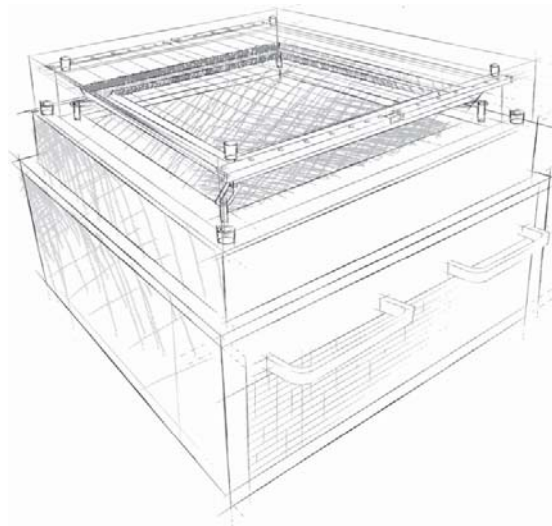


34264-Laboratorio de Física Nuclear y de Partículas

Departament de Física Atòmica, Molecular i Nuclear
Facultat de Física - Universitat de València
☞: Dr Moliner 50, E-46100 Burjassot

Instituto de Física Corpuscular
Parque Científico – Universitat de València
☞: Catedrático José Beltrán 5, E-46980 Paterna

La cámara de niebla de difusión (Diffusion cloud chamber)



Noviembre 2011

Propósito

La cámara de niebla de difusión es un dispositivo único para la visualización de trazas de los distintos tipos de radiaciones, y la identificación de las mismas a partir de las diferencias en su longitud y espesor (densidad de ionización o *stopping power*). Por tanto, la finalidad básica de esta práctica es la de visualizar y diferenciar directamente el rastro de partículas alfa, protones, electrones, fotones e incluso muones, que llegan a la cámara procedentes de los rayos cósmicos o la radiactividad natural terrestre, ilustrando directamente las consecuencias de la fórmula de Bethe-Bloch. La discriminación entre tipos diferentes de radiaciones se aplicará para realizar una medida de la concentración de radón atmosférico. Esta medida nunca antes había sido realizada en una cámara de niebla. Asimismo, se pretende que el alumno conozca la técnica de escaneado de miles y miles de fotografías (en este caso una película) para la búsqueda de sucesos “raros”, técnica que ha conducido a muchos de los grandes descubrimientos en Física de Partículas, como son el descubrimiento de la antimateria (positrón) y del muón, entre otros.

Equipamiento necesario

- Cámara de niebla de difusión PHYWE.
- Una webcam conectada a un ordenador portátil.
- Una fuente de Sr-90.
- Cronómetro.

1.- Introducción

La cámara de niebla de difusión es un detector de partículas que permite la observación directa de las trayectorias de las mismas cuando atraviesan el volumen efectivo de la cámara. Con esta cámara podremos observar diferentes tipos de trazas asociadas a la radiación cósmica y terrestre, así como a fuentes radiactivas artificiales.

La cámara de difusión es una versión mejorada de la cámara de niebla de Wilson. Ambas se basan en el mismo principio: cuando una partícula ionizante pasa a través de una atmósfera de aire sobresaturada de vapor de agua o alcohol, el vapor se condensa en los iones que se forman al paso de la radiación y la traza de la partícula se hace visible.

En la cámara original de Wilson, el aire dentro del dispositivo sellado estaba saturado con vapor de agua, y se usaba un diafragma para expandir el aire dentro de la cámara (expansión adiabática). Esto enfría el aire y el vapor de agua comienza a condensarse alrededor de los iones formados al paso de la radiación. Las diminutas gotas de líquido que se formaban a lo largo de la trayectoria de la radiación podían ser fotografiadas. Si además la cámara está dentro de un campo eléctrico o magnético, las trayectorias aparecen curvadas por dicho campo por lo que es posible conocer la carga de la radiación incidente. Como ejemplos podemos citar el descubrimiento por Anderson del positrón en 1932 y del muon en 1936, utilizando una cámara de niebla en un campo magnético expuesta a los rayos cósmicos (ver Figura 1.1).

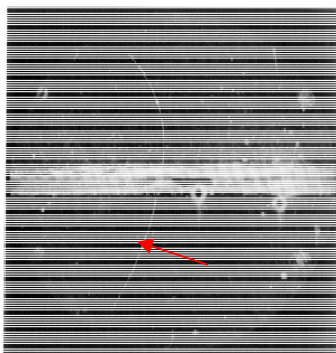


Figura 1.1- Descubrimiento de la antimateria. Traza de un positrón observado por Anderson en 1932. El positrón entra en la cámara por abajo y atraviesa la plancha de plomo central (soporte del imán) perdiendo energía, por lo que su curvatura debida al campo magnético es mayor.

La cámara niebla de difusión se desarrolló en 1936 por Alexander Langsdorf. Esta cámara difiere de la cámara de expansión de Wilson en que es sensible a la radiación de forma continua, ya que no se utiliza la expansión para enfriar, sino que se genera un gradiente térmico enfriando el fondo de la cámara con una máquina refrigerante o con hielo seco, consiguiendo la mezcla sobresaturada en esta parte de la cámara permanentemente.

2.- Descripción de la cámara

La cámara de niebla de difusión del IFIC (Figura 2.1) consta de un zócalo y de una cámara de observación. El zócalo de la cámara contiene la máquina refrigerante, la alimentación eléctrica, el tanque de alcohol y la bomba del alcohol. La cámara de observación se halla encima del zócalo.



Figura 2.1- La cámara de niebla de difusión del IFIC.

La Figura 2.2 muestra una vista esquemática de la cámara. El fondo de la cámara de observación lo constituye una placa metálica maciza negra (superficie 45cm x 45cm) enfriada uniformemente sobre toda la superficie por la máquina refrigerante (aproximadamente -35°C). El techo y las paredes de la cámara de observación están constituidos por dos cubiertas de vidrio superpuestas. Entre las dos cubiertas está dispuesta una redcilla de finos alambres de calefacción, que sirven para calentar esta parte de la cámara (hasta unos $+35^{\circ}\text{C}$ aproximadamente), creando el gradiente de temperatura necesario y evitando que se empañe. Los hilos constituyen asimismo una red de alta tensión para la absorción de iones.

En la parte superior y debajo de la cubierta de vidrio se halla una canaleta calentada eléctricamente, que da la vuelta a toda la cubierta, y dentro de la cual gotea el alcohol isopropilo desde un pequeño surtidor. El alcohol se evapora y se difunde desde la zona superior caliente hacia el fondo frío (por eso se llama cámara de difusión). El alcohol se condensa en el fondo y vuelve al tanque.

Dado que la altura del volumen de observación es de unos 15 cm, el gradiente de temperatura es $\approx 4.7^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Este valor está por encima del umbral de $3.6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ necesario para formar una capa de vapor sobresaturado en la mezcla de aire-alcohol a 1 atm de presión, por encima de la delgada capa de líquido que cubre el fondo. En esta zona únicamente, de espesor ~ 5 mm, las partículas

cargadas provenientes del exterior o del interior de la cámara generan iones a lo largo de sus trayectorias, formando núcleos de condensación alrededor de los cuales aparecen las gotitas del alcohol, formando las trazas de niebla visibles para el observador (Figura 2.3). La longitud y la forma de las trazas permiten estudiar algunas características de las partículas que las originan.

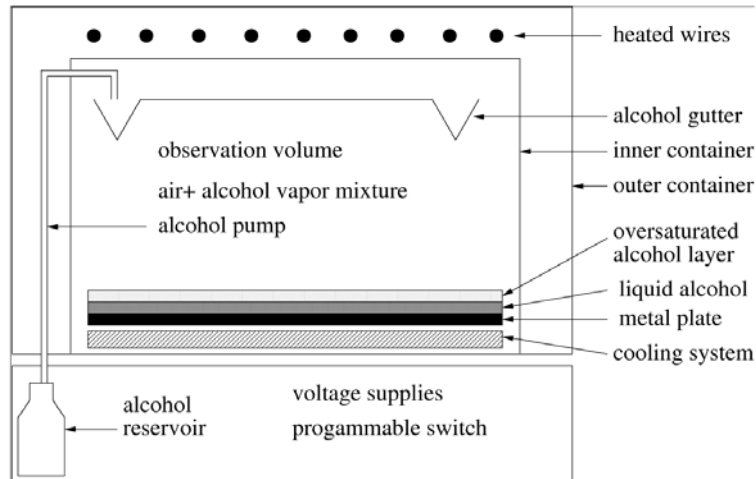


Figura 2.2- Vista esquemática del volumen de observación de la cámara de niebla de difusión.

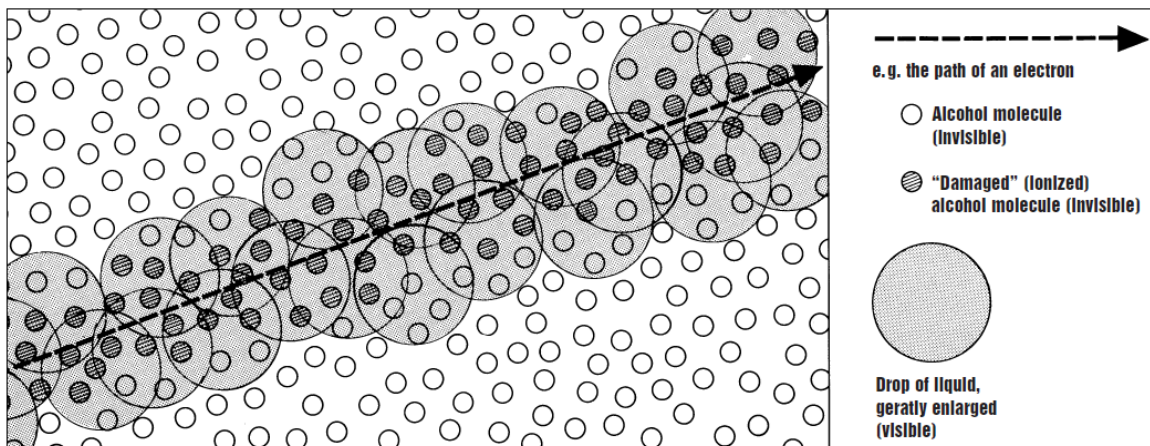


Figura 2.3- Formación de las trazas en la cámara de niebla.

3.- Fondo radiactivo

En la cámara se pueden observar trazas generadas por partículas alfa, protones, electrones y positrones y también por muones. Algunas tienen su origen en los rayos cósmicos y otras en la radiación natural terrestre.

Los **rayos cósmicos** (ver Figura 3.1) están constituidos por partículas muy energéticas (rayos cósmicos primarios) provenientes del espacio y que penetran en nuestra atmósfera, provocando violentas colisiones con los núcleos de la atmósfera y produciendo cascadas de partículas que llegan a nuestra superficie (rayos cósmicos secundarios).

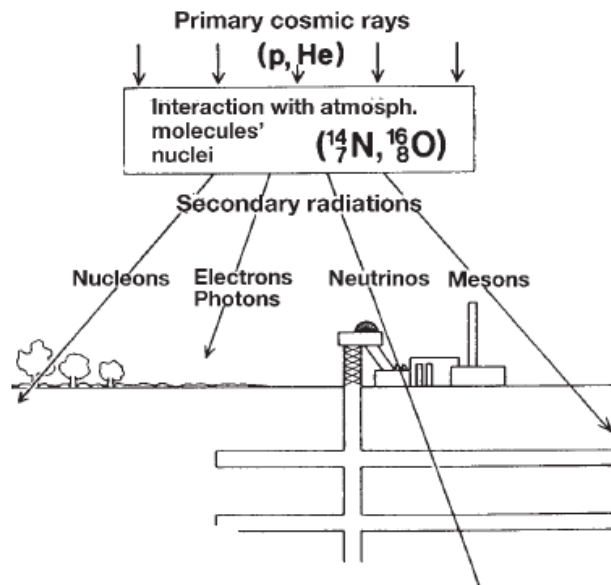


Figura 3.1- Producción de rayos cósmicos secundarios a partir de los primarios, constituidos fundamentalmente por protones y partículas alfa.

Los rayos cósmicos primarios están constituidos en su mayoría por protones (86%). El resto son principalmente partículas alfa (11%) y otros núcleos más pesados (1%). Los electrones constituyen el 2%. Se han detectado rayos cósmicos primarios de hasta 10^{20} eV de energía. Los rayos cósmicos secundarios están constituidos por distintos tipos de partículas con diferente poder de penetración, principalmente mesones μ (muones), neutrinos muónicos, protones/neutrones, electrones/positrones y otros mesones (piones, aunque éstos se desintegran antes de llegar a la superficie terrestre) [1]. En la Figura 3.2 puede verse el flujo vertical de rayos cósmicos con energías superiores a 1 GeV.

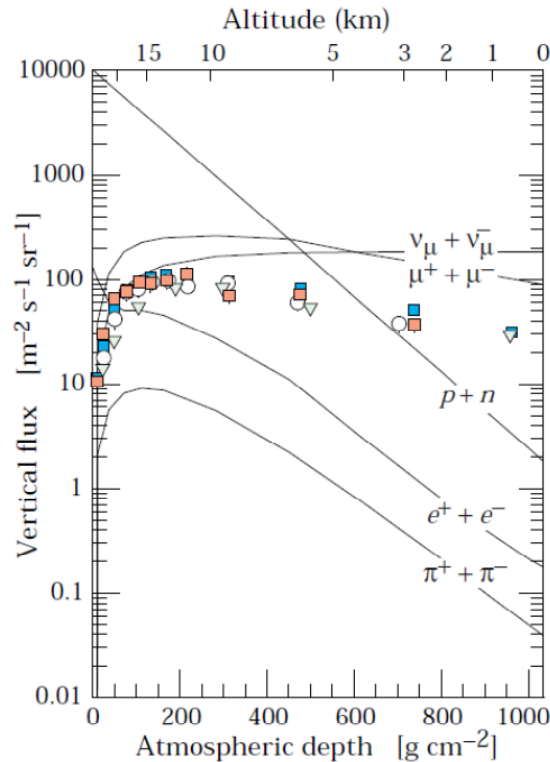
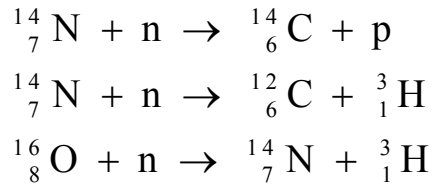


Figura 3.2- Flujo vertical de rayos cósmicos con $E > 1$ GeV. Los puntos corresponden a medidas de muones negativos con $E > 1$ GeV [1].

La **radiación natural terrestre** proviene de la desintegración de los radionúclidos presentes en los materiales que nos rodean, especialmente en rocas y minerales que se formaron en la Tierra hace unos 4500 millones de años. El U-238, el Th-232 y el U-235, con periodos de semi-desintegración comparables a la edad de la Tierra, constituyen el primer eslabón de las tres series radiactivas naturales de elementos pesados (conocidas como serie del uranio-radio, serie del torio y serie del actinio, respectivamente). En general las rocas constituyen un blindaje para que la radiación no escape, pero en las tres series aparece radón radiactivo gaseoso que, cuando escapa por fracturas en las rocas o a través de su presencia en materiales de construcción, puede ser peligroso para la salud cuando es inhalado.

Las series de elementos pesados no son las únicas fuentes de radiactividad natural. Radionúclidos naturales como el K-40, Rb-87, Cd-113, In-115 y otros también forman parte de los isótopos de vidas largas presentes en las rocas. Otros radionúclidos naturales con periodos cortos y que se crean continuamente por reacciones nucleares con rayos cósmicos en las capas altas de la atmósfera son el C-14 y el H-3, producidos a partir de la desintegración del N-14 o el O-16,



4.- Visualización de las trazas

La cámara de niebla de difusión permite visualizar todas las partículas cargadas (electrones/positrones, protones, partículas alfa y muones). Los fotones pueden visualizarse indirectamente a través de la producción de fotoelectrones, electrones Compton o incluso por medio de la producción de pares cuando la energía del fotón supera $2m_e c^2$. Finalmente, los neutrones pueden producir una reacción nuclear con los núcleos en el volumen de la cámara y la partícula cargada producida dejará su rastro en la misma.

Partículas alfa

Las partículas α provenientes de la desintegración de radionúclidos tienen una energía típica de 5 MeV, con un alcance en la mayoría de los sólidos inferior a 100 μm y en aire de unos 5 cm (ver Figura 4.1). En una mezcla de aire y vapor de alcohol el alcance será algo menor.

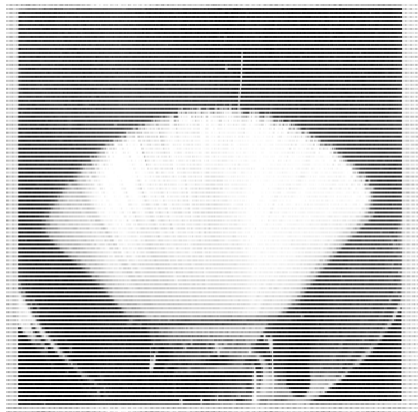


Figura 4.1- Fotografía de la desintegración alfa del Bi-214 en una cámara de niebla. Obsérvese que no hay apenas fluctuaciones en el alcance (la traza larga es una alfa más energética).

La expresión teórica entre el alcance y la energía a energías intermedias y altas se obtiene del cálculo mecano-cuántico del proceso de colisión coulombiana con los electrones atómicos del medio (fórmula de Bethe-Bloch) [3]:

$$S_{col} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{col} = K \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left\{ \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 E_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right\} \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g},$$

donde $K = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$, r_e es el radio clásico del electrón, m_e la masa del electrón, N_A el número de Avogadro, I el potencial medio de excitación,

$$I \approx \begin{cases} 12Z + 7 \text{ [eV]}, & Z < 13 \\ 9.76Z + \frac{58,8}{Z^{0.19}} \text{ [eV]}, & Z \geq 13 \end{cases} \text{ [eV]},$$

Z el número atómico del material, A el peso atómico del material, ρ la densidad del material, z la carga de la partícula, $E_{\max} \approx 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$ la máxima energía transferida ($M \gg m_e$), β la velocidad de la partícula, δ la corrección de densidad (efecto de apantallamiento, partículas ultrarelativistas en medios densos), y C la corrección de capa (velocidad de la partícula \gg velocidad orbital electrones atómicos).

Para bajas energías los valores se obtienen a partir de resultados experimentales del poder de frenado. Sus valores para distintos materiales y energías pueden consultarse en la referencia [2] y la Figura 4.2.

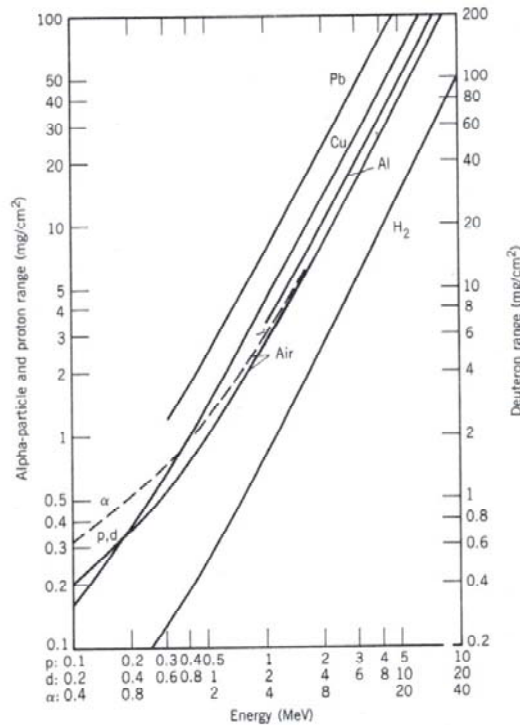


Figura 4.2- Relación alcance-energía de p,d y α en distintos materiales [3].

La ionización producida en un gas depende sólo ligeramente del tipo de gas. Como la energía promedio para producir un ión en aire es de 34 eV [3], una partícula alfa de 5 MeV produce del orden de 150,000 iones, en 5 cm de longitud, lo cual genera una condensación importante que da lugar a una traza gruesa y brillante. Cuando la partícula α penetre verticalmente la capa de vapor sobresaturado, sólo podremos ver un punto grueso como traza de la partícula (ver Figura 4.3).



Figura 4.3- Partícula α (traza oblicua) fotografiada en la cámara de IFIC.

Protones

Los protones energéticos de rayos cósmicos secundarios pueden atravesar el cristal y penetrar en la cámara. La fórmula de Bethe-Bloch predice que protones cuatro veces menos energéticos que las α , tienen el mismo alcance en un mismo material. Por tanto, un protón que penetre en la cámara con 1,25 MeV producirá cuatro veces menos ionización que una partícula α de 5 MeV a lo largo de la misma distancia, dando lugar a una traza algo menos gruesa (ver Figura 4.4).

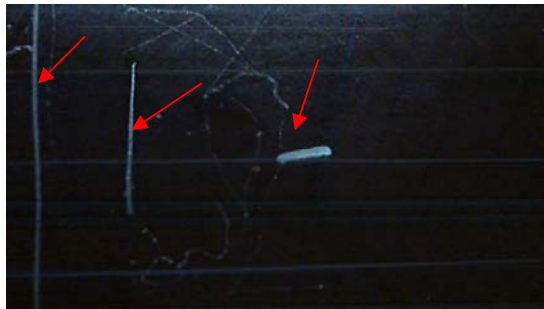


Figura 4.4- Dos partículas muy energéticas en vertical y una alfa en horizontal fotografiados en la cámara del IFIC.

La longitud de las trazas de los protones variará en función de la energía de los mismos. Por encima de 1 GeV los protones ionizan al mínimo y la traza sería mucho más débil, y mucho más larga. Por debajo de 6 MeV los protones pierden toda su energía en la cámara, ya que su alcance es de unos 40 cm, que es la longitud de la cámara (siempre que incidan horizontalmente en el volumen activo de la misma).

Electrones y positrones

Al igual que las partículas pesadas, los electrones y positrones interactúan con los electrones atómicos por interacción coulombiana, pero con importantes diferencias: son relativistas; pueden sufrir grandes desviaciones en sus interacciones, siguiendo recorridos erráticos; pueden perder una fracción importante de su energía en colisiones frontales; además, producen radiación de frenado (aunque este efecto es despreciable en aire para energías inferiores a 100 MeV).

Como las trayectorias pueden ser erráticas, el alcance no está bien definido (Figura 4.5). Datos empíricos con electrones monoenergéticos nos dan una estimación del alcance de electrones de 1 MeV en aire de unos 5 m, y para electrones de 0,1 MeV, de 10 cm [4]. La ionización que producen los electrones a estas energías es unas 100 veces inferior a la que producen los protones de igual energía (véanse las gráficas del *stopping power* en la referencia [1] en aire para electrones y protones). Por tanto las trazas de los electrones en este rango de energías se ven más débiles y finas que las de los protones.



Figura 4.5- Electrones beta.

Por encima de 1 GeV la ionización de protones y electrones es similar, y las trazas por tanto tienen el mismo aspecto (Figura 4.6).



Figura 4.6- Electrón muy energético.

Muones

El 90% de los cósmicos secundarios son muones. Su energía media en tierra es de alrededor de 4 GeV y cuando entran en la cámara ionizan al mínimo, es decir, algo más de $1 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$. Por tanto su traza es larga y fina, similar a la de protones o electrones energéticos. Muy ocasionalmente puede observarse la desintegración del muón negativo en electrón y dos neutrinos invisibles, tal como se observa en la Figura 4.7.

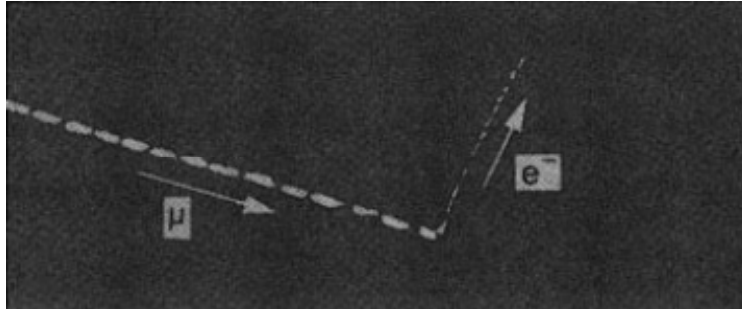


Figura 4.7- Desintegración $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$.

Fotones

Los fotones al interactuar con la cámara producen fotoelectrones y electrones Compton. Estos electrones siguen trayectorias cortas y muy tortuosas (Figura 4.8). Si los fotones tienen energías superiores a 1.022 MeV pueden además producirse pares electrón-positrón, cuyas trazas podrían verse separadas en presencia de un campo eléctrico o magnético.

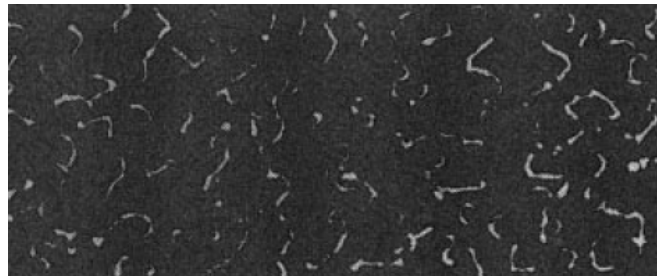


Figura 4.8- Trazas generadas por fotoelectrones y electrones Compton.

5.- El gas radón

Una característica común de las cadenas naturales del uranio-radio, del torio y del actinio es la existencia de isótopos del radón. El radón ($Z=86$) es el gas monoatómico más pesado de la naturaleza. Es incoloro, inodoro e insípido, y carece prácticamente de actividad química frente a otros elementos de la tabla periódica. Por su naturaleza gaseosa, se difunde fácilmente a través de diferentes medios.

Se conocen tres isótopos del radón, Rn-222, Rn-220 y Ra-219, denominados respectivamente radón, torón y actinión. Son inestables y cada uno de ellos forma parte de una cadena radiactiva natural diferente. El radón pertenece a la serie del uranio-radio (ver Figura 5.1), el torón a la del torio y el actinión a la del actinio. Estos isótopos radiactivos constituyen los únicos elementos gaseosos de sus respectivas cadenas radiactivas, y al desintegrarse producen isótopos de metales pesados (Po, Pb, Bi).

Figura 5.2- Actividades del Rn-222 e hijos. Como se observa, al cabo de unas 3,5 horas se alcanza el equilibrio secular.

El actinión (Rn-219) debido a su periodo de semidesintegración ($T_{1/2} = 3,96$ s), presenta una capacidad limitada de migración. Esto, unido a la abundancia isotópica del U-235 en el uranio natural (0,7%) hace que su presencia en la atmósfera sea despreciable. Lo mismo le sucede al torón (Rn-220), con una vida media corta ($T_{1/2} = 55,6$ s) que inhibe su movilidad respecto a la presentada por el Rn-222. Por lo tanto, en cualquier atmósfera, el isótopo dominante del radón será el Rn-222.

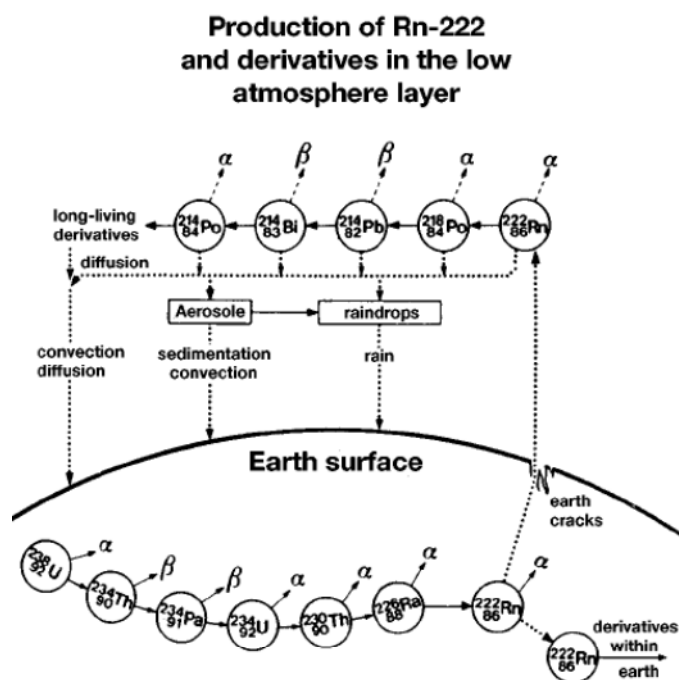


Figura 5.3- Esquema de producción del Rn-222 y derivados en las capas bajas de la atmósfera.

Una vez en la atmósfera (ver Figura 5.3) la desintegración del Rn-222 produce isótopos de polonio, plomo y bismuto, así como de talio en el caso del Rn-220. Estos son metales pesados, muy activos químicamente, que rápidamente formarán moléculas en fase condensada. Unidos a partículas de polvo, formarán aerosoles radiactivos que pueden ser inhalados. La peligrosidad de la exposición a altas concentraciones de radón no proviene por tanto de este gas en sí mismo, sino de los cuatro siguientes isótopos de la serie, que son de periodo corto, y cuyas partículas se fijan al tejido pulmonar, radiándolo. Dado que el elemento de mayor periodo es de 27 minutos, toda la secuencia de desintegraciones se puede completar antes de que los diferentes sistemas de limpieza del cuerpo humano los puedan eliminar, de modo que la radiación se disipa en el seno de la materia celular, con los problemas que ello puede acarrear para la salud. En la referencia [5] aparece una descripción más detallada de este tema.

Medida de la concentración de radón atmosférico

La concentración de radón en la atmósfera depende fuertemente de la región y de las condiciones de ventilación y ambientales. Por ejemplo, el promedio en el Museo de la Ciencia de Estocolmo es de 220 Bq/m^3 , variando del valor canónico de 40 Bq/m^3 durante el día a 700 Bq/m^3 cuando la ventilación se apaga durante la noche o fines de semana. La cámara de niebla de difusión del IFIC está situada en un amplio hall del primer piso del edificio de laboratorios del IFIC, sin ventilación directa al exterior (ventanas), pero con buena ventilación artificial y rodeada de despachos con buena ventilación natural. La ventilación se apaga durante la noche y los fines de semana. Estos datos son importantes para la interpretación de los resultados, a la hora de comparar con valores típicos en Europa y Valencia, en el rango $30\text{-}40 \text{ Bq/m}^3$.

Como el Rn-222 tarda apenas 3,5 horas en alcanzar el equilibrio secular con sus hijos de vida corta (Po-218, el Pb-214, el Bi-214 y el Po-214), deberíamos observar las partículas α del propio Rn-222 (5,49 MeV), del Po-218 (6,00 MeV), y del Po-214 (7,69 MeV) con la misma frecuencia. Los isótopos de plomo y bismuto se desintegran a través de betas con tiempos de semidesintegración cortos y sus trazas son muy diferentes (delgadas). El Po-214 produce Pb-210, el cual tiene un periodo de 22 años, por lo que a nuestros efectos prácticos lo podemos considerar estable.

La cámara de difusión nos permite visualizar las trazas de partículas α que se producen en el volumen eficaz de la misma, volumen que podemos estimar ya que conocemos los lados ($L_x=L_y=40\pm 2 \text{ cm}$) y el espesor de la capa de aire sobresaturado de $\varepsilon_z=5.0\pm 2.0 \text{ mm}$. Si contamos en un intervalo de tiempo de $T_0=5$ minutos el número de trazas N_0 gruesas y brillantes, de longitud inferior a unos 6 cm, podremos obtener una estimación de las partículas alfa por unidad de tiempo y volumen. Podemos comparar este valor con los datos de la referencia [6] que nos da una medida de los niveles de radón en Valencia y alrededores.

Para convertir la medida del número de trazas alfa en concentración de radón, debemos tener en cuenta las dimensiones L_x , L_y , ε_z del volumen activo de la cámara. Además, debemos tener en cuenta que, dado que ε es de unos pocos mm, la mayor parte de las trazas observadas proceden del exterior del volumen activo. Como sólo estamos interesados en las trazas producidas en el volumen activo, debemos introducir un factor de corrección geométrico ε_{vol} . Este factor puede obtenerse analíticamente,

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_z + L/4},$$

siendo L es la longitud máxima de las trazas alfa en aire. Alternativamente puede emplearse una técnica de simulación Monte Carlo que explícitamente tenga en cuenta el tamaño finito de la placa metálica maciza (L_x , L_y finitos). En nuestro caso, la simulación da un valor $\varepsilon_{vol}\approx 30\%$, que coincide con el cálculo analítico, tal como esperábamos dado que $\varepsilon_z \ll L_x, L_y$. De acuerdo con valores tabulados, el valor de L a $T=0^\circ\text{C}$ es 3.9, 4.5 y 6.6 cm para Rn-222, Po-218 y Po-214, respectivamente, correspondientes a energías alfa 5.5, 6.0 y 7.7 MeV. Los dos últimos isótopos se producen en la desintegración del primero, y alcanzan rápidamente equilibrio secular, de modo

que la actividad de los tres es básicamente la misma. Este equilibrio puede verse afectado en áreas confinadas, pero en buena aproximación podemos suponer que es correcta, por lo que podemos tomar que la actividad de los tres isótopos es la misma, $N_{iso}=3.0\pm 0.5$ y en promedio $L=5.0\pm 1.2$ cm.

Con todo ello, podemos evaluar la actividad en aire por unidad de volumen (concentración) de radón como (después de la cancelación parcial de ε_z),

$$N = \frac{1}{\varepsilon_{obs}} \frac{N_0}{T_0} \frac{1}{L_x L_y} \frac{1}{\varepsilon_z + L/4} \frac{1}{N_{iso}},$$

donde $\varepsilon_{obs}=(100\pm 10)\%$ es la eficiencia global de observación de partículas alfa en la cámara.

6.- Actividades y resultados

Las actividades a realizar durante la sesión son las siguientes (análisis “on-line”):

1. Observación directa sobre la cámara de los diferentes tipos de trazas, asociándolas a partículas alfa, protones, electrones/positrones beta y de alta energía, y muones.
2. Colocar la fuente de Sr-90 en el orificio lateral de la cámara y analizar los patrones de las trazas observadas.
3. Contar 3 veces en intervalos de 5 minutos el número de trazas gruesas y brillantes de longitud igual o menor que L . Realizar una estimación de la concentración de radón en Bq/m^3 . Cada grupo intercambiará con el resto de grupos de la sesión de laboratorio las mediciones con el fin de realizar una medida de la concentración con 15-21 contajes.
4. Al final de la sesión, realizar una toma de datos (grabación con la webcam) de unos 20 minutos de duración.

Las actividades a realizar en casa serán las siguientes (análisis “off-line”):

5. Utilizar las ecuaciones de Bateman para calcular las actividades del Rn-222 y sus hijos de vida corta, en función del tiempo (suponer que inicialmente se tiene $1\mu g$ de Rn-222 y nada del resto de la serie). Dibujar estas actividades en una gráfica $A(Bq)$ vs T (min) y estimar cuánto tiempo debe transcurrir para que las diferencias sean inferiores al 5%.
6. Obténganse los alcances R en aire de las alfas de esta serie [2].
7. Intentar reproducir el cálculo analítico del porcentaje de trazas que proceden de fuera del volumen útil (alfas generadas fuera del volumen útil y que van hacia abajo llegando a dejar traza cuando alcanzan el vapor de alcohol sobresaturado), es decir, reproducir la expresión $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_z / (\varepsilon_z + L/4)$.
8. A partir de 3 fragmentos de 5 minutos cada uno de los datos registrados en la película, realizar una medida de concentración de radón, realizando el oportuno análisis de errores

estadísticos y sistemáticos (propagación de errores en las dimensiones de la cámara, volumen de la zona activa, alcance de las alfas en la mezcla sobresaturada, etc.). Comparar con la medida análoga (asimismo con análisis completo de errores estadísticos y sistemáticos) realizada a partir de los 15-21 contajes realizados durante la sesión de laboratorio directamente sobre la cámara.

9. Buscar sucesos alfa en forma de “V”, correspondientes a desintegraciones sucesivas de la cadena de Rn-222. Para distinguir si su origen es el mismo o diferente núcleo de Rn-222, es preciso determinar si las dos ramas de la “V” tienen un origen común, y la variación en la densidad de ionización a lo largo de su trayectoria, lo cual puede realizarse visualizando la película a cámara lenta para cada una de ellas.
10. Identificar procesos de materialización de fotones (sucesos también tipo “V”), intentando aislar alguno en el que sea posible distinguir entre el electrón y el positrón. Identificar algunos de los muchos fotoelectrones y electrones Compton que se producen continuamente en el seno de la cámara.
11. Identificar protones, electrones y muones cósmicos.
12. Realizar la búsqueda de sucesos candidatos a muones desintegrándose en el volumen activo de la cámara (Figura 4.7). Además de la topología en “L” y diferencias en la densidad de ionización en cada una de las ramas, utilizar el “timing” del proceso analizando los fotogramas desde que el candidato aparece hasta que desaparece (típicamente entre 12 y 15 fotogramas).

Bibliografía

- [1] <http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-cosmic-rays.pdf>
- [2] www.nist.gov/physlab/data/star/index.cfm
- [3] Krane, *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons Inc., 1988.
- [4] W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [5] J.J. Llerena Cristobo, *Medición de la concentración de gas Rn-222 en el interior de edificios*, Trabajo DEA (2006), Facultad de Física, U. de Santiago de Compostela.
- [6] R Amorós et al., *Radon levels in the Valencian Community (Spain). Results in the province of Valencia (1990-1991)*, J. Environ. Radioactivity, vol 27, nº2 pp 125-131 (1995).
- [7] R. Cases, E. Ros, J. Zúñiga, *Measuring radon concentration in air using a diffusion cloud chamber*, Am. J. Phys. **79** (9), September 2011. <http://aapt.org/ajp>