

Universidad de Zaragoza

FACULTAD DE CIENCIAS

MÓDULO EDUCATIVO SOBRE INTERACCIONES
NUCLEARES UTILIZANDO EL ENTORNO
“RESTSOFT”

Autor:

Luis Miguel Tomás Alías

Directora:

Gloria Luzón Marco

Resumen

En el trabajo desarrollado a continuación se expone una página web con fines educativos así como el proceso de su creación y los fundamentos teóricos que hay tras la misma [1]. Esta página se centra en explicar las interacciones nucleares, principalmente aquellas producidas por los neutrones. Para las simulaciones y la comprobación de los resultados se utiliza la herramienta RestSoft.

Summary

In this dissertation, a website with an educational purpose is going to be exhibited as well as its creation process and theoretical fundamentals that are behind it [1]. This webpage will be focused on explaining the nuclear interactions, in particular those that are produced by neutrons. Furthermore, I am going to use the tool RestSoft in order to prove the simulations and the results.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos	2
2. Estructura de la web	3
3. Desarrollo teórico	6
3.1. Introducción	6
3.2. Interacciones radiación-materia	7
3.3. Interacciones de neutrones	8
3.4. Neutrones cósmicos	12
4. Simulaciones	15
4.1. Archivos que usamos	16
4.2. ¿Cómo simulamos?	17
4.3. Resultados	21
5. Conclusiones	22
6. Bibliografía	24
7. Anexo 1	26

1. Introducción

Este proyecto trata de introducir un tema fundamental de la Física Nuclear, las interacciones nucleares, de una forma nueva e innovadora. De este modo se intenta lograr que el alumno adquiera una serie de conocimientos de forma clara y sencilla. Para ello se desarrolla una herramienta de fácil uso que tenga toda la información necesaria para que el alumno pueda avanzar en el aprendizaje de forma escalonada y comprobando su progreso a la vez que va aprendiendo los conceptos básicos de las interacciones nucleares [1].

Se centra en el estudio de aquellas interacciones en las que intervienen neutrones, de modo que la herramienta desarrollada se sustenta inicialmente en una serie de conocimientos teóricos básicos sobre el tema a estudiar que se adquieren de algunos libros y artículos de referencia. [4] [5] [6]

Posteriormente al estudio teórico del tema se han realizado una serie de programas y simulaciones con el entorno RestSoft, de forma que se observa la coherencia existente entre los resultados teóricos y experimentales, además de comprobarse con diversas páginas de datos reales [2].

Finalmente, mediante la herramienta Google Sites se ha realizado una página web que plasma dicha información recogida, de manera que el alumno pueda estudiar fácilmente y disponga en un único lugar de toda la información necesaria para tener un conocimiento mínimo sobre el tema, sin tener que buscar por diversos sitios de internet donde puede existir información contradictoria o incorrecta en ocasiones. El módulo educativo que se ha desarrollado debía tener una estructura clara y ordenada, para lograr que el alumno pudiera realizar su aprendizaje de forma autónoma, marcando él mismo el ritmo de aprendizaje que desee.

En nuestro caso, y mediante una explicación general que después realizaremos más detalladamente, el módulo se estructura en una portada que actúa como página principal, un apartado de teoría, otro de simulaciones, otro con ejercicios de teoría junto con resultados de las simulaciones realizadas, un apartado de aplicaciones y experimentos de neutrones y un cuestionario final de satisfacción.

En la página principal tenemos los objetivos principales que se esperan conseguir en el módulo. En el desarrollo teórico se cuenta con un resumen de la teoría del tema a tratar mediante archivos que no sean muy grandes, de forma que sea un aprendizaje dinámico y que dé al alumno la sensación de estar avanzando. En el apartado de simulaciones tenemos un breve resumen del protocolo a seguir así como de la información básica para ejecutar las simulaciones con el entorno RestSoft desde casa. Están también subidos archivos que tienen ejemplos de materiales que se

pueden utilizar o capturas de los resultados esperados. Todo lo que se encuentra en la página web lo desarrollaremos en mayor profundidad más adelante.

Las ventajas que presenta este método es que al ser individualizado se aprovecha más el tiempo del alumno ya que no tiene que adaptarse al ritmo del profesor, o del resto de sus compañeros y da la posibilidad de liberar el horario haciendo que se pueda trabajar en el momento del día que mejor le venga a cada alumno. Sin embargo, cuando hacemos ese tipo de módulos siempre existe la desventaja de que el alumno necesita también de cierta interacción con el entorno educativo, ya sea en forma de prácticas o de trabajos en grupo que le permitan socializar y aprender mediante el trabajo cooperativo.

Además, en este tipo de módulos es muy difícil determinar tanto el nivel de aprendizaje logrado por el alumno, como el nivel de calidad del curso en cuanto a la enseñanza que se imparte. En resumen, este tipo de métodos son buenos como herramientas complementarias a la enseñanza presencial y facilitan que el alumno se encuentre activo y lleve un ritmo de aprendizaje más dinámico e individualizado que si nos ceñimos únicamente a la enseñanza tradicional en pizarra.

1.1. Motivación y objetivos

Este trabajo busca proporcionar al estudiante de información básica sobre las interacciones de los neutrones de una forma más visual, usando simulaciones para lograr que el alumno llegue a entender el concepto y dejando un poco de lado los desarrollos matemáticos, muchas veces complejos, que impiden en ocasiones que el alumno tenga facilidad a la hora de entender los procesos que ocurren.

Al ser un tema que se introduce en el último año de carrera, principalmente tratado en una asignatura optativa, muchos alumnos pueden verse en la situación de querer complementar y reforzar su aprendizaje mediante el uso de nuevas herramientas que permitan una aproximación a través de experimentos virtuales y ejercicios de ampliación de la teoría. Las limitaciones horarias limitan que esto pueda hacerse durante las horas lectivas.

Se trata de condensar todo el proceso completo de aprendizaje, paso por paso, en un único lugar. De esta forma, el alumno puede adquirir los conocimientos básicos sin tener que buscar por sí mismo en la web, facilitando así el desarrollo del aprendizaje, ya que evita realizar el proceso de cribado de información siempre necesario cuando tratamos con datos obtenidos en la red. El objetivo de este módulo es, en lo referente a la parte teórica, que sea lo más clara y sencilla posible. Intentando lograr que alguien, con un conocimiento no muy amplio sobre el tema, sea capaz de

analizar y entender por sí mismo dicha información sin necesidad de un profesor que le apoye durante el proceso de aprendizaje.

También se busca proporcionar al alumno una página web donde tenga la posibilidad de autogestionar su progreso y donde pueda realizar una autoevaluación de su conocimiento en forma de bloques de diversa dificultad, dependiendo de la profundidad de aprendizaje que busque, de modo que sea él mismo el que conozca su nivel basándose en la resolución de diversos ejercicios programados.

Asimismo la web pretende que el alumno pueda observar ejemplos reales y sus simulaciones aprendiendo a usar la herramienta RestSoft, así como tener acceso a datos reales mediante enlaces adjuntados de fiabilidad anteriormente comprobada. Esta herramienta debe proporcionar cierta información sobre neutrones de diferentes procedencias: neutrones cósmicos o aquellos procedentes de la radiactividad natural, también analizar distintos sistemas de protección ante ellos. Además debe aportar una visión general sobre las diversas aplicaciones y experimentos que existen actualmente en el ámbito de la Física de neutrones. El último propósito de este módulo consiste en servir de modelo para seguir creando nuevos módulos de diversas temáticas dentro del grado de Física para que se logre crear contenido en el que alumnos o incluso gente no asociada a la universidad pueda estudiar libremente o repasar contenido de diversas áreas de la Física contribuyendo así a un aumento general del conocimiento de la misma, algo necesario en la sociedad cada vez más tecnológica en que vivimos y donde la población carece generalmente de conocimientos científicos fundados especialmente en un tema tan controvertido como el de la Física Nuclear.

2. Estructura de la web

El resultado final del trabajo era la creación de la página web sobre interacciones nucleares [1]. La página está distribuida en distintos apartados, cada uno de ellos separado de los demás de modo que para pasar entre apartados tenemos el menú en la parte superior de la página. En cada uno de ellos se encuentran además de varios vídeos o imágenes, diversos documentos realizados por mí, donde se resume y explica la información que se tratará en el módulo, las explicaciones de los recursos que se utilizan, etc...

Comienza con una portada (Figura 1), en la que se encuentra el título del módulo educativo y también resumidos los objetivos que se pretenden conseguir con la página, de este modo el alumno sabe los contenidos que va a tratar y las competencias que debería adquirir al finalizar el módulo. Como hemos señalado antes, en la parte superior de la página se encuentra el menú con cada

apartado, los cuales se aconseja seguir en el orden de aparición, ya que el módulo está pensado para ir guiando al alumno en el aprendizaje. Por ejemplo, no tendría ningún sentido ir al apartado de ejercicios cuando aún no se ha estudiado la teoría relacionada.



Figura 1: Portada web

El primer apartado es el de Teoría (Figura 2), donde he recogido los documentos con la teoría correspondiente al curso. Concretamente, tenemos un documento con información básica sobre las fórmulas o conceptos propios de la interacciones, otro con información referente a la interacción radiación-materia y, finalmente, otro documento que se especializa en los neutrones procedentes de los rayos cósmicos y sus efectos. Así mismo, en la parte inferior de la página tenemos un breve vídeo explicativo de una de las aplicaciones de los neutrones en nuestra vida como forma de ilustrar los usos que tiene esta partícula, en este caso para radiografías.

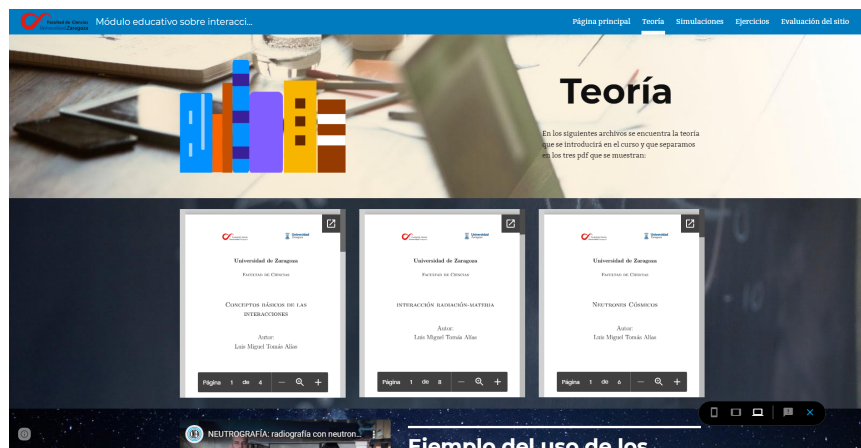


Figura 2: Teoría web

El siguiente apartado es el de las simulaciones (Figura 3), donde he recogido los documentos necesarios para lanzar estas simulaciones y analizarlas, utilizando el entorno RestSoft, así como una explicación detallada de los comandos y pasos necesarios para realizarlas a través del entorno RestSoft de la universidad. También tenemos la guía para el uso de la página con aplicaciones para el estudio de isótopos del Nuclear Data Center, entre las que se encuentran la “sigma”. Esta aplicación usa la base de datos ENDF para evaluar reacciones nucleares y nos permite conocer las secciones eficaces de distintos materiales al lanzar los neutrones [2]. En la parte inferior, hay unos enlaces a guías más detalladas sobre el uso de Root, Rest y Geant4 [8] [10] [11] [12], para aquellos que quieran profundizar en el funcionamiento de estos entornos y aprender más comandos a los básicos que se introducen en el documento.

El entorno RestSoft es un código específico que se encarga de la toma de datos, los análisis de los mismos y la realización de las simulaciones. Geant4 se encarga de llevar a cabo las simulaciones de las diversas interacciones de los materiales con los neutrones u otras partículas y se basa en el lenguaje C++ y en ROOT. La herramienta ROOT se desarrolló en el CERN y es de gran utilidad en el estudio de la física de partículas. Permite la observación de las diversas interacciones así como el manejo de grandes cantidades de datos.

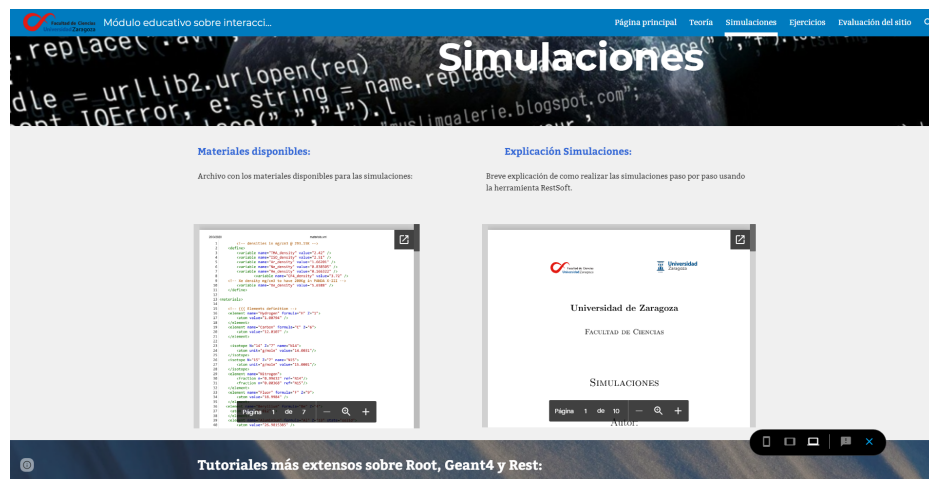


Figura 3: Simulaciones web

En el apartado siguiente (Figura 4) están los ejercicios propuestos por mí para que los alumnos resuelvan a modo de autoevaluación, este documento contiene los problemas con la solución de cada uno, de modo que el alumno sea capaz de trabajar de forma autónoma y realice los problemas previamente a mirar la solución del mismo, de forma que sea consciente de su nivel de asimilación de los conocimientos teóricos. También incluimos un archivo con resultados de las simulaciones a modo ilustrativo, de forma que el alumno tenga una referencia de como deberían verse las gráficas

que estaría obteniendo si hace las simulaciones.

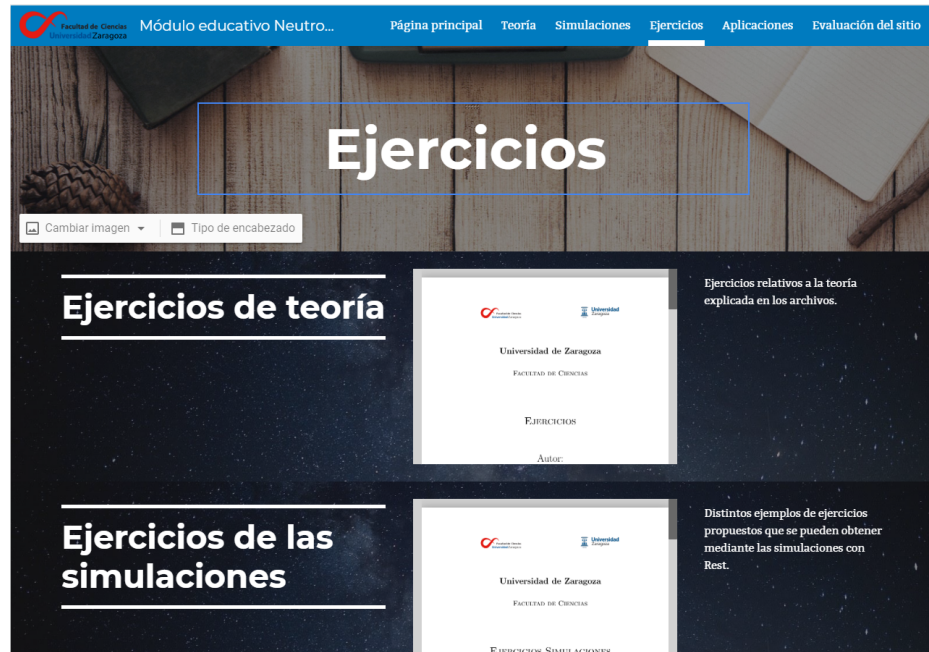


Figura 4: Apartado ejercicios

Hay un apartado de aplicaciones y experimentos que se realizan actualmente con neutrones en diversos centros de investigación y en la industria, de modo que el estudiante puede adquirir información extra sobre la importancia del estudio de los neutrones y las aplicaciones que tiene actualmente su uso en numerosos centros de investigación por todo el mundo.

Finalmente tenemos una pequeña encuesta de evaluación del curso, con el fin de que el alumno puede proponer mejoras así como evaluar la calidad de los contenidos, la organización de la página o si cree que el nivel es el adecuado. Esta es una forma de obtener un feedback para mejorar la web de cara a futuras versiones del módulo o incluso para otros posteriores que se realicen referentes a otras áreas de la física.

3. Desarrollo teórico

3.1. Introducción

Como ya hemos explicado anteriormente, trataremos de estudiar las interacciones nucleares desde un punto de vista teórico haciendo hincapié en aquellas producidas por neutrones. Las radiaciones pueden ser clasificada de muchas maneras atendiendo a diversas propiedades: Ionizante

o no ionizante, natural o artificial, etc...

Como físicos lo que nos interesa estudiar es como interaccionan las partículas al atravesar la materia y la energía que depositan al hacerlo. En concreto, este trabajo detalla los tipos de interacciones existentes de neutrones con la materia, intentamos conocer los parámetros característicos de la radiación así como el estudio teórico de los blindajes que se pueden realizar e introducir algo de información sobre los neutrones cósmicos, que son los más abundantes a nivel de suelo, aunque en un laboratorio subterráneo sólo quedan neutrones provenientes de la radiactividad natural, de menor energía.

A la hora de estudiar las interacciones que cierta partícula tiene, se debe tener en cuenta que nunca podremos afirmar con seguridad que una partícula va a interaccionar de la misma forma al chocar con un átomo, pero podremos usar la probabilidad para saber cuál es la interacción predominante dependiendo de los parámetros que se den. La probabilidad es, por tanto, fundamental a la hora de estudiar cualquier tipo de interacción entre energía y materia, ya que como se observa en la mecánica cuántica nada es absoluto.

3.2. Interacciones radiación-materia

Vemos que hay una gran variedad de posibles interacciones que se pueden separar de varias formas atendiendo a sus características. Algunas de las más importantes son:

- a) Scattering elástico: Es un proceso donde la energía cinética total del sistema permanece constante, esto no implica que no se pueda transferir energía entre la partícula incidente y el objetivo, sino que ninguna de ellas se excita en el proceso.

- b) Scattering inelástico: La partícula incidente cede la suficiente energía para que el átomo golpeado se excite a un estado superior, aunque luego pueda volver al fundamental emitiendo partículas en el proceso. En estos casos la energía cinética no se conserva pero sí la total.

- c) Procesos de creación-aniquilación: Cuando una partícula interacciona con su antipartícula, se puede dar un proceso de aniquilación en el cuál generan nuevas partículas. El ejemplo más conocido es la aniquilación del electrón y el positrón para dar lugar a fotones u otras partículas en el caso de chocar a altas energías. En estos casos siempre debe existir una energía umbral que sea igual a $2mc$, siendo m la masa del electrón, para que se dé el proceso de forma inversa.

- d) Bremsstrahlung: Es el proceso por el cual partículas cargadas van decelerando emitiendo radiación electromagnética, esto puede sucederle a todas las partículas cargadas si tienen suficiente energía conforme atraviesan un medio en el que encuentran una cierta resistencia.
- e) Radiación Cherenkov: La luz no tiene que tener la misma velocidad en todos los medios, sino que dependiendo de la densidad o naturaleza del medio los fotones tendrán diferentes velocidades. En el caso de que en un medio, una partícula cargada de alta energía con masa en reposo distinta de 0 tenga una velocidad que es mayor que la de la luz, emite una radiación llamada de Cherenkov, denominada así por su descubridor. Esta radiación tiene la característica de que se emite en forma de cono, con un ángulo θ que cumple:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n \cdot \beta}$$

donde $\beta = \frac{v}{c}$ y n es el índice de refracción del medio. Del hecho de que el coseno debe ser menor que 1, podemos llegar a la condición de que $\beta > \frac{1}{n}$ o que $v > \frac{c}{n}$.

3.3. Interacciones de neutrones

Comencemos diciendo que los neutrones son partículas subatómicas de masa 939,6 MeV y de carga neta nula. Los neutrones están, sin embargo, compuestos de otras partículas elementales denominadas quarks las cuáles sí que tienen carga, de forma que podemos definir el neutrón como un barión con dos spines down y un spin up lo que logra una carga total nula.

El hecho de que su carga sea nula hace que su forma de interactuar con la materia sea diferente a aquellas partículas cargadas, ya que no interactúa electromagnéticamente sólo lo hace por interacción fuerte. Esta ausencia de interacción electromagnética hace que el neutrón tenga un papel fundamental a la hora de estudiar las interacciones nucleares, ya que no se ve afectado por la barrera de potencial de Coulomb generada por los electrones del exterior del núcleo. Así, incluso neutrones de muy poca energía (como unos pocos eV) son capaces de atravesar la materia y dar lugar a varios tipos de interacciones. Vamos a clasificar los neutrones dependiendo de su energía en varios tipos:

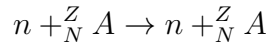
1. Fríos $E \leq 0,003$ eV
2. Térmicos $E \simeq 0,025$ eV
3. Epitérmicos $E \simeq 0,5-100$ eV

4. Intermedios $E \simeq 0,1-200$ KeV
5. Rápidos $E=0,2-10$ MeV
6. Neutrones de alta energía (relativistas) $E \geq 10$ MeV

Conforme el haz de neutrones va atravesando el material, la intensidad del haz decrece de forma exponencial. Las principales interacciones que producen con la materia son:

a) Dispersión

La dispersión elástica es el principal modo de interacción de los neutrones con los núcleos atómicos, en estos procesos el núcleo mantiene el mismo estado que tenía antes de la interacción, sin verse excitado.



Este proceso se puede dar de dos modos distintos: potencial elástico o resonancia elástica.

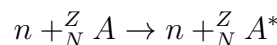
En el caso de interacciones que sufren el potencial elástico hace referencia al proceso en el que el neutrón interacciona en el rango de las fuerzas fuertes del núcleo y se dispersa sin ser absorbido por el núcleo. El neutrón sufre la dispersión producida por la parte real de un potencial (normalmente complejo) que generan los nucleones. Cuando no se produce una transferencia de momento angular entre núcleo y neutrón, la dispersión se considera de onda s , con el número cuántico $l=0$. En este caso, la amplitud de dispersión f_0 es isotrópica y está relacionada con la sección eficaz como:

$$\sigma = 4\pi |f_0|^2 = \frac{4\pi}{k} \sin^2 \delta_0$$

Con $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\mu v}{\hbar}$, con μ la masa reducida de la colisión.

En el modo de resonancia un neutrón con una cantidad determinada de energía es absorbido por el núcleo y se emite otro neutrón, de forma que se cumple la conservación de la energía cinética.

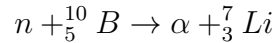
En el caso de dispersión inelástica, el neutrón incidente es absorbido por el núcleo, dando lugar a un nuevo núcleo inestable que queda en un estado excitado tras la colisión. Este nuevo núcleo emite rápidamente un neutrón de baja energía cinética. El estado excitado del núcleo puede regresar al nivel fundamental mediante una o varias reacciones gamma.



b) Transmutación

La transmutación es un proceso en el que se produce un cambio de elemento, neutrones de cualquier energía son capaces de producir transmutaciones.

Ejemplo:

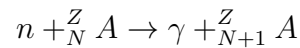


c) Spallation

La spallation hace referencia a la fragmentación de un núcleo en varias partes cuando un neutrón de alta energía choca con él. Este proceso se suele dar para energías de neutrones mayores que 100 MeV. En este tipo de reacciones se pueden separar muchos tipos de partículas distintas dependiendo del núcleo que golpeemos y las características de la colisión. Algunos de estos productos pueden ser inestables. Entonces se hablará de activación cosmogénica, al haber activado isótopos radioactivos.

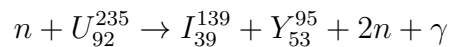
d) Captura radiativa

La captura radiativa es una radiación muy común, un núcleo absorbe el neutrón y va a un estado excitado, para volver al estado fundamental lo que hace es emitir únicamente fotones. Se diferencia de los procesos de dispersión inelástica en que no hay emisión de neutrones secundarios.



e) Reacciones de fisión

Finalmente hablaremos de la fisión, cuando un neutrón lento es capturado por un núcleo pesado, como el uranio 235, lo lleva a un estado excitado. El núcleo entonces se divide en fragmentos, emitiéndose varios neutrones y fotones en el proceso. Un ejemplo de la fisión es la de la reacción del uranio-235:



Sin embargo, este no es el único proceso ya que hay un gran número de fisiones distintas que se pueden dar para cada núcleo.

Esta interacción quizás sea la de mayor importancia porque es la que nos permite generar la energía en las centrales nucleares. En las cuales los neutrones generados en la fisión inicial dan lugar a su vez a nuevas fisiones que producen a su vez más neutrones, logrando así una cadena de reacciones de fisión que es la base de la producción de la energía nuclear. En la fisión se libera una gran cantidad de energía en forma de calor que se convierte en la energía eléctrica.

Este es un proceso que ha sido uno de muchos ejemplos de como la ciencia y el conocimiento pueden usarse para hacer el bien o el mal, ya que además de lograr generar energía también es la base de las bombas atómicas que se usaron durante la segunda guerra mundial.

Los neutrones pueden dar lugar a un gran número de reacciones distintas. La probabilidad de que se dé una reacción u otra viene determinada por el tiempo de vida de cada decaimiento posible, que tiene una fuerte dependencia con la energía del neutrón. La probabilidad total de decaimiento del estado.

$$\Gamma = \Gamma_{n,n} + \Gamma_{n,n'} + \Gamma_{n,\gamma} + \Gamma_{n,p} + \dots$$

Para núcleos ligeros, la dispersión de resonancia es mucho más probable que la captura radiativa, para los núcleos pesados ocurre al revés.

En el caso de tener neutrones térmicos, la mayoría de las reacciones que se dan son de captura (n,γ). A altas energías, este tipo de reacciones de absorción dan lugar a resonancias donde la sección eficaz crece enormemente, fuera de ellas sigue la relación de $\sigma \sim \frac{1}{v}$. Esta fórmula nos dice que cuanto mayor es el tiempo que pase el neutrón en la zona donde puede ser absorbido mayor será la probabilidad de que suceda.

Esta regla se puede obtener de la fórmula de la sección eficaz de Breit-Wigner, la cual dicta que en caso de tener resonancias ampliamente separadas en energía se cumple:

$$\sigma_{CN} = \pi\lambda^2(2l + 1) \frac{\Gamma_n \Gamma}{(E - E_R)^2 + (\frac{\Gamma}{2})^2}$$

Donde λ es la longitud de onda de De Broglie normalizada del neutrón incidente y Γ la anchura parcial y total.

De modo que para un proceso de este tipo $\sigma = \sigma_{CN} \frac{\Gamma_n}{\Gamma}$, lo que a bajas energías resulta en esa

dependencia de $1/v$.

Estos neutrones a los cuales se les reduce la velocidad, se les denominan neutrones moderados y presentarán una mayor actividad al ser más probable su absorción que los neutrones de mayor energía. Para ralentizarlos se puede simplemente usar moderadores como el de parafina. En los choques elásticos, la energía que un neutrón cede al núcleo en el sistema centro de masas viene dada por la expresión $E = \frac{4Mm}{(M+m)^2} \cos\beta$ donde M es la masa del núcleo, m la del neutrón y β el ángulo respecto a la dirección incidente. Así, la cesión es máxima para el caso del hidrógeno, por lo que se utilizan como moderadores materiales ricos en H.

Si suponemos que un material tiene un espesor dx y n átomos por unidad de volumen. Consideremos σ_t la sección eficaz total del mismo, la pérdida de intensidad que sufra el flujo será:

$$dI = -I\sigma_t n dx$$

$$I = I_0 e^{-\sigma_t n x}$$

Esta expresión es válida para neutrones monoenergéticos. En caso de tener un espectro, se debería convolucionar la sección eficaz con el espectro de energía para obtener una sección efectiva.

De la expresión anterior podemos calcular muy fácilmente el espesor necesario para atenuar un cierto porcentaje de electrones, simplemente despejando la x .

$$x = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{\sigma n}$$

3.4. Neutrones cósmicos

Los rayos cósmicos son radiaciones provenientes del espacio exterior que llegan a la tierra. Varios son los fenómenos que causan los rayos cósmicos primarios como las explosiones de supernovas, pulsares, explosiones de núcleos de galaxias... Aunque la mayor parte, por cercanía, son partículas provenientes del Sol.

Como he mencionado la mayor fuente de rayos cósmicos es el Sol, produce la mayor parte de la radiación que llega a la tierra y tiene un ciclo interno de emisión de radiación de unos 11 años. En dicho ciclo puede estar en período de calma, donde la radiación que emite no tiene la energía suficiente para atravesar la atmósfera. Aunque en el período activo del ciclo se pueden producir partículas con energías anormalmente altas que penetran la atmósfera. Sin embargo, a la vez que esto ocurre también se genera, por el viento solar que tiene, un mayor campo magnético que el

usual sobre la tierra. De modo que se aumenta la protección sobre la misma y hace que se reduzca en un 30 % el número de rayos cósmicos que le llegan.

Pero, ¿qué ocurre una vez que atraviesan la atmósfera? En estos casos golpean con casi total seguridad a átomos de las capas externas de la misma, iniciando una cascada de fragmentos nucleares. Debido a que la atmósfera es tan gruesa, las partículas primarias que la atraviesan colisionan muchas veces con otras antes de llegar a la superficie terrestre. En muchas ocasiones no llegan sino que generan mediante estos choques una serie de cascadas de partículas secundarias, hasta que estas u otras generadas posteriormente llegan a la superficie terrestre después de haber realizado otros choques.

Generalmente estas cascadas consisten en piones, muones, electrones, fotones y nucleones, cada una con sus interacciones determinadas. Las podemos clasificar en cascadas hadrónicas y electromagnéticas.

Las cascadas no se van incrementando en intensidad al avanzar atravesando la atmósfera, ya que hay muchos procesos de absorción. La máxima densidad de partículas en la cascada se tiene a unos 15 km de altura, concretamente en el intervalo de entre 10-25 km de altura, zona donde vuelan los aviones comerciales. A nivel de suelo, o cerca, encontramos positrones, electrones y fotones en la cascada electromagnética, neutrones y protones en la hadrónica y una tercera, la muónica, contiene muones y neutrinos. Estas son las partículas finales que impactan contra nosotros o contra los materiales.

La unidad utilizada para medir los efectos de la exposición prolongada a niveles bajos de radiación es el Sievert, que representa la suma de las dosis de radiación absorbidas por diferentes órganos del cuerpo humano, ponderados por el tipo de partícula (mayor peso para partículas alfa y núcleos pesados, neutrones, protones y finalmente fotones y electrones). También es importante la sensibilidad del órgano expuesto a las radiaciones ionizantes.

La cantidad de radiación que sufre una persona, por el hecho de ir en avión por ejemplo, se ha demostrado que es insuficiente para poder decir que se corre un peligro real de daños en el cuerpo humano, aunque si se supera un valor límite del orden de los sievert, podría causar problemas como el cáncer o la infertilidad.

Podemos decir que no existe un riesgo real de problemas de salud en humanos debido a rayos cósmicos salvo que sean situaciones extremadamente raras y, en ningún caso, se podrían dar de forma natural por las condiciones actuales de protección generadas por el campo magnético terrestre.

Los rayos cósmicos cambian su intensidad dependiendo del lugar del planeta en el que te encuentras así como la altura, lo que hoy se conoce con bastante exactitud. El testado de la sensibilidad de los circuitos a los rayos cósmicos debe ser hecho a gran altitud donde los rayos cósmicos tienen 10 veces más probabilidades de afectar al circuito.

Así mismo, como ya habíamos comentado anteriormente, también se conoce con exactitud como varían con el tiempo los rayos cósmicos. Siendo la mayor variación temporal la debida al ciclo solar que varía los “soft error rates” (SER) en un 30%. El blindaje es lo que produce una reducción significativa de estos errores en los circuitos.

La mayoría de neutrones van a través del circuito sin interactuar, pero cuando ocurre hay una probabilidad significativa de que ocurra un fallo en el mismo. Podemos estimar esta probabilidad de interacción de un neutrón energético con un circuito de silicio.

Si suponemos un circuito de unos $10 \mu\text{m}$ tan sólo un neutrón de 40000 que sean cercanos al mismo interaccionaran de forma que puedan causar un error. Sin embargo, los neutrones siguen siendo el mayor problema y causa de los “soft error rates” en circuitos en la actualidad.

Un neutrón que interacciona con la red semiconductor podrá desplazar sus átomos. Esto conduce a un aumento del número de centros de recombinación y a defectos a bajo nivel, reduciendo el tiempo de vida de los portadores minoritarios. Este efecto es mayor en dispositivos bipolares que a los CMOS o FET. Cuando se llega a concentraciones de 10^{10} hasta $10^{11} \frac{\text{neutrones}}{\text{cm}^2}$ se observan cambios en los parámetros de los circuitos de dispositivos bipolares, mientras que los CMOS no son afectados hasta los $10^{15} \frac{\text{neutrones}}{\text{cm}^2}$.

Por la activación de neutrones existe también una probabilidad de generar radiactividad inducida, lo que genera un ruido en los dispositivos astrofísicos de alta energía. La radiación inducida y la residual, procedente de impurezas en los materiales empleados, son las causas principales que afectan a la vida media de los dispositivos. Un ejemplo altamente sensibles a neutrones son los LEDs de GaAs, comunes en optoacopladores

Un flujo de neutrones de energía media (20-100 MeV), causa un 20% de los errores en los SER siendo menor esta cantidad en los CMOS. La intensidad de un neutrón puede cambiar hasta en un factor 3 dependiendo del lugar en el que caiga, esta dependencia del flujo con la posición terrestre es lo que hace difícil conocer con exactitud la probabilidad de que un dispositivo falle en un lugar concreto.

Para proteger los aparatos son muy necesarios los blindajes, la regla práctica general que se debe tener en cuenta para el blindaje de neutrones es que el equilibrio de la energía de estos se consigue y permanece constante después de una o dos longitudes de relajación del material de blindaje. Por lo tanto, para espesores superiores a varias longitudes de relajación, la dosis equivalente fuera del blindaje de hormigón o hierro será atenuada con longitudes de relajación de 120 g/cm^2 o 145 g/cm^2 , respectivamente.

La pérdida de energía de los neutrones por dispersión elástica exige un blindaje hidrogenado para optimizar la transferencia de energía a medida que los neutrones son moderados o frenados. Para energías de neutrones superiores a 10 MeV, los procesos inelásticos son eficaces en la atenuación.

Para predecir la radiación podemos usar los monitores de neutrones. Sirven para dar alertas útiles sobre la llegada masiva a las proximidades de la tierra de partículas de bajas energías (decenas a centenas de MeV) con una antelación de minutos a decenas de minutos, de forma que al contar con una red de estos monitores se puede lograr una alta resolución de datos en tiempo real.

Los datos recogidos permiten calcular la radiación en el entorno espacial, así como a varias altitudes en la atmósfera. También proporcionan información sobre como interaccionan la radiación cósmica de cada tipo con el plasma y los campos magnéticos que protegen la tierra.

4. Simulaciones

El entorno RestSoft, que vamos a usar para realizar las simulaciones, es un software colaborativo creado en la Universidad de Zaragoza en el grupo de Física Nuclear y de Partículas. Es el entorno encargado de realizar las simulaciones que se observan en la página web, así como el análisis de los resultados de las mismas. Usa Geant4 para realizarlas y se basa en el lenguaje de C++ y ROOT.

A continuación, se explica como realizar los códigos necesarios para este trabajo junto con una explicación breve de los archivos que se usan. Si fuera necesario ampliar el conocimiento sobre el programa, se adjunta en la bibliografía así como en la pagina web un enlace al documento que explica de forma completa y detallada el uso de este programa, de las diversas geometrías, materiales, tipos de comandos de ROOT que se pueden usar y su función, etc...

4.1. Archivos que usamos

Los archivos que utilizamos son:

a) Materials:

En este archivo encontramos definidos los elementos así como los materiales que vamos a usar en las simulaciones. No debemos confundir la definición de un elemento con la de un material, ya que lo simulado son distintos materiales que configuran nuestra caja así como el gas de su interior. Estas definiciones son similares a las que utiliza Geant4.

b) Geometry:

Este archivo se describe en un formato GDML. Este lenguaje gráfico puede ser interpretado tanto por Geant4 como por Root y nos permite cambiar la geometría de nuestra simulación [9]. Es aquí donde definimos nuestro mundo, la estructura dentro de él, le decimos desde donde vamos a lanzar los neutrones, el material de nuestra estructura y del gas dentro de ella. Este es el archivo que iremos cambiando cada vez que queramos simular.

c) BasicSim

Es el archivo de simulación. Lo editaremos para darle el nombre que queramos a nuestra simulación e introducir el número de eventos que representar, así como dar la energía de las partículas que vamos a lanzar. En este trabajo usaremos también “virtual wall”, en el que se define la posición, tamaño y rotación de la estructura que usaremos respecto del punto central.

d) BasicSimManager

Es el archivo de análisis de las simulaciones, donde tenemos distintos tipos de observables posibles dependiendo de lo que nos interese. Se puede iniciar mediante el comando “new TBrowser”. Este comando nos permite abrir una ventana que nos da acceso a los distintos observables organizados en las hojas del analysis tree. Las gráficas que se analizan se pueden cambiar en el archivo processes.rml dependiendo de cuales nos interesen en nuestro experimento. Son especialmente importantes las líneas de output e input file, donde deberemos poner el nombre

del archivo que vamos a analizar y el que queremos para el archivo que obtengamos del análisis.

4.2. ¿Cómo simulamos?

Vamos a explicar como realizar paso por paso las simulaciones que se hacen en este trabajo.

Comenzamos entrando en nuestra sesión e iremos usando el comando `cd` hasta el archivo `BasicSim.rml`, para ello seguiremos el path:

BASIC – REST/G4Sim/RML_templates/BasicSim.rml

avanzando de un directorio a otro mediante el comando `cd`, usando el comando `ls` para ver a qué nuevos directorios o archivos podemos acceder cada vez que cambiemos de directorio, así mismo mediante el comando `ls-l` podemos ver alguna información relevante de esos archivos.

Una vez que hemos llegado al directorio donde se encuentra el archivo `BasicSim.rml` usaremos el comando:

gedit BasicSim.rml

El cual nos abrirá una ventana que contendrá el archivo `BasicSim` (Figura 5), en una pestaña arriba nos ofrecerá una opción de `open`, de forma que desde ahí podremos abrir otros archivos interesantes como el de materiales o el de la geometría de la caja que podremos ir cambiando según lo que queramos simular. Una vez acabados los cambios en estos archivos podemos guardar mediante el botón `save`, tras lo que ejecutamos el `BasicSim.rml`.

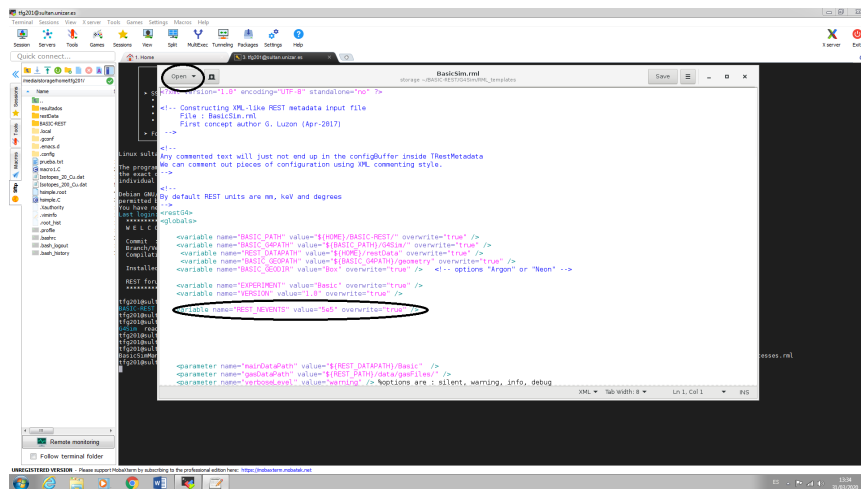


Figura 5: Simulaciones

Como vemos en la imagen anterior, tenemos rodeado donde está la opción de open que nos permite abrir varios archivos al mismo tiempo y también el número de eventos que simulo.

Para ejecutar el archivo una vez cambiados los parámetros a nuestra elección usaremos el comando:

restG4 BasicSim.rml&

Donde el & hace que no se bloquee el terminal al lanzar la simulación. Los resultados de nuestra simulación se guardarán en el directorio que hayamos configurado en el archivo BasicSim.

Tras ello podremos usar el comando:

restRoot

para entrar en Root y poder usar varias funciones que nos sirven para observar los resultados (6).

Un ejemplo sería:

Rest_ViewG4Event("nombre_archivo")

la cual nos permite observar en 3D cada uno de los sucesos que hemos simulado.

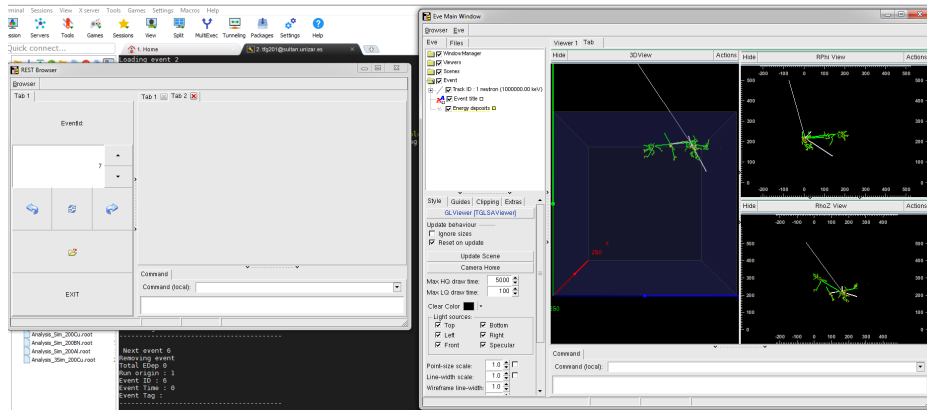


Figura 6: Ejemplo 3D

Si queremos ver distintas gráficas que nos ayuden a interpretar los datos obtenidos usamos el comando:

“newTBrowser”

Esto nos abre una nueva pestaña en la que acceder de nuevo a todos los archivos. Podemos ver que se distribuyen los archivos en arboles, ramas y hojas, de modo que podemos acceder a nuestra

simulación e ir avanzando hasta la rama que nos interese, viendo las distintas gráficas posibles correspondientes a cada parámetro que nos interese (Figura 7). También es posible cambiar el formato en el que vemos la gráfica, la escala de los ejes, etc..

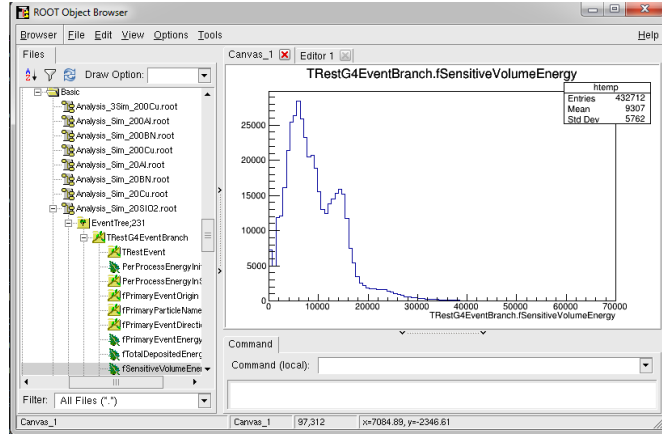


Figura 7: Ventana Análisis

Para analizar los datos de las simulaciones usaremos el archivo BasicSimManager.rml, el cual editaremos previamente incorporando en la línea de output file el nombre del archivo que generamos con los datos analizados y en input file el nombre del archivo de simulación que queremos analizar.

Una vez configurado lo podremos ejecutar con el comando:

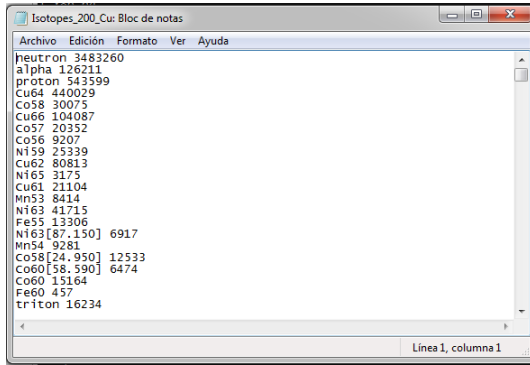
$$restManager -cBasicSimManager.rml\&$$

Si usamos nuevamente el comando new TBrowser tendremos varias gráficas con los datos de la simulación que queremos visualizar como la energía depositada, el número de distintos procesos que se han producido, etc..

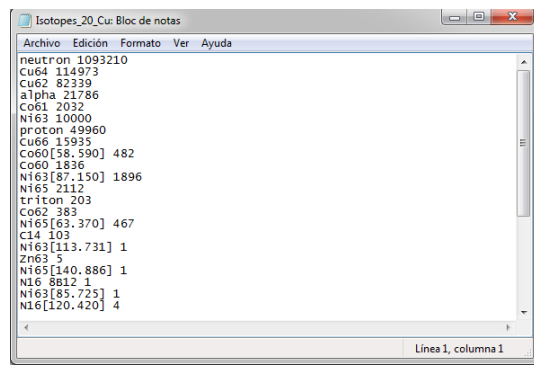
Así mismo otro de los comandos importantes en REST es:

$$REST_ListIsotopes(" ficheroentrada.root, ficherosalida.dat")$$

De esta manera podemos tener en un archivo dat todos los isótopos producidos en la simulación (Figuras 8a 8b), para ver y comprobar posteriormente cuales son estables e inestables. A continuación mostramos las imágenes de los isótopos inestables que se obtienen para el cobre a 200 y 20 Mev respectivamente.



(a) Isótopos 200 MeV Cu



(b) Isótopos 20 MeV Cu

Los núcleos producidos son resultados de los procesos de espallación o de captura. Es muy interesante estudiar aquellos isótopos radioactivos, ya que pueden dar lugar a efectos no deseados en electrónica, o formar fondos de detectores de sucesos raros. Para comparar los resultados obtenidos y estudiar la dependencia de la sección eficaz con la energía del neutrón incidente, así como observar cuáles de los isótopos de cada elemento eran estables o inestables usábamos varias bases de datos [3] [2]. En la imagen siguiente observamos la primera web (Figura 8), que nos proporcionaba la información de los isótopos existentes de cada elemento, cuando seleccionamos un elemento de la tabla periódica se abre una nueva pestaña que incluye información muy útil sobre cada uno sus isótopos, como sus tiempos de vida media o su abundancia.

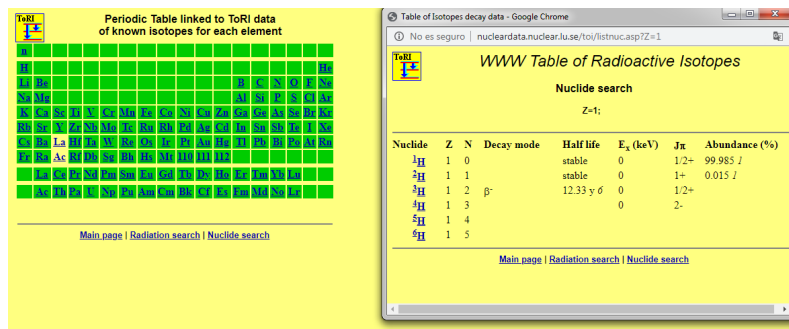


Figura 8: Base de datos isótopos

En la segunda web [2] tenemos acceso a los distintos procesos que puede realizar el elemento de nuestra elección y a las gráficas de las distintas secciones eficaces correspondientes a cada proceso. Podemos juntar varias secciones eficaces en una misma gráfica para poderlas comparar de forma más sencilla (Figura 9).

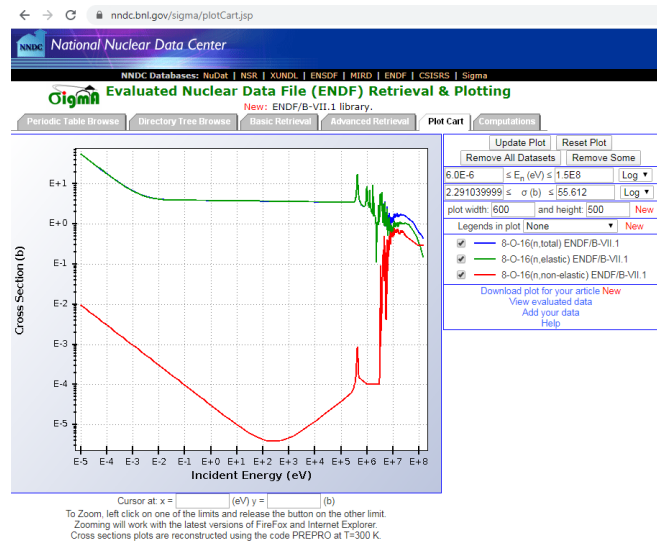


Figura 9: Comparación secciones eficaces

4.3. Resultados

Como ya habíamos dicho anteriormente, el resultado de todo el trabajo se presenta en una web, en la que se encuentran ampliados los conocimientos que se han reflejado en este documento y que resumen los conocimientos básicos de la interacción radiación-materia centrándose en los neutrones e introducen información sobre la radiación y neutrones cósmicos.

Así mismo estos conocimientos básicos se apoyan en un análisis de los procesos e interacciones que se observan en las simulaciones realizadas mediante el entorno RestSoft, herramienta que nos proporciona información sobre los isótopos generados y los procesos que sufren los neutrones al atravesar diversos materiales a distintas energías, así mismo mediante una base de datos se podía ver como eran las secciones eficaces para cada caso en experimentos reales para los distintos materiales.

De este modo he podido comprender y analizar varios de estos procesos y, posteriormente se ha resumido este conocimiento de modo que se enseñara como realizarse si alguien nuevo quisiera realizar dichas simulaciones. Para concluir, se han propuesto una serie de ejercicios que complementen el desarrollo teórico y otros relativos a las simulaciones de modo que el alumno pueda comprobar los conocimientos adquiridos por sí mismo.

Veamos ahora el análisis completo que hemos realizado de un material concreto, de forma que podemos conocer el potencial que tiene esta herramienta para entender la teoría vista sobre neutrones. Comenzamos observando mediante la web [2], la dependencia que presenta la sección

eficaz de cada isótopo respecto a la energía del neutrón incidente de modo que podemos estudiar si se producirán o no las resonancias.

Del mismo modo, mediante la herramienta RestSoft, hemos simulado diversos materiales a los cuales hemos lanzado neutrones a diversas energías y cuyos datos presentamos en el Anexo 1. A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que esa dependencia de los procesos de captura que nombrábamos en la teoría, efectivamente se cumple, cuanto más pesado es el núcleo que bombardeamos mayor es la probabilidad de obtener una captura radiativa que scattering. Así mismo veíamos que para energías de 200 MeV, casi todos los neutrones producían procesos de todos los tipos estudiados. Cuando esa energía bajaba a 20 MeV, ya se observaba como los procesos predominantes eran el efecto fotoeléctrico e interacción Compton, realizados por los fotones que se producían en los choques anteriores. Principalmente se veían los choques inelásticos del neutrón con el átomo lo que ocurre en prácticamente el 100 % de los neutrones que lanzábamos a 20 MeV, los choques elásticos con el núcleo se producían con una probabilidad menor que los inelásticos.

En probabilidad le seguían el Bremsstrahlung y la captura del neutrón. Estas probabilidades se repiten aproximadamente en los diversos materiales con pequeñas variaciones dependiendo de su número atómico o su interacción con los neutrones. En energías mayores también es mucho mayor el número de isótopos producidos, tanto inestables como estables. Esto es lógico ya que a menor energía, les cuesta mucho menos descender su energía hasta el punto de perder esa capacidad de excitar el núcleo. Como recordatorio se incluyen en el Anexo 2, las tablas y gráficas que se han obtenido para un ejemplo concreto en este caso el del aluminio y el cobre a 20 MeV y 200 MeV.

5. Conclusiones

Este trabajo tiene como resultado principal un módulo educativo sobre interacciones nucleares. No propone una solución a un problema de la física sino que su finalidad era introducir a futuros estudiantes al estudio de las interacciones entre radiación y materia, centrándose en aquellas efectuadas por neutrones.

En ese aspecto, se ha elaborado una página web mediante la herramienta de Google Sites que incluye todos los apartados necesarios en un proceso de aprendizaje. Tenemos contenidos teóricos resumidos, así como ejercicios y demostraciones mediante simulaciones de dichos contenidos, los cuáles sirven para ilustrar la teoría vista.

Por otro lado, este tipo de métodos de enseñanza cuentan con ventajas e inconvenientes, por un lado la autonomía del alumnado en el aprendizaje así como la autogestión de su enseñanza, lo que es uno de los aspectos más positivos con este tipo de módulos. El principal inconveniente es la ausencia de un profesor de referencia al que consultar dudas o solicitar una mayor profundización en algunos aspectos. El centrar un TFG en el diseño de un módulo educativo, enfocándose en el desarrollo de competencias y habilidades utilizando Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TICs), es un proyecto bastante innovador en la Facultad de Ciencias. Creo que deberían ser más fomentados ya que es una buena manera de incentivar la introducción a la enseñanza con nuevas tecnologías en el ambiente universitario. Además proporciona a los alumnos que elijan realizar estos TFG una visión de la complejidad que tienen los profesores a la hora de preparar los contenidos para su enseñanza.

En este sentido, a la hora de realizar el proyecto, la recopilación de conocimientos teóricos no ha sido difícil, ya que se contaban con buenos libros de referencia. Ha sido el proceso de cribado de estos conocimientos, qué incluir o no en el módulo, lo más complicado e introducirlo de una forma clara y atractiva para el alumnado, sin dejar de perder la precisión de los contenidos que se tratan.

En mi caso concreto, he adquirido una serie de conocimientos teóricos sobre diversos temas relacionados con neutrones, desde las interacciones que generan en la materia como sus efectos y la energía que depositan sobre la misma. También he estudiado muy superficialmente el ámbito de los rayos cósmicos, para centrarme posteriormente en el estudio de los neutrones cósmicos y su influencia en los errores que pueden producir en circuitos o la protección contra ellos. Aparte me ha ayudado a entender mejor el proceso de elaboración de cualquier documento que esté destinado a la enseñanza como sería una guía docente o, en este caso, un módulo educativo.

Además, en el aspecto de simulaciones, ha servido para que me familiarice con el entorno RestSoft usado por la universidad y para comenzar a utilizar Linux, así como aprender los comandos básicos de Root, Rest y a entender pequeños códigos en Geant4. Esto siempre supone un aliciente, ya que complementa la formación que nos imparten en informática a lo largo de la carrera y que básicamente es programación en C/C++. A su vez se ha dejado la explicación sobre las simulaciones y comandos en la web, lo que podría llegar a ser útil para todo aquel que realice el curso si, en un futuro, pasara RestSoft a ser un software público.

Sin embargo, como he recalado en un párrafo anterior lo difícil no era la recopilación y el estudio de la información o la interpretación de las simulaciones, que es una actividad común en cualquier curso que realizamos a lo largo de la carrera, sino que la gran dificultad era como adaptar toda esa información que tenía sobre estos temas al módulo. No cabe duda de que te-

ner que enseñar algo es una de las mejores formas de aprenderlo tú también, ya que te requiere un gran esfuerzo a la hora de determinar la importancia de cada contenido que vas a añadir al módulo y la forma en que quieres transmitir cada información que das en él. Lo que debía incluir, cómo hacerlo, cuánto extenderme, qué añadir o quitar, si era lo suficientemente interactivo... Eran preguntas frecuentes en el proceso de formación del módulo.

En este sentido, he intentado lograr un módulo que sea ameno y que se aleje de la típica web de física repleta de información teórica pero con poca práctica sobre ella, para buscar un contenido más funcional. Centrando la web más en las simulaciones y en los ejercicios propuestos, buscando aplicaciones interesantes que animen al estudiante a interesarse por el tema más que en lograr un contenido teórico exhaustivo.

Desde mi punto de vista, estaría bien continuar con proyectos de este perfil para poder tener varios módulos como este, que puedan servir para el apoyo docente en varias áreas de la física en un futuro. Así como obtener una verdadera opinión por parte del alumnado sobre si realmente es viable añadir este tipo de módulos como material complementario a aquellas actividades docentes convencionales. Para ello, he añadido al final de la web un cuestionario de satisfacción que sería recomendable rellenar, a fin de mejorar este tipo de módulos en próximas ocasiones.

6. Bibliografía

Referencias

- [1] Luis Miguel Tomás. *Guía educativa de interacciones nucleares*.
URL: <https://sites.google.com/view/modulo-educativo-neutrones>
- [2] National Nuclear Data Center. URL:<https://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl02.jsp>
- [3] S.Y.F.Chu, L.P.Ekström and R.B.Firestone. *The Lund/LBNL Nuclear Data Search*.
URL:<http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/perchart.htm>
- [4] Kenneth S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons (1988), págs 444-477.
- [5] S.N.Ahmed. *Physics & Engineering of Radiation Detection*. Elsevier(2007), págs 1-29, 65-76, 137-148.

- [6] F.A.SMITH.A Primer in Applied Radiation Physics, World Scientific Publishing (2000), págs 121-135.
- [7] J.F.Ziegler.Terrestrial Cosmic Rays. En: IBM J.RES.DEVELOP. VOL.40 NO.1 JANUARY 1996.
- [8] Luis José Sánchez González. Manual Práctico de Linux con Ejercicios (2009).
- [9] CERN. Manual GDML.
URL: <http://lcgapp.cern.ch/project/simu/framework/GDML/doc/GDMLmanual.pdf>
- [10] CERN.ROOT. URL:<https://root.cern.ch/root/html/doc/guides/nbprimer/ROOT-Primer.html>
- [11] J Galan. "REST Framework general description"
URL: <https://sultan.unizar.es/rest/index.html>
- [12] J Galan. "REST Framework . The restG4 package Definning simulation. conditions and geometry".
URL:<https://sultan.unizar.es/rest/index.html>
- [13] http://www01.nmdb.eu/public_outreach/es
- [14] <http://jag.cami.jccbi.gov/cariprofile.asp>
- [15] Laura Marcos. URL:<https://www.muyinteresante.es/ciencia/video/radiacion-cosmica-en-los-aviones-es-peligrosa>
- [16] F.J.Bermejo, F.Fernández-Alonso, F.Sordo, A.Rivera y J.M.Perlado. Inspecciones no destructivas mediante haces de neutrones. En: NUCLEAR ESPAÑA Noviembre 2013.
- [17] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_6.html
- [18] Instituto de Seguridad y Salud en el Trabajo. Gobierno de España
URL:<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+48.+Radiaciones+ionizantes>
- [19] C.Villalobos. Encuesta de satisfacción del cliente: 10 preguntas indispensables.
URL: <https://blog.hubspot.es/service/encuesta-satisfaccion-cliente>
- [20] John R. Lamarsh and Anthony J. Baratta. Introduction to Nuclear Engineering.URL:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/850/A5.pdf?sequence=5>

7. Anexo 1

Realizamos el análisis de los procesos que se observan para dos materiales y para varias energías distintas de los neutrones. En estos casos, se ha usado la misma geometría en forma de cubo y se han lanzado los neutrones desde la misma posición en los dos materiales.

Comenzamos con el cobre:

Cu			
Energía neutrón	0,1 MeV	20 MeV	200 MeV
Fotoeléctrico	0,153	0,971	0,992
Compton	0,153	0,982	0,994
Bremstrahlung	0,111	0,600	0,925
Elástica	0,994	0,855	0,981
Captura	0,156	0,283	0,7405
Inelástica	0	0,992	0,996

Tabla 1: Probabilidades de que al lanzar un neutrón en su recorrido realice, al menos una vez, el proceso mencionado para distintas energías de lanzamiento en el material indicado (Cu)

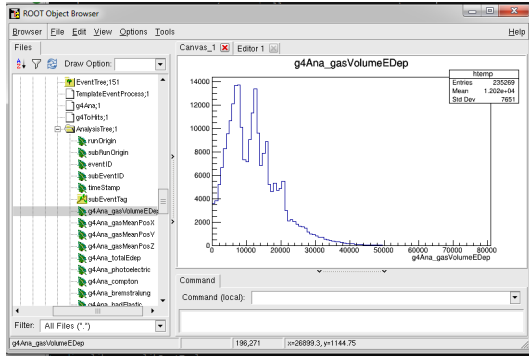
Este análisis lo podemos repetir para un gran número de materiales posibles. Otro ejemplo sería usando aluminio.

Al		
Energía neutrón	20 MeV	200 MeV
Fotoeléctrico	0,900	0,976
Compton	0,962	0,988
Bremstrahlung	0,372	0,806
Elástica	0,814	0,957
Captura	0,048	0,250
Inelástica	0,990	0,997

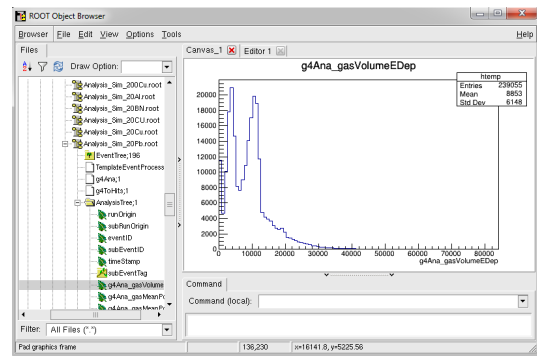
Tabla 2: Tabla comparativa con el Aluminio como material

Estos datos y las conclusiones de ellos se reflejan en el apartado Resultados del documento.

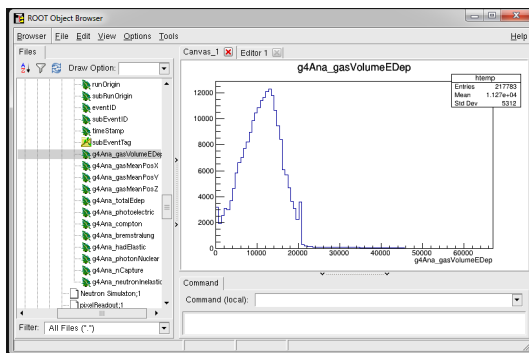
Finalmente, adjunto gráficas de la energía depositada para distintos materiales y energías de lanzamiento.



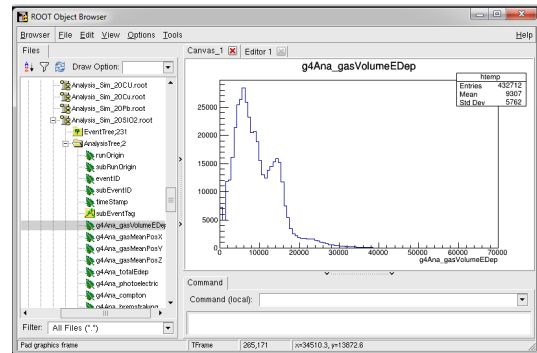
(a) Energía 20 MeV Cu



(b) Energía 20 MeV Pb



(c) Energía 20 MeV BN



(d) Energía 20 MeV SiO2

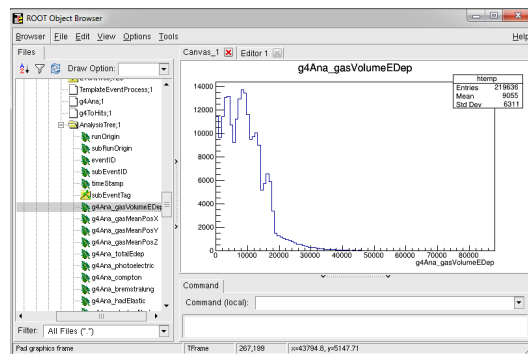


Figura 10: (e) Energía 20 MeV Al

Conocer la energía depositada por los neutrones en cada material nos aporta información de los procesos que habrán sufrido y, por tanto, de como es su interacción con el mismo. También nos sirve para conocer cuánto tardan en detenerse las partículas y así poder estudiar sistemas de protección frente a este tipo de radiación.