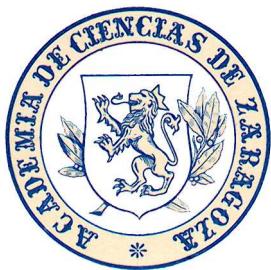


REVISTA
DE LA
REAL ACADEMIA
DE CIENCIAS
Exactas
Físicas
Químicas y
Naturales
DE
ZARAGOZA



Serie 2.^a
Volumen 63

2008

ÍNDICE DE MATERIAS

Interpolation and reconstruction of curves and surfaces JESÚS M. CARNICER	7
Dos décadas de búsqueda de materia oscura en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc MARÍA LUISA SARSA	41
Las raíces de las ideas biológicas de Félix de Azara JUAN PABLO MARTÍNEZ RICA	101
In memoriam de un maestro ejemplar: Henri Cartan JOSÉ LUIS VIVIENTE MATEU	165
Un Presidente crucial para la Real Academia de Ciencias de Zaragoza: Horacio Marco Moll (1917–2008) J. BADAL, M. PELEATO, M. GASCA Y L.J. BOYA	173
ACTIVIDADES DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS, QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA EN EL AÑO 2006	185
Instrucciones a los autores	189
Intercambio de Publicaciones	191

Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza. **63:** 7–40, (2008).

Interpolation and reconstruction of curves and surfaces

Jesús M. Carnicer

Department of Applied Mathematics/IUMA

University of Zaragoza. 50009 Zaragoza. Spain

Premio a la Investigación de la Academia 2008. Sección de Exactas

1 Polynomial interpolation in one variable

Interpolation is an ubiquitous technique arising in Mathematics, specially in Numerical Analysis. The name interpolation itself means *to place something between selected sites*, in contrast to extrapolation which means *place something outside*. Interpolation is generally more accurate than extrapolation leading to better stability in computations and lower error bounds. Since most methods can be used for both interpolation and extrapolation, the word interpolation is preferred.

Simple interpolation methods can be dated back to babylonians and the greeks. The Mathematical Syntaxis of Ptolemy shows how to construct a table of chords as a function of its corresponding arcs, the first table of a trigonometric function $2 \sin(x/2)$. John Napier and Joost Bürgi introduced in the 17th century tables of logarithms which were improved by Henry Briggs, who introduced new tables of functions. The tables of functions contained a lot of decimal places and computing them was a very laborious task. The idea of approximating a curve by its chord or a parabola leads to a first instance of linear or quadratic interpolation. Interpolation formulae were implicit or explicitly used for constructing and filling up the tables. Briggs propose to substitute the true logarithmic function by a quadratic function in some parts of the table (see Chapter 1 of [22]) which can be regarded as an interpolation by a quadratic polynomial. The result obtained leads to very accurate results.

The final user of a table might need to access to a value not contained in the table without having to recompute a whole part of the table. If extremely accurate results are not required, tables can be filled up using linear interpolation. For better results, quadratic and cubic interpolation methods are preferred. This offers the possibility of

using short tables, which are more handy if not many significant digits are required. Only a subtraction, a multiplication and an addition are enough to obtain the value of a linear interpolant.

Assume that a table of a function f is known at two points x_0, x_1 . The chord joining $(x_0, f(x_0))$ and $(x_1, f(x_1))$ is a segment whose equation is $y = p(x)$, $x \in [x_0, x_1]$, where

$$p(x) := f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0).$$

Substituting the true value of the function $f(x)$ by the value of the first degree polynomial $p(x)$ might lead to big errors but if the function is smooth and the points x_0, x_1 are close enough, the error might be very small. In fact, the difference $f(x) - p(x)$ can be bounded in terms of the second derivative of f by the formula

$$|f(x) - p(x)| \leq \frac{M}{8}h^2, \quad M := \max_{x \in [x_0, x_1]} |f''(x)|, \quad h := x_1 - x_0. \quad (1.1)$$

Therefore, if the second derivative is bounded, the interpolation error tends to zero when $h \rightarrow 0$. Figure 1 shows how close is the linear interpolant p to the logarithm function at $x_0 = 1, x_1 = 2$. Figure 4 shows the linear interpolant of the log function on the intervals $[1, 3], [3, 5]$ and $[5, 7]$. We observe that the second derivative of the log function $-x^{-2}$ is much lower on the interval $[5, 7]$ than on the interval $[1, 3]$ and so the interpolation error is lower on $[5, 7]$ than on $[1, 3]$.

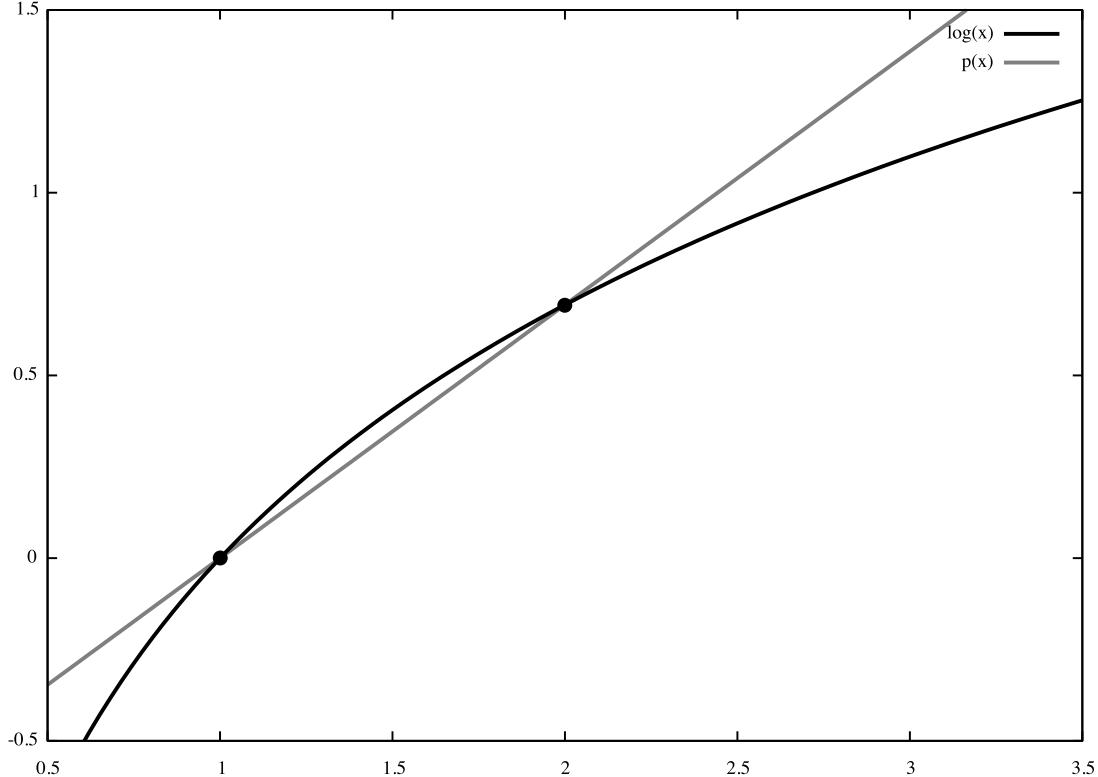


Figure 1. The natural logarithm and its linear interpolant at $x_0 = 1, x_1 = 2$.

While the error for linear interpolation is quadratic on h , the convergence order can be improved by using polynomials of higher degree.

Let us pose the Lagrange interpolation problem for polynomials of degree less than or equal to n . Given a function f , the Lagrange interpolation problem at $x_0 < \dots < x_n$ consists of finding a polynomial p of degree not greater than n such that $p(x_i) = f(x_i)$, $i = 0, \dots, n$. The solution of the problem is provided by the Lagrange formula

$$p(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i)l_i(x), \quad l_i(x) = \prod_{j \neq i} \frac{x - x_j}{x_i - x_j}.$$

Another possibility is to express the interpolant as a sum of polynomials of increasing degree by Newton's formula

$$p(x) = \sum_{k=0}^n f[x_0, \dots, x_{k-1}] \pi_k(x), \quad \pi_k(x) = \prod_{i=0}^{k-1} (x - x_i),$$

where $f[x_i, \dots, x_{i+k}]$ are the k -th order divided differences, which can be computed by the recurrence formula

$$f[x_i, \dots, x_{i+k}] = \frac{f[x_{i+1}, \dots, x_{i+k}] - f[x_i, \dots, x_{i+k-1}]}{x_{i+k} - x_i},$$

starting from the initial values $f[x_i] := f(x_i)$, $i = 0, \dots, n$. A third formula for the interpolant is the Aitken-Neville formula

$$p(x | x_i, \dots, x_j) = \frac{x - x_i}{x_j - x_i} p(x | x_{i+1}, \dots, x_j) + \frac{x_j - x}{x_j - x_i} p(x | x_i, \dots, x_{j-1}),$$

where $p(x | x_0, \dots, x_n)$ denotes the value at x of the interpolating polynomial of f at x_0, \dots, x_n . The Aitken-Neville formula suggests an algorithm for computing the interpolant based on the idea of repeated linear interpolation.

A formula for the error of the interpolant is of the form

$$f(x) - p(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{i=0}^n (x - x_i), \quad (2.1)$$

where n is the degree, ξ is any point of a compact interval I containing all the interpolation sites x_0, \dots, x_n . A typical error bound for the interpolant can be expressed in the form

$$|f(x) - p(x)| \leq K \sup_{x \in I} |f^{(n+1)}(x)| h^{n+1},$$

where h is the length of a compact interval I containing all the interpolation sites and K is a constant which does not depend on f but might depend on the distribution of the interpolation sites in I . Let us observe, that even with very low degrees, powerful approximation methods can be devised using polynomial interpolation.

As an example, let us discuss how polynomial interpolation can be used to compute the functions $\sin x$ and $\cos x$ using only few arithmetic operations similarly as it is done

in scientific calculators, function libraries of programming languages or simple computer applications. The functions $\sin x$, and $\cos x$ are periodical of period 2π . Furthermore

$$\sin(x + \pi) = -\sin x, \quad \cos(x + \pi) = -\cos x$$

Therefore, if \hat{x} is the value in $(-\pi/2, \pi/2]$ such that

$$n := \frac{x - \hat{x}}{\pi} \in \mathbf{Z},$$

then we can reduce the problem of computing the values of both trigonometric functions to the interval $(-\pi/2, \pi/2]$

$$\sin(x) = (-1)^n \sin(\hat{x}), \quad \cos(x) = (-1)^n \cos(\hat{x}).$$

The relations

$$\sin(-x) = -\sin(x), \quad \cos(-x) = \cos(x), \quad \sin(\pi/2 - x) = \cos(x), \quad \cos(\pi/2 - x) = \sin(x),$$

allow us to reduce the problem to the interval $[0, \pi/4]$ for both functions. Taking into account that the cosine can be expressed in terms of the sine of the half angle

$$\cos x = 1 - 2 \sin^2(x/2),$$

the problem is reduced to compute the value $\sin x$ for $x \in [0, \pi/4]$. There are many approaches for computing the value. One might use the MacLaurin expansion

$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} - e_9(x), \quad x \in [0, 1],$$

where $0 < e_9(x) < 1.8 \times 10^{-9}$. Computing the sine function using the above expansion has computational cost of 13 operations: 4 subtractions, 5 products and 4 divisions. Another approach is the use of tables. The function has been previously computed with high accuracy (for instance, taking enough terms in the MacLaurin expansion) at selected points obtaining a table of the function, which is kept in memory. These tables can be combined with the addition formulae to reduce the interval to be considered, allowing to reduce the number of terms in the MacLaurin expansion. Another possibility is to substitute $\sin(x)$ by a polynomial approximation. The Approximation Theory shows that polynomials obtained by interpolation exhibit remarkable approximation properties.

A good approximation of $\sin(x)$ on $[0, \pi/4]$ can be obtained using the symmetry properties of this function. Let us introduce the cardinal sine function

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x},$$

and consider the polynomial interpolant $p(x)$ of degree $2n+3$ at the symmetrically placed sites

$$-x_n < -x_{n-1} < \cdots < -x_0 < 0 < x_0 < \cdots < x_{n-1} < x_n$$

of $\text{sinc}(x)$. Due to the fact that $\text{sinc}(x)$ is an even function, it immediately follows that $p(x)$ is also an even function with $p(0) = 1$. Therefore the interpolant $p(x)$ can be written in the form

$$p(x) = 1 - x^2 q(x^2),$$

where $q(t)$ is the polynomial of degree n which interpolates the function

$$f(t) = \frac{1 - \text{sinc}(\sqrt{t})}{t}$$

at the sites $t_i = x_i^2$, $i = 0, \dots, n$. The error formulae of polynomial interpolation allow us to deduce that

$$|\sin(x) - x(1 - x^2 q(x^2))| \leq \frac{1}{(2n+4)!} \sin(x) x^3 |x^2 - x_0^2| \cdots |x^2 - x_n^2|, \quad x \in [0, \pi/4].$$

and taking

$$n = 2, \quad x_0 = 1/2, \quad x_1 = 5/8, \quad x_2 = 3/4,$$

we have the following bound for the relative error

$$e_r(x) = \frac{|\sin(x) - x(1 - x^2 q(x^2))|}{\sin(x)} \leq \frac{1}{40320} x^3 \left| x^2 - \frac{1}{4} \right| \left| x^2 - \frac{25}{64} \right| \left| x^2 - \frac{9}{16} \right|, \quad x \in [0, \pi/4].$$

We may bound $e_r(x)$ by the maximum value of the right hand side attained at $x = \pi/4$ to find that

$$e_r(x) \leq 5.42 \times 10^{-8} \tag{2.2}$$

which is lower than the maximal accuracy that can be ensured in simple precision arithmetic $\epsilon = 2^{-24} \approx 5.96 \times 10^{-8}$.

Now it remains to compute the polynomial q . First, we need to have the values of $\sin(1/2)$, $\sin(5/8)$ and $\sin(3/4)$, which can be obtained taking enough terms in the MacLaurin expansion. Then we compute the quadratic interpolation polynomial to $f(t)$ at $1/16, 1/4, 9/16$

$$q(t) \approx 0.16666652 - 0.0083930591 t + 0.00019512189 t^2.$$

and obtain an approximation of the sine function on $[0, \pi/4]$ using the formula

$$\sin(x) \approx x(1 - x^2 q(x^2)).$$

The evaluation of the sine then is reduced to 3 products and 1 sum and the computational cost of an evaluation of q , which needs 2 sums and 2 products. So the amount of computations to be done to compute the sine function on $[0, \pi/4]$ is 8 operations: 5 products and 3 sums. Taking into account that trigonometric functions might be evaluated many times in a computer program, the saving in computational cost implies a

substantial reduction in the computation time of many tasks in scientific computing. The maximal error occurs in $x = \pi/4$. Computations in double precision arithmetic lead to the value 0.7071067752634779 whose relative error with respect to the correct value $\sqrt{2}/2 \approx 0.7071067811865476$ is less than 10^{-8} , lower than the predicted error bound (2.2) and below the unit roundoff in single precision arithmetic.

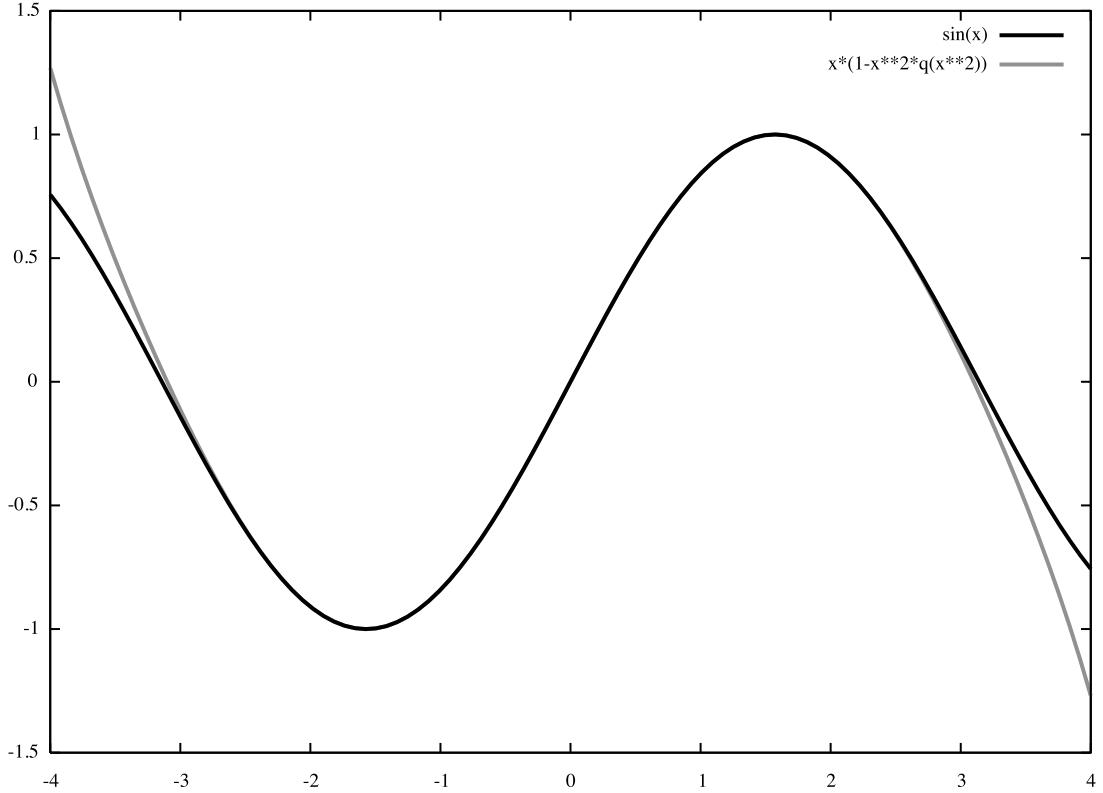


Figure 2. The sine function and the 7th degree polynomial approximant

Figure 2 shows that the approximant is very close to the sine function even in wider intervals than $[-\pi/4, \pi/4]$. The figure shows that the absolute error keeps very low even in the interval $[-\pi, \pi]$ which is 4 times wider. The absolute error in the approximation of $\sin \pi = 0$ is 4.7×10^{-2} .

2 High amplitude oscilations of polynomial interpolants

Polynomial interpolants may not look as expected. They might oscillate much more than the function to be interpolated. It often happens that, when increasing the degree, the error increases. In fact, the sequence of interpolants might not converge to the function. A first question which arises is to derive conditions which imply the convergence of the interpolant. Since the power series centered at c can be seen as a special case when all the interpolation sites tend to coincide with c , we deduce that the analyticity of f at some points might play an important role in the discussion of the convergence. Formula (2.1) allows us to deduce the following error bound for the interpolant p_n at sites

$x_{0,n}, \dots, x_{n,n}$ in a compact interval $[a, b]$ of length $h = b - a$

$$|f(x) - p_n(x)| \leq \frac{M_{n+1}}{(n+1)!} h^n, \quad M_{n+1} := \max_{x \in I} |f^{(n+1)}(x)|.$$

We observe that if

$$\frac{M_{n+1} h^n}{(n+1)!} \rightarrow 0,$$

then p_n converges to f uniformly on the interval I . This condition is satisfied if f is analytical in $[a-h/2, b+h/2]$ and the power series centered at $c = (a+b)/2$ has convergence radius $R > 3h/2$. In general convergence of the interpolant might depend on the function f and the distribution of the sites in the interval $[a, b]$. In [26], Carl Runge studied the convergence in the case of equidistant sites $x_i = a + ih/n$, $i = 0, \dots, n$. He showed that even in the simple case of interpolation of a C^∞ differentiable function with equidistant sites, the interpolant might not converge. For his example, he chose the function $f(x) = (1+x^2)^{-1}$ on the interval $[-5, 5]$. Observe that the function can be expanded in a power series centered at the origin

$$\frac{1}{1+x^2} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k x^{2k}, \quad |x| < 1$$

with convergence radius $R = 1 < 15 = 3h/2$. An analysis of the error formula (2.1) for even degree $n = 2k$ leads to

$$\left| \frac{1}{1+x^2} - p_{2k}(x) \right| = \frac{1}{1+x^2} \prod_{j=0}^k \frac{|x^2 - (5j/k)^2|}{1 + (5j/k)^2}.$$

Taking into account that

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{5}{k} \log \left(\prod_{j=0}^k \frac{|x^2 - (5j/k)^2|}{1 + (5j/k)^2} \right) = q(x) := \int_0^5 \log \left(\frac{|x^2 - t^2|}{1 + t^2} \right) dt$$

the convergence depends on the sign of $q(x)$. Let $\xi \approx 3.63$ be the zero of q on $[0, 5]$. It can be shown that, if $|x| < \xi$, then the sequence of interpolating polynomials converges, while if $|x| > \xi$ the sequence diverges. Figure 3, shows then interpolants corresponding to degrees 2, 8 and 14.

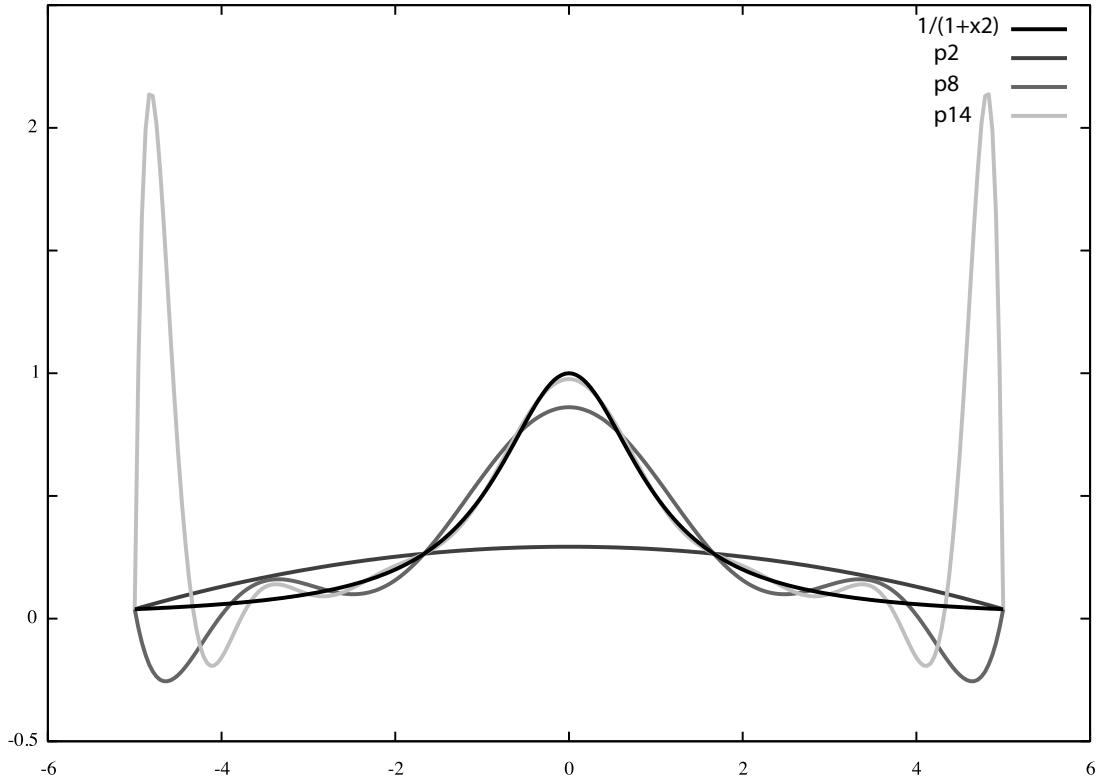


Figure 3. Runge's example

The previous example shows that interpolation by polynomials of high degree leads to interpolants of high amplitude oscillations. The same can be said for the basic Lagrange polynomials

$$l_i(x) = \prod_{j \neq i} \frac{x - x_j}{x_i - x_j}, \quad i = 0, \dots, n$$

whose maximal absolute value increases when the number of points increases. This fact has an important consequence: the bad stability and poor condition of polynomial interpolation with high degree polynomials. Assuming that the given data y_i are not exact but very close to the function values

$$|y_i - f(x_i)| \leq \epsilon$$

then we find that the perturbed interpolant $\tilde{p}(x) := \sum_{i=0}^n y_i l_i(x)$ may differ considerably from the true interpolant $p(x) := \sum_{i=0}^n f(x_i) l_i(x)$

$$|\tilde{p}(x) - p(x)| \leq \epsilon \Lambda(x),$$

where

$$\Lambda(x) := \sum_{i=0}^n |l_i(x)|$$

is the Lebesgue function corresponding to the sequence of nodes x_0, \dots, x_n . The norm (and condition) of the interpolation operator is given by $\max_{x \in [a, b]} \Lambda(x)$ and depends on

the degree and the distribution of the nodes on the interval. In general we can say that the norm of the operator tends to infinity and satisfies

$$\max_{x \in [a,b]} \Lambda(x) > \frac{2}{\pi} \log(n) + 0.5212.$$

In the case of Chebyshev nodes

$$x_j = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{2j-1}{2n}\pi\right), \quad j = 0, \dots, n,$$

we find an almost optimal behaviour and the norm of the interpolation operator satisfies

$$\max_{x \in [a,b]} \Lambda(x) < \frac{2}{\pi} \log(n) + 1.$$

For equidistant nodes, the norm of the interpolation operator exhibits an exponential growth

$$\max_{x \in [a,b]} \Lambda(x) \sim \frac{2^n}{en \log(n)}.$$

Therefore equidistant nodes are not recommended for interpolation problems of high degree. For more information see Chapter 3 of [18].

3 Spline interpolation

Piecewise interpolation has a long history. The linear interpolation for function tables mentioned above defines a continuous piecewise linear interpolant, due to the fact that different linear polynomials are used to represent the interpolant depending on the relative position of the point with respect to the data. Geometrically, this means that the graph of the function is approximated by the polygon joining the points $(x_i, f(x_i))$, $i = 0, \dots, n$. If we increase the number of interpolation sites on an interval in such a way that the mesh size $h := \max_{i=0, \dots, n-1} |x_{i+1} - x_i|$ tends to 0, the convergence of the piecewise linear interpolant to f is ensured by (1.1).

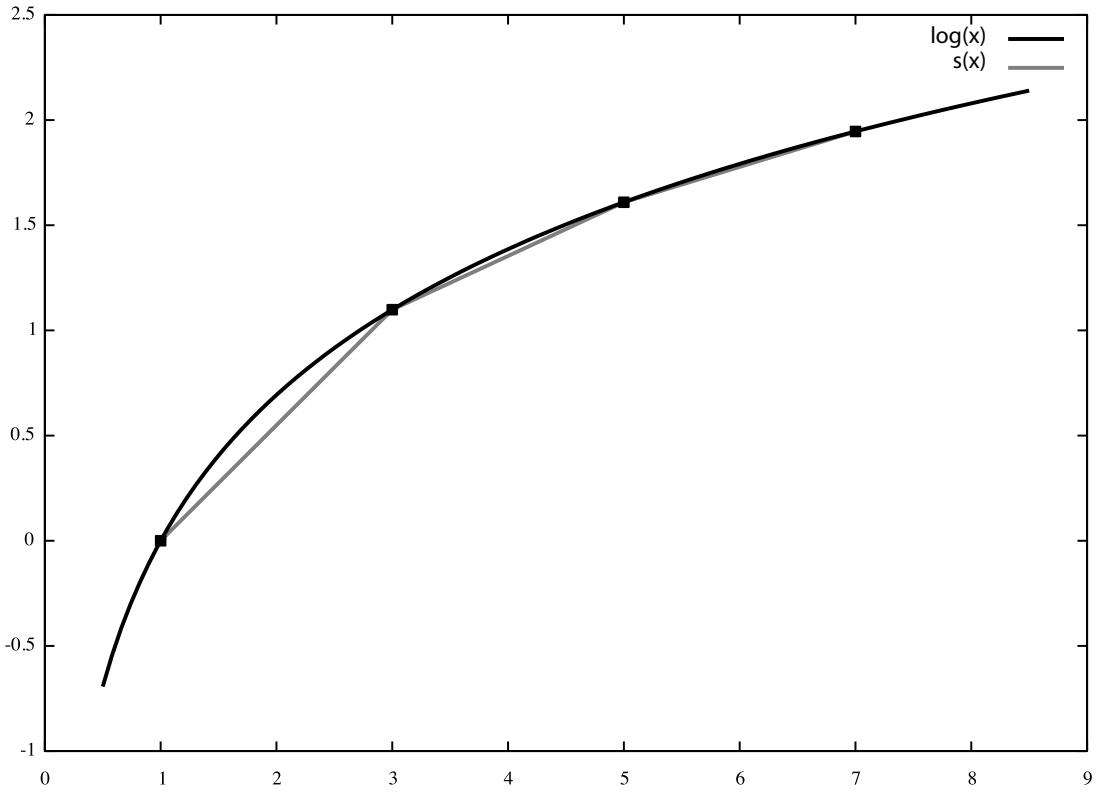


Figure 4. Piecewise linear interpolation

The inflexibility of polynomials can be avoided using piecewise polynomial functions also called spline functions. Piecewise polynomial functions arise in a natural way in elasticity theory of beams and flexible bars. The Bernoulli-Euler law relates the deflection of a beam and the bending moment. Assume that we are given a long and thin beam and that the cross-section is constant along its axis and composed of an isotropic material. The neutral axis is the locus of the barycenters of each cross-section. Assume that forces (loads) are applied orthogonally to the neutral axis and act in a unique plane causing the beam to bend. Then the curvature of the neutral axis is proportional to the bending moment,

$$M = \kappa/R,$$

where M represents the bending moment at a given point of the beam, κ the curvature of the neutral axis and R is a constant called flexural rigidity.

In order to formulate mathematically these ideas, we first choose coordinates to represent the neutral axis on the plane x, y , where $(0, 1, 0)$ is the direction of the forces bending the beam and $(0, 0, 1)$ is the direction on the load plane orthogonal to the beam. Let us assume that the deflections are sufficiently small, so that we may represent the position of the neutral axis in \mathbb{R}^3 by $(x, y(x), 0)$, where $y(x)$ is a function of x such that $|y'(x)| \ll 1$ and the force density (load) at $(x, y(x), 0)$ is given by $(0, f(x), 0)$, $x \in [0, L]$.

The curvature at the point $(x, y(x), 0)$ is given by

$$\kappa(x) = \frac{y''(x)}{(1 + (y'(x))^2)^{3/2}} \approx y''(x)$$

The flexural rigidity $R = EI$ depends on the material and on the geometry of the cross section D , E represents the Young's elasticity modulus and I is the area inertia moment

$$I = \int_D z^2 dy dz.$$

Then we can express the Euler-Bernoulli formula by the following approximate equation

$$y''(x) = \frac{1}{R} M(x).$$

The bending moment at the point $(x, y(x), 0)$ is given by

$$M(x) = M_0 + R_0 x + \int_0^x f(t)(x-t) dt = M_0 + R_0 x + \int_0^L f(t)(x-t)_+ dt,$$

where $R_0 = M'(0)$ is the force exerted at the left end $(0, y(0), 0)$ and $M_0 = M(0)$ is the moment applied to the left end of the beam. The force R_0 is usually due to the reaction of the pivot where it is supported or of the wall where it is clamped. The moment M_0 is usually due to the clamping moment and elastic supports. We use the symbol $(x-t)_+$ to indicate the positive part of $x-t$. For more general purposes the truncated power function can be used

$$(x-t)_+^k = \begin{cases} (x-t)^k, & \text{if } t \leq x, \\ 0, & \text{if } t > x. \end{cases}$$

Differentiating with respect to x we deduce that

$$M''(x) = f(x).$$

So, for a given distribution of the force density f , the deflection y of a beam can be approximately found by solving the differential equation

$$y^{(4)}(x) = \frac{1}{R} f(x).$$

An interesting case not covered by the above reasoning is the case in which the forces acting on the beam are concentrated at points $\tau_0, \dots, \tau_n \in (0, L)$. Assume that a force $(0, F_i, 0)$ is applied at $(\tau_i, y(\tau_i), 0)$, $i = 0, \dots, n$, and no forces act on the other points. Additional terms must be included to take into account the reaction forces $R_0 = M'(0)$, $R_L = M'(L)$ and bending moments $M_0 = M(0)$, $M_L = M(L)$ acting at the ends $\tau_{-1} = 0$ and $\tau_{n+1} = L$, respectively, to meet static equilibrium conditions

$$M'(0) + \sum_{i=0}^n F_i + M'(L) = 0, \quad M(0) + \sum_{i=1}^n \tau_i F_i + LM'(L) + M(L) = 0$$

and to fit boundary conditions. Then we may represent the bending moment by the formula

$$M(x) = M_0 + R_0x + \sum_{i=1}^n F_i(x - \tau_i)_+,$$

and, by the Bernoulli-Euler law, the deflection of the beam satisfies the differential equation

$$Ry''(x) = M_0 + R_0x + \sum_{i=0}^n F_i(x - \tau_i)_+.$$

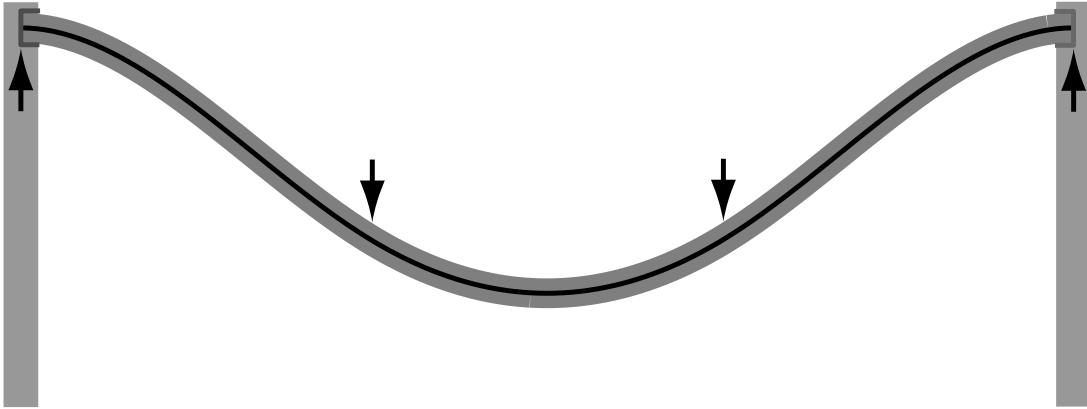


Figure 5. A beam clamped between two walls with two concentrated loads

We deduce that y must be a C^2 piecewise cubic function, because the second derivative is a continuous piecewise linear function. Figure 5 shows the deflection of a beam clamped to the ends with two symmetrically placed loads in the places indicated by the arrows. Two supporting forces at the end are necessary to fit the boundary conditions.

In each subinterval $[\tau_i, \tau_{i+1}]$, $i = -1, \dots, n$, the deflection y is represented by a cubic polynomial. The points τ_i , $i = 0, \dots, n$, are called the knots of the cubic spline function.

Beams, wooden rods and bars have been used for the design of ships based on the fact that boundary conditions at the ends and concentrated loads on the interior knots τ_i , $i = 0, \dots, n$, can be selected so that the deflection attained at the knots can have prescribed values y_i . This experimental fact can be confirmed analyzing the interpolation problem at the knots

$$y(\tau_i) = y_i, \quad i = 0, \dots, n,$$

with boundary conditions

$$y(a) = y_{-1}, \quad y'(a) = m_{-1}, \quad y(b) = y_{n+1}, \quad y'(b) = m_{n+1}.$$

by cubic spline functions in $S_3(\tau_0, \dots, \tau_n)[a, b]$, the space of all C^2 piecewise cubic functions at knots $a < \tau_0 < \dots < \tau_n < b$ on the interval $[a, b]$. A simple discussion of a related linear system of equations shows that this interpolation problem has always a unique solution.

General spline function spaces of arbitrary degree can be constructed. If $\tau_0 < \dots < \tau_n$, then we denote by $S_k(\tau_0, \dots, \tau_n)[a, b]$ the space of C^{k-1} functions which coincide with polynomials of degree k on each subinterval $[\tau_i, \tau_{i+1}]$, $i = -1, \dots, n$ where $\tau_{-1} := a$ and $\tau_{n+1} := b$. When knots tend to coincide smoothness properties of the spline functions are lost. If $m(\tau_i)$ is the number of times that the knot τ_i appears in the sequence τ_0, \dots, τ_n , then we only require that the spline function is of class $C^{k+1-m(\tau_i)}$ in a neighbourhood of τ_i

$$S_k(\tau_0, \dots, \tau_n)[a, b] : = \begin{aligned} &\{s : s|_{(\tau_i, \tau_{i+1})} \in P_k, i = -1, \dots, n, \\ &s \in C^{k+1-m(\tau_i)} \text{ on a neighbourhood of } \tau_i\}. \end{aligned}$$

It follows from the definition that $S_k(\tau_0, \dots, \tau_n)[a, b]$ is a vector space of dimension $n+k+2$. The Schoenberg-Whitney theorem [28] shows that a necessary and sufficient condition on the interpolation sites for the Lagrange interpolation problem

$$s(x_i) = y_i, \quad i = 0, \dots, n+k+1,$$

in $S_k(\tau_0, \dots, \tau_n)[a, b]$ to have always a unique solution is that

$$x_0 \in [a, \tau_0), \quad x_i \in (\tau_{i-k-1}, \tau_i), \quad i = 1, \dots, n+k, \quad x_{n+k+1} \in (\tau_n, b].$$

We use the convention that $\tau_{-k-1} = \dots = \tau_{-1} = a$ and $\tau_{n+1} = \dots = \tau_{n+k+1} = b$.

As a consequence of the Schoenberg-Whitney theorem, we can say that there are many possibilities for choosing the degree and the knot positions for spline interpolation problems. This freedom gives rise to different interpolation problems with the same data whose solutions are interpolants with different smoothness properties.

4 Shape-preserving interpolation

Spline interpolants are often used for curve design. They also arise in the numerical analysis of differential equations. They are a fundamental tool in experimental data fitting because smoothness and order approximation can be adjusted in spline interpolation.

Although spline interpolants do not present oscillations of much higher amplitude than the data, they may present oscillations not suggested by the data. A typical example is when a rapid transition between two states needs to be simulated. This often arises in examples from biology, chemistry and physics. An increasing function changes its rate of increase. First the function increases slowly, then in the transition zone it increases quickly and after this transition has been crossed the function turns again to present a slow increasing behaviour.

The use of a non-monotonic interpolating function might be problematic. For instance assume that we are evaluating the relative concentration of a substance arising in an

non-reversible chemical reaction. Monotonicity is a fundamental feature of the process. Furthermore relative concentrations below 0 and greater than 1 do not make sense.

$$\begin{array}{ccccccc} x : & 0.00 & 0.50 & 0.90 & 1.10 & 1.50 & 2.00 \\ y : & 0.00 & 0.05 & 0.15 & 0.85 & 0.95 & 1.00 \end{array}$$

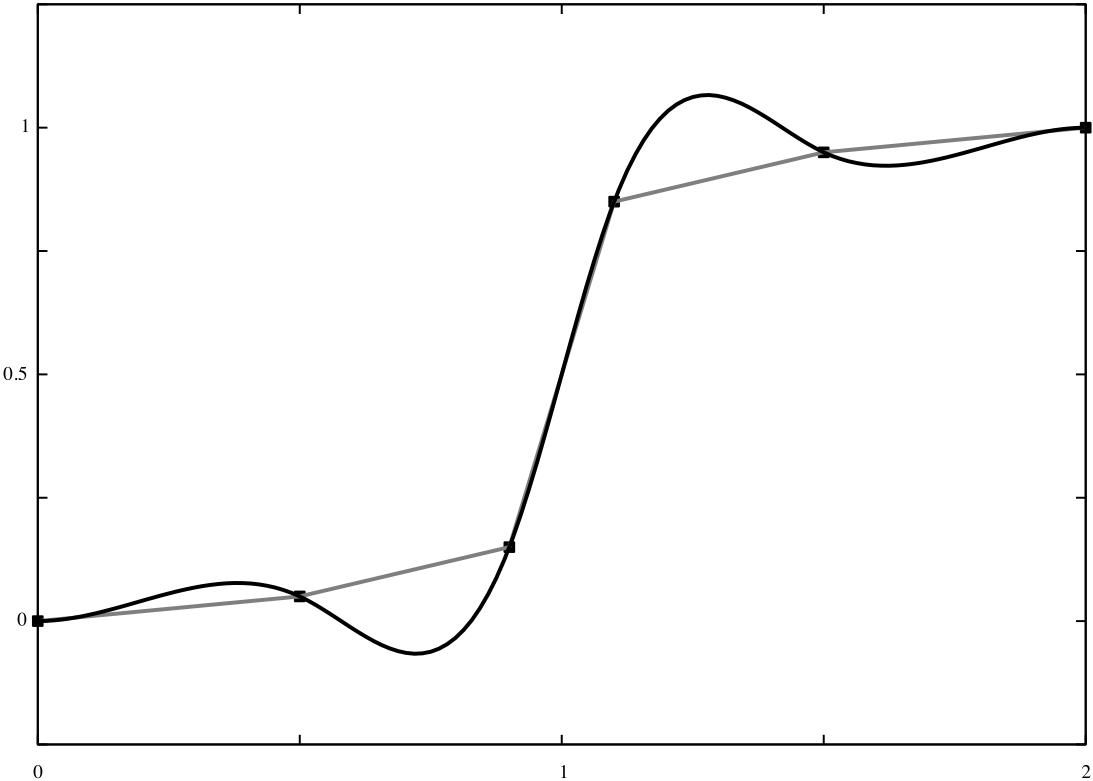


Figure 6. A rapid transition between two states

Figure 6 depicts the data, the piecewise linear interpolant and a cubic spline interpolant. The cubic spline interpolant oscillates taking values beyond the minimum and maximum of the data while the piecewise linear interpolant preserves monotonicity. In this case, the piecewise linear interpolant reflects important features of the solution although it is not smooth and presents lower degree of approximation.

Another shape property which might be preserved is convexity. Again the piecewise linear interpolant is convexity preserving but it is not smooth. Monotonicity and convexity provide a control on the oscillation properties of the interpolant. The search of smooth shape-preserving interpolants is a difficult task. The problem is non-linear in its nature. One reason is that the set of increasing or convex functions is not a vector space. Another problem arises when trying to establish a linear correspondence between convex data and convex functions. Assume that we want to find a convex interpolant to the data

$$p(0) = 0, \quad p'(0) = -1, \quad p(1) = 0, \quad p'(1) = m,$$

with $m > 0$. Since the data are convex then we deduce

$$-\min(x, m(1-x)) \leq p(x) \leq 0.$$

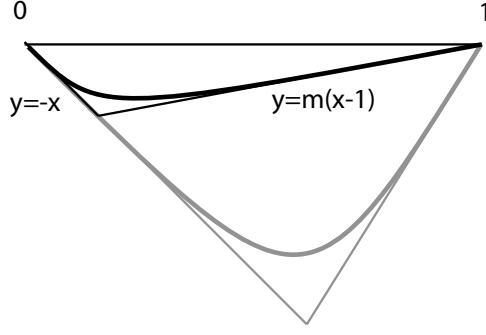


Figure 7. When $m \rightarrow 0^+$, the convexity preserving interpolant must converge to the zero function

Taking into account that $\lim_{m \rightarrow 0^+} \min(x, m(1-x)) = 0$, we deduce that the solution of the problem converges to the zero function when $m \rightarrow 0^+$. But the zero function does not satisfy the condition $p'(0) = -1$. This indicates that, if we define a convexity preserving interpolant to data, continuous dependence on the parameters will be lost and then the method will be nonlinear.

Tension methods are a simple and versatile way of solving shape-preserving interpolation problems. The name tension refers to a free parameter and goes back to a paper by Schweikert [29], considering the shape of a beam or flexible bar under tension as a way of solving shape-preserving interpolation problems.

If the deflections are sufficiently small and all tension forces and bending moments lie on the same plane, we can represent the position of the neutral axis in \mathbb{R}^3 by $(x, y(x), 0)$, where $y(x)$ is a function of x such that $|y'(x)| \ll 1$. The force density at $(x, y(x), 0)$ is given by $(0, f(x), 0)$, $x \in [0, L]$.

The tension acting at the ends of a flexible bar is transmitted to all the points in the bar and is exerted in a direction tangent to the bar. Therefore the tensile stress $\mathbf{T}(x)$ has constant modulus T_0 and can be described by

$$\mathbf{T}(x) = T_0 \left(\frac{1}{(1 + y'(x))^2}, \frac{y'(x)}{(1 + y'(x))^2}, 0 \right) \approx (T_0, T_0 y'(x), 0).$$

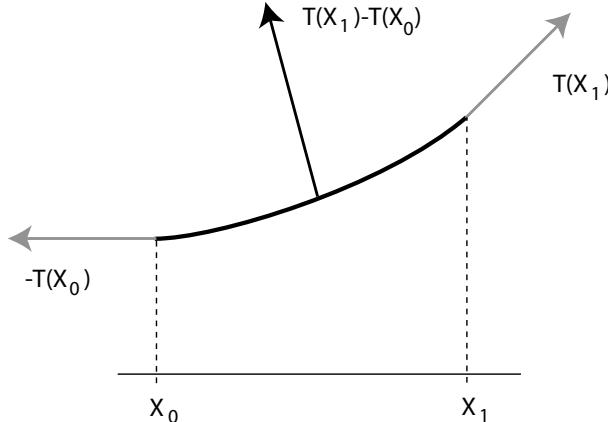


Figure 8. A beam in tension

We observe that if the bar has been curved by the effect of the loads the resultant of all tensile stresses acting on the piece of the bar between $(x_0, y(x_0), 0)$ and $(x_1, y(x_1), 0)$ is given by $\mathbf{T}(x_1) - \mathbf{T}(x_0)$. When $x_1 \rightarrow x_0$, a force density arises due to tension

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{x_1 - x_0} (\mathbf{T}(x_1) - \mathbf{T}(x_0)) = \mathbf{T}'(x_0) \approx (0, T_0 y''(x_0), 0).$$

Now we can introduce the effect of tension in the computation of the bending moment

$$M(x) \approx M_0 + R_0 x + \int_0^x (f(t) + T_0 y''(t))(x-t) dt$$

and applying the Bernoulli-Euler law, $M(x) \approx Ry''(x)$, we deduce that

$$Ry^{(4)}(x) \approx M''(x) = f(x) + T_0 y''(x).$$

In the case of concentrated loads $(0, F_i, 0)$ applied at $(\tau_i, y(\tau_i), 0)$, $i = 0, \dots, n$, the deflection of the beam can be described by the solution of the differential equation

$$y''(x) - \frac{T_0}{R}(y(x) - y(0) - xy'(0)) = \frac{1}{R} \left(M_0 + R_0 x + \sum_{i=0}^n F_i (x - \tau_i)_+ \right).$$

Therefore y is a C^2 function satisfying in each subinterval (τ_i, τ_{i+1}) , $i = -1, \dots, n$ the fourth order differential equation

$$y^{(4)}(x) - \alpha^2 y''(x) = 0,$$

where $\alpha = \sqrt{T_0/R}$. It immediately follows that the restriction of $y(x)$ to each subinterval (τ_i, τ_{i+1}) must be of the form

$$y(x) = c_0 + c_1 x + c_2 \cosh(\alpha x) + c_3 \sinh(\alpha x).$$

The space of hyperbolic functions

$$H_\alpha = \langle 1, x, \cosh(\alpha x), \sinh(\alpha x) \rangle = \langle 1, x, e^{\alpha x}, e^{-\alpha x} \rangle,$$

depending on the tension parameter α , can be used to introduce hyperbolic spline function spaces.

$$H_\alpha(\tau_0, \dots, \tau_n)[a, b] := \{s \in C^2[a, b] : s|_{(\tau_i, \tau_{i+1})} \in H_\alpha, i = -1, \dots, n\}$$

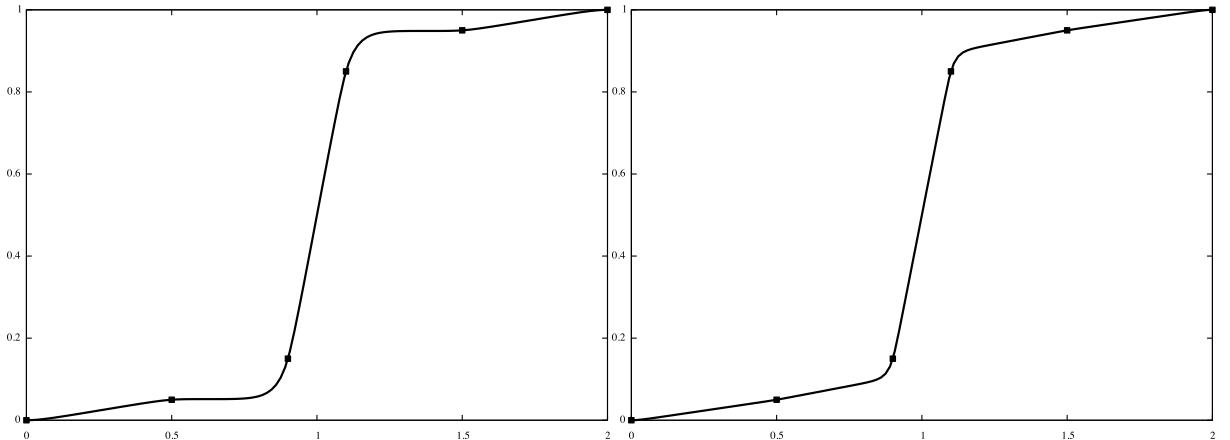


Figure 9. A rapid transition between two states simulated with hyperbolic splines
the tension parameters are $\alpha = 10$ (left) and $\alpha = 20$ (right)

When the tension parameter α increases, the solution of the problem converges to the piecewise linear interpolant which is shape preserving. On the other hand if the tension parameter tends to 0, the solution converges to the usual cubic spline. For more flexibility, different tension parameters can be used in each subinterval. If we choose large tension parameters, the shape requirements will be satisfied but smoothness properties become worse. The choice of the tension parameters might be a difficult task and other methods for obtaining shape preserving interpolants have been considered. Most of them can be regarded as tension methods, where the tension parameters are automatically selected.

The minimal amount of work necessary to take a beam from the equilibrium position to a stressed state due to tension forces and bending moments caused by transversal loads can be summarized by the energy integral

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2T_0} \int_0^L \|\mathbf{T}\|^2 ds + \frac{1}{2} \int_0^L M\kappa ds,$$

where s denotes the arc-length parameter of the neutral axis. In the case of small deflections this energy can be described by a functional

$$\mathcal{E} = RJ_\alpha[y], \quad J_\alpha[y] := \frac{1}{2} \int_0^L y''(x)^2 dx + \frac{T_0}{2R} \int_0^L y'(x)^2 dx = \frac{1}{2} \int_0^L (y''(x)^2 + \alpha^2 y'(x)^2) dx.$$

The hyperbolic spline in tension can be regarded as a solution of the following minimization problem: *find s minimizing the energy functional J_α subject to interpolation and boundary conditions*. Observe that the interpolation by cubic spline functions corresponds to $\alpha = 0$, and cubic spline interpolants minimize the integral $J_0[y] = \int_a^b y''(x)^2 dx$.

Several methods for the construction of shape-preserving interpolants use the solution of a minimization functional subject to the shape constraints. Let us describe the approach given in [1, 2, 3, 4, 5]. We want to obtain a solution of the interpolation problem

$$u(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n,$$

among all strictly convex functions with bounded second derivative

$$K = \{u \in C^1[a, b] \mid u'' \in L^\infty[a, b], \text{ess inf } u > 0\}.$$

Assuming that the data are strictly convex

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} < \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}}, \quad i = 0, \dots, n-2,$$

it can be shown that the set of all interpolants in K is an infinite convex set

$$L = \{u \in K \mid u(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n\}.$$

Then we can choose the unique interpolant minimizing a penalty functional

$$J[u] = \int_a^b F_p(u''),$$

where $p \in [0, 1]$ and

$$F_p(t) := \begin{cases} t \log t, & \text{if } p = 1, \\ -t^p/p, & \text{if } 0 < p < 1, \\ -\log t, & \text{if } p = 0. \end{cases}$$

In [1, 2], it was shown that there exists a unique interpolant u characterized by the fact that in each subinterval $[x_i, x_{i+1}]$ satisfies the fourth order nonlinear differential equation

$$u^{(4)}(x) - (2-p) \frac{(u^{(3)}(x))^2}{u''(x)} = 0.$$

If we solve the above equation we find that in each subinterval the function u is of the form

$$u(x) = c_0 + c_1 x + a(x+b)^{(1-2p)/(1-p)}, \quad 0 < p < 1/2, \text{ or } 1/2 < p < 1.$$

There are three special cases for $p = 0, 1/2, 1$

$$\begin{aligned} u(x) &= c_0 + c_1 x + a \exp(bx), & (p = 1) \\ u(x) &= c_0 + c_1 x + a \log(bx), & (p = 1/2) \\ u(x) &= c_0 + c_1 x + a(x+b) \log(x+b), & (p = 0) \end{aligned}$$

We remark that the interpolation problem is nonlinear. So, in order to find the unique solution of the problem, a nonlinear system of equations must be solved.

Figure 10 shows a convex interpolant obtained with $p = 1$. The second derivative of the interpolant is a continuous piecewise exponential function and minimizes the entropy functional $\int_a^b f(x) \log f(x) dx$.

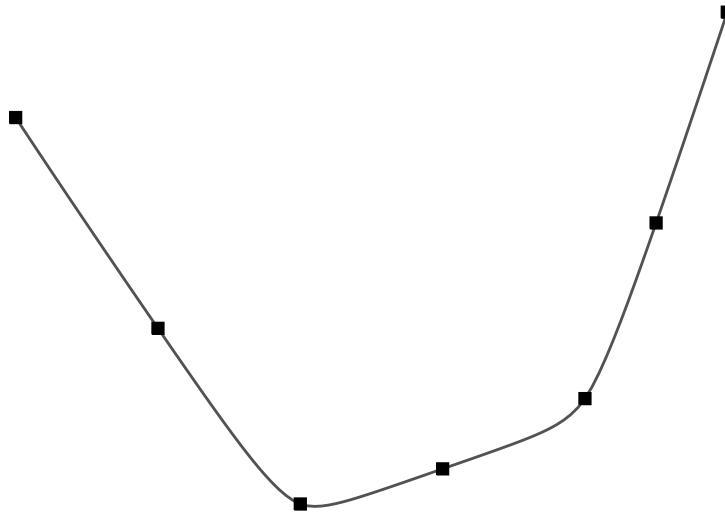


Figure 10. Convex interpolant minimizing the entropy of the second derivative

5 Tensor-product constructions in multivariate interpolation

Let U be a vector space of continuous functions defined on the set $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ and let X be a finite set of points (usually called nodes). Given a function $f : X \rightarrow \mathbb{R}$, the Lagrange interpolation problem on the set of nodes X consist of finding a function $u \in U$ such that

$$u(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}), \quad \forall \mathbf{x} \in X.$$

We say that the set X is *correct* for the Lagrange interpolation problem by functions in U if it is *unisolvant*, that is, there exists a unique solution to the Lagrange problem in U for any f . Multivariate interpolation is a more difficult task than the problem in one variable because even the existence of interpolants is an interesting problem by itself.

In 1918, Haar [23] discussed the problem of finding the best uniform approximation to a function. The uniqueness of the best approximation $u_0 \in U$ to a function f by functions in a space U on a compact domain Ω in the sense of Chebyshev

$$\max_{x \in \Omega} |f - u_0| = \min_{u \in U} \max_{x \in \Omega} |f - u|$$

is equivalent to the fact that the Lagrange interpolation problem is unisolvant on X for any set X with $\#X = \dim U$. In one variable, there exists function spaces (called Haar spaces) U such that there exists a unique interpolant $u \in U$ for any function f and any set X with $\#X = \dim U$. However, in [23] it was shown that there exist no Haar spaces if Ω contains interior points, $d > 1$ and the set X contains more than one point. In 1955, Mairhuber [25] solved a problem suggested by I. J. Schoenberg, showing that U is a Haar space with $\dim U \geq 2$ if and only if Ω is homeomorphic to a closed subset of the circumference of a circle. For more information on this problem see the book of Zielke [30].

A consequence of the above result is that the Lagrange interpolation problem on a given space U of functions defined on a multivariate domain Ω will not be unisolvant for certain sets X .

The use of polynomial interpolants give rise to local function representations with high order of approximation. Interpolation by multivariate polynomials is a powerful approximation technique used in the *finite element method* for finding a numerical solution to partial differential equations. The domain is subdivided into small subdomains called elements. This is a usual technique used in engineering analysis of structures. In many practical cases elements can be taken as rectangles or triangles in two variables (boxes or simplices in more than two variables) and the space of interpolants can be chosen any subspace of the space of polynomials containing all polynomials up to a given total degree. The use of a interpolants to represent or approximate the solution has the advantage that

we can add or manipulate easily physical constraints or boundary conditions and that we can interprete easily the values of the polynomials as approximation of the values to the true solution of the differential equation. Continuity conditions for relating different patches of the global solution can easily be imposed and low order smoothness condition are not hard to incorporate. The approximation power of polynomial representations makes it easy the design of *finite elements* with high order of approximation which might imply fast convergence properties of *finite element method*.

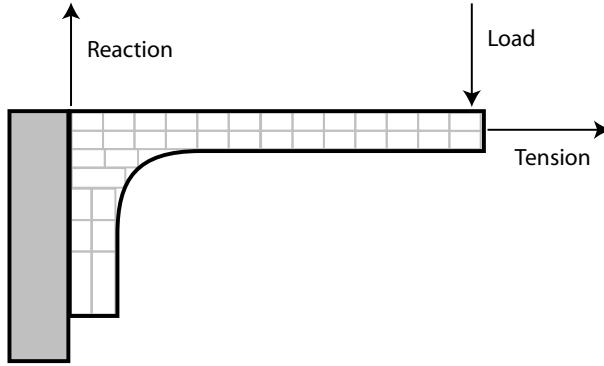


Figure 11. Analysis of the mechanical properties of a structure with finite elements

On the other hand, bivariate interpolation techniques are fundamental in the representation of surface patches by polynomials. The use of bivariate polynomial interpolants give rise to local surface representations for reproducing surfaces accurately.

In surface design other representations than the representations by interpolation are preferred. However, in the design process it is usual to impose conditions for restricting the freedom of the surface. Many restrictions can be formulated as interpolation or approximation conditions leading to bivariate interpolation problems.

In most of the above applications, the interpolation nodes and the space of interpolants can be chosen. If we are free to select the nodes and the space, tensor product constructions, based on simpler univariate problems can be easily described, analyzed and implemeted. In order to simplify our discussion, we shall draw our attention on bivariate problems.

The interpolation problems on rectangular grids

$$X = \{(x_i, y_j) \mid i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, m\} = \{x_i \mid i = 0, \dots, n\} \times \{y_j \mid j = 0, \dots, m\},$$

$$x_0 < x_1 < \dots < x_n, \quad y_0 < y_1 < \dots < y_m,$$

are usually called tensor product constructions because the space of polynomial interpolants

$$P_{n,m} = \{p(x, y) \mid \deg_x p \leq n, \deg_y q \leq m\} = \langle x^i y^j \mid i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, m \rangle$$

can be regarded as a tensor product of univariate polynomial function spaces $P_n \otimes P_m$. We observe that $\dim P_{n,m} = (n+1)(m+1) = \#X$. Furthermore, the Lagrange interpolation problem is unisolvant and a Lagrange formula can be derived immediately

$$p(x, y) = \sum_{i=0}^n f(x_i, y_j) l_i^x(x) l_j^y(y), \quad l_i^x(x) = \prod_{k \neq i} \frac{x - x_k}{x_i - x_k}, \quad l_j^y(y) = \prod_{k \neq j} \frac{y - y_k}{y_j - y_k}.$$

Multivariate extensions for the Newton and Aitken-Neville formulae can also be easily derived in this case.

Tensor product interpolants provide excellent approximations properties and give rise to low errors. However they share the inflexibility properties of the univariate polynomials and are not able to represent global surfaces in large areas of the domain and they should rather be used to represent local surface patches. It is not recommended to use surface interpolants of very high degree because the complexity of the formulae representing the interpolant increases. Since the dimension of $P_{n,n}$ is $(n+1)^2$, we may expect to obtain the interpolant as the sum of $(n+1)^2$. This gives rise to 441 terms to be considered for $n = 20$ and 961 terms for $n = 30$. By increasing the degree, the condition of the problem measured by the Lebesgue functions also grows very fast. The higher complexity of the formula implies more computation time and an increased risk of error propagation.

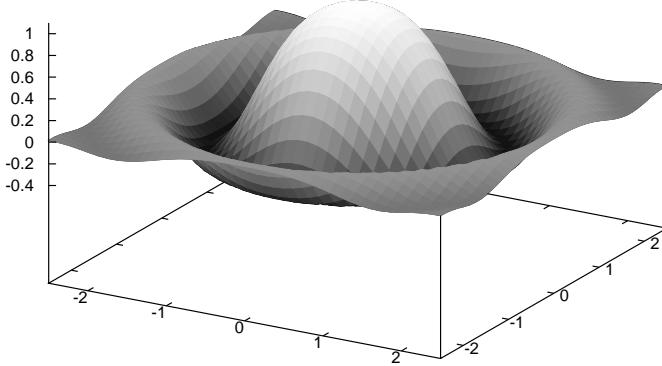


Figure 12. The surface $z = \exp(x^2 + y^2)/3 \cos(x^2 + y^2)$

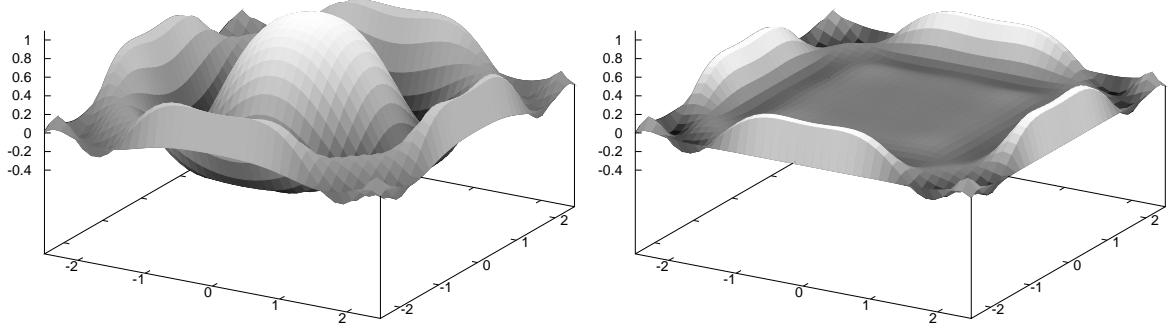


Figure 13. The $P_{8,8}$ tensor product interpolant and its error

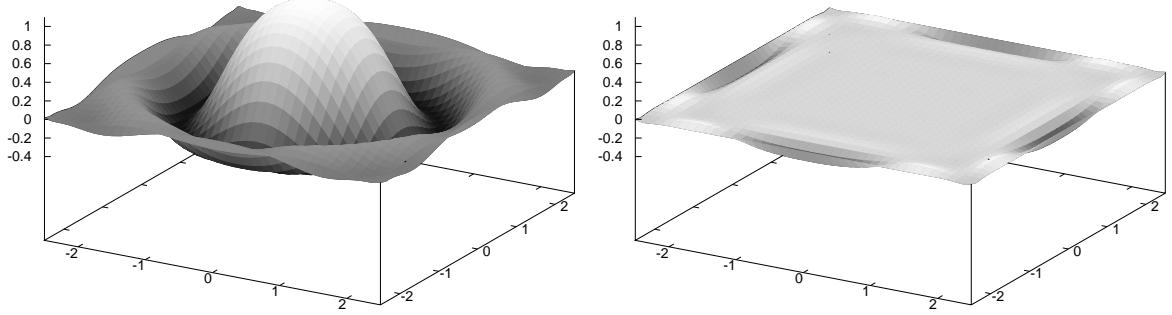


Figure 14. The $P_{12,12}$ tensor product interpolant and its error

Figure 12 shows a moderately oscillating function whose behaviour can only be imitated by considering a large number of data

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{3}\right) \cos(x^2 + y^2), \quad x, y \in [-5/2, 5/2].$$

We consider tensor product interpolants in $P_{n,n}$ at the grid of points

$$\left(-\frac{5}{2} + \frac{5i}{n}, -\frac{5}{2} + \frac{5j}{n}\right), \quad i, j = 0, \dots, n.$$

When $n = 8$ (91 data points) the behaviour of the interpolant is only very well imitated at the center of the square $[-5/2, 5/2] \times [-5/2, 5/2]$ (see Figure 13). By increasing a little the degree $n = 12$ (169 data points), we obtain more acceptable results in the boundary (the error is lower than the 10% of the range) and very good approximation properties at the center of the square (see Figure 14).

6 Multivariate interpolation by polynomials of bounded degree

Lagrange interpolation in more than one variable in a finite dimensional space of polynomial functions will not be unisolvant for certain sets X as a consequence of Haar's results in [23]. In order to face this problem two different but complementary approaches have been considered. If the set of nodes $X \subset \Omega$ cannot freely be chosen, search for a space of polynomial functions such that the Lagrange interpolation problem at X is unisolvant. The second possibility is that the space of interpolants is fixed. The space of polynomials with total degree not greater than n is considered in most cases

$$P_n^d = \{p(x_1, \dots, x_d) \mid \deg p \leq n\} = \langle x_1^{i_1} \cdots x_d^{i_d} \mid i_1 + \cdots + i_d \leq n \rangle$$

because of this space has optimal approximation order properties with respect other polynomial spaces of the same dimension. Then the problem consists in identifying or constructing correct sets for the given space and provide efficient algorithms to find the interpolant.

A polynomial interpolant to any set of data can be obtained by increasing the total degree n according to the data. A simple construction of a polynomial of degree not greater than $n = \#X - 1$ similar to the univariate construction can be obtained as follows:

$$p(x) = \sum_{y \in X} f(y) l_y(x), \quad l_y(x) := \prod_{z \in X \setminus \{y\}} \frac{(y - z)^T (x - z)}{\|y - z\|^2}. \quad (6.1)$$

Reducing the degree as much as possible allows us to fully exploit the power of approximation of multivariate polynomials. Another reason is that the growth and oscillation properties of the polynomials might be better controlled by keeping the degree as low as possible. A *minimal degree interpolation space* for a set of nodes X is any interpolation space U such that $U \subseteq P_n$ such that no interpolation space for the set of nodes X is contained in the space P_{n-1} . The space generated by the polynomials l_y , $y \in X$, in (6.1) is a minimal degree interpolation space if and only if all nodes lie on the same line. For most distributions of points lower degree interpolants can be obtained. For instance, if X consists of three noncollinear points on the plane, then a linear interpolant in P_1 can be always provided, whereas formula (6.1) provides quadratic interpolants. For most sets X , the degree can be considerably reduced and attains its minimal possible value n with $\dim P_{n-1} < \#X \leq \dim P_n$.

A related question is degree reduction. Given a set X , we can define the restriction operator which associates to each function f its restriction $f|_X$ to the set X . For any space U of polynomials such that the Lagrange interpolation problem is unisolvant the restriction operator is a bijection between U and \mathbb{R}^X . The inverse of the restriction operator is the

interpolation operator which associates to each function on X , a polynomial function defined on a wider domain $L_U : \mathbb{R}^X \rightarrow U$. The interpolation at points X by functions in U is *degree reducing* if for any polynomial p , we have that $\deg L_U[p] \leq \deg p$. Any degree reducing space is a minimal degree interpolation space but the converse is not true in general. The construction of degree reducing and minimal degree spaces for any sets of nodes has been investigated by T. Sauer among others (see [27]).

In the second approach we fix the interpolation space P_n^d and search for correct sets. A set $X \subset \mathbb{R}^d$ is correct if and only if

$$\#X = \dim P_n^d = \binom{n+d}{d}$$

and all the points in X are not contained in an algebraic hypersurface of degree n . This geometric condition is not practical to check because it requires almost the same effort than trying to solve the interpolation problem and find that there exist no unique solution.

We should take into account that, for $d > 1$, the number of nodes and the dimension of the interpolation space P_n^d grows considerably with the degree. This implies additional complexity in the formulae. For instance, if we perform bivariate interpolation of degree 15 we would need to manipulate, in general, 105 different terms because $\dim P_{15}^2 = 105$. This also means that, apart from the condition of the problem, stability of computations should be carefully considered to avoid propagation of the roundoff errors.

The Lagrange polynomials $l_y \in P_n^d$, $y \in X$, are implicitly defined by the conditions

$$l_y(y) = 1, \quad l_y(x) = 0, \quad \forall x \in X \setminus \{y\}.$$

and give a representation of the interpolant by means of the Lagrange formula

$$p(x) = \sum_{y \in X} f(y) l_y(x).$$

The Lagrange formula is often used in the finite element method because its coefficients are directly the values of the solution and further evaluation of the formula might be avoided if we are dealing with a sufficiently fine grid.

On the other hand Newton-like formulae

$$p(x) = \sum_{k=0}^N c_k \pi_k(x)$$

are more versatile than the Lagrange formulae and can be applied to a wider set of problems. A Newton-like basis $\pi_k(x)$, $k = 0, \dots, N$, is usually formed by polynomial whose degree gradually increases with k and vanishes on subsets X_k of X whose size gradually increases

$$0 = X_0 \subseteq \dots \subseteq X_N \subset X,$$

so that, the Lagrange interpolation problem leads to a triangular (or block triangular) system of equations. The coefficients of a Newton-like formula can be regarded as generalizations of the divided differences. The computation of the coefficients is usually unstable, in contrast to Lagrange formula whose coefficients are the interpolation data $f(y)$, $y \in X$.

The complexity of the formulae representing the Lagrange polynomials must also be considered in the choice of a Lagrange formula to represent the interpolant. Each of the Lagrange polynomials will be expressed in terms of a basis of P_n^d and might have $\dim P_n^d$ terms. Taking into account that the Lagrange formula express the solution as a sum of $\dim P_n^d$ terms, the final value is the sum of $(\dim P_n^d)^2$ terms. For $n = 15$, $d = 2$, this gives a huge number of terms 10125 making the evaluation of the interpolant a high demanding computational task leading to a unreliable computed value. Chung and Yao suggested to use sets X leading to simple Lagrange formulae, in the sense that the Lagrange polynomials can be completely factored into first degree polynomial factors. These sets can be characterized by the following property

Geometric characterization by Chung and Yao. *For each node $x \in X$, there exists a set of n hyperplanes $\Gamma_{x,X} = \{H_1^x, \dots, H_n^x\}$ such that $x \notin \bigcup_{i=1}^n H_i^x$ and $X \setminus \{x\} \subset \bigcup_{i=1}^n H_i^x$. We say that X is a GC_n set for short.*

For GC_n sets the Lagrange formula can be written as follows

$$p(x) = \sum_{y \in X} f(y) l_y(x), \quad l_y(x) = \prod_{i=1}^n \frac{h_i^y(x)}{h_i^y(y)},$$

where h_i^y is a first degree polynomial such that $h_i^y(x) = 0$ is the equation of the hyperplane $H_i^y \in \Gamma_{y,X}$ (determined up to a constant factor). The formula retains many features of the univariate one and has a similar computational complexity.

A *lattice* is determined by a set of affine/projective manifolds and its incidence relations. A lattice can be described as a set of points X equipped with a *lattice structure*, which means sets of lines, planes, hyperplanes, containing relevant subsets of X . An important feature of the lattice structure is the inclusion and the incidence relations between the different affine/projective manifolds of the structure (points contained in lines, lines in planes, planes intersecting in lines, lines intersecting at points, etc). In the analysis of GC_n sets X , it will be important the lattice structure provided by the hyperplanes in $\Gamma_{x,X}$, $x \in X$ and other auxiliary manifolds used to understand its structure. For this reason, structured GC_n sets are also called lattices.

Principal lattices of degree n can be defined as a set of points of the form

$$x_\alpha = \sum_{r=0}^d \frac{\alpha_r}{n} V_r, \quad |\alpha| = n$$

where V_0, \dots, V_d are the vertices of a nondegenerate simplex $[V_0, \dots, V_d]$, $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_d)$ is a multiindex (a vector whose components are nonnegative integers) and $|\alpha| = \sum_{r=0}^d \alpha_r$.

Let us observe that all the points x_α with $\alpha_r = i$, lie on the same hyperplane

$$H_i^r = \{x \in \mathbb{R}^d \mid \lambda_r(x) = i/n\},$$

where $\lambda_r(x)$ denotes the r -th barycentric coordinate of the simplex $[V_0, \dots, V_d]$, defined to be the unique linear function such that

$$\lambda_r(V_r) = 1, \quad \lambda_r(V_j) = 0 \quad j \neq r.$$

On the other hand x_α can be regarded as the unique intersection of the hyperplanes H_i^r . Therefore we have

$$H_i^r = \text{aff hull}\{x_\alpha \mid \alpha_r = i, |\alpha| = n\}, \quad \{x_\alpha\} = \bigcap_{r=0}^d H_{\alpha_r}^r,$$

where aff hull denotes the affine hull of a set of points. The relation between points and hyperplanes gives rise to a characteristic lattice structure. Let us observe that the set of n hyperplanes

$$\Gamma_{x_\alpha, X} = \{H_i^r \mid i < \alpha_r, r \in \{0, \dots, d\}\}$$

contains all points in $X \setminus \{\alpha\}$ but not x_α . Therefore any principal lattice of degree n is a GC _{n} set.

Principal lattices in the plane have a triangular structure. The points are points regularly distributed on a triangle. There are three pencils of parallel lines and each point is the intersection of the three concurrent lines each from one different pencil (see Figure 15). An analogous structure can be described for more than two variables: the points are regularly distributed on a simplex. The hyperplanes belong to $d + 1$ different pencils of parallel hyperplanes and each point is the intersection of $d + 1$ hyperplanes each belonging to a different pencil.

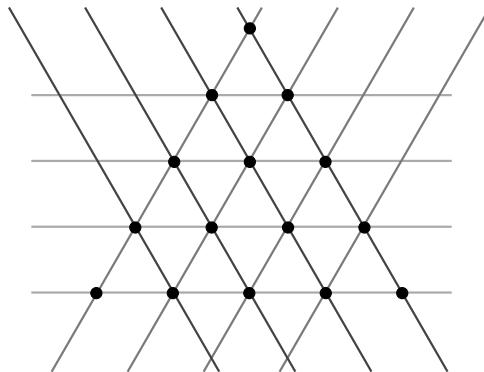


Figure 15. A planar principal lattice

All the interpolation nodes of a principal lattice lie inside the simplex $[V_0, \dots, V_d]$. This fact is fundamental for the construction of piecewise interpolants on a simplicial partition.

Assuming that a multidimensional domain is subdivided into simplices, we can find an interpolant to given data on each simplex. Since interpolants defined on adjacent simplices agree on the common facet, we deduce that the piecewise polynomial interpolant is at least continuous. Unfortunately, smoothness conditions are far from being trivial require additional work. Principal lattices are often used for surface reconstruction and in the finite element method. The subdivision of a bidimensional domain into triangles (also called triangulation) is a more flexible tool than subdivision into rectangular pieces. For higher dimensional domains, we can say that a partition into boxes suggests regular grids while simplicial partitions offer more possibilities for constructing nonuniform partitions. The use of nonuniform partitions is crucial for solving certain differential equations by the finite element method. Using a more detailed representation in selected regions of the domain (like corners), improves considerably the degree of approximation of the numerical solution.

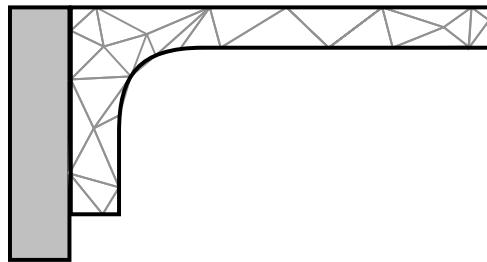


Figure 16. A triangulation of a domain for finite element analysis

Generalizations of principal lattices have been described. One may replace the condition that all hyperplanes in H_0^r, \dots, H_n^r are parallel for $r = 0, \dots, d$ by the more general condition

$$H_0^r, \dots, H_n^r \in \Lambda_r,$$

where Λ_r denotes a linear pencil of hyperplanes (see [24]). Lattices generated by polynomial pencils of hyperplanes have also described.

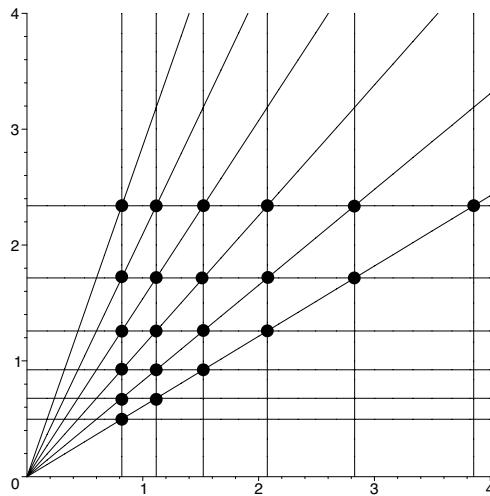


Figure 17. A three-pencil lattice

Lattices generated by polynomial pencils of hyperplanes have also been described [13]. This motivates the following definition

Definition 6.1. A generalized principal lattice of degree n is a set X that can be so indexed as $X = \{x_\alpha : \alpha \in \Gamma_n^0\}$ that, for $d + 1$ families of hyperplanes

$$(H_i^r, i = 0, \dots, n), \quad r \in \{0, \dots, d\},$$

containing altogether $(d + 1)(n + 1)$ distinct hyperplanes,

$$\{x_\alpha\} = \bigcap_{r=0}^d H_{\alpha_r}^r = \bigcap_{r \in \{0:d\} \setminus \{l\}} H_{\alpha_r}^r, \quad \forall \alpha \in \Gamma_n^0, \quad \forall l \in \{0, \dots, d\},$$

and

$$\bigcap_{r=0}^d H_{\alpha_r}^r \cap X \neq \emptyset \implies \alpha \in \Gamma_n^0.$$

It has been recently shown that all lines defining a generalized principal lattice in the plane must belong to the same cubic pencil [15]. In [10, 11] the generation of generalized principal lattices from a cubic pencil of lines was discussed. In [12] a complete classification of all lattices generated by cubic pencils was provided. Figure 18 shows some lattices obtained by lines in the same reducible cubic pencil formed by a linear pencil and a quadratic pencil. Figure 19 illustrates lattices obtained by lines in the same irreducible cubic pencil. Multivariate constructions of generalized principal lattices using polynomial pencils have been discussed in [13].

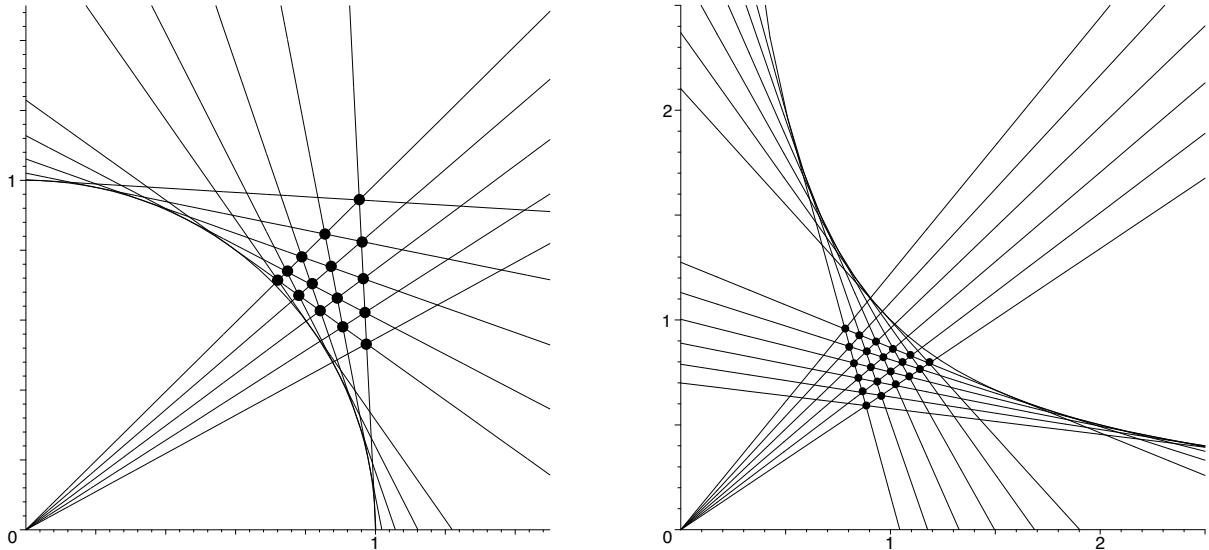


Figure 18. Lattices generated by linear pencil and a quadratic pencil

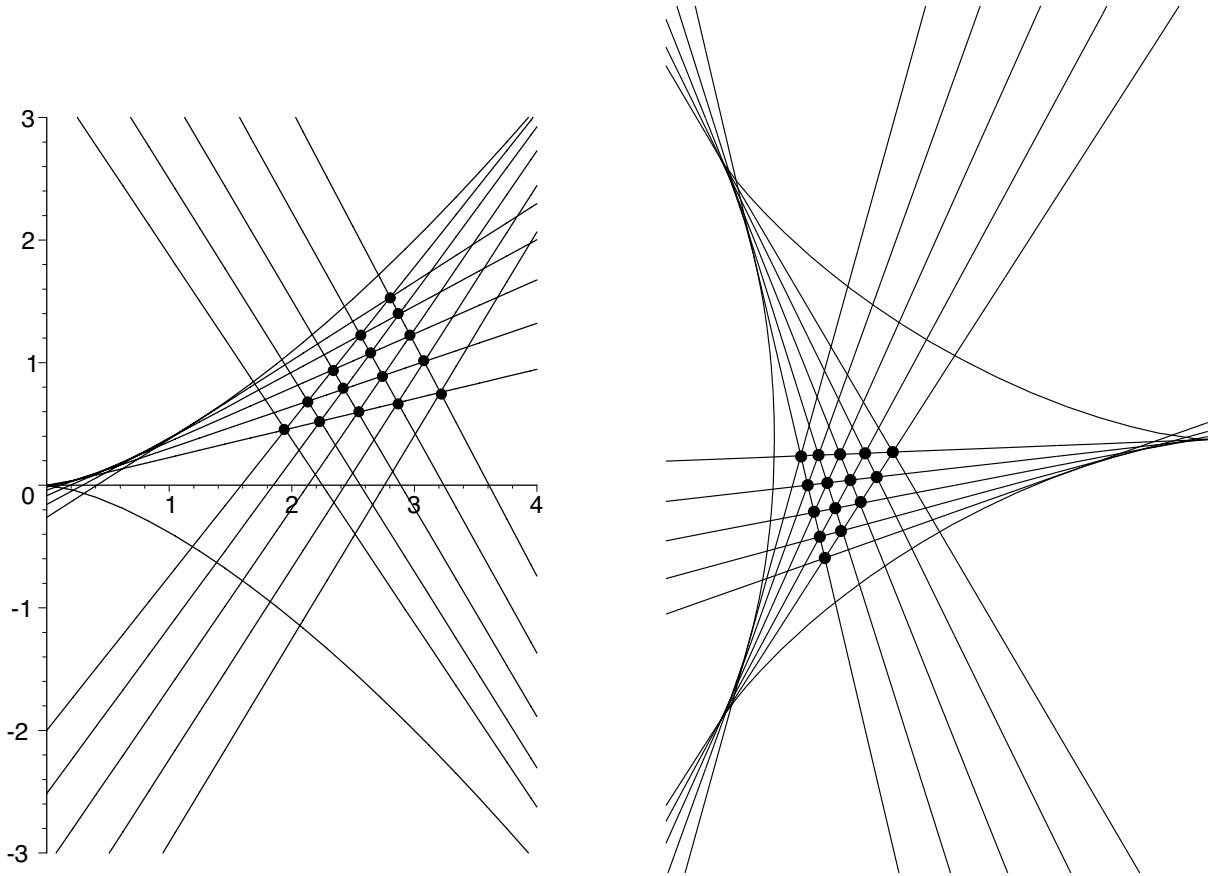


Figure 19. Lattices generated by cubic pencils of lines

Apart from generalized principal lattices some other kinds of GC_n sets can be described. For general dimension, the description is complicated and many questions remain unsolved. So, we shall limit our classification to planar GC_n sets. As a criterion of classification we shall use the number of lines containing $n + 1$ points of X

$$\mathcal{K}_X := \{L \in \Gamma_X \mid \#(L \cap X) = n + 1\}, \quad \Gamma_X := \bigcup_{x \in X} \Gamma_{x,X}.$$

Definition 6.2. We say that a GC_n set X has defect d if the number of lines containing $n + 1$ points of X is $\#\mathcal{K}_X = n + 2 - d$. We also say that X is a $\text{GC}_{n,d}$ set for short.

It is easy to deduce that $\#\mathcal{K} \leq n + 2$. Therefore, the defect of a GC_n set is a nonnegative number less than or equal to $n - 2$. However, Gasca and Maeztu [20] conjectured that for any GC_n set, there exists a line in Γ_X containing $n + 1$ points of X , in other words $\mathcal{K}_X \neq \emptyset$.

Conjecture GM. The defect d of any $\text{GC}_{n,d}$ set of degree n is less than $n + 2$, that is, $d < n + 2$.

The conjecture has been proved for $n \leq 4$ by J. R. Busch (see [6]) but even for $n = 5$, this conjecture has not been settled. Let us introduce the greatest degree for which we

can ensure that conjecture *GM* holds for a GC_n set and all possible GC subsets

$$\nu := \max\{n \mid \text{Conjecture GM holds for all GC sets of degree } \leq n\} \geq 4.$$

In [8], it was shown that, for every planar $\text{GC}_{n,d}$ set X with $n \leq \nu$, then there exists at least three lines in Γ_X containing $n + 1$ points $\#\mathcal{K} \geq 3$, that is, the defect is $\leq n - 1$. Since $\text{GC}_{n,n-1}$ sets with $n \leq \nu + 2$ are just generalized principal lattices (see [14]), the classification of GC_n sets, which are not generalized principal lattices is reduced to examine the defects $d < n - 1$.

In [21], it was shown that there exist no $\text{GC}_{n,d}$ sets with $d = 4 < n - 1$. From this fact it can be deduced that higher defects than 3 are not possible. The following result (see [21]) summarizes the above mentioned results on classification of GC_n sets

Theorem 6.3. *Let $X \subset \mathbb{R}^2$ be a $\text{GC}_{n,d}$ set with $d \leq \nu + 2$. Then either $0 \leq d \leq 3$ or $d = n - 1$. If $d = n - 1$, then X is a generalized principal lattice.*

In [19], [7] and [16] $\text{GC}_{n,d}$ sets with defects 0, 1, 2, 3 were described. In order to provide a general description we recall that the lines in \mathcal{K}_X are in general position: any two lines in \mathcal{K}_X meet at a point in X and no triple of lines are concurrent at the same point.

Theorem 6.4. *A set $X \subset \mathbb{R}^2$ is a $\text{GC}_{n,d}$ set, $d \in \{0, 1, 2, 3\}$ if and only if $X = X_0 \cup X_1 \cup X_2$, where*

$$X_0 := \{x_{ij} \mid \{x_{ij}\} = K_i \cap K_j \mid i \neq j \in \{0, 1, \dots, n+1-d\}\}$$

is the set of all intersection points of $n+2-d$ lines in general position K_0, \dots, K_{n+1-d} , $\#X_0 = (n+1-d)(n-d)/2$,

$$X_1 := \bigcup_{i=0}^{n+1-d} X_{i,1}, \quad X_{i,1} := K_i \cap X \setminus \bigcup_{j \neq i} K_j$$

is the set of points belonging to exactly one of the lines K_i , $i = 0, \dots, n+1-d$, with $\#X_{i,1} = d$ and $\#X_1 = d(n+1-d)$ and

$$X_2 := X \setminus \bigcup_{i=0}^{n+1-d} K_i$$

is the set of points in X not belonging to any line K_i , $i = 0, \dots, n+1-d$, containing $\#X_2 = d(d-1)/2$ points and,

- (a) if $d = 0$, then $X_1 = X_2 = \emptyset$;
- (b) if $d = 1$, then $X_2 = \emptyset$ and not all points in X_1 lie on the same line;

- (c) if $d = 2$, then there exist three lines L_0, L_1, L_2 such that $X_2 = L_0 \cap L_1 \cap L_2$, $L_i \cap K_i \cap X = \emptyset$, $i = 0, 1, 2$, and $X_1 \subset L_0 \cup L_1 \cup L_2$;
- (d) if $d = 3$, then there exist three lines L_0, L_1, L_2 , in general position, such that

$$X_2 = \{z_{01}, z_{12}, z_{02}\}, \quad \{z_{ij}\} := L_i \cap L_j, \quad i \neq j \in \{0, 1, 2\}$$

$$X_{i,1} = K_i \cap \bigcup_{j \neq i} L_j \cup \{z_i\}, \quad \{z_i\} := X_{i,1} \setminus \bigcup_{j \neq i} L_j, \quad i = 0, 1, 2,$$

$$X_{i,1} = K_i \cap (L_0 \cup L_1 \cup L_2), \quad i = 3, \dots, n+1-d,$$

and the points z_i, z_j, z_{ij} are collinear for $i \neq j \in \{0, 1, 2\}$.

Figures 20 and 21 illustrate the different types of line configurations associated with $\text{GC}_{n,d}$ sets, $d = 0, 1, 2, 3$.

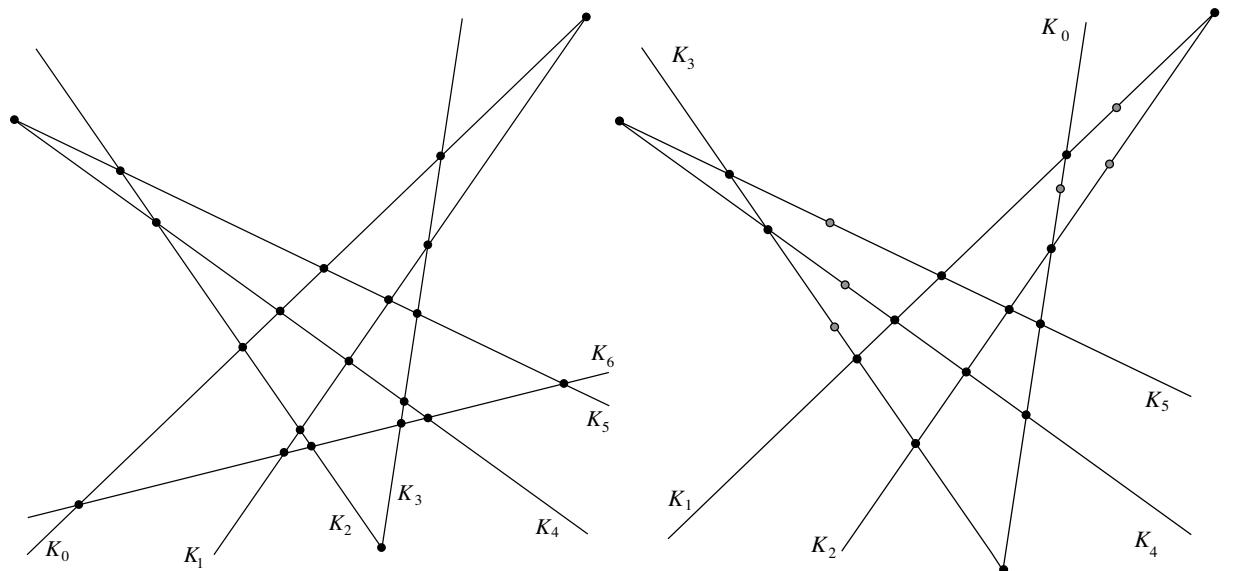


Figure 20. A $\text{GC}_{5,0}$ set (left) and a $\text{GC}_{5,1}$ set (right)

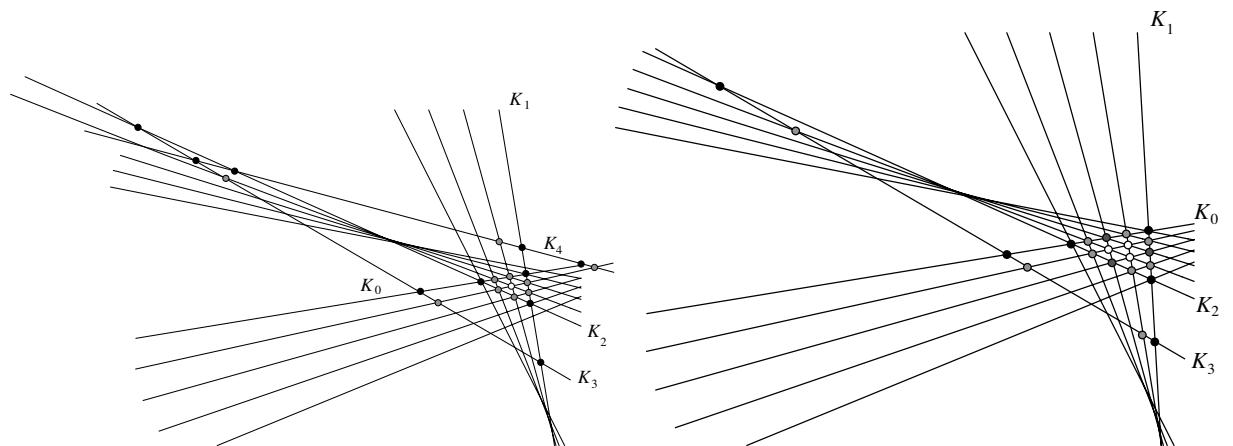


Figure 21. A $\text{GC}_{5,2}$ set (left) and a $\text{GC}_{5,3}$ set (right)

Acknowledgements

Partially supported by the Spanish Research Grant MTM2006-03388, by Gobierno de Aragón and Fondo Social Europeo.

References

- [1] Carnicer, J. M., *Convexity Preserving Interpolation*, Publicaciones del Seminario García de Galdeano, Sección 2, **38**, 1991.
- [2] Carnicer, J. M., On best constrained interpolation, *Numer. Algor.* **1** (1991), 155–176.
- [3] Carnicer, J. M., Dual Bézier curves and convexity preserving interpolation, *Comput. Aided Geom. Design* **9** (1992), 435–445.
- [4] Carnicer, J. M., Rational interpolation with a single variable pole, *Numer. Algor.* **3** (1992), 125–132.
- [5] Carnicer, J. M.; Dahmen, W. Characterization of local strict convexity preserving interpolation methods by C^1 functions, *J. Approx. Theory* **77** (1994), 2–30.
- [6] Carnicer, J. M; Gasca, M., A conjecture on multivariate polynomial interpolation, *RACSAM, Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat.* **95** (2001), 145–153.
- [7] Carnicer, J. M; Gasca, M., Planar configurations with simple Lagrange interpolation formulae, en *Mathematical Methods for Curves and Surfaces: Oslo 2000*, Tom Lyche and Larry L. Schumaker (eds.), Vanderbilt Univ. Press, Nashville TN, 2001, 55–62.
- [8] Carnicer, J. M; Gasca, M., On Chung and Yao’s geometric characterization for bivariate polynomial interpolation, in *Curve and Surface Design: Saint-Malo 2002*, Tom Lyche, Marie-Laurence Mazure and Larry L. Schumaker (eds.), Nashboro Press, Brentwood TN, 2003, 21–30.
- [9] Carnicer, J. M; Gasca, M., Classification of bivariate configurations with simple Lagrange interpolation formulae, *Adv. in Comput. Math.*, **20** (2004), 5–16.
- [10] Carnicer, J. M; Gasca, M., Generation of lattices of points for bivariate interpolation. *Numerical Algorithms* **39** (2005), 69–79.
- [11] Carnicer, J. M; Gasca, M., Interpolation on lattices generated by cubic pencils. *Adv. in Comput. Math.*, **24** (2006), 113–120.
- [12] Carnicer, J. M; Gasca, M., Cubic pencils of lines and bivariate interpolation, *J. Comput. Appl. Math.*, **219**, 370–382.

- [13] Carnicer, J. M; Gasca, M., Sauer, T., Interpolation lattices in several variables. *Numer. Math.*, **102** (2006), 559–581.
- [14] Carnicer, J. M; Godés, C., Geometric characterization and generalized principal lattices. *J. Approx. Theory* **143** (2006) 2–14.
- [15] Carnicer, J. M; Godés, C., Generalized principal lattices and cubic pencils. *Numer. Algor.* **44** (2007), 133–145.
- [16] Carnicer, J. M; Godés, C., Geometric characterization of Configurations with Defect Three, in *Curve and Surface Fitting: Avignon 2006*, Albert Cohen, Jean-Louis Merrien and Larry L. Schumaker (eds.), Nashboro Press, Brentwood TN, 2007, 61–70.
- [17] Carnicer, J. M; Godés, C., Configurations of Nodes with Defect Greater than Three, *J. Comput. Appl. Math.*, to appear.
- [18] Cheney, Ward; Light, Will, *A Course in Approximation Theory*, Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove CA, 2000.
- [19] Chung, K. C.; Yao, T. H., On lattices admitting unique Lagrange interpolations, *SIAM J. Numer. Anal.* **14** (1977) 735–743.
- [20] M. Gasca and J. I. Maeztu, On Lagrange and Hermite interpolation in \mathbb{R}^n , *Numer. Math.* **39** (1982), 1–14.
- [21] Godés, C. *Configuraciones de nodos en interpolación polinómica bivariada*, Monografías del Seminario Matemático “García de Galdeano” **32**, 2006.
- [22] Goldstine, Herman H., *A History of Numerical Analysis from the 16th through the 19th Century*, Springer-Verlag, New York, 1977.
- [23] Haar, A., Die Minkowskische Geometrie und die Annäherung an stetige Funktionen, *Math. Ann.* **18** (1918), 294–311.
- [24] Lee, S. L.; Phillips, G. M., Construction of lattices for Lagrange interpolation in projective space, *Constr. Approx.* **7** (1991), 283–297.
- [25] Mairhuber, J. C., On Haar’s theorem concerning Cebychev approximation problems having unique solutions, *Proc. Amer. Math. Soc.* **7** (1956), 609–615.
- [26] Runge, C., Über empirische Funktionen und die Interpolation zwischen äquidistanten Ordnaten, *Zeitschrift für Mathematik und Physik* **46** (1901), 224–243.
- [27] Sauer, T., Polynomial interpolation in several variables: Lattices differences and ideals, in *Multivariate Approximation and Interpolation* (M. Buhman, W. Haussmann, K: Jetter, W. Schaback, and J: Stöckler, eds.), Elsevier, 2006, 189–228.

- [28] Schoenberg, I. J.; Whitney, A., On Pólya frequency functions III: The positivity of translation determinants with application to the interpolation problem by spline curves. *Trans. Amer. Math. Soc.* **74** (1953), 246–259.
- [29] Schweikert, D. G., An interpolation curve using a spline in tension, *Journal of Mathematics and Physics* **45** (1966), 312–317.
- [30] Zielke, R., *Discontinuous Čebyšev Systems*, Lecture Notes in Mathematics **707**, Springer, Berlin, 1979.

Dos décadas de búsqueda de materia oscura en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc

María Luisa Sarsa

Laboratorio de Física Nuclear y Astropartículas

Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza, E-50009 Zaragoza

Premio a la Investigación de la Academia 2008. Sección de Físicas

Resumen

El avance producido en las últimas décadas del siglo veinte en las técnicas observacionales ha proporcionado una gran variedad de datos experimentales sobre el Universo a distintas escalas de distancias y en distintas etapas de su evolución, gracias a los cuales se ha profundizado en nuestra comprensión del Universo. Apoyado sobre estos datos se ha desarrollado un modelo cosmológico consistente que requiere la existencia de una gran cantidad de materia oscura no bariónica (aproximadamente un 20% del presupuesto energético del Universo). En este trabajo se revisará brevemente el conjunto de evidencias experimentales que apoyan la existencia de la materia oscura, así como las distintas aproximaciones a su detección, para continuar con un resumen de los experimentos más relevantes en el contexto internacional. En particular, se hará hincapié en el continuado programa experimental orientado a la detección directa de materia oscura que se viene realizando en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc desde finales de los ochenta con la participación del grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza. Algunos de estos experimentos fueron pioneros en el campo, tanto en el desarrollo como en la aplicación de nuevos detectores o técnicas de análisis. Se presentará un breve resumen de los experimentos más relevantes realizados en Canfranc que se completará con el estado actual de los esfuerzos experimentales que se están llevando a cabo en esta dirección: ANAIS (Annual modulation with sodium iodide detectors, NaI's) y ROSEBUD (Rare Objects SEarch with Bolometers UndergrounD).

Abstract

The recent progress in observational techniques has provided a significant amount of experimental data about our Universe at different distance and time scales allowing a deeper understanding of the Universe. Supported by these data, a consistent

cosmological model has been developed, requiring a large amount of non-baryonic Dark Matter (about a 20% of the Universe matter+energy budget). In the following, the present standard framework and experimental data supporting the existence of Dark Matter will be briefly reviewed. The experimental approaches to search for this Dark Matter will be also covered, to continue with a summary of the most relevant experiments in the international context. In particular, stress will be given to the lasting Dark Matter Direct Search Program being carried out in the facilities of the Canfranc Underground Laboratory since the last eighties with the participation of the University of Zaragoza (UZ) Nuclear and Astroparticle Physics group. Some of them were pioneer in the development and application of new detectors or analysis techniques in the field. A brief summary of the most relevant experiments carried out in Canfranc will be followed by the report on the status of the present experimental efforts: ANAIS (Annual modulation with sodium iodide detectors, NaI's) and ROSEBUD (Rare Objects SEArch with Bolometers UndergrounD).

1 Introducción

Existen en la actualidad un cúmulo de evidencias experimentales que apuntan hacia un contenido no inferior al 20% de la densidad crítica del Universo en forma de partículas masivas y neutras, débilmente interaccionantes y que no tienen origen bariónico. Al no emitir radiación, estas partículas constituyen la llamada materia oscura del Universo, cuya existencia se intuyó en los años 30 por sus efectos gravitatorios en la dinámica de los cúmulos de galaxias [1] y, algo más adelante, en la de las galaxias espirales [2]. El Modelo Estándar de la Física de Partículas sólo ofrece un candidato que cumpla todas estas características: el neutrino. Sin embargo, su masa es demasiado pequeña para haber permitido el desarrollo de estructuras como las que vemos en el Universo actual. Por lo tanto, para resolver la cuestión hace falta introducir por lo menos una partícula, todavía desconocida y al margen de dicho Modelo Estándar. Descubrir la naturaleza y propiedades de esta materia oscura es uno de los retos más importantes que tienen planteados hoy por hoy la Física de Partículas, la Astrofísica y la recientemente establecida Física de Astropartículas.

Este trabajo se dedica a los esfuerzos encaminados a su detección directa, en particular a aquéllos que han sido llevados a cabo en las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Se presentarán en primer lugar, y de forma resumida, el conjunto de datos y observaciones astronómicas que apoyan la existencia de la materia oscura en el contexto astrofísico y cosmológico general (sección 2) y en nuestra galaxia en particular (sección 3), lo que se puede decir sobre su naturaleza (sección 4), así como las distintas aproximaciones experimentales a su detección (sección 5) para continuar con un resumen de las técnicas utilizadas y los experimentos más relevantes en el contexto internacional (sección

6). Finalmente se hará un repaso histórico de las investigaciones realizadas en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc orientadas a la detección directa de la materia oscura galáctica fría (secciones 7 y 8).

2 El problema de la materia oscura

Recientes avances tecnológicos han permitido llevar a cabo durante las dos últimas décadas observaciones astronómicas de relevancia cosmológica. Los resultados de dichas observaciones no sólo apoyan el modelo de Big Bang, sino que lo extienden y completan de una forma inesperada, requiriendo la incorporación de nuevos elementos al escenario cosmológico. Este nuevo marco emergente, que denominaremos *el modelo cosmológico estándar*, permite una descripción coherente de la geometría del Universo, del origen de las estructuras y de su evolución. Aunque hay otros escenarios en los que se pueden explicar las observaciones, en este trabajo se hará fundamentalmente referencia a dicho modelo cosmológico estándar, mayoritariamente aceptado por la comunidad científica que trabaja en el campo.

En este modelo el Universo comienza su existencia con el Big Bang, una *singularidad* que queda fuera del alcance de nuestras teorías, en el que se crearon el espacio y el tiempo. A partir de entonces, el modelo requiere que en una fracción del primer segundo de vida del Universo se produjera una fase de expansión *explosiva* que se conoce como inflación, que borraría la curvatura y primeras posibles *arrugas* del espacio-tiempo, a la vez que llevaría a escalas astrofísicas las fluctuaciones cuánticas permitiendo entender el origen de las estructuras que observamos a nuestro alrededor. Además resuelve el problema de la homogeneidad del Universo observado, ya que permite que hubiera contacto causal entre todos sus contenidos antes de la etapa inflacionaria. Por el momento no hay evidencias directas de la inflación ni del campo que la genera, aunque es uno de los ingredientes imprescindibles del modelo cosmológico desde que fuera propuesta en los ochenta por A. Guth [3].

Tras la inflación, el Universo quedó en un estado que podríamos llamar de *sopa caliente* de partículas en equilibrio térmico que fue progresivamente enfriándose al tiempo que se expandía. En esta situación de equilibrio dinámico se aniquilaban y creaban pares de partícula y antipartícula de forma continua: $a + \bar{a} \rightleftharpoons b + \bar{b}$ mientras la energía disponible para el proceso ($\propto k_B T$) permitía la creación de la masa en reposo del par de partículas consideradas ($2m_b c^2$). A partir del momento en que una partícula determinada dejaba de ser producida, su contribución a la densidad del Universo resultaba de la competición entre los ritmos de la expansión del Universo y de la aniquilación partícula-antipartícula correspondiente. En el caso de partículas que fueran inestables irían desintegrándose,

de acuerdo con su vida media, hasta desaparecer. Las partículas que, por lo tanto, podrían haber llegado en cantidades importantes a la presente etapa de evolución del Universo, como reliquias o fósiles de su caliente pasado, tienen que ser estables o con vidas medias comparables a la edad del Universo y, además, su posible aniquilación partícula-antipartícula tiene que estar *suprimida*, bien a causa de secciones eficaces de aniquilación pequeñas, o bien debido a la existencia de asimetría entre la cantidad de partículas y antipartículas. En distintas ampliaciones del modelo estándar de la Física de Partículas existen posibles candidatos a poblar el Universo actual con densidades *reliquia* adecuadas para hacer el papel de materia oscura. Entre ellas destacan las teorías supersimétricas [4].

Para una correcta reproducción de las observaciones se requiere la incorporación al modelo cosmológico de elementos no previstos inicialmente en el mismo y, de hecho, desconocidos por la Física de Partículas en la que dicho modelo hunde sus raíces. Por un lado, la inflación requiere un campo escalar atrapado en un falso vacío, el *inflatón*. Por otro lado, la mayor parte de la materia del Universo es *fundamentalmente* diferente de la materia ordinaria de la que tenemos experiencia, los bariones (protones y neutrones, básicamente, por lo que identificaremos materia *normal* con materia bariónica). Finalmente, la mayor parte de la energía del Universo ni siquiera se encuentra en forma de materia y sus efectos *anti-gravitatorios* provocan la aceleración de la expansión del Universo desde hace algunos miles de millones de años. En resumen, en el modelo cosmológico estándar resulta desconocido más del 90% del contenido del Universo en formas de **materia y energía oscuras** al margen del modelo estándar de la Física de Partículas. No deja de ser paradójico que un modelo se considere exitoso en estas condiciones.

Este modelo se construye sobre la teoría de la Relatividad General de Einstein y el principio cosmológico: el Universo es homogéneo e isótropo. A partir de ellos se deduce la ecuación de Friedmann (1) que relaciona la geometría del Universo, determinada por su curvatura k , con el contenido en materia y energía (ρ es la densidad de materia y energía en cualquiera de sus formas¹) y el ritmo de expansión, H :

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{R^2} \quad (1)$$

siendo R el factor de escala del Universo y G la constante de gravitación universal. A partir de esta ecuación se puede definir la densidad crítica del Universo (2), como aquel valor de la densidad que corresponde a un Universo plano, sin curvatura² ($k = 0$):

¹Incluyendo la energía de vacío, cuya posible contribución a veces se escribe como la *constante cosmológica* que introdujo Einstein en la ecuación (1).

²Antes de la introducción de la energía oscura en los modelos, la geometría del Universo determinaba su destino y se hablaba de Universos cerrados ($k > 0$) y abiertos ($k < 0$) que recolapsaban, en el primer

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (2)$$

siendo H_0 la constante de Hubble.

La evolución del factor de escala depende también de los contenidos del Universo y, en particular, de las ecuaciones de estado que relacionan la presión con la densidad de energía para cada componente: $P = P(\rho)$. Las componentes convencionales y conocidas del Universo, tanto materia como radiación, producen desaceleración en la expansión y, de acuerdo con (3), para producir aceleración en la expansión se requiere una componente en la que $(\rho + 3P)$ sea negativo, a la que más adelante llamaremos de forma genérica energía oscura.

$$\ddot{R} = - \left(\frac{4\pi G R}{3} \right) (\rho + 3P) \quad (3)$$

En adelante se utilizará la siguiente notación: $\Omega = \rho/\rho_c$ representa de forma adimensional (en unidades de la densidad crítica) la densidad total de materia-energía del Universo en cualquiera de sus formas y Ω_X representa la contribución a la densidad total de la componente X.

A continuación se resumen brevemente los resultados más relevantes de recientes observaciones astronómicas y otras evidencias experimentales que permiten estimar los distintos parámetros cosmológicos. La convergencia de resultados procedentes de ámbitos muy distintos y derivados mediante técnicas experimentales muy diferentes apoya de una forma firme la consistencia del marco cosmológico mayoritariamente aceptado [5].

2.1 El fondo cósmico de microondas

Los fotones integrantes de la radiación CMB (Cosmic Microvawe Background) estuvieron en equilibrio térmico con el resto de los contenidos del Universo hasta que éste alcanzó una temperatura suficientemente baja como para que a partir del plasma ionizado que llenaba el Universo se formaran átomos neutros (*recombinación*). Unos 380000 años después del Big Bang tuvo lugar la *última dispersión* de estos fotones con el plasma y a partir de ese momento los fotones de la radiación CMB han visto un Universo prácticamente transparente³. Los fotones CMB pasaron de ser, durante la era de dominio de la radiación, la parte dominante del presupuesto energético del Universo a ser una fracción despreciable del mismo en la actualidad ($< 0.01\%$), aunque su densidad sigue siendo alta (411 fotones

caso, o se expandían por siempre, en el segundo. Con energía oscura esta relación se pierde ya que dependiendo de su ecuación de estado, podría haber Universos con $k = 0$ y expansión acelerada o que recolapsaran, por ejemplo.

³Aunque se cree que hubo períodos posteriores de re-ionización cuando comenzó la formación estelar, por ejemplo.

cm^{-3}) y la información que han conservado es vital para entender el Universo: la radiación CMB es como una instantánea fotográfica del Universo cuando tenía unos 380000 años de edad y sus anisotropías (ver figura 1) nos informan del tamaño de las fluctuaciones en la densidad del Universo en el momento de la *última dispersión*.

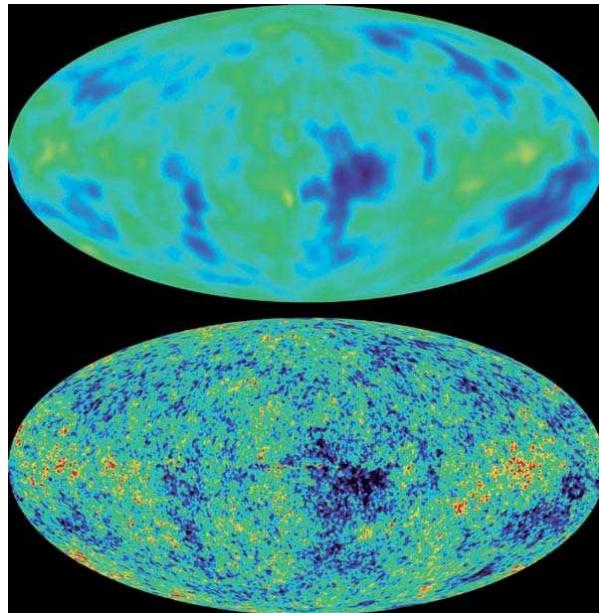


Figura 1: Anisotropías en la radiación CMB medidas por los instrumentos instalados en los satélites COBE y WMAP (este último con una resolución 30 veces mejor y mayor sensibilidad). En azul están las regiones con menor temperatura en la radiación CMB y en rojo las de mayor, correspondiendo a regiones más densas y menos densas, respectivamente, ya que el pozo de potencial gravitatorio produce como resultado un desplazamiento al rojo de las longitudes de onda de los fotones CMB. Crédito: NASA/WMAP team. (En color en la versión digital)

Desde su descubrimiento, de forma accidental, por Penzias y Wilson en 1965, la radiación CMB ha proporcionado uno de los mejores apoyos al modelo del Big Bang al informarnos de la existencia de un Universo mucho más caliente y pequeño en el pasado. Los parámetros que caracterizan a esta radiación han sido determinados con una precisión insospechada: Hitos importantes han sido las medidas llevadas a cabo desde los satélites espaciales COBE⁴ (que midió su temperatura: $2,725 \pm 0,001$ K y observó por primera vez anisotropías de decenas de microKelvin en su valor para distintas direcciones de la bóveda celeste) y WMAP⁵, cuyos resultados, añadidos a los de otros experimentos de base terrestre o en globos como MAXIMA o BOOMERANG, han permitido precisar la forma

⁴COrmic Background Explorer.

⁵Wilkinson Microwave Anisotropy Probe.

del espectro angular de potencias de las anisotropías en la radiación CMB, detectar las oscilaciones acústicas de los bariones en el momento del desacoplo de la radiación y de todo ello extraer información sobre la composición y curvatura del Universo. Entre los resultados más importantes derivados de estas medidas, fundamentalmente de los cinco años de datos disponibles de WMAP [6], podemos destacar: el Universo es plano (su densidad de materia-energía es compatible con la crítica, $\Omega = 1,099^{+0,100}_{-0,085}$), los bariones no superan el 5% del contenido del Universo ($\Omega_b = 0,0441 \pm 0,0030$), la densidad de materia oscura es del orden del 20% ($\Omega_{dm} = 0,214 \pm 0,027$) y, por lo tanto, la energía oscura debe contribuir a la densidad total de materia-energía con el 75% restante ($\Omega_\Lambda = 0,742 \pm 0,030$).

2.2 Las estructuras a gran escala

La distribución de galaxias en nuestro Universo muestra la existencia de agrupaciones jerárquicas (cúmulos, supercúmulos, vacíos, burbujas, láminas o filamentos) que son resultado de la acción de la gravedad sobre las fluctuaciones primordiales en la distribución de materia del Universo. En la actualidad se pueden medir simultáneamente corrimientos al rojo para cientos de galaxias y ello ha permitido extraer información relevante a escalas en las que ya se revela la naturaleza homogénea del Universo (al nivel que muestra también la radiación CMB en una época muy anterior de su evolución). Los dos esfuerzos experimentales más importantes hasta la fecha son *Anglo-Australian Two-degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS) y *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) (ver figura 2). Este último ya ha medido del orden de un millón de galaxias, habiendo cubierto con sus observaciones más del 25% del firmamento y creado los mayores mapas 3-D de estructuras cósmicas.

Las distribuciones de galaxias obtenidas, en función de su corrimiento al rojo⁶, por 2dFGRS y SDSS han puesto también en evidencia las oscilaciones acústicas de bariones, identificadas a $z \approx 0,35$, que había detectado WMAP en una época muy anterior ($z \approx 1100$). La comparación de las amplitudes de estas oscilaciones en dos épocas tan diferentes aporta una información fundamental: las pequeñas fluctuaciones que muestran los datos de WMAP no habrían tenido tiempo de crecer y convertirse en las estructuras que observamos hoy. Es imprescindible la existencia de pozos de potencial mayores, debidos a materia no bariónica, que fuera no relativista y se hubiera desacoplado del resto del Universo antes de que lo hiciera la radiación para que pudiera haber pozos de potencial mayores que los que muestran las fluctuaciones en la radiación CMB. Esto pone de manifiesto la necesidad de la existencia de la denominada *materia oscura fría* (Cold Dark Matter, CDM).

⁶El corrimiento al rojo, $z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}$, siendo λ_o y λ_e las longitudes de onda observada y emitida, respectivamente, es resultado de la expansión del Universo y, por lo tanto, se relaciona con el cambio en el factor de escala y el tiempo transcurrido, $R(t) = \frac{R(0)}{1+z}$, siendo $R(0)$ el valor actual.

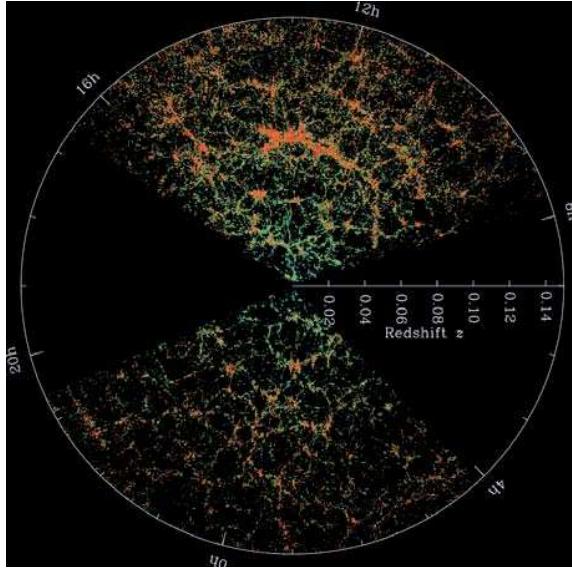


Figura 2: Corte de la distribución 3-D de galaxias obtenida por la Sloan Digital Sky Survey. Cada punto representa una galaxia y su color indica la edad de las estrellas que contiene (el rojo se utiliza para las estrellas más antiguas). Crédito: M. Blanton, the Sloan Digital Sky Survey Collaboration. (En color en la versión digital)

Las simulaciones a gran escala de la evolución de distintos modelos de Universo (con o sin materia y energía oscuras) van más allá de lo puramente cualitativo y permiten comparaciones cuantitativas con las observaciones astronómicas de la distribución de estructuras a gran escala, con la consiguiente puesta a prueba de dichos modelos. Recientemente se ha hecho pública la simulación de más alta resolución de formación de estructuras en un modelo de Universo que incluye una componente de materia oscura fría. Ha sido denominada *Millenium Run* y sólo se ha empezado a extraer parte de la información que contiene sobre la evolución del proceso de formación de estructuras y su distribución final. El acuerdo entre la simulación y los resultados observacionales es *asombroso* [7] (ver figura 3)⁷.

Estas observaciones, junto con los resultados de la medida de la anisotropía en la radiación CMB, han permitido establecer un modelo satisfactorio que explica la formación de estructuras en el Universo: el origen de las fluctuaciones primordiales en la densidad de materia-energía se atribuye a la expansión inflacionaria que convirtió fluctuaciones cuánticas en inhomogeneidades a escalas astrofísicas; después, la existencia de materia oscura fría (no relativista) permitiría explicar una formación de estructuras de abajo

⁷Se puede acceder a visualizar el resultado de la simulación en formato mpg en [8].

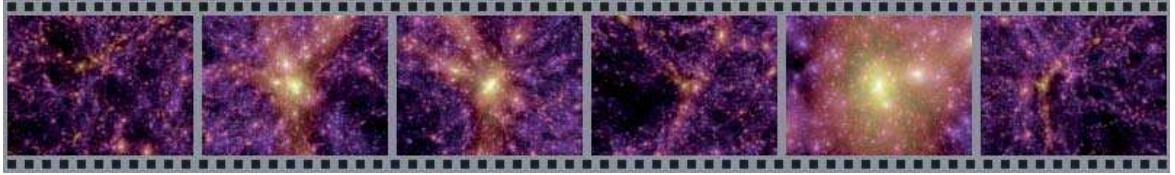


Figura 3: Fotogramas de uno de los vídeos elaborados a partir de la *Millenium Simulation* mostrando la distribución de materia oscura en el Universo en la actualidad. Esta simulación ha sido llevada a cabo con más de 10^{10} partículas. Permite visualizar la morfología de las estructuras formadas a diferentes escalas (desde varios Gpc hasta subestructuras del orden de $10\ kpc$). Crédito: Springel *et al.* [7, 8]. (En color en la versión digital)

hacia arriba como la aparentemente observada (primero se habrían formado las galaxias, luego los cúmulos y finalmente los supercúmulos). En este contexto, los neutrinos, cuya masa no nula ha sido recientemente confirmada (pero no determinada) por experimentos de oscilaciones de neutrinos [9], no pueden ser una contribución demasiado importante a la energía total del Universo. Con masas en el rango permitido por los experimentos, los neutrinos se comportarían como partículas relativistas (*materia oscura caliente*) cuyo flujo habría borrado las fluctuaciones de materia a escala galáctica y las estructuras se habrían formado preferentemente de arriba hacia abajo (primero los supercúmulos, luego los cúmulos y finalmente las galaxias).

2.3 La expansión del Universo y las supernovas de tipo Ia

Edwin Hubble descubrió en 1929 la expansión del Universo al establecer la correlación entre las distancias a las galaxias próximas y sus velocidades de recesión. El valor de la constante de Hubble, H_0 , es el ritmo de expansión del Universo en el momento actual y se obtiene del cociente entre la velocidad de recesión de una galaxia y su distancia. Estimar su valor fue durante décadas un problema clave para la Astronomía y Cosmología. Sólo recientemente, y gracias al telescopio espacial Hubble, las medidas experimentales (utilizando cinco métodos diferentes para la determinación de la distancia) convergen a un valor único: $H_0 = 72 \pm 2 \pm 7\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$ [10]. Los resultados derivados de WMAP, por ejemplo, dan un valor totalmente compatible de $H_0 = 71,9_{-2,7}^{+2,6}\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$ [6].

Pero surgió una sorpresa del estudio de las supernovas de tipo Ia (SNIa), candelas extraordinarias utilizadas para determinar las distancias a galaxias de muy alto corrimiento al rojo. Cuando se esperaba observar un frenado lento del ritmo de expansión a causa de la atracción gravitatoria que experimenta toda la materia se encontró lo opuesto: las supernovas más lejanas se ven más débiles de lo que les correspondería en un Universo con

ritmo de expansión constante, indicando que la expansión se está acelerando desde hace algunos miles de millones de años. Esta conclusión se apoya en observaciones de más de 200 supernovas de tipo Ia por parte del Hubble Space Telescope (*Supernova Cosmology Project*, SCP, y *High-z Supernova Search Team*, HST) [11] y sólo puede ser explicada mediante un efecto anti-gravitatorio con origen en alguna forma desconocida de energía que llamamos *energía oscura*.

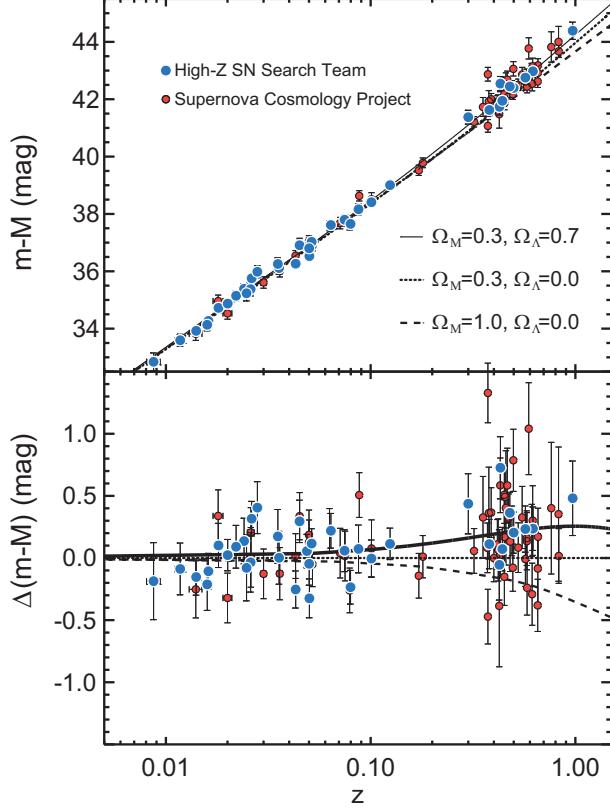


Figura 4: Diagramas de Hubble construidos con datos de supernovas a muy altos corrimientos al rojo observadas por las colaboraciones *Supernova Cosmology Project* y *High-z Supernova Search Team* [11]. Se muestran las predicciones de algunos modelos, incorporando o no energía oscura, para su comparación con las observaciones. Ω_M representa la contribución total de materia (en todas sus formas) a la densidad del Universo. Crédito: Colaboraciones SCP/HST. (En color en la versión digital)

Aceptando un Universo plano ($k=0$) los resultados derivados de las SNIa son compatibles con los modelos que incluyen $\Omega_M = 0,25 \pm 0,07 \pm 0,04$ y $\Omega_\Lambda = 0,75 \pm 0,07 \pm 0,04$ (ver figura 4). Su concordancia con los resultados para Ω y Ω_M derivados de las fluctuaciones en la radiación CMB representa un apoyo importante al marco cosmológico actual, ya que, en un caso, el resultado se deriva de observaciones del Universo reciente ($z < 1$) y en el otro, del Universo primitivo ($z \approx 1100$).

2.4 Los cúmulos de galaxias

La dinámica del cúmulo de galaxias de Coma permitió poner en evidencia en los años treinta la necesidad de grandes cantidades de materia oscura: la aplicación del teorema del virial de acuerdo con la materia luminosa observada y las velocidades de las galaxias medidas no permitía su estabilidad [1]. Desde entonces se han ido acumulando observaciones ópticas, de radio y de rayos X de numerosos cúmulos de galaxias, y se ha desarrollado el análisis de los efectos de lente gravitatoria que algunos cúmulos muy masivos producen en la luz emitida desde galaxias muy distantes en la misma línea de visión (ver figura 5). Estas observaciones han permitido determinar los cocientes entre la cantidad de materia normal y de materia oscura que contienen, indicando que aproximadamente un tercio de la materia del Universo es oscura, $\Omega_M = 0,3 \pm 0,04$ y apenas proporcionan información sobre la posible presencia de energía oscura, $\Omega_\Lambda = 0,75^{+0,48}_{-0,72}$ [12].

En particular, el estudio del *bullet cluster* ha aportado recientemente (agosto de 2006 [13]) datos relevantes sobre la dinámica de la materia contenida en los cúmulos al combinar la información que proporcionan las observaciones ópticas sobre la distribución de la materia luminosa, las observaciones de rayos X sobre la distribución de la materia bariónica y el análisis de los efectos de lente gravitatoria sobre la distribución de materia oscura. El *bullet cluster* es resultado de una colisión entre dos cúmulos y la distribución de materia oscura frente a materia bariónica que se observa sólo puede interpretarse si la materia oscura no se comporta en la colisión como la materia normal, no sufriendo efectos disipativos (ver figura 6).

En la figura 7 se pueden ver, en el espacio paramétrico $(\Omega_M, \Omega_\Lambda)$, las regiones compatibles con los resultados de las medidas en cúmulos, con los derivados del estudio de las supernovas Ia y con los de la radiación CMB. La compatibilidad de los resultados procedentes de indicadores cosmológicos tan diferentes apoya la credibilidad del marco cosmológico actual. Los resultados para los parámetros más importantes que se obtienen de la combinación de los datos de WMAP, los resultados de las supernovas de tipo Ia y las oscilaciones acústicas de bariones extraídas de la distribución de galaxias, son [6]: $\Omega = 1,0052 \pm 0,0064$, $\Omega_b = 0,0462 \pm 0,0015$, $\Omega_{dm} = 0,233 \pm 0,013$, $\Omega_\Lambda = 0,721 \pm 0,015$.

2.5 Las abundancias de los elementos ligeros y los cálculos de la nucleosíntesis primordial

La parte visible de la materia ordinaria contribuye como mucho al 1% del balance de energía y masa del Universo. El resto de la materia es oscura y sólo detectamos su presencia por sus efectos gravitatorios. Para estimar cuánta materia ordinaria hay en nuestro Universo se utilizan diferentes métodos que proporcionan una respuesta similar. Hasta disponer de las medidas de anisotropías en la radiación cósmica de fondo y las oscilaciones acústicas de bariones, el más preciso de todos ellos era el basado en la comparación de las

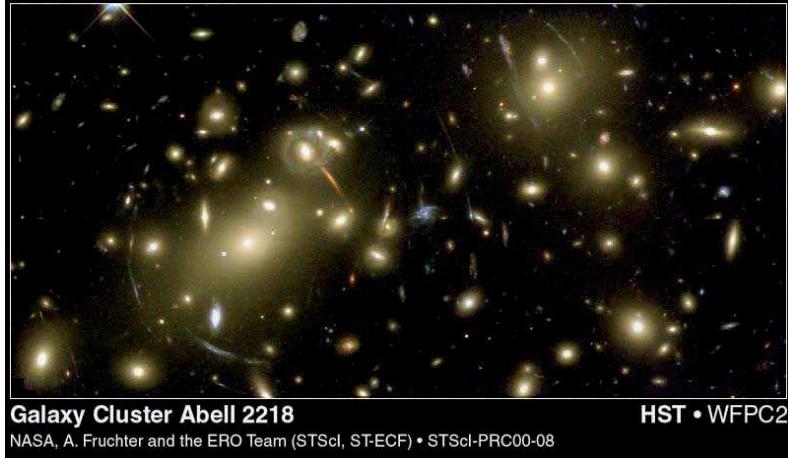


Figura 5: Fotografía tomada por el Telescopio Espacial Hubble del cúmulo de Abell 2218 en la que se pueden observar varias imágenes de la misma galaxia formadas por el efecto de lente gravitatoria. Crédito: NASA, A. Fruchter, ERO Team. (En color en la versión digital)

predicciones de las abundancias de los núcleos más ligeros, realizadas en el marco de los cálculos de la nucleosíntesis primordial, y las observadas en la actualidad para los mismos. En los primeros minutos tras el Big Bang se formaron, a partir de protones y neutrones, los elementos químicos hasta el Berilio. Las bases de los cálculos de la BBN fueron establecidas ya en 1948 [14] y sólo permiten reproducir las observaciones experimentales para valores muy acotados de la densidad de bariones, en torno a $(3,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-31} \text{ g cm}^{-3}$ (aproximadamente el 4% de la densidad crítica) [15]. Su compatibilidad con los resultados obtenidos a partir de las medidas de la radiación CMB resulta también un refuerzo notable al marco cosmológico mayoritariamente aceptado y proporciona una prueba adicional de la consistencia del modelo cosmológico y simultáneamente de la Astrofísica Nuclear y de Partículas, requerida en los cálculos BBN.

La existencia a escala cosmológica de materia oscura no bariónica está fuertemente apoyada por evidencias observacionales de índole muy diversa. El Universo compatible con dichas observaciones consta de cinco componentes diferentes: materia ordinaria o bariónica, fotones (CMB), neutrinos (tan abundantes como los fotones de la radiación CMB), materia oscura fría (CDM) y energía oscura (Λ). En la figura 8 se representa el reparto del presupuesto de materia y energía del Universo entre estas componentes que mejor reproduce las distintas evidencias experimentales interpretadas en el referido marco cosmológico estándar. A partir de aquí seguiremos tratando de la materia oscura fría y su

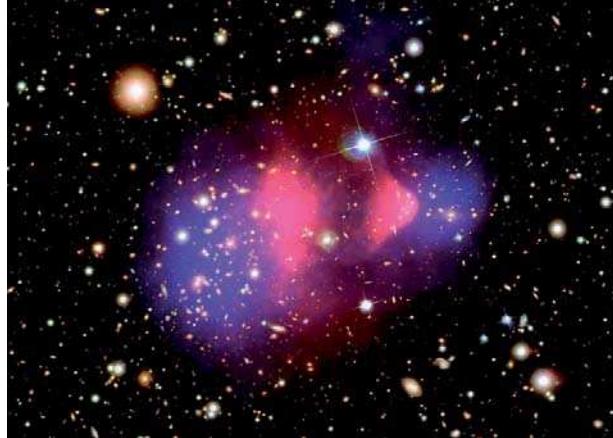


Figura 6: Imagen compuesta del cúmulo de galaxias 1E 0657-56, también conocido como *bullet cluster*, en la que se observa la distribución de materia visible (Hubble Space Telescope), la distribución de gas caliente en rosa (CHANDRA) y la distribución de materia oscura obtenida por el efecto de lente gravitatoria en azul. Crédito: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch *et al.*; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe *et al.*; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe *et al.* (En color en la versión digital)

detección; con respecto a la energía oscura, todavía hay poco que decir: su presión debe ser negativa pero ni siquiera sabemos si su densidad de energía es constante en el tiempo (*constante cosmológica*) o varía (*quintaesencia*).

Hay otras soluciones que pueden evitar la introducción de materia oscura en el modelo cosmológico. Entre ellas resulta obligado citar la posibilidad de una modificación a la dinámica newtoniana en el límite de aceleraciones débiles (del orden de 10^{-8} cm s $^{-2}$), teorías MOND, que produciría efectos capaces de reproducir las curvas de rotación galáctica observadas (ver sección 3) [16]. Sin embargo, parece cuestionable su capacidad para explicar el marco cosmológico completo [17], puesto que parece incompatible con los resultados de lente gravitatoria en cúmulos [18] y las recientes observaciones del *bullet cluster* [13]. Sus ecuaciones pueden ser derivadas a partir de la dinámica newtoniana clásica incluyendo la influencia gravitatoria de una componente de materia oscura [19], por lo que no se puede considerar una teoría totalmente independiente de la hipótesis de la existencia de materia oscura y es razonable que explique hechos que ella explica. En cualquier caso, no hay que descartar que estos nuevos ingredientes requeridos para encajar las observaciones en el marco cosmológico nos estén indicando que todavía no tenemos una teoría adecuada para la gravedad.

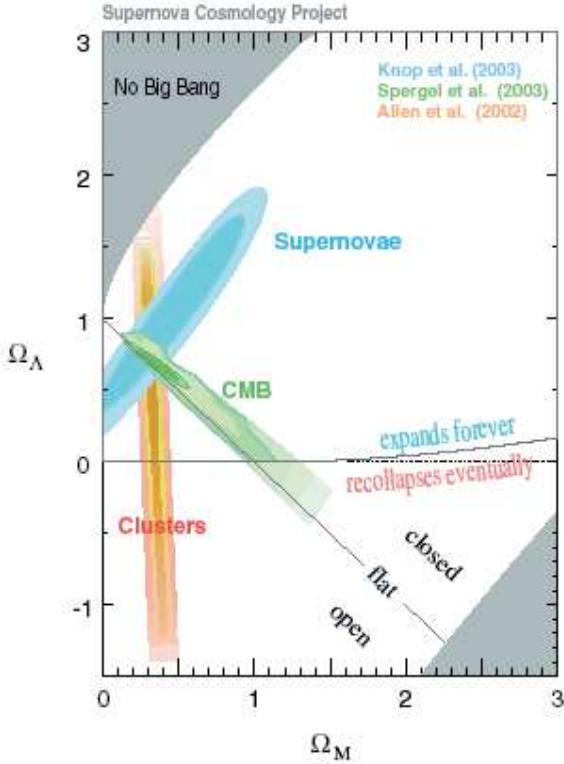


Figura 7: Límites obtenidos para las densidades de materia y de energía oscura con los datos de la radiación CMB, de las SNIa y de los cúmulos. La compatibilidad entre los resultados de tan diferentes indicadores cosmológicos resulta un apoyo importantísimo para el modelo cosmológico mayoritariamente aceptado. Crédito: Supernova Cosmology Project (SCP) Collaboration. (En color en la versión digital)

3 La materia oscura en las galaxias

Con respecto a la materia oscura, aparte de los argumentos que apoyan su existencia en base a las numerosas evidencias experimentales, es poco lo que podemos decir de ella y, en cambio, son numerosas las incógnitas que quedan planteadas, y que afectan de una forma fundamental a los esfuerzos encaminados a su detección directa en el laboratorio (a los que haremos referencia en la sección 5). Se van a considerar en esta sección y la siguiente dos de las más importantes: cuánta materia oscura se encuentra en las galaxias, en particular en la nuestra, y más concretamente en el entorno del Sistema Solar, y cuál es su naturaleza.

La materia oscura galáctica ha sido cuantificada por medio de las curvas de rotación de las galaxias espirales que se fueron acumulando desde los años setenta [2] y que mostraron velocidades de rotación constantes hasta distancias del orden de 30 kpc (ver figura 9).

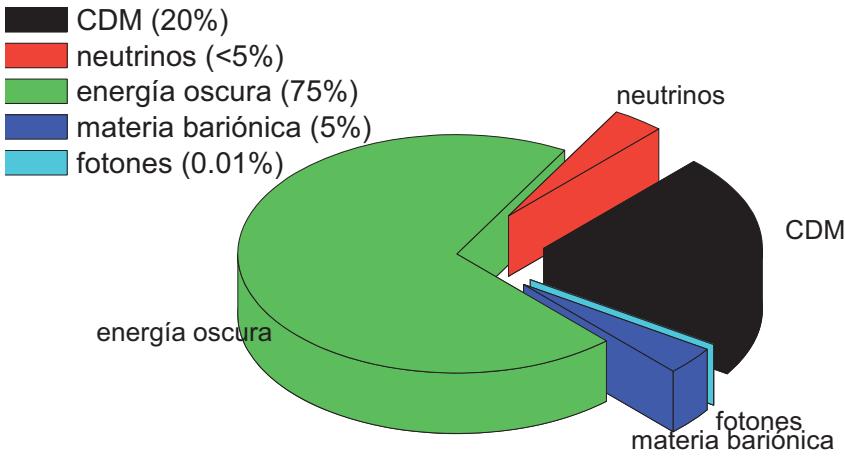


Figura 8: Posible reparto de materia y energía en el Universo entre las cinco componentes que requiere el modelo cosmológico estándar y que permite la correcta interpretación de todas las evidencias experimentales acumuladas (suponiendo $\Omega=1$). (En color en la versión digital)

Inicialmente estos resultados no se relacionaron con el problema identificado por Zwicky en los cúmulos [1] y la posible existencia de materia oscura, hasta que Ostriker y Peebles publicaron sus trabajos sobre la forma de evitar la inestabilidad de los discos galácticos mediante halos esféricos y masivos y su relación con el aumento de masa observado en función del radio [20].

Tradicionalmente esta materia oscura se ha considerado, por simplicidad, distribuida en halos isotermos, esféricos y sin rotación que se extienden hasta distancias del orden de 10 veces el radio galáctico y con perfiles de densidad $\propto r^{-2}$ para explicar las velocidades de rotación constantes fuera del radio visible de la galaxia. Sin embargo, recientemente, simulaciones mucho más completas de la evolución de las estructuras con una componente importante de materia oscura fría parecen indicar la plausibilidad de que los halos no sean esféricos ni isotermos: se plantean modelos *más reales* de halo axisimétricos, triaxiales, aplastados, con rotación, con subestructuras, etc. [21].

En el caso particular de nuestra galaxia, la Vía Láctea, la curva de rotación parece indicar que en el entorno del Sol la densidad de materia oscura se encontraría entre 0,2 y 0,4 GeV cm⁻³ (en adelante consideraremos como valor para dicha densidad $\rho_0 = 0,3$ GeV cm⁻³) y que los WIMPs gravitatoriamente ligados a la galaxia deberían moverse con velocidades del orden de las de rotación de las estrellas del disco (≈ 220 km s⁻¹). Usualmente se adopta, por simplicidad, una distribución de velocidades maxwelliana, con velocidad de escape en torno a 650 km s⁻¹, e isótropa en el sistema de referencia del halo. Sin embargo, no está descartado que el Sistema Solar esté atravesando en estos

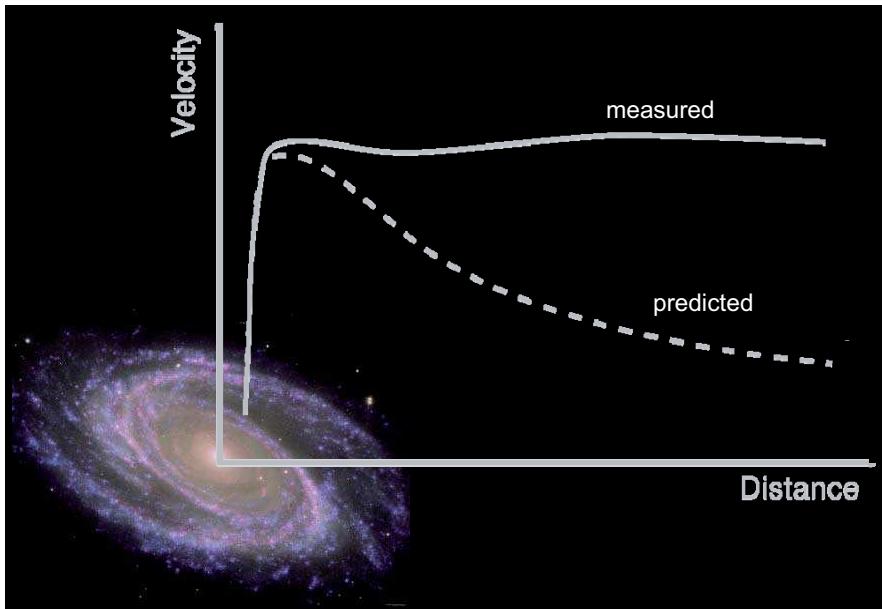


Figura 9: Representación de una curva de velocidades de rotación medida en una galaxia espiral frente a la predicha, en base a la materia visible que contiene. Las velocidades se mantienen constantes hasta distancias muy superiores al radio de la galaxia visible. (En color en la versión digital)

momentos una corriente de marea dejada atrás en su órbita por la galaxia enana SagDEG (Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy), descubierta en 1994 [22] y que está siendo destruida por el efecto de marea que le provoca la atracción gravitatoria de la Vía Láctea [23]. Dicha corriente de marea podría estar constituida mayoritariamente por materia oscura, implicando la posible existencia de subestructura en el halo galáctico y la posibilidad de que la densidad de materia oscura en nuestro entorno sea superior a la derivada de las curvas de rotación galácticas, así como que la distribución de velocidades de las partículas constituyentes de la materia oscura incluya flujos no isótropos.

4 La naturaleza de la materia oscura galáctica fría

Con respecto a la naturaleza de esta materia oscura galáctica fría resulta imprescindible buscar fuera del Modelo Estándar de la Física de Partículas para encontrar candidatos satisfactorios: masivos, débilmente interaccionantes, no bariónicos y estables (al menos con tiempos de vida del orden de la edad del Universo). Entre los candidatos preferidos debemos mencionar dos partículas hipotéticas propuestas en un contexto muy diferente del cosmológico, por lo que se consideran sólidamente fundamentadas desde el punto de vista teórico: el axión (que resolvería el problema de CP en la interacción fuerte) y el

neutralino (que en muchos de los modelos supersimétricos es la partícula supersimétrica más ligera, LSP⁸, estable si se conserva la R-paridad). La Supersimetría es una de las ampliaciones del Modelo Estándar de la Física de Partículas más atractivas [4]. Requiere la introducción de un amplio espectro de *nuevas* partículas, alguna(s) de las cuales podrían resolver el problema de la materia oscura. Como ejemplo, para los modelos supersimétricos CMSSM⁹ considerados en [24] se ha representado en la figura 10 la región de masas y secciones eficaces que corresponderían al neutralino.

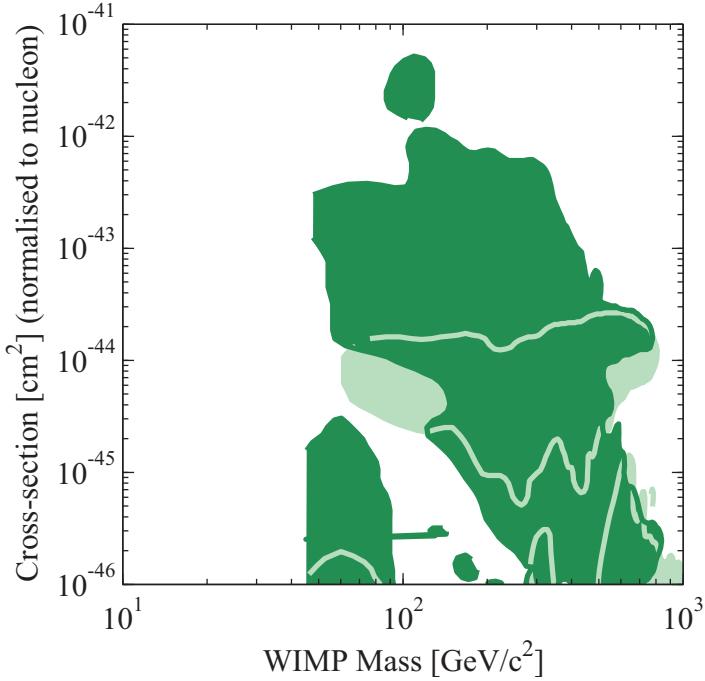


Figura 10: Diagrama (m, σ) para neutralinos en el marco de modelos CMSSM considerados en [24]. Crédito: R. Gaitskell, V. Mandic and J. Filippini (<http://dmtools.berkeley.edu/limitplots/>). (En color en la versión digital)

En caso de existir, estas hipotéticas partículas se habrían producido en los primeros momentos de vida del Universo en grandes cantidades y en muchos de los modelos teóricos habrían podido sobrevivir en número suficiente para explicar la materia oscura. Sus interacciones garantizan que en los procesos de formación de estructuras actuarían, en ambos casos, como materia oscura fría, no relativista, pese al rango tan diferente de masas que abarcan: los axiones desde unos meV hasta del orden del eV y los neutralinos de unos pocos a cientos de GeV.

⁸Lightest Supersymmetric Particle.

⁹Constrained Minimal Supersymmetric Standard Model.

A partir de aquí hablaremos de una forma genérica de WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) para referirnos a aquellos candidatos a la materia oscura fría similares al neutralino (con masas en el rango de 1 a 1000 GeV): masivos, neutros y débilmente interaccionantes, aunque no tienen por qué estar sujetos a las ligaduras que el marco supersimétrico impone a los neutralinos. Los esfuerzos experimentales dedicados a la búsqueda de los hipotéticos axiones galácticos y solares, que requieren técnicas diferentes de las utilizadas en la detección de WIMPs y que no van a ser revisadas en este trabajo, se pueden consultar, por ejemplo, en [25].

5 La detección de los WIMPs

Para la detección de los WIMPs supuestamente integrantes del halo galáctico se utilizan tanto métodos directos (mediante el retroceso nuclear que producen en su dispersión elástica con los núcleos de un detector utilizado como *blanco* en el laboratorio) como métodos indirectos (a través de los productos emitidos en su aniquilación en el halo galáctico o en el interior del Sol y la Tierra donde podrían quedar atrapados gravitacionalmente. En dicha aniquilación se emitirían fotones de alta energía, neutrinos, pares electrón-positrón, pares protón-antiproton, etc.).

En el ámbito de la detección indirecta se están alcanzando sensibilidades competitivas frente a las posibilidades que ofrece la detección directa, tanto en búsquedas de neutrinos de unos GeV procedentes del centro del Sol o la Tierra en los telescopios de neutrinos (ANTARES, ICECUBE, etc.), como en búsquedas de rayos gamma y rayos cósmicos procedentes del centro o el halo galáctico. En concreto, recientes observaciones de una línea gamma de 511 keV intensa procedente del *bulge* galáctico con el satélite INTEGRAL (INTERnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) sugieren la existencia de una fuente desconocida de positrones en la galaxia [26]. Entre las potenciales explicaciones para el origen de estos positrones hay que mencionar como posibilidad la aniquilación de partículas de materia oscura ligeras (1-100 MeV) en pares electrón-positrón [27]. Análogamente, medidas del experimento HEAT (realizadas en globos) del espectro de positrones cósmicos muestran un exceso en la región de 7-8 GeV que sería también compatible con la aniquilación de neutralinos en el halo galáctico [28]. Los experimentos en satélites que medirán con precisión los flujos de antiprotones y positrones en los rayos cósmicos pueden aportar nuevos datos relevantes para la resolución de este problema en el próximo futuro. En particular, el experimento PAMELA (en operación en un satélite ruso desde su lanzamiento en junio de 2006) y GLAST (Gamma Large Area Space Telescope)¹⁰, puesto en órbita en junio de 2008, se espera que aporten en los próximos años nuevos indicios de una posible señal indirecta de la existencia de la materia

¹⁰Recientemente renombrado como Fermi Gamma-ray Space Telescope.

oscura.

Por supuesto, en caso de existir, estas partículas podrían producirse en los grandes aceleradores para energías de colisión suficientemente elevadas. Hasta el momento no se ha observado ningún indicio de la producción de WIMPs en aceleradores, y, aunque de una forma fuertemente dependiente del modelo de WIMP considerado, con los datos existentes se pueden excluir, por ejemplo, neutralinos de masa inferior a 47 GeV [29]. En este aspecto, la reciente puesta en funcionamiento de LHC puede cambiar drásticamente el escenario que afrontamos, ya que la puesta a prueba de algunos modelos supersimétricos, por ejemplo, está entre sus objetivos principales.

En la detección directa los WIMPs depositan solamente unos pocos keV en un proceso de dispersión elástica que tenga lugar con uno de los núcleos del detector y el ritmo de interacción correspondiente es extremadamente bajo por lo que su observación experimental requiere detectores con muy bajos tanto fondo radiactivo como umbral en energías. Dado que la señal buscada no presenta un espectro con rasgos identificables frente al fondo radiactivo natural, la mayor parte de los experimentos sólo pueden dar resultados *negativos*, es decir, excluir candidatos para los que la señal debiera haber resultado visible por encima del fondo. Para una detección *positiva* los experimentos deben enfocarse hacia la búsqueda de señales distintivas (como son la modulación de periodo anual en los ritmos de interacción que corresponde a la variación de la velocidad relativa WIMP-detector como consecuencia del movimiento de la Tierra en torno al Sol o dependencias direccionales en los ritmos de retrocesos nucleares). Éste es un tema de gran actualidad debido a los resultados del experimento DAMA-LIBRA, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, que observa una señal positiva en el análisis de modulación anual en sus datos que solamente la materia oscura parece capaz de explicar [30, 31].

5.1 Características de la interacción y ritmos esperados

El flujo de WIMPs que atraviesa la Tierra, de acuerdo con los valores usuales para parámetros como la densidad y las velocidades cuadráticas medias de los WIMPs en el halo, depende de la masa del WIMP, siendo del orden de 10^8 a 10^{10} WIMPs $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para masas en el rango de 1 TeV a 10 GeV. A pesar de este elevado flujo, el ritmo de interacción esperado en un detector es muy pequeño, ya que la sección eficaz WIMP-núcleón debería ser inferior a 10^{-5} pb (ver figura 10) y generar ritmos inferiores a 1 cuenta $\text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$.

Para velocidades de los WIMPs en el rango considerado, el depósito energético se produce principalmente por dispersión elástica con los núcleos del detector y, de una forma general, la interacción del WIMP puede descomponerse en dos términos. Uno de ellos corresponde a interacciones independientes del espín (SI), para las que las amplitudes

de dispersión con los nucleones individuales se suman coherentemente y la sección eficaz nuclear es $\propto A^2$, siendo A el número másico del núcleo. El otro término, dependiente del espín (SD), corresponde a interacciones en las que el WIMP se acopla de forma efectiva al espín nuclear total. Dependiendo de la naturaleza del WIMP, por ejemplo de la composición del neutralino, puede predominar uno de los dos tipos de interacción o ser comparables ambas contribuciones. Debido a que en muchos modelos supersimétricos domina la interacción SI, se suele preferir como blancos núcleos con A grande, que incrementan la sensibilidad. En cualquier caso, resulta imprescindible explorar todas las posibilidades e interesan también aquellos blancos que incluyan núcleos con espín no nulo.

Un simple argumento cinemático indica que el máximo depósito de energía en una dispersión WIMP-núcleo resulta cuando el ángulo de dispersión en el centro de masas es igual a 180° . La energía de retroceso máxima impartida al núcleo en este caso es:

$$E_R^{max} = 2v^2 m_{WN}^2 / m_N \quad (4)$$

donde v es la velocidad de los WIMPs relativa al detector, m_N la masa del núcleo y m_{WN} la masa reducida del sistema WIMP-núcleo. Para una determinada masa del WIMP, esta energía máxima de retroceso, determinada mediante (4), se hace a su vez máxima cuando $m_N=m_W$, siendo su valor $\frac{1}{2}m_N v^2$. Para velocidades de los WIMPs relativas al detector de pocos cientos de km s^{-1} y masas del WIMP del orden de 100 GeV se obtienen valores para E_R^{max} inferiores a 100 keV.

El ritmo de interacción de los WIMPs en el detector en función de la energía depositada en forma de retroceso nuclear, se puede expresar como:

$$\frac{dR}{dE_R} = n_W N_N \int f(v) v \frac{d\sigma_{WN}}{dE_R} dv = \frac{\rho_0 m_{detector}}{2m_W m_{WN}^2} \int \frac{f(v)}{v} \sigma_{WN} dv \quad (5)$$

quedando en función de parámetros astrofísicos relacionados con el modelo de halo considerado (para los que existen estimaciones, aunque afectadas de importantes incertidumbres) y parámetros del modelo de WIMP, como la masa y su sección eficaz, totalmente desconocidos. En la figura 11 se pueden comparar los ritmos de detección esperados en un detector de yoduro de sodio para diferentes masas de WIMP y en distintas épocas del año (cambia la velocidad relativa WIMP-detector, como se verá más adelante).

La conversión de la energía de retroceso en energía visible depende del mecanismo de detección considerado. De una forma general, la respuesta a un determinado depósito de energía es diferente según cuál sea la partícula que ha interactuado. La señal visible (que puede ser ionización, en un detector semiconductor o fluorescencia, en un centelleador, por ejemplo) es usualmente mayor para depósitos energéticos causados por electrones que para los debidos a retrocesos nucleares de la misma energía. La calibración de los detectores se suele realizar con fuentes gamma, y los fotones al interactuar ceden su energía a

los electrones del blanco, por lo que hablaremos de la señal que producen en términos de energía equivalente de electrón (E_{ee} , que se suele expresar en keVee). Para poder convertir las energías *vistas* por el detector en energías de retroceso nuclear es preciso conocer el factor de eficiencia relativa (REF), definido como el cociente entre la señal producida por una partícula que deposita una energía E_{dep} y la señal producida por un electrón que deposita la misma energía .

$$E_R = \text{REF} \cdot E_{ee} \quad (6)$$

La mayoría de los detectores son menos eficientes en la conversión en señal visible de la energía depositada por retrocesos nucleares que por electrones de la misma energía ($\text{REF} < 1$), por lo que los espectros de retrocesos producidos por los WIMPs galácticos se observan a energías equivalentes de electrón claramente inferiores a los 100 keVee, haciendo imprescindible la disponibilidad de detectores con muy bajo umbral en energías.

5.2 Rechazo del fondo radioactivo

Las interacciones de los WIMPs son tan poco probables que los experimentos dedicados a búsqueda de materia oscura necesitan detectores masivos y/o largas exposiciones (suele utilizarse como parámetro el producto de la masa por el tiempo de medida, expresado en kg·día). Además resulta imprescindible la operación de dichos experimentos en condiciones de ultra-bajo fondo radioactivo. Los rayos cósmicos contribuyen en gran medida al fondo radiactivo en superficie, por tanto estos experimentos han de estar emplazados en laboratorios subterráneos, donde su flujo se reduce en varios órdenes de magnitud (ver sección 7).

Además, los detectores deben estar fabricados con materiales de la máxima radiopureza y adecuadamente apantallados de la radiactividad medioambiental mediante blindajes específicamente diseñados.

La componente mayoritaria del fondo radioactivo es la de origen β/γ , por tanto, para optimizar la sensibilidad de un experimento, es fundamental disponer de un mecanismo que permita distinguir retrocesos nucleares (como los producidos por neutrones o WIMPs) de retrocesos electrónicos (debidos a interacciones de electrones o fotones). Las técnicas de rechazo del fondo con más éxito en la actualidad se basan en detectores con un doble mecanismo de conversión de la energía depositada en señal visible. Cuando el factor de eficiencia relativa de cada uno de los sistemas de conversión es suficientemente distinto, la discriminación es muy eficiente incluso en la región de baja energía. Este sistema ha producido excelentes resultados con detectores criogénicos que, además de medir ionización o centelleo, detectan la energía depositada en forma de calor y en detectores que hacen uso de líquidos *nobles* (ver secciones 6.3, 6.4 y 8.3). El uso de estas técnicas ha permitido

reducir el fondo en estos experimentos en varios órdenes de magnitud y ha posibilitado alcanzar hoy en día las mejores sensibilidades en la detección directa de materia oscura.

5.3 Diagramas de exclusión y estudio de señales distintivas

El método utilizado normalmente para la obtención de resultados en los experimentos de detección directa es la comparación del espectro experimental con el espectro calculado para una población de WIMPs galácticos (en el marco de un determinado modelo del WIMP y del halo, haciendo uso de (5)). De esta comparación se deriva la exclusión de aquellos candidatos que hubiesen producido una señal superior al fondo observado, y se representan en el plano (m_W, σ) las regiones de parámetros compatibles con el fondo observado y las que pueden ser excluidas.

Para conseguir una identificación positiva de la presencia de materia oscura en los datos de un experimento es preciso buscar señales distintivas características de los WIMPs y que no comparten los posibles fondos radiactivos. En la literatura se han propuesto varias:

- La modulación diaria de la señal de WIMPs es ocasionada por el eclipse que produce la Tierra, en su rotación, al interponerse entre el detector y el viento de WIMPs. El flujo que llega al detector resulta atenuado con una periodicidad diaria y por lo tanto, los ritmos de detección deberían mostrar la correspondiente modulación. Se trata de un efecto muy pequeño para las secciones eficaces de los WIMPs viables [32].
- Los ritmos de interacción correspondientes a un determinado modelo de WIMP dependen del blanco utilizado y, por tanto, el uso de diferentes materiales en el mismo montaje experimental puede producir una identificación positiva [33], aunque las diferencias en los fondos intrínsecos de cada material pueden complicar el análisis. En particular, este análisis será muy útil para comprender el fondo de neutrones del experimento ya que las secciones eficaces de neutrones y WIMPs escalan de forma diferente con el núcleo blanco [34].
- La modulación anual en los ritmos de interacción de los WIMPs se basa en la variación de la velocidad relativa Tierra-halo (con periodicidad anual) debido al movimiento de traslación de la Tierra en torno al Sol. El efecto es pequeño, del orden del 7% (ver figura 11). Esta técnica fue propuesta por primera vez en los ochenta [35] y las primeras búsquedas de este efecto se realizaron en paralelo en el LSC y en Gran Sasso. El único experimento de búsqueda directa con una señal positiva hasta la fecha (DAMA-LIBRA [30], ver sección 6) está basado en esta técnica.

- Otra señal distintiva con origen galáctico que puede producir buenos resultados en el futuro es la direccionalidad del retroceso nuclear. La distribución de velocidades de los WIMPs en el sistema de referencia laboratorio no es isótropa, sino que tiene una dirección preferida, la correspondiente al movimiento del detector a través del halo, posibilitando la distinción entre la señal y los fondos si se dispone de un detector capaz de medir las direcciones de los retrocesos nucleares para energías < 100 keV (ver siguiente sección).

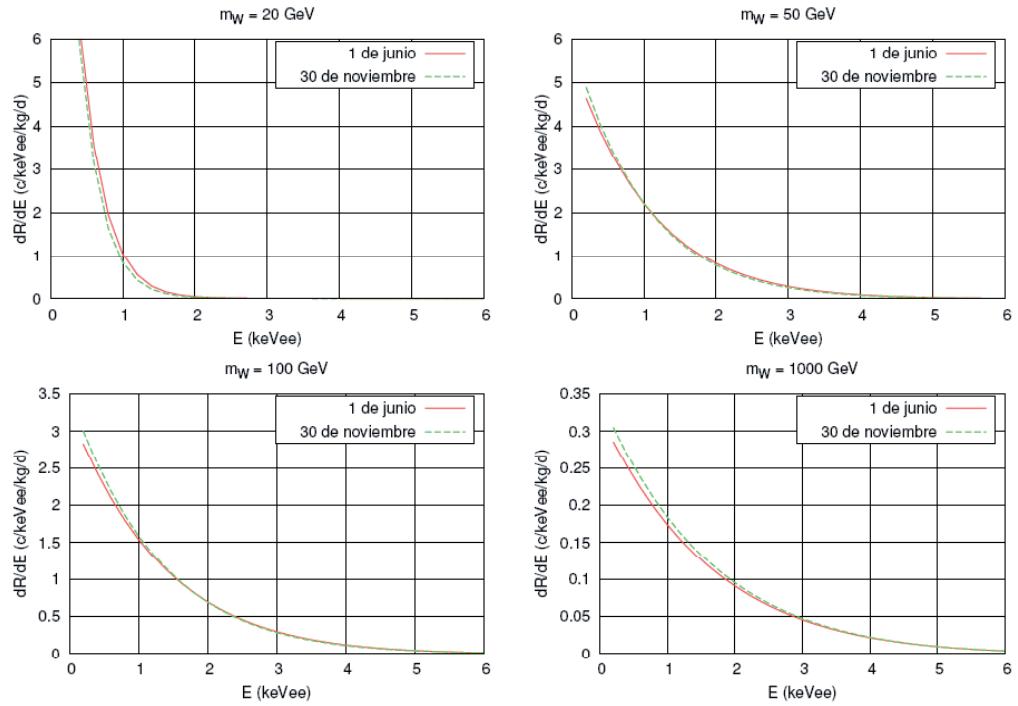


Figura 11: Ritmos de interacción de WIMPs de diferentes masas en un detector de NaI. Se puede observar la diferencia entre los ritmos esperados en junio y diciembre, a causa de la variación de la velocidad relativa WIMP-detector. Crédito: M. Martínez, Tesis Doctoral [36]. (En color en la versión digital)

6 Estado actual de la detección directa de WIMPs en el contexto internacional

Los primeros esfuerzos experimentales orientados a la detección directa de la materia oscura se remontan a la década de los ochenta, utilizando la tecnología de bajo fondo que había sido desarrollada para experimentos de búsqueda de la desintegración doble beta sin neutrinos en ^{76}Ge . Con detectores semiconductores de Germanio, en 1987, se excluyeron como candidatos a la materia oscura los neutrinos pesados de Dirac en uno de los primeros experimentos dedicados [37]. En la década de 1990 comenzaron a utilizarse los detectores centelleadores de NaI con el objetivo de buscar el efecto de modulación anual, gracias a la disponibilidad de detectores de gran masa. A finales de los 90 se incorporaron los detectores criogénicos a la detección directa de la materia oscura, para aprovechar su capacidad de discriminación del tipo de partícula para rechazar los fondos de origen β/γ y mejorar las sensibilidades alcanzadas. En esta primera década del siglo XXI han comenzado a utilizarse detectores basados en elementos nobles líquidos (Xe y Ar, principalmente) que conjugan la capacidad de discriminación y la gran masa de detección. Mirando hacia el futuro ofrecen grandes expectativas los detectores gaseosos (tipo TPC) con sensibilidad a la dirección del retroceso nuclear.

A continuación se hará una breve revisión de algunos de los experimentos más relevantes, agrupados según la tecnología que utilizan. En la figura 12 se han representado, con la única finalidad de permitir una mera comparación de sensibilidades, algunos de los experimentos más destacados de cada tipo. Hay que enfatizar que esta comparación es *dependiente de los modelos considerados para el WIMP y el halo* y que por lo tanto debe ser interpretada con precaución.

6.1 Detectores de ionización

El germanio natural fue el primer material utilizado en los experimentos de búsqueda de la materia oscura del Universo a causa de las altas prestaciones alcanzadas por los detectores semiconductores fabricados con este material. Originalmente, la motivación para la mejora continuada de la tecnología de los detectores semiconductores de germanio hiperpuro hay que buscarla en su aplicación a la investigación de la desintegración doble beta del ^{76}Ge . El progreso en las técnicas de fabricación permitió el crecimiento de cristales de gran tamaño y el desarrollo de técnicas específicas de bajo fondo aplicadas al proceso de crecimiento y a la fabricación por electroformación de los criostatos de cobre, alcanzando excelentes cotas de radiopureza.

Numerosos experimentos destinados a la búsqueda de la desintegración doble beta fueron reconvertidos a la búsqueda de materia oscura, como IGEX-DM [38, 39] (ver sección 8.1.2) y HDMS [40], otros fueron específicamente diseñados para ella, como

COSME [41, 42] (ver sección 8.1.1), otros experimentos hicieron uso de semiconductores de Silicio [43]. Durante mucho tiempo estos detectores fueron los más sensibles en la detección directa de la materia oscura¹¹.

En la actualidad están en preparación experimentos muy masivos con detectores de Germanio cuyo objetivo principal es el estudio de la desintegración doble beta sin neutrinos del ^{76}Ge , pero que también podrán colaborar en la búsqueda de la materia oscura fría, especialmente en el análisis de la modulación anual. A nivel europeo, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (Italia), destaca el proyecto GERDA [44], que contará con 100 kg de HPGe sumergido en un líquido criogénico. En el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) se proyectó el experimento GEDEON [45], con 40 kg de HPGe. En Estados Unidos el proyecto más importante en este campo es MAJORANA [46] que utilizará detectores muy segmentados de Ge hasta una masa total de 500 kg.

6.2 Detectores de centelleo

El NaI(Tl) es un material especialmente interesante para la búsqueda de materia oscura que comenzó en los años 90 a utilizarse en experimentos subterráneos dedicados, entre ellos destacan DM32 [47, 48] en el LSC, la colaboración BPRS [49] en Gran Sasso (parte de la cual integraría posteriormente la colaboración DAMA) o ELEGANTS-V [50] en Otto (Japón)¹². La colaboración UKDMC también instaló un experimento de NaI(Tl) en Boulby, Reino Unido: NAIAD. Después de algunos problemas de contaminación superficial en sus cristales, los últimos resultados presentados corresponden a una exposición de 44,9 kg·año, obteniendo buenas exclusiones, especialmente para interacción SD [52].

El resultado más interesante conseguido con este tipo de detectores, sin lugar a dudas, es el obtenido por los experimentos DAMA/LIBRA en Gran Sasso, siendo hasta la fecha el único resultado positivo en la detección directa de la materia oscura. Tras 7 ciclos anuales de medidas, en julio de 2002 finalizó la toma de datos de DAMA/NaI con una evidencia de modulación anual en los datos correspondientes a la región de 2 a 6 keVee, que según el modelo de halo y WIMP considerado favorece una determinada región en el espacio de parámetros (m, σ) [30]. En marzo de 2003 entró en operación el nuevo montaje DAMA/LIBRA, con 25 cristales de NaI(Tl) de 9,7 kg cada uno y un reacondicionamiento del montaje experimental de DAMA/NaI. En 2008 DAMA/LIBRA ha confirmado la modulación con un alto nivel de confianza y una exposición de 0,53 toneladas·año [31] (ver figura 13). Los resultados de este experimento han causado una gran controversia en el campo, al mostrarse una aparente inconsistencia con los resultados de otros experimentos que para ciertos modelos de WIMPs presentan una mayor sensibilidad. Sin embargo,

¹¹Hasta la aparición de los detectores criogénicos.

¹²En la actualidad están trabajando en el desarrollo de centelleadores de NaI(Tl) segmentados [51].

las incertidumbres en muchos de los parámetros que intervienen en el cálculo de la señal esperada para los WIMPs hacen que la comparación de los resultados obtenidos con blancos distintos sea *dependiente del modelo*. Para un reciente análisis de la cuestión se puede consultar la referencia [53].

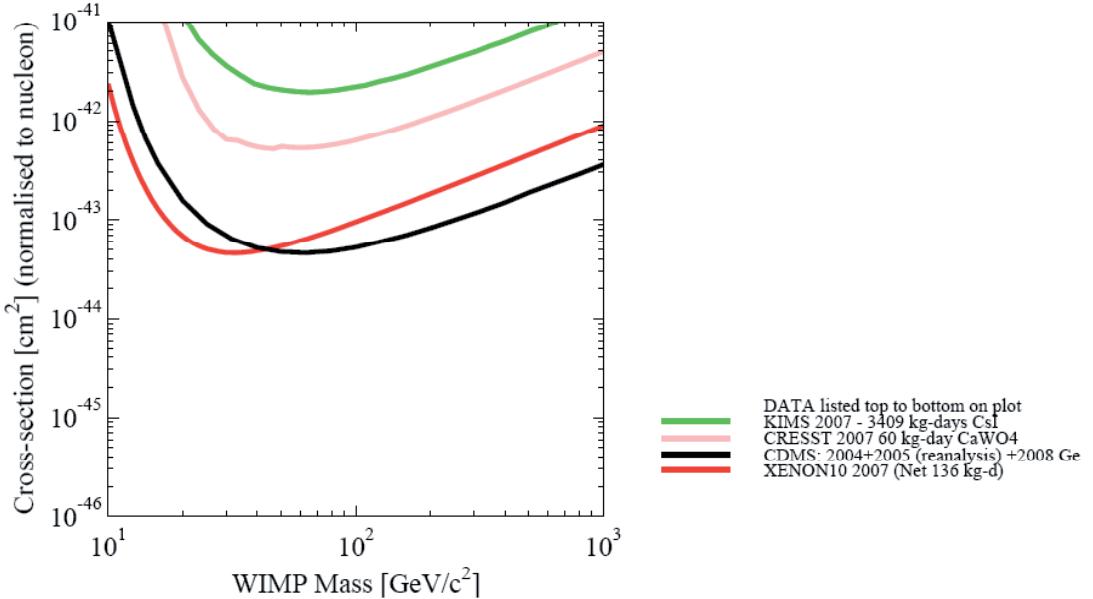


Figura 12: Comparación de las sensibilidades de diferentes experimentos dedicados a la detección directa de la materia oscura en un diagrama de exclusión (m, σ) para candidatos con interacciones independientes del espín. Crédito: R. Gaitskell, V. Mandic and J. Filippini, (<http://dmtools.berkeley.edu/limitplots/>). (En color en la versión digital)

Es importante destacar la reciente aplicación de centelleadores de CsI(Tl) a la detección directa de la materia oscura por parte de la colaboración KIMS [54]. Aunque este material no se usa normalmente en experimentos de bajo fondo debido a su elevada contaminación intrínseca en los isótopos ^{137}Cs y ^{87}Rb , se están creciendo cristales con niveles adecuados de radiopureza. Además, la posibilidad de aplicar técnicas de discriminación de sucesos por la forma de los pulsos y de analizar la modulación anual, gracias a la alta masa disponible, ha aumentado enormemente la sensibilidad del experimento y lo ha colocado entre los más y relevantes del contexto internacional actual.

6.3 Detectores criogénicos

Los detectores criogénicos aplicados a la detección de radiación y partículas han alcanzado un alto nivel de desarrollo. Se utilizan en experimentos que requieren muy alta resolución

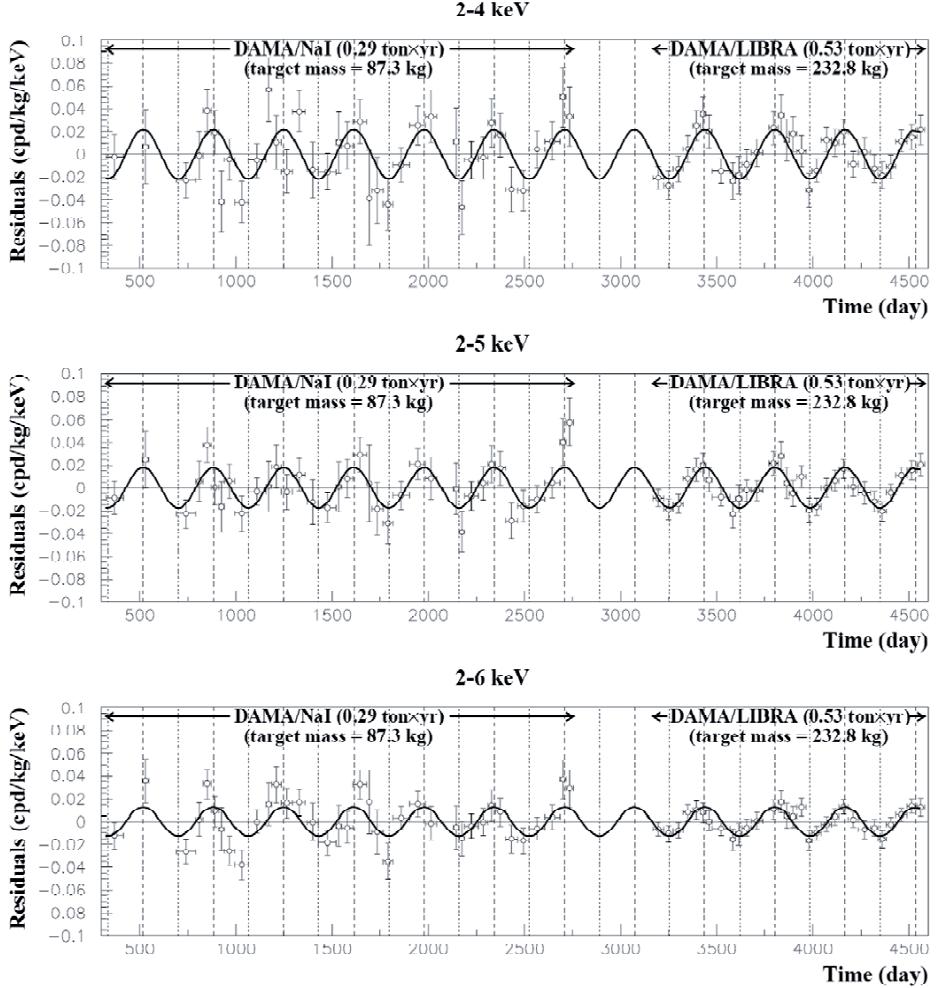


Figura 13: Modulación observada por los experimentos DAMA/LIBRA en las ventanas de baja energía, compatible con lo esperado para la señal debida a WIMPs del halo galáctico [31].

(análisis de rayos X, medidas de masas de proteínas, espectroscopía alfa, etc.), en el estudio de la desintegración doble beta de los núcleos o en búsquedas de materia oscura, por ejemplo; en muchas otras aplicaciones se está investigando su adaptación [55]. En particular, y gracias a la posibilidad de discriminación del fondo radiactivo que ofrecen, los detectores criogénicos (o bolométricos) han acaparado hasta muy recientemente los mejores límites en la búsqueda directa de materia oscura.

Un detector bolométrico consiste fundamentalmente en un absorbente, un sensor térmico y una fuga térmica a un baño a temperatura constante y se basan en la medida del incremento en la temperatura de un cristal tras un cierto depósito de energía causado por la interacción de una partícula. Un sensor adecuado medirá el incremento de temperatura, $\Delta T = \Delta E/C_v$, que produce en el cristal un depósito de energía ΔE .

Siendo el incremento de temperatura producido inversamente proporcional a la capacidad calorífica del sistema, C_v , es preciso utilizar materiales dieléctricos y diamagnéticos o superconductores muy por debajo de su temperatura crítica ¹³. Con respecto a los sensores capaces de medir tan pequeños cambios de temperatura, hoy por hoy, hay planteadas varias posibilidades: los termistores NTD de Ge o Si (que aprovechan la dependencia con la temperatura de la resistencia de materiales semiconductores fuertemente dopados por activación con neutrones, ya cercanos a la transición a conductor), los termómetros superconductores al filo de la transición de fase (que operan en medio de la transición de fase superconductor-normal aprovechando que la resistencia cae bruscamente a cero en torno a la temperatura crítica) y los sensores magnéticos (que constando de un material paramagnético en un campo magnético aprovechan la variación en magnetización que produce un cierto incremento de temperatura). Los tres proporcionan sensibilidades adecuadas para la búsqueda de materia oscura, que al requerir masas de detección grandes precisa la operación de los detectores a muy bajas temperaturas para minimizar la contribución de la capacidad calorífica. Usualmente se trabaja en el rango de 10-20 mK, lo que implica la operación del detector en el interior de un refrigerador de dilución, con el detector térmicamente acoplado a su cámara de mezcla. Por lo tanto se necesita disponer de una infraestructura de bajas temperaturas adecuada en el entorno del laboratorio (disponibilidad de líquidos criogénicos, por ejemplo). Asimismo, en el caso de experimentos que requieran ultra-bajo fondo radiactivo (por ejemplo búsqueda de sucesos raros como materia oscura o desintegración doble beta) hay que imponer condicionantes especiales relativos a la elección de los materiales utilizados en el diseño de todo el equipo empleado.

Los bolómetros ofrecen importantes ventajas frente a detectores convencionales. Los portadores de la energía son fonones (con energías del orden de μeV a temperaturas de unos 10 mK) que permiten alcanzar un umbral en energía muy bajo y muy buena resolución intrínseca gracias al alto número de portadores generados, al menos teóricamente¹⁴. Un amplio abanico de elementos que interesen como fuente o como blanco puede ser adecuadamente investigado en una configuración óptima fuente = detector. El único requisito será encontrar una matriz dieléctrica adecuada para dicho elemento con buenas propiedades mecánicas y térmicas. La mayor parte de la energía depositada en cualquier material se transforma en calor, lo que hace que estos detectores sean muy sensibles y

¹³En ellos, al ser $C_v \propto T^3$, a muy bajas temperaturas se garantizan sensibilidades a depósitos energéticos en el rango del keV, que corresponden típicamente a cambios de temperatura del orden de algunos μK

¹⁴En la práctica la posible existencia de estados metaestables, excitados por ionización por ejemplo, puede limitar considerablemente estas prestaciones ideales. Aún así en los últimos años se han obtenido resultados espectaculares con microcalorímetros, con valores cercanos a los límites termodinámicos para la resolución en energía, y próximos también a la anchura natural de las líneas observadas [56].

puedan alcanzar bajos umbrales energéticos. En particular, son mucho más eficientes que los detectores convencionales en la detección de retrocesos nucleares, ya que al tratarse de radiación no ionizante la mayor parte de la energía se convierte directamente en calor y, por lo tanto, es detectable¹⁵. Además, en ocasiones, permiten medir simultáneamente el incremento de temperatura en el cristal y otra magnitud proporcional a la energía depositada que haga uso de otra forma de excitación (como la ionización producida o la luz emitida); en este modo de operación *híbrido* se puede discriminar el tipo de partícula que ha depositado la energía comparando las dos señales registradas¹⁶. La detección híbrida ha permitido reducir los fondos radiactivos en varios órdenes de magnitud, discriminando el origen de cada depósito energético. Por todas estas ventajas los bolómetros se han incorporado rápidamente a la investigación en Física Nuclear y de Partículas, tanto en la búsqueda de materia oscura [58, 59, 60], como de la desintegración doble beta [61] y en otras aplicaciones como medidas de precisión, como por ejemplo, de la vida media y masa del neutrino en espectros beta [62].

Los bolómetros también tienen limitaciones en su aplicación: no resulta sencillo fabricar cristales de grandes dimensiones con buenas propiedades térmicas, resulta complicado garantizar la estabilidad en largos períodos de medida de un sistema criogénico completo (rellenado con líquidos criogénicos, vibraciones, etc.), se complica el diseño de un blindaje adecuado para un experimento de ultra-bajo fondo porque los refrigeradores tienen numerosos componentes imprescindibles y no radiopuros que deben ser adecuadamente apantallados y/o alejados de la parte sensible del detector, entre otras. Pese a estas limitaciones, hoy en día los bolómetros están empezando a alcanzar fondos comparables a los de los mejores detectores convencionales y se está invirtiendo mucho esfuerzo en su continuo desarrollo y mejora.

El experimento CDMS-II [58] en Soudan, U.S.A., mide simultáneamente ionización y calor con bolómetros de Ge y Si. Los datos acumulados por CDMS proporcionan una cota para WIMPs con interacciones independientes del espín de $4,6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ para masas de 60 GeV y dan la mejor sensibilidad por encima de 42 GeV. La colaboración CDMS planea trasladarse al Laboratorio Subterráneo de Sudbury, Canadá, e instalar allí SuperCDMS [63], con más masa de detección y mejores blindajes. Otro experimento basado en la adquisición simultánea de calor e ionización es EDELWEISS, en Modane, Francia [59].

Otra posibilidad para discriminar el fondo es la medida simultánea de luz y calor, ha-

¹⁵El factor de eficiencia relativa entre retrocesos nucleares como los producidos por WIMPs y sucesos con origen β/γ , a diferencia de lo que sucede para los detectores convencionales, resulta compatible con $Q = 1$ en detectores bolométricos [57].

¹⁶Aprovechando que según el poder de frenado de la partícula incidente serán muy diferentes las fracciones de energía invertidas en ionización o centelleo, mientras que la señal calorimétrica (aparentemente) es la misma.

ciendo uso de bolómetros centelleadores como se lleva a cabo en el marco del experimento ROSEBUD en el LSC [64] y se detallará en la sección 8. Como ya se ha comentado, este experimento utiliza varios materiales blanco distintos en un mismo montaje experimental y está llevando a cabo una interesante labor de I+D con bolómetros centelleadores de LiF, Al₂O₃, SrF₂ y BGO, por ejemplo. Esta misma tecnología es la que utiliza el experimento CRESST [60], en Gran Sasso, que ha logrado unos límites muy competitivos tras dos meses de medidas con un cristal de CaWO₄ de 300 g y con 12 keVee de umbral energético. Recientemente se ha planteado la posibilidad de realizar un gran proyecto europeo que combine la tecnología de EDELWEISS y la de CRESST: EURECA (EURopEan Calorimeter Array) [65].

Dentro de los experimentos criogénicos también hay que mencionar el proyecto CUORE, en Gran Sasso, [61] que aún siendo su objetivo la búsqueda de desintegración doble beta, también puede contribuir a la detección directa de la materia oscura si consigue un buen umbral en energía. Actualmente se encuentra en fase de prototipo (CUORICINO), pero cuando complete su montaje contará con 1000 bolómetros de TeO₂ de 760 g cada uno.

6.4 *Elementos nobles líquidos*

El Xe líquido (LXe) es un material atractivo como blanco para la detección directa de WIMPs: es un centelleador intrínseco, de elevado número másico (favorable para candidatos con interacciones independientes del espín) y que no cuenta con isótopos radioactivos de larga vida media (se pueden conseguir blancos de alta radiopureza). Hay varios experimentos que, en la actualidad, hacen uso del LXe como blanco. ZEPLIN, en Boulby, utiliza 3,2 kg de LXe, tiene su umbral en 2 keVee y REF para retrocesos nucleares de 0,20. Tras una exposición de 293 kg·día y haciendo uso de una discriminación estadística de sucesos por la forma de los pulsos, ZEPLIN ha alcanzado buena sensibilidad a candidatos a la materia oscura, aunque su recolección de luz es poco eficiente [66]. La colaboración DAMA cuenta con un detector de LXe en Gran Sasso [67] y la colaboración japonesa XMASS ha instalado 100 kg de LXe en Kamioka para la detección de neutrinos solares y planea ampliar su masa hasta 1 tonelada pudiendo colaborar en la búsqueda de materia oscura. Pero en la actualidad, la línea dominante en el campo se basa en la combinación de la fase líquida con una fase gaseosa (LXe/GXe), que permite la detección simultánea de centelleo e ionización y, por tanto, el rechazo del fondo β/γ . La segunda fase de ZEPLIN (ZEPLIN-II) se basa en esta técnica y ya está proyectada la tercera fase ZEPLIN-III [68]. La colaboración XENON [69] en Gran Sasso, que también utiliza LXe/GXe, ha presentado recientemente los resultados de un prototipo de 10 kg (XENON10) que, tiene previsto ampliar a 100 kg y 1 tonelada (XENON100 y XENON1T). XENON10 ha utilizado 5,4 kg de Xe y 58,6 días de datos acumulados para obtener una cota para WIMPs

con interacciones independientes del espín de $4,5 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ para masas de 30 GeV, siendo el experimento más sensible para masas inferiores a 42 GeV.

Este modo de operación es común a experimentos con Argón líquido como WARP [70] (100 l de LAr en el laboratorio de Gran Sasso) o ArDM [71] (que pudiera ser instalado en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc), cuyo objetivo es disponer de una masa de detección de 1 tonelada.

6.5 Detectores gaseosos (TPC)

La posibilidad de identificar la dirección de los retrocesos nucleares y, por lo tanto, de alguna manera reconstruir la dirección de movimiento de la partícula incidente, permite utilizar esta técnica de detección para obtener una señal característica atribuible a los WIMPs del halo que permita concluir su presencia en los datos al no resultar fácilmente enmascarada por efectos debidos al fondo radiactivo. Estos detectores permiten además una discriminación uno a uno de sucesos de origen β/γ frente a retrocesos nucleares gracias a la diferencia en las trazas que cada uno de ellos genera. La colaboración DRIFT está desarrollando un detector de estas características, cuyo primer prototipo (DRIFT-I) fue instalado en Boulby, con una cámara de 1 m³ llena de gas CS₂ a baja presión [72]. La segunda fase DRIFT-II está actualmente en operación [73].

En el caso de identificar la presencia de WIMPs en sus datos, esta nueva generación de detectores podrá proporcionar además información adicional sobre la distribución de velocidades de los WIMPs en el halo oscuro, por ejemplo, ya que la distribución angular de sucesos en el detector puede diferir sensiblemente según el modelo de halo considerado [74].

6.6 Otras técnicas

Otras técnicas están siendo aplicadas en la detección directa de la materia oscura en experimentos de menores dimensiones. Todas ellas tienen interés, complementan los esfuerzos antes mencionados y pueden dar resultados importantes para ciertos candidatos a WIMPs, como, por ejemplo, para aquellos que interactúan mediante acoplamiento al espín del núcleo. Así, por ejemplo, el experimento COUPP, con una exposición acumulada de 52 kg·día (el detector consiste en 1,5 kg de CF₃I) ha sido capaz de alcanzar sensibilidades competitivas con las de DAMA-LIBRA para WIMPs con interacciones dependientes del espín gracias a su elevado contenido en Flúor (el ¹⁹F es un blanco con una elevada figura de mérito para este tipo de interacciones). COUPP utiliza un líquido sobrecalentado en el que la interacción de un WIMP es capaz de producir la nucleación de una única burbuja de gas. El experimento puede discriminar el tipo de partícula responsable de la interacción ya que los fotones o electrones no llegan a producir la nucleación al no depositar una

densidad de energía suficientemente grande y los neutrones producirían varias burbujas debido a su sección eficaz de interacción mucho mayor [75].

En esta misma línea se pueden mencionar los detectores de gotas supercalentadas (SDD: Superheated Droplet Detectors) como SIMPLE [76] y PICASSO [77]. Otro experimento paralelo, ORPHEUS, utiliza gránulos superconductores sobrecaleidos que transitan al estado normal cuando un WIMP interacciona en su interior [78].

Otro tipo de técnica novedosa, especialmente interesante también para WIMPs con interacciones dependientes del espín, se basa en utilizar como blanco ^3He superfluido a una temperatura de $100\mu\text{K}$ [79]. La energía depositada en una interacción produce excitaciones elementales (cuasipartículas) que modifican la anchura del pico de resonancia de un hilo superconductor inmerso en el seno del superfluido. ULTIMA es uno de los experimentos aprobados por el comité científico del Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

7 El Laboratorio Subterráneo de Canfranc

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) es una instalación única en España, reconocida recientemente como instalación singular, que permite la realización de experimentos de búsqueda de fenómenos poco probables gracias al entorno de ultra-bajo fondo radiactivo que ofrece. Desde finales de los años ochenta el Laboratorio de Canfranc ha desarrollado una amplia actividad en el campo de la Física Subterránea y los experimentos realizados en él han competido con los llevados a cabo en otras instalaciones similares a nivel internacional entre las que hay que destacar, a nivel europeo, el Laboratorio Nacional del Gran Sasso en Italia, el laboratorio de Boulby en el Reino Unido y el Laboratorio de Modane-Fréjus en Francia y, fuera de Europa, los laboratorios de Homestake y Soudan en los Estados Unidos, el de Kamioka en Japón y el de Sudbury en Canadá.

Hasta fechas recientes, la gestión y mantenimiento de esta instalación subterránea ha sido asumida por el grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza, hecho que por supuesto ha implicado un esfuerzo añadido al puramente científico pero que, por otro lado, ha dado un especial protagonismo al papel desempeñado por el grupo de la UZ en el marco de las colaboraciones internacionales en las que ha participado para la realización de experimentos en la vanguardia de la Física Subterránea.

7.1 Antecedentes

En 1985 el grupo de Física Nuclear y Astropartículas (entonces llamado grupo de Física Nuclear y Altas Energías) de la Universidad de Zaragoza examinó diferentes emplazamientos subterráneos que permitieran la realización de experimentos de búsqueda de sucesos poco probables. Los dos mejores candidatos considerados fueron el túnel ferroviario del Somport, en Canfranc (Huesca), que cruza la frontera España-Francia y que desde 1970

está en desuso, y una mina de sal en Remolinos (Zaragoza), todavía en operación. Finalmente fue elegido el túnel del Somport por sus mejores condiciones ambientales (ausencia de polvo en suspensión y buena ventilación natural). A partir de este momento (1986) comenzaron las tareas de acondicionamiento ya que el emplazamiento carecía de cualquier tipo de infraestructura que permitiera su utilización como laboratorio. Se acondicionaron dos salas de apenas 10 m^2 cada una de ellas a 780 m de la entrada del túnel por el lado español, cubiertas por un espesor de roca equivalente a 675 m de agua (m.w.e.), denominado Laboratorio 1 en la figura 14. Posteriormente se instaló un módulo prefabricado reforzado de unos 15 m^2 sobre las vías al lado de las dos salas.

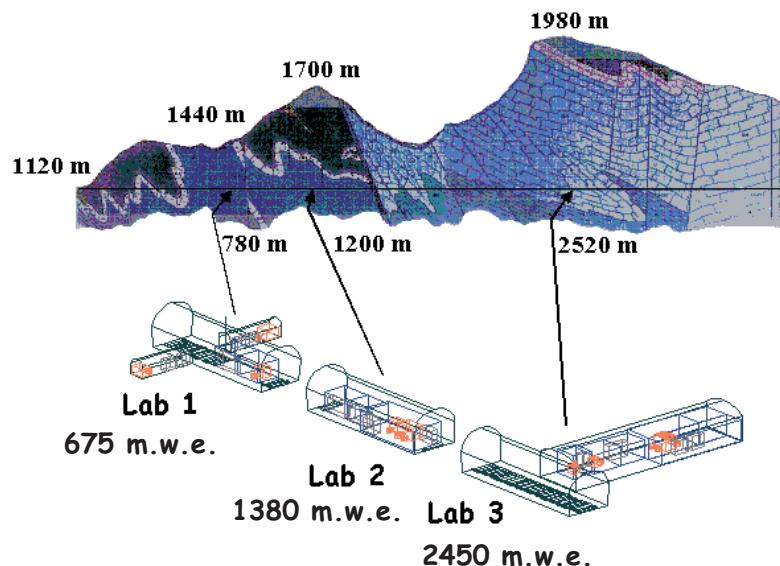


Figura 14: Esquema de localización de las distintas salas experimentales habilitadas en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc indicando las correspondientes distancias medidas desde la boca española del túnel (a la izquierda en la representación) y el recubrimiento medio de roca (en metros equivalentes de agua, m.w.e.). El Laboratorio 3 sigue en uso en la actualidad y se aprovecha del máximo recubrimiento de roca que permite el perfil orográfico. (En color en la versión digital)

En 1988, como resultado de una colaboración con la Universidad de Carolina del Sur (USC) y el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), llegó a Canfranc el primer detector de ultra-bajo fondo: un detector de germanio hiperpuro. Fue dedicado inicialmente a la medida de materiales y en 1989 fue utilizado en el primer experimento del Laboratorio Subterráneo de Canfranc: el detector de germanio rodeado por una corona de 14 centelleadores de yoduro de sodio se dedicó a la búsqueda de la desintegración doble beta

del ^{76}Ge . Posteriormente se amplió la colaboración USC/PNNL/UZ a la realización de otros experimentos, orientados en dos direcciones fundamentales: estudio de los procesos doble beta en detectores de germanio y detección directa de la materia oscura galáctica.

En 1991 se instaló sobre las vías del tren un nuevo módulo prefabricado de 27 m^2 , que se unió al que ya estaba operativo y todo el conjunto fue desplazado a una nueva localización a 1200 m de la boca española del túnel, bajo 1380 m.w.e. (tratando de mejorar el apantallamiento de los rayos cósmicos y por lo tanto las condiciones de bajo fondo). Una vez acondicionado constituyó el denominado Laboratorio 2 (ver figura 14).

En 1994 se planteó la posibilidad de ampliar las instalaciones aprovechando la realización de las obras de perforación del túnel de carretera del Somport, en el marco del proyecto de autovía Somport-Sagunto, cuyo trazado es casi paralelo al del antiguo túnel de ferrocarril. La Dirección General de Carreteras de la Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes del Ministerio de Transporte ejecutó a su cargo las obras de excavación y adecuación de un nuevo laboratorio de 118 m^2 a 2520 m de la entrada española y bajo 2450 m.w.e. (el máximo cubrimiento de roca que la orografía del terreno permite a lo largo del túnel, ver figura 14). El Laboratorio 3 estuvo operativo en 1995 (ver figura 15 para el detalle de su distribución interior). Este nuevo laboratorio supuso en su día un salto cualitativo tanto en disponibilidad de espacios como en cubrimiento de roca y, por lo tanto, en apantallamiento de los rayos cósmicos. En la figura 16 se puede ver la dependencia del flujo de muones cósmicos con la profundidad, en m.w.e.; en ella se han marcado las posiciones de los más importantes laboratorios subterráneos en el contexto internacional, entre ellos el Laboratorio 3 del LSC. Los módulos prefabricados fueron dedicados a otros usos en el exterior.

Entre los experimentos que han sido llevados a cabo en el Laboratorio 3 podemos destacar: IGEX, IGEX-DM, COSME, KRIPTON, AMBAR, DM32, ROSEBUD y las fases iniciales de otros que están en preparación como ANAIS o NEXT. En la sección 8 resumiremos los objetivos y principales resultados de aquellos experimentos dedicados a la detección directa de la materia oscura galáctica en las instalaciones del LSC.

7.2 *Perspectivas*

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc ha comenzado recientemente una nueva etapa y ha dado un salto realmente importante que le va a permitir superar la que ha sido su principal limitación frente a otras instalaciones subterráneas: sus reducidas dimensiones. Con motivo de la excavación de galerías de evacuación del túnel de carretera del Somport (uniendo el túnel de carretera con el túnel de ferrocarril en desuso) que han hecho del mismo uno de los túneles más seguros de Europa, se planteó un ambicioso proyecto de ampliación de las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Las obras se

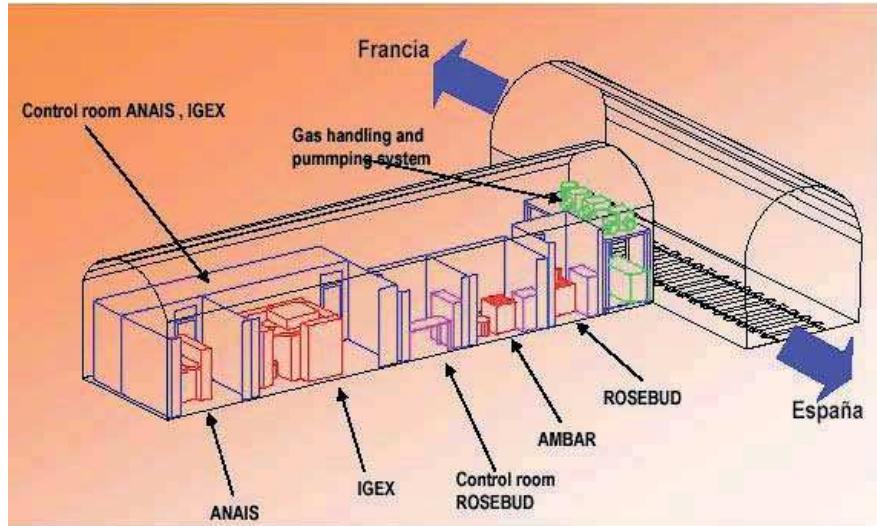


Figura 15: Localización de los diversos experimentos en el Laboratorio 3 del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. En total dispone de unos 100 m^2 útiles y sigue alojando en la actualidad los experimentos de detección directa de materia oscura, ANAIS y ROSEBUD. (En color en la versión digital)

llevaron a cabo a lo largo de 2004 y se extendieron hasta finales de 2005. La financiación de la obra ha correspondido al Gobierno de Aragón y al Ministerio de Educación y Ciencia (ahora Ciencia e Innovación) haciendo uso de fondos FEDER. El Laboratorio fue inaugurado el 27 de marzo de 2006 por Dña. María José San Segundo (Ministra de Educación y Ciencia), D. Marcelino Iglesias (Presidente de la Comunidad Autónoma de Aragón) y D. Felipe Pétriz (Rector de la Universidad de Zaragoza). Sin embargo, importantes problemas estructurales detectados en marzo de 2007 han paralizado la puesta en marcha del laboratorio y, en el momento de redactar este trabajo, todavía no se han acometido las reformas requeridas, por lo que el grupo de la UZ sigue desarrollando sus actividades en las antiguas instalaciones del LSC (Laboratorio 3).

La puesta en marcha de estas nuevas instalaciones va a suponer un lógico cambio cuantitativo en espacio disponible, contará con unos 600 m^2 útiles en la sala experimental principal¹⁷ y del orden de 1000 m^2 distribuidos en zonas especialmente diseñadas para talleres, sala limpia, laboratorio de ultra-bajo fondo radiactivo y almacén, por ejemplo (ver figura 17). Además, la puesta en marcha de las nuevas instalaciones conlleva un cambio sustancial en la gestión del laboratorio. Ya está nombrado un comité científico internacional que decidirá, en base a criterios científicos, los experimentos que podrán ser

¹⁷Esta sala está orientada hacia el CERN para posibilitar la operación de experimentos de detección de haces de neutrinos CERN-Canfranc.

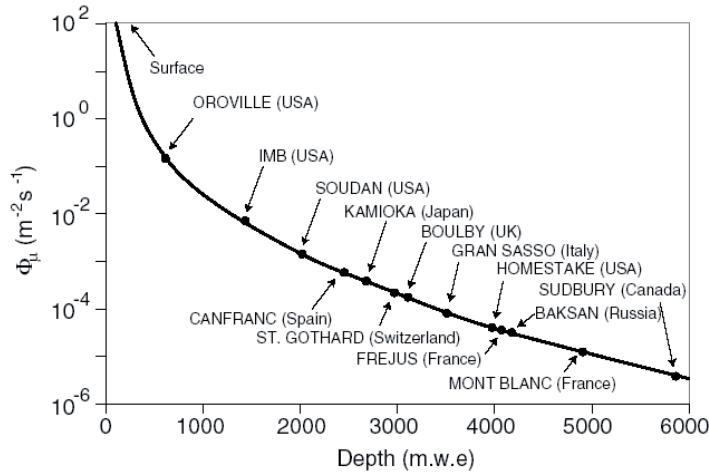


Figura 16: Dependencia del flujo de muones con la profundidad (expresada en metros equivalentes de agua). Se indica la posición del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (Laboratorio 3) junto a las más importantes instalaciones subterráneas a nivel internacional.

instalados en él. En lo que respecta al grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la UZ, las tareas de mantenimiento del laboratorio ya no recaerán en sus miembros, sino en el personal propio del LSC, al mismo tiempo que no se garantiza espacio para sus propuestas en las nuevas instalaciones¹⁸.

8 Esfuerzos experimentales desarrollados en Canfranc para la detección directa de la materia oscura

En la figura 18 se muestran de forma esquemática las distintas técnicas de detección utilizadas en el LSC y los distintos materiales utilizados como blanco en la búsqueda de la materia oscura. A continuación se expondrán brevemente las principales líneas de trabajo seguidas desde finales de los años ochenta y los resultados más relevantes obtenidos.

8.1 Detección de materia oscura con detectores semiconductores de germanio

Como ya se ha comentado en la sección 6 el germanio natural fue el primer material utilizado en los experimentos de búsqueda de la materia oscura y a finales de los ochenta la tecnología de fabricación de detectores HPGe (High Purity Germanium) garantizaba excelentes cotas de radiopureza. En este contexto se planteó la colaboración entre la Uni-

¹⁸Excepto para aquellos experimentos en los que ya estaba comprometido el grupo en el momento de firmarse el consorcio gestor del LSC.

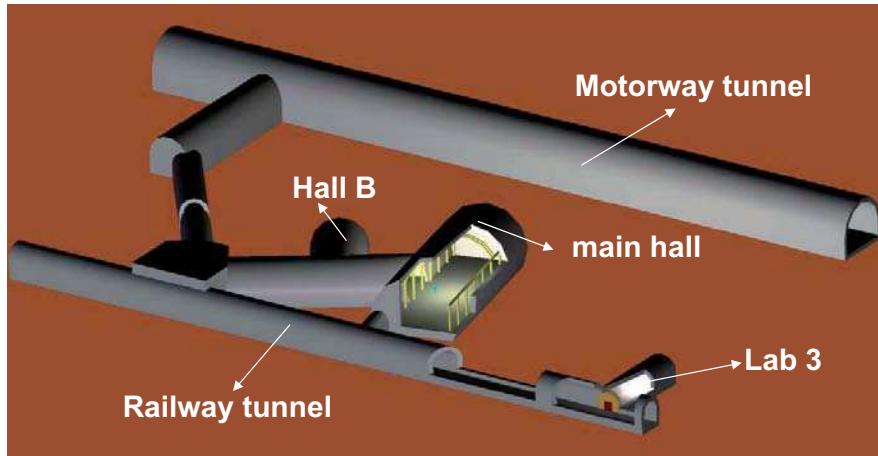


Figura 17: Croquis de las nuevas instalaciones del LSC junto al todavía en uso Laboratorio 3. (En color en la versión digital)

versidad de Zaragoza, el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) y la Universidad de Carolina del Sur (USC). En el PNNL se disponía en ese momento de la tecnología más avanzada para la fabricación de criostatos de cobre y detectores de germanio hiperpuro y, en el marco de la referida colaboración, se desarrolló un detector con muy bajo umbral en energía, específicamente diseñado para su utilización en la búsqueda de materia oscura. Además, los grupos de USC y PNNL ya tenían algunos de sus detectores de germanio en operación en el Laboratorio de Homestake (USA). La colaboración planteada debía aprovechar la disponibilidad de detectores similares en dos laboratorios diferentes (fondos diferentes, efectos sistemáticos diferentes, etc.). Esta colaboración se ha mantenido, y en ocasiones ampliado, en todos los experimentos que usan esta tecnología de detección en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc a lo largo de los años, y a los que se irá haciendo referencia a continuación.

8.1.1 EL EXPERIMENTO COSME

Fue el primer experimento dedicado a la búsqueda de materia oscura en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. El detector fue especialmente fabricado para este experimento y optimizado para la detección de depósitos de baja energía. Se trata de un detector de germanio natural con una masa activa de 234 g. Con un umbral de detección de 1,6 keV y 0,43 keV de resolución (FWHM) a 10,3 keV fue en su momento el detector de germanio dedicado a la detección de materia oscura con mejor umbral en energías. Se instaló en el Laboratorio 1 del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (a 675 m.w.e.) con un blindaje de 10 cm de plomo antiguo, 20 cm de plomo de baja actividad, una funda

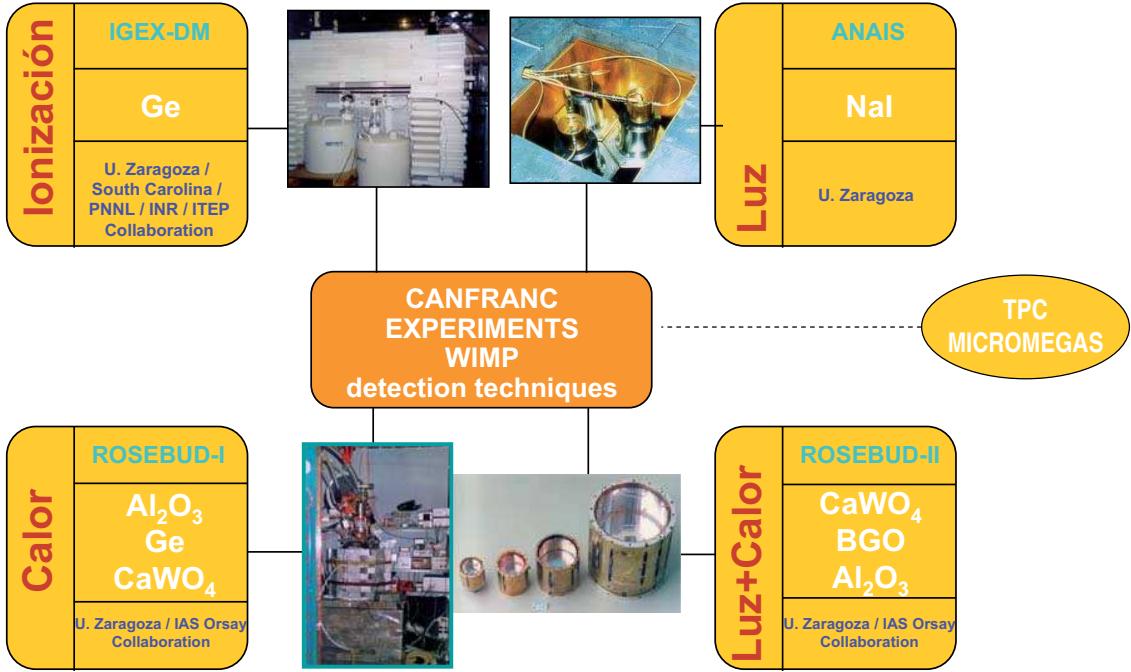


Figura 18: Resumen de las distintas técnicas de detección y materiales utilizados como blanco en la búsqueda de materia oscura en el LSC. (En color en la versión digital)

de PVC herméticamente cerrada con sobrepresión de N₂ gaseoso evaporado de un dewar para evitar la penetración del radón en el interior del blindaje, 1 mm de cadmio y 20 cm de parafina.

Tras una fase inicial destinada al estudio de la excitación cosmogénica de isótopos de corta vida media producida en el detector durante su fabricación (en superficie) y traslado de los E.E.U.U. a España (por avión), comenzó la toma de datos definitiva del experimento en junio de 1990 extendiéndose hasta junio de 1992. En total se contabilizaron 13404 horas efectivas de medida, que corresponden a una exposición de 130,7 kg·día. El fondo radiactivo conseguido fue de ≈ 9 sucesos keV⁻¹ kg⁻¹ día⁻¹ en la región entre 2 y 5 keV y de ≈ 1 suceso/keV/kg/día entre 15 y 20 keV. Del análisis de los datos de este experimento se extrajo importante información, no sólo para la exclusión de candidatos a la materia oscura (comparando la señal esperada con el límite superior al espectro de fondo obtenido)¹⁹ que era el principal objetivo del experimento [41, 42], sino también para la estimación de las contribuciones de isótopos activados cosmogénicamente, para dar las mejores cotas en su día a la estabilidad del electrón [80] y para determinar la eficacia

¹⁹ Así por ejemplo se pudieron excluir como candidatos a la materia oscura del Universo neutrinos de Dirac entre 9 GeV y 2 TeV.

del sistema de limpieza de radón empleado (y que posteriormente se aplicaría a todos los experimentos de similares características y objetivos).

Para identificar positivamente la presencia de la señal de materia oscura en los datos se requiere el análisis de señales distintivas (ver sección 5) como las modulaciones anual y diaria en los ritmos de detección. La modulación anual, debida a la variación de la velocidad relativa WIMP-detector a lo largo del periodo de revolución de la Tierra en torno al Sol, supone un efecto en la señal del orden del 5-10%. A causa de ello, se requieren experimentos de gran masa para ser sensibles a ella y el grupo se planteó utilizar otro tipo de detector que fuera más fácilmente escalable (ver sección 8.2). La modulación diaria es debida al eclipse del viento solar por la Tierra en grado variable como consecuencia de la rotación terrestre (los WIMPs pueden interaccionar con los núcleos que encuentran al atravesar la Tierra, alterando su flujo y distribución de velocidades). La latitud de Canfranc no es óptima para estudiar este efecto y por eso se planteó un experimento similar a COSME en Argentina [81].

El detector COSME fue reinstalado en 1998, en mejores condiciones experimentales, en el Laboratorio 3 del LSC (bajo 2450 m.w.e. en lugar de los 675 m.w.e. del Laboratorio 1 donde estuvo instalado en un principio). El blindaje de plomo fue mejorado (se añadieron 10 cm), se minimizó el espacio interno accesible al radón (haciendo uso de una pieza de plomo antiguo especialmente diseñada para las dimensiones de detector) y se colocó un voto activo de centelleadores plásticos en anticoincidencia para minimizar la posible contribución originada por el flujo residual de muones cósmicos capaces de penetrar hasta la profundidad del laboratorio. A todas estas mejoras del entorno experimental se añadió la reducción del fondo interno del cristal (que habiendo estado almacenado en subterráneo durante todo este tiempo no sólo no sufrió activación cosmogénica sino que fue desactivándose de aquellos contaminantes excitados durante el transporte de E.E.U.U. a España). El resultado final fue una reducción de un orden de magnitud en el fondo del experimento en la región de baja energía. El umbral en energías conseguido fue de 2,5 keV.

Esta reducción en el fondo permitió, con una exposición de 72,8 kg·día, mejorar las cotas obtenidas en el espacio paramétrico (m, σ) de los WIMPs [82, 83]. Sin embargo, el principal objetivo de su instalación fue otro: la búsqueda de axiones solares mediante su conversión Primakoff en fotones en el cristal de germanio de forma coherente para ciertos ángulos de incidencia [84].

8.1.2 EL EXPERIMENTO IGEX-DM

Aunque el objetivo del experimento IGEX (International Germanium EXperiment) fue la detección de la desintegración doble beta sin neutrinos del ^{76}Ge , campo en el que fue

uno de los dos experimentos líderes a nivel mundial [85, 86], uno de sus detectores fue dedicado, en el mismo montaje en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, a la búsqueda de materia oscura. El detector denominado RG-2 con una masa activa de unos 2 kg fue utilizado con un sistema de adquisición específico para la toma de datos en la región de baja energía tratando de reducir al máximo su umbral de detección. Con una exposición de 60 kg·día, un umbral de 4 keV y una resolución de 0,8 keV en la línea de 75 keV de los rayos X del plomo, se obtuvo un fondo radiactivo de 0,3 sucesos $\text{keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ entre 4 y 10 keV y 0,07 sucesos $\text{keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ entre 10 y 20 keV. Los diagramas de exclusión derivados permitieron mejorar los de la colaboración Heidelberg-Moscow [86] en la región de masas más interesante y se convirtieron en los más restrictivos sin hacer uso de substracción de fondos [38].

A continuación se implementó en el sistema de adquisición de datos la digitalización de los pulsos en la región de baja energía y se desarrolló una técnica de discriminación entre los sucesos debidos a ruido y los ocasionados por el fondo radiactivo (o WIMPs) en el detector mediante una técnica que usa las transformadas wavelets de los pulsos digitalizados. También se completó el blindaje de neutrones hasta 40 cm con ladrillos de polietileno borado y tanques de agua borada. Debido a que los otros detectores que compartían blindaje con RG-2 (RG-1, RG-3 y COSME) fueron extraídos del blindaje (ver figura 19), se pudo completar con plomo adicional el hueco interior que antes ocupaban y se pudo cerrar mejor el blindaje de neutrones al no estar los dewars de dichos detectores impidiéndolo. Con estas modificaciones se mejoró el fondo en la región más próxima al umbral en energías, obteniéndose 0,21 sucesos $\text{keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ entre 4 y 10 keV y 0,10 sucesos $\text{keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ entre 10 y 20 keV. En estas condiciones se obtuvieron 80 kg·día de datos que permitieron mejorar sensiblemente las exclusiones en el espacio paramétrico de los WIMPs y penetrar por primera vez en la región singularizada por la evidencia de modulación anual de la colaboración DAMA sin hacer uso de substracción de fondos [39].

8.2 Detección de materia oscura con centelleadores de yoduro de sodio

El yoduro de sodio dopado con Talio es un material centelleador con excelentes prestaciones para su uso en la búsqueda de materia oscura: se pueden fabricar cristales de gran tamaño, la producción de luz por unidad de energía depositada es grande y permite discriminar el tipo de partícula que ha hecho el depósito de energía en el detector mediante el estudio de la forma de los pulsos. Además, tanto el yodo como el sodio (ambos con un contenido isotópico 100% de núcleos con espín no nulo) son especialmente indicados para la búsqueda de WIMPs con interacciones dependientes del espín. Por todo ello y posibilitado por la disponibilidad de 14 centelleadores de yoduro de sodio de 10,7 kg cada uno de ellos en Canfranc (y que se habían utilizado con anterioridad en otros experimen-

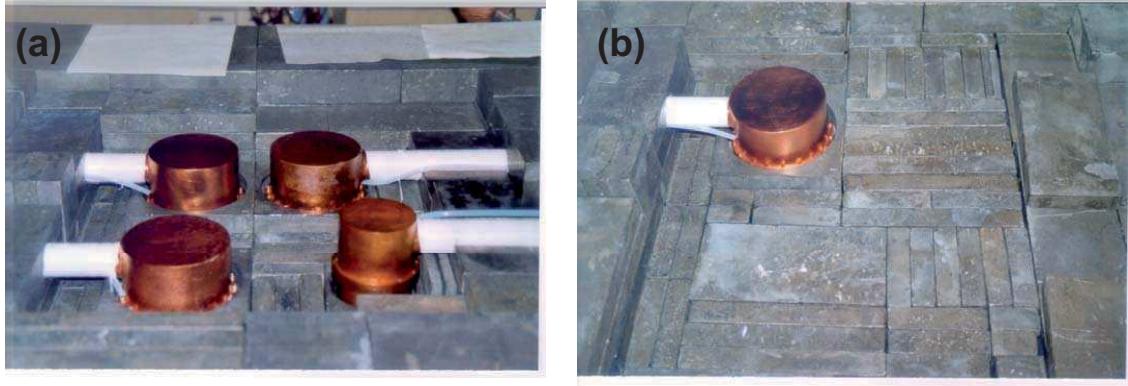


Figura 19: (a) Detalle de la parte interna del blindaje de tres de los detectores de IGEX y COSME. (b) Detalle de la parte interna del blindaje del detector RG-2 durante la toma de datos de IGEX-DM. (En color en la versión digital)

tos [87, 88]) se planteó un experimento de detección directa de materia oscura con ellos a comienzos de los noventa. El interés de este tipo de blanco para la búsqueda de materia oscura ha cobrado un mayor interés desde los primeros indicios de evidencia de modulación anual en los datos de baja energía obtenidos con este tipo de detectores por parte de la colaboración DAMA [30] en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso. Estos datos han sido recientemente confirmados por la misma colaboración (DAMA-LIBRA) [31].

8.2.1 EL EXPERIMENTO DM32

El experimento DM32 fue pionero en el análisis de la modulación anual en la señal de materia oscura. Utilizando 3 de los 14 detectores disponibles (32,1 kg de masa efectiva), fue planteado como experimento piloto para establecer la sensibilidad de estos detectores en la búsqueda de materia oscura y la viabilidad de un futuro experimento que permitiera aprovechar toda la masa disponible.

Los tres centelleadores estaban rodeados por un blindaje consistente (de dentro hacia fuera) de un promedio de 6 mm de cobre OFHC, 20 cm de plomo de baja actividad, una funda de PVC con sobrepresión de N₂ gaseoso evaporado de un dewar, 1 mm de cadmio y 20 cm de parafina (ver figura 20). El dispositivo experimental se instaló en Canfranc, en el Laboratorio 1, a 675 m.w.e. y se almacenaron 4613,6 kg·día de datos útiles entre mayo de 1993 y diciembre de 1994, con un umbral de unos 8 keV y un fondo radiactivo promedio en la región de baja energía de unos 10 sucesos keV⁻¹ kg⁻¹ día⁻¹.

Los datos de este experimento fueron utilizados para excluir parte del espacio paramétrico (m, σ) de los WIMPs por el método convencional de comparar el límite superior al fondo

medido con la señal esperada para cada candidato. Se consideraron los dos escenarios límite: interacción pura independiente del espín y pura dependiente del espín, para presentar los resultados. La estabilidad de las condiciones de operación y la elevada masa de DM32 posibilitaron el análisis de la modulación anual en la señal de materia oscura. Para ello, se estudiaron los residuos Junio-Diciembre, se estudiaron parámetros estadísticos (como el significado estadístico de la modulación) y la transformada coseno de la distribución temporal de los datos experimentales en la ventana de energías escogida, tratando de encontrar el mejor método para determinar la sensibilidad del experimento a una posible señal modulada. La ausencia de indicios de presencia de modulación en los datos llevó a mejorar en casi dos órdenes de magnitud las exclusiones obtenidas por el método convencional para interacciones tanto dependientes como independientes del espín [47, 48].



Figura 20: Blindaje del experimento DM32: tres detectores de NaI(Tl) en el Laboratorio 1 del LSC con el objetivo de estudiar la modulación anual en los ritmos de interacción. (En color en la versión digital)

8.2.2 EL EXPERIMENTO ANAIS

El experimento ANAIS (Annual modulation with NaIIs) es un proyecto que trata de aprovechar toda la masa de yoduro de sodio disponible en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc y la experiencia acumulada por el grupo de Física Nuclear y Astropartículas en el trabajo con este tipo de detectores y en el análisis de la modulación anual en los ritmos de detección de la materia oscura galáctica. A causa del resultado positivo obtenido por el experimento DAMA-LIBRA (en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, Italia) y del escepticismo de la comunidad científica respecto al mismo, es necesario un experimento

de control con la misma técnica y el mismo material blanco para confirmar la evidencia o analizar posibles efectos sistemáticos de forma independiente al análisis realizado por DAMA-LIBRA. ANAIS cumpliría esta misión perfectamente como se refleja en el informe de ApPEC sobre el futuro de la Física de Astropartículas en Europa [89].

Partiendo de los resultados del experimento DM32 se pudo concluir que la mayor parte del fondo observado podía ser atribuido a contaminaciones de ^{40}K y ^{210}Pb en materiales próximos a los cristales (como la carcasa de acero, los fotomultiplicadores, soldaduras en el divisor de tensión, material reflectante, etc.) o en los propios cristales de yoduro de sodio [47]. El objetivo inmediato de ANAIS fue la reducción del fondo radiactivo junto con la mejora del umbral en energías (un punto clave para ser competitivo con el experimento DAMA-LIBRA).

En primer lugar se reemplazó la base de los fotomultiplicadores (que incluye el divisor de tensión) por otra sin soldaduras y fabricada en teflón (para reducir su contaminación) y, en la cual, todos los componentes electrónicos estuvieran alejados ≈ 1 m del cristal y fotomultiplicador. Asimismo se desarrolló un procedimiento de análisis de la forma de los pulsos a baja energía para discriminar los sucesos con origen en el fotomultiplicador (rápidos) de aquéllos con origen en el cristal (con las constantes de tiempo típicas de la fluorescencia en yoduro de sodio). Con estas dos mejoras implementadas se montó un dispositivo experimental consistente en un único cristal pero en las mejores condiciones de fondo posible (cambios principales con respecto a DM32 fueron el emplazamiento en el Laboratorio 3 con menor flujo residual de muones cósmicos a causa de la mayor cobertura de roca, el empleo de plomo antiguo de unos 2000 años de antiguedad con muy bajo contenido en ^{210}Pb y el uso de vetos activos para eliminar sucesos debidos a la cascada que un muón podría producir en el material del blindaje). Este experimento consiguió reducir el umbral en energías de 8 a 4 keV y el fondo en la región de baja energía de unas 10 a 4 cuentas $\text{keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ [90]. Aún así las principales contaminaciones del detector siguen presentes en el fondo (mostrando ser internas al cristal o muy próximas a él) en concordancia con la interpretación de los resultados del experimento DM32 [48].

En la actualidad ANAIS está enfocado en varias líneas de trabajo paralelas con el mismo objetivo final: alcanzar un grado de sensibilidad suficiente para llevar a cabo un experimento de control de la evidencia de DAMA sobre la observación de modulación anual en sus datos. Obviamente, se plantea como un experimento a largo plazo y que requiere una gran masa de detección en el que la estabilidad de las condiciones experimentales resulta fundamental. El estudio de la modulación anual requiere estudiar varios ciclos anuales, y exposiciones de por lo menos 500 kg·años.

Con el objetivo de comprender y reducir el fondo radiactivo del experimento se decidió modificar uno de los 14 detectores disponibles. Se han llevado a cabo modificaciones estructurales, sustituyendo algunos de los materiales por otros de bajo fondo especialmente

seleccionados y reemplazando algunos de los componentes originales por otros diseñados en Zaragoza. Se ha sustituido el fotomultiplicador por uno de bajo fondo y se ha acoplado una guía de luz, produciéndose una notable reducción en el fondo radiactivo en la región de media y alta energía. La escasa mejora conseguida en la región de baja energía es compatible con el hecho de que los contaminantes responsables de la misma se encuentran muy próximos o en el propio cristal de NaI. A continuación el detector fue abierto y despojado de su carcasa de acero inoxidable y reflectantes internos, que han sido sustituidos por otros especialmente diseñados a base de materiales de gran radiopureza: teflón y cobre OFHC. Se acoplaron dos fotomultiplicadores (con y sin guías de luz) y todo el conjunto se instaló dentro de una caja de cobre hermética para evitar que la humedad ambiente pudiera dañar el cristal de NaI, fuertemente higroscópico. A este dispositivo se le denominó el Prototipo II (ver figura 21) y permitió investigar el comportamiento del cristal a muy baja energía, caracterizándolo con fuentes gamma por debajo de 150 keV hasta 6 keV. Se ha discriminado el ruido procedente de los fotomultiplicadores, lo que ha permitido reducir el umbral hasta 2 keV (midiendo en coincidencia) [91, 36, 92]. No se pudo estudiar adecuadamente el fondo en la región de baja energía a causa de la presencia de una contaminación importante en ^{232}Th en las soldaduras de la caja de cobre.

En pruebas realizadas en un tercer prototipo se puso de manifiesto la presencia de una población de sucesos a baja energía que mostraban una fluorescencia más rápida que la esperada para el yoduro de sodio. Estos sucesos, que empeoran las prestaciones de los detectores cerca del umbral, fueron identificados en un banco de pruebas en Canfranc como centelleo del cuarzo natural utilizado para las ventanas ópticas. Como consecuencia, en el Prototipo IV, en preparación, las ventanas de cuarzo natural serán sustituidas por ventanas de cuarzo sintético, que ha probado no centellear en los test realizados en el banco de pruebas.

Se ha trabajado asimismo en la puesta a punto de técnicas de discriminación del fondo radiactivo por la forma de los pulsos, ya que el tiempo de vida media asociado a la fluorescencia excitada en el proceso de interacción depende de la naturaleza de la partícula responsable del depósito energético. Por el momento, el análisis se ha llevado a cabo en la región de alta energía. Su finalidad era tanto la puesta a punto de la técnica de análisis (programas de tratamiento de los pulsos, algoritmos de selección, criterios de rechazo, parámetros de la adquisición, etc.) como una estimación de la contaminación interna de los cristales en los isótopos integrantes de las cadenas naturales mediante la discriminación de los depósitos de energía debidos a partículas alfa de aquellos ocasionados por fotones o electrones. Los resultados obtenidos son compatibles con una contaminación importante de ^{210}Pb distribuido en el volumen de los cristales de NaI, que produce una contribución importante al fondo en la región de baja energía en torno a 50 keV. Se ha observado una gran variabilidad en las contaminaciones de los cristales estudiados y que las cadenas



Figura 21: Proceso de montaje de uno de los cristales de 10,7 kg de NaI como Prototipo II en los laboratorios de la Universidad de Zaragoza para su posterior instalación en el LSC. Cualquier operación que implique el contacto del cristal con la atmósfera debe ser evitada y por eso se ha trabajado en una caja de guantes especialmente diseñada para ANAIS. (En color en la versión digital)

naturales aparecen con el equilibrio roto en todos los cristales medidos hasta la fecha [93].

Por otro lado y, también en paralelo, se ha adquirido un cristal de nueva manufactura de la empresa Saint-Gobain, de 9,6 kg, en las condiciones de máxima pureza que ofrece el mercado. Con él se va a construir el Prototipo IV, especialmente diseñado con componentes de ultra-bajo fondo radiactivo: carcasa óptima, materiales reflectantes, guías de luz, ventanas de acople a los fotomultiplicadores, etc. El Prototipo IV tiene como objetivo la optimización de la detección en el rango de baja energía, minimizando el fondo radiactivo y mejorando el umbral en energías, así como la estimación del contenido del cristal en ^{40}K . Su caracterización alfa ha probado que tiene un nivel de ^{210}Pb interno aproximadamente un orden de magnitud menor que los antiguos cristales, pero sin embargo, el fondo en la región de baja energía ha resultado, en los tests preliminares de fondo, prácticamente el mismo que se midió con el Prototipo II por debajo de 30 keV. A causa de la presencia de la contaminación de Torio en la caja de cobre, cuando se hicieron estas pruebas, no se puede descartar un origen externo común de ambos fondos a baja energía.

Se han realizado simulaciones, usando el código Géant 4, del Prototipo II, colocando las distintas contaminaciones en sus lugares más plausibles. Aparte de descartar algunas localizaciones para diversos contaminantes, uno de los principales resultados de estas simulaciones ha sido identificar el ^{40}K como el isótopo más peligroso de los presentes en el entorno del detector, a causa de que en la desintegración vía Captura Electrónica, en un alto porcentaje se emite la energía de ligadura de la capa K del Argón en forma de rayos X y electrones Auger, que son absorbidos con una eficiencia del 100%, suponiendo un depósito energético total de 3,2 keV, que produce un pico muy próximo al umbral (y en la ventana energética de interés para el análisis de la señal de materia oscura) cuando escapa el fotón de 1460 keV que sigue a la desintegración del potasio. Recientemente, se ha llevado a cabo la medida de la contaminación interna de potasio del Prototipo III mediante el análisis de la coincidencia entre el fotón de 1460 keV que escapa (e interacciona en otro detector contiguo) y el depósito de 3,2 keV en el detector estudiado, en este caso el Prototipo III. Los resultados del experimento han permitido determinar la contribución de este isótopo al fondo a baja energía de ANAIS, que por el momento parece ser la dominante, y han permitido verificar la linealidad de la calibración a muy baja energía, justo en la región del umbral. Ya se han medido los siete primeros detectores y está en operación en Canfranc un montaje con los siete detectores restantes en coincidencia (ver figura 22) para tratar de determinar las contaminaciones de ^{40}K , resultado crucial para establecer la viabilidad del experimento ANAIS tal y como fue planteado. De acuerdo con un análisis preliminar, parece que el alto nivel observado de este isótopo puede comprometer los objetivos de fondo a baja energía de ANAIS y se han establecido contactos con diversos suministradores de NaI para intentar la adquisición de nuevos cristales de mayor radiopureza.

8.3 Detección de materia oscura con detectores criogénicos: el experimento ROSEBUD

El grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza ha tenido como objetivo a largo plazo disponer de una instalación de bajas temperaturas con carácter permanente en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Con este fin se planteó la formación de miembros del grupo en este campo en pleno desarrollo desde comienzos de los 90 y se establecieron contactos con diversos grupos a nivel europeo, en la vanguardia del desarrollo de estos nuevos detectores.

Como resultado de una colaboración con el Institute d’Astrophysique Spatiale (Orsay, Francia), a finales de 1998 estaba terminada la instalación en el Laboratorio 3 de una caja de Faraday ($2\times 2\times 3\text{ m}^3$) aislada eléctrica y acústicamente (para alojar el equipo experimental: refrigerador de dilución, detector, blindaje y primeras etapas de la electrónica), de los equipos de alto vacío necesarios, de una sala de control y de una caja de guantes para la manipulación de los detectores. En la primavera de 1999 se procedió a la instalación del

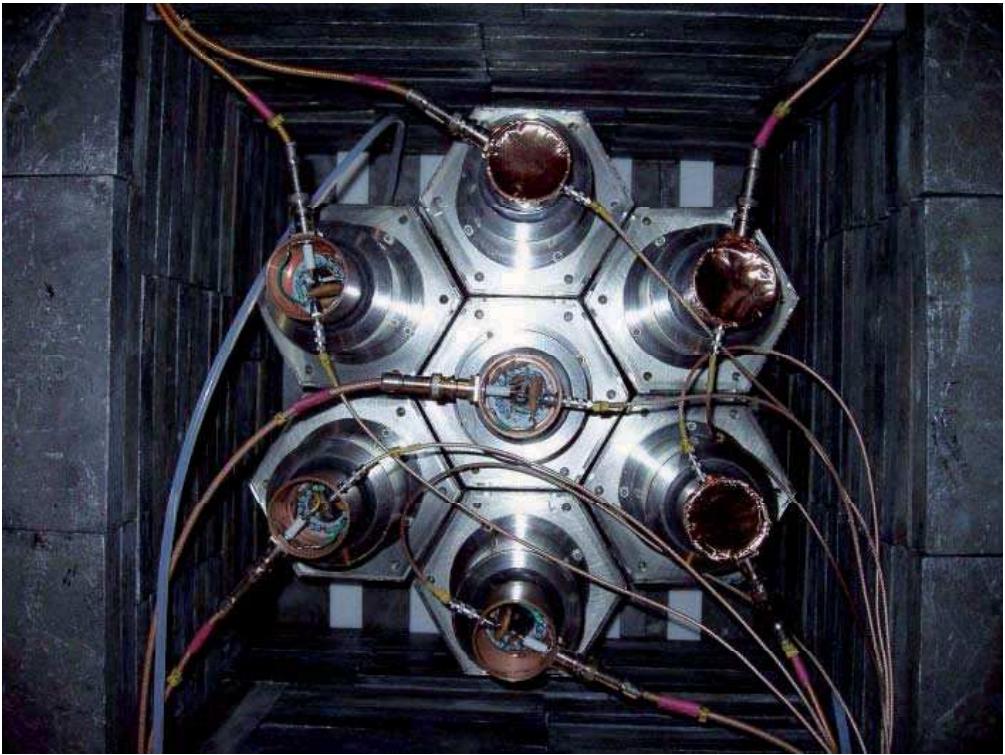


Figura 22: Montaje utilizado en Canfranc para la caracterización de los yoduros, tanto en contaminantes alfa como en potasio. (En color en la versión digital)

primer experimento con detectores de bajas temperaturas en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc: ROSEBUD. Es una colaboración entre el Institute d’Astrophysique Spatiale (IAS) y la Universidad de Zaragoza con la finalidad de buscar la materia oscura del Universo, combinando para ello la experiencia del grupo del IAS en la fabricación de bolómetros de excelentes prestaciones y la experiencia del grupo de Zaragoza en cuestiones de bajo fondo y de búsqueda de materia oscura. Desde su instalación en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, ROSEBUD ha tenido dos fases que se resumen a continuación y una tercera que está en marcha en la actualidad.

En su primera fase ROSEBUD instaló tres bolómetros de zafiro (Al_2O_3), dos de 25 g y uno de 50 g. El zafiro es un material adecuado como absorbente en un bolómetro dada su alta temperatura de Debye, habiéndose alcanzado umbrales inferiores a 500 eV y resoluciones de 120 eV (FWHM) a 1,5 keV en pruebas preliminares en el IAS en Orsay. Fueron instalados en un pequeño refrigerador de dilución ^3He - ^4He en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc y operados a una temperatura de unos 20 mK. Utilizaban como sensor térmico un termistor NTD de germanio. El blindaje, especialmente diseñado para

este experimento, consistió en un blindaje dentro del refrigerador (4 mm de plomo antiguo y 14 mm de cobre rodeando a los detectores para apantallar la contaminación posible en las distintas capas del escudo térmico y los recipientes de los líquidos criogénicos, además de 30 mm de plomo antiguo apantallando los detectores de los distintos componentes de la parte superior del refrigerador de dilución: cámara de mezclas, intercambiadores de calor, etc.) y un blindaje externo (10 cm de plomo antiguo, 15 cm de plomo de baja actividad, funda de PVC sellada herméticamente y mantenida bajo sobrepresión de N₂ gaseoso evaporado de un dewar, 1 mm de cadmio y láminas de μ -metal). Todo ello se instaló dentro de la caja de Faraday, especialmente construida para este experimento, y sobre una plataforma antivibratoria.

Durante 1999 se llevaron a cabo varios periodos de medida en Canfranc con este sistema buscando reducir el fondo radiactivo en la región de baja energía y tras sucesivas modificaciones en el refrigerador de dilución y la supresión de componentes prescindibles próximos a los detectores se consiguió un fondo de 7 sucesos keV⁻¹ kg⁻¹ día⁻¹ en la ventana 100-150 keV y 11 sucesos keV⁻¹ kg⁻¹ día⁻¹ en la ventana 50-100 keV. En la región de más baja energía el fondo resultó ser mucho mayor y por eso, pese al bajo umbral del experimento, las exclusiones obtenidas en el espacio paramétrico (m, σ) de los WIMPs fueron modestas.

En la segunda fase del experimento (2000-2001) se instalaron en Canfranc tres bolómetros distintos: uno de 50 g de zafiro (el único utilizado en la fase anterior), otro de 67 g de germanio y el tercero un bolómetro doble para la detección simultánea de luz y calor con 54 g de CaWO₄ como absorbente centelleador. Para esta nueva etapa se reemplazaron ciertas partes del refrigerador y se aumentaron los blindajes internos tratando de mejorar el fondo con respecto al de la primera fase. Sin embargo el fondo observado en el bolómetro de zafiro no mostró variación alguna respecto al obtenido en la primera fase. El bolómetro de germanio, que gracias a su mayor número másico garantizaba mayor eficiencia en los picos de absorción total, dio resultados compatibles con los del de zafiro sin mostrar picos visibles que sirvieran de ayuda para la identificación o localización de los posibles contaminantes externos. Este problema se volverá a abordar con éxito más adelante con un bolómetro centelleador de BGO. El resto de los objetivos de esta fase del experimento fueron satisfactoriamente cumplidos. Por primera vez operaron en el mismo montaje, dentro del mismo blindaje y en las mismas condiciones, detectores con tres absorbentes distintos. Aunque sólo se trata de un primer paso, es importante como método para minimizar posibles errores sistemáticos e incluso para analizar la dependencia de la señal de materia oscura con el número másico del blanco empleado. Además, y sobre todo, fue la primera vez que se llevó a cabo en subterráneo la discriminación del tipo de partícula incidente mediante la detección simultánea de la luz y el calor producidos en su interacción con el material blanco. Debido a la importancia de este último punto,

se describe a continuación con un poco más de detalle el doble bolómetro: consta de un cristal cilíndrico de 54 g de CaWO₄ y un pequeño disco de germanio (25 mm de diámetro y 100 μm de espesor) que mira directamente hacia una de las caras del centelleador dentro de una cavidad reflectante (ver figura 23). Cada cristal tiene pegado su correspondiente sensor NTD para la medida de la temperatura y sus eventuales variaciones. Así el calor producido tras un depósito energético, correspondiendo a una interacción de una partícula en el cristal de CaWO₄, es visto directamente como un incremento en su temperatura y parte de la luz emitida que escapa del CaWO₄ es absorbida por el germanio y convertida también en otro incremento de temperatura en este segundo bolómetro. La lectura simultánea de estos dos bolómetros permitió distinguir sin ambigüedad la presencia de contaminantes internos con emisión alfa en un fondo beta/gamma mucho más importante, así como retrocesos debidos a neutrones (en tests previos en Orsay con una fuente de calibración de ²⁵²Cf). Esta discriminación resulta crucial en la búsqueda de materia oscura, como ya habíamos comentado previamente. De hecho, pese al elevado fondo interno del cristal (atribuible en buena parte a la presencia de ²¹⁰Pb y sus descendientes de corta vida media ²¹⁰Bi y ²¹⁰Po), después de aplicar los cortes adecuados en el diagrama en dos dimensiones de señal luminosa frente a señal térmica, sólo 4 sucesos no pudieron ser rechazados como originados por WIMPs o neutrones en 24,2 horas efectivas de medida y en una ventana de análisis entre 75 y 200 keV. Por supuesto para explorar regiones de interés del espacio paramétrico de los WIMPs son necesarios mejores umbrales y mayores tiempos de exposición, objetivos a medio plazo para ROSEBUD [64].



Figura 23: Bolómetro doble de BGO utilizado durante la última serie de medidas del experimento ROSEBUD en Canfranc. (En color en la versión digital)

La línea abierta con el doble bolómetro de CaWO₄ pasó a ser el punto fuerte de la siguiente etapa de ROSEBUD, con el objetivo principal de mejorar las prestaciones de

los dobles bolómetros utilizados, sobre todo en lo que al umbral en energías y al fondo radiactivo se refiere. Asimismo, otros materiales centelleadores han sido y serán puestos a punto para su operación como bolómetros dobles en subterráneo y su posible aplicación en la búsqueda de materia oscura.

En concreto, la colaboración IAS-UZ dispone de nuevos bolómetros centelleadores de BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), LiF, TeO_2 y Al_2O_3 [95]. Entre ellos destacan los de zafiro y BGO por su excelente umbral en energías y muy buena capacidad de discriminación (ver figura 24). En 2007 se ha iniciado un nuevo periodo de medidas de ROSEBUD en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, instalando en una primera fase, un cristal de BGO (hay ya construidos dos bolómetros, uno de 46 y otro de 92 g), un cristal de zafiro y un cristal de LiF, montados todos ellos como dobles bolómetros luz-calor para disponer de la posibilidad de discriminar el tipo de partícula que interacciona en el cristal. En lo que se refiere a la discriminación de retrocesos nucleares frente a los electrónicos, estos dobles bolómetros ya han sido probados en Orsay con una fuente de neutrones (^{252}Cf) y muestran una capacidad de discriminación del 90% por encima de 23 keV (y del 99,99% por encima de 51 keV) el BGO y de 14 keV (y 27 keV), respectivamente, el zafiro, por lo que sus prestaciones para la búsqueda de materia oscura se acercan a las necesarias (ver figura 25). Además el doble bolómetro de BGO, gracias a su alta eficiencia, actúa como espectrómetro gamma en el montaje, permitiendo monitorizar el fondo radiactivo y del análisis de los últimos resultados obtenidos en Canfranc se ha derivado una mejor comprensión del fondo radiactivo del experimento [94]. Con el detector de LiF se espera medir por primera vez el fondo de neutrones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. En la actualidad, sólo hay dos experimentos en toda la comunidad científica internacional que trabajen con este tipo de dobles bolómetros centelleadores: la colaboración CRESST [60] y la colaboración ROSEBUD; pese a las reducidas dimensiones de los cristales empleados, ROSEBUD se encuentra en disposición de competir al más alto nivel en la I+D de estos detectores. En cualquier caso, la posibilidad de obtener límites relevantes para los WIMPs (con bolómetros de menos de 100 g) pasa por la necesaria mejora del umbral, del fondo radiactivo y el aumento de la exposición.

Dado que este tipo de detectores son tan novedosos, de las diversas calibraciones llevadas a cabo y primeras pruebas en Canfranc se está obteniendo información muy interesante tanto sobre el comportamiento y prestaciones de este tipo de detector híbrido como de los materiales utilizados como centelleadores a tan bajas temperaturas (casi ninguno de ellos había sido caracterizado previamente en el rango de los mK). Así por ejemplo, se está estudiando una anticorrelación luz-calor observada en los datos proporcionados por el centelleador de zafiro (y después identificada también en el BGO) que ha permitido estimar la emisión absoluta de luz en el zafiro a muy baja temperatura de una forma original. Se están estudiando posibles inhomogeneidades en la emisión o recolección de

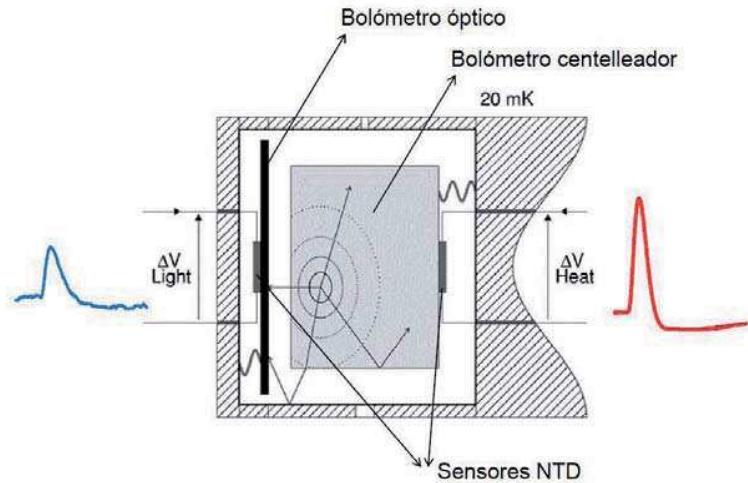


Figura 24: Esquema de un bolómetro doble similar a los utilizados en el experimento ROSE-BUD: consta de un bolómetro centelleador en el que una interacción convierte parte de la energía depositada en calor, que produce una señal en el NTD, y en luz, que escapa y es absorbida en el bolómetro óptico, convirtiéndose también en calor. (En color en la versión digital)

luz, para cuantificar su influencia en la resolución de estos detectores. Se está trabajando en la determinación del Factor de Eficiencia Relativa (REF) para retrocesos nucleares, todavía poco estudiado en detectores bolométricos y que resulta ser un factor fundamental en el análisis de datos en la búsqueda de la materia oscura. Como ya se ha comentado, se espera determinar el fondo de neutrones en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc en el próximo futuro con el bolómetro centelleador de LiF, etc.

A más largo plazo, la colaboración con el IAS sigue planteada. El desarrollo de experimentos específicos y el uso de unos materiales u otros para la fabricación de los nuevos bolómetros debe ir adaptándose a los resultados que se vayan obteniendo, manteniendo siempre como objetivos la reducción del fondo radiactivo y la mejora del umbral. Se pretende ser competitivos en la búsqueda de la materia oscura con una diversidad de posibles materiales blanco. Este último punto es importante en caso de que se encuentre una señal positiva: debería ser compatible en todos ellos y diferente de lo esperado para un fondo debido a neutrones. El uso de diferentes materiales nos proporcionará además nuevas posibilidades no previstas de antemano para explorar otros aspectos de la Física Nuclear o Subnuclear diferentes de la búsqueda de materia oscura, aunque ésta se mantenga como objetivo fundamental.

Por supuesto, la posibilidad de incrementar la masa de los bolómetros utilizados es uno

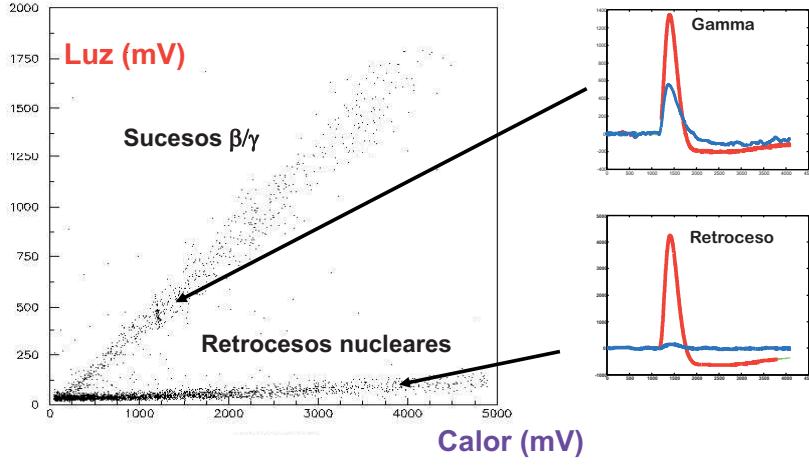


Figura 25: Diagrama de discriminación luz-calor obtenido en el IAS durante una calibración con una fuente de neutrones de un bolómetro de zafiro. El reparto de la energía depositada en la interacción entre las vías de luz y calor depende del tipo de partícula y permite discriminar sucesos β/γ de retrocesos nucleares. (En color en la versión digital)

de los puntos más importantes para el futuro de ROSEBUD. Para conseguir este objetivo, es imprescindible disponer de una instalación de bajas temperaturas permanente en el nuevo Laboratorio Subterráneo de Canfranc con capacidad para masas de detección del orden de, al menos, una decena de kilos. Así se podría pensar en un amplio programa de búsqueda de materia oscura en condiciones de ultra-bajo fondo y con discriminación luz-calor para una gran diversidad de materiales blanco. Si los factores de rechazo de fondo a baja energía se mantienen y se logra reducir el umbral en energías del experimento, estarían al alcance límites competitivos con los de los mejores experimentos de búsqueda de materia oscura actualmente en operación o en desarrollo.

La incorporación de ROSEBUD al proyecto EURECA (European Calorimeter Array), que aglutina a los principales grupos europeos en la detección de materia oscura con técnicas criogénicas, se suma a esta intensificación de la línea de trabajo asociada a los detectores de bajas temperaturas. EURECA es un ambicioso proyecto que surge de las colaboraciones CRESST y EDELWEISS y pretende operar hasta 1 tonelada de masa de detección a muy baja temperatura, con una técnica híbrida y siguiendo una estrategia basada en la utilización de múltiples blancos en un gran experimento a nivel europeo. Al proyecto inicial se han añadido algunos grupos más pequeños, entre ellos la colaboración ROSEBUD, aceptados por EURECA al considerar que aportan un valor añadido al proyecto en experiencia y conocimientos.

9 Conclusiones y Agradecimientos

Este trabajo ha tratado de revisar dos décadas de esfuerzos para mantener un laboratorio subterráneo competitivo a nivel internacional. Ha sido un esfuerzo compartido, al que han contribuido numerosos investigadores nacionales y extranjeros y sin el cuál habría sido imposible que un pequeño laboratorio en el Pirineo aragonés fuera conocido en el ámbito de la Física Subterránea al más alto nivel. Por eso este trabajo tiene que reconocer la tarea de los fundadores del Laboratorio, en primer lugar, Ángel Morales, Rafael Núñez-Lagos, Julio Morales, José Ángel Villar y Jorge Puimedón. Ellos creyeron en el proyecto y construyeron un laboratorio con los escasos medios con los que contaban y con mucho trabajo. Son muchos los que han contribuido a la consolidación y crecimiento del Laboratorio. En particular, me gustaría mencionar a aquellos que ya no forman parte del grupo de Física Nuclear y Astropartículas y con los que compartí muchas agradables, aunque duras, horas en Canfranc: Ángel Larrea, Carlos Sáenz, Ana Salinas, Eva Cerezo, Mercedes Fatás y David González. Por supuesto, todo el grupo de Física Nuclear y Astropartículas ha trabajado siempre por y para el Laboratorio Subterráneo de Canfranc y debe ser reconocida su contribución al éxito del mismo. Canfranc no habría llegado a ser lo que es en la actualidad sin las colaboraciones internacionales que han aportado tanto equipos como experiencia. En particular me gustaría mencionar el papel que los últimos años ha desempeñado el grupo del Institute d’Astrophysique Spatiale de Orsay (Francia).

A título personal, me gustaría agradecer especialmente a Eduardo García el apoyo que siempre me ha prestado en todas las tareas que he abordado y lo mucho que de él he aprendido y sigo aprendiendo, a Alfonso Ortiz de Solórzano, su saber hacer y su siempre buena disposición a trabajar y a hacerlo con buen humor y a María Martínez, su excelente trabajo en el experimento ANAIS, y el entusiasmo que derrochó, incluso en los momentos complicados, y que nos sirvió de estímulo a muchos.

Referencias

- [1] F. Zwicky, *Helvetia Physics Acta* **6** (1933) 110.
- [2] V.C. Rubin and W.K. Ford, *Astrophysical Journal* **159** (1970) 379.
M.S. Roberts, R.N. Whitehurst, *Astrophysical Journal* **201** (1975) 327.
V. Rubin *et al.*, *Astrophysical Journal* **238** (1980) 471.
- [3] A.H. Guth, *Physical Review D* **23** (1981) 347.
A. Linde, *Physics Letters B* **108** (1982) 389.
A. Albrecht and P.J. Steinhard, *Physical Review Letters* **48** (1982) 1220.

- [4] K. Griest and M. Kamionkowski, *Physics Reports* **333-334** (2000) 167.
 G. Bertone, D. Hooper and J. Silk, *Physics Reports* **405** (2005) 279.
- [5] W.L. Freedman and M.S. Turner, *Reviews of Modern Physics* **75** (2003) 1433.
- [6] Los resultados mostrados en el texto se obtienen a partir de los datos de WMAP directamente, si se realiza un análisis combinado de datos de WMAP, medidas de supernovas distantes y medidas de oscilaciones acústicas en la distribución de galaxias se obtienen resultados totalmente compatibles, aunque ligeramente diferentes.
 G. Hinshaw *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0732v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
 B. Gold *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0715v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
 M.R. Nolta *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0593v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
 J. Dunkley *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0586v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
 E.L. Wright *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0577v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
 R.S. Hill *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0570v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
 E. Komatsu *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0547v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
- [7] Springel *et al.*, *Nature* **435** (2005) 629.
- [8] <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>
- [9] S. Fukuda *et al.*, (SuperKamiokande Collaboration), *Physical Review Letters* **81** (1998) 1562.
 Q.R. Ahmad *et al.*, *Physical Review Letters* **87** (2001) 071301.
 Q.R. Ahmad *et al.*, *Physical Review Letters* **89** (2002) 011302.
- [10] W.L. Freedman *et al.*, *Astrophysical Journal* **553** (2001) 47.
- [11] R.A. Knop *et al.*, *The Astrophysical Journal* **598** (2003) 102.
 S. Perlmutter *et al.*, *The Astrophysical Journal* **517** (1999) 565.
 S. Perlmutter, *Physics Today* abril 2003.
 A.G. Riess *et al.*, *Astronomical Journal* **116** (1998) 1009.
- [12] S.W. Allen *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **334** (2002) L11.

- [13] http://chandra.harvard.edu/press/06_releases/press_082106.html (Nota de prensa que hizo pública la colaboración CHANDRA el 21 de agosto de 2006 al respecto).
- [14] R. A. Alpher, H. Bethe, and G. Gamow, *Physical Review* **73** (1948) 803.
- [15] S. Burles *et al.*, *Astrophysical Journal Letters* **552** (2001) L1.
- [16] M. Milgrom, *Scientific American*, Agosto (2002).
- [17] A. Lue *et al.*, *Physical Review Letters* **92** (2004) 131102.
- [18] R. Gavazzi, *New Astronomy Reviews* **46** (2002) 783.
- [19] J. Dunkel, *The Astrophysical Journal* **604** (2004) L37.
- [20] J.P. Ostriker, P.J.E. Peebles, *Astrophysical Journal* **186** (1973) 467.
- [21] A. Helmi *et al.*, *Physical Review D* **66** (2002) 063502.
A.M. Green, *Phys. Rev. D* **63** (2001) 043005.
- [22] R.A. Ibata *et al.*, *Nature* **370** (1994) 194.
- [23] D. Martínez-Delgado *et al.*, *Astrophysical Journal* **549** (2001) L199.
D. Martínez-Delgado *et al.*, *Astrophysical Journal* **601** (2004) 242.
- [24] L. Roszkowski, R. Ruiz de Austri and R. Trotta, *Journal of High Energy Physics* **07** (2007) 075.
- [25] G. Raffelt, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **49** (1999) 163.
C. Hagmann *et al.*, *Physical Review Letters* **80** (1998) 2043.
A. Morales *et al.*, *Astroparticle Physics* **16** (2002) 325.
S. Andriamonje *et al.*, *Physical Review Letters* **94** (2005) 121301.
E. Zavattini *et al.*, *Physical Review Letters* **96** (2006) 110406.
- [26] P. Jean *et al.*, *Astronomy and Astrophysics* **407** (2003) L55.
- [27] C. Boehm *et al.*, *Physical Review Letters* **92** (2004) 101301-1.
- [28] S. Coutu *et al.*, *Astroparticle Physics* **11** (1999) 429.
G.L. Kane *et al.*, *Physical Review D* **65** (2002) 057701.
- [29] C. Amsler *et al.*, *Physics Letters B* **667** (2008) 1.
- [30] R. Bernabei *et al.*, *Physics Letters B* **450** (1999) 448.
R. Bernabei *et al.*, *Rivista Nuovo Cimento A* **112** (1999) 545.
R. Bernabei *et al.*, *Physics Letters B* **480** (2000) 23.

- R. Bernabei *et al.*, *European Physics Journal C* **18** (2000) 283 .
 P. Belli *et al.*, *Physical Review D* **61** (2000) 023512.
 R. Bernabei *et al.*, *Physics Letters B* **509** (2001) 197.
 P. Belli *et al.*, *Physical Review C* **66** (2002) 043503 .
- [31] R. Bernabei *et al.*, arXiv:astro-ph 0804.2738v1.
 R. Bernabei *et al.*, arXiv:astro-ph 0804.2741v1.
- [32] J. I. Collar and F.T. Avignone, III. *Physical Review D* **47** (1993) 5238.
- [33] P. F. Smith and J. D. Lewin. *Physics Reports* **187** (1990) 203
- [34] P.F. Smith. *New Astronomy Review* **49** (2005) 303.
- [35] A. K. Drukier, *Physical Review D* **33** (1986) 3495.
 K. Freese, J. Frieman, and A. Gould, *Physical Review D* **37** (1988) 3388.
- [36] M. Martínez Pérez, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Diseño de un prototipo para un experimento de detección directa de materia oscura mediante modulación anual con centelleadores de ioduro de sodio*, octubre 2006.
- [37] S. P. Ahlen *et al.*, *Physics Letters B* **195** (1987) 603.
- [38] A. Morales *et al.*, *Physics Letters B* **489** (2000) 268.
 S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **95** (2001) 229.
- [39] A. Morales *et al.*, *Physics Letters B* **532** (2002) 8.
 I.G. Irastorza *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **110** (2002) 55.
 J. Morales *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **118** (2003) 524.
 I.G. Irastorza *et al.*, *Astroparticle Physics* **20** (2003) 247.
- [40] H. V. Klapdor-Kleingrothaus *et al.*, *Astroparticle Physics* **18** (2003) 525.
- [41] J.I. Collar *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **31** (1993) 377.
 M.L. Sarsa *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 154.
 E. García *et al.*, *Physical Review D* **51** (1995) 1458.
- [42] E. García Abancens, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Investigación sobre candidatos a la materia oscura del Universo en experiencias subterráneas con detectores de germanio*, diciembre de 1992.
- [43] D. O. Caldwell *et al.*, *Physical Review Letters* **65** (1990) 1305.
- [44] S. Schoenert *et al.*, (GERDA Collaboration). *Prog. Part. Nucl. Phys.* **57** (2006) 241.

- [45] A. Morales. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **114** (2003) 39.
- [46] D. Anderson *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **138** (2005) 217.
- [47] M.L. Sarsa *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **48** (1996) 73.
 M.L. Sarsa *et al.*, *Physics Letters B* **386** (1996) 458.
 M.L. Sarsa, *et al.*, *Physical Review D* **56** (1997) 1856.
- [48] M.L. Sarsa Sarsa, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Experimento para la detección directa de la materia oscura galáctica fría con detectores de centelleo mediante la búsqueda de señales distintivas*, diciembre de 1995.
- [49] C. Bacci *et al.*, (BPRS Collaboration), *Astroparticle Physics* **4** (1996) 195.
- [50] K. Fushimi *et al.*, *Physical Review C* **47** (1993) 425.
- [51] K. Fushimi *et al.*, *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 120.
- [52] G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Physics Letters B* **616** (2005) 17.
 F. Giuliani. *Physical Review Letters* **93**(2004)161301.
- [53] C. Savage *et al.*, arXiv:astro-ph 0808.3607v1.
- [54] H. S. Lee *et al.*, (KIMS Collaboration), *Physics Letters B* **633** (2006) 201.
- [55] G. Angloher, *Nucl. Inst. Met. Phys. Res. A* **512** (2003) 401.
- [56] E. Silver *et al.*, *Nucl. Inst. Met. Phys. Res. A* **545** (2005) 683.
- [57] A. Alessandrello *et al.*, *Physics Letters B* **408** (1997) 465.
 J.W. Zhou *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **349** (1994) 225.
 N. Coron *et al.*, *Physics Letters B* **659** (2008) 113.
- [58] D. S. Akerib *et al.*, CDMS Collaboration, *Physical Review Letters* **96** (2006) 011302.
 D. S. Akerib *et al.*, CDMS Collaboration, *Physical Review D* **73** (2006) 011102.
 Z. Ahmed *et al.*, arXiv:astro-ph 0802.3530v2.
- [59] V. Sanglard *et al.*, *Physical Review D* **71** (2005) 122002 .
- [60] G. Angloher *et al.*, *Astroparticle Physics* **23** (2005) 325.
- [61] R. Ardito *et al.*, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **57** (2006) 203.
 C. Arnaboldi *et al.*, *Physics Letters B* **584** (2004) 260.
 C. Arnaboldi *et al.*, *Nucl. Inst. Met. Phys. Res. A* **518** (2004) 775.

- [62] M. Galeazzi *et al.*, *Physical Review Letters* **86** (2001) 1978.
M. Galeazzi *et al.*, *Physical Review C* **63** (2000) 014302.
F. Gatti *et al.*, *Nature* **397** (1999) 137.
- [63] D. S. Akerib *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **559** (2006) 411.
- [64] C. Bobin *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **70** (1999) 90.
S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **10** (1999) 361.
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Inst. and Methods in Phys. Research A* **444** (2000) 315.
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **87** (2000) 500.
S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **15** (2001) 79.
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **110** (2002) 97.
S. Cebrián *et al.*, *Physics Letters B* **556** (2003) 14.
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **118** (2003) 523.
S. Cebrián *et al.*, *Physics Letters B* **563** (2003) 48.
S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **21** (2004) 23.
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **138** (2005) 519,
J. Amaré *et al.*, *Applied Physics Letters* **87** (2005) 264102.
- [65] H. Kraus *et al.*, *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 139.
- [66] G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Astroparticle Physics* **23** (2005) 444.
- [67] R. Bernabei *et al.*, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* **110** (2002) 88.
- [68] G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Astroparticle Physics* **28** (2007) 287.
G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Physics Letters B* **653** (2007) 161.
- [69] J. Angle *et al.*, (XENON Collaboration), *Physical Review Letters* **100** (2008) 021303.
- [70] P. Benetti *et al.*, *Astroparticle Physics* **28** (2008) 495.
- [71] A. Rubbia (ArDM Collaboration), *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 129.
- [72] G. J. Alner *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **535** (2004) 644.
- [73] G. J. Alner *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **555** (2005) 173.
- [74] C.J. Copi and L.M. Krauss, *Physical Review D* **63** (2001) 043507

- [75] E. Behnke *et al.*, *Science* **319** n.5865 (2008) 933.
- [76] T. A. Girard *et al.*, *Physics Letters B* **621** (2005) 233.
- [77] M. Barnabé-Heider *et al.*, *Physics Letters B* **624** (2005) 186.
- [78] K. Borer *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **138** (2005) 163.
- [79] Winkelmann *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) 384.
- [80] Y. Aharonov *et al.*, *Physics Letters B* **353** (1995) 168.
Y. Aharonov *et al.*, *Physical Review D* **52** (1995) 3785.
- [81] D.E. Di Gregorio *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **48** (1996) 56.
D. Abriola *et al.*, *Astroparticle Physics* **6** (1996) 63.
D. Abriola *et al.*, *Astroparticle Physics* **10** (1999) 133.
- [82] A. Morales *et al.*, *Astroparticle Physics* **16** (2002) 325.
- [83] I. García Irastorza, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Un telescopio subterráneo de axiones y WIMPs como instrumento de investigación astrofísica y detector de materia oscura*, abril de 2001.
- [84] S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **10** (1999) 397.
I.G. Irastorza *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **87** (2000) 102.
A. Morales *et al.*, *Astroparticle Physics* **16** (2002) 325.
- [85] E. García *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **28 A** (1992) 216.
R.L. Brodzinski *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **31** (1993) 76.
F.T. Avignone *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 354.
H.S. Miley *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 388.
C.E. Aalseth *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **48** (1996) 223.
C.E. Aalseth *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **70** (1999) 236.
C.E. Aalseth *et al.*, *Physical Review C* **59** (1999) 2108.
C.E. Aalseth *et al.*, *Physics of Atomic Nuclei* **63** (2000) 1225.
C.E. Aalseth *et al.*, *Physical Review D* **65** (2002) 92007.
D. González *et al.*, *Nucl. Inst. & Meth. A* **515** (2003) 634.
C.E. Aalseth *et al.*, *Physical Review D* **70** (2004) 078302.
- [86] L. Baudis *et al.*, *Physics Letters B* **407** (1997) 219.
M. Guenther *et al.*, *Physical Review D* **55** (1997) 54.

- [87] A. Morales *et al.*, *Journal of Physics G: Nucl. Part. Phys.* **17** (1991) S211.
A. Morales *et al.*, *Il Nuovo Cimento* **104 A** (1991) 1581.
- [88] V. Kuzminov *et al.*, *Atomic Energy* **73** (1992) 1010.
V. Kuzminov *et al.*, *Inst. and Exp. Techniques* **36** (1993) 69.
C. Sáenz *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 363.
C. Sáenz *et al.*, *Physical Review C* **50** (1994) 1170.
C. Sáenz *et al.*, *Nucl. Inst. & Meth. A* **356** (1995) 220.
C. Sáenz Gamasa, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Investigación experimental sobre la conversión electrón-positrón y la doble desintegración beta en ^{78}Kr* , julio de 1994.
- [89] <https://ptweb.desy.de/appec/Roadmap-Phase1.pdf>
- [90] S. Cebrián Guajardo, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Estudio del fondo radiactivo en experimentos subterráneos de búsqueda de sucesos poco probables: CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events) y ANAIS (Annual Modulation with NaIIs)*, enero de 2002.
- [91] S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **110** (2002) 94.
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **114** (2003) 111.
J. Morales *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **118** (2003) 525.
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **138** (2005) 147.
J. Amaré *et al.*, *Journal of Physics: Conference Series* **39** (2006) 123.
- [92] C. Pobes Aranda, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Optimización de la respuesta de un sistema multidetector de cristales de centelleo para un experimento de materia oscura (ANAIS)*, mayo de 2006.
- [93] J. Pelegrín Mosquera, Trabajo académicamente dirigido Universidad de Zaragoza, *Técnicas de discriminación en Física Nuclear y de Partículas: aplicación al experimento ANAIS*, junio de 2008.
- [94] L.C. Torres Ferrández, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Bolómetros centelleadores para búsqueda de materia oscura*, julio de 2008.
- [95] N. Coron *et al.*, *Nucl. Instr. Met. A* **520** (2004) 159.

Las raíces de las ideas biológicas de Félix de Azara

Juan Pablo Martínez Rica*

Instituto Pirenaico de Ecología

Consejo Superior de Investigaciones Científicas

1. Introducción



Figura 1.— Félix de Azara, (obra de Goya, propiedad de Ibercaja)

Se ha escrito tanto sobre Félix de Azara, se han diseccionado con tanto detalle su vida y sus obras y se ha discutido tanto la importancia de sus actividades que parece difícil añadir nada nuevo al respetable acúmulo de información que existe sobre él, o presentar bajo un nuevo punto de vista los temas ya tratados por otros autores. Sin embargo la realidad es diferente. Por ejemplo, CONTRERAS (2005) señala numerosos aspectos de la biografía de Azara que permanecen todavía inéditos o que requieren un estudio más acabado, y MORALES, en el mismo volumen, se atreve a adoptar un punto de vista más crítico de lo habitual sobre las ideas de Azara, permitiendo así otro enfoque menos manido. Incluso de vez en cuando aparecen nuevos documentos de o sobre Azara, y ello lleva, evidentemente, a nuevas investigaciones. Pero con todo y con eso cualquier persona que pretende escribir sobre el

autor aragonés se enfrenta desde el principio al desafío de leer lo mucho que ya se ha escrito y de plantear su trabajo de modo que resalte aspectos insuficientemente tratados.

Félix de Azara ha sido uno de esos personajes, no tan insólitos, que han alcanzado la celebridad por razones ajenas a su profesión. Poco pudo pensar el decidido soldado que

*Académico de Número

su nombre sería recordado sobre todo no por sus servicios militares sino por sus trabajos de historia natural. Cuando se lamentaba ante su hermano José Nicolás de la diferencia de sus respectivas carreras, él desterrado por veinte años de la civilización y de toda relación culta, mientras que José triunfaba en las cortes europeas y alcanzaba el título de marqués, menos podía suponer que al fin su celebridad sería mayor que la de su hermano, y que la debería precisamente a las observaciones y trabajos que, a falta de otra cosa, se vio obligado a emprender en circunstancias tan penosas cuanto favorables eran las que rodeaban a José Nicolás. Una celebridad, en todo caso, si no desmedida, sí mal orientada en ocasiones, como ya han señalado diversos autores, quienes llegan a hablar incluso de “mitologización” de la figura de Azara (LUCENA y BARRUECO, 2006).

Lo cierto es que con evidente exageración se ha llegado a decir que sin la contribución de Azara Darwin no habría podido enunciar su teoría de la evolución, y con similar falta de fundamento se ha llegado a calificar a Azara como “el Darwin español”; lo que es peor, precisamente ese título (“Félix de Azara, el Darwin español”) llevaban las Primeras Jornadas Azarianas que se desarrollaron el año 2005 en Madrid y en Huesca. Felizmente el calificativo ha desaparecido de la edición escrita de las ponencias de dichas Jornadas (salvo en uno o dos casos), con lo que se evita una permanente contribución a la hipérbole sobre el personaje. Pero incluso los calificativos más mesurados de BAULNY (1966-1967) quien siguiendo a ÁLVAREZ LÓPEZ (1934) considera a Azara como precursor de Darwin, deben reducirse a su justa medida. Y quizás deba resaltarse, como ya lo han hecho algunos, que la contribución de Azara tiene más valor como antípodo del desarrollo de la ciencia biogeográfica o de la genética, que de la teoría evolutiva.

En otro artículo se intentará precisar cual fue la contribución real de Azara a la obra de Darwin. En la ciencia todo está entrelazado y todos los autores se influyen directa o indirectamente, por lo que negar dicha contribución sería sin duda tan impropio como exagerarla. Azara, como cualquier otro científico, influyó en Darwin, y no sólo en él sino también en otros muchos naturalistas, desde d'Orbigny a Agassiz, por no hablar del propio Álvarez López, quien le debe una parte importante de sus obras. A su vez fue influido por numerosos autores, bien directamente, como es el caso de Buffon, bien a través de éste último, en una larga cadena que se remonta hasta Aristóteles. Sólo en este sentido amplio puede considerarse a Azara precursor de Darwin, pero no el único, ni el más importante, ni mucho menos el primero. Al fin y al cabo es el propio Darwin quien relativiza esta manía de buscar evolucionistas *avant la lettre* incluyendo al propio Aristóteles en la lista de sus precursores.

Aunque Azara es un ejemplo típico del científico aislado, que trabaja sólo y que debe poco a sus predecesores, y aunque él mismo se queja de ello, lo cierto es que nadie se encuentra totalmente sólo, ni siquiera un Robinson Crusoe, o su modelo real, Alexander

Selkirk. Azara llegó a América cargado de un bagaje cultural que había recibido en España de su familia, de los centros en que estudió, de sus amigos y de la sociedad en general. Este bagaje constituía las raíces de su pensamiento, raíces que se prolongan mediante conexiones a veces extrañas, hasta la antigüedad más remota. Pero aquí no me propongo llegar tan lejos: bastará examinar el propio siglo en que Azara nació y considerar la atmósfera científica imperante en su tiempo y ambiente. Dos figuras dominaron la historia natural en este siglo, Carl von Linne y Georges Louis Leclerc de Buffon, figuras que serán el tema central de estas páginas. Ambos son citados por Azara y el segundo de ellos constituyó su referencia fundamental. No son los únicos autores que consultó, pero sí los de mayor relevancia y los que más influyeron no sólo en su obra, sino también en toda la ciencia natural de su tiempo. Estas dos raíces se complementan con otras tres: la situación científica de España en la segunda mitad del siglo XVIII, especialmente en lo referente a la historia natural, las condiciones políticas que influyeron en la evolución histórica de las tierras estudiadas por Azara en la América meridional, y las expediciones científicas a dichas tierras encargadas por la corona española, y que precedieron al viaje de Azara. Seguiremos estas cinco raíces no linealmente, sino en sucesivas secciones cronológicas horizontales, siete de ellas, que nos llevarán al comienzo de la actividad de Félix de Azara en Sudamérica, punto temporal en el cual tales raíces se unen para formar el tronco de la obra azariana.

2. Prolegómenos: 1700-1730

El siglo XVIII es llamado de la Ilustración o de las luces por el cambio que tuvo lugar en la visión del mundo que tenían las clases educadas. Este cambio se manifestó especialmente en la segunda mitad del siglo, sobre todo en España, pero tuvo su origen en las décadas anteriores. Por lo que hace a nuestro país puede decirse que comenzó con el advenimiento de la nueva dinastía borbónica, advenimiento que no pudo ser operativo hasta que terminó la Guerra de Sucesión española, en 1715, y el nuevo monarca, Felipe V, alcanzó todo su poder.

Durante las décadas siguientes los esfuerzos del rey se encaminaron a la restauración de la economía y el saneamiento de la hacienda, a la unificación y racionalización de las leyes, a la modernización del ejército y de la armada españoles y también, como no, a la modificación de la estructura y usos de la corte para adaptarla al modelo francés. Hubo, desde luego, numerosas iniciativas encaminadas a la implantación y mejora de la investigación científica, pero aún se trataba de acciones débiles y de escaso calado. No en vano Leibniz y Newton estaban todavía investigando, y al comienzo del siglo sólo hacía trece años que el segundo había publicado sus *Principia Mathematica*, un tiempo muy

escaso para que sus ideas se implantasen en nuestro país.

Sin embargo la tendencia general, debido a la fuerte influencia francesa, dio lugar a la creación de algunas instituciones claramente iluministas. Por ejemplo la Real Sociedad de Medicina y Ciencias de Sevilla, nacida en 1700, todavía en el reinado de Carlos II, o el Real Seminario de Nobles de Madrid, de 1726. Por cierto, que esta última fecha es también la de publicación de la obra más conocida del padre Feijoo, *Teatro Crítico Universal*, uno de cuyos objetivos era precisamente poner de manifiesto el atraso científico español. Durante este periodo también se creó en Barcelona una institución que sería de gran trascendencia en la vida de Félix de Azara, la Academia de Ingenieros Militares, fundada en 1715, y que acogería a Azara entre sus alumnos.

Como es bien sabido, los acontecimientos científicos que por aquellos años tuvieron lugar fuera de España fueron de especial relevancia. El primer manual sobre uso del cálculo infinitesimal fue publicado en 1696, y los inventores de esta herramienta que sería fundamental en la evolución ulterior de la ciencia, Leibnitz y Newton, murieron respectivamente en 1716 y 1727, de manera que bastantes de sus contribuciones son precisamente de estos años. En el ámbito de la historia natural el panorama era menos alentador. Se cuenta una veintena de nombres con dedicación a este campo, la mayoría de los cuales dejaron una huella modesta. Fuera de Linne¹ y Buffon, que tendrían una influencia decisiva en la ciencia española y en el propio Azara, pero que todavía eran jóvenes (ambos cumplirían 23 años en 1730) y no habían iniciado su producción científica, y de Leeuwenhoek, que se centró en la anatomía microscópica, apenas pueden destacarse los nombres de Ray y de Tournefort, ambos botánicos y pertenecientes en gran parte al siglo XVII en el que realizaron la mayor parte de sus trabajos.

El primero escribió sobre botánica pero también sobre zoología y sobre otras muchas materias. Fuera de su patria, Inglaterra, no se le atribuye una importancia capital, pero tuvo una influencia decisiva en Linne, quien lo cita profusamente, y en sus continuadores, como Jussieu o De Candolle. Se atribuyen los conceptos taxonómicos de género y especie a Linne, pero habían sido propuestos previamente por John Ray, quien también había elaborado una clasificación de las plantas más consistente que la de Linne, y que sin duda inspiró a éste. Para nosotros tiene un interés particular su obra *Synopsis Methodica Avium et Piscium*, publicada después de su muerte, y en la que establece no sólo una

¹Usamos constantemente en este artículo los nombres Linne y Buffon, en lugar de los más usados por otros autores, como Linnaeus (forma latinizada del apellido sueco Linne) o su versión castellanizada Linneo. Este autor firmaba siempre con su nombre latinizado aunque no escribiera en latín, pero cuando fue elevado al rango de conde en 1761 y tuvo que adoptar un título sueco usó el apellido von Linne. En cuanto a Buffon, como es sabido su nombre era Georges Louis Leclerc de Buffon, pero firmó casi desde el principio sus trabajos como Buffon, y tomó el título de Conde de Buffon cuando fue a su vez ennoblecido por el rey de Francia.

clasificación animal que también usaría Linne sino que además describe en ella especies que Buffon, y con él Azara, recogerían. En cuanto a Joseph Pitton de Tournefort también diseñó un sistema de clasificación de las plantas basado en las características de las flores y de los frutos. Se trataba de un sistema artificial, como el de Linne, a pesar de lo cual fue preferido por algunos de los críticos del autor sueco, entre ellos Buffon, que achacaban artificialidad al sistema linneano.

En resumen, durante las tres primeras décadas del siglo XVIII se habían establecido unas bases en la historia natural que, superando apenas las contribuciones de Aristóteles, Teofrasto y Plinio, imperantes de forma absoluta durante más de 1500 años, posibilitarían la construcción de un sólido armazón en torno al cual se edificarían la botánica y la zoología modernas. Pero esto era entonces tarea futura.

Por supuesto pocas de estas tendencias se manifestaban en España. A principios del siglo XVIII todavía se estaba propugnando en nuestro país una visión más moderna de la medicina, que incluyese las aportaciones de Vesalio, Paré y Harvey, y no se limitase a la visión galénica. Pero algunos autores españoles habían producido ya obras que, aunque no se incorporaron a la corriente principal del renacimiento científico de la Ilustración, quizás por prematuras, sí que representaron un aporte inestimable de información, no sólo para los grandes naturalistas del siglo XVIII, sino también para el propio Félix de Azara, si bien éste no las conoció hasta muy tarde. Nos referimos a las obras de los naturalistas de Indias, principalmente Gonzalo Fernández de Oviedo y José de Acosta, pero también otros de entidad menor pero que son específicamente citados y criticados por Azara. (p. ej, Francisco Hernández)

Forman estos naturalistas de Indias un grupo de autores que se sitúan en un nivel intermedio entre los enciclopedistas medievales y los observadores directos de la naturaleza en el campo. Muy influidos por Plinio el Viejo y recogiendo como él consejas e informaciones no comprobadas de las fuentes más diversas, representan, sin embargo un paso adelante en la observación de los seres vivos. Por ejemplo, FERNÁNDEZ DE OVIEDO (1851) reprocha a Pedro Martir de Anglería su falta de información de primera mano acerca de algunos animales como las iguanas:

“El cronista Pedro Martir dice que estas iuanas son semejantes a los cocodrilos del Nilo, en lo cual él se engañó mucho, y a semejantes y notorios errores están obligados los que en estas cosas escriben por oídas; porque estas iuanas no son mayores animales de lo que tengo dicho; los cuales he yo visto innumerables, desde menores que un dedo, hasta ser tan grandes como de suso se declaró; y de las pequeñas he visto muchas pasar por encima de los arroyos e ríos, seyendo chiquitas, e también por debajo del agua, seyendo mayores, en algunos arroyos; y, como he dicho, las he comido muchas veces. Y los cocodrilos son muy grandes animales, e de muy diferenciada forma e manera e color, e en otras muchas

particularidades”

Historia General e Natural de las Indias, Libro XI

En muchos otros lugares de su obra insiste Fernández de Oviedo en la insuficiencia de las descripciones basadas en referencias verbales o escritas, frente a las basadas en observaciones personales, aunque no deje de citar a menudo a los autores clásicos y les siga, especialmente a Plinio, en la ordenación de las especies que presenta. La misma pauta sigue JOSÉ DE ACOSTA (1590), si bien éste trabaja a menudo con datos de segunda mano, lo que compensa con un espíritu crítico que le lleva a menudo a conclusiones audaces y acertadas, en algunas de las cuales supera al mismo Azara. Por ejemplo, es muy interesante comparar las ideas de Azara acerca del poblamiento de América con las de Acosta. Azara rebate así la idea del tránsito intercontinental:

“... ¿Cómo puede explicarse razonablemente el paso de estas naciones de un continente a otro por el norte o por cualquier otro paraje que sea? No se trata aquí del paso de un hombre o de una mujer en una canoa o balsa, ni aún del de una parte de una nación vecina: es necesario concebir un brazo de mar atravesado por una multitud de naciones enteras, de las que no ha quedado ni un solo individuo en su antigua patria.”

Félix de Azara: Viajes por la América Meridional

En cambio Acosta, muy precozmente justifica la hipótesis del tránsito por el noroeste del continente americano:

“Este discurso que he dicho, es para mi una gran conjetura para pensar que el nuevo orbe que llamamos Indias , no está del todo diviso y apartado del otro orbe. Y por decir mi opinión tengo para mí días ha, que la una tierra y la otra en alguna parte se juntan y continúan, o a lo menos se avecinan y allegan mucho. Pues ya sobre el cabo Mendocino en la mar del sur tampoco se sabe hasta dónde corre la tierra, made que todos dicen que es cosa inmensa lo que corre... Si esto es verdad, como en efecto me lo parece, fácil respuesta tiene la duda tan difícil que habíamos propuesto: como pasaron a las Indias los primeros pobladores de ellas, porque se ha de decir que pasaron, no tanto navegando por mar, como caminando por tierra... ”

José de Acosta: Historia Natural y Moral de las Indias, Lib. I, Cap. XVI

La obra de Acosta, publicada en vida de su autor a diferencia de la de Fernández de Oviedo, y rápidamente difundida en Europa, ejerció un influencia clara sobre los naturalistas de los siglos XVII y XVIII, influencia que por desgracia no siempre es reconocida.

3. La década de arranque: 1730-1740.

La década que precedió al nacimiento de Félix de Azara se caracterizó por el inicio de las condiciones que determinarían más tarde su postura científica. Entre estas condiciones estaba la creación de una atmósfera nueva acerca de las investigaciones en historia natural, que aún tardaría en alcanzar España pero que se iniciaba ya en otros países de Europa. Es la década en que determinados autores claves como Linne alcanzan su madurez científica; la década en que se inician las expediciones científicas de altos vuelos sufragadas por la corona española; la década, por fin, en que terminados los años tensos del comienzo de la dinastía de Borbón, pudieron los monarcas españoles dedicarse a las mejoras culturales propias del despotismo ilustrado. Todas las actividades iniciadas en estos años continuarán y aumentarán en las décadas siguientes, aunque solamente en el último cuarto del siglo puede decirse con total razón que España entró en la época de la Ilustración.

El naturalista del siglo XVIII que más influencia tuvo en el desarrollo de la botánica y la zoología, aunque no en la obra de Félix de Azara, fue Carlos Linne, o Linneo. Por los años que estamos considerando Linne estaba estudiando medicina en las universidades de Lund y Uppsala, pero no llegó a licenciarse como médico, en parte por las limitaciones de la universidad y en parte por las suyas propias tanto económicas como de disposición. En efecto, su pasión era el estudio de las plantas, materia que en aquella época formaba parte esencial de la formación de un médico, pero que en su caso era demasiado exclusiva. Una cadena de acontecimientos casuales, pero que hubiera sido imposible sin el desmedido interés de Linne por las plantas, le llevó a conocer en 1730 un artículo escrito por Sébastien Vaillant un francés que trabajaba en el *Jardin du Roi*, en París. El artículo trataba un tema escasamente estudiado por entonces, la sexualidad de las plantas, y fue una revelación para Linne². Esta humilde semilla daría lugar al frondoso árbol de la obra linneana. En aquel invierno de 1730 simplemente empujó al joven autor sueco a examinar y contar los estambres de todas las plantas en sus colecciones, y a escribir un artículo sobre el tema. Su primera obra botánica llegó a la Academia de Ciencias de Suecia y fue impresa. Contenía la base de lo que luego sería el sistema linneano de clasificación de las plantas, y a Linne

²La sexualidad de las plantas había sido reconocida parcialmente ya por Teofrasto y luego, aunque en general equivocadamente, por Plinio el Viejo. Durante la Edad Media, sin embargo, el tema quedó oscurecido, y hasta finales del siglo XVII se reconocía únicamente en las palmeras datileras, especie con pies masculinos y femeninos separados. Autores del siglo XVII, como Tradescant o Brown, atribuían también, aunque de forma errónea, sexos separados a los abetos, que son monoicos y tienen flores masculinas y femeninas en el mismo pie. La primera obra en que se afirma que las flores hermafroditas de los vegetales tienen órganos masculinos y femeninos es *Anatomy of Plants*, publicada por Nehemiah Grew en 1682, pero como veremos después, los botánicos españoles fueron reacios a admitir la sexualidad vegetal hasta bien avanzada la segunda mitad del siglo XVIII.

le proporcionó, entre otras cosas, la oportunidad de explicar botánica en la universidad.

La idea de organizar y llevar a cabo una expedición botánica, como la que Linne efectuó a Laponia el año 1731, era insólita en aquella época. Muchos naturalistas escribían sus obras a partir de referencias verbales que habían recibido o de anteriores publicaciones. En ocasiones se trataba de autores que habían llegado a nuevas tierras por motivos ajenos a la investigación científica (lo que le sucedió a Gonzalo Fernández de Oviedo y le ocurriría también a Félix de Azara), y aprovechaban la situación para anotar sus propias observaciones. Una excepción eran los botánicos, que al disponer de un objeto de estudio más accesible, trabajaban a partir del material que poseían en colecciones o que cultivaban en jardines *ad hoc*, y también a partir de material herborizado cerca de su área de residencia. Así John Ray publicó su primera Flora utilizando el material recogido por él mismo en los alrededores de Cambridge. Pero cuando se trataba de estudiar territorios más alejados, ni los botánicos ni los demás naturalistas se atrevían a emprender una expedición para cuyo coste y riesgos no estaban preparados. A veces algún botánico afortunado, como lo fue Tournefort, podía viajar a países lejanos, pero en una expedición cómoda, fuertemente subvencionada y amparada por la corte real. Lo normal era que solicitasesen el material a viajeros que, por distintos motivos debían trasladarse a las regiones a prospectar. Para su “Flora de Inglaterra” el propio Ray trabajó con material enviado por correspondientes, además del que él mismo recolectó, y cuando inició su ambicioso proyecto de una flora mundial, que, naturalmente, no llegó a terminar, la mayor parte del material de estudio le había sido enviado por residentes en otros países.

La audacia de Linne al emprender una expedición a Laponia casi en solitario, y aunque fuese en la época estival, sólo puede explicarse por su ignorancia de las dificultades que le esperaban, por su necesidad de reponer las perdidas colecciones de Rudbeck y sobre todo porque necesitaba comprobar si su sistema de ordenación, que por entonces ya estaba configurando en mente, podría aplicarse también a especies aún no conocidas. En todo caso, aunque modesto en términos tanto económicos como geográficos o temporales y en los resultados científicos que produjo, el viaje de Linne puede considerarse con todo derecho una de las primeras expediciones científicas de un siglo que sería tan rico en ellas.

A la vuelta de su expedición Linne dispuso en Uppsala de un par de años en que con dificultades y aún con penurias, pudo dedicarse al tema que le obsesionaba, la clasificación de las plantas. Su interés por ese tema derivaba del hecho de que conocía ya un gran número de plantas, y necesitaba poner algo de orden en ese maremágnum para llegar a manejarlo. Es importante darse cuenta de que esta fue la razón principal que le llevó a diseñar su sistema de clasificación, como lo sería también en el caso de Félix de Azara cuando éste estudiase las aves del Paraguay. En cualquier caso, examinó los sistemas de clasificación existentes, en especial el de Tournefort, que de algún modo integraba y

superaba todos los anteriores, desde Teofrasto a Camerarius. El sistema de Tournefort se basaba en diversos rasgos morfológicos de las plantas, pero principalmente en la corola de las flores y en los frutos. Mediante este rasgo se distinguían las plantas apétalas de las monopétalas (con la corola soldada) y las polipétalas, y usando otros criterios se refinaba la clasificación hasta distinguir diez clases o grupos principales de plantas. Estas diez clases se subdividían en géneros, unos 600 por entonces, en los que el autor francés distribuyó las 6000 a 8000 especies de plantas entonces conocidas. Linne estudió y perfeccionó el sistema de Tournefort, ya que al intentar aplicarlo a sus colecciones pudo percatarse de que era insuficiente. Recordando sus trabajos sobre la sexualidad en las plantas diseñó un nuevo sistema que se basaba en distintas partes de la planta, pero esencialmente en el número de estambres de la flor. Sin embargo, no publicó sus ideas, y esta publicación debería esperar a su viaje a Holanda, país hacia el que partió en 1735.

Linne pasó casi cuatro años fuera de Suecia, la mayor parte de ellos en Holanda. Aparte de conseguir su título universitario —oficialmente era médico— tuvo la oportunidad de publicar la primera edición de su obra *Systema Naturae*, obra en la que trabajaría el resto de su vida y que serviría de fundamento al estudio de los seres vivos hasta nuestros días. Aquella primera edición de 1735 era muy modesta, un simple folleto de 11 páginas, y no incluía las especies, llegando sólo hasta los géneros. No se podía comparar con la décima edición, de 1758, que se adoptaría oficialmente como punto inicial de la nomenclatura zoológica moderna, y mucho menos con la decimotercera y última edición, de 1770, que constaba de unas 3000 páginas.

A partir de 1736 la obra de Linne empezó a difundirse por el mundo científico, y hacia el final de la década era conocida ya por los principales botánicos y también por algunos zoólogos. Despertó reacciones entusiastas en algunos y muy críticas en otros, basadas las primeras en que el método permitía poner en orden la inmensa avalancha de plantas y animales nuevos que se iban conociendo, y las segundas en que se trataba de un método artificial, innecesario e inútil. Uno de los autores críticos sería más adelante Buffon, quien prefería el método de Tournefort. Lo curioso es que, siendo artificiales tanto el método de este último autor como el de Linne, los partidarios de uno u otro sistema acusaban al de sus oponentes de artificialidad. Como seguidor de Buffon, y por falta de una formación adecuada, Azara se resistiría siempre a usar el sistema linneano, aunque ayudaría y aún procuraría que otros autores designaran sus especies con la nomenclatura binomial del autor sueco.

Por la época en que Linne regresó a Suecia, en 1738, esta nomenclatura aún no estaba establecida. Ni su obra fundamental, *Systema Naturae*, ni las otras ocho obras que escribió durante su estancia en Holanda, se conocían en Suecia cuando volvió, y sus primeros meses en su país fueron amargos. Ya en Holanda había experimentado la dureza

de las críticas de sus adversarios, pero sin duda estas críticas eran preferibles a la marginación, cuando no a la irrisión, de que fueron objeto sus obras en Suecia. Cuando en 1741 consiguió la cátedra de botánica en la Universidad de Uppsala las circunstancias habían cambiado y su obra ya no era objeto de burla sino de seria consideración, aunque las críticas continuaron, como veremos, y se hicieron incluso más feroces. Pero estas reacciones, como las de alabanza desmedida e hiperbólica que las siguieron, deberían esperar a la década siguiente, la década en que Félix de Azara nació.

Mientras Linne construía los fundamentos de su obra y empezaba a darlos a conocer, otro naturalista de altura y coetáneo del autor sueco, Georges Louis de Leclerc, más tarde Conde de Buffon y desde muy joven conocido como Buffon, iniciaba también su carrera científica. Este científico francés, el único que ejercería una influencia directa sobre las obras de Félix de Azara, seguía en esta época unas vías muy diferentes de las que había seguido Linne. Buffon era un hombre acomodado y no pasó las penurias que tuvo que sufrir su colega sueco. Su gran inteligencia y su pasión por las matemáticas le llevarían a utilizar más la teoría y menos la observación. Aunque fue un científico experimental y enfocaba muchas de sus investigaciones desde un punto de vista práctico no fue un biólogo de campo, y sí lo fue de gabinete. Esta calificación no es peyorativa. Tomó este camino porque se lo impusieron las circunstancias, y si Linne hubiera tenido la fortuna de ocupar un puesto de gestión de la investigación, como lo ocupó Buffon, probablemente también hubiera herborizado menos y teorizado más. Pero había diferencias reales de temperamento entre uno y otro autor, que eran independientes de las circunstancias: Linne era sistemático, Buffon informal, Linne tenía una visión que hoy llamaríamos reduccionista, Buffon la tenía, también con un término actual, holista, Linne tenía un estilo conciso, a pesar de la evidente poesía de algunas de sus descripciones, Buffon lo tenía elegante y especulativo, como él mismo demostraría en su famoso discurso de ingreso en la Academia Francesa.

Las diferencias entre Linne y Buffon, que luego se comentan con más detalle, se limitaron a ellos. Hubo muchos científicos e instituciones europeos que se opusieron vivamente a las ideas linneanas y llegaron a ridiculizarlas. Entre ellos se cuentan Dillenius, von Haller, Heister, Ludwig, Siegesbeck, Maupertuis, Diderot, etc. La mayoría de ellos basaban su oposición en puntos relacionados con la botánica, pero algunos, incluyendo el Vaticano, fundaban su rechazo en que encontraban repugnante y obscena una clasificación que utilizaba los órganos sexuales de las plantas.

En los años iniciales de la década, y poco antes que Linne, Buffon obtuvo su licenciatura, en este caso en Derecho. Es curioso que, al igual que Azara, Buffon estudiase leyes por imposición familiar, y que luego fuese conocido no por una carrera vinculada a su formación académica, sino por sus desempeños en historia natural. Sea como sea, terminados sus estudios inició un viaje que, a diferencia del de Linne, era de placer, y le

llevó por diversas ciudades de Francia, Suiza e Italia. A su vuelta, en 1733 comenzó en serio su carrera científica con la publicación de un trabajo sobre teoría de probabilidades, un tema por entonces todavía joven. Aunque a primera vista sin relación con la historia natural, ese trabajo es importante, no sólo por ser el primero, sino sobre todo porque revela un enfoque en parte experimental muy raro en matemáticas, y que recuerda los planteamientos de Arquímedes.

La visión generalista del científico francés se manifestaba ya en su interés por materias muy diversas, principalmente de tipo práctico y vinculadas a la gestión de su hacienda en Montbard. Muchas de estas cuestiones tenían que ver con la física y las matemáticas, pero algunas se referían a la gestión de sus bosques y al uso de sus maderas. Mayor conexión con la historia natural tuvo su traducción al francés del primer libro sobre fisiología vegetal, *Vegetable Staticks*, debido al inglés Stephen Hales. Pero en conjunto puede decirse que durante la mayor parte de la década Buffon cultivó la ciencia como un aficionado ocasional y desde luego sin dedicación especial a la historia natural. La situación cambiaría cuando se hiciese cargo del *Jardin du Roi*, lo que sucedió a finales de 1739. Pero su trabajo a partir de ese momento corresponde a la década siguiente.

Queda discutir un tercer punto, el relativo a las expediciones científicas españolas. Aunque sólo una de ellas, la de Malaspina, se relacionaría indirectamente con Félix de Azara a través del naturalista de la misma, Antonio Pineda, todas ellas contribuyeron a establecer en España el interés por los seres vivos procedentes de tierras lejanas, a crear los principales jardines botánicos y museos de historia natural, y a traer a nuestro país los conocimientos europeos en esta materia.

OCAMPOS (2002) presenta un breve comentario sobre las más de 60 expediciones científicas a América organizadas por España desde el reinado de Felipe V al de Carlos IV, número que DÍEZ TORRES et al. (1995) elevan a casi 75. Sólo una de ellas, la primera, tuvo lugar durante la década que nos ocupa, y fue la de La Condamine, que se inició en 1735.

La expedición de La Condamine no surgió de una iniciativa española, sino que fue propuesta por la Academia de Ciencias de París. El propósito de la misma era medir un arco de meridiano de un grado en latitudes próximas al ecuador, y comparar esta medida con la que efectuaría en Laponia una expedición similar. De resultar, como así ocurrió, que la medida ecuatorial era mayor que la boreal, ello significaría que la curvatura de la Tierra sería mayor en el Ecuador, y que por tanto el globo estaba achulado por los polos. Era, pues, una expedición con fines básicamente geodésicos y en principio poco relacionada con la historia natural ni con España. Pero la corte española exigió para autorizarla que dos marinos españoles, Antonio de Ulloa y Jorge Juan, se sumaran a la misma, y así se hizo. Esta circunstancia sería feliz para la ciencia española, pues Antonio de Ulloa era un

ilustrado ferviente, y a su vuelta emprendió acciones decisivas para el desarrollo científico en nuestro país, entre ellas las que llevarían a la creación del primer Gabinete de Historia Natural. Pero estas acciones, así como la publicación de los resultados de la expedición, tanto por parte de Ulloa como del propio La Condamine, se produjeron ya en la década siguiente.

4. La infancia: 1740-1750.

Como es sabido, la fecha de nacimiento de Félix de Azara ha dado lugar a un cierto debate, ya que a partir de las declaraciones del propio Azara sería la de 1746, mientras que de su partida de nacimiento se deduce la de 1742. Más adelante se comenta este punto, pero basta por ahora decir que en todo caso su infancia transcurrió en la década de los 40 del siglo XVIII. Dada su edad y las condiciones de su pequeña localidad natal de Barbuñales, huelga decir que no tuvo ni atisbo de las ideas de los grandes naturalistas europeos. Su educación inicial, como la de sus hermanos, corrió a cargo de preceptores que le enseñaron las primeras letras. Otros conocimientos que serían más relevantes para él en relación con su trabajo de ultramar, deberían esperar a su adolescencia.

En esos años triunfaba Linne, despuntaba Buffon y arrancaba la batalla de la Ilustración, con los escritos de Voltaire y de Diderot. También nacían ilustrados punteros, como Ignacio Jordán de Asso, coetáneo de Azara, en Aragón, Jovellanos fuera de Aragón pero en España o Goethe, este ya más bien prerromántico, fuera de nuestro país. Volvían de América Antonio de Ulloa y Jorge Juan, y empezaban sus actividades particulares en pro del avance científico de España. Y lentamente, algunas iniciativas científicas iban cuajando. Eran, realmente, los años decisivos.

Aunque las obras de Linne se difundían, y la principal de ellas, *Systema Naturae*, se ampliaba y enriquecía en cada nueva edición, el autor sueco escribió menos durante esta década que durante la anterior. ¡Era difícil alcanzar el límite de cuatro obras, con 1850 páginas, que produjo en 1737! Pero no estuvo inactivo, por supuesto. Además de sus tareas docentes en la Universidad de Uppsala, de la que llegó a ser rector a finales de la década, escribió al menos tres obras, una de las cuales, *Fauna Suecica*, es de especial interés por ser la primera obra faunística en sentido moderno y en la que, como es de suponer, Linne aplicó su esquema clasificatorio zoológico. Estos años fueron cruciales también de cara a la difusión de sus ideas, porque para empezar, a partir de 1741 Linne pudo formar discípulos y disponer de ellos para involucrarlos en distintas expediciones — Pehr Löfling, que viajó a Venezuela en una expedición posterior patrocinada por la corona española sería uno de ellos — y vio así su nombre y su obra proyectados en los ámbitos científicos de todo el mundo.

En efecto, además de la Academia de Ciencias de Suecia, de la que había sido fundador en 1739, Linne ingresó durante esta década en numerosas academias extranjeras, entre ellas las de San Petersburgo, Berlín, París y Filadelfia. Sus trabajos eran ampliamente conocidos también en Holanda y en Inglaterra, pero muy poco en España, donde comenzaba a despuntar entonces José Quer, un convencido botánico tournefortiano que más adelante, cuando conociese la obra de Linne, entraría en el grupo de los opositores radicales al botánico sueco.

Cuando la vida de Linne empezaba a asentarse en Uppsala, ocurría lo mismo con la de Buffon. En 1739 éste era nombrado intendente del *Jardin du Roi*, en Paris. La institución había salido del marasmo en que había permanecido desde su fundación, gracias a la activa intervención de Charles Dufay, el intendente que estuvo a cargo del jardín entre 1732 y 1739. Dufay había trabajado activamente para convertir el *Jardin du Roi* en un centro de interés científico, mejorando sus instalaciones y enriqueciendo sus colecciones. En 1739, antes de morir, recomendó a Buffon para el cargo, no sin la intervención interesada de éste, y su recomendación fue aceptada.

Al comienzo, el trabajo de Buffon, que simultaneaba con sus investigaciones particulares en su hacienda de Montbard, se concentró en continuar con mayor intensidad la obra de Dufay. A pesar de los inconvenientes de las guerras francesas que dejaban pocos recursos para las instituciones científicas, Buffon creó una red de correspondentes en todo el mundo de los cuales empezó a recibir abundantes envíos de minerales, plantas y animales. Estos envíos servían a su propósito de convertir el *Jardin du Roi* en lo que luego sería, un Museo de Historia Natural. A lo largo de la década las colecciones del centro se incrementaron hasta el punto de que en 1745 Buffon tuvo que ceder parte de su vivienda para alojarlas. Al mismo tiempo se empezaron a contratar y a formar naturalistas de relieve, proporcionando al centro una plantilla que lo convertiría en un verdadero núcleo de investigación científica. Como se ve, todo eran acciones locales, por más que los científicos dirigidos por Buffon comenzasen a tener proyección fuera de su ciudad. Pero estas acciones de alcance local eran fundamentales para situar a Buffon en el umbral de sus realizaciones más decisivas, y que le darían gran parte de su fama.

Hacia finales de la década Buffon había recogido, acondicionado y observado tantos ejemplares de animales y plantas que pudo considerarse experto en historia natural. Sus observaciones le desbordaban, pero en lugar de ordenarlas, resumirlas y sistematizarlas, como había hecho Linne, pensó en recogerlas en una amplia panorámica que englobase todo lo que se conocía en su tiempo acerca del tema, exponiéndolo a grandes rasgos aunque sin olvidar algunos detalles. Probablemente hacia 1747 concibió la idea de una vasta Historia Natural que recogiese todos esos conocimientos. Obviamente, se percató de que esa empresa exigiría mucho tiempo y esfuerzo, muchos volúmenes, y muchos colab-

boradores, pero ello no le arredró. Se impuso un eficaz programa de trabajo y en 1749 aparecieron los tres primeros volúmenes de lo que sería su obra más famosa y la única que utilizaría intensamente Félix de Azara, la *Histoire Naturelle Générale et Particulièrre, avec la Description du Cabinet du Roi*.

Los tres primeros volúmenes, únicos impresos antes de 1750, conocieron un éxito inmediato, pero todavía muy inferior al que gozaría la obra en las décadas siguientes, cuando estuviese más avanzada. Comprendían estos volúmenes una parte muy pequeña del plan de Buffon, pero esta parte contenía un elemento fundamental para comprender las ideas del autor y la influencia que ejercieron.. El primer volumen se dedicaba casi por completo a cuestiones de geología, hidrología y meteorología, pero iba precedido de un famoso discurso, *De la manière d'étudier et de traiter l'Histoire Naturelle*, en el que Buffon exponía su visión de la historia natural y el enfoque que pensaba dar a su obra. En comparación, el segundo volumen, que recoge ensayos generales sobre los seres vivos y el hombre, y el tercero, en el que se describen las colecciones reales, son de importancia secundaria. El discurso indicado, que permite calibrar las ideas de Buffon en relación con las de sus contemporáneos, es mucho más relevante.

Ya al final del primer párrafo de su discurso Buffon contrapone los dos enfoques básicos del estudio de la historia natural, la perspectiva global y la atención al detalle, por más que señala que un buen naturalista debe cultivar simultáneamente ambos enfoques:

“...l'on peut dire que l'amour de l'étude de la Nature suppose dans l'esprit deux qualités qui paroissent opposées, les grandes vues d'un génie ardent qui embrasse tout d'un coup d'œil, & les petites attentions d'un instinct laborieux qui ne s'attache qu' à un seul point.”

Desde luego, él no siguió este consejo, y recomendó a sus lectores que no lo siguieran. En efecto, poco más adelante afirma que es necesario abordar el mundo natural simplemente viendo muchos objetos y volviéndolos a ver a menudo, sin ideas preconcebidas ni sistemas clasificatorios que coarten la libertad de la inteligencia. Evidentemente esta crítica se dirige al sistema linneano de clasificación, que Buffon rechaza de manera más explícita en párrafos sucesivos:

“Un autre inconveniencier qui n'est pas moins grand, & qui est le contraire du premier, c'est de s'assujétir des méthodes trop particulières, de vouloir juger du tout par une seule partie, de réduire la Nature de petits systèmes qui lui sont étrangers, & de ses ouvrages immenses en former arbitrairement autant d'assemblages détachez ; enfin de rendre, en multipliant les noms & les représentations, la langue de la science plus difficile que la Science elle-même.”

Y poco más adelante arremete directamente contra Linne, apoyando el sistema de

Tournefort:

“...plusieurs méthodes de Botanique, toutes fondées peu près sur ce mme principe; parmi ces méthodes celle de M. de Tournefort est la plus remarquable, la plus ingénieuse, & la plus compléte. Cet illustre Botaniste a senti les défauts d'un système qui seroit purement arbitraire; en homme d'esprit, il a évité les absurdités qui se trouvent dans la plpart des autres méthodes de ses Contemporains, & il a fait ses distributions & ses exceptions avec une science & une adresse infinies; il avoit, en un mot, mis la Botanique au point de se passer de toutes les autres méthodes, & il l'avoit rendu susceptible d'un certain degré de perfection; mais il s'est élevé un autre Méthodiste qui, après avoir loué son système, a tâché de le détruire pour établir le sien, & qui ayant adopté avec M. de Tournefort les caractères tirez de la fructification, a employé toutes les parties de la génération des plantes, & sur-tout les étamines, pour en faire la distribution de ses genres; & méprisant la sage attention de M. de Tournefort ne pas forcer la Nature au point de confondre, en vertu de son système, les objets les plus différens.”

Era natural que la visión de Buffon se enfrentase a la de Linne, como ya hemos dicho antes. El autor francés no creía posible encasillar a las diferentes especies de animales, ya que percibía entre ellos, según sus propias palabras, una gradación insensible que iba desde el hombre, al que incluía lógicamente en el reino animal, como ya había hecho Linne, hasta la materia menos estructurada, así como la imposibilidad de introducir cortes artificiales en esa gradación. Este aspecto esencial de las ideas de Buffon sería asumido por el propio Félix de Azara, no obstante sus críticas al autor francés.

No deja de ser chocante que un enfoque como el de Buffon, que podía conducir directamente al evolucionismo a partir de la gradación insensible y continua que él percibía en la escala de los seres vivos, llevase de hecho a una vía muerta, y que el enfoque de Linne, fijista y creacionista donde los haya, se fundamentase en cambio en una historia evolutiva subyacente. A Buffon le escandalizaba, y así lo dice, que Linne englobara en unas mismas clases plantas tan diferentes como las moreras y las ortigas, o las fresas y las rosas. Pero tenía razón Linne: fresas y rosas corresponden a la misma familia, y tienen un antecesor común, y lo propio sucede con las moreras y las ortigas, que comparten el mismo orden taxonómico. Pocas pautas evolutivas hubiera podido deducir Darwin de haberse basado en los grupos propuestos por Buffon, pero encontró el camino abierto con las unidades propuestas inicialmente por Linne.

La polémica en torno al sistema linneano se agudizó en las décadas siguientes, y de hecho dividió a los naturalistas, al menos hasta 1820, en buffonianos y linneanos, pero finalmente ese sistema llegó a imponerse en todas partes. También en España, donde se introdujo con más retraso que en otros países de Europa. Linne, quien, como es bien sabido, tenía una conciencia quizás desmedida de su propia valía, reaccionó a menudo con

hostilidad hacia las críticas que recibía, y utilizó para sus pequeñas venganzas la nomenclatura latina que estaba estableciendo, bautizando a las especies de aspecto repulsivo con los nombres de sus contrincantes científicos. En definitiva, el autor sueco tuvo mucha suerte por haber elegido como criterio básico de su clasificación un carácter, el número de estambres de la flor, que refleja relativamente bien las afinidades filogenéticas de los grupos. Por el contrario, los autores que como Buffon, y luego Azara, utilizaban a la vez numerosos caracteres para establecer su clasificación, consideraban fundamentales entre éstos algunos rasgos, como el tamaño o la coloración, que figuran entre los menos estables desde el punto de vista filogenético, y que pueden variar notablemente dentro de una misma familia, género y aún especie. Esto daba como resultado grupos artificiales, cuando lo que se pretendía era un sistema más natural que el de Linne, mientras que este sistema, considerado artificial por sus adversarios, lograba grupos más naturales.

La obra de Buffon consiguió un éxito inmediato en Francia, hasta el punto de que la primera edición se agotó en seis semanas, y todavía en el año 1749 se imprimieron la segunda y tercera ediciones. Las traducciones al inglés, alemán y holandés se iniciaron en ese mismo año, con un adelanto de 36 respecto a la primera traducción española, pero su impresión y difusión, así como la continuación de la obra y la aceptación de Buffon como una especie de experto supremo en historia natural, deberían esperar a la década siguiente.

En 1745, mientras Linne enviaba sus primeros discípulos a distintas expediciones y Buffon dedicaba parte del espacio de su vivienda a acoger las crecientes colecciones del *Jardin du Roi*, terminaba la primera expedición científica hispano-francesa a América, dirigida por La Condamine. De momento, el mejor resultado de esa expedición de cara a la ciencia española, fue la formación que recibieron o se autoaplicaron los participantes españoles en la misma, Jorge Juan y Antonio de Ulloa, que regresaron a España convertidos en unos científicos consumados particularmente expertos en el ámbito de la astronomía y la geodesia. Antonio de Ulloa, que tan decisivo papel había de tener en España en la siguiente década, tardó más de la cuenta en regresar a su patria, pues fue apresado por los ingleses y hecho prisionero en Inglaterra. No volvió a España hasta 1746, una vez liberado, recuperada la documentación científica que se le había confiscado, y admitido con todos los honores en la Royal Society.

Nada más regresar a España Ulloa emprendió la tarea de renovación y mejora de la ciencia nacional. Sus contactos con Londres fueron decisivos para que el gobierno le encomendara una misión de prospección científica por Europa, en la que se informó de los últimos avances científicos, entre ellos de las colecciones conseguidas y conservadas por Buffon, y concibió el deseo de emprender iniciativas similares en España. Aunque estas iniciativas no se podrían en marcha hasta la década siguiente, todavía pudo publicar

antes de 1750, cuatro obras en colaboración con Jorge Juan, todas ellas derivadas de la expedición de La Condamine, y de las cuales nos interesa especialmente una, *Relación histórica del viaje hecho de orden de su Majestad a la América Meridional*, que vio la luz en 1748. A diferencia de las Noticias Americanas, que publicaría en 1772 y que luego se comentarán, esta obra tiene pocos datos de historia natural, pero los que tiene, así como las observaciones astronómicas geológicas y físicas de la misma obra y de las otras tres obras que publicó en esos años, sirvieron quizás de precedente a las observaciones efectuadas mucho más tarde por Félix de Azara³.

5. La adolescencia: Una década clave.

Los años que van desde 1750 a 1759 son quizás los que definitivamente encaminan la vida de Félix de Azara hacia su destino. Son los años en que inicia sus estudios y descubre su vocación militar. Son los años en que empieza a absorber con eficacia las ideas de la Ilustración, todavía poco difundidas en España. Y son los años en que la atmósfera científica de Europa en el ámbito de la historia natural, se coloca oficialmente bajo la tutela de sus dos pontífices, Linne y Buffon. Sin olvidar que en el año 1751 precisamente, Diderot comienza la publicación de su famosa Encyclopédie e inicia así el movimiento de los encyclopedistas.

Antes de su partida hacia América no consta que Félix de Azara tuviese interés alguno por la historia natural, pero al leer sus primeras descripciones de animales americanos puede constatarse que a veces los asimilaba a especies europeas, o las designaba con el mismo nombre que a éstas. Ello significa que conocía estas especies, al menos las de su tierra, antes de su viaje. De hecho en alguna ocasión lo indica explícitamente: “... como lo he visto yo mismo en los gorriones de mi tierra.” Y no podía ser menos. Un muchacho perteneciente a la nobleza rural aragonesa, en una zona rica en caza, tenía que acompañar a sus mayores o a sus criados en esta actividad, y aún de practicarla. A pesar de la indicación explícita de su primer biógrafo, Walckenaer, quien dice de Azara “... no conociendo ni aún los animales de su país natal, pues sólo se había dedicado a este estudio mientras estuvo en América...”, el conocimiento que el joven Félix podía tener de la naturaleza era el que tendría cualquier muchacho en esas circunstancias: aunque con menos libertad que sus vecinos más humildes, habría buscado nidos, habría pescado en el cercano río Alcanadre

³En esta década tuvo lugar una segunda expedición científica a América, concretamente en 1745 y 1746. Se trata de la expedición del Padre Quiroga y sus compañeros jesuitas a la Patagonia, que no puede compararse ni por su duración, sus objetivos y sus resultados a la gran expedición de La Condamine. Las escasas observaciones de historia natural realizadas en ella no pudieron servir a Azara. Eran simples menciones ocasionales de animales que vivían en regiones que Azara nunca visitó, hechas sin pretensión científica. No tuvo apenas influencia sobre la ciencia española.

y habría acompañado a su padre por el monte. Si más no, conocería de primera mano los problemas de una explotación agrícola y ganadera de aquellos tiempos. Pero nada se sabe con certeza de la infancia de Félix de Azara (BAULNY, 1969)

Sabemos que en estos años Félix de Azara comenzó sus estudios fuera de su casa, concretamente en la Universidad Sertoriana de Huesca. Ingresó en esta Universidad en 1757, a los 15 años de edad, y tras una supuesta formación elemental en su casa de Barbuñales. Le apadrinó su tío don Mamés de Azara, canónigo maestrescuela de la catedral de Huesca, quien ya había hecho lo mismo con su hermano mayor José Nicolás. En épocas anteriores sobre todo, pero todavía en el siglo XVIII, los destinos que se daban a los varones en una familia acomodada eran los clásicos, Iglesia o Armas, en una antinomia que Cervantes dibujó magistralmente en el discurso de D. Quijote sobre las armas y las letras. Además estaba el mayorazgo, que solía quedar para el hijo mayor, quien heredaba la hacienda y la mantenía. En el caso de los Azara no se cumplió la pauta, y el mayorazgo quedó para el menor de los hermanos, Francisco Antonio. Eran los últimos años del reinado de Fernando VI y los primeros de Carlos III, y fueron años pacíficos, ya que España mantuvo una política neutral en las confrontaciones europeas. Quizás por ello ninguno de los Azara fue destinado a la carrera militar y todos ellos, incluido el menor, lo fueron así a las Letras, bien en la vertiente eclesiástica, bien en la vertiente jurídica. A Félix le correspondió esta última opción, que al parecer no le gusto demasiado.

Sea como fuere, Félix emprendió sus estudios de Filosofía y Artes (dos años) y de Leyes (los dos años siguientes) en Huesca, unos estudios que tuvieron poco que ver con su desempeño posterior en historia natural o en topografía militar, pero que quizás le dejaron un sentido de amor a la legalidad que también tendría que poner en práctica durante muchas de las misiones que se le encomendarían en Sudamérica. Durante su estancia en Huesca residió en casa de su tío. Nada se sabe de su rendimiento en los estudios, sino que los dejó al cabo de cuatro años sin haber repetido ningún curso. Puede que fuese motivo para ello el atraso de las enseñanzas en esa universidad, todavía anclada en el escolasticismo en cuanto a filosofía, y opuesta a cualquier innovación moderna en otras materias. En efecto, en medicina esta universidad se alineó con las de Salamanca, Alcalá, Valladolid, Barcelona, Lérida, y Valencia en su oposición a la nueva medicina propugnada por la universidad de Zaragoza, alegando que tales enseñanzas eran contrarias a Galeno. El mismo retraso se aprecia en el ámbito de las matemáticas (FERRER DEL RIO, 1856) o para la filosofía, disciplina que afectaría a Azara en particular (ALFAGEME et al., 1987). Sin embargo esta circunstancia no influyó en José Nicolás de Azara, quien, a pesar de completar sus estudios secundarios en la misma universidad, y pasar luego a Salamanca, otra universidad entonces reaccionaria, adoptó intensa y combativamente los principios de la Ilustración. En esas condiciones parece claro que Félix no podía haber oído hablar

de ninguno de los autores europeos o españoles que estaban haciendo avanzar la historia natural, y probablemente no conocería ni los nombres de Buffon o de Linne. Pero éstos se encontraban entonces en la cumbre de su carrera científica, quedando esta década fuertemente caracterizada por algunas de sus obras.

En estos años Linne triunfó de manera absoluta, a pesar de las críticas que recibía de sus opositores irreducibles. Estas críticas no compensaban las alabanzas, a menudo desmesuradas, que recibió⁴, y de cuya justicia parecía estar convencido. Para él correspondieron a una época dichosa, en la que recibía estudiantes procedentes de todos los países de Europa y trabajaba con ellos en una atmósfera jubilosa y productiva. A algunos de esos estudiantes, a los que el llamaba “sus apóstoles”, los envió en misión herborizadora a regiones remotas. Su situación económica era boyante y le pudo permitir la adquisición de propiedades cerca de Uppsala, en una de las cuales construyó un jardín botánico personal que todavía se mantiene y se visita, junto con su casa. Su situación social también había experimentado una gran mejora, hasta el punto de que fue Presidente de la Academia de Ciencias de Suecia y el primer civil condecorado por el rey de Suecia con la Orden de la Estrella del Norte, lo que preludiaba su posterior ennoblecimiento. Y desde el punto de vista de su producción científica esta década fue también fundamental, en especial por dos obras que publicó, *Species Plantarum*, que describía las 8000 especies de plantas que él conocía, y *Systema Naturae*, que alcanzó en 1758 su décima edición. En ambas obras Linne expone y desarrolla por completo el sistema de nomenclatura latina binomial que todavía está en uso. El catálogo de especies de plantas de la primera obra venía a completar los escritos previos de Linne, *Genera Plantarum*, de 1737, y *Classes Plantarum*, de 1738, y se considera el punto de partida oficial de la nomenclatura botánica. Precisamente también la décima edición de *Systema Naturae*, de 1758, muy crecida respecto a la inicial de 1735, se ha adoptado oficialmente por los zoólogos como el punto de partida de la nomenclatura latina. Ha sido y es todavía, por lo tanto, una obra fundamental en la historia de la ciencia, de una importancia que no alcanzaría ni de lejos la obra de Buffon, con todo su atractivo para la época. Bueno será, por lo tanto, conocer un poco más esta décima edición que fundamentó la zoología subsiguiente.

Esta obra recoge la clasificación fundamental de los seres vivos en categorías taxonómicas.

⁴Un ejemplo explícito de la consideración de Linne por parte de los científicos británicos en esa época, y de la que había tenido años atrás, cuando aún era desconocido, lo suministran las siguientes palabras de un autor anónimo, publicadas el año 1750 en la revista The Monthly Review: “Cuando Linne, el mayor botánico que el mundo ha conocido o que probablemente conocerá jamás, estuvo aquí y ofreció a esta Sociedad (la Royal Society de Londres) los descubrimientos por los cuales ha sido desde entonces casi divinizado, ha acumulado honores y más honores, se le han dado trabajos provechosos y altas dignidades, y se han acuñado medallas con su nombre, fue menospreciado, sus trabajos fueron objeto de burla, y él mismo, de no ser por la generosa amistad del hoy Dr. Isaac Lawson, hubiera perecido de necesidad”.

cas de distinto nivel, concretamente clases, órdenes, géneros y especies, categorías que ya se habían empleado en la primera edición. Otras categorías como las familias y los tipos, así como las llamadas categorías intermedias (subtipo, subclase, suborden, etc), fueron introducidas posteriormente. El número de especies recogidas por Linne (poco más de 10000 en la décima edición), refleja la distinta concepción que se tenía de la especie en su tiempo y en la actualidad. Hoy este número se aproxima al de familias conocidas, y de hecho en muchos casos las especies linneanas corresponden a familias actuales, como los géneros corresponden a los actuales órdenes y las clases a los actuales tipos o phyla. Linne distinguía 20 clases para las plantas y sólo 6 para los animales, *Quadrupeda* (luego llamados *Mammalia*, los actuales mamíferos), *Aves*, *Amphibia* (entre los que se incluían los reptiles, que Linne consideraba de vida anfibia), *Insecta* (más o menos equivalentes a los actuales artrópodos) y *Vermes* (un cajón de sastre heterogéneo en el que situaba a los demás animales). Tomando, por ejemplo, los mamíferos, el autor sueco subdividía la clase en cinco órdenes, que en posteriores ediciones aumentaría a ocho, *Anthropomorpha* (los primates, entre los que se incluían especies tan alejadas como el perezoso), *Ferae* (los carnívoros, con inquilinos hoy tan insólitos como los topos y los murciélagos), *Glires* (los roedores, con algunos insectívoros), *Jumenta* (un conjunto mixto de ungulados y proboscídeos) y *Pecora* (este sí, un grupo relativamente homogéneo formado por artiodáctilos). En estos cinco órdenes distribuyó una treintena de géneros y algo más de 180 especies de mamíferos. Dentro del orden primates, por ejemplo, distinguía tres géneros, *Homo*, *Simia* y *Bradypus*, y dentro del género *Homo* incluía dos especies, *Homo diurnis*, el hombre, y *Homo nocturnis*, el orangután, al que, por cierto, según su descripción, consideraba dotado de inteligencia, raciocinio y lenguaje.

Este conciso resumen es bastante para calibrar las insuficiencias del sistema. No obstante, aunque defectuoso, este sistema constituía un armazón en el que situar los animales conocidos y también los que se descubrirían posteriormente. Y en todo caso representaba una mejora sustancial respecto a ediciones anteriores. En cada edición se había ampliado el número de especies descritas y se habían corregido errores importantes. Por ejemplo, en la décima edición el número de especies de mamíferos descritas había alcanzado las 184, mientras que en la primera edición era de 87, y se incluían por primera vez las ballenas entre los mamíferos sacándolas de la clase de los peces. Pero, como se ha dicho antes, la innovación principal y que califica a esta edición como punto de partida de la taxonomía zoológica es el uso consistente y general de la nomenclatura latina binomial.

Linne pasa por ser el prototipo de los biólogos fijistas, convencidos de que las especies animales y vegetales son inmutables y han salido tal cual son de las manos del Creador. Sin embargo, hacia el final de esta década parece ser que sus ideas estaban experimentando un cambio. Percibía que la inmutabilidad de las especies no era tan estricta, y en 1759

presentó un trabajo (*Generatio Ambigena*) a la Academia de Ciencias de San Petersburgo, en el que aceptaba la posibilidad de cambio de las especies mediante hibridación. Al mismo tiempo continuaba buscando un sistema de clasificación más natural que el suyo, que reflejase las afinidades reales entre las distintas especies de seres vivos, lo cual era tanto como buscar un esquema de la evolución sin percatarse de ello. De hecho Linne había dicho que quien encontrase un método natural de clasificación “sería para él un Apolo”.

Ya se ha dicho que el sistema de Linne despertó una polémica que oscilaba entre la dura crítica y la alabanza desmedida, y se han mencionado las posturas de algunos de los críticos. Entre las personas que vieron la obra linneana de forma muy favorable figuran Voltaire, a quien le impresionó la complejidad del sistema linneano hasta el punto de que escribió al margen de su copia del *Systema Naturae* su famosa frase “*Si Dieu n'existe pas il faudrait l'inventer*”, o Rousseau, quien dijo de Linne que a su entender, era el hombre más grande del mundo, y que le había dado la salud, el alma y la vida. No está de más señalar que entre los autores convencidos de la inmensa valía de Linne figuraba él mismo, pues no en vano adoptó la divisa “*Deus creavit, Linnaeus ordinavit*”, colocándose poco menos que en plan de igualdad con la Divinidad. Los opositores eran igualmente fervorosos, y la situación recuerda a tantas otras que se han dado en tiempos más recientes acerca del valor y la importancia de las clasificaciones y las nomenclaturas biológicas. Piénsese, por ejemplo, en las diatribas que han rodeado el uso de la clasificación fitosociológica o sintaxonómica, cuyos detractores emplean exactamente los mismos argumentos que otrora empleaban los opositores a Linne.

Conociendo la oposición de Buffon, Linne esperó impaciente desde 1750 la aparición de los siguientes volúmenes de la Historia Natural. Es verdad que el tercer volumen proporcionaba ya una pista sobre el método de clasificación seguido por el francés, pero como se limitaba a describir unas colecciones, podía hacerlo, como lo hacía, siguiendo la ubicación de los ejemplares. Mediante sus correspondientes en Francia Linne se enteró inmediatamente de la aparición del volumen 4º (en 1751), y de que Buffon iniciaba su descripción de los animales por los domésticos. Una clasificación de los animales que los dividía en domésticos y salvajes era incluso más pobre que la vieja división aristotélica entre animales con sangre y sin sangre, y Linne no dejó de criticar la endeblez del esquema clasificatorio.

Entre los adversarios de Buffon, sin embargo, figuraban algunos bastante más temibles que los naturalistas linneanos. Los profesores de teología de la facultad de la Sorbona, encargados de censurar los libros contrarios a la fe, no podían pasar por alto las afirmaciones recogidas en el segundo volumen de la *Histoire Naturelle* acerca de la edad de la Tierra y de su formación. La habilidad de Buffon consiguió superar este obstáculo sin retractarse explícitamente de las afirmaciones en cuestión, pero está claro que su postura era un punto de ataque ofrecido en bandeja a sus adversarios más conservadores, que

seguían a Linne.

La vida de Buffon en esta década experimentó cambios importantes en lo personal (por ejemplo su matrimonio), en sus investigaciones (fue el primero en demostrar, siguiendo las ideas de Benjamín Franklin, que los rayos consistían en descargas eléctricas), en su proyección social (fue recibido en la Academia Francesa) y en su propia obra (durante estos años terminó parte de los volúmenes de la *Histoire Naturelle* relativos a los mamíferos y concibió los de las aves). Solamente comentaremos estos dos últimos puntos, más relacionados con el propósito del presente artículo.

Su recepción en la Academia Francesa, de hecho, tiene poco que ver con la historia natural, pues se trata evidentemente de la gran institución, homóloga y precedente de la Real Academia Española dedicada al cuidado de la lengua francesa, no de la Academia de Ciencias de París, a la que Buffon pertenecía ya desde hacía tiempo. Lógicamente, el discurso de ingreso debía versar sobre temas relacionados con el idioma francés, y no con los animales o las plantas, y así el discurso leído por Buffon fue el célebre “*Discours sur le Style*”, un tema que podía aplicarse a todos los escritores, incluyendo a los que tratan sobre historia natural. Las frases de Buffon en ese discurso, vinculando la solidez de las ideas de un autor a una forma de exposición que resalte dicha solidez, o afirmando que el estilo es insustituible y permanente, mientras que el contenido no lo es, conservan vigencia incluso actualmente. Pero la importancia fundamental de ese trabajo para nosotros estriba en que permite contrastar las formas de expresarse- ¡y por ende de pensar! — de distintos autores. No hay más que comparar el estilo brillante,pletórico de ideas, y de notable altura filosófica de este discurso o de otros discursos de Buffon como el que sirve de prólogo a su *Histoire Naturelle*, con el estilo extremadamente conciso, casi telegráfico, de las descripciones linneanas, o con el estilo apagado, incluso cuando relata anécdotas o experiencias personales, de los libros de viajes de este último autor. Por cierto, si incluimos a Félix de Azara en la comparación el autor aragonés no sale muy bien librado, pero, naturalmente, trabajaba en otras condiciones y circunstancias.

Dos días después de su recepción en la Academia Francesa y una vez solventadas provisionalmente sus dificultades teológicas con la Sorbona, Buffon publicó el volumen cuarto de su *Histoire Naturelle*, y a lo largo de la década fueron apareciendo los volúmenes siguientes concretamente los volúmenes quinto a séptimo, todos ellos dedicados a los mamíferos. Salvo en los tres primeros volúmenes aparecidos en la década anterior, Buffon contó con la colaboración de un joven autor, Louis Jean Marie Daubenton, quien progresivamente fue haciéndose cargo de más y más trabajo. Muchas de las críticas que más tarde dirigiría Félix de Azara a la obra de Buffon correspondían más bien al trabajo de Daubenton y de otros colaboradores.

Las ideas más polémicas de Buffon, que motivaron la repulsa de los teólogos de La

Sorbona, son las que figuran en los dos primeros volúmenes de la *Histoire Naturelle*. Básicamente se refieren a tres puntos, el origen de la Tierra y de los demás planetas, que Buffon suponía formados a partir de fragmentos del Sol expulsados por el choque de un cometa, los géneros de verdad y sus grados de aceptabilidad, y el alma humana y sus relaciones con el cuerpo y el mundo exterior. No interesan aquí más que por su carácter innovador y por que permiten comprender el método de trabajo de Buffon, especulativo, pero bien fundado en su propio razonamiento y en un conocimiento excelente de la literatura científica.

Más interés tiene el método de organización, clasificación y descripción que emplea en su obra. Para empezar, hay que decir que el plan de su libro fue cambiando a lo largo del tiempo, y quizás no incluyese al principio más que un tratado sobre los mamíferos motivado por la necesidad de dar a conocer las colecciones reales. Claro está, ese tratado requería de un marco más general, y por ello antepuso al mismo unos volúmenes sobre la Tierra y sobre el Hombre. Cuando tenía ya desarrollado este esquema lo incluyó en un marco metodológico y conceptual, que constituyó su discurso sobre la manera de estudiar la historia natural que sirve de introducción al primer volumen. Aunque sin duda la idea de una descripción completa de los tres reinos de la naturaleza estaba presente desde el comienzo en la mente de Buffon, probablemente no la asociaba a una realización efectiva. Su propósito era terminar la descripción de los mamíferos y después lo que pudiese añadir. Parece ser que no fue hasta 1758, después de recibir del rey el encargo de ocuparse de las colecciones de Réaumur, muy ricas en aves, e integrarlas en las del *Jardin du Roi*, cuando Buffon concibió la idea de añadir a los volúmenes sobre mamíferos, de los que todavía faltaban bastantes por publicar, la *Histoire Naturelle des Oiseaux*. Además de éstos todavía pudo escribir los volúmenes correspondientes a los minerales poco antes de su muerte, pero los referentes a los demás animales ya no se debieron a él sino a Lacépède, y los correspondientes a los vegetales nunca fueron escritos. La postura de Buffon de describir cada especie de forma independiente y su hostilidad hacia los sistemas de clasificación probablemente le impidieron incluir un plan sistemático de la obra y dejaron a los lectores sin saber lo que se habían perdido con la muerte del autor.

El tema de la clasificación seguida tiene particular importancia porque el método de Buffon, o más bien su falta de método, fue empleado también por Félix de Azara. Si Buffon arremete contra Linne por su clasificación botánica, es todavía más duro cuando se trata de los animales. Probablemente le asistía más razón en este punto, porque la clasificación zoológica, ya lo hemos visto, era el punto más débil del sistema linneano. Pero Buffon parece no haber comprendido el propósito fundamental de un sistema de clasificación, por más que lo defina él mismo como un armazón o andamiaje que permite acceder a la verdadera ciencia. Las críticas fundadas que hace a Linne por incluir al lobo

o al zorro con los perros, a las serpientes con los anfibios o al cangrejo con los insectos, son adecuadas hasta cierto punto. Buffon sostiene que en lugar de llamar perro al zorro y al lobo, o llamar gusano al calamar, es mejor llamar perro al perro, zorro al zorro o calamar al calamar. Pero claro está, no es lo mismo decir que el zorro pertenece al mismo género que el perro, género al que por convención llamamos “de los perros”, que decir que el zorro es un perro. Igualmente el calamar era entonces un “gusano” en el sentido amplio, de la clase, pero no en el sentido estricto, de la especie. De cualquier modo y como hemos dicho, este rechazo llevó a Buffon a emplear una clasificación hasta cierto punto arbitraria, y en aquellos puntos en que no lo es, no muy distinta de la de Linne.

Así, comienza con los animales domésticos por ser los más conocidos por el hombre. Luego sigue un orden más o menos igual al taxonómico, continuando por algunos ungulados, algunos roedores (o que entonces se consideraban tales), carnívoros, más roedores (entre los cuales sitúa abruptamente el oso, sin llamarle roedor, claro está), insectívoros, etc. Es un orden peculiar, pero que salvo excepciones numerosas, no deja de colocar a cada especie junto a sus afines. Buffon reconoce explícitamente el empleo de especies, géneros, órdenes y clases (las familias, como hemos dicho, aún no estaban en la escala taxonómica), pero les atribuye el simple valor de etiquetas y los compara con las categorías de los escolásticos y los nominalistas medievales.

Buffon mantiene el mismo esquema en la descripción de cada especie; una introducción, una descripción morfológica, a veces también anatómica, del animal y, cuando corresponde, una descripción de las colecciones del *Jardin du Roi* relacionadas con la especie en cuestión. Comienza con los animales domésticos, y dedica más de 200 páginas al primer animal descrito, el caballo, más de 150 al siguiente, el asno, y más de 100 al tercero, el toro. Con estas tres especies y con la introducción al estudio de los animales llena el volumen cuarto. Claro está que, en los siguientes volúmenes dedica menos espacio a cada especie, y engloba más especies. Así, en el volumen séptimo, último de esta década, consagra algo más de 330 páginas a la descripción de 16 especies, con una media de unas 21 páginas por especie. La tendencia al acortamiento de las descripciones continuaría en los años siguientes, pero nunca serían éstas tan breves como las de Félix de Azara.

Hoy nos es difícil comprender el éxito inmenso de la obra de Buffon. Mientras que la de Linne se difundió por los círculos científicos y fue rechazada por muchos autores, la de Buffon se convirtió en un verdadero *best-seller*, y alcanzó a toda la sociedad culta, incluso en una fase inicial como la correspondiente a esta década. Ya se ha comentado que la primera edición se agotó en poco tiempo. Se hablaba de ella en los salones y en la mayoría de los círculos intelectuales. Sus afirmaciones, bastante revolucionarias para la época como lo prueba la intervención de las autoridades teológicas, sirvieron de alimento a la ideología de muchos ilustrados del último cuarto del siglo. La obra se encontró desde el

comienzo en los estantes de casi todas las bibliotecas públicas y de muchas de las privadas, y en todo caso fue un éxito absoluto de ventas.

En el ámbito internacional, ya se ha dicho algo sobre la proyección de las obras de Linne y de Buffon durante esta década, y no cabe duda de que parte de esa proyección alcanzó a España. Al menos es lo que puede suponerse sabiendo que científicos españoles, como Antonio de Ulloa, recorrían el continente europeo en procura de los adelantos científicos, y que no pudieron por menos de conocer la influencia de los dos autores citados. Se sabe que Antonio de Ulloa visitó París durante su viaje, y sin duda conoció las colecciones del *Jardin du Roi*, al propio Buffon, su intendente, y los primeros volúmenes de su obra. Probablemente de esta visita sacó su idea de crear en España un similar Gabinete Real de Historia Natural.

Ulloa propuso en 1752 al rey Fernando VI la creación de dicho gabinete, idea que fue aceptada de inmediato. El centro, que recibió el nombre de “Real Casa de la Geografía y Gabinete de Historia Natural”, se instaló en una casa de Madrid, y se nombró director del mismo al propio Antonio de Ulloa (BARREIRO, 1992), con el apoyo de otras once personas que debían ayudarle a poner en marcha el establecimiento. La orientación inicial, los trabajos y la mayor parte de las primeras colecciones científicas se vinculaban a la mineralogía, pues no hay que olvidar que Ulloa había hecho contribuciones importantes en este campo durante su estancia en Sudamérica (es bien sabido que fue el descubridor del platino). No obstante la institución no logró afianzarse. Ulloa dimitió de su cargo de director en 1755, y desde entonces el centro fue decayendo, a pesar de los esfuerzos del vicedirector, Eugenio Reigosa. Hacia el final de esta década el personal del gabinete se había reducido al vicedirector y un portero, las colecciones empezaron a descomponerse y sus elementos a asignarse a otras instituciones, y la propia idea del Museo a apagarse. No sería hasta dos décadas más tarde cuando se resucitaría la llama de un gabinete operativo, a partir de las cenizas que había dejado su predecesor. Antonio de Ulloa, que había fundado también otras instituciones científicas españolas, y había propuesto algunas más que no llegaron a cristalizar, como la Academia de Ciencias de Madrid, volvió a América en 1758.

Mejor suerte le cupo a la botánica en esta década. Por su vinculación con la agricultura, la medicina y la farmacia, la botánica había sido estudiada en España desde la Antigüedad, y en el siglo XVIII, especialmente en el último cuarto, su práctica alcanzaría cotas de excelencia. Aunque existieron magníficos botánicos españoles durante la primera mitad de este siglo, el arranque de la fase esplendorosa del desarrollo hispánico de la botánica tuvo lugar a partir de la década de 1750 debido a la conjunción de tres factores: los problemas fronterizos, el interés de los farmacéuticos y la personalidad de algunos científicos destacados.

Entre estos científicos figuran algunos de los botánicos que pusieron las primeras pie-

dras para el desarrollo científico español, como José Quer, Cristóbal Vélez o José Minuart. José Quer, quien sería primer director del Real Jardín Botánico de Madrid, se había formado como cirujano militar, y había acompañado a su regimiento por distintas zonas de España y del norte de África, herborizando en cuanto tenía ocasión, y llegando a formar un excelente herbario. Conoció a Antoine de Jussieu y a su hermano menor Bernard, ambos los cuales efectuaron viajes botánicos por España. Antoine de Jussieu había sucedido a Tournefort en la dirección y cuidado del *Jardin des Plantes* de París, y lógicamente transmitió a Quer el aprecio por el sistema de clasificación de su maestro. Por su parte, Quer no se limitó a conservar plantas en su herbario, sino que gracias a la mediación de sus superiores militares, comenzó a cultivar algunas en un jardín privado. Cuando se instaló en Madrid, la cantidad de plantas que cultivaba era tan grande que debió trasladar su cultivo a un jardín mayor, el del Duque de Miranda.

En 1732 se había creado el Real Colegio de Boticarios de Madrid, que, según sus estatutos, tenía como meta el cultivo de la farmacia, la química, la botánica y la historia natural. Para sus cultivos de plantas medicinales los boticarios contaban con un pequeño huerto próximo al río Manzanares, en el Soto de Migas Calientes, donde el boticario de Felipe V y de Luis I había situado en 1720 un huerto de plantas medicinales para la Botica Real.. Mucho más tarde este huerto albergaría el primer Jardín Botánico de Madrid, a cargo de José Quer. En su creación tuvo algo que ver el propio Carl Linne.

En efecto, la fama de Linne había empezado a llegar a España, hasta el punto de que desde la Secretaría de Estado de Fernando VI se intentó contratar a uno de sus alumnos. Linne tenía pensado precisamente enviar a España a uno de ellos, y de hecho parece ser que fueron las instancias de Linne ante el embajador de España en Suecia las que determinaron la petición española. El autor sueco aprovechó la solicitud para recomendar a Pehr Löfeling, al que más tarde calificará Linne de su alumno predilecto, para que estudiase la flora de España. Löfeling, que sólo conocía los campos de Suecia, estaba entusiasmado (tenía sólo 22 años cuando llegó) con las floras española y portuguesa. Pero se entusiasmó también, o al menos dijo haberse entusiasmado, con el clima, el paisaje y los hombres de nuestro país, y así se lo hizo saber en sus cartas a Linne. Había encontrado en Madrid a cuatro botánicos (Quer, Minuart, Vélez y Ortega), que le causaron admiración por sus extensos conocimientos sobre las plantas, y que le acogieron con gran amabilidad, poniendo a su disposición libros, herbarios y experiencia. Linne diría de ellos que eran cuatro hombres memorables, eminentes en sus respectivas profesiones y muy entendidos en botánica. Con estas alabanzas intentaba Linne, a petición de Löfeling, reducir un tanto la hostilidad hacia su persona y su obra por parte de los autores de nuestro país, y facilitar en la medida de lo posible el trabajo a su discípulo. El pretérito y severo juicio de Linne sobre

los botánicos españoles⁵ era la causa, junto con la adhesión al sistema de Tournefort, de dicha hostilidad. En cualquier caso la reunión de estos autores con Löfling tuvo dos consecuencias importantes.

La primera de ellas fue la incorporación de Löfling a la expedición de límites dirigida por Iturriaga, y que partiría de España en 1754. Esta fue una de las tres expediciones científicas organizadas durante el breve reinado de Fernando VI, aunque sus propósitos no eran científicos, sino políticos. Como en el caso de la expedición en la que el propio Azara participaría, se trataba de poner fin a las disputas fronterizas entre España y Portugal en tierras americanas. Se había intentado zanjar tales disputas mediante el Tratado de Madrid entre ambas naciones, un tratado muy favorable para Portugal, quizás debido a la influencia de la reina, que era portuguesa. Como sustitución de la línea fronteriza definida mediante el Tratado de Tordesillas, todavía oficialmente vigente aunque no respetada desde el principio por Portugal, se propuso la línea divisoria de las cuencas fluviales. El problema era complejo, y no se reducía a las dos naciones ibéricas, sino que implicaba también a Gran Bretaña, Francia, y Holanda. Además, los límites propuestos en el tratado tenían que traducirse en un establecimiento de la frontera sobre el terreno, lo que dio lugar a las expediciones de límites.

Pronto hablaremos de estas expediciones. Por ahora volvamos a los cuatro botánicos españoles antes mencionados. Sea por la influencia de Löfling y su descripción del Jardín Botánico de Uppsala, o por la de Jussieu y sus descripciones del Jardin des Plantes en París, el hecho es que los cuatro y especialmente Ortega, de quien partió la idea, estaban convencidos de la necesidad de crear un Jardín Botánico importante en España. Esta idea era compartida por otros botánicos españoles, y en su puesta en práctica fue decisiva la intervención de José Suñol, un zaragozano que era médico de cámara de Fernando VI. A finales del año 1755 este monarca creaba el primer Jardín Botánico de Madrid, aprovechando los huertos existentes en el Soto de Migas Calientes. Dada la gran cantidad de plantas que por entonces cultivaba José Quer en el jardín del Duque de Miranda, no es de extrañar que los fondos iniciales del Jardín Botánico estuviesen formados por esas plantas, unas 2000 especies, y que el primer profesor de botánica de dicho Jardín fuera José Quer (el intendente o director sería inicialmente José Suñol). Durante la segunda mitad de esta década Quer se dedicó al trasplante de sus ejemplares y al mantenimiento

⁵Este juicio fue publicado en 1736 en *Bibliotheca Botanica*, obra que Linne escribió durante su estancia en Holanda. Bien que eran años muy tempranos y la botánica tenía escaso desarrollo en nuestro país, las palabras de Linne, que calificaba de bárbaros a los botánicos españoles (mejor, de ignorantes, pues las palabras “*barbaries Botanices*”, deberían traducirse más bien como “ignorancia botánica”), eran claramente injustas, como lo demuestra la reivindicativa lista de Quer en su *Flora Española*, lista que se comenta más adelante. El texto de Linne fue escrito en latín y Quer lo había traducido al castellano, suavizándolo un tanto.

del jardín, sin publicar todavía nada relacionado con la botánica.

Por lo que respecta a las expediciones científicas, en 1755 hacía cuatro años que Pehr Löfing había llegado a España y cinco que se había firmado el Tratado de Límites con Portugal. Ese tratado preveía la delimitación de la frontera en tres zonas, la del norte, la occidental y la meridional. Para ello se organizaron las tres expediciones de límites antes referidas, de las que la primera en partir, en 1751, fue la occidental, que debía operar en la cabecera del Amazonas y de sus afluentes. Ni en esta ni en la expedición del sur se incorporaron naturalistas, por lo que los datos aportados no nos incumben. En cambio la expedición del norte, encaminada a establecer la divisoria entre las cuencas del Orinoco y del Amazonas, sí que contaba con naturalistas, entre ellos Löfing.

La expedición estaba dirigida por el primer comisario, José de Iturriaga, y partió de España en 1754. Además de Löfing contaba con dos médicos botánicos españoles (Benito Paltor y Salvador Condal) y con tres dibujantes de botánica. Desgraciadamente la zoología era mucho menos interesante que la botánica para la corona, y habría que esperar décadas para que los zoólogos participasen en expediciones de este tipo. Las duras condiciones de la región tropical, tan diferentes de las de Suecia, afectaron enseguida a Löfing, quien cayó enfermo de malaria. A pesar de ello estuvo trabajando durante más de un año y medio en la zona, y afortunadamente pudo enviar buena parte de sus trabajos a Linne, quien los publicaría tras la muerte de su autor. En efecto, Löfing no volvió a Suecia y ni siquiera a España, falleciendo en lo que hoy es Venezuela a la edad de 25 años. Sus compañeros continuaron sus trabajos en tierras americanas durante seis años más, terminando oficialmente la expedición en 1760⁶.

Aunque Löfing, como Linne, era principalmente botánico, no dejó de hacer algunas observaciones sobre animales americanos y españoles. Antes de su partida hacia América había reunido una colección de peces capturados en aguas gaditanas que fueron enviados a Suecia con su correspondiente identificación. Se supone que buena parte de estas descripciones llegaron a su maestro y éste incluyó algunas de ellas directamente en su obra de 1758. La mayor contribución de Löfing a la zoología se refleja en uno de los trabajos generados por la expedición, *Ichtyologia Orinocensis*, obra en la que se describen varias docenas de especies de peces, con algunos reptiles y aves. Puede ser que Löfing sea el autor material de la obra, pues aunque no está escrita de su letra, sí parece evidente que intervino en ella de forma decisiva.

⁶En el excelente libro editado por F. PELAYO (1992), se describe extensamente la visita de Löfing a España, sus relaciones con los botánicos españoles y con Linne, y su expedición al Orinoco. Además se documentan los viajes menos conocidos de otros discípulos de Linne, como Pehr Osbeck y Claes Alströmer, quienes también estuvieron en nuestro país por las mismas fechas.

6. La entrada en el mundo: 1760-1769

Al final de la década precedente hemos dejado a Félix de Azara estudiando leyes en Huesca, a Linne abriendo su mente a esquemas menos fijistas y publicando el trabajo de Löfling *Iter Hispanicum*, a Buffon bosquejando la *Histoire Naturelle des Oiseaux* y continuando la de los mamíferos en medio de penosas circunstancias familiares, a Antonio de Ulloa en el Perú, como gobernador del departamento de Huancavelica y supervisor de las minas americanas, a José Quer dando sus primeras lecciones de botánica en el nuevo Jardín Botánico de Madrid, a Eugenio Reigosa intentando salvar algún resto de las colecciones del Gabinete de Historia Natural y a los supervivientes de las expediciones de límites a Sudamérica terminando su trabajo y volviendo a España.

Al mismo tiempo, en 1759 moría Fernando VI y subía al trono español su hermano Carlos III, el monarca ilustrado por excelencia, bajo el cual se abrirían de par en par las puertas de entrada de las nuevas ideas científicas en España. A partir de 1760 esta sucesión tendría también y en primer lugar, como es natural, consecuencias políticas. Dispuesto a mantener la neutralidad en la confrontación entre Francia e Inglaterra que había caracterizado el reinado anterior, la política inicial de Carlos III era pacifista. Sin embargo, ante las agresiones inglesas en tierras de la América española, no tuvo más remedio que responder. En 1761 se firman el Tercer Pacto de Familia hispano-francés y el Acuerdo de El Pardo, que anula el Tratado de Límites de 1750. Todo el trabajo de las expediciones enviadas a América en la década anterior se arroja por la ventana y en las disputas entre España y Portugal en tierras americanas, disputas centradas principalmente en la colonia de Sacramento, se opta por la confrontación armada. En el futuro, las acciones portuguesas, fuertemente apoyadas por Gran Bretaña, serán respondidas por una débil España, sostenida también débilmente por Francia. Esta situación será la causa de la firma ulterior de un nuevo Tratado de Límites, de la expedición que envió a Azara a las tierras sudamericanas, y en definitiva, de la obra del aragonés.

Carlos III demostraba un gran interés por la ciencia y concretamente por la historia natural, ya desde su infancia. El famoso cuadro de Jean Ranc que se halla en el Museo del Prado le representa niño, determinando unas flores ante un libro de botánica y con un papagayo (en la imagen parece más bien una cacatúa) cerca de él⁷. En años posteriores

⁷En esa pintura el libro que sirve de referencia al futuro rey no puede ser ninguna de las obras de Linne, ya que el cuadro fue pintado en 1724, cuando tales obras aún no se habían escrito. Otro libro de botánica muy empleado por los boticarios reales era el famoso “Dioscórides” ilustrado por Andrés Laguna, pero éste presenta diferencias de formato con el libro que aparece en el cuadro. Lo más probable es que se trate de una obra de Tournefort, *Institutiones rei herbariae*, versión latina publicada en 1700 de otra obra anterior del mismo autor publicada en francés en 1694. Esta obra empleaba el sistema de clasificación de Tournefort, basado en la corola floral, e incluía casi 500 láminas con las que contrastar

manifestará su interés patrocinando la creación del nuevo Jardín Botánico de Madrid, que por ahora todavía persiste en el lugar en que fue fundado. Además manifestó su apoyo a la historia natural en general promoviendo las numerosas expediciones científicas que tuvieron lugar durante su reinado y creando nuevamente el Real Gabinete de Historia Natural. Pero también otras de las iniciativas de este rey iban a afectar más o menos directamente a Félix de Azara, a cuya historia volvemos ahora.

Como consecuencia del Pacto de Familia España entra en Guerra con Portugal en 1761, interrumpiéndose un periodo de paz que había durado más de diez años. Sea por esta razón, sea por el tedio que inspiraban en Félix de Azara sus estudios en Huesca, el hecho es que éste siente la llamada castrense y plantea a su padre la necesidad de cambiar su trayectoria. Hay aquí una de esas lagunas en la biografía de Azara a las que alude con frecuencia CONTRERAS (2005). El muchacho abandona sus estudios en Huesca en 1761 y no solicita plaza de entrada en la Academia de Artillería hasta 1763. Hay pues aquí un hiato de casi dos años durante el cual la vida de Félix de Azara es una incógnita. Es razonable suponer que volvería a su casa de Barbuñales, y que allí se discutiría y decidiría su trayectoria futura. Es posible que entonces obtuviera información esporádica sobre historia natural examinando la biblioteca de su padre, pero sólo podemos especular al respecto, y en todo caso fue una información que no le interesó. Los temas de discusión con su familia se centrarían, presumiblemente, en la conveniencia de elegir una carrera distinta de la jurídica, que ya Félix había rechazado. La elección de la carrera militar debió tropezar con una cierta oposición por parte de su padre, ya que Félix era el único de sus hijos que optó por ese camino, y además era demasiado mayor para iniciarla. Pero finalmente, en 1763, decidió por solicitar su ingreso en la Academia de Artillería de Segovia (por entonces sólo Real Colegio de Nobles de Artillería), solicitud que fue rechazada debido a la edad de Félix, 20 años.

Al año siguiente Félix probó fortuna en el Regimiento de Infantería de Galicia, donde fue aceptado, quizás debido a una falsificación de la edad, pues de haber nacido en 1746, como Félix sostuvo siempre a partir de entonces, hubiera tenido 18 años y la edad reglamentaria para entrar como cadete. Luego pasó a Barcelona y estudió como ingeniero militar en la academia de Pedro Lucuce. Su rendimiento escolar es bueno, ya que consigue terminar los tres cursos reglamentarios en dos, y se licencia como “Subteniente de Infantería e Ingeniero Delineador” en 1767. Especialmente brillante sería su desempeño en los temas teóricos, mientras que en los prácticos, y sobre todo en el dibujo su nota sería más modesta (CAPEL, 2005)

El hecho es que Félix de Azara terminó la década de los 60 como ingeniero militar en Barcelona, donde se ocupó de la delineación y restauración de las fortalezas, no sólo de una flor a determinar. Su formato coincide con el del libro representado.

la Ciudadela, en la propia ciudad, sino también de las fortificaciones de Gerona. A finales de 1768 enfermó y permaneció en S. Cugat del Vallés. Son unos años estos en los que forzosamente debió entrar en contacto con personajes ilustrados, y en que debió absorber de alguna manera las ideas científicas que venían de Europa. Pero estas influencias no podían todavía manifestarse claramente. Azara viviría en Cataluña la mayor parte del tiempo hasta su marcha a América en 1781. Como su principal zona de residencia, aquí iniciaría sus lecturas de tipo más general, aunque en estos años sus trabajos de delineación no parecen haberle dejado mucho tiempo libre.

En 1766 había tenido lugar en Madrid (pero también en Zaragoza) el famoso motín de Esquilache, que da pie a la instauración de una serie de reformas tendentes a garantizar el suministro de alimentos a la población, pero que tiene también otras dos consecuencias de importancia para la vida de Félix. Una es la sustitución del primer ministro italiano por el Conde de Aranda y la consiguiente potenciación del “partido aragonés” junto a la persona del Rey. Otra es la expulsión del territorio español de la Compañía de Jesús, a la que se vinculó con las revueltas. Esta expulsión se realizó con el beneplácito papal, obtenido en parte gracias a la gestión de José Nicolás de Azara, hermano de Félix, y agente del futuro Conde de Floridablanca, embajador español ante la corte pontificia. Precisamente dicha expulsión había ocurrido en 1767, el mismo año en que Félix terminó sus estudios militares. Dada la fundamental participación de su hermano en el asunto, cabe suponer que Félix tuviera noticias de todo por vía epistolar, que conociese los puntos de vista sobre el tema de José Nicolás y de otros ilustrados, y que estas ideas pudieran influir en las repetidas críticas a la Compañía de Jesús que se manifiestan más tarde en la obra de Félix de Azara.

En fin, de un modo u otro Félix continúa aprendiendo de forma autodidacta. Comienza a formarse una biblioteca que sabemos poseerá bastante más tarde. Varios autores (MONES y KLAPPENBACH, 1997) se han preguntado por el contenido de esa biblioteca y por los libros que leyó Azara una vez salido de la Academia. Sin duda algunos de esos libros serían los que había utilizado durante sus estudios sobre temas de fortificación, topografía, balística, etc, quizás también con algún texto más general, sobre matemáticas, geografía o historia, pero podría ser que ni siquiera tales libros existieran, pues los cursos que siguió en la Academia de Barcelona eran dictados, y se recogían en apuntes por parte de cada alumno..Es dudoso que leyese algo sobre historia natural, y muy probable que no hubiese visto nunca la obra de Buffon, que ya se vendía, aunque casi de forma subrepticia en España, pero que todavía no era un éxito comentado en todas partes, como lo era en Francia. Y menos probable todavía era que hubiese oído hablar de Linne.

¿Qué hacía éste último mientras tanto? Tenemos menos datos acerca de la vida de Linne en esta época, quizás porque su propia biografía, titulada *Vita Caroli Linnaei*, termina

en 1751. Pero sabemos que vivía plenamente dedicado a la enseñanza y a la investigación botánicas, aunque ahora desde una posición de fama y prestigio envidiables. En 1761 fue nombrado Conde de Linne, y en 1762 se trasladó a sus nuevas propiedades en Hammarby. Continuó publicando ediciones sucesivas del *Systema Naturae*, apareciendo la undécima en 1762, la duodécima en 1766 y la décimotercera y última en 1767. Todas implicaban mejoras e incrementos sustanciales respecto a las ediciones anteriores y los sistemas de clasificación empleados en ellas se iban puliendo poco a poco. Seguía buscando un método más natural, que reflejase las afinidades reales entre los grupos de organismos, y sus ideas acerca de la invariabilidad de las especies, y aún de los géneros, iban debilitándose. La difusión de las obras de Linne era ya muy extensa, habiéndose publicado éstas antes de 1770, totalmente o en parte, en siete idiomas (latín, sueco, inglés, alemán, holandés, francés e italiano), y en 14 ciudades europeas diferentes. Ninguna de esas ciudades era española, pero en nuestro país podía conocerse esta obra a partir de las ediciones francesas, sin contar las ediciones latinas, accesibles entonces a todos los estudiosos.

Otra de las ocupaciones de Linne en este periodo fue el intento de aclimatación en Suecia de plantas exóticas. Estuvo intentando introducir el té en el país durante los primeros años de la década, y en 1765 logró que floreciera uno de los arbustos de té que había plantado. Pero en 1766 tuvo lugar un incendio en la universidad de Uppsala que quizás fue la causa inicial del cambio de orientación de Linne en los últimos años de su vida. En efecto, preocupado por la permanencia de sus colecciones las trasladó a Hammarby donde construyó un pequeño museo. Esta circunstancia, y quizás también sus problemas domésticos, indujeron en él una tendencia depresiva que le llevó a centrar su interés en los casos de supuesta “compensación de fortuna”, es decir, en ejemplos de personas que habían sufrido grandes desgracias para compensar épocas previas en que habían sido muy afortunadas. Inició así lo que sería una de sus últimas obras, poco o nada relacionada con la botánica o con la ciencia y titulada *Nemesis Divina*. A partir de este año dejó sus tareas en la Academia de Ciencias y en gran medida dejó también la enseñanza, siendo sustituido en la cátedra de Uppsala por su propio hijo Carl.

El miedo a una incipiente senectud afectó no sólo a Linne, sino también a Buffon, quien tenía la misma edad. Cuando se inició la década Francia se enfrentaba todavía con Inglaterra en la desastrosa Guerra de los Siete Años en la que España había permanecido neutral. Aunque Buffon se sentía patriota y había apoyado la causa francesa incluso con sus bienes de fortuna, le preocupaba sobre todo el paso del tiempo y la posibilidad de dejar su obra inconclusa. En 1765 escribió a un amigo su deseo de terminar la obra antes de cumplir los 68 años y de que su cerebro empezara a desvariar, es decir, antes de 1775. En esta carta figura la idea que el autor francés tenía por entonces de la estructura final de su obra, ya que señalaba que deseaba dedicar seis volúmenes más a los cuadrúpedos, cetáceos,

peces cartilaginosos, cuadrúpedos ovíparos y reptiles, así como alguna información sobre plantas y minerales. Al mismo tiempo preparaba cuatro o cinco volúmenes adicionales de láminas que constituirían un suplemento de la obra principal y se titularían *Continuation de l'Histoire Naturelle de M. de Buffon*.

Visto lo que después sucedió está claro que la obra no se desarrolló con arreglo a lo planeado, y que, como había ocurrido en el pasado, la Historia Natural tenía su propia dinámica y crecía según las posibilidades y condiciones de cada momento. Pero también está claro que el autor no la veía como una obra metódica y equilibrada, sino que, fiel al principio inicial de que lo más conocido debe tratarse antes que lo menos conocido, y con mayor extensión, concebía entonces una obra que dedicaría una quincena de volúmenes a los mamíferos y tres o cuatro volúmenes a los demás organismos, excluyendo a las aves que tendrían su propio tratamiento en una obra complementaria. En todo caso la obra debía estar concluida antes de 1775, y no lo estuvo. Pero el avance fue notable. A lo largo de esta década Buffon publicó los volúmenes 8 al 15 de la *Histoire Naturelle*, pero todavía ninguno sobre las aves ni sobre los restantes animales o vegetales. Con ello, al final de la década existía ya una obra extensa y accesible sobre la naturaleza. El éxito de su venta era tal que cuando muere en 1764 el librero encargado de su edición y distribución, Buffon recompra los derechos para las mismas por la suma, entonces astronómica, de 179000 libras, el salario medio de un cirujano de la época durante veinte años.

También los años finales de esta década fueron penosos para Buffon. Tuvo que lamentar la muerte de su esposa y ello causó una cierta interrupción en su trabajo. Como había sucedido ya con Linne, la edad le llevó a posiciones menos combativas y suavizó sus relaciones con otros autores, y en especial con Voltaire, quien había criticado de manera mordaz las ideas buffonianas sobre los fósiles. Pero mantuvo, eso sí con mayor discreción, la crítica del sistema de Linne y la preferencia por el de Tournefort, a pesar de que por aquellas fechas Bernard de Jussieu, un botánico que trabajaba cerca de Buffon, en el *Jardin du Roi*, estaba ensayando los fundamentos de un método natural de clasificación de las plantas, método que, desarrollado y publicado más tarde por su sobrino Antonio, sustituiría a los sistemas de Linne y de Tournefort, y daría fin temporalmente a la polémica entre linneístas y buffonistas.

Como es de suponer, menos conocida era esta situación en España. Aquí se mantenían las fuertes posiciones de los partidarios del sistema de Tournefort, defendido especialmente por José Quer. Para éste era muy interesante la obra póstuma de Löffling *Iter Hispanicum*, publicada por Linne, pues la obra se ocupaba de la flora española y su autor había sido amigo de Quer. Pero era difícil olvidar las palabras críticas de Linne respecto a la botánica española de las que antes hemos hablado. Estas palabras habían sido mal recibidas por distintos botánicos, incluyendo a Quer, quien decidió responder a las críticas de Linne con

la publicación de su *Flora Española*, obra en cuatro volúmenes que apareció en 1762. En primer lugar, esta Flora, primera en nuestro país, respondía a las insuficiencias constatadas por Linne y por el propio Quer en la botánica hispana, pues, como dice el P. Francisco Rodríguez en carta a Quer incluida en la obra, mientras que existían floras de varios países, como Francia, Prusia, Libia, China (y de otros que no indica el firmante) y de la vecindad de muchas ciudades, se echaba en falta una flora de un país tan rico en especies como España. Sin embargo la obra de Quer no puede compararse con esas otras floras extranjeras a las que deseaba emular. Su calidad es baja, sus imágenes pobres y escasas, y además la dejó inconclusa, terminándola mucho más adelante su discípulo Casimiro Gómez Ortega.

En segundo lugar, Quer sale al paso de las acusaciones de irrelevancia de la botánica española incluyendo en el segundo volumen de su obra un catálogo de 127 autores españoles que han escrito sobre historia natural. Este catálogo es un documento valiosísimo para conocer la historia de la biología en España, y de hecho es también la primera obra de este tipo escrita en nuestro país. Es verdad que dicha lista es un poco generosa en cuanto a lo que se entendía por “historia natural”, y que la mayor parte de los autores relacionados eran apenas conocidos. Además, por lo menos la mitad de los autores trataron de agricultura o de medicina, y del resto, la mayoría son botánicos. Sólo 16 autores pueden considerarse zoólogos en un sentido muy amplio, y si excluimos a quienes se limitaron a traducir las obras de historia natural de Plinio o de Aristóteles, los que emplean a los animales personificados en fábulas morales, y los que consideran a los animales como fuente de remedios, la lista se reduce a media docena de nombres. Cuando mucho más adelante, Félix de Azara busque las referencias adecuadas para sus escritos, hubiera debido parar forzosamente en alguno de estos nombres. Pero como buscó estas referencias a través de la obra de Buffon, y éste no conocía los autores no traducidos del español, sólo tres de los autores relacionados por Quer (Fernández Navarrete, Francisco Hernández y Francisco Ximénez) figuran en la bibliografía de Azara, y desde luego no son los más importantes.

En tercer lugar, Quer no desaprovechó la ocasión para arremeter contra el sistema linneano de clasificación y apoyar el de Tournefort. Por ejemplo, y es uno de los textos más suaves, en el volumen II dice:

“En el Discurso Analytico, que compara entre sí los métodos Botánicos, impugné el Sexual, renovado, ilustrado y defendido del Doctísimo LINNEO, produciendo las razones, que me parecieron suficientes, para probar su mucha antigüedad y su poca certeza . . .”

La argumentación de Quer se centra en que otros autores antes de Linne, empezando por Teofrasto, habían aceptado la existencia de funciones sexuales en las plantas, y la presencia de los órganos sexuales en las flores, por lo que las ideas de Linne no son nuevas. Pero tanto este como sus predecesores, en opinión de Quer, se equivocaban, puesto que

las flores no tendrían función sexual alguna, sino solamente la misión de nutrir al fruto proporcionándole alimento de primera calidad, algo así como un destilado de la savia elaborada. Los argumentos de Quer son hoy día ridículos, y su error fue pronto señalado y refutado.

José Quer murió en 1764 sin haber terminado su obra. Sus continuadores serían más abiertos y aceptarían gradualmente el sistema linneano. Miguel Barnades le sucedió en la Cátedra de Botánica, ocupando la misma poco tiempo, ya que murió en 1771. Pero antes de su muerte tuvo tiempo de publicar su obra *Principios de Botánica*, que fue también la primera de su género publicada en España, y en la que comienza a introducir el sistema de Linne, lo que harán de forma plena sus sucesores en la década siguiente. Y también le cupo el honor de tener como discípulo en el Jardín Botánico de Madrid al gran José Celestino Mutis, uno de los mejores botánicos nacidos en nuestro país.

Mutis no tuvo mucho tiempo para disfrutar de las lecciones de botánica de Barnades, solamente pudo hacerlo entre 1757, en que se ocupó de la cátedra de anatomía humana en Madrid y 1760, en que partió hacia Sudamérica en compañía de Pedro Messía, el nuevo Virrey de Nueva Granada, cuyo médico personal era. Por lo tanto, la totalidad de su trabajo durante esta década se desarrolló en Colombia. Sus contribuciones más relevantes a la ciencia española tuvieron lugar más tarde, en las décadas siguientes, ya que entre 1760 y 1772 añadió a sus estudios de medicina, ciencias exactas, astronomía y botánica, que ya tenía, la carrera eclesiástica. Comentaremos algo de las obras de Mutis más adelante, pero de momento hay que resaltar dos aspectos, el de sus relaciones con Linne y el de sus semejanzas con Félix de Azara.

Las relaciones de Mutis con Linne fueron muy diferentes a las del áspero José Quer. Mantuvo una correspondencia interesante con el maestro sueco, y éste le alababa hasta de forma desmedida en sus cartas, afirmando sus deseos de conocerle en persona y considerándolo poseedor de “*un nombre inmortal, que jamás borrará edad alguna*”. Mutis era para Linne un “*solidissimum botanicum*”, uno de los científicos destacados que previamente había echado en falta en nuestro país. Bien es verdad que Mutis correspondía a Linne con la misma moneda, y nunca escatimó admiración ni alabanzas a su persona y a su obra. Los primeros trabajos botánicos que escribió, cuando aún no era sacerdote, fueron publicados en 1769 en las Memorias de la Academia de Ciencias de Estocolmo, que ya no presidía Linne.

En cuanto a las semejanzas con Félix de Azara, Mutis siguió pasos parecidos a los de éste. Viajó a Sudamérica con una misión oficial distinta de la que le ganaría la fama, pasó largos años en el país de destino (de hecho el resto de su vida), empleó su esfuerzo y sus medios económicos en organizar expediciones encaminadas a conocer mejor la naturaleza sudamericana, dejó una huella permanente en forma de observatorios astronómicos

e instituciones científicas, y fue un ilustrado relevante, que llegó a tener problemas con la Inquisición por su adhesión pública a las ideas de Copérnico en Astronomía. El descubrimiento de la quina, con todo lo que esto ha representado para el alivio de los afectados por el paludismo y para la exploración de las regiones tropicales, es su mayor contribución al progreso científico, una contribución, desde luego más relevante que las debidas a Azara. Otras diferencias con éste derivan de la posesión de una sólida formación científica, de su deseo de documentar las especies que describía con maravillosas ilustraciones, difíciles de superar aun hoy en día, y desde luego, de su condición religiosa, que le impedía actitudes algo críticas como las que tuvo Azara con la Compañía de Jesús.

En aquellos tiempos, mientras España comenzaba a contar ya con botánicos destacados, faltaban casi por completo los zoólogos. Ya hemos visto la escasa cosecha de nombres de zoólogos que pudo reunir José Quer en su relación de naturalistas españoles. El primero que destacaría en este campo, Ignacio de Asso, paisano y más tarde compañero y amigo de Azara, estaba todavía en esta década formándose como jurista y lingüista y no había escrito nada sobre historia natural. Parecido retraso llevaban las instituciones zoológicas con relación a las botánicas. Por ejemplo, mientras que el Jardín Botánico de Migas Calientes continuaba y aumentaba sus actividades, proporcionando, como hemos visto, formación botánica a científicos importantes, el Real Gabinete de Historia Natural se hundía en la miseria y el olvido. Iniciada la dispersión de sus colecciones en la década anterior, continuó en la presente, distribuyéndose los libros e instrumentos en parte por las Academias Militares y por la Real Casa, incluyendo desde 1763 la Academia de Artillería de Segovia, precisamente aquella en la que Félix de Azara había intentado infructuosamente ingresar.

En este año de 1763 falleció Eugenio Reigosa, y los restos del Gabinete quedaron a cargo de su hijo Francisco. Los esfuerzos de éste por resucitar la institución fracasaron también. Ciento que en 1764 se quiso recomponer incorporando al mismo las colecciones de José Quer, pero no se consiguió más que un depósito de algunos ejemplares que, de todos modos, hacia 1766 se encontraban, con lo poco que quedaba del Real Gabinete, en un almacén. Todavía de allí se sacaron bastantes objetos para darlos a la Real Casa. Pero esta última extracción llevaba en ella el germen de la recuperación del Gabinete, recuperación y de hecho refundación, que corresponde a la siguiente década..

La tradición de las expediciones científicas a Sudamérica continuó y se amplió durante el reinado de Carlos III, de manera que si en el de su predecesor Fernando VI se organizaron tres de ellas, en el de Carlos fueron más de 30. Este aumento se debió no sólo a la mayor duración del reinado sino también a la mayor penetración de las ideas ilustradas y las inquietudes científicas en nuestro país, y a las nuevas necesidades militares y estratégicas de la metrópoli en relación con sus colonias. No es necesario ni posible extenderse en detalles sobre estas expediciones, que han sido estudiadas de forma específica en otras

obras (v. PUIG-SAMPER, 1991). Varias de esas expediciones tuvieron fines alejados de la ciencia, como la visita de inspección de José Gálvez a Nueva España, o se desarrollaron fuera del ámbito sudamericano, como la de observación del tránsito de Venus, en 1769, dirigida por Chappe D'Auteroche a Baja California . Dos expediciones no españolas, la primera de James Cook, iniciada en 1768, (que también participó en la observación del tránsito de Venus) y la francesa de Bougainville, tuvieron mayor repercusión en el conocimiento científico, y la segunda, que tocó las tierras que Azara iba a recorrer, mayor interés para nosotros. Aunque Bougainville efectuó este viaje entre los años 1766 y 1769, y anteriormente había llevado a cabo otros por tierras sudamericanas, publicó su relato del mismo en 1771, de manera que la información del viaje concerniente a Sudamérica no pudo ser conocida por ni influir en Félix de Azara antes de esta fecha.

7. La década de 1770 a 1779: Un ingeniero militar ilustrado.

En ésta década, en la que termina la vida de Linne, comienza la de Félix de Azara en su vertiente pública. Son los años en que Azara desarrolla su servicio como ingeniero militar y también como soldado en combate, los años en que conoce a sus compatriotas ilustrados y aprende de ellos, los años en que participa de manera activa en la vida cultural aragonesa y aquellos en que se pone por primera vez en contacto con naturalistas. Finalmente, son los años en que las raíces que vamos siguiendo confluyen para formar el tronco de la obra del ilustrado aragonés. Todavía, y al menos hasta 1810, alguna otra raíz se irá uniendo a este tronco crecido. Más adelante, pero también durante la primera década del siglo XIX, comienzan a brotar las ramas de este tronco, ramas cada vez más robustas y densas, de las que se deberá tratar en otro artículo.

La peripécia vital de Félix de Azara durante esta década es bien conocida. Continua residiendo en Cataluña, desde donde se traslada ocasionalmente a otras regiones para trabajar en obras locales de fortificación o de encauzamiento de ríos (como lo había hecho, p. ej. pocos años antes en Palma de Mallorca o en los ríos Henares y Tajuña). Es la vida, todavía no muy exigente, de un Suboficial del Ejército. En 1774 ya imparte clases en la Academia Militar de Barcelona. En ese mismo año se encuentra con su hermano José Nicolás (hay quien supone que el encuentro tuvo lugar diez años antes, en 1765), que viene de Roma en un breve permiso de dos días, logrado quizás gracias al ascenso del conde de Floridablanca y al papel de ambos en la expulsión de la Compañía de Jesús. Como José Nicolás de Azara era uno de los ilustrados más ardientes y conspicuos no cabe duda de que la labor de transmisión de sus ideas a su hermano menor, transmisión que ya se habría iniciado por carta, continuaría de manera más espontánea por vía verbal durante este encuentro. Uno de los posibles temas de conversación con su hermano pudo

ser la obra de Buffon, de quien José Nicolás era gran admirador, y cuya *Histoire Naturelle* ya empezaba a circular más o menos a escondidas en España. En 1773 la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País, primera de este tipo fundada en España, había comenzado a publicar un extracto de la obra del autor francés. Pero esto es simple especulación, pues no cabe suponer que en aquellas fechas Félix estuviera ya interesado en la historia natural.

Pero hacia la mitad de la década este trabajo poco arriesgado se interrumpe, y Azara tiene que participar en las acciones habituales de un soldado, el combate y la guerra. Su experiencia en el fracasado ataque español sobre Argel le dejará secuelas físicas dolorosas, y quizás sea la primera fuente de sus desencuentos con la administración política y militar. Más tarde estos desencuentos aflorarían como consecuencia de sus penosas experiencias en Sudamérica, pero claro está que para entonces ya llovía sobre mojado.

El ataque sobre Argel fue decidido por el gobierno español en 1775 como una acción de castigo ante las actividades corsarias de los piratas argelinos. La equivocada impresión de superioridad absoluta del ejército español sobre las fuerzas otomanas llevó a plantear una campaña breve, sin planificación alguna, sin previsión de alternativas y lo que es peor, sin el menor conocimiento del enemigo ni del terreno. Cuando las consecuencias de esta imprevisión se hicieron patentes en el combate, con los cañones trabados e inutilizados en la playa y sin posibilidad de emplazamiento adecuado, con las tropas avanzando al descubierto, y con los adversarios bien parapetados en un terreno agreste y conocido, no es de extrañar que muchos soldados se cuestionaran la competencia de sus mandos superiores, y especialmente del ministro Grimaldi, a quien correspondía la decisión, y del general O'Reilly, a quien correspondía la estrategia del ataque. Seguro que Azara debió pensar así, en especial porque fue herido y salvado “*in extremis*” sobre la misma playa del desembarco. Su grave herida le valió la retirada del combate y su vuelta a España, donde le fue forzoso pasar un largo tiempo de convalecencia y curación, que no sería completa hasta muchos años más tarde. No le faltarían ocasiones para deplorar entonces la incompetencia de las autoridades militares, y la amargura se convertiría en indignación cuando se enterase de las palabras de justificación de O'Reilly, según las cuales el fracaso de la expedición se debió a la cobardía demostrada por los soldados. Esta injusta afirmación, desmentida por los actos de bravura llevados a cabo por varios regimientos en la acción, sirvió para limpiar hasta cierto punto el buen nombre de O'Reilly, pero no el del primer ministro, Jerónimo Grimaldi, que fue destituido al año siguiente. CONTRERAS (2006) discute en detalle el descontento de los militares y la amargura de Azara ante esta acusación.

Las secuelas físicas del combate se redujeron en Azara a una herida que aún se le abría cuando ya estaba en América, cinco años después, y a la pérdida de una porción de costilla. Pero la obligada convalecencia le produjo también algún beneficio. En primer lugar fue

ascendido por méritos de guerra primero a Teniente, y en 1776 a Capitán de Infantería e Ingeniero Extraordinario. Además tuvo tiempo de leer, de trasladarse a veces a su casa de Barbuñales, de relacionarse con sus compatriotas ilustrados, especialmente con Ignacio de Asso, y de contribuir a la fundación de la Real Sociedad Económica Aragonesa de Amigos del País.

Entre 1776 y 1778 Azara tuvo su primer destino como ingeniero extraordinario en Gerona. Son conocidos sus trabajos de aquellos años en las fortificaciones de la ciudad y en la canalización de los ríos Galligans y Ter. Menos conocida es su recaída de 1779, que le sorprendió en tierras leridanas y le matuvo apartado del trabajo más de medio año. Cuando se cura, casi en 1780, vuelve a Lérida.

Casi todos los autores que han escrito sobre estos años de la vida de Azara han subrayado que fueron los años en que éste recibió su educación como un ilustrado de su tiempo, y ello a través de sus propias lecturas. Se desconoce cuáles fueron éstas, a pesar de que sabemos que tenía algunos libros que le acompañaban habitualmente, y a pesar de los intentos de MONES y KLAPPENBACH (1997), de reconstruir su elenco de lecturas, ya que la relación de estos autores corresponde a fechas muy posteriores. CONTRERAS indica que podría haber leído la *Encyclopédie Methodique*, pero seguramente se refiere a la clásica *Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné* de Diderot y D'Alembert, pues la primera no se publicaría hasta después de la partida de Azara a América. El mismo autor dice que durante estos años Azara debió viajar a Zaragoza con cierta frecuencia, pues como se ha dicho, participó en la fundación de la Sociedad Económica Aragonesa. Este punto, de todos modos, está sujeto a discusión. Diversos autores, entre ellos OCAMPOS (1999), SANTANA (2006), ALVAREZ JUNCO (1968) y CONTRERAS (2006) le consideran uno de los fundadores de dicha Sociedad, mientras que ALBIAC (2000) o FORNIÉS (2000) no mencionan a Azara entre los 10 socios fundadores. Probablemente tanto Ignacio de Asso como los hermanos Azara (por lo menos Francisco Antonio y José Nicolás, además de Félix) formaron parte de los 121 socios reclutados por los socios fundadores a partir de Marzo de 1776 y antes de la constitución formal de la Sociedad en Noviembre de 1776, tras la aprobación de sus estatutos por parte de Carlos III⁸.

Aunque Félix de Azara no debió asistir a muchas de las Juntas de la Sociedad, no cabe duda de que allí terminó de adquirir sus ideas ilustradas, y que allí contactó con algunos de sus paisanos más emprendedores. Pocos de ellos estaban relacionados con la historia natural. Uno de ellos era Echeandía, quien más tarde se encargaría del primer Jardín

⁸Esta interpretación es sostenida de manera oficial en el discurso pronunciado en la Real Sociedad Aragonesa de Amigos del País en 1930 por José Sinués y contestado por el Marqués de Nibbiano. Agustín de Azara. Allí se afirma de forma explícita que fue la Sociedad la que propuso y obtuvo la afiliación de Félix de Azara, porque ya era un personaje significado entre los ilustrados de Aragón (SINUÉS, 1930)

Botánico de Zaragoza, y otro fue, sin duda, Ignacio Jordán de Asso. Este era entonces un experto jurista, viajero consumado, políglota con dominio de varias lenguas clásicas y modernas, y prototipo del ilustrado culto interesado por todas las disciplinas, incluida la historia natural. En 1779 Asso publicó su primera obra en este terreno, una obra escrita en latín sobre las plantas de Aragón. Más tarde, cuando Azara estaba en América, publicaría los primeros trabajos propiamente zoológicos producidos en España. Asso era admirador de Linne y seguía escrupulosamente su sistema de nomenclatura binomial, y es posible que Azara obtuviera sus primeras referencias sobre el mismo de labios del propio Asso, pero esto es mera suposición. En todo caso Ignacio de Asso tuvo relación con el hermano de Félix, José Nicolás, al que pidió con frecuencia libros prestados.

El viaje de Azara a América comenzó a incubarse en estos años, concretamente en 1777 y 1778, años en que se firmaron los tratados de San Ildefonso y de El Pardo entre España y Portugal. Estos tratados dejaban sin efecto el previo Tratado de Límites de 1750, y establecían nuevas fronteras entre las posesiones lusitanas y las españolas en Sudamérica. El nuevo tratado era menos perjudicial para España que el anterior, y por ello fue recibido con reticencias y mala voluntad por los portugueses, en especial por los que vivían en Brasil y Paraguay. De todas formas el tratado era de difícil aplicación, porque las fronteras estaban mal definidas, los ríos y divisorias invocados eran en parte ficticios y no existían mapas fiables de las zonas en disputa. Será preciso enviar a estas zonas equipos de cartógrafos y topógrafos que den un contenido real a los tratados, y Azara formará parte de uno de estos equipos. Pero esto llegaría más adelante. De momento Azara, ya restablecido, termina la década siendo ascendido a teniente coronel de infantería y a ingeniero ordinario, con destino inicial en San Sebastián, ciudad a la que se traslada en 1780.

Aunque Azara pudo no haber tenido noticias de Linne en sus conversaciones con Ignacio de Asso, el autor sueco se estaba haciendo ya rápidamente popular en España, pues no en vano le llevaba una ventaja de bastantes años a Buffon en la publicación de sus obras, y a través de Löfling había dejado una influencia directa en nuestro país. Pero en esta década ya produciría sólo obras menores, en parte a causa de su edad y su salud, en parte porque su hijo Carl le sustituiría en muchas de sus funciones, y sobre todo porque las preocupaciones de Linne iban entonces por otro camino.

En efecto, su principal esfuerzo se dirigía a la recolección de notas que integrarían una de sus obras póstumas, *Nemesis Divina*. Normalmente se considera esta obra como fruto de la depresión que afectaba a Linne y le llevaba a disquisiciones teológicas un tanto aventuradas. Es verdad que a primera vista el tema de esta obra no tiene nada que ver con la historia natural, pues consiste en una recopilación de historias más o menos sobrenaturales acerca del castigo de los pecados ya en esta vida.

Desde la ruina y destrucción de una familia a causa del adulterio del padre, hasta el terremoto de Lisboa sucedido veinte años antes⁹ a causa de los pecados de los portugueses, Linne va acumulando casos que a su entender, revelan la acción constante de la justicia divina. Pero en realidad la obra es una continuación de la investigación del autor en historia natural, una especie de intento de poner orden en el caos de las acciones y la historia humanas, como antes lo había puesto en el caos de la creación. De hecho, la obra se sitúa en la línea de uno de los campos en los que Linne fue pionero y en el que sus trabajos han pasado casi desapercibidos, ocultos por su enorme contribución en el terreno de la botánica, el campo de la ecología. En efecto, ya en 1749 Linne había dirigido en la universidad de Uppsala la tesis doctoral de Isaac Biberg, titulada *De Oeconomia Naturae* (en aquellos tiempos eran los directores de tesis los que escribían el texto, y los doctorandos los que lo defendían en público, de manera que el texto de esta obra se debe al propio Linne). La tesis tuvo un éxito inmediato, hasta el punto de que pronto fue publicada en sueco y en pocos años traducida al inglés, alemán y latín. Aunque con bases puramente filosóficas, es un verdadero texto de ecología, en el que se identifican los flujos de materia que discurren a través de la naturaleza en un incesante río de creación, supervivencia y muerte. Se ha considerado este trabajo como un punto de transición entre el optimismo de la teología natural propio del barroco y un cierto estoicismo derivado de la contemplación de la残酷 de la naturaleza (¡incluso el terremoto de Lisboa!. HESTMARK, 2006). No sorprende, por lo tanto, reencontrar el hilo de esta visión realista en *Nemesis Divina*. De esta forma Linne, a pesar de sus ideas fijistas casi absolutas sobre las especies, habría sido, como Malthus, precursor de Darwin y Haeckel (a quien se atribuye habitualmente el primer uso del término “ecología”), al subrayar la importancia de la lucha por la supervivencia en la naturaleza. Pero esta última obra, publicada sólo parcialmente y bastante después de la muerte del autor, quedaría relegada para los naturalistas al rincón de las elucubraciones filosóficas o paracientíficas, y no ejercería influencia alguna en Darwin ni en sus sucesores.

Todavía vivió Linne lo suficiente como para enterarse de los trabajos de Antoine Laurent de Jussieu, sobrino de los tres hermanos botánicos que le precedieron, y que iba a dar a conocer el método natural de clasificación concebido por su tío Bernard. Linne pudo, pues, conocer finalmente al “Apolo” que esperaba, pero demasiado tarde como para ensayar su método y emplearlo en sus últimas obras. Jussieu publicó las bases de su

⁹El terremoto de Lisboa, que tuvo lugar en 1755, no representó solamente una fuerte perturbación y el comienzo de un cambio en el urbanismo lisboeta, sino que tuvo también importantes consecuencias científicas, políticas, filosóficas y teológicas en toda Europa a lo largo de la segunda mitad del siglo XVIII. Desde nuestro punto de vista quizás su consecuencia más importante fue el freno que impuso a la ambiciosa política expansionista portuguesa en las colonias, lo que facilitó la anulación del Tratado de Límites de 1750 con España, y su posterior sustitución por el Tratado de El Pardo, del que resultaría el viaje de Azara a Sudamérica.

método natural en 1774, y continuó mejorando y puliendo su sistema hasta 1779. Tiempo después sería adoptado por De Candolle primero, y luego por casi todos los botánicos en sustitución de los sistemas artificiales de Linne y de Tournefort.

A partir de 1775 la salud de Linne comenzó a deteriorarse, y sufrió varios ataques de parálisis. Lo que es peor, al parecer cada vez desvariaba con más frecuencia. Sin embargo, todavía continuó elaborando algunos trabajos sobre botánica. El último, una descripción del género *Cycas*, fue publicado en las Memorias de la Academia de Ciencias de París en el mismo año de su muerte, 1778. Muchos otros se publicaron como obras póstumas, aunque una parte del material todavía permanece inédita. El destino de sus manuscritos, biblioteca y colecciones no fue único, quedando algunas piezas en Suecia y otras en posesión de la Sociedad Linneana de Londres, fundada a la muerte de Linne, que ha publicado muchas de sus obras, y que aún existe y se mantiene muy activa. En el ámbito de la historia natural la contribución de Linne es, quizás después de la de Darwin, la que ha dejado una huella más profunda y permanente, y desde luego es la más antigua de las que todavía mantienen relevancia científica.

Buffon sobrevivió a Linne toda una década, y en la que estamos describiendo se mantuvo muy activo, si bien asimismo con problemas de salud. También experimentó problemas familiares, iniciados con la muerte de su esposa en 1769 y continuados con su propia enfermedad, que le tuvo en 1771 a las puertas de la muerte. Otro amargo fracaso derivó de su incapacidad para que el cargo de intendente del *Jardin du Roi* pasara tras su muerte a su hijo Georges, fracaso apenas suavizado por su ennoblecimiento, ya que fue hecho Conde de Buffon en 1772. Por estas razones el trabajo, y especialmente los desplazamientos que implicaba entre Montbard y París, se le hacía cada día más penoso. Sufría de cálculos renales, y rehusaba cualquier tratamiento médico oficial. Aún así continuó sus actividades, tanto en la redacción de su *Histoire Naturelle* como en la gestión del *Jardin du Roi*, que por esas fechas engrandeció notablemente, en la gestión de su hacienda en Montbard, en la supervisión de sus talleres de forja y metalurgia y en sus contribuciones físicas y matemáticas a la Academia de Ciencias de París. Para este trabajo ingente necesitaba cada vez más colaboradores, y por ello una parte de sus trabajos en esta década le deben solamente su supervisión, pero no su redacción. Nos limitaremos a comentar aquí dos puntos, la evolución general de sus ideas en relación con Linne, y la continuación de su esfuerzo en la edición de su *Histoire Naturelle*.

Al igual que le había ocurrido a Linne y le ocurre a la mayoría de las personas, Buffon se fue volviendo más y más comprensivo con la edad. Después de los 50 años es difícil mantener la altanería y presunción, que a menudo son fruto de la ignorancia y de la incapacidad para relativizar los propios logros que suelen asociarse a la juventud. Así como Linne se fue reconciliando con sus críticos, así lo hizo también Buffon. Por de

pronto se reconcilió con su padre, con quien había estado enemistado por años. Otro de sus opositores había sido siempre Voltaire, quien inició sus críticas tras la aparición del primer volumen de la *Histoire Naturelle*. Ambos escritores habían apoyado siempre a candidatos diferentes y a menudo enfrentados para su ingreso en la Academia Francesa. Voltaire había atacado a muchos amigos de Buffon y había ridiculizado a éste y a su obra en distintas ocasiones, sin recibir apenas respuestas hostiles por su parte. Finalmente, y gracias a la mediación de amigos comunes, ambos se reconciliaron y empezaron a manifestarse su mutua admiración, si bien nunca fueron amigos.

Otro personaje con el que Buffon mantuvo una actitud menos hostil a partir de 1770 fue el propio Linne. El enfrentamiento entre ambos autores y las razones del mismo se han comentado antes. Pero después de 1770, cuando comienzan a aparecer los primeros volúmenes de la *Histoire Naturelle des Oiseaux*, Buffon se encuentra frente a un problema: ya no puede adoptar el esquema de organización usado con los mamíferos, comenzando por las especies domésticas y pasando después a las menos conocidas, porque en este grupo los animales domésticos son muy pocos, apenas tres o cuatro especies, y las silvestres son tan numerosas que en cualquier caso requieren un agrupamiento para organizar su descripción. Es la misma necesidad de clasificación que experimentaría más tarde Félix de Azara en el Paraguay, para organizar sus observaciones de aves. En estas circunstancias Buffon pudo apreciar la utilidad del método de Linne, por artificial que éste fuese¹⁰, y sus comentarios sobre el autor sueco se fueron haciendo cada vez menos críticos y más laudatorios.

Este talante de mejora de sus contactos con distintos personajes rindió pronto sus frutos. Eran muchas las personas que deseaban colaborar con el gran Conde de Buffon, o al menos visitarle. De entre estas visitas surgieron sus colaboradores más eficaces junto con Daubenton, es decir, Montbeillard y Bexon, a quienes aludiremos luego, o Lacèpede, quien se encargaría de la redacción de los volúmenes correspondientes a los anfibios, reptiles y peces. Otros visitantes eran simples viajeros, que atraídos por la fama del científico querían tratarle personalmente. Entre ellos se cuentan personajes tan relevantes como Jean Jacques Rousseau, quien pasó por Montbard en 1770 y se arrodilló delante del despacho de Buffon, James Bruce, quien visitó a Buffon durante dos semanas a la vuelta de su viaje exploratorio en busca de las fuentes del Nilo, Jean Baptiste de Lamarck o

¹⁰En la décima edición del *Systema Naturae*, Linne dividía a las aves en seis órdenes, que en traducción española corresponden a las rapaces, trepadoras, palmípedas, zancudas, gallináceas y pájaros. Aunque burda, esta clasificación ha seguido en vigor con pequeños cambios hasta bien entrado el siglo XX, y en algunos textos de divulgación todavía se adopta. En esta edición se describían 554 especies de aves, número muy superior a las 184 de mamíferos, y suficiente como para hacer imprescindible una clasificación. Las aves son el grupo animal mejor trabajado por Linne, cuyos primeras publicaciones zoológicas, nada menos que de 1731, se refieren a las aves de Suecia.

Sonini de Mannoncourt. Estos dos últimos personajes merecen un comentario adicional.

Lamarck era por entonces un joven ex oficial del ejército que se había aficionado a la botánica y que colaboraba con Bernard de Jussieu, e indirectamente con Buffon en el *Jardin du Roi*. Ya sabemos que de Jussieu, aunque seguía el sistema de clasificación de Tournefort y no el de Linne, estaba ensayando otros sistemas menos artificiales que los de ambos y poniendo en marcha el primer método natural de clasificación. Aunque sus ideas no fueron publicadas sino mucho más tarde por su sobrino, está claro que Lamarck pudo conocerlas ya en estos años, y que este conocimiento de las afinidades reales entre distintos grupos de plantas pudo despertar en él la noción del parentesco entre grupos de organismos y más tarde, la idea de la evolución de las especies, de la que sería el primer proponente científico. El hecho es que su competencia en botánica era ya suficiente como para animarle a escribir una *Flore de France*, que llegó a presentar a Buffon. Éste acogió el libro con entusiasmo, pidió a Daubenton que lo prologase, y se cuidó de hacerlo imprimir y publicar. Es más, quedó tan contento con Lamarck que decidió facilitar su entrada en la Academia de Ciencias de París, y escogerle como preceptor de su hijo, entonces de 14 años¹¹.

En cuanto a Sonini de Mannoncourt, en la época en que visitó a Buffon era un joven militar que más tarde actuaría como corresponsal del autor francés enviándole material, principalmente aves, desde las Guayanás, Brasil y Venezuela. Algunas de las descripciones que hace Buffon en su obra se basan en materiales enviados por Sonini de Mannoncourt, y serían criticadas más adelante por Azara de modo poco elegante. Aunque este punto desborda el ámbito aquí contemplado para entrar en la propia obra de Azara, diremos que éste siempre afirmó que sus críticas no iban dirigidas contra Buffon, sino hacia sus colaboradores, y especialmente hacia sus corresponsales. El blanco principal de estas críticas sería entonces Sonini de Mannoncourt, al que Azara llegó a acusar, medio en broma, de haber mutilado y falsificado los ejemplares enviados a Buffon.

A pesar de los problemas de salud de Buffon, la tarea de redacción de su obra continuó durante esta década siguiendo tres caminos. El primero y principal fue la publicación de los volúmenes correspondientes a las aves, de los cuales vieron la luz seis entre 1770 y 1779. En este trabajo Buffon contó con la ayuda de Montbeillard y de Bexon, puesto que dado que su vista se había debilitado mucho, ya no podía escribir de su puño y letra, y se limitaba a dictar sus trabajos. Más tarde revelará que algunas de las monografías más admiradas de su obra, como la dedicada al pavo real, no son obra suya sino de Montbeillard.

¹¹El papel de Lamarck como preceptor del joven Buffon continuó durante la década siguiente con un viaje de estudios por distintos países europeos, viaje programado y financiado por Buffon padre, y en el que visitaron diferentes museos y jardines botánicos. El viaje y la vinculación de Lamarck con Buffon terminaron abruptamente en 1781 por desavenencias entre preceptor y discípulo.

Probablemente sus colaboradores tuvieron en la redacción un papel más importante de lo que se supone, de modo que la historia natural de las aves bien podría haber sido firmada por ellos. El segundo camino consistió en la publicación de otros volúmenes titulados en conjunto *Suppléments l'Histoire Naturelle*, el primero de los cuales, que recoge sus experimentos de 1767 sobre el calor, apareció en 1774, y cuatro volúmenes más antes de 1780. El último, publicado en 1779, incluía su famoso trabajo titulado *Les Époques de la Nature*, en el que desarrollaba sus ideas de treinta años atrás sobre la formación de la Tierra. Como era de esperar, este volumen topó de inmediato con la censura de la Sorbona, de la que ahora era más difícil librarse con una simple retractación y con la afirmación de la fidelidad a la fe católica. Sin embargo por esas fechas Buffon era demasiado poderoso, de manera que los teólogos decidieron nuevamente no remover el asunto. La tercera vía consistió en la popularización de su obra mediante nuevas ediciones en distintos formatos y tamaños, de traducciones a distintos idiomas y de resúmenes más o menos manejables. Uno de estos resúmenes fue el traducido al español por la Sociedad Bascongada de Amigos del País, distribuido más o menos clandestinamente, y al que hemos aludido unos párrafos atrás. Para percatarse de la difusión que había tenido la *Histoire Naturelle*, indicaremos que hacia finales de la década que estamos comentando existían ya ocho ediciones de la obra completa en francés, más otras dos ediciones parciales, tres traducciones completas al alemán, con otras dos parciales, una al inglés, y una parcial al italiano, además de los compendios no oficiales, como el español, que podrían calificarse de ediciones piratas.

Así pues, en España la penetración de las ideas de Buffon continuaba llevando retraso con relación a las de Linne, que ya empezaban a implantarse. En esta implantación tendrían un papel decisivo los sucesores de Miguel Barnades en la Cátedra de Botánica, Casimiro Gómez Ortega, primer catedrático, y Antonio Palau, que lo fue segundo. Se considera a ambos los introductores oficiales del sistema linneano en nuestro país, si bien no se decantaron del todo por él hasta la década siguiente. En efecto, en 1773 Gómez Ortega publica en Madrid las *Tabulae Botanicae* para uso de sus alumnos, en las que sigue todavía el sistema de Tournefort. A su vez, Antonio Palau publicó en 1778 otra obra, *Explicación de la Filosofía y Fundamentos Botánicos*, en la que traduce las obras de Linne de mismo título comentándolas y comparando su sistema con el de Tournefort. Si atendemos a los libros publicados en esta década en España la huella de Linne parece todavía poco profunda, ya que sólo la última obra mencionada sigue el camino marcado por el autor sueco¹², pero su método se iba haciendo más y más conocido también por

¹²En realidad existen otras dos obras de botánica aparecidas en estos años y que siguen el sistema linneano. Una es la antes mencionada de Ignacio Asso *Synopsis Stirpium*... que el autor encabeza con una cita del propio Linne y que se publicó en 1779, pero no en España sino en Francia, concretamente en Marsella. La segunda es una obra, *Géneros de las Plantas de Linneo*, una traducción de *Genera Plantarum* debida a Antonio Capdevila (1774) que al parecer no llegó a publicarse (COLMEIRO, 1858).

transmisión oral, y sin duda Gómez Ortega lo enseñaba ya en su cátedra.

Fue precisamente Gómez Ortega quien se encargó de dar al Jardín Botánico de Madrid el rango internacional que todavía conserva. Para ello era preciso buscarle un lugar más idóneo, y en esto colaboró el catedrático con el médico de cámara del rey para persuadir a éste de la necesidad del traslado. En esa labor empleó buena parte de su tiempo, y aunque dicho traslado no culminó hasta la década siguiente, la aquiescencia del monarca y la elección y preparación del terreno, el actual emplazamiento en el Paseo del Prado madrileño, se lograron antes de 1780. No en vano había recorrido previamente Gómez Ortega los principales jardines botánicos de Europa, y se había relacionado con los mayores botánicos del continente. De hecho, su trabajo fue reconocido tanto nacional como internacionalmente, y por esta época era ya miembro de numerosas instituciones académicas, como la Sociedad Botánica de Florencia, la Academia de Ciencias de París, la Royal Society y la Sociedad Linneana de Londres, etc, sin olvidar las Reales Sociedades Económicas de Amigos del País, de dos de las cuales, la Bascongada y la Matritense, fue socio.

Las iniciativas de Gómez Ortega tuvieron gran relevancia por dos motivos. En primer lugar, y como catedrático del Jardín Botánico, se encargó de dirigir en su aspecto botánico las expediciones científicas que organizaba el gobierno español, todas ellas de gran importancia, pero entre las que destacó la de Hipólito Ruiz y José Pavón a Perú y Chile. En segundo lugar Gómez Ortega era, como Azara e Ignacio de Asso, un ilustrado típico, interesado por múltiples saberes, buen escritor, amigo y contertulio de literatos célebres como Tomás de Iriarte o Nicolás Fernández de Moratín, y tan experto en temas históricos que fue elegido miembro de la Real Academia de Historia en 1770. Esta condición le permitió ejercer una gran influencia en el desarrollo de la cultura científica en nuestro país.

Antes de dar un repaso a las expediciones científicas a Sudamérica que se realizaron durante esta década, o que siendo anteriores a ella plasmaron en esos años sus resultados, vamos a ocuparnos brevemente de la otra gran institución española dedicada a la historia natural, y que levantó definitivamente el vuelo en 1775, el Real Gabinete de Historia Natural. Como se ha dicho anteriormente, el primitivo Gabinete creado a mediados del siglo por Antonio de Ulloa no cuajó, y hacia 1770 podía darse por desaparecido. No obstante unos años antes, en 1767, comenzó a gestarse su recuperación a partir del interés del P. Enrique Flórez y de la colección de D. Pedro Franco Dávila. Era el primero un padre agustino muy aficionado a la historia, sin excluir la natural, que poseía buenas colecciones de conchas y fósiles, amén de monedas y cerámica que le permitían documentar sus estudios históricos. Una de sus obras más famosas, “*La España Sagrada*”, presagia compilaciones eruditas muy posteriores, como las debidas a Marcelino Menéndez Pelayo. Su interés por la historia natural pudo transmitirlo tanto al rey, como especialmente al

entonces Príncipe de Asturias, que luego sería Carlos IV. De hecho ayudó a crear en los aposentos del Príncipe un pequeño museo de curiosidades naturales, entre las cuales algunas procedían de los expoliados fondos del casi extinto Real Gabinete, e influyó en el ya predisputado ánimo del monarca para que apoyara cualquier iniciativa a favor de las ciencias naturales. La colección de Franco Dávila había sido iniciada por éste, un acomodado particular oriundo de Ecuador, a raíz de su instalación en París en 1745. Hacia 1760 Franco Dávila había dirigido un memorial de súplica al rey Carlos III rogando se comprase esta colección con destino a un museo de historia natural, pero su petición no había sido atendida. En 1767, apremiado por sus acreedores que iban a liquidar la colección en pública subasta, reiteró su petición¹³.

Contó esta vez, además de con el valor intrínseco de la colección, con importantes apoyos, siendo uno de ellos precisamente el del padre Flórez. Era entonces Primer Ministro el Marqués de Grimaldi, el que había sido embajador en Suecia y había gestionado la visita de Pehr Löfing a España, y también el futuro responsable del desastre de Argel, en el que resultaría malherido Félix de Azara. Grimaldi, quien, como sabemos estaba interesado también en la historia natural, pidió su parecer al Padre Flórez.

La respuesta de éste, desde luego favorable, tiene interés aquí, porque incluye un párrafo que se hace eco casi literal de las antiguas críticas de Linne a la ciencia española: “... a fin de vindicar por otros poderosos la nota que nuestra nación padece entre los que debieran mirarla como primera en el Mundo... para el glorioso imperio de nuestro Soberano, el que se introduzca este gusto y cese la barbarie, pues el caso presente del Gabinete de Dávila puede ser un principio de que se roce con el fin más glorioso...”. Más a pesar de tan buenos fundamentos, apoyos y valedores, tampoco esta vez tuvo éxito la petición, y la colección debió salir a subasta pública.

Ahora bien, quizás no se presentaron postores o sus pujas fueron insuficientes, ya que en 1771 Franco Dávila reiteró de nuevo su petición al Rey, esta vez con éxito. Se consultó nuevamente al Padre Flórez y se siguieron sus recomendaciones, tanto respecto a

¹³La colección de historia natural de Franco Dávila debió ser muy valiosa. Su propietario declaraba que le había costado cincuenta mil pesos.(de difícil traducción a los valores actuales, pero que equivaldrían por lo menos a un millón de Euros). También afirma éste que “... un gabinete de la magnitud y distinción de este, pues los más célebres de Europa, como el del instituto de Bolonia, el de Dresde, el de Viena, y el famoso de Londres de Slone no son mejores, y aunque la holanda posea muchos que están en reputación el mio es mas completo, el del Rey de Francia que es el trabajo de muchos años, y al que se han juntado, de otros los más ricos de París, es inferior al mío, el Gabinete de la Reyna de Sueda, el del Príncipe Carlos de Lorena en Venizelos y todos los otros de príncipes de Alemania son inferiores ...”. Aunque las alabanzas puedan parecer hiperbólicas e interesadas, sobre todo si se considera que Dávila situaba a su colección por encima de la del *Jardin du Roi* en París, que estaba a cargo del propio Buffon, convendremos en que la colección no era una bagatela, como se la había calificado por algunas personas. Su catálogo comprendía tres tomos, lo que da idea de su amplitud.

la compra de la colección, como respecto al nombramiento del Director del Real Gabinete, que lo fue inicialmente Dávila, el anterior propietario.

La compra del edificio destinado a exhibición, el traslado de las colecciones desde París y su instalación en el real Gabinete llevaron varios años, de manera que la institución no se inauguró hasta 1776. No podía exponerse todo el material disponible, pues sólo la colección Dávila constaba de decenas de miles de objetos, y el edificio sólo podía destinar siete salas a la historia natural. Pero al menos se contaba ya con una institución que podía servir de centro de referencia zoológica y a la que los futuros naturalistas podrían enviar los materiales que recogieran en tierras lejanas, como lo haría más de una vez el propio Félix de Azara.

Estos envíos de materiales fueron copiosos desde el principio, incluso desde antes de la inauguración, pero hasta 1777 no llegaron los primeros procedentes de Sudamérica, concretamente de Colombia. En este primer envío iban ya tres aves disecadas que no se han podido identificar, pero que permiten comprobar que desde varios años antes de la partida de Azara existía en el Real Gabinete material que hubiera podido servir de comparación con el de los envíos que el aragonés haría. Además de estos envíos hay que tener en cuenta las remesas de materiales recogidos durante las expediciones anteriores y coetáneas, algunos de cuyos elementos se añadieron a las colecciones del Real Gabinete. Es momento ahora de ocuparnos de tales expediciones.

En primer lugar hay que volver nuestra atención a la vieja expedición de La Condamine, con Antonio de Ulloa y Jorge Juan. En estos años Antonio de Ulloa había dejado su gobierno en el Perú y también en la Luisiana, de donde fue expulsado por los colonos franceses. El dominio español sería restablecido allí provisionalmente por O'Reilly, el mismo que comandó el frustrado desembarco de Argel que tantos sinsabores proporcionó a Félix de Azara. Antonio de Ulloa permaneció durante la mayor parte de esta década en América, organizando flotas y astilleros. Si hablamos ahora de él es porque hasta estas fechas, en 1772, no apareció su principal obra derivada de la expedición de La Condamine, en que participó. Esta obra, titulada “*Noticias americanas, entretenimientos físico-históricos sobre la América meridional y la septentrional oriental: comparación general de los territorios, climas y producciones en las tres especies vegetal, animal y mineral*”, pudo ser conocida, aunque probablemente no consultada por Azara antes de su partida. En cuatro de sus capítulos (Entretenimientos VI, VII, VIII y IX), se ocupa Ulloa de los vegetales y de los animales de las zonas que recorrió. Como ninguna de estas zonas coincidía con las recorridas por éste, aunque algunas hay comunes, como el guanaco, la vizcacha, el cóndor o algunas especies de patos. Las descripciones de Ulloa, sin embargo, son muy distintas de las de Azara: no son metódicas ni completas, dando sólo algunos aspectos generales

e insistiendo más en la utilidad de cada especie para el hombre. Como no realizaba las observaciones por sí mismo, y en el campo a menudo recoge datos de oídas, a veces tales descripciones son poco fiables. Y con frecuencia utiliza nombres genéricos, tales como garzas, o gamos, con lo que resulta difícil identificar la especie significada. En conjunto, pues, su obra hubiera sido de poca utilidad a Azara, pero vale la pena señalar que Ulloa parte de la idea de que, salvo excepciones, las tierras diferentes, aunque se hallen a poca distancia, albergan especies diferentes, y acepta la tesis de Buffon, a la que se opondría Azara, de que los distintos climas son los responsables de que existan diferencias entre especies afines. Nótese que esta idea no conlleva implícita la de evolución de las especies, por cuanto tanto Ulloa como Azara sostenían que el Creador había situado en distintos lugares especies diferentes y con el entorno más apropiado a cada una.

Otra expedición del pasado continuaba dando también sus frutos en esta década. Nos referimos a la expedición de límites al Orinoco, dirigida por Iturriaga, que tantas dificultades encontró y en la que Pehr Löfing encontró la muerte. Después de este fallecimiento la expedición continuó, a pesar del abandono de algunos de sus miembros, hasta terminar oficialmente en 1761. Parte de los escritos de Löfing, que había podido llegar a manos de Linne, fue publicada por éste, con firma de su discípulo, en su *Iter Hispanicum* de 1758. El resto del material no se describió hasta después de 1763, principalmente por Casimiro Gómez Ortega, quien continuó este trabajo hasta después de 1770. Todavía en 1776, poco después de la inauguración del Real Gabinete de Historia Natural, se incorporaron a éste materiales procedentes de la expedición al Orinoco. Y de la propia expedición de la Condamine un botánico, Joseph de Jussieu, hermano de Antoine y de Bernard, a quienes ya hemos encontrado, permaneció trabajando en América hasta 1771, volviendo a Europa en este año y muriendo unos años más tarde.

Mientras José Celestino Mutis continuaba estudiando la flora de Nueva Granada, la actual Colombia, y organizando la infraestructura científica en Sudamérica, otros dos discípulos de Casimiro Gómez Ortega, Hipólito Ruiz y José Pavón, se encargaban de los estudios botánicos adscritos a una nueva expedición científica, la destinada a las tierras del Perú y Chile y que partió de España en 1778. Los resultados de esta expedición, tan copiosos y notables como los de Mutis, no empezarían a llegar a España hasta la década siguiente, muy tarde ya para que Azara pudiera tener noticia de ellos.

Otra expedición precedente cuyas noticias llegaron a España en esta década fue la de Louis Antoine de Bougainville. Es la única, entre las expediciones que ya hemos comentado, que desembarca en la región del Plata y proporciona algunos detalles acerca de la misma, precediendo en más de diez años a Félix de Azara. Bougainville llegó a Buenos Aires a principios de 1767, tras haber terminado su misión oficial de entregar las Islas Malvinas a la corona de España. Cuando volvió a Buenos Aires debió hacer por

tierra el camino a Montevideo, y con esta ocasión pudo observar las tierras que Azara recorrería después. Bougainville proporciona algunos datos relativos a la historia natural de la región del Plata y de Uruguay, datos que como los de Azara, revelan al observador de primera mano y que por este motivo coinciden casi totalmente con los suministrados por el autor aragonés. Así, relatando su viaje a Montevideo indica: “*Nous traversâmes ces plaines immenses dans lesquelles on se conduit par le coup d'oeil, dirigeant son chemin de manière ne pas manquer les gués des rivières, chassant devant soi trente ou quarante chevaux, parmi lesquels il faut prendre avec un lacs son relais lorsque celui qu'on monte est fatigué, se nourrissant de viande presque crue, et passant les nuits dans des cabanes faites de cuir, où le sommeil est à chaque instant interrompu par les hurlements des tigres*” (se refiere a los jaguares) *qui rôdent aux environs*”. Se creería estar leyendo directamente a Félix de Azara.

Como es lógico, la mayor parte del relato de Bougainville se refiere a tierras no americanas, o a las regiones de Sudamérica situadas al sur de Buenos Aires, donde no había ciudades ni poblados permanentes. No tiene, pues, interés, como documento antecedente de las observaciones de Azara. Las páginas del diario correspondientes a la estancia en Sudamérica, que terminó a finales de Enero de 1768 con la salida del Estrecho de Magallanes, recogen muy escasas observaciones de historia natural. Por el contrario son abundantes los datos sobre los indios patagones. Pero hay un tema, que el autor toca al comienzo de su relato y que desarrolla con bastante detalle, que tiene especial interés por cuanto permite una cierta perspectiva acerca de la actitud de Félix de Azara al respecto. Se trata de las famosas reducciones de los jesuitas en tierras guaraníes. Bougainville enfoca el problema convencido de que los gobiernos de las reducciones son un modelo para todo el mundo, y dignos de la mayor alabanza. Después, el contacto con los gobernadores locales y con la élite ilustrada, hace cambiar su perspectiva, y llega a comprender que existan guaraníes que deseen abandonar las misiones, lo que al principio le parecía incomprendible. Relata de primera mano los acontecimientos ligados a la supresión de la orden, el arresto de los padres, la toma de rehenes y la ocupación de las misiones. Sin embargo se resiste a creer en la veracidad de las acusaciones de que la Compañía es objeto, acusaciones intensamente difundidas por las autoridades, y que justificarían la intervención. Su posición, más comprensiva con los jesuitas y que le lleva a terminar esta parte de su relato afirmando su convicción de que salvo raras excepciones, éstos son modelos de honradez y bondad, contrasta con la de Félix de Azara, más severa y ya afectada por una información establecida oficialmente y por una distancia temporal de al menos catorce años.

Pero no hay mal que por bien no venga, y la expulsión de los jesuitas tuvo consecuencias positivas en el ámbito de la historia natural. En efecto, algunos padres refugiados en Europa y dedicados a menesteres no religiosos, publicaron obras de importancia referidas

a la historia natural de las tierras que habían dejado. Ninguna de estas obras pudo ser consultada por Azara antes de su viaje a América, pues son posteriores a su partida. En el apartado siguiente se comentarán algunas de ellas.

8. El tronco empieza a crecer: el comienzo de las fatigas: 1780-1789

Iniciamos aquí el breve recorrido por el último lapso temporal que vamos a examinar. Es un punto adecuado para dejar de seguir las raíces del pensamiento biológico de Azara. Ahora el personaje se encuentra ya en plena tarea de observación y recolección de datos, y produce sus primeros trabajos. El panorama político cambia bruscamente al final de la década con la revolución francesa, iniciando una nueva época y dando fin al Antiguo Régimen y a la Edad Moderna. Estos acontecimientos no se reflejan en España hasta la década siguiente, pero con el final del reinado de Carlos III comienza ya una época de reacción y protección ante las ideas liberales, que ha de repercutir fuertemente en las ideas e instituciones científicas. Las consecuencias alcanzarán a Félix de Azara incluso durante su estancia en América, pero aún no en los primeros años, previos a la Revolución Francesa. Es en esta década, y sobre todo en la siguiente, cuando Azara comienza a percibir el trabajo científico en historia natural desarrollado en Europa, y cuando tiene que posicionarse frente al mismo e integrarlo en su obra. Irá formando, primero ocasionalmente, luego con más y más frecuencia, su ideología acerca de la naturaleza a partir sobre todo de la observación directa, pero también de esas raíces que venimos siguiendo y que todavía se engruesan. Si bien después de esta década ya no son las raíces lo más importante, sino el tronco del árbol y las primeras ramas, que comienzan a aparecer.

La historia de Félix de Azara durante esta década ha sido relatada tantas veces que huelga repetirla aquí. Se resume diciendo que en 1780 estaba destinado en San Sebastián, y que a finales de 1781 recibe la orden de partir para Lisboa, lo que hace de inmediato. Allí el embajador español le transmite las órdenes de embarque hacia Río de Janeiro. Los arreglos de partida se hacen en Diciembre de 1781, de acuerdo con el embajador y los restantes oficiales¹⁴, y el barco hace vela a mediados de Enero de 1782, llegando a Río de Janeiro dos meses más tarde. Durante la travesía se entera a grandes rasgos de su misión de demarcación, y de su paso a la marina (que no de su ascenso, como suele decirse), con grado de capitán de fragata, equivalente al que tenía en el ejército. En Mayo de 1782 llega a Montevideo donde el virrey le comunica, como a los demás comisionados,

¹⁴Azara indica que le acompañaban tres oficiales de marina en el viaje. Estos eran los Primeros Comisarios de las otras tres partidas de demarcación, concretamente José Varela y Ulloa (1^a partida), Diego de Alvear (2^a partida) y Juan Francisco de Aguirre (4^a partida). Todos ellos tenían grados militares superiores al de Azara. Otros autores sostienen que en lugar de Diego de Alvear iba Rosendo Rico, Segundo Comisario de la primera partida.

los detalles de su misión y les proporciona los instrumentos necesarios para llevarla a cabo. Desde mediados de 1782 hasta Enero de 1784 Azara permanece en Montevideo, o Buenos Aires, con alguna interrupción para ir a Río Grande de San Pedro y concertar con las autoridades portuguesas los lugares de encuentro de las respectivas comisiones para iniciar los trabajos de delimitación. Cumpliendo lo acordado sale a comienzos de 1784 para Asunción, a donde llega el 9 de Febrero. Forzado por la incomparecencia de los comisionados portugueses allí se instalaría durante casi trece años, y utilizaría la ciudad como base de sus numerosos viajes y excursiones a través de la región. La mayor parte de las observaciones recogidas en sus obras fueron efectuadas en esta zona y en estos años de obligada espera.

Este periodo puede ser descompuesto, por lo tanto, en tres partes. La primera corresponde a su estancia en San Sebastián, entre su ascenso a teniente coronel y su partida para Lisboa, y duró aproximadamente un año durante el cual Azara estuvo en condiciones de adquirir nuevos conocimientos en distintas disciplinas. Sabemos que entonces poseía ya una pequeña biblioteca, puesto que él mismo indica que se ve obligado a abandonar sus libros en la ciudad cuando recibe la orden de marcha. Es muy probable que llevara consigo tales libros a América, ya que dispuso de al menos un mes en Lisboa antes del embarque, tiempo suficiente para hacerle llegar sus pertenencias desde San Sebastián. Pocos de esos libros versarían sobre historia natural, aunque sabemos que tras su vuelta a España, entre sus posesiones figuraba un ejemplar de la “*Introducción a la Historia Natural y la Geografía Física de España*” de William Bowles (SÁNCHEZ ESPINOSA, 1997), cuya traducción al español se debió a José Nicolás de Azara. Es muy posible que poseyera ya ese libro, o por lo menos su primera parte antes de la partida hacia América, pues había sido publicado en Madrid en 1775¹⁵. Durante su estancia en San Sebastián Azara debió relacionarse sin duda con la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País, ya que él formaba parte de la homóloga en Aragón y puesto que en aquella época tales sociedades contactaban de inmediato con los militares ilustrados de alta graduación como lo era él mismo. Como fue precisamente esta Sociedad la que publicó en castellano el primer compendio de la Historia Natural de Buffon, es casi seguro que si Azara no había tenido antes noticias del autor francés las tuviera en este tiempo, lo cual no significa que se interesase ya por los animales y las plantas. De hecho sabemos que no leerá a Buffon hasta 1796, pero cuando explica su contacto con este autor señala que había pedido sus

¹⁵La segunda parte de esta obra se publicó en 1782, ya después de que Azara saliese de España, y también después de la muerte de su autor, que ocurrió en 1780. Bowles, de origen irlandés, se afincó en España y llegó a estar muy vinculado, a través de Antonio de Ulloa, al primer Gabinete de Historia Natural. Sus intereses eran principalmente geológicos y mineralógicos, pero en su obra se recogen datos de botánica y de zoología. Podría afirmarse que su obra es la primera Historia Natural moderna de nuestro país, pero este punto es discutible y parece más adecuado dejar este honor a la obra de Ignacio de Asso.

obras muchos años antes. Cuando las pidió por primera vez, quizás a su hermano, era porque ya conocía su importancia, y ese conocimiento debió ser anterior a su llegada a América.

Lo que sí debía ser motivo de su interés era la marina. De algún modo la estancia en San Sebastián le llevó a desear su paso a la Armada Española, que ya conocía por su larga estancia en Barcelona y por su desembarco en Argel. Puesto que pidió este paso a la marina (CAPEL, 2006) probablemente durante estos meses, parece lógico suponer que, o bien los barcos que allí anclaban le atrajeron especialmente, o bien sus tareas como teniente coronel de infantería eran lo bastante enojosas para él como para desear dejarlas. No es aventurado suponer, por lo tanto, que entre los libros de su propiedad hubiese alguno relacionado con la navegación. Las enseñanzas en las escuelas de náutica a finales del siglo XVIII tenían muchas asignaturas en común con las que se impartían en las academias militares, de manera que a Azara le representaba poco esfuerzo de aprendizaje el cambio de cuerpo. Pudo conocer y consultar los libros de texto sobre náutica en vigor entonces¹⁶, pero es más probable que el origen de su interés fuesen los libros de viajes, que conocían por entonces una popularidad extraordinaria tanto en España como fuera de ella. En especial los relatos de la vuelta al mundo de Bougainville y las traducciones francesas de las relaciones de los dos primeros viajes del capitán Cook, disponibles respectivamente desde 1772 y 1778, pudieron influir en la decisión de Azara. En tal caso cabría suponer que conocería, y quizás poseería dichos libros.

El segundo periodo corresponde al principio de su estancia en Sudamérica. Durante un año y medio largo estuvo en la región rioplatense antes de dirigirse hacia la capital de Paraguay. Este periodo nos es casi tan desconocido como el precedente. En su obra “*Viajes por la América Meridional*” indica Azara que a su llegada a Buenos Aires el virrey le detalló su cometido como Primer Comisario de la tercera partida y a continuación le envió sólo y por tierra a Río Grande, para acordar el comienzo e los trabajos con la comisión portuguesa. A su vuelta, la misma noche de su llegada recibió la orden de parir para Asunción lo que hizo lo antes que pudo. Tenemos, pues, un lapso temporal de más de año y medio en el que no quedan huecos y que no pudo estar totalmente ocupado por la misión de Brasil. Este es otro de los interrogantes al que los biógrafos de Azara deberán responder. Aquí sólo podemos suponer que hubo un tiempo restante, y que ese tiempo lo debió pasar Azara en Buenos Aires.

¹⁶Existía un texto de náutica (“*Lecciones Náuticas*”), debido a Miguel Archer, y publicado en 1756, que todavía era normativo en el Museo Matemático (nombre que tenía la escuela naval) de Bilbao, y que había sido muy ponderado por Jorge Juan. Describía algunos procedimientos e instrumentos para averiguar las coordenadas geográficas de un punto, los cuales emplearía Azara en su misión, y que conocería ya de Barcelona.

¿Qué haría Azara en ese tiempo? En primer lugar, es de imaginar, relacionarse con la élite ilustrada de la colonia, especialmente con las autoridades locales. Parece ser que su relación con el virrey Juan José Vértiz fue cordial, y lo sería también con los miembros de las grandes familias españolas o criollas. Como simple capitán de fragata quizás no podía considerarse uno de los elementos destacados de la colonia, pero como Primer Comisario de su partida de delimitación, su persona tenía una importancia mucho mayor, que sin duda le abriría las puertas de la sociedad local. En todo caso es seguro que debió relacionarse con los miembros de su partida, a los que correspondía delimitar un tramo de la frontera entre las posesiones españolas y las portuguesas, y probablemente también con los de las otras cuatro partidas.

Entre los componentes de la tercera partida, que estaba al mando de Félix de Azara, no había ningún naturalista, como no los había en las demás partidas. Además del Primer Comisario integraban la partida Martín Boneo, Pedro Cerviño, Juan Inciarte y Manuel de Rosas entre los militares, y les acompañaban Ignacio Pasos (o Pazos), geógrafo, José Sourryère de Souillac, astrónomo (y español, a pesar de su apellido), Bernabé Bueno, tesorero, Antonio Arcos, capellán y José Martí, cirujano. De todos ellos era Pedro Cerviño el más próximo a Azara, y el que éste consideraba más competente. Durante este periodo inicial Cerviño llevó a cabo diversos reconocimientos, incluso en puntos tan lejanos como las minas de Potosí, en Bolivia, por encargo del virrey. Mucho más adelante, ya en la década siguiente, será Cerviño el que preste a Félix de Azara su ejemplar de la *Histoire Naturelle* de Buffon que permitiría el primer contacto del naturalista aragonés con la obra del francés. Cuando Azara vuelva a España Cerviño permanecerá en América, contribuyendo decisivamente a dotar de infraestructura científica a la naciente Argentina.

Hasta después de su llegada a Asunción en 1784, no comienza la tercera parte de este último periodo, en la que Félix de Azara inicia sus observaciones de historia natural. Sin duda, en los muchos meses que median entre su llegada y su instalación en Paraguay habría hecho ya observaciones del entorno, que consignaría en su diario. De sus notas extraería después el material que, más organizado, presentaría en sus obras. La anotación de sus observaciones geográficas y topográficas comenzaría oficialmente a su llegada a Buenos Aires, y para las de historia natural en Junio de 1784, cuando inició su primer viaje desde Asunción a Villarrica. Pero esto, sus observaciones, sus fuentes locales, su conexión epistolar con expertos ocasionales, sus trabajos cartográficos más directamente relacionados con su misión, el desempeño de su labor, en suma, es ya materia para otro artículo. Aquí dejaremos a Azara para volver a los naturalistas europeos y a la influencia de sus obras.

Poco hay que decir de Linne, ya difunto. Su hijo, quien le sucedió en la cátedra de Uppsala, no le sobrevivió por mucho tiempo, pues murió en 1783. Sus obras y colecciones

fueron vendidas por su viuda a un comerciante inglés y sirvieron de fundamento para la creación de la Linnean Society de Londres. La leyenda según la cual el rey de Suecia envió in navío en persecución del barco que llevaba las colecciones a Gran Bretaña, sin lograr darle alcance, parece ser cierta, de acuerdo con el prólogo de la edición inglesa de *Lachesis Laponica*, hecha en 1811. La vigencia del sistema de clasificación de Linne fue más breve en botánica que en zoología. Para las plantas fue sustituido pronto por los sistemas llamados naturales, debidos a Antoine de Jussieu y a Augustin de Candolle, pero todavía a principios del siglo XX se incluía el sistema linneano en una obra española de botánica (*Compendio de la Flora Española*, de Blas Lázaro Ibiza), si bien como complemento de otros sistemas modernos, empleados en el libro. En zoología el sistema de Linne fue modificado y actualizado repetidas veces a lo largo del siglo XIX, pero en libros de finales de ese siglo aún se rastrean sus huellas (PÉREZ ARCAS, 1874).

Buffon sobrevivió a Linne durante una década, pues murió en 1788, exactamente diez años después de Linne. Curiosamente el hijo de Buffon, que fue guillotinado durante el Terror, dejó la vida cinco años después que su padre, en 1793, como el hijo de Linne lo había hecho también cinco años después que el suyo. Durante estos años finales de su vida Buffon apenas disminuyó su actividad. De hecho la aumentó, ya que en 1780 uno de sus colaboradores, Guéneau de Montbeillard, cesa de trabajar con él. En cuanto a su otro colaborador, Bexon, también disminuyó su ayuda, y finalmente murió en 1784. Quedaba Daubenton, sobrino del primer Daubenton que colaboró con Buffon desde el principio, pero éste se dedicaba de forma casi exclusiva a los aspectos gráficos de la *Histoire Naturelle des Oiseaux*, de manera que tampoco ayudaba en la redacción del texto. En cuanto a Lacépède, en realidad nunca colaboró con Buffon; si escribió la *Histoire Naturalle des Quadrupèdes Ovipares et des Serpens* fue a espaldas de éste. Además, a Buffon no le gustó el texto del primer volumen, y de hecho tenía pensado que fuese otra persona (Faujas de Saint-Fond), quien continuase su obra, pero no comunicó su propósito antes de su muerte, y tras ésta sus albaceas, que ignoraban la decisión, encomendaron el trabajo al conde de Lacépède. En resumidas cuentas, Buffon contó con poca o ninguna ayuda, si no era la de sus secretarios a quienes dictaba, para elaborar los volúmenes restantes de la *Histoire Naturelle* que aparecieron antes de su muerte, concretamente los dos últimos volúmenes sobre las aves y los cinco que integraban la *Histoire Naturelle des Minéraux*. El último de éstos se publicó el mismo año en que murió el científico.

Quedaba así casi terminada una obra a la que se añadieron póstumamente las contribuciones de Lacépède, algún suplemento y muchas de las ilustraciones. No hubo lugar para prolongarla con nuevos volúmenes sobre el reino vegetal o sobre los invertebrados. Lo que sí se hizo fue aprovechar su popularidad para reeditarla muchas veces, traducirla a distintos idiomas (la primera traducción al español comenzó a publicarse en 1785), presen-

tarla en distintos formatos, incluyendo el formato de bolsillo que multiplicaba el número de volúmenes, y presentarla con mayores o menores cambios. Por ejemplo, se editaron numerosos compendios o resúmenes de la misma, así como versiones menos áridas, en las que se habían suprimido las descripciones anatómicas, e incluso versiones “para señoritas y para niños”, en las que las alusiones al sexo en los animales se suavizaban u omitían.

En fin, se disponía ahora de una monumental obra de consulta sobre los animales que durante casi un siglo fue la referencia y autoridad reconocida en este campo, y un elemento indispensable en cualquier biblioteca que contuviese libros de historia natural. Además se trataba de la primera obra científica verdaderamente popular, aunque manteniendo su rigor científico. Le cabe a Buffon, por lo tanto, el honor de ser pionero en la divulgación científica. Puso de moda la zoología, y gran parte de las personas cultas en Francia, pero también en otros países, leían y comentaban sus textos. Ya hemos visto que en España la versión compendiada comenzó a circular a mediados de la década anterior, y es un signo claro de su popularidad, incluso en nuestro país, el hecho de que tanto Martín Boneo como Pedro Cerviño, los compañeros de Azara, poseyeran ya la obra antes de su partida para América.

Sería ahora el momento de resumir las ideas de Buffon y de comentar las diferencias con las de Azara y las polémicas debidas a estas diferencias. Ya se ha aludido antes a este tema, aunque no en profundidad. Pero, como se ha dicho, esto es asunto para otro artículo: las ideas de Azara estaban todavía gestándose y las polémicas no se producirían hasta la publicación de sus obras, ya entrado el siglo XIX. Vamos pues a abandonar a Buffon para examinar brevemente el panorama de la historia natural en España durante esta década.

Las principales instituciones dedicadas al cultivo de la historia natural seguían siendo el Jardín Botánico de Madrid y el Real Gabinete de Historia Natural. El primero experimentó cambios importantes, ya que en estos años fue oficialmente refundado. En efecto, se trasladó en 1781 a su nuevo emplazamiento en el Paseo del Prado, en el que todavía continúa. Algunos de los edificios e instalaciones que contiene, concretamente la Puerta del Rey¹⁷, la Puerta de Murillo, el Pabellón Villanueva, el emparrado, etc., se remontan a esta década. Testimonios actuales de aquellos tiempos son también los bustos dispersos por el jardín, que recuerdan a los primeros directores del mismo, de los cuales todos, menos el de José Quer, corresponden a épocas posteriores a 1790. Y no podemos olvidar

¹⁷La Puerta del Rey, construida en 1781, puede considerarse como el punto fundacional del Real Jardín Botánico. En ella figura la conocida inscripción, redactada por Casimiro Gómez Ortega y que indica el autor de la fundación (“Carolus III”), su propósito (“Civium Saluti et Oblectamento”) y el año de la misma (“MDCCCLXXI”). Esta puerta todavía se usa en ocasiones de solemnidad, pero la entrada normal se efectúa por la Puerta de Murillo, de 1789.

otros monumentos, éstos naturales, que aún perviven en el jardín y que son los árboles que se plantaron poco después de su fundación o incluso antes de ésta, como un ejemplar de ciprés que se apoda, con justicia, “bicentenario”.

Naturalmente, el Real Jardín Botánico de Madrid no era ni siquiera entonces el único de España, ni tampoco el primero. Le habían precedido, aparte de su antecesor inmediato en el Soto de Migas Calientes, los que cultivaba Quer en las propiedades de los Duques de Atrisco y de Miranda, el primer jardín medicinal en el Soto de Migas Calientes, fundado en 1720 por Riqueur, boticario de Felipe V y de Luis I, el creado en las afueras de Barcelona en 1688 por el botánico catalán Jaime Salvador, el Jardín Botánico de Valencia, creado en 1651, otro jardín medicinal creado en 1568 en Aranjuez por deseo de Felipe II, y otros que se remontan incluso al siglo XIV. En la década de que hablamos existían, junto al de Madrid, jardines botánicos por lo menos en Aranjuez, Algeciras, Cartagena, Córdoba, Granada, Málaga, Sevilla, Valencia, La Orotava en la isla de Tenerife, etc. Su función entonces era triple. Los principales, como el de Madrid, impartían la enseñanza de la botánica, disponiendo de una cátedra asociada y formando a los nuevos especialistas. Varios cultivaban plantas medicinales y estudiaban sus propiedades curativas, lo que servía tanto a las boticas reales como a la enseñanza de la farmacia, activa en España desde antes de 1750. Por último existían los llamados jardines de aclimatación, como los de Málaga, Sevilla o La Orotava, cuya función era sembrar y ensayar las plantas cuyas semillas se traían de las colonias americanas o de Filipinas, para tratar de cultivarlas en la Península. Claro está que todos los jardines botánicos participaban en mayor o menor grado de las tres funciones, pero la investigación científica se vinculaba especialmente al Real Jardín Botánico de Madrid.

Seguían al frente del mismo Casimiro Gómez Ortega y Antonio Palau. En estos momentos su cátedra de botánica era la más autorizada y la de mayor prestigio del país, y ambos continuaron su dedicación, ahora más intensa, a implantar el sistema de clasificación de Linne en España. Palau publicó en 1784 su “*Parte Práctica de Botánica del Caballero Carlos Linneo*”, una traducción al castellano en 8 volúmenes del *Species Plantarum* de Linne. Cuatro años después Palau publicó también un resumen de esta obra en un solo tomo. También, junto con Casimiro Gómez Ortega, publicó en 1785 su “*Curso Elemental de Botánica*” en dos volúmenes, ambos basados y el segundo incluso directamente traducido de las obras de Linne. Otra importante contribución de Gómez Ortega fue la terminación de la *Flora Española*, obra que había dejado inconclusa José Quer y a la que el nuevo catedrático añadió los dos volúmenes que la completaban.

La otra gran institución era el Real Gabinete de Historia Natural, que continúa su trayectoria sostenido por el apoyo real. Gracias a él se implantan en España no sólo la zoología, sino también otras disciplinas como la mineralogía, la arqueología o la etno-

grafía. Todas ellas se habían cultivado anteriormente con un enfoque precientífico, pero ahora, con sus materiales dispuestos y estudiados en las salas del Real Gabinete, pudieron asimilar su desarrollo al que tenían en otros países. En el ámbito de la zoología no existían clasificaciones adecuadas que compitiesen con la de Linne, como ocurría en botánica con el sistema de Tournefort, pues la clasificación de John Ray y otras coetáneas eran muy inferiores. En consecuencia fue aquí mucho más fácil la aceptación del sistema linneano, y los primeros zoólogos de esta década lo adoptaron sin vacilar. No obstante, las primeras publicaciones del Gabinete no empleaban ese sistema, ni tampoco otro alguno. Se trataba de dos libros de láminas, dibujados por D. Juan Bautista Bru, pintor del Gabinete, y que presentaban sin orden alguno los animales y monstruos albergados en la institución. En realidad se trataba de obras sin valor científico, pero en el segundo tomo, aparecido en 1786, se discuten e ilustran algunos animales mantenidos en la Casa de Fieras del Retiro de Madrid. Allí se hacen algunas consideraciones sobre el efecto de la cautividad en los animales, consideraciones que si no son interesantes por lo obvias, si lo son al menos por decirse amparadas con la autoridad del conde de Buffon, lo cual indica el valor que la opinión de éste alcanzaba ya en España.

En relación con este punto hay que destacar otra circunstancia que iba a afectar al Gabinete y concretamente a las obras de Félix de Azara. En 1785 había fallecido Pedro Franco Dávila y hubo que elegir un nuevo Director del Museo. El cargo recayó, ya en 1786, en Eugenio Izquierdo, siendo Vicedirector José Clavijo. Este último había iniciado la traducción al español de la Historia Natural de Buffon, de la cual traducción había aparecido el año 1785 el primer volumen. Como es de suponer, Clavijo era un ardiente partidario de Buffon, y más cuando según sus palabras, había conseguido que “...los Académicos de París y el mismo Conde de Buffon hayan confesado ser la mía la mejor edición que se ha hecho de sus obras.” Es, por tanto, comprensible que subvalorase de algún modo a todos aquellos que se oponían al autor francés. El caso es que, como se ha dicho antes, el Gabinete de Historia Natural venía recibiendo desde 1777 envíos de material zoológico procedente de Sudamérica, y continuó recibiendo envíos de este tipo durante la década que nos ocupa. Uno de estos envíos llegó en 1787 procedente del Paraguay, y constaba de 401 ejemplares de aves recogidas en aquellas tierras por D. Félix de Azara. Sabemos de este envío porque el índice de su contenido se conserva en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, heredero del Real Gabinete, y por la carta que acompañaba a un segundo envío de 1790¹⁸, en la que se aludía al material precedente. De no ser por

¹⁸Este segundo envío consistió en 87 aves, con su correspondiente lista en la que se relacionaban sus nombres vulgares y los números de los recipientes que las contenían. Además Azara envió al Conde de Floridablanca una carta y un primer borrador de su obra *Apuntamientos para la Historia Natural de los Paxaros del Paraguay*. Floridablanca contactó con el Real Gabinete y de esta forma obligó a José Clavijo a pronunciarse, mientras que el primer envío, más completo, no había tenido valedores y había quedado

estos documentos no conoceríamos nada de ese material, y si la carta en cuestión no la hubiese recibido el Conde de Floridablanca, quizás aún sabríamos menos. En efecto, el primer envío quedó sin respuesta alguna, y al segundo, forzado por el interés del Conde, Clavijo respondió con una alabanza más o menos obligada, una velada crítica a Azara, y sin ningún deseo de publicar la obra de éste, en la que reconocía haber encontrado muchos datos nuevos. Es posible que esta reticencia, que influyó de forma decisiva en el retraso en la publicación de las obras de Azara y en la relativa marginación de éste para los naturalistas españoles del siglo XIX, pudiera estar motivada por las diferencias entre la posición de Azara y la de Buffon. No parece esto probable, sin embargo, porque en el primer envío el único texto acompañante era la relación de ejemplares, y no se discutían las ideas de Buffon en ningún caso, ya que Azara no leyó a éste hasta 1796. En realidad el tema se sale del ámbito que nos hemos propuesto, puesto que ya corresponde a la repercusión de las ideas de Azara y no a sus orígenes, pero era necesario aludir al mismo al tratar de la trayectoria del Real Gabinete en esta década.

La importancia del Real Gabinete era ya tan alta que, del mismo modo que el Jardín Botánico tenía asociada una cátedra para la enseñanza de la botánica, a partir de 1787 se intenta crear otra de zoología asociada al Real Gabinete, iniciativa que no cuajó hasta bastantes años más tarde. En todo caso el Gabinete se enfrentaba con un problema de espacio que dificultaba la dedicación a aulas de alguna de sus salas. En efecto, a las copiosas colecciones iniciales se añadía tanto material que pronto se decidió abandonar el primer edificio en que estaba ubicado y que hoy es la Academia de Bellas Artes de San Fernando, situada en la calle de Alcalá. En 1785 Carlos III, monarca que tanto había ayudado al Real Gabinete, decidió la construcción de un nuevo y amplio edificio situado en el Paseo del Prado, junto al Jardín Botánico, para albergar las crecientes colecciones. El rey no vería ya terminado este edificio, y las colecciones del Gabinete no lo ocuparían jamás. Ya bien entrado el siglo XIX se instalaría allí el Museo del Prado, dedicado a las artes, y allí permanece hasta hoy. La congestión del Real Gabinete no tendría otro camino que el de seguir aumentando.

Pero incluso con estas instalaciones insuficientes el Real Gabinete desempeñaba un papel esencial en la implantación de la zoología en España. Dada la falta de cátedras de historia natural en las universidades españolas, los botánicos y zoólogos de nuestro país debían formarse en esta institución o en el Real Jardín Botánico. Y también aque-llos especialistas que no se habían formado allí recurrían a los expertos de estos centros para efectuar consultas o remitir material. Las cátedras de química y de mineralogía se olvidado. Quizás hubo un tercer envío del que no se tienen noticias, pues Azara dice haber remitido al Real Gabinete de 600 a 700 ejemplares de aves y cuadrúpedos, es decir, entre 112 y 212 más que la suma de los dos envíos consignados

asociaron pronto al Real Gabinete, siendo la propuesta de su creación precisamente de la década que estamos considerando. Aparte de las publicaciones propias, y que por ahora se reducían a los dos libritos de láminas de Brú, el Gabinete facilitaba los trabajos de otros autores, bien mediante contrato, como sucedió con William Bowles, cuya obra, traducida por Nicolás de Azara ya hemos comentado, bien de otras formas, como sucedió con la traducción de la Historia Natural de Buffon hecha por José Clavijo.

En esta época aparecen dos publicaciones de historia natural externas al Gabinete, y que merecen destacarse entre las otras porque, si bien no aparecieron a tiempo para influir sobre Félix de Azara antes de su marcha a América, si tuvieron alguna relación con sus trabajos¹⁹. Una de ellas es la conocida obra de Ignacio de Asso “*Introductio in Oryctographiam et Zoologiam Aragoniae*”, aparecida en 1784. Ya hemos visto que Asso y Azara debieron conocerse años atrás, y que pudieron compartir ideas de modo verbal en las reuniones de la Sociedad Aragonesa de Amigos del País. Precisamente el Prefacio de esta obra comienza mencionando a dicha Sociedad, y después alude también al Real Gabinete de Historia Natural y al Real Jardín Botánico de Madrid como frutos del celo de Carlos III por el florecimiento de la ciencia en España. De las relaciones entre Asso y el Museo de Madrid da fe, entre otros, este párrafo correspondiente a la descripción de la cabra montés: “*Specimen quod nobis Cesaraugustae videre licuit, ad Regium Musaeum Matritense transmissum fuit.*” (Un ejemplar que pudimos ver en Zaragoza fue enviado al Real Gabinete de Historia Natural de Madrid). Como hemos dicho, Asso, que escribió esta obra en Amsterdam, en el país donde aparecieron las ideas de Linne, era ferviente linneano, y adopta por completo el sistema del autor sueco en su obra, lo cual no significa que no considere a Buffon, a quien cita, como a muchos otros autores (pues conocía muy bien la bibliografía sobre el tema), en diversos pasajes La obra, con una primera parte (orictografía) dedicada a los minerales y una segunda parte (zoología) dedicada a los animales, escrita en un excelente latín, mejor incluso que el de Linne, describe 32 especies de mamíferos aragoneses y 126 de aves, siendo la primera “fauna” en sentido moderno publicada en España. Si Azara la hubiera tenido consigo sin duda hubiera intentado utilizar el esquema linneano de clasificación, aunque dado que Asso no describe los taxones de rango superior a la especie quizás le hubiera sido difícil la asignación de sus especies a un grupo correcto La obra está enriquecida con una treintena de excelentes dibujos, muy realistas. Asombra pensar que en tiempos tan remotos Asso describiese incluso numerosos

¹⁹Además de las obra mencionada, existe otro texto zoológico publicado en España en esta década, concretamente en 1788. Se trata del “*Ensayo de una historia de los peces y otras producciones marinas de la costa de Galicia, arreglado al sistema del caballero Carlos Linneo*”, de José Cornide de Saavedra. Este ilustrado gallego, como Ignacio de Asso en Aragón, escribió sobre temas diversos, principalmente históricos y económicos, pero también sobre historia natural, especialmente en aquellos aspectos relacionados con la pesca.

insectos u otros invertebrados, grupos que ni siquiera Buffon había podido abordar, pero que sí figuraban en el cuadro zoológico de Linne. Ahora, como buen economista, Asso mantiene algo del espíritu de Buffon, y así dedica alguna mayor extensión al hombre y a los animales domésticos, principalmente a ovejas, vacuno, y gallinas.

Hay muchas otras obras que hubieran podido proporcionar una buena base a los trabajos de Félix de Azara, y que fueron escritas en esta década o en décadas anteriores. Cuando Walckenaer pregunta a Azara acerca de los libros que había leído y en los que podía fundar sus conocimientos de historia natural, éste le contesta que los únicos libros que conocía eran los que figuraban en el prefacio de su obra “*Viajes por la América Meridional*”. Si examinamos este prefacio veremos que Azara sólo menciona en él a ocho autores²⁰. Es evidente que conocía a otros, pues, en su obra “*Apuntamientos sobre los Paxaros del Paraguay*” suministra una lista bibliográfica con 56 nombres, generalmente obtenidos de modo indirecto a través de Buffon, al que no menciona entre los ocho autores antes señalados. Algunas de las obras que pudo conocer pero que no menciona (hasta una veintena de ellas) son indicadas por distintos autores (FERNÁNDEZ PÉREZ, 1992). Añadiremos a esta lista la obra siguiente, no incluida en las relaciones anteriores. Se trata del “*Compendio de la Historia Geográfica, Natural y Civil del Reyno de Chile*”, debida al Padre Ignacio Molina, uno de los jesuitas expulsados de las colonias españolas y que encontró acomodo en la universidad de Bolonia como profesor de griego y de historia natural. Su obra apareció en 1783 en italiano, y la traducción española de la primera parte, que es la que trata sobre historia natural, se publicó en 1788. Esta obra es similar a la de Asso, ya que describe si no todas, al menos la mayor parte de las especies que habitan en Chile, incluyendo también las plantas. La mayor extensión del tema y del ámbito geográfico harían esperar una obra más extensa que la del aragonés, tanto más cuanto que las descripciones son más amplias y aportan a menudo detalles de la biología de la especie descrita. Y en efecto, lo es pero no tanto como cabría esperar. Los animales se tratan en el libro cuarto, donde el autor sigue el esquema linneano, y a diferencia de lo que se acostumbraba en su época, comienza por los organismos más sencillos, invertebrados marinos, utilizando los nombres latinos para las especies que puede identificar y dando nombres nuevos con arreglo a las normas de Linne para las especies y aún géneros nuevos que describe. En todos los casos acompaña al texto italiano una concisa descripción en latín. Las descripciones parecen a menudo fruto de la propia observación, pero también

²⁰Es curioso constatar el poco aprecio que hace Félix de Azara de las obras de sus predecesores. Sus valoraciones son bastante duras. Por ejemplo, de Herrera comenta “*Así, lo poco que dice Herrera del Paraguay y del Río de la Plata no merece mayor estima que lo de Ivar Núñez, su original*”, y de Barco Centenera dice “*Se nota claramente que el autor no se ocupaba apenas de la verdad ni de los hechos; que se deja arrastrar por un espíritu de maledicencia; que tiene poco método...*”. Apenas Schmidels y Haenke se salvan de las duras calificaciones de Azara.

se basan en datos bibliográficos o en referencias. Cuando se trata de especies que el autor considera nuevas la descripción es siempre de primera mano y basada en el material que él mismo ha manejado.

Es muy improbable que esta obra o la de Asso estuviesen al alcance de Félix de Azara cuando estuvo en América, pues tenían una difusión mucho más restringida que la de Buffon, y además una de ellas se debía a un jesuita, que quizás Azara consultara sólo si no había más remedio. Ejemplares de la obra de Molina llegaron a Chile ya durante la década siguiente, y sin duda fueron examinados por los naturalistas de la expedición Malaspina, uno de los cuales, Antonio Pineda, llegó a contactar con Azara. No podemos sino especular al respecto y lamentar que por sus circunstancias de aislamiento y en parte por sus prejuicios, Azara no pudiese aprovechar el valioso material que otros habían elaborado antes que él. Pero nuevamente nos estamos moviendo en un ámbito temporal que corresponde al tronco principal de la obra azariana, y que deberá ser analizado en otro artículo. Para el presente basta lo dicho.

Referencias

- [1] ALBIAC, M.D., 2000.- *Félix de Azara*. Col. CAI-100, nº 83. Zaragoza, 96 pp.
- [2] ALFAGEME, C, ALMAZÁN, N, ARENZANA, H., BENÍTEZ, M., CALVO, C., CANTÍN, A., DÍEZ, M. y SEBASTIÁN, J., 1987.- Félix de Azara, ingeniero y naturalista del siglo XVIII. *Col. Estudios Altoaragoneses*, nº 16. 131 pp.
- [3] ÁLVAREZ JUNCO, J., 1968.- La Sociedad Aragonesa de Amigos del País en el siglo XVIII. *Revista de Occidente*, Año VI, 2^a Época, nº 69: 301-319
- [4] ÁLVAREZ LÓPEZ, E., 1934.- Félix de Azara, precursor de Darwin. *Revista de Occidente*, 43: 149-166
- [5] BARREIRO, A.J., 1992.- *El Museo Nacional de Ciencias Naturales (1771-1935)*. Ed. Doce Calles, Madrid. 509 pp.
- [6] BAULNY, O., 1966.- Félix de Azara. Un aragonais précurseur de Darwin. I: Vie de Félix de Azara. *Pyrénées*, 68: 233-248
- [7] BAULNY,O., 1967.- Félix de Azara. Un aragonais précurseur de Darwin. I: Vie de Félix de Azara. (suite) y II: Félix de Azara et la nature américaine. *Pyrénées*, 69: 9-24
- [8] BAULNY,O., 1967.- Félix de Azara. Un aragonais précurseur de Darwin. II: Félix de Azara et la nature américaine (suite) y III: Félix de Azara, témoin et artisan de la colonie. *Pyrénées*, 70: 97-112

- [9] BAULNY, O., 1967.- Félix de Azara. Un aragonais précurseur de Darwin. III: Félix de Azara, témoin et artisan de la colonie (suite) y IV: Le tombeau de Don Félix. *Pyrénées*, 72: 251-263
- [10] CAPEL, H., 2005.- El ingeniero militar Félix e Azara y la frontera americana como reto para la ciencia española. In: BALLARÍN, I, CONTRERAS, J.R. y ESPAÑOL, M., (Coords.): *Tras las huellas de Félix de Azara (1742-1821), Ilustrado altoaragonés en la última frontera sudamericana*. Primeras Jornadas Azarianas, Madrid-Huesca, 2005. Ed. Diputación Provincial de Huesca y Fundación Biodiversidad de Madrid. pp. 83-132
- [11] COLMEIRO M. 1858.- *La Botánica y los Botánicos de la Península Hispano-Lusitana. Estudios bibliográficos y biográficos*. Imp. Rivadeneyra, Madrid. 216 pp.
- [12] CONTRERAS, J.R., 2006.- Don Félix de Azara, ilustrado español y “guardián platónico” de Indias. Una incursión por su biografía, su epistolario y sus actos de servicio. En: BALLARÍN, I, CONTRERAS, J.R. y ESPAÑOL, M., (Coords.): *Tras las huellas de Félix de Azara (1742-1821), Ilustrado altoaragonés en la última frontera sudamericana*. Primeras Jornadas Azarianas, Madrid-Huesca, 2005. Ed. Diputación Provincial de Huesca y Fundación Biodiversidad de Madrid. pp. 159-182
- [13] DÍEZ TORRES, A. R.; MALLO, T.; PACHECO, D. (Coords), 1995.- *De la ciencia ilustrada a la ciencia romántica*. Ed. Doce Calles, Aranjuez.
- [14] FERNÁNDEZ PÉREZ, J., 1992.- Estudio Preliminar. In: Azara, F., *Apuntamientos para la historia natural de los Paxaros del Paraguay y Río de la Plata*. Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología, Plan Nacional de I+D, Madrid: 11-70
- [15] FERRER DEL RÍO, A., 1856.- *Historia del reinado de Carlos III en España*. Madrid.
- [16] FORNIÉS, J.F., 2000.- *La Real Sociedad Económica Aragonesa de Amigos del País*. Col. CAI-100, nº 50. Zaragoza, 96 pp.
- [17] HESTMARK, G., 2006.- *Oeconomia Naturae L.*, *Nature*, 405(19): Millenium Essay.
- [18] LUCENA, M. y BARRUECO, A., 2006.- “Por la ciencia y la gloria nacional”. Félix de Azara y la exploración de las fronteras americanas. En: BALLARÍN, I, CONTRERAS, J.R. y ESPAÑOL, M., (Coords.): *Tras las huellas de Félix de Azara (1742-1821), Ilustrado altoaragonés en la última frontera sudamericana*. Primeras Jornadas Azarianas, Madrid-Huesca, 2005. Ed. Diputación Provincial de Huesca y Fundación Biodiversidad de Madrid. pp. 259-269
- [19] MONES, A. y KLAPPENBACH, M.A., 1997.- Un ilustrado aragonés en el Virreinato del Río de la Plata. Félix de Azara (1742-1821). Estudios sobre su vida, su obra y su pensamiento. *Anales del Museo de Historia Natural de Montevideo* (2^a Serie), 9: 1-221
- [20] MORALES, J., 2006.- Félix de Azara. Modernidad e Ilustración. En: BALLARÍN, I, CONTRERAS, J.R. y ESPAÑOL, M., (Coords.): *Tras las huellas de Félix de Azara (1742-1821)*,

Ilustrado altoaragonés en la última frontera sudamericana. Primeras Jornadas Azarianas, Madrid-Huesca, 2005. Ed. Diputación Provincial de Huesca y Fundación Biodiversidad de Madrid. pp. 281-287

- [21] OCAMPOS, A., 2002.- *La conquista científica de Azara en el Paraguay. Su fascinación y respeto para la naturaleza.* Ed. Instituto de Estudios Altoaragoneses, Huesca. 251 pp.
- [22] PELAYO, F., 1992. *Pehr Löfling y la expedición al Orinoco, 1754-1761.* Ed. Sociedad Estatal Quinto Centenario, Madrid. 190 pp.
- [23] PÉREZ ARCAS, L., 1874.- *Elementos de Zoología.* Imprenta de Fontanet, Madrid. 578 pp.
- [24] PUIG-SAMPER, M. A., 1991.- *Las expediciones científicas durante el siglo XVIII.* Madrid. Ediciones Akal.
- [25] SÁNCHEZ ESPINOSA, G., 1997.- *La biblioteca de José Nicolás de Azara.* Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Calcografía Nacional, Madrid. 294 pp.
- [26] SANTANA, O., 2006.- *Dom Félix de Azara. Terra e Céu.*, Ed. del Autor, Sao Gabriel. 166 pp.
- [27] SINUÉS, J., 1930.- *D. Félix de Azara y Perera. Refundición del texto biográfico del historiador de la casa de Azara Basilio Sebastián Castellanos de Losada, escritor de mitad del siglo XIX, y adiciones por José Sinués y Urbiola. Discurso leído en la sesión de homenaje dedicada a D. Félix de Azara Perera, y contestación del censor de la Sociedad, Marqués de Nibbiano.* Ed. Real Sociedad Económica Aragonesa de Amigos del País, Zaragoza, 31 pp.

In memoriam de un maestro ejemplar: Henri Cartan

El trece de agosto del año dos mil ocho falleció el Prof. Henri Cartan a la edad de 104 años, un brillante matemático con profundos sentimientos humanistas y uno de los primeros fundadores del grupo Bourbaki. Henri Cartan nació en Nancy el 8 de julio de 1904; tuvo tres hermanos, se casó con la Srta. Nicole Weiss en Estrasburgo en 1935 de cuyo matrimonio nacieron cinco hijos. El papel de Mme. Cartan como esposa y madre justifica, una vez más, el dicho popular de que “detrás de todo gran hombre existe una gran mujer”. Era hija del profesor Pierre Weiss, especialista en magnetismo, y supo no sólo adaptarse a las condiciones de vida, nada fáciles de un matemático, sino ser su incondicional apoyo.

Henri Cartan, antiguo alumno de la École Normale Supérieure, obtuvo la Agregación en 1926 y el doctorado en Ciencias en 1928. Inició la docencia el curso 1928-29 en el Lycée Malherbe de Caen. Durante los años 1929 al 1940 ejerció la docencia en las Facultades de Ciencias de Lille y Estrasburgo, y de 1940 a 1949 fue nombrado Maitre de Conférences de la Faculté de Sciences de París, aunque durante los cursos 1945-46 y 1946-47 estuvo en comisión de servicio en la Universidad de Estrasburgo (facilitando su renovación de relaciones con los matemáticos alemanes). De 1949 a 1969 fue Profesor en la Facultad de Ciencias de París y de 1969 a 1975 Profesor en la Facultad de Ciencias de Orsay. De 1940 a 1965 se le encargó de la enseñanza de las matemáticas en la Escuela Normal Superior en la rue d’Ulm. Fue Profesor honorario de las universidades de Estrasburgo, Luis Pasteur y Paris-Sud. De 1967 a 1970 fue Presidente de la Unión Internacional de Matemáticos. Además fue miembro de unas doce sociedades o academias de ciencias.

Quizás sea preciso recordar, también aquí, la obra de su padre el profesor Élie Cartan; uno de los matemáticos más destacados del primer tercio del siglo XX. Debido a sus investigaciones sobre la teoría de los grupos de Lie y la geometría diferencial se le considera fundador de la geometría diferencial tal como hoy se estudia¹. Sus resultados atrajeron pronto la atención fuera de Francia².

¹Véase el número fuera de serie de “Astérisque” (1985) en el que se publican las comunicaciones presentadas en el seminario conjunto SMF y CNRS desarrollado en la Universidad de Lyon I, los días 25 al 29 de junio de 1984, año en que H. Cartan cumplía los ochenta años, titulado “Élie Cartan et les mathématiques d’aujourd’hui, The Mathematical Heritage of Elie Cartan”.

²Por ejemplo en la Universidad de Madrid, en el curso de 1956-57, el Prof. D. Germán Ancochea, desarrolló un programa de doctorado sobre “sistemas diferenciales exteriores” siguiendo esencialmente la

Después de haber recordado brevemente el encuadre familiar y académico-docente del Prof. H. Cartan, puesto que existen numerosas publicaciones con análisis sobre sus trabajos por estudiosos más competentes que nosotros, destacando los presentados en la introducción que a los mismos realiza el propio H. Cartan al presentar su curriculum vitae³ en 1974 y el breve análisis de sus trabajos en la revista “Asterisque 32-33 de 1976” dedicada al “Colloque analyse et topologie en l’honneur de Henri Cartan” que tuvo lugar con motivo de su jubilación oficial. También debe citarse que todas sus obras, recopiladas por R. Remmert y J. P. Serre, se publicaron por Springer-Verlag en 1979 en tres volúmenes titulados “Colección de las obras completas de Henri Cartan”.

Pero en esta comunicación no se analizan ni comentan los temas de sus obras y trabajos de investigación, simplemente se pretende humildemente rendir nuestro cordial recuerdo y homenaje a quien tanto debemos por su desinteresada y esencial ayuda en nuestra formación, no sólo matemática sino humana, centrándonos en algunos aspectos de sus actividades docente y humanista.

Su brillante inteligencia, extraordinaria capacidad de trabajo y sobre todo su sentido estético y deseo de conocer la verdad, le llevaban a exigir el rigor no sólo en la exposición verbal de las ideas sino, principalmente, en la presentación escrita de los resultados, exigiendo una correcta sintaxis y ortografía. Es posible que tal exigencia fuese, desde luego fruto de su sentido estético, pero quizás radicalizado cuando, al inició del primer Seminario Cartan, Jean-Pierre Serre⁴ tuvo la acertada idea de decirle: “Mais il faudrait que les exposés soient rédigés!”. Permitía así una mayor precisión, luego penetración, del significado de las definiciones y análisis de los problemas, facilitando la discusión y estudio de los resultados obtenidos, a la vez que se conseguía una comunicación de ideas más fluida con todo aquel que pudiera estar interesado en el tema.

El estudio lo facilitaba mediante una docencia motivadora. Por ejemplo, mediante la solución de situaciones análogas a las que se planteaban y con las que conseguía rápidamente implicar al alumno en el tema tratado. Sus respuestas, generalmente, se apoyaban en una sencilla y afectuosa, pero rigurosa, relación personal que exigía del alumno practicase la necesaria reflexión enfrentándole a un hábil “*qui habet audies audiat*”.

obra del Prof. Élie Cartan sobre el mismo tema, obra editada en 1945 por Hermann, curso que debimos estudiar.

³A completar con honores como la concesión de la “Medalla de oro del C. N. R. S.” del año 1976; el premio Wolf de matemáticas en 1980, Comendador de la Legión de Honor en 1989, el nombramiento Doctor “Honoris Causa” en 1985 por la Universidad de Zaragoza y en 1992 por la Universidad de Atenas, etc.

⁴Allyn Jackson: Interview with Henri Cartan, Notices of the American Mathematical Society, 46 (Agust 1999), No. 7, pp. 782-788.



Figura 1.— El Profesor Henri Cartan (izda.) en su investidura como Doctor *Honoris Causa* por la Universidad de Zaragoza el 26 de marzo de 1984, acompañado por su padrino en el acto, el Profesor Viviente.

Gracias a la formación en Álgebra Moderna que recibimos del Prof. P. Abellanas (alumno de Bartel Van der Waerden), esta técnica tuvimos la suerte de experimentarla y superarla con éxito por primera vez en el curso 1958-59, cuando bajo su dirección estudiamos el “Homological algebra” (obra de H. Cartan y S. Eilenberg). Libro también llamado el “diplodocus” por los alumnos de la Escuela Normal Superior de la rue d’Ulm, “normaliens” de aquella época. El proceso se repitió en el curso 1959-60 con mis cuestiones sobre la sucesión espectral, o sobre las operaciones de Steenrod, también fue un encuentro decisivo el que motivó la exposición de mi idea sobre la diferencia que encontrábamos entre la noción de “faisceau” del texto de Godement de 1958 y la generalización de tal concepto introducida por Grothendieck. En más de una ocasión la discusión matemática en su despacho de la E. N. S. se prolongaba por la rue Gay Lussac y en el autobús que desde el Boul. Mich (ante el jardin de Luxenbourg frente a la esquina con Gay Lussac)

nos llevaba a la Port d'Orleans camino de nuestras respectivas casas.

Prácticamente su dirección docente sobre nuestros estudios en Topología Algebraica, concluyó en el curso 1960-1961, al ir presentándole, y discutir, primero los errores hallados en una publicación aparecida en el No. 12 de la revista *Kodai Math. Sem. Rep.*, y después los resultados que habíamos obtenido al corregir tales errores. Resultados que fueron objeto de nuestra nota al *Comptes Rendus de la Academia de Ciencias de París* (tomo 252 de 1961), presentada por el propio Prof. Jean Leray⁵. Con ella resumíamos los tres cursos de formación en Topología Algebraica bajo la dirección del Prof. H. Cartan. Nota al CRAS de París. Nota que, desarrollada detalladamente, podría habernos permitido defender una segunda tesis doctoral, pero ello no estaba conforme con nuestras ideas europeístas; desde 1960 ya éramos doctor por la Universidad de Madrid. Sin embargo mientras seguí como docente en la Universidad de París, no faltaron ocasiones de reencuentro y cambio de ideas, bien en su Seminario bien en el Instituto H. Poincaré o en su domicilio.

Desde el curso 1961-62 mi interés se centró más en los trabajos sobre Topología Diferencial y teoría de categorías estructuradas que estudiaba el Prof Ch. Erhesmann en su seminario en el Instituto Henri Poincaré. Creo que, como resumen de cuanto hemos afirmado respecto a la docencia del Prof. H. Cartan se puede concluir diciendo que fue *un bondadoso y exigente maestro ejemplar*. Opinión generalmente admitida, pero que adquiere un superior matiz para todos los que tuvimos el privilegio de que nos acogiera (pues no fui el único en la Universidad de París con análogas relaciones con el Prof. H. Cartan) sin otro precedente que su sensibilidad y delicadeza. Es decir, el Prof. H. Cartan entendía que *“la enseñanza es un acto de amor o amistad que tiende hacia la autonomía futura del alumno”*, la amistad es el medio, la autonomía del alumno el fin.

El segundo rasgo personal del Prof. H. Cartan que queremos destacar es el de su profundo humanismo. Fue notoria la alegría con que acogió la creación de la Sociedad Matemática Europea⁶ “*je m'en réjouis profondément, car elle montre le progrès d'une idée qui me tient au cœur: celle de la solidarité entre nos peuples d'Europe*” y aunque siga diciendo: “*Bien que je ne sois pour rien dans cette importante décision*”. Está claro que se refiere a que él, jubilado en 1974, estaba ya al margen de toda actividad oficial socio-política, pero trivialmente, y en gran parte, ello se consiguió gracias a los frutos de la simiente que siempre supuso su ejemplo y manifestación de sus sentimientos europeístas en toda ocasión y sobre todo ante sus alumnos (recuérdese su desplazamiento de la Universidad de París a la de Estrasburgo durante dos cursos al terminar la Segunda Guerra

⁵Creemos que esta nota en el CRAS de Paris, tomo 252, 1961, es la primera publicación sobre un tema de topología algebraica efectuada por un español en una revista extranjera.

⁶H. Cartan: *Quelques souvenirs*, Gazette des Mathematiciens, juin 1992/ No. 53, pp 23-24.

Mundial). Su fomento de los intercambios entre alumnos facilitándoles ayudas (becando en el extranjero a alumnos franceses y recibiendo a becarios del extranjero), e incluso proporcionando una acogida personal (de la que nosotros mismos fuimos privilegiados beneficiarios). Multiplicó los encuentros entre matemáticos de distintas universidades europeas tanto en París como desplazándose él mismo a esas otras universidades. En este sentido su seminario en la E. N. S. fue modelo de centro de encuentro de matemáticos de todo el mundo: además de los franceses de aquella época, en él pudimos conocer a matemáticos como Atiyah, Borel, Bot, Chern, de Rham, Eckman, Eilenberg, Hirzebruch, MacLane, Marston Morse, Moore, Weil, etc. Otro lugar de encuentro lo constituían las tres sesiones anuales del Seminario Bourbaki.

Existe una práctica popular afirmando que “si tú no dices lo que eres otros dirán lo que no eres”, por ello ante la pregunta de Marian Schmidt⁷ sobre si poseía una filosofía personal, su respuesta fue sencilla “*Non, si ce n'est celle du devoir*”, para seguir con consideraciones sobre la bondad de la unidad de la familia y la del ejemplo del trabajo desinteresado de su padre, mostrándose partidario del papel de la familia en la formación de la personalidad. Así mismo ante sus anhelos europeístas y más aún por su defensa de los Derechos del Hombre, en diversas entrevistas se vio obligado a precisar que ello no era debido a que perteneciera a partido político alguno. Por ejemplo, en la entrevista que le hizo Marian Schmidt, en mayo de 1982, al tratar de justificar su interés vital por la construcción de Europa dice: “*Je précise tout d'abord que je n'appartiens à aucun parti politique, car je tiens à conserver toute ma liberté de jugement.*” También resulta interesante la respuesta que dio a Allyn Jackson⁸ cuando éste le preguntó ¿Es que no existe relación entre la política y las matemáticas? ... a lo que respondió: “*Quizás exista ... Un matemático piensa: “¿Cuál es la pregunta? ¿De qué se trata? ¿Por qué es así y no de otra manera? ¿Cuál es la razón? ¿Qué consecuencias lógicas pueden deducirse de ello? Yo aplico este modo de razonamiento a la política. He tratado de analizar las situaciones y deducir de ellas consecuencias lógicas. Es así que yo he llegado a ser un federalista europeo porque he comprendido que no existía otra solución ... siempre que se comprenda bien el sentido del término federalismo”.*

De hecho esta conclusión fue fruto de una lenta evolución, sus primeros anhelos europeístas se manifestaron, como ya hemos señalado, con el deseo de solidaridad entre los matemáticos de todos los pueblos de Europa. Como precisa (5) en 1956 se creó en París una “Asociación Europea de Docentes” que reunía docentes conscientes de la necesidad de desarrollar en los jóvenes el sentimiento de pertenecer a una Europa unida, así como reformar los manuales de historia. Como presidente de la Sección francesa, el Profesor Henri

⁷Marian Schmidt: Hommes de Science, 1990, editorial Hermann, Paris.

⁸Ver la entrevista por Allyn Jackson ya citada en el pie de página (4).

Cartan, tuvo la iniciativa de reunir en París, en octubre de 1960, amigos matemáticos de ocho países de Europa⁹. Después de discutir varias propuestas se alcanzaron acuerdos en cuanto a unos mínimos programas comunes con vistas a la creación del “Libro del Estudiante europeo”. En la reunión siguiente, celebrada en Düsseldorf, quedó bien conformado el “Libro del Estudiante europeo” y su edición la realizó la editorial Dunod. Siguieron otras varias reuniones: la de 1969 se efectuó en Estrasburgo organizada por el Consejo de Europa y en ella se encargó al Prof. Kuiper la realización de una encuesta sobre el Libro del Estudiante europeo; en 1970 se organizó un encuentro internacional en Grenoble sobre “La Europa universitaria”. Asistieron 250 participantes en representación de 13 países de Europa. El Prof. André Lichnerowicz fue el reportero general del encuentro y entre los asistentes figuraba Pierre Mendes-France, participación oficial que, naturalmente, supuso una satisfacción para el Profesor H. Cartan al observar que sus primitivas ideas habían comenzado a prosperar entre los medios oficiales.

Las satisfacciones anteriores, enriquecidas por la experiencia de haber vivido las limitaciones de acción del individuo respecto a la realización de ideales de alcance colectivo, le llevaron a adherirse a diversas organizaciones con el interés común de alcanzar una unión europea. Entre ellas figuraba el Movimiento Federalista Europeo, organización en la que aprendió qué era el federalismo, llegando a ser elegido su presidente en 1974 (justo el año en que el Prof. H. Cartan fue jubilado como docente en la Universidad). En la ya citada entrevista por Allyn Jackson, comenta alguna de sus actividades y por qué no consiguieron ningún escaño en las elecciones al Parlamento europeo que tuvieron lugar en 1984, pese a ser el número 1 de la lista titulada “Por los Estados Unidos de Europa”. En la entrevista a Marian Schmidt, con anterioridad a la caída del muro de Berlín, con una clarividencia extraordinaria decía: *“Si la unión de Europa es aún hoy tan difícil, es porque los Estados quieren conservar una soberanía total que, por otra parte con frecuencia, no es más que una ilusión en el mundo actual”*, como demuestra la actual crisis económica mundial, añadiríamos hoy.

Otro aspecto que su humanismo le exigía considerar fue “la defensa de los Derechos Humanos”. Por ello se implicó en la defensa de ciertos disidentes, sobre todo colegas matemáticos, como Leonid Pliouchtch que estaba encerrado en un hospital psiquiátrico “especial”. Andrei Sakharov les puso en conocimiento de la existencia de tal situación, según comenta a Allyn Jackson. Las acciones, realizadas con ayuda de un llamado “Comité de matemáticos” que se reunía en la sede de los Derechos Humanos en París, fue todo un éxito pues consiguió que en enero de 1976 la Unión Soviética liberase a Pliouchtch. Estas

⁹En esta época tuve ocasión de reunirme en París con mi director de tesis en España el Prof. D. Pedro Abellanas, quien después de comentarle los estudios y trabajo que allí desarrollaba me animó a que siguiese en París.

y otras actividades análogas motivaron el que La Academia de Ciencias de Nueva York otorgara a Henri Cartan el Pagels Award. El Comité de matemáticos pasó a llamarse más tarde “Comité de defensa de los hombres de ciencia” y hoy existen comités análogos en Suecia, Gran Bretaña, Italia y en los Estados Unidos.

Si tanto Élie Cartan como H. Cartan fueron profesores en la Escuela Normal Superior de la rue d’Ulm, Albert Einstein nació en la ciudad de Ulm y si Élie Cartan mantuvo un intercambio de ideas matemáticas con Albert Einstein, vemos que su hijo Henri Cartan fue de los científicos que supo llevar a la práctica alguna de las ideas humanistas que Albert Einstein consideró esenciales para la humanidad, como aquella que afirmaba: *“La conducta moral no consiste simplemente en exigir que se renuncie a ciertos placeres de la vida, sino más bien en el benévolos interés por conseguir una situación más feliz para todos los hombres”* o aquella, dirigida al hombre de ciencia: *“La preocupación por el hombre y su destino debe siempre constituir el interés principal de todos los esfuerzos técnicos ... No lo olvidéis nunca en medio de vuestras diagramas y de vuestras ecuaciones”*. Por todo ello decimos con el profesor Jean Cerf: *Gracias, Señor Cartan, por mostrarnos con vuestro ejemplo que es posible envejecer llegando a ser cada vez más humano.*

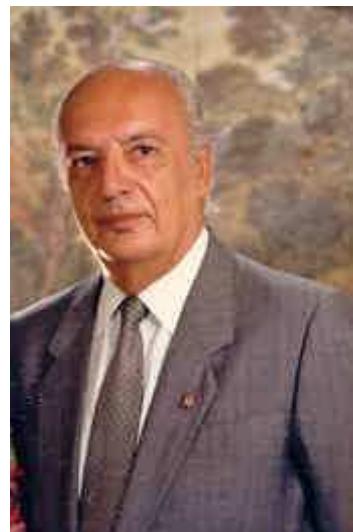
Alicante, octubre de 2008.

JOSÉ LUIS VIVIENTE MATEU
Académico correspondiente

**Un Presidente crucial para la
Real Academia de Ciencias de Zaragoza:
HORACIO MARCO MOLL (1917–2008)**

El pasado 18 de octubre, en la Sala de Grados de la Facultad de Ciencias, tuvo lugar un Acto conjunto de la Real Academia y de la Facultad de Ciencias para recordar la figura del anterior Presidente de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza, Don Horacio Marco Moll, fallecido el pasado 18 de febrero. Se pretendió que el Acto tuviese un carácter íntimo de la Academia, de la Facultad y de la familia de Horacio, dignamente representada por su viuda, Doña Pilar Álvarez, su hija Pilar y otros familiares.

El Acto fue presidido por el Presidente de la Academia, Luis Joaquín Boya y por la Sra. Decana, Anabel Elduque. En las páginas siguientes reproducimos algunas de las intervenciones en el mismo.



JOSÉ BADAL

Catedrático de Física de la Tierra. Universidad de Zaragoza

Las líneas que siguen se escriben con sentido y profundo pesar por el reciente óbito del Dr. D. Horacio Marco Moll, profesor de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza durante 45 años o tal vez más. No va a ser éste un obituario al uso. No voy a referirme a la fecha y al lugar en el que comenzó sus estudios universitarios, sus duros años de formación, ni a cuándo se licenció y después consiguió el grado de doctor; ni siquiera voy a hacer una relación detallada de su dilatada y brillante labor científica. Esto es lo habitual; pero yo dejo esta tarea a otros, discípulos y amigos, que le han conocido como científico y tratado como compañero de trabajo mucho mejor que yo. Yo quiero traer a primer plano su calidad humana, siendo consciente de que no la puedo desgajar de su faceta docente, aspectos ambos que sí he conocido bien desde tiempo atrás, cuando mis circunstancias personales me han brindado la oportunidad de tratarlo, y que no dudo en decir que han sido excelentes referencias para sus pupilos, colegas y amigos. Si se me preguntara cuáles son las notas que yo destacaría de la personalidad de Horacio Marco, dejando a un lado otras familiares y su condición de estudioso y profesor, diría que su bonhomía y su humor ingenioso y sagaz, bien dosificado, que siempre lo sacaba a relucir en el momento preciso, nunca a destiempo, con perspicacia y cierto laconismo, lo cual daba idea clara de su agudo sentido de la realidad y de su saber destilado con paciencia durante años.

Yo quiero que mis palabras, no exentas de emoción, debo confesarlo, sean de modesto, pero merecido, homenaje para quien hasta hace muy poco era el Presidente de la Academia de Ciencias de Zaragoza y se venia ocupando de regir con entusiasmo y acierto la institución; que sirvan, a modo de semblanza, para dejar testimonio de mis buenos recuerdos de él, primero como estudiante y alumno suyo, años después como compañero de la Facultad y como amigo; recuerdos que guardo en mi memoria con sincero afecto y profunda admiración.

Conocí a D. Horacio Marco Moll hace ya muchos años, antes de iniciar mis estudios universitarios, cuando yo era un joven estudiante del curso preuniversitario, el PREU, que más tarde pasaría a llamarse curso de orientación universitaria, el actual COU que todos conocemos y nos suena más. La época sería por los años sesenta cuando yo era alumno de la Academia Burbano, que por aquel entonces estaba en la calle Alar del Rey, una bocacalle del hoy rebautizado Paseo de Sagasta. Recuerdo bien que el centro lo dirigía D. Santiago Burbano de Ercilla, hombre de fuerte y franca personalidad, que era físico y colaboraba como docente en la Universidad, lo mismo que D. Horacio, el cual compatibilizaba su actividad docente en la Universidad con sus clases de Biología en dicha

academia. Mis imborrables recuerdos de entonces son que Horacio Marco, D. Horacio en esos años, era un profesor excelente. Sabía captar muy bien la atención del alumno con su plática amena, a la vez que pedagógica y comunicativa, con su discurso fundado y pleno de rigor científico. Recuerdo que acostumbraba a componer con tizas de colores en el encerado de clase, a veces incluso antes de que ésta diera comienzo, explicativos diagramas, cuadros sinópticos y acertados resúmenes que no dejaban de maravillarnos como alumnos suyos y que nos ayudaban extraordinariamente en nuestro aprendizaje y nuestras tareas de estudiantes. D. Horacio Marco era, siempre lo ha sido, un profesor que se expresaba con claridad, orden, rigor y todo ello no exento de amenidad. Cautivaba por su saber, por sus sólidos conocimientos, por su don para explicar la biología, que todos sus alumnos agradecíamos, pues nos facilitaba en gran medida la comprensión de la materia y la adquisición de conocimientos científicos. Sus enseñanzas nos acercaban al entendimiento de la célula, del citoplasma, de las mitocondrias, del núcleo, de los cromosomas, de los ácidos RNA y DNA, de los aminoácidos y de tantas y tantas cosas que existen y pululan en ese aparentemente reducido mundo que es la célula, pero que sin embargo constituye todo un extenso universo que atesora infinidad de misterios y retos. D. Horacio era atento con nosotros, sus alumnos, afable, cordial, y siempre estaba presto a contestar a las preguntas que le formulábamos sin rehuir la mayor o menor complejidad de cuanto le planteábamos. Pero también, hay que decirlo, era un profesor exigente que, a cambio de su esmero y dedicación, esperaba una respuesta del alumno acorde con la buena docencia con la que nos obsequiaba. En uno u otro grado, todos nosotros aceptábamos este compromiso tácito con él.

Superado el PREU y el examen de acceso a la Universidad, de nuevo me encontré con D. Horacio como profesor de Biología en el primer curso de Ciencias, que por entonces era el temido curso selectivo. No se podía pasar a segundo curso sin antes haber aprobado todas las asignaturas del primero, que eran Matemáticas, Física, Química, Geología y Biología, y se impartían como asignaturas anuales, es decir, a lo largo del curso académico; y no como sucede en la actualidad, que los estudiantes tienen que aprobar un montón de asignaturas cuatrimestrales troceadas y a veces inconexas o descoordinadas. No sería el último curso selectivo. El plan de estudios de la Licenciatura en Ciencias Físicas de aquellos años contenía una exigencia más: el tercer curso también era selectivo y tampoco se podía pasar a cuarto curso sin antes haber aprobado todas las asignaturas de los tres primeros, lo que en la actualidad es el primer ciclo. Bueno, era otro obstáculo a salvar, y así hasta seis entre examen de ingreso en bachillerato, reválidas (dos, en cuarto y sexto de Bachiller), examen de ingreso en la Universidad y cursos selectivos. Realmente eran tiempos duros y exigentes (nada que ver con los tiempos actuales) en los que uno agradecía toparse con un buen profesor que le facilitara el trabajo y le ayudase a supe-

rar el escollo de la selectividad de ese primer curso de Ciencias. El profesor D. Horacio Marco cumplía sobradamente estos requisitos y desplegaba todo su saber y entusiasmo para hacernos más fácil y atractivo el estudio de la Biología. Bagaje y experiencia no le faltaba, después de tantos años como docente acreditado; y tampoco formación científica y labor investigadora, pues era autor de varios libros (yo aún conservo uno suyo de texto en buen estado) y artículos de investigación. Admirábamos su rigor en clase, en la exposición de los temas de estudio, y agradecíamos su atención y consejo en las prácticas de laboratorio, enfrascados como estábamos con las tinciones y observaciones con la ayuda del microscopio.

Ya cuando lo conocí en PREU me percaté de una nota muy característica de su personalidad que tiempo después confirmé siendo su alumno en la Universidad: era su humor, como antes he dicho, su magnífico y brillante humor; su humor agudo, a la vez que fino y elegante. Horacio Marco, dada su cultura y formación científica, era una persona con la que podías hablar de temas muy diversos, que él acostumbraba a tratar con la seriedad requerida, pero sin renunciar a una exposición amable y cordial convenientemente sazonada de su peculiar humor, a veces socarrón, como madrileño que era, otras certero y atinado. Derrochaba personalidad y buen oficio y siempre encontraba el punto de vista sugerente. Jamás, pese a que hubiera podido suceder, exhibió pedantería o alardeó de erudito; más bien hacía gala de su erudición con naturalidad, dentro y fuera de clase, dentro y fuera de la Universidad. Quienes se acuerden de un famoso programa de televisión de los años sesenta, creo recordar que se llamaba *La unión hace la fuerza*, en el que competían equipos por provincias compuestos por personas de variada formación y bagaje cultural, seguramente recordarán esto que ahorauento. Hacía las veces de portavoz del equipo de Zaragoza precisamente D. Horacio Marco Moll y bien que supo ganarse el respeto y la admiración de los espectadores y conciudadanos por su labor como integrante y portavoz del equipo y por su humor, que, tal como lo hacía patente con sus alumnos y con sus compañeros de Facultad, nos regalaba también durante sus intervenciones en aquel entrañable programa televisivo. Horacio Marco era un buen contertulio; su conversación o charla no defraudaba; por el contrario, hacia disfrutar de su compañía. Me parece obligado dejar aquí constancia de este otro rasgo que adornaba su personalidad junto con los otros a los que ya me he referido anteriormente.

No puedo dejar de referirme a otro aspecto muy marcado de Horacio Marco. Debo decirlo: Horacio era, ha sido siempre, una persona presumida, atildada. Vestía con pulcritud, con cierta elegancia, que lucía con su particular desenvoltura y garbo, nada ajeno a su origen madrileño, que no se guardaba de pregonar, pese a sus muchos años de convivencia entre nosotros, en Zaragoza. Nuestro querido compañero Horacio, lo sabemos bien los que a menudo nos cruzábamos con él por los pasillos de la Facultad de Ciencias,

paseaba su prestancia y su donaire, su “palmito”, con esa sencillez del que se gusta y sabe que gusta a los demás. Todos recordamos cómo se presentaba en muchos días brumosos y grises durante los crudos meses de invierno, cuando el frío apretaba y ni siquiera permitía una mínima esperanza de calidez, cuando la niebla se enseñoreaba de nuestras calles y plazas y nuestro aliento más se parecía al chorro de vapor exhalado por un máquina: Horacio Marco solía aparecer con su cabeza cubierta, protegida, tocada de un sombrero y a veces de un gorrito de astracán, envuelto en una magnífica, confortable y señorial capa española que sin duda le otorgaba un signo de distinción y captaba las miradas de quienes se topaban con él. Paseaba esta típica prenda española con orgullo y galanura, pero sin atisbo alguno de afectación o pose, siendo perfectamente consciente de su tributo a lo español, lo cual, mirado desde la perspectiva de los tiempos de hoy, realza todavía más, si cabe, su forma de ser y su estilo de caballero español, del que no se recataba cuando la ocasión era propicia. Ya en tiempos más recientes, cuando su edad persistía en doblarlo y su caminar era más lento y desmañado, él aún se empeñaba en mostrarse apuesto sin resignarse a ceder en su compostura y, mucho menos, en su ánimo y talante.

Y termino. Quiero con mis palabras rememorar cómo he visto, o mejor, cómo hemos visto a Horacio Marco los que hemos sido afortunados por conocerlo y tratarlo y los que hemos disfrutado de su compañía y de su amistad. No creo, sería pretencioso por mi parte, que haya sido capaz de dibujar un bosquejo siquiera aproximado de su rica personalidad con tan escasas pinceladas; pero al menos sí creo que he conseguido evocar unos pocos rasgos acerca de la forma de ser de nuestro maestro, compañero y amigo. Si he logrado avivar su imagen en la memoria de los lectores, me doy por satisfecho.

Sé que Horacio estará siempre presente entre sus familiares, allegados y amigos. Pero es cierto que nos ha dejado, que ya no se encuentra físicamente entre nosotros. Pero también es verdad que Horacio Marco Moll nos ha dejado algo muy importante y valioso: su ejemplo y testimonio como persona cabal en todas sus vertientes y sobre todo su recuerdo, su grato recuerdo, su gratísimo recuerdo.

Empezaré con una frase tópica, diciendo lo difícil que es este tipo de tarea; en primer lugar debido a que muchos de nosotros todavía pensamos que nos lo vamos a encontrar en la entrada de la Facultad cualquier mañana; en segundo lugar, por lo difícil que resulta resumir en pocas palabras la huella que una persona deja en su entorno, pero sobre todo, por las múltiples facetas de la rica personalidad de don Horacio.

Cualquiera que haya conocido a don Horacio, sabe lo inútil del intento de tratar de definirlo. Tal vez, utilizando terminología científica, si tuviera que encontrar palabras clave para describir a don Horacio, diría:

- Excelente profesor
- Trabajador infagitable
- Incombustible curiosidad por aprender.

¡y que más se puede decir! . . . ; en nuestro ámbito universitario, en mi opinión, muy poco más.

Cuando un alumno, como fue mi caso, llegaba a la Facultad de Ciencias al Curso Selectivo, venía aterrorizado, y con la idea preconcebida de que no íbamos a enterarnos de nada. Desde luego, en lo que se refiere a la Biología, no fue así. Cada profesor tenía su leyenda, y la de don Horacio era una mezcla de fama de claridad y buen profesor, rigor en la enseñanza, y su sentido del humor, por ejemplo regalando sus famosos roscos, es decir, el dudoso honor de haber sacado un cero, que era compensado con una rosquilla . . .

Todos los que hemos sido sus alumnos somos unánimes: sus explicaciones eran excelentes, los esquemas y dibujos, mucho antes de la era de las transparencias y el *power point*, verdaderas obras de arte. Mucho más tarde, ya en la Complutense, constaté que fue casi el único profesor que nos daba citas bibliográficas, y nos contaba el estado del conocimiento en el momento concreto, huyendo de dogmas, y contrastando las diversas teorías que podrían explicar algunos de los fenómenos observados. Esto que hoy parece trivial, en aquel momento era una iniciativa pionera. Aunque querría huir de personalizar, guardo como un tesoro mis apuntes de Biología de aquel Curso Selectivo, y he visto como han ido cristalizando algunas de las opciones que don Horacio nos planteaba como posible (en aquel momento, teorías solamente). El modelo de membrana tilacoidal de los cloroplastos, cómo podrían funcionar los complejos formadores de ATP, el mosaico fluido como modelo para las membranas . . . , todo esto estaba ya esbozado en mis notas. Muchas veces, al entrar a las 4 de la tarde en el aula 6, nos encontrábamos ya la pizarra con esquemas y dibujos que hubieran sido hoy día objeto de pirateo masivo si estuvieran

en la web . . . , es una lástima pensar que el borrador acababa con ellos cada tarde.

Es importante resaltar que pasado el tiempo, seguí observando la misma entrega a la docencia, incluso en la época al borde de la jubilación, y con mucha más carga docente de la que tenemos ahora. La clase, era sagrada y de ninguna forma se planteaba, a pesar de su sobrada experiencia, simplemente cumplir el expediente. Cambiaba y actualizaba los contenidos cada año, según iba avanzando el conocimiento. Don Horacio ha sido un excelente profesor que sin duda aportó calidad a nuestra Facultad en momentos en que no era tan fácil hacerlo como ahora.

Cuando años más tarde llegué al departamento de Biología por diversos azares y con otro punto de vista diferente, me reencontré con don Horacio. En aquel momento, la imagen del departamento de Biología en la Facultad de Ciencias era casi de un grupo de caza-mariposas algo trasnochados pero cada uno de los profesores, don Cruz, don Horacio y doña Pilar, a su manera, y en medio de una cierta incomprendión, seguían siendo referentes en algún frente, con una enorme entrega docente y con gran ilusión por las tareas que tenían entre manos. Don Horacio se orientaba hacia aspectos moleculares, y compró las primeras pipetas automáticas que probablemente hubo en la Facultad de Ciencias. Emprendía con mucha ilusión proyectos nuevos, que sacó adelante, en una época en la que solo la curiosidad científica incentivaba su trabajo de investigación. Trabajador infatigable y constante, son palabras que sin duda reflejan su quehacer en aquel momento. Nunca estaba ocioso, y lo recuerdo en su zona de trabajo, con la bata puesta, enfascado en los cromosomas de sus chicharras, en sus botes de agua, o en su microscopio, que cuidaba con verdadero mimo. Don Horacio quiso siempre “estar al día”, incluso en los últimos años, consultaba bibliografía nueva y tenía un afán de aprender sorprendente. Siguió consultando libros de texto avanzados hasta el ultimo momento, y no era infrecuente que se interesara por novedades en algunos temas que le interesaban especialmente y me pidiera que le bajara determinados libros.

Aunque ya pertenece a la esfera de lo difícilmente trasmisible a otras personas, no puedo dejar de recordar el ambiente de mi departamento de Biología sus famosos cafés a las 11, donde se hablaba de ciencia y de otras muchas cosas, y Don Horacio siempre ponía la nota de guasa, muchas veces riéndose de sí mismo. Podría contar infinitud de anécdotas y bromas, que probablemente solo tendrían sentido para los que en aquel momento estábamos en el departamento, pero simplemente quiero recordar un hecho que pone de manifiesto que detrás de su guasa iconoclasta había un gran sentimental. Cuando su compañero de muchos años, Don Cruz Rodríguez Muñoz, se jubiló, y él iba a pronunciar unas palabras, la emoción le embargó de tal manera, que durante unos minutos no pudo articular palabra.

Dice la canción que cuando un amigo se va, algo se muere en el alma. Tal vez tenemos

un trozo del alma que se ha ido con él, pero también tenemos todo lo que hemos aprendido y nos ha aportado su compañía en el viaje. Y aunque he dicho que no quería personalizar, no puedo dejar de decir algo de lo espero que él tuviera constancia clara: gracias, don Horacio.

MARIANO GASCA

Secretario de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza

Hasta 1996 conocía a Horacio Marco sólo superficialmente. En mis primeros años de docencia en la Universidad de Zaragoza, de 1965 a 1968, matemáticos y biólogos coincidíamos en el espacio en el tercer piso de la Facultad de Ciencias, actual edificio A o de Físicas, pero no habiendo sido profesor mío, para mí era un profesor agradable a simple vista, con el que la diferencia de edad y campo de trabajo no dieron lugar a mayor trato que amables saludos.

Tras mi periplo de 14 años por otras Universidades retorné a Zaragoza al estrenarse el Edificio de Matemáticas, con lo que se produjo una mayor lejanía física de matemáticos y biólogos. Mi trato con Horacio siguió siendo muy superficial, puesto que aun siendo los dos Académicos desde finales de los 80 las actividades de la Academia eran escasísimas, por no decir casi nulas.

Sin embargo en 1996, cuando los (pocos) académicos más antiguos le propusieron presidir la Academia, me vino a ver a mi despacho y me propuso ser el nuevo Secretario. La fuerza que contagiaba una persona como él, a sus casi 80 años entonces, me impresionó y acepté. Jamás me arrepentí, a pesar del trabajo que me cayó encima. Porque él daba ejemplo ocupándose de que todo funcionase. Por eso no voy a escribir aquí sobre sus otras múltiples facetas. Sólo sobre su labor de presidente, que creo que fue una de las más gratificantes de su vida.

Como ya he dicho, tomó una Academia reducida a media docena de Académicos Numerarios y una decena más de Académicos Electos que demoraban largamente su Discurso de Ingreso y se impuso la (ingente) labor de perseguir, tenaz y amablemente, a los Electos bajo la “amenaza” de cancelar su nombramiento. Paralelamente empezó a realizar otras varias labores: convocar varias Sesiones al año para planificar actividades, resucitar los Premios de Investigación de la Academia, cambiar la orientación de éstos para darles mayor interés científico, impulsar la Revista y la Colección de Monografías, organizar Ciclos de Conferencias, coordinar esfuerzos con la Facultad de Ciencias colaborando con los sucesivos Decanos, promover el nombramiento de nuevos Académicos Electos a los que volvía a pedir, machacona pero agradablemente, que escribieran sus Discursos en el plazo de un año,.... En fin, conseguir que la Academia tenga actualmente casi cuarenta académicos, el máximo posible según Estatutos, más que duplicando su máximo histórico desde 1916 y mantenga un nivel de actividades que nunca había tenido.

Cabe recordar también la constante labor del Profesor D. Rafael Cid como Académico Editor de la Revista durante muchísimos años. Entre las labores que se impuso Horacio al ser nombrado Presidente estaba la de clarificar si en el pasado se le había concedido a la

Academia el título de Real o no, puesto que aparecía en los documentos indistintamente con él o no, resultando en una nueva solicitud (reiterando la acordada en 1916), tras la que se consiguió de S.M. el Rey dicho título, para su satisfacción.

Los años iban pasando y la edad iba minando físicamente su cuerpo. Sin embargo su mente seguía siendo clarísima, como para llevar a sus noventa años en la cabeza hasta el menor detalle relacionado con la Academia. Como Secretario nos reuníamos un par de veces a la semana al menos, y para mí era un rato de lo más placentero, disfrutando de su socarronería, que usaba para sí tanto como para los demás, y su humor tan próximo al mío. Y creo que él también disfrutaba tanto como yo, sintiéndose útil hasta el último día.

Por tanto, puedo decir que aunque lo traté íntimamente sólo en sus últimos doce años, lo hice en uno de los aspectos en que más disfrutó y se sintió reconocido. Por eso concluyo diciendo: Gracias Horacio, en nombre de la Academia y en el mío propio, por la labor realizada, y gracias por el tiempo que compartimos en todos estos doce años.

LUIS JOAQUÍN BOYA

Presidente de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza

Entre los años 1953 y 1958 cursé Ciencias Físicas en el Viejo edificio de la Plaza de Paraíso. En Biología, en el primer curso, tuve de profesores a D. Cruz RODRÍGUEZ MUÑOZ y a D. Horacio MARCO MOLL. Tuvieron una enorme influencia sobre mí los dos, hasta el punto que mi afición a la Biología vino de entonces, y he hecho (de joven) incluso algún pinito, sólo o con mi hija Patricia, bióloga “profesional”. Pertenezco al ISSOL, la Sociedad para el Estudio del Origen de la Vida, donde conocí y traté a Juan Oró y otras eminentes (M. Eigen, por ejemplo); también mi discurso de entrada en esta Academia versó sobre ese tema: *Origen de la Vida y Evolución de la Primeras Formas Vivientes*. Tuve el honor de que me contestase el propio Horacio (Noviembre, 1996), y que mi número de académico sea el 18, que anteriormente llevó D. Francisco Grande Covián.

Recuerdo en especial de Horacio su porte elegante, su distinción, su pequeña chulería madrileña, una personalidad cautivadora, sin duda. Destacó desde el principio en sus enseñanzas lo que hoy día es la Biología Molecular, aunque el término no existía aún. Todavía recuerdo su clasificación de los aminoácidos (¿eran ya veinte?), según los restos nitrogenados o alcohólicos; recuerdo hablarnos de nucleótidos, pero no puede ser aun de la doble hélice, descubierta ese mismo año, en la primavera de 1.953. Mientras D. Cruz resaltaba la biología evolutiva y comparativa, desde los virus al hombre, nos abría hacia los libros en inglés, etc., Horacio por su parte miraba por dentro la constitución química de los seres, y las consecuencias de la Bioquímica en los fenómenos netamente biológicos; sí recuerdo alguna cosa en común de los dos: la atracción por los cromosomas, y por ponerlos de relieve mediante tinciones, etc; parece ser que en eso Horacio fue un pionero nacional. En resumen, que fue un curso inolvidable para mí.

La figura de Horacio como Presidente de la Academia ha sido recordada aquí por voces más autorizadas, y poco puedo añadir. Sí contarles, brevemente, algunas preocupaciones de Horacio que la Academia en su actual situación debe, creo yo, tener en cuenta. Horacio y yo hablábamos una o dos veces por semana, de todo lo divino y lo humano, pero sobre todo de sus preocupaciones por la Academia. Me hablaba él de completar la lista hasta cuarenta académicos (diez por sección), de estudiar el desglose entre Biología y Geología, ... y también de cosas más importantes: de la responsabilidad de la Academia para con la Sociedad Aragonesa y como fuente de divulgación de la ciencia y de la cultura superior en general. Decía que Aragón es grande en extensión, no es sólo la capital, Zaragoza, hay que llevar la llama de la cultura a los pueblos aragoneses.

Horacio aprendió que las conferencias “de gran público” requieren preparación minuciosa y elección de temas atractivos; durante su Presidencia se han organizado cinco ciclos

de conferencias, todos ellos en estrecha colaboración con la Facultad de Ciencias. El ciclo del curso pasado, sobre Biología del Medio Ambiente en Aragón fue concebido por él, con la elección de los conferenciantes inclusive; lástima que no lo vio terminar.

Pero su Obra está ahí, y es cuestión nuestra el continuarla; es un reto que tenemos; la Academia de Ciencias de Zaragoza cumplirá pronto 100 años, es una de las más antiguas de España en su especialidad, y tuvo entre sus miembros correspondientes a Albert Einstein, quien nos visitó en 1923. Que nosotros, los continuadores, seamos dignos sucesores de los Zoel García Galdeano, Antonio de Gregorio Rocasolano, Gonzalo Calamita y Paulino Savirón, y tantos otros.

Quiero terminar mi intervención recordando a los familiares de Horacio, aquí presentes, y en especial tener un pequeño recuerdo para su viuda. Muchas gracias.

**ACTIVIDADES DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS, QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA
EN EL AÑO 2008**

Sesiones:

En el año 2008 la Real Academia de Ciencias de Zaragoza celebró ocho Sesiones. De ellas cuatro fueron Ordinarias y cuatro Extraordinarias, dos con motivo de Discursos de Ingreso de nuevos Académicos Numerarios, una de Entrega de Premios de Investigación y una de Homenaje Póstumo al anterior Presidente D. Horacio Marco. Las Ordinarias tuvieron lugar los días 13 de febrero, 10 de abril, 20 de mayo y 25 de septiembre.

La Extraordinarias tuvieron lugar en las fechas que se indican

- 14/2/2008. Discurso del Académico Numerario Ilmo. Sr. D. Fernando Solsona Motrel: *La Física también cura*. Le respondió en nombre de la Academia el Ilmo. Sr. D. Luis Joaquín Boya Balet.
- 3/3/2008. Lectura por el Académico Numerario Ilmo. Sr. D Mariano Gasca Numerario a título póstumo. del Discurso del Académico Ilmo. Sr. D. Miguel San Miguel Marco. *Bolas y urnas: la urna de Polya*. Respondió en nombre de la Academia también el Ilmo. Sr. D. Mariano Gasca.
- 15/10/2008. Entrega de Premios de Investigación 2006-2007.
- 28/10/2008. Sesión Homenaje al fallecido Presidente Excmo. Sr. D. Horacio Marco

Además el 17 de octubre se realizó una Sesión conjunta de las cuatro Academias aragonesas (Ciencias, Medicina, Jurisprudencia y Bellas Artes).

Nuevos Académicos Numerarios:

- Ilmo Sr. D. Fernando Solsona Motrel, Académico Numerario (Sección de Físicas) con la Medalla Nº 23.
- Ilmo. Sr. D. Miguel San Miguel Marco, Académico Numerario (Sección de Exactas, a título póstumo) con la Medalla Nº 4.

Nuevo Académico Electo:

- Ilmo. Sr. D. Rafael Navarro Linares, Académico Numerario (Sección de Físicas).

Baja de Académicos Numerarios:

- Ilmo. Sr. D. Miguel San Miguel Marco (Sección de Exactas), fallecido en julio de 2007, nombrado Académico Numerario.a título póstumo en 2008.
- Excmo. Sr. D. Horacio Marco Moll, Presidente de la Academia y Académico Numerario (Sección Naturales), medalla Nº 21.

Nuevos Académicos Correspondientes:

- Ilmo.Sr. D. José María Ordovás (Sección de Químicas)
- Ilma. Sra. Doña Carmen Claver (Sección de Químicas)
- Ilmo.Sr. D. José Adolfo de Azcárraga (Sección de Físicas)
- Ilmo.Sr. D. Albert Figueras (Sección de Físicas)
- Ilmo.Sr. D. Fernando María de Legarda (Sección de Físicas)
- Ilmo.Sr. D. Javier Llorca (Sección de Físicas)

Publicaciones de la Academia:

- Los dos Discursos de Ingreso citados en el apartado de Sesiones.
- Volumen 63 de la Revista de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza.

Organización de Congresos y Conferencias:

La Academia ha colaborado en 2008 en la organización de los siguientes eventos:

- Se ha finalizado un Ciclo de Conferencias sobre Biología en colaboración con la Facultad de Ciencias. En él se han impartido en 2008 las siguientes conferencias:
 1. D. Juan Pablo MARTÍNEZ RICA, “*Biodiversidad Pirenaica*”
 2. D. Adolfo ARAGÜES, “*La ornitología en Aragón*”
 3. D. José María ORDOVÁS, “*Nutrogenómica*”
 4. D. Patrick FITZE, “*Herpetología española*”

- También se ha colaborado en la organización del Ciclo de Conferencias *Cita con la Ciencia-Espacio Facultad 2007-2008* en la Facultad de Ciencias.
- Así mismo, en colaboración con la Facultad de Ciencias se ha comenzado un ciclo sobre *2009 Año de la Tierra* habiéndose impartido estas conferencias:
 1. Dña. Gloria CUENCA, *Lecciones de Atapuerca*
 2. D. Eustoquio MOLINA, *Paleontología y Extinciones*
- La Academia ha colaborado en 2008 en la organización de las V Jornadas sobre Calidad en el Control de la Radiactividad Ambiental que tuvieron lugar en Jaca (Huesca) del 27 al 30 de mayo. El presidente del Comité Organizador fue el Académico D. Rafael Núñez-Lagos Roglá.
- También ha colaborado con el Depto. de Matemática Aplicada de la Universidad de Zaragoza en la organización de las *X Jornadas Zaragoza-Pau de Matemática Aplicada y Estadística* celebrado en septiembre de 2008 en Jaca.
- La Academia colabora en la organización del **Taller de Talento Matemático** que, con objeto de promover el descubrimiento de habilidades matemáticas en niños y niñas, tiene lugar anualmente bajo la dirección del Académico D. Alberto Elduque.

Dentro de la habitual participación de Académicos en numerosos Congresos nacionales e internacionales, y en conferencias en el ámbito de la difusión de la ciencia, cabe destacar las siguientes actuaciones.

- El Prof. Rafael Núñez-Lagos Roglá presidió la Delegación Española en la *XXIX Asamblea General del Comité Internacional de la Ciencia (ICSU)* celebrada en Maputo (Mozambique) del 20 al 24 de octubre de 2008.
- El Dr. Mariano Gasca fue conferenciante invitado plenario en las *X Jornadas Zaragoza-Pau de Matemática Aplicada y Estadística* celebradas en septiembre de 2008 en Jaca.
- El Dr. Núñez-Lagos Roglá fue conferenciante invitado en el *IUMA Day on Special Functions and Physical Models*, que tuvo lugar en Zaragoza, el 12 de junio de 2008.
- El Dr. Manuel Doblaré fue elegido Académico Numerario de la Real Academia de Ingeniería.
- El Dr. Eladio Liñán fue co-organizador de la *IV International Trilobite Conference* celebrada en mayo en Toledo y lideró la excursión post-congreso de tres días al yacimiento de Murero (Zaragoza).

- El Dr. Antonio Elipe fue conferenciante invitado en el *VI Congreso Venezolano de Física*. celebrado en Mérida, Venezuela en marzo de 2008; en el *4th International Workshop “Spaceflight Dynamics and Control”* celebrado en Covilhã, Portugal en octubre de 2008 y en el *2008 Brazilian Orbital Dynamic Colloquium*, celebrado en Aguas do Lindoia, Brasil en noviembre de 2008.
- Varios Académicos colaboran con cursos propios en la *Universidad de la Experiencia* que organiza la Universidad de Zaragoza.

Premios de investigación 2007

Se convocaron los Premios de Investigación 2007-2008 de la Academia correspondientes a las secciones de Exactas y Físicas, de acuerdo con las nuevas bases . En la primera el Premio fue para el Dr. D. José Miguel Carnicer, del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Zaragoza. El segundo para la Dra.. María Luisa Sarsa, del Departamento de Física Teórica de la Universidad de Zaragoza. Los premiados expusieron sendos trabajos de investigación en la Sesión Extraordinaria de la Academia celebrada el 17 de octubre en la que recibieron el Premio, con los títulos respectivos de *Interpolation and reconstruction of curves and surfaces* y *Dos décadas de materia oscura en el laboratorio subterráneo de Canfranc*, que se publican en el volumen 63 de la Revista de la Academia.

Se ha iniciado el proceso para los Premios 2008-2009 en las Secciones de Químicas y Naturales.

Distinciones y Nombramientos a Académicos.

El Académico D. Luis Oro ha sido nombrado Presidente de la Asociación Europea de Ciencias Químicas y Moleculares (EuCheMS).

Otros datos.

La Real Academia de Ciencias de Zaragoza ha sido subvencionada por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del programa de apoyo a las Reales Academias asociadas al Instituto de España, siendo la subvención para 2008 de 7200 euros, considerablemente inferior a la de años anteriores. Así mismo recibió una subvención extraordinaria de la Dirección General de Investigación y Desarrollo del Gobierno de Aragón

Se ha continuado poniendo al día la página web de la Academia, cuya dirección es <http://www.unizar.es/acz/>

Zaragoza, diciembre de 2008

REVISTA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA

Abstract

La Revista de la Real Academia de Ciencias publishes original research contributions in the fields of Mathematics, Physics, Chemistry and Natural Sciences. All the manuscripts are peer reviewed in order to assess the quality of the work. On the basis of the referee's report, the Editors will take the decision either to publish the work (directly or with modifications), or to reject the manuscript.

1 Normas generales de publicación

1.1 Envío de los manuscritos.

Para su publicación en esta Revista, los trabajos deberán remitirse a

Académico-Director de Publicaciones
Revista de la Academia de Ciencias
Universidad de Zaragoza
50009 Zaragoza

o bien electrónicamente a la cuenta `elipe@unizar.es`.

La Revista utiliza el sistema de *offset* de edición, empleando el texto electrónico facilitado por los autores, que deberán cuidar al máximo su confección, siguiendo las normas que aquí aparecen.

Los autores emplearán un procesador de texto. Se recomienda el uso de LaTeX, para el que se han diseñado los estilos `academia.sty` y `academia.cls` que pueden obtenerse directamente por internet en <http://www.unizar.es/acz/> o por petición a la cuenta de correo electrónico: `elipe@unizar.es`.

1.2 Dimensiones

El texto de los trabajos, redactados en español, inglés o francés, no deberá exceder de 16 páginas, aunque se recomienda una extensión de 6 a 10 páginas como promedio. El texto de cada página ocupará una caja de 16 × 25 cm., con espacio y medio entre líneas.

2 Presentación del trabajo.

Los trabajos se presentarán con arreglo al siguiente orden: En la primera página se incluirán los siguientes datos:

- a) *Título del trabajo*: Conciso, pero ilustrativo, con mayúsculas.
- b) *Autor*: Nombre y apellidos del autor o autores, con minúscula.
- c) *Centro*: Centro donde se ha realizado, con su dirección postal.
- d) *Abstract*: En inglés y con una extensión máxima de 200 palabras.
- e) *Texto*

A) Los encabezamientos de cada sección, numerados correlativamente, serán escritos con letras **minúsculas** en negrita. Los encabezamientos de subsecciones, numerados en la forma 1.1, 1.2, ..., 2.1, 2.2, ..., se escribirán en cursiva.

B) Las fórmulas estarán centradas y numeradas correlativamente.

C) Las referencias bibliográficas intercaladas en el texto, deben ser fácilmente identificables en la lista de refencias que aparecerá al final del artículo, bien mediante un número, bien mediante el nombre del autor y año de publicación.

D) Las figuras y tablas, numeradas correlativamente, se intercalarán en el texto. Las figuras se enviarán en formato EPS, o que se pueda convertir a éste con facilidad. Los apéndices, si los hay, se incluirán al final del texto, antes de la bibliografía.

G) Las referencias bibliográficas de artículos deberán contener: Autor: año de publicación, “Título del artículo”, revista **número**, páginas inicial–final. En el caso de libros, deberá incluirse: Autor: año de publicación, *Título del libro*. Editorial, lugar de publicación.

3 Notas finales

Por cada trabajo publicado, se entregarán al autor o autores un total de 25 separatas. La Revista permite la inclusión de fotografías o figuras en color, con un coste adicional que correrá a cargo de los autores.

Antonio Elipe
Académico Editor

RELACIÓN DE REVISTAS NACIONALES QUE RECIBE EN INTERCAMBIO
LA BIBLIOTECA DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS

ACTA BOTANICA BARCINONENSIS
ACTA QUIMICA COMPOSTELANA - Departamento de Química Analítica
AFINIDAD - Revista Química Teórica y Aplicada
ANALES DE BIOLOGIA - Sección de Biología General (Murcia)
ANALES DEL JARDIN BOTANICO DE MADRID
ANALES DE LA REAL ACADEMIA DE DOCTORES
ANALES DE LA UNIVERSIDAD DE MURCIA
ANALES DE CIENCIAS - Facultad de Ciencias (Químicas y Matemáticas) (Murcia)
ANALES SECCION DE CIENCIAS - Colegio Universitario de Girona
ANUARIO DEL OBSERVATORIO ASTRONOMICO - Madrid.
BELARRA. SOCIEDAD MICOLOGICA. Baracaldo.
BLANCOANA - Col. Univ. "Santo Reino" Jaén
BOLETIN DA ACADEMIA GALEGA DE CIENCIAS - (Santiago de Compostela)
BOLETIN DE LA ASOCIACION HERPETOLOGICA ESPAÑOLA
BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO
BOTANICA COMPLUTENSIS - Madrid
BUTLLETI DEL CENTRO D'HISTORIA NATURAL DE LA CONCA DE BARBARA
COLLECTANEA BOTANICA - (Barcelona)
COLLECTANEA MATEMATICA - (Barcelona)
ESTUDIO GENERAL - Revista Colegio Universitario (Girona)
EXTRACTA MATHEMATICAE - Universidad de Extremadura
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES DE JAEN. Monografías.
FOLIA BOTANICA MISCELLANEA - Departamento de Botánica (Barcelona)
GACETA DE LA REAL SOCIEDAD MATEMÁTICA ESPAÑOLA
INDICE ESPAÑOL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA -
INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA
INVESTIGACION E INFORMACION TEXTIL Y DE TENSIOACTIVIVOS (C.S.I.C.)
- Barcelona
LACTARIUS.- BOL. DE LA ASOCIACION MICOLOGICA - Jaen
LUCAS MALLADA - Inst. Est. Altoaragoneses.

MEMORIAS DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Y ARTES DE BARCELONA
MISCELLANEA ZOOLOGICA - Museo Zoológico - Ayuntamiento de Barcelona
NATURALIA BAETICA - Jaen
PIRINEOS
PUBLICACIONES PERIODICAS DE LA BIBLIOTECA DEL MUSEU DE ZOOLOGIA
- (Barcelona)
REBOLL.- Bull. Centro d'Historia Natural de la Concha de Barbera.
REVISTA DE LA ACADEMIA CANARIA DE CIENCIAS
REVISTA REAL ACADEMIA GALEGA DE CIENCIAS
REVISTA DE BIOLOGIA DE LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO
REVISTA ESPAÑOLA DE FÍSICA
REVISTA ESPAÑOLA DE FISIOLOGIA - Pamplona
REVISTA ESPAÑOLA DE HERPETOLOGIA
REVISTA IBERICA DE PARASITOLOGIA
REVISTA MATEMATICA COMPLUTENSE - (Madrid)
REVISTA DE OBRAS PUBLICAS
REVISTA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES DE MADRID – Matemáticas
REVISTA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS - QUIMICA - Madrid
RUIZIA - Monograffías del Jardín Botánico (Madrid)
SCIENCIA GERUNDENSIS
STUDIA GEOLOGICA SALMANTICENSE - Universidad de Salamanca
TRABAJOS DE GEOLOGIA - Universidad de Oviedo
TREBALLS DEL CENTRE D'HISTORIA NATURAL DE LA CONCA DE BARBERA.
TREBALLS DE L'INSTITUT BOTANIC DE BARCELONA
TREBALLS DEL MUSEU DE ZOOLOGIA DE BARCELONA
ZOOLOGIA BAETICA. UNIVERSIDAD DE GRANADA.

RELACIÓN DE REVISTAS INTERNACIONALES QUE RECIBE EN
INTERCAMBIO LA BIBLIOTECA DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS

ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS - Córdoba. Argentina
ACADEMY OF NATURAL SCIENCES OF PHILADELFIA
ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCIEI - Notiziario
ACCADEMIA UDINESE DI SCIENZI LETTERS ED ARTI.
ACTA ENTOMOLOGICA MUSEI NATIONALIS PRAGAE
ACTA FAUNISTICA ENTOMOLOGICA MUSEI NATIONALIS - Pragae
ACTA GEOLOGICA POLONICA - Warszawa
ACTA MATHEMATICA HUNGARICA
ACTA MATEMATICA SINICA - New Series China
ACTA MUSEI NATIONALI PRAGAE
ACTA ORNITHOLOGICA - Polska Akademia Nauk Warszawa
ACTA PHYSICA - Academia Scientarum Hungaricae
ACTA SOCIETATIS ENTOMOLOGICA BOHEMOSLOVACA
ACTA UNIVERSITATIS - Series: Mathematics and Informatic – University of Nis –
Yugoslavia
ACTA ZOOLOGICA FENNICA
AGRONOMIA LUSITANICA - Est. Agr. Nac. Sacavem - Portugal
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
ANALES DE LA ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y
NATURALES DE BUENOS AIRES
ANALES DE LA ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLOGICAS. México
ANALES DE LA SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA
ANALES DE LA ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLOGICAS - México
ANIMAL BIODIVERSITY CONSERVATION
ANNALEN DES NATURHISTORICHEN MUSEUMS IN WIEN
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAЕ - Serie A - I Matematica - Helsinki
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAЕ - Serie A - II Chemica - Helsinki
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAЕ - III Geologica Geografica - Helsinki
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAЕ - Serie A - IV Physica - Helsinki
ANNALES HISTORICO NATURALES - Musei Nationalis Hungarici

ANNALES DE L'INSTITUT FOURIER - Université de Grenoble
ANNALES DE L'INSTITUT FOURIER - Gap
ANNALES DE LA SOCIETE SCIENTIFIQUE - Serie I - Science Mathematiques Physiques
Bruxelles
ANNALES UNIVERSITATIS MARIA CURIE - Sectio A Mathemat. - Sklodowska
ANNALES UNIVERSITATIS MARIA CURIE - Sklodowska - Sectio AA Chemica. Lublin.
ANNALES UNIVERSITATIS MARIA CURIE - Sklodowska - Sectio AAA Physica. Lublin.
ANNALES ZOOLOGICI FENNICI - Helsinki
ANNALI DELLA FACOLTA DE AGRARIA - Universita de Pisa
ANNALI DEL MUSEO CIVICO DI STORIA NATURALE "Giacomo Doria"
ARBOLES Y SEMILLAS DEL NEOTROPICO - Museo Nac. de Costa Rica
ARCHIVIO GEOBOTANICO - Univ de Pavía.
ATTI DELLA ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI. RENDICONTI LINCEI - Matematica e Applicazioni - Roma
ATTI DELLA ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI. RENDICONTI LINCEI - Scienze Fisiche e Naturali - Roma
ATTI DELLA ACCADEMIA DI SCIENZE, LETTERE E ARTI DI UDINE
ATTI DELL'INSTITUTO BOTANICO E DEL LABORATORIO CRITTOGRAMICO
DELL'UNIVERSITA DI PAVIA
BAYERISCHE AKADEMIE DR WISSENSCHAFTEN - Munchen
BEITRAGE ZUR FORSCHUNSTECHOLOGIE - Akademie Verlag Berlin
BOLETIM DA SOCIEDADE PARANAENSE DE MATEMATICAS - Paraná
BOLETIM DA SOCIEDADES PORTUGUESA DE CIENCIAS NATURALES - Lisboa
BOLETIN DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS FISICAS, MATEMATICAS Y
NATURALES - Caracas
BOLETIN DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS - Córdoba. Argentina.
BOLETIN BIBLIOGRAFICO DE LA ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS - México
BOLETIN DEL MUSEO NAC. DE COSTA RICA.
BOLETIN DE LA SOCIEDAD MATEMATICA MEXICANA
BOTANY UNIV. OF CALIFORNIA PUBLICATIONS.
BRENESIA - Museo Nacional de Costa Rica
BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES - Scientific Information - CENTRE MATHEMATICAL AND PHYSICAL SCIENCES
BULGARIAN JOURNAL OF PHYSICS
BULLETIN OF THE AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY - Providence
BULLETIN DE LA CLASSE DE SCIENCES - Academie Royale de Belgique - Bruxelles
BULLETIN OF THE GEOLOGICAL INSTITUTION OF THE UNIVERSITY UPSALA

BULLETIN OF THE JSME (Japan Society of Mechanical Engineers)
BULLETIN DE LA SOCIETE SCIENTIFIQUE DE BRETAGNE - Rennes
CALIFORNIA AGRICULTURE - University of California
CIENCIAS TECNICAS FISICAS Y MATEMATICAS. Academia de Ciencias. Cuba.
COLLOQUIUM MATHEMATICUM - Warszawa
COMMENTATIONES MATHEMATICAES - Ann. So, Mathematicae Polonese
COMPTES RENDUS DE L'ACADEMIE BULGARE DE SCIENCES - Sofia
DARWINIANA REV. INST. BOTANICA DARWINION - República Argentina
DORIANA - Supplementa agli Annali del Museo Civico di Storia Naturale "G. Doria" - Cenova
ESTUDOS, NOTAS E TRABALHOS DO SERVICIO DE FOMENTO MINERO - Portugal
ESTUDOS, NOTAS E TRABALHOS, DIECCIÓN GERAL DE GEOLOGIA E MINAS - Porto
FILOMAT - FACTA UNIVERSITATIS - Univ. af Nis.
FÍSICA DE ONDAS ACÚSTICAS Y ELECTROMAGNÉTICAS LINEALES - Acad. Búlgara de las Ciencias
FOLIA ANATOMICA UNIVERSITATIS CONIMBRIGENSIS - Coimbra
FOLIA ZOOLOGICA - Czechoslovak Academy of Sciences
FUNCTIONS ET APPROXIMATIVE COMMENTARI MATHEMATICI - Poznań
GLASNIK MATEMATICKI - Zagreb
IBC - INFORMAZIONI - Rivista Bimestrale Inst. Beni. Artistic. - Regione Emilia-Romagna
INSTITUTO DE MATEMATICA - Univ. Nac. del Sur - Bahia Blanca - Argentina
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGAÇÃO AGRARIA - Estação AGRONOMICA NACIONAL OEIRAS INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO DE CIENFUEGOS
INTERNATIONAL TIN RESEARCH INSTITUTE
JAHRBUCH DER AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN IN GÖTTINGEN.
JOURNAL OF THE AMERICAN ACADEMY OF ARTS AND SCIENCES - Daedalus
JOURNAL OF THE BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
JOURNAL OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY
JOURNAL OF NON-CRYSTALLINE SOLIDS - Amsterdam
LESTURAS MATEMATICAS - Colombia
MATHEMATICA BALKANICA
MATHEMATICA MONTISNIGRA
MEMORABILIS ZOOLOGICA
MEMORANDA SOCIETATIS PROFAUNA ET FLORA FENNICA - Helsingfors
MEMORIAS DA ACADEMIA DAS CIENCIAS DE LISBOA (Classe de Ciencias)
MITTEILUNGEN AUS DEN ZOOLOGISCHEN MUSEUM IN BERLIN

MONOGRAFIAS DE LA ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES DE BUENOS AIRES
NACHRICHTEN DER AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN IN GUTTINGEN - II
Matemáticas y Física
NATURAL HISTORY MUSEUM UNIV. OF KANSAS.
NEOTROPICO - Museo Nacional de Costa Rica
NETHERLANDS JOURNAL OF ZOOLOGY
NONLINEARITY - Inst. Physics and London Math. Soc
NOTAS DE ALGEBRA Y ANALISIS - Ins. de Matematica - Univ. Atac. del Sur. Bahia Blanca
NOTULAE NATURAE
NUCLEAR ENERGY -Bulgarian Academy of Sciences
OCCASIONAL PAPERS OF THE CALIFORNIA ACADEMY OF SCIENCES - San Francisco
PHILIPPINE JOURNAL OF SCIENCES - Manila
POLISH ACADEMY OF SCIENCES. INSTITUTE OF MATHEMATICA
POLSKA AKADEMIE NAUK-PRACE GEOLOGICZNE
POLSKA AKADEMIE NAUK-PRACE MINERALOGICZNE
PORTUGALIA PHYSICA - Sociedade Portuguesa de Física
PROCEEDINGS OF THE ACADEMY OF NATURAL SCIENCES OF PHILADELPHIA
PROCEEDINGS OF THE CALIFORNIA ACADEMY OF SCIENCES
PROCEEDINGS OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY
PROCEEDINGS OF THE ROCHESTER ACADEMY OF SCIENCES
PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON - A: Mathematical and Physical Sciences
PROCEEDINGS OF THE ROYAL SCOIETY OF EDINBURGH - Section A (Mathematical and Physical Sciences)
PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF QUEENSLAND
PUBLICACIONES FUNDAMENTALES DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE SOFIA
PUBLICATION DE L'INSTITUT DE RECHERCHE MATHEMATIQUE AVANCEE - Strasbourg
PUNIME MATEMATIKE - Prishtine
QUADERNI DELL' ACADEMIA UDINESA.
QUATERLY OF APPLIED MATHEMATICS
REVISTA CUBANA DE FISICA
REVISTA COLOMBIANA DE MATEMATICAS

REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA- Univ. Nal. del Litoral - Argentina

REVISTA TRIMESTRAL DEL INTERNATIONAL TIN RESEARCH INSTITUTE

REVISTA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA - Argentina

REVISTA DE LA UNION MATEMATICA ARGENTINA

REZIMEA ABSTRACTS - POGDORICA

SCIENCE BULLETIN - University of Kansas

SCIENTIFIC PAPERS NAT. HISTORY MUSEUM. The University Kansas.

SEARCH AGRICULTURAL ITHACA NEW YORK

SENCKENBERGIANA BIOLOGICA - Frankfurt

SENCKENBERGIANA LETHAEA - Frankfurt

SMITHSONIAN CONTRIBUTIONS TO PALEONTOLOGY

SPECTRUM - Akademie der Wissenschaften der DDR

STUDIA GEOLOGICA POLONICA - Polska Akademy Nauk Warsovia

SUT JOURNAL OF MATHEMATICS - Science University of Tokio

T. KOSCIUSZKI TECHNICAL - Univesity of Cracow

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA - Notas del museo de la Plata

UNIVESITY OF THE STATE OF NEW YORK - Bulletin

UNIVERSITY OF KANSAS PALEONTOLOGICAL CONTRIBUTIONS

VERTEBRATOLOGICKE ZPRAVY CESKOLOVENSKA AKADEMIE BRNO

ZBORNIK RADOVA FILOZOFSKOG - Fakulteta u Nisu-Serija Matematika

ZBORNIK - Acta Musei Nationalis - Pragae

ZOOLOGICA POLONIAE

ZPRAVY USEB (Vertebralogy zpravy) - Brno - Checoslovaquia