

# Visualización de trazas y medida de la concentración de radón atmosférico con la cámara de niebla de difusión

Erica Alcusa Sáez\*      Fernando Hueso González†

4º DE GRADO DE FÍSICA - UVEG  
Laboratorio de Física Nuclear y de Partículas - Grupo B-L<sub>1</sub>

Práctica 3 realizada: 30-11-2010, entregada: 30-12-2010

El objetivo de esta práctica es visualizar las trayectorias de partículas cargadas en una cámara de difusión de niebla, distinguir e identificar las distintas partículas a partir de su traza, así como estudiar las desintegraciones y colisiones que sufren. En concreto, se observan directamente (en vivo) las trazas debidas a la radiación de fondo y a una fuente radioactiva, y se graban con una cámara de video durante 20 minutos para su posterior análisis.

En primer lugar se han observado directamente las trazas que deja la radiación al atravesar el medio activo de la cámara. Se han distinguido las distintas partículas incidentes en función del grosor, longitud y forma de la traza, y se han identificado fotoelectrones o electrones Compton, electrones  $\beta$ , electrones cósmicos, partículas  $\alpha$ , protones, positrones, muones, etc. Algunas de estas partículas procedían de los rayos cósmicos. Posteriormente, se han estudiado procesos de desintegración visibles en la cámara, como dos desintegraciones  $\alpha$  consecutivas de una misma cadena y la materialización de un fotón en el par electron-positrón, ambos con una traza en forma de V. También se ha encontrado un suceso “raro”: la desintegración de un muón en un electrón. Por último, se ha medido la concentración de radón atmosférico a partir del recuento de partículas  $\alpha$  que se observan en la cámara y se ha obtenido un valor compatible con el tabulado en la bibliografía.



---

\*ealsa#alumni.uv.es

†ferhue#alumni.uv.es

# Índice

Resumen . . . . .	1
Índice . . . . .	2
<b>1 Introducción histórica</b>	<b>3</b>
1.1 La cámara de Wilson . . . . .	3
1.2 La cámara de niebla de difusión . . . . .	5
<b>2 Fundamentos teóricos</b>	<b>6</b>
2.1 Fondo radioactivo . . . . .	6
2.2 Visualización de las trazas . . . . .	7
2.3 Identificación de sucesos . . . . .	9
2.3.1 Cadena de partículas $\alpha$ . . . . .	9
2.3.2 Rayo delta . . . . .	10
2.3.3 Producción de pares . . . . .	10
2.3.4 Desintegración de un muón . . . . .	10
2.4 El gas radón . . . . .	11
2.4.1 Actividad de la cadena . . . . .	12
2.4.2 Partículas $\alpha$ de la cadena . . . . .	13
2.4.3 Concentración en la atmósfera . . . . .	14
<b>3 Montaje experimental</b>	<b>15</b>
<b>4 Procedimiento experimental</b>	<b>16</b>
4.1 Identificación de partículas . . . . .	16
4.2 Identificación de sucesos . . . . .	16
4.3 Medida de la concentración de radón atmosférico . . . . .	17
<b>5 Medidas y resultados</b>	<b>21</b>
5.1 Identificación de partículas . . . . .	21
5.2 Identificación de sucesos . . . . .	27
5.2.1 Cadena de partículas $\alpha$ . . . . .	27
5.2.2 Rayo delta . . . . .	28
5.2.3 Producción de pares . . . . .	29
5.2.4 Desintegración de un muón . . . . .	29
5.3 Medida de la concentración de radón atmosférico . . . . .	31
<b>6 Conclusiones</b>	<b>32</b>
Bibliografía . . . . .	33

# 1 Introducción histórica

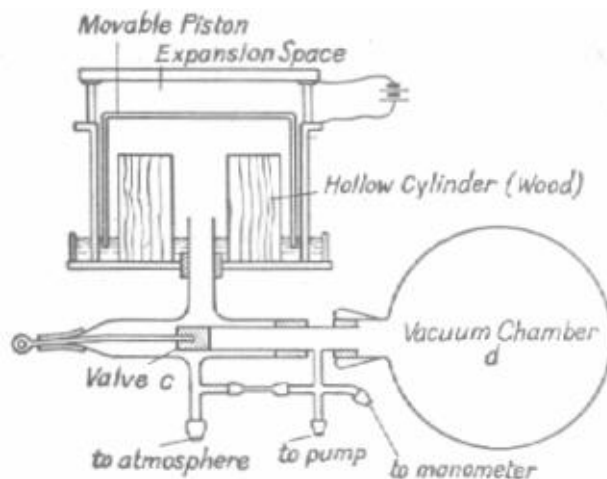
Tras el descubrimiento de la radioactividad a principios del siglo XX y la creación de detectores para medir la energía de las partículas radiadas, surgió la necesidad de detectar las trayectorias de partículas ionizantes y estudiar su comportamiento en comparación con las teorías planteadas. La cámara de Wilson fue el primer dispositivo para visualizar las trazas que dejaban las partículas cargadas a su paso a través de un medio activo. En ésta se demostró la existencia de partículas desconocidas hasta el momento, como el positrón (predicho por Dirac en 1928), primera evidencia de la antimateria, o el muón, primera observación de leptones de segunda generación.

## 1.1 La cámara de Wilson

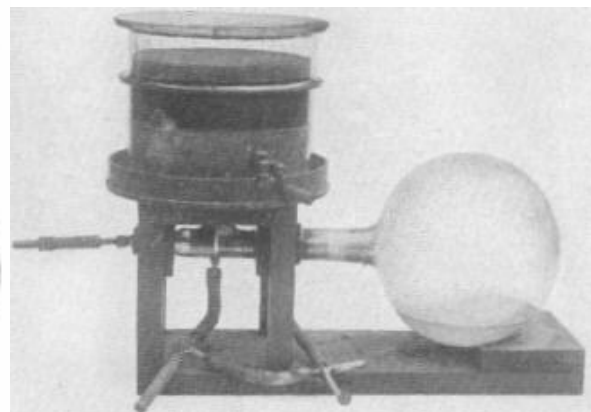
Charles Thomas Ree Wilson (1869–1959) era un físico escocés que estudiaba la formación de vapor de agua y los fenómenos ópticos que se producen en la naturaleza cuando hay bruma o niebla, como el espectro de Brocken. Para ello, comenzó a diseñar cámaras de expansión adiabática con aire saturado de vapor de agua para recrear la niebla artificialmente y realizar experimentos en su laboratorio. Wilson se percató de que los iones que atravesaban esta atmósfera podían actuar de núcleos de condensación del vapor de agua, observación que le condujo a la creación de la primera cámara de niebla en 1911.

En la cámara original, el aire del interior estaba saturado con vapor de agua, y un diafragma realizaba expansiones adiabáticas para enfriar el aire y crear una situación favorable para la condensación. Al atravesar las partículas cargadas este medio dejaban un rastro visible de su trayectoria al actuar como núcleos de condensación del vapor de agua. Este detector también permite estudiar la curvatura de estas partículas cargadas con campos magnéticos, y en consecuencia su masa.

Este tipo de cámara se clasifica como cámara pulsada, puesto que las condiciones de funcionamiento no están siempre mantenidas (necesita de sucesivas expansiones del diafragma). Posteriormente, Patrick Blackett perfeccionó el sistema aumentando la frecuencia de expansiones para poder detectar partículas más veces por segundo.



(a) Esquema del diseño experimental



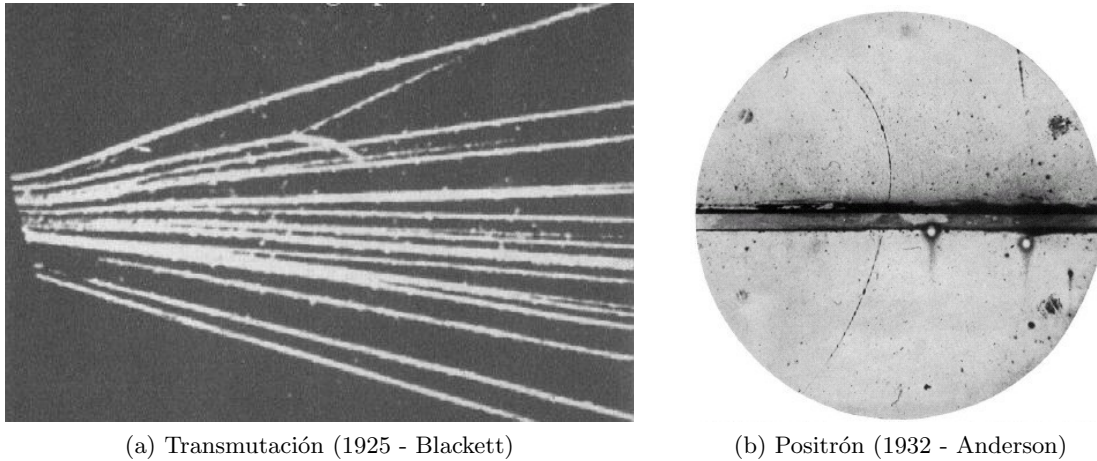
(b) Foto original

**Figura 1:** Primera cámara de niebla de Wilson, creada en 1911, con un diámetro de 16,5cm

Charles Wilson, junto con Arthur Compton, recibió en 1927 el Premio Nobel de Física por su trabajo en torno a la cámara de niebla (figura 1). Este dispositivo se utilizó para descubrimientos tan importantes como el positrón y del muón por Anderson en 1932 y 1936 respectivamente

(figura 2b), premiado con el Nobel. Por otro lado, Blackett logró observar por primera vez la transmutación atómica en 1925 (figura 2a) mediante esta cámara (recibió el Nobel en 1948).

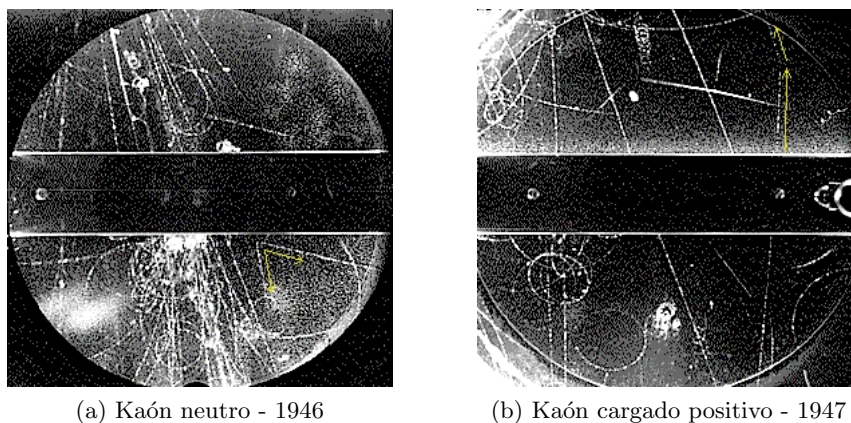
En 1946 y 1947, Clifford Butler y George Rochester descubrieron dos partículas de la segunda generación, el kaón neutro y cargado respectivamente (figura 3), ambos mesones con extrañeza. Para ello colocaron una cámara de niebla en un avión que voló a una altura suficiente para observar los primeros productos de desintegración de los rayos cósmicos con la atmósfera para que el kaón fuese visible con mayor probabilidad en dicha cámara.



**Figura 2:** Descubrimientos importantes realizados mediante la cámara de niebla

En la figura 2a se observó la colisión de una partícula  $\alpha$  con un núcleo de nitrógeno (predominante en el aire), y la consiguiente producción de un isótopo pesado de oxígeno (línea más gruesa) y un protón (línea fina) en forma de V.

En la figura 2b se observó una curvatura de signo contrario a la del electrón, pero del mismo radio y densidad de ionización (y por tanto masa, a energía cinética inicial igual). Por otro lado, el positrón incide desde abajo y deposita parte de su energía en la lámina de Pb, con lo que la curvatura por el campo magnético es mayor tras atravesar dicha lámina. Aparte, el muón fue descubierto al observar una trayectoria similar a la del electrón, pero con menor radio de curvatura al tener más masa y mayor densidad de ionización.



**Figura 3:** Descubrimiento de partículas “extrañas” por Butler y Rochester con la cámara de Wilson.

## 1.2 La cámara de niebla de difusión

La cámara de difusión es una mejora sustancial de la cámara de niebla original, pues detecta la radiación de forma continua en lugar de a saltos (cámara pulsada). Fue desarrollada por Alexander Langsdorf en 1936 sustituyendo el mecanismo de expansión adiabática por un gradiente térmico entre dos superficies planas. De esta manera, consiguió un medio activo de aire sobresaturado en la zona fría de la cámara de forma permanente.

En nuestro experimento utilizamos este tipo de cámara. Aunque estas cámaras han sido fundamentales en el siglo XX para descubrimientos científicos relevantes, actualmente han quedado obsoletas a nivel de investigación por otros dispositivos más sofisticados, y sólo se utilizan en museos o a nivel didáctico para ilustrar de forma muy visual y directa los conceptos teóricos estudiados previamente.



**Figura 4:** Cámara de difusión empleada en nuestro experimento

## 2 Fundamentos teóricos

Antes de comenzar a observar en la cámara de niebla, hay que saber qué partículas esperamos ver y cómo se identifican. Las dos fuentes más importantes de radiación detectada son los rayos cósmicos y la radiación terrestre, principalmente del gas radón.

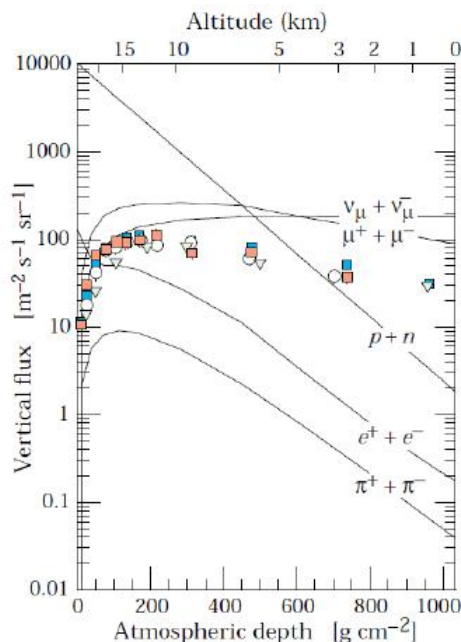
De la radiación terrestre, lo que más se observa son partículas  $\alpha$  procedentes de la desintegración del radón (del que hablaremos en la sección 2.4). Debido a su energía, sus trazas miden menos de 7 cm, pero son anchas debido a la alta densidad de ionización. También se deben observar electrones  $\beta$  de la cadena del radón, aunque no se pueden distinguir de electrones de baja energía con otro origen que dejan trazas similares (aleatorias y erráticas).

De los rayos cósmicos se deben ver electrones y muones de altas energías, que dejan trazas finas y rectas. También se deben ver protones cósmicos, que dejan trazas rectas y largas, pero más anchas que las de los electrones energéticos (aunque menos que las de las partículas  $\alpha$ ), así como partículas  $\alpha$  procedentes de los rayos cósmicos. Éstas pueden ser más energéticas que las que son producto de la desintegración de elementos terrestres, por lo que sus trazas deben ser más largas.

Cuando coloquemos la muestra de  $^{226}\text{Ra}$ , esperamos ver un abanico de partículas  $\alpha$  provenientes de la desintegración (figura 7b), así como electrones de distintas energías, principalmente electrones Compton y fotoelectrones.

### 2.1 Fondo radioactivo

Como hemos dicho, una parte muy importante del fondo radioactivo proviene de los rayos cósmicos. Los rayos cósmicos primarios, formados por un 86% de protones, un 11% de partículas  $\alpha$ , un 1% de otros núcleos más pesados y un 2% de electrones, pueden llegar a ser muy energéticos. Se han llegado a observar rayos cósmicos primarios de hasta  $10^{20}$  eV, lo que es mucha más energía de la que podemos conseguir en un acelerador, aunque son sucesos muy poco frecuentes.



**Figura 5:** Flujo vertical de distintas partículas en función de la altura (o de la atmósfera que atraviesan) para rayos cósmicos de energías superiores a 1 GeV



Por el impacto con las partículas de la atmósfera, éstos se pueden desintegrar en rayos cósmicos secundarios. Los rayos cósmicos secundarios están formados por mesones ( $\mu$ ,  $\pi$ ...), protones, neutrones, electrones, positrones y neutrinos, principalmente. En la figura 5 se puede ver el flujo de estas partículas. Dada la penetración y vida media de los muones, estas partículas son predominantes en los rayos cósmicos que alcanzan el nivel del mar y se pueden observar por tanto en la cámara de niebla con relativa frecuencia.

La otra parte principal de la radiación de fondo es la radiación terrestre. Proviene en su mayor parte por la desintegración de los elementos de las cadenas radioactivas originadas por los elementos de vida media comparable a la edad de la Tierra, como el  $^{238}\text{U}$  (cadena del uranio-radio), el  $^{232}\text{Th}$  (serie del torio) o el  $^{235}\text{U}$  (serie del actinio). La radioactividad de estas cadenas queda en su mayor parte absorbida por las rocas de la corteza terrestre, pero en algunas se produce radón, que es gaseoso. Este gas puede filtrarse entre la corteza, llegar a la superficie, y ser perjudicial. En la sección 2.4 se desarrolla este tema en profundidad.

Aunque las cadenas radioactivas son las causantes de la mayor parte de la radioactividad terrestre, no es la única fuente. También existen otros radionúclidos presentes en las rocas ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{115}\text{In}$ , ...), así como otros de vidas más cortas, que se generan en la atmósfera por la colisión de los rayos cósmicos, como el tritio ( $^3\text{H}$ ) o el  $^{14}\text{C}$ .

## 2.2 Visualización de las trazas

Como ya hemos dicho, en la cámara de niebla podemos ver el rastro de partículas cargadas, que es distinto según el tipo de partícula. Cuanto más alcance tienen las partículas, mayor es la longitud de la traza que dejan en la cámara, y en la figura 6 podemos ver la relación de alcance y energía en distintos materiales para partículas  $\alpha$ , protones y deuterones.

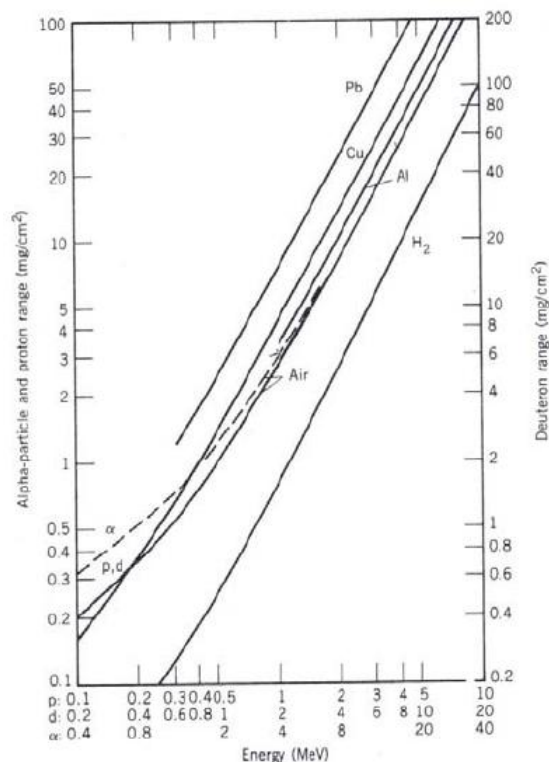


Figura 6: Alcance de p, d y  $\alpha$  en distintos materiales para distintas energías

**Partículas  $\alpha$**  En la cámara se deben observar partículas  $\alpha$  provenientes sobre todo de la cadena de desintegración del radón. Como se explica en el apartado 2.4.2, las  $\alpha$  de la desintegración del radón y sus hijos tienen una energía de alrededor de 6 MeV y un alcance de unos 5-7 cm en aire. Como las partículas  $\alpha$  son muy ionizantes y depositan su energía en un corto espacio, la traza que dejan es muy gruesa, por lo que son las partículas más fácilmente identificables.

Es posible que también observemos alguna partícula  $\alpha$  proveniente de otras fuentes, que, si es más energética, puede dejar trazas más largas. Si llegase una partícula  $\alpha$  cósmica, debería haber entrado en la atmósfera con una energía del orden del TeV para poder atravesarla sin colisionar para que la detectemos, por lo que son sucesos poco probables (infrecuentes).

**Protones** Los protones que se pueden observar provienen de los rayos cósmicos secundarios, que son capaces de atravesar el cristal y entrar en la cámara. Utilizando la fórmula de Bethe-Bloch, se tiene que el alcance de los protones es cuatro veces mayor que el de las partículas  $\alpha$  de la misma energía (su masa es 4 veces mayor), por lo que su densidad de ionización es cuatro veces menor y su traza más fina. Los protones muy energéticos ( $> 1$  GeV) apenas depositan energía en la cámara, y tienen trazas muy finas y rectas, que pueden confundirse con las de los electrones muy energéticos.

Los protones que mejor se identifican son los de energías de menos de 6 MeV, pues tienen un alcance de la longitud de la cámara ( $\sim 40$  cm) y depositan toda su energía en la cámara y dejan trazas gruesas y rectas, aunque no tan luminosas y anchas como las de las partículas  $\alpha$ .

**Electrones y positrones** Al igual que las partículas  $\alpha$  y los protones, los electrones y positrones cruzan la cámara ionizando mediante la interacción de Coulomb, pero con la diferencia de que a energías de más de 100 MeV son importantes los efectos relativistas (pueden perder energía en colisiones frontales y por radiación de frenado).

Los electrones  $\beta$ , por tanto, pueden seguir trayectorias con cambios bruscos de dirección, por lo que el alcance no está bien definido (aunque se puede estimar, que en aire, el alcance de los electrones de 1 MeV es de unos 5 cm y el de los de 0,1 MeV es de unos 10 cm, energías para las que los electrones ionizan unas 100 veces menos que los protones de la misma energía). Los electrones Compton y los fotoelectrones, algo menos energéticos, siguen trayectorias erráticas, donde no tiene sentido hablar de alcance. No obstante, en ocasiones es complicado distinguir entre  $\beta$  y fotoelectrones o Compton, pues su energía es del mismo orden.

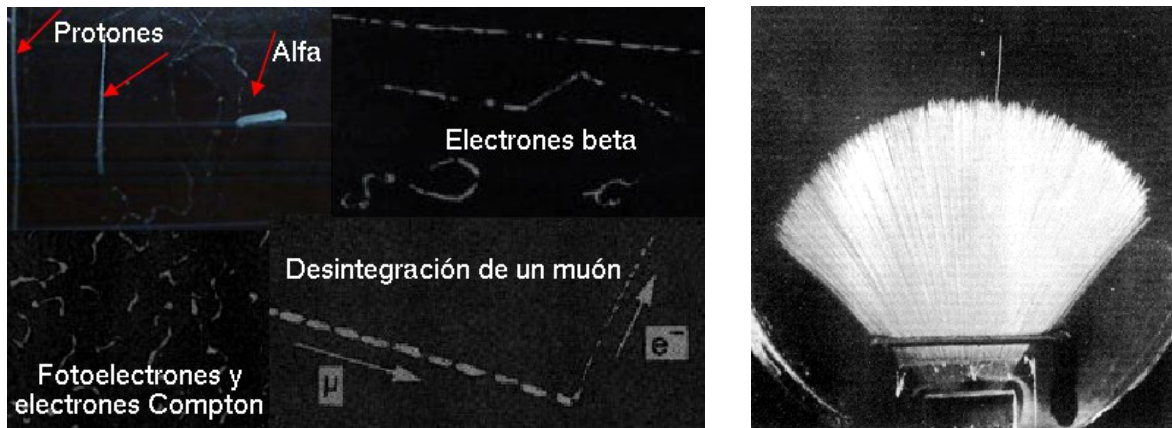
Por otro lado, los electrones de muy alta energía ( $> 1$  GeV), de origen cósmico, dejan trazas muy similares a las de los protones cósmicos de más de 1 GeV, por lo que es difícil distinguirlos.

**Muones** Casi todas las partículas que componen los rayos cósmicos secundarios (el 90%) son muones, que en la Tierra tienen una energía promedio de unos 4 GeV. Debido a que ionizan muy poco, su traza no se puede distinguir siempre de las de los electrones y protones energéticos. Para poder identificarlos con total garantía, ha de ocurrir que un muón se desintegre en un electrón y dos neutrinos ( $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ ), un suceso bastante poco frecuente y que se observa como una L en la cámara, con un brazo un poco más grueso (la traza del muón) y el otro ligeramente más fino (la traza del electrón). Los neutrinos, al no estar cargados, no generan traza alguna.

**Fotones** Los fotones no dejan rastro en la cámara, pues no tienen carga, pero pueden observarse indirectamente mediante electrones Compton y fotoelectrones, que de hecho son las partículas que se observan con mayor frecuencia. Si los fotones tienen energías de más de 1,022 MeV, pueden producir pares electrón-positrón, lo que se observa en la cámara como una V. Si se dispusiese de un campo magnético, se observarían dos espirales, donde cada una de ellas giraría en un sentido (debido a que tienen carga opuesta).



En la figura 7a se puede ver un ejemplo del aspecto que tienen las trazas descritas debidas al fondo ambiental. La figura 7b es un ejemplo de lo que se espera observar al colocar una fuente intensa que se desintegra vía  $\alpha$  junto a la cámara. Se aprecia que todas las partículas (excepto una más larga) tienen el mismo alcance, lo que indica que en la desintegración alfa de un núcleo, estas partículas son monoenergéticas (proceso a dos cuerpos), a diferencia del espectro continuo de los electrones  $\beta$  (proceso a tres cuerpos dada la existencia del neutrino).



(a) Aspecto de las trazas de las distintas partículas

(b) Partículas  $\alpha$  de una fuente de  $^{214}\text{Bi}$

**Figura 7:** Trazas observables en la cámara de niebla de difusión

## 2.3 Identificación de sucesos

### 2.3.1 Cadena de partículas $\alpha$

En una cadena de desintegraciones vía  $\alpha$ , existen elementos con vida media pequeña respecto al tiempo de observación. Cuando el núcleo padre se desintegra y emite una partícula  $\alpha$  en una dirección, la hija retrocede en dirección opuesta. Si ésta se desintegra rápidamente, emitirá una nueva partícula  $\alpha$  en una dirección arbitraria, en punto algo desplazado respecto al padre (debido al retroceso).

Se espera observar este suceso como una V con un pequeño hueco en el vértice. Es decir, se deben observar dos partículas  $\alpha$ , una detrás de otra, de manera que la prolongación del origen de la primera hacia la segunda corte en el origen de la segunda, como se aprecia en la siguiente figura. La primera  $\alpha$  es la traza de la izquierda.



**Figura 8:** Desintegración  $\alpha$  consecutiva en forma de V

Mediante la grabación es posible observar el orden en que se producen ambas partículas. En cuanto a su origen (o dirección de movimiento), se puede razonar que el punto más alejado del origen es el más brillante, es decir, donde más energía deposita, de acuerdo con la curva de Bragg de las partículas  $\alpha$ .

### 2.3.2 Rayo delta

Un rayo delta está caracterizado por electrones energéticos (de origen cósmico o de los orbitales de un átomo, tras ser arrancado por partículas ionizantes como las  $\alpha$  o los electrones o muones). Su energía es suficiente para ionizar otros átomos a su paso. Este tipo de rayo aparece en la cámara de niebla como una pequeña ramificación de la traza principal (corresponde a radiación secundaria), principalmente en aquella zona donde la ionización del medio es mayor, de acuerdo con la curva de Bragg de la partícula incidente.

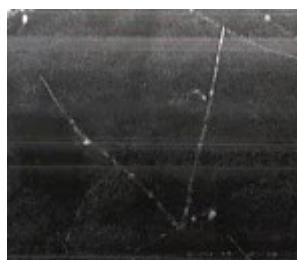


**Figura 9:** Traza de partícula  $\alpha$  con rayos delta (ionización secundaria)

### 2.3.3 Producción de pares

Uno de los procesos de interacción del fotón con la materia es la producción de pares para fotones con energías mayores de 1,022 MeV. El fotón (invisible en la cámara por no tener carga) produce un par electrón-positrón (materializa), de manera que transfiere toda su energía a éstos (1,022 MeV para la masa del par y el resto como energía cinética).

En consecuencia, se espera una traza simétrica, en forma de V e igual de larga, al repartirse la energía cinética y momento entre ambos por igual (conservación de momento). En esta ocasión, el origen es coincidente, con lo que no hay un hueco en el vértice.



**Figura 10:** V de materialización

Las ramas de la V pueden ser rectas y finas o cortas y erráticas, dependiendo si el fotón que materializa tiene más o menos energía (que es transferida como energía cinética al par). Por otro lado, al no haber campos magnéticos en la cámara, ambas trazas son similares y no es posible distinguir cuál corresponde al electrón y cuál al positrón.

### 2.3.4 Desintegración de un muón

Se espera que, de acuerdo con lo explicado anteriormente, un muón cósmico energético (trayectoria recta y fina) se desintegre en un electrón, con traza algo menos gruesa y que se mueve en una dirección distinta (V asimétrica, ó L). Para más detalles, se puede consultar la figura 7a.



### 2.4.1 Actividad de la cadena

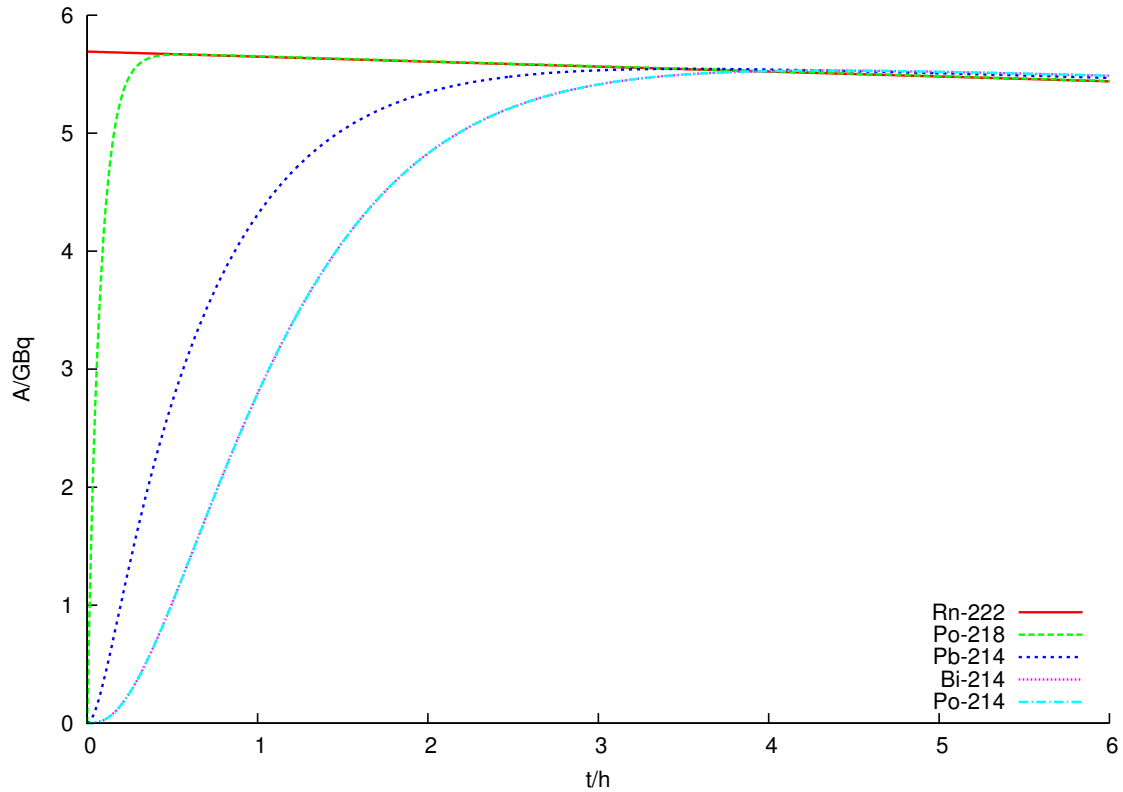
Los hijos del radón tienen vidas medias muy cortas, con lo que alcanzan rápidamente el equilibrio secular con el padre de acuerdo con las ecuaciones de Bateman. Para calcular las actividades del radón y sus cuatro primeros hijos utilizamos dichas ecuaciones, que, en el caso de que inicialmente sólo se tengan  $N_0$  partículas de radón, se reducen a:

$$A_n(t) = N_0 \sum_{i=1}^n c_{ni} e^{-\lambda_i t}, \quad c_{ni} = \frac{\prod_{k=1}^n \lambda_k}{\prod_{k=1, k \neq i}^n (\lambda_k - \lambda_i)}. \quad (1)$$

De este modo, obtenemos:

$$\begin{aligned} A_{222\text{Ra}}(t) &= A_1(t), & T_{\frac{1}{2},1} &= 3,82 \text{ d} \\ A_{218\text{Po}}(t) &= A_2(t), & T_{\frac{1}{2},2} &= 3,10 \text{ min} \\ A_{214\text{Pb}}(t) &= A_3(t), & T_{\frac{1}{2},3} &= 26,8 \text{ min} \\ A_{214\text{Bi}}(t) &= A_4(t), & T_{\frac{1}{2},4} &= 19,9 \text{ min} \\ A_{214\text{Po}}(t) &= A_5(t), & T_{\frac{1}{2},5} &= 164 \mu\text{s} \end{aligned} \quad (2)$$

Si inicialmente tenemos  $1 \mu\text{g}$  de  $^{222}\text{Rn}$ ,  $N_0 = 2,71 \cdot 10^{15}$ , obtenemos las actividades en función del tiempo mostradas en la figura 12.



**Figura 12:** Actividades del radón y sus hijos de vida corta en función del tiempo

Podemos ver cómo, a las tres horas, las actividades de los hijos difieren de la del radón en un 5%, y a las tres horas y media se alcanza el equilibrio secular. También vemos cómo, debido a la baja vida media del  $^{214}\text{Po}$  en comparación con las demás, su actividad es siempre la misma que la de su padre, el  $^{214}\text{Bi}$ .

## 2.4.2 Partículas $\alpha$ de la cadena

Hemos visto cómo varían las actividades del radón y sus cuatro primeros hijos con el tiempo, pero también debemos conocer las energías implicadas en estas desintegraciones. Para nuestro experimento nos interesan las desintegraciones  $\alpha$ , pues son estas partículas las que vamos a identificar en la cámara de niebla.

Para conocer las energías de las partículas  $\alpha$  basta con conocer las masas iniciales y finales, y aplicar conservación de momento y energía. Si el núcleo padre (en reposo) se desintegra  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$ , obtenemos la energía  $T_\alpha$  de la partícula  $\alpha$ :

$$T_\alpha = Q \frac{1}{1 + \frac{M(\alpha)}{M(Y)}}, \quad (3)$$

donde  $Q$  es el calor de reacción:

$$Q = M({}^A_Z X) - M({}^{A-4}_{Z-2} Y) - M({}^4_2 \alpha) = \Delta({}^A_Z X) - \Delta({}^{A-4}_{Z-2} Y) - \Delta({}^4_2 \alpha) \quad (4)$$

Los valores tabulados de defectos de masa se consultan en la referencia [3, Ferrer].

Al realizar estos cálculos, obtenemos que el  ${}^{222}\text{Rn}$  emite una partícula  $\alpha$  de 5,49 MeV, el  ${}^{218}\text{Po}$  emite una partícula  $\alpha$  de 6,00 MeV, y el  ${}^{214}\text{Po}$  emite una  $\alpha$  de 7,69 MeV. Por otro lado, el  ${}^{214}\text{Pb}$  y el  ${}^{214}\text{Bi}$  se desintegran vía  $\beta$  de acuerdo con la serie de la figura 11.

Una vez conocidas las energías de las partículas  $\alpha$  podemos recurrir a tablas [4, ASTAR - CSDA Range] y determinar su alcance en aire. Los alcances para las tres  $\alpha$  son de 4,1 cm, 4,7 cm y 6,8 cm.

En la cámara de niebla el alcance es algo menor que en el aire, pero estos valores nos dan una idea de lo que vamos a observar. Una manera de recordar fácilmente estos valores es que el alcance es de 1cm/MeV aproximadamente.

En resumen, dado que el radón alcanza en sólo 3,5 horas el equilibrio secular con los hijos de vida corta (ver figura 11), se espera que se observen en la cámara partículas  $\alpha$  debidas a la desintegración del  ${}^{222}\text{Rn}$  (con energía 5,49MeV y alcance 4,1cm en aire), del  ${}^{218}\text{Po}$  (6,00MeV - 4,7cm) y del  ${}^{214}\text{Po}$  (7,69MeV - 6,8cm).

Las partículas  $\beta$  que se produzcan en las desintegraciones sucesivas no son fáciles de distinguir porque se ven enmascaradas con el fondo y porque su traza es bastante fina. El  ${}^{210}\text{Pb}$  se considera estable respecto al tiempo que dura el experimento.

### 2.4.3 Concentración en la atmósfera

Cuando el radón se encuentra en la atmósfera tras migrar desde la tierra produce isótopos de polonio, plomo y bismuto (figura 11). Estos metales pesados forman moléculas en la fase condensada, son activos químicamente y se unen a partículas de polvo.

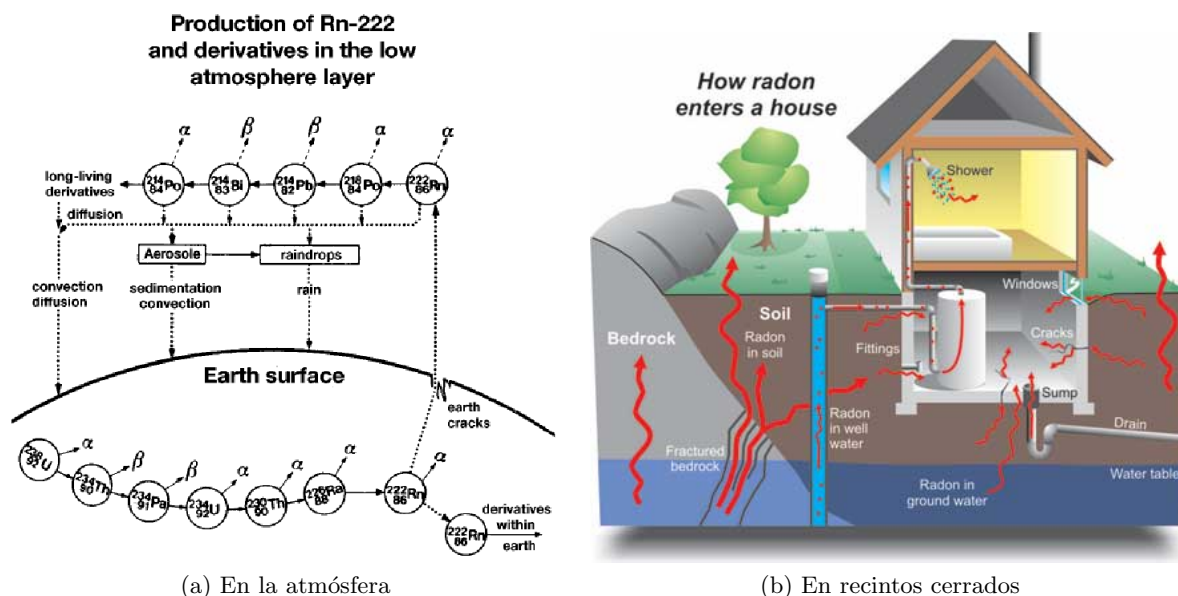


Figura 13: Migración del radón desde el suelo al ambiente exterior

En consecuencia, se forman aerosoles radioactivos que están presentes en capas bajas de la atmósfera y que pueden suponer un peligro para los pulmones si se inhalan. Es decir, los cuatro isótopos de la serie (hijos consecutivos del radón) se pueden adherir a los pulmones. Debido a su vida media corta (menor de 27 minutos), irradian el tejido pulmonar antes de que el sistema de limpieza del cuerpo humano lo pueda eliminar. Por tanto, el peligro directo reside no tanto en el radón sino en los productos de su desintegración. El radón es el gas que hace de vehículo para que la serie radioactiva entre directamente en el cuerpo humano.

La concentración atmosférica de radón depende de la región geográfica así como de la ventilación si la medimos en un recinto cerrado. Los valores típicos al aire libre para Valencia y Europa son del orden de 30 ó 40 Bq/m<sup>3</sup> en promedio. En recintos cerrados sin ventilación, puede aumentar peligrosamente, como en el sótano de una iglesia de Casinos (Valencia), donde el valor asciende a 1600 Bq/m<sup>3</sup>, o en un pozo en desuso, con un valor de 8000Bq/m<sup>3</sup> (consultar referencia [1, Radon Levels]).

Los niveles de peligrosidad para la salud dependen del tiempo de exposición. Se fijan ciertos niveles de riesgo de cara a la protección radiológica y actuaciones de control:

Tabla 1: Niveles de actuación recomendados, extraído de [2, Llerena]

Intervalos de concentración de radón	Comentario
$0 \leq \text{Bq/m}^3 \leq 200$	Por debajo de los niveles de actuación recomendados.
$200 < \text{Bq/m}^3 \leq 400$	Nivel de actuación para viviendas posteriores a 1990
$400 < \text{Bq/m}^3 \leq 800$	Nivel bajo de actuación para puestos de trabajo
$800 < \text{Bq/m}^3 \leq 1600$	Nivel alto de actuación para puestos de trabajo
$1600 < \text{Bq/m}^3$	Superior a todo nivel de actuación recomendado



### 3 Montaje experimental

Para realizar este experimento, hemos utilizado la cámara de niebla del IFIC, fabricada por PHYWE, que se puede ver en la figura 4.

La cámara de difusión utilizada funciona creando un gradiente de temperatura, de unos  $4,7^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  en un tanque de alcohol isopropilo, de manera que se forma una fase metaestable de vapor sobresaturado, de unos 5 mm de espesor. Al ser metaestable, cuando una partícula cargada cruza esta zona, ioniza el alcohol. Los iones generados actúan como núcleos de condensación, y el vapor sobresaturado forma gotas visibles.

En la cámara se aprecian dos partes. En primer lugar hay una base, o zócalo, donde se encuentra el sistema de refrigeración y el sistema de bombeo de alcohol. El sistema refrigerador enfría una plancha uniformemente a  $-35^{\circ}\text{C}$ . Sobre ésta base, se encuentra la cámara de observación, donde está la fase sobresaturada. En la parte superior se sitúa un canal calentado, donde es bombeado el alcohol desde la base y desde donde se evapora. En la cubierta superior hay una red de hilos calefactores, que mantienen la temperatura superior a unos  $35^{\circ}\text{C}$ . Además de ésta, los hilos tienen otra función, pues crean una red de tensión para absorber iones.

De este modo, el alcohol del tanque de la base se bombea hasta el canal, donde se evapora y se difunde hacia las zonas más frías. Cuando llega a la base, se condensa y vuelve al tanque.

La placa metálica cuadrada mide  $a = b = 45 \pm 2$  cm y el grosor del medio activo es  $c = 5,0 \pm 2,5$  mm.

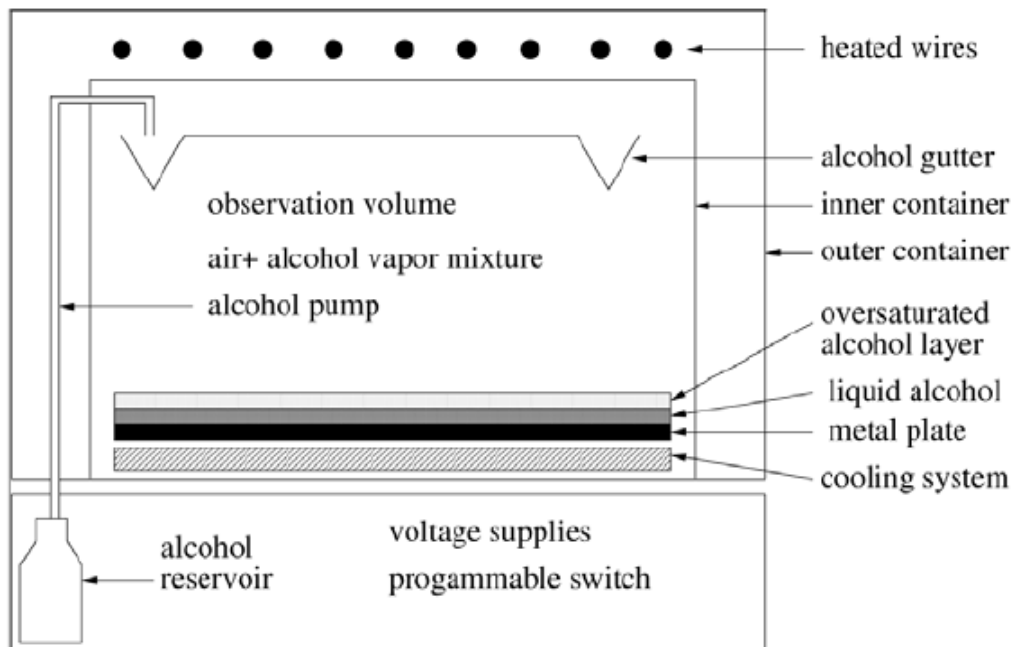


Figura 14: Esquema de la cámara de niebla de difusión

## 4 Procedimiento experimental

Con el montaje detallado en el apartado anterior, se realiza una sesión de 3 horas tanto de observación directa de las trazas como de grabación con una webcam.

En primera instancia se distinguen las distintas partículas incidentes en función de la traza, y se identifican protones, electrones, partículas  $\alpha$ , muones, etc. También se detectan varios procesos de desintegración (cadena de dos partículas  $\alpha$ , materialización), y se aprecia el abanico de partículas  $\alpha$  al acercarse una fuente radioactiva sellada de  $^{226}\text{Ra}$ .

En segundo lugar, se realizan varios contajes en vivo de desintegraciones  $\alpha$  en periodos de cinco minutos para obtener una medida de la concentración de radón atmosférico a partir del recuento de partículas  $\alpha$  que se observan en la cámara.

Finalmente, se realiza una grabación de 20 minutos para disponer de imágenes objetivas que justifiquen las observaciones anteriores, hacer un recuento más fiable de las partículas  $\alpha$  en un análisis posterior y buscar la desintegración de un muón (proveniente de un rayo cósmico) en un electrón.

### 4.1 Identificación de partículas

Tanto en la observación directa como en el video grabado se identifican los distintos tipos de radiación, cuya traza característica se ha detallado en el apartado 2.2. Se selecciona un fotograma del video que justifique la observación de cada partícula (protón, fotoelectrones y electrones Compton, electrón  $\beta$ , positrón, muón, partícula  $\alpha$ , rayo delta, etc.).

Se observan estas partículas debidas tanto a radiación cercana (Tierra, atmósfera, etc.) como a causa de los rayos cósmicos. Como estamos a poca altura sobre el nivel del mar, veremos principalmente protones, electrones, partículas  $\alpha$  y muones. Si viajásemos con esta cámara en un avión a mucha altura se podría apreciar esta radiación con mayor frecuencia, así como partículas menos corrientes (como los kaones) que se desintegran antes de llegar a la Tierra (pese a aplicar el boost de Lorentz).

Por otro lado, se selecciona la imagen donde se aprecia el abanico de partículas  $\alpha$  emitido por la muestra radioactiva que se sitúa junto a la cámara.

Otro comentario pertinente es que la cámara de niebla tiene un tiempo de inactividad (tiempo muerto) después de que aparece la traza de una partícula. Es por ello que en ocasiones se puede dar la situación de ver trazas cortadas por la mitad o zonas con un hueco anómalo. La explicación es que en esa zona ha habido poco antes una ionización, con lo que el medio activo no ha vuelto todavía al estado inicial para poder volver a ionizarse y revelar las trayectorias de las partículas.

### 4.2 Identificación de sucesos

En este apartado, se identifican procesos de desintegración que se dan en el medio activo de la cámara. En especial, se busca una V de partículas  $\alpha$ , una V de materialización, que son sucesos relativamente frecuentes, y la desintegración de un muón en un electrón, que se denomina suceso “raro” por ser muy poco frecuente que se observe con claridad (enmascarado por el fondo).

Si la fuente radioactiva que colocamos no estuviese aislada y fuese más activa, las partículas  $\alpha$  llegarían con mayor intensidad y energía a la cámara. En estas condiciones, también seríamos capaces de encontrar la transmutación atómica de átomos de nitrógeno. Pero con la muestra de que disponemos o con las partículas  $\alpha$  ambientales, la escala baja de intensidad hace muy

improbable que observemos este fenómeno de colisión nuclear (escala de distancias muy pequeña requiere intensidades altas).

Por otro lado, también es factible que se observe la aniquilación de un positrón en dos fotones. No obstante, no es muy probable que ambos fotones generen fotoelectrones al instante (interaccionan poco). Este hecho, unido a que no disponemos de campos magnéticos para distinguir electrones de positrones, hace difícil distinguir con certeza este suceso entre otros fotoelectrones de otros procesos y de la radiación de fondo.

Aparte, los neutrones cósmicos pueden interaccionar fuertemente con núcleos de oxígeno o nitrógeno y producir una partícula cargada que deja su traza en la cámara. No obstante, dado que el neutrón no deja traza al ser neutro, es casi imposible distinguir este suceso, ya de por sí poco frecuente, entre el fondo de radiación.

### 4.3 Medida de la concentración de radón atmosférico

En la cámara de difusión, podemos observar partículas  $\alpha$  provenientes principalmente de los rayos cósmicos y de la serie del  $^{238}\text{U}$ , a causa de la presencia del gas radón (parte de dicha cadena) en la atmósfera. Para distinguir uno u otro origen, debemos tener en cuenta la energía cinética de las partículas  $\alpha$ , mucho mayor en la radiación cósmica que en la desintegración de la serie mencionada. Por tanto, sólo se tiene en cuenta las partículas  $\alpha$  con una traza menor a 7 cm, que es la distancia máxima que recorre en el medio activo la partícula  $\alpha$  más energética de las desintegraciones en cadena del  $^{222}\text{Rn}$ .

Para medir la concentración volumétrica a partir de las trazas observadas en el medio activo, debemos conocer sus dimensiones ( $a \times b \times c$ ), cuyos valores se detallan en el montaje experimental (sección 3). Además, se debe tener en cuenta que algunas trazas pueden proceder del exterior del medio activo, es decir, que su trayectoria alcanza antes de depositar toda su energía el medio activo. Esto introduce un factor corrector geométrico que se deduce analíticamente a continuación, y que ha sido verificado con una simulación con el método de Monte Carlo que tiene en cuenta además el tamaño finito de la placa metálica.

Cada punto o diferencial de volumen en la atmósfera emite con cierta probabilidad una partícula  $\alpha$  debida a la presencia del gas radón en una dirección arbitraria. Dichas partículas recorren una distancia media  $L$ , que se ha calculado en el apartado 2.4.2.

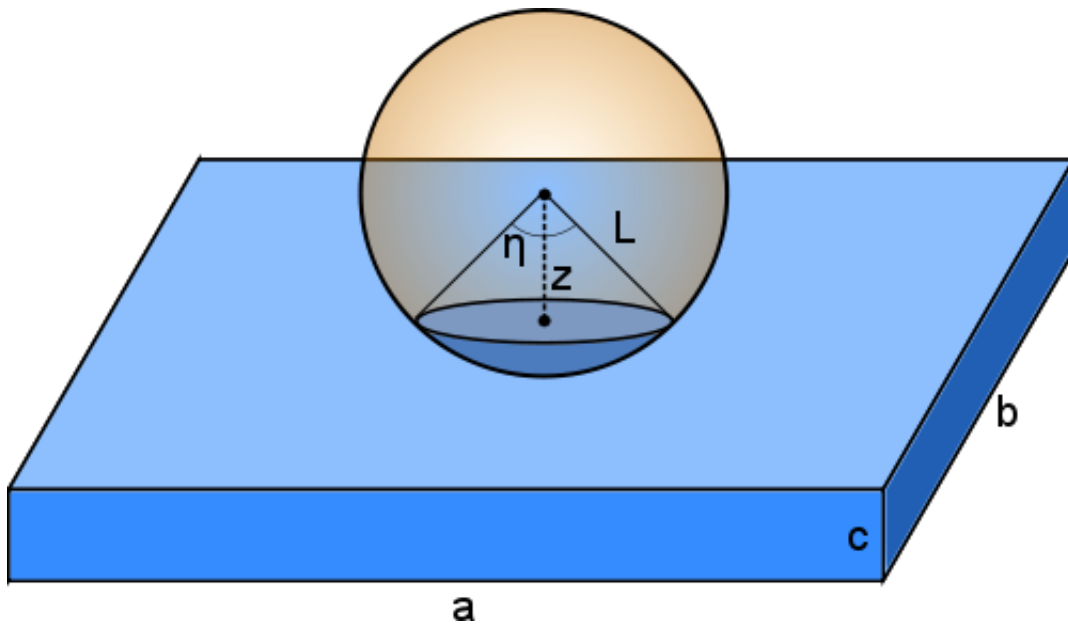
Como se ha comentado, las desintegraciones observables en el medio activo de dimensiones  $a$ ,  $b$  y  $c$  proceden no sólo del volumen de dicho medio, sino de la atmósfera que hay sobre él (por debajo, suponemos que la placa metálica es gruesa y que el aire bajo ella emite partículas que no llegan hasta el medio).

Aparte, se considera que las dimensiones  $a$  y  $b$  son mucho mayores que  $c$ , es decir, que aproximamos el problema por un plano infinito, con lo que sólo hay dependencia en la dirección vertical, que denominamos  $z$ . Es decir, se desprecian los efectos de borde para poder obtener un resultado analítico. Por tanto, las desintegraciones que se registran en la cámara provienen del volumen del medio activo más una contribución de una parte del volumen sobre la placa. Llamamos  $V$  al volumen del medio activo y  $V_{ef} = V + V'$  al volumen efectivo del que provienen las desintegraciones. El objetivo es determinar  $V'$  a partir de la longitud media  $L$  recorrida por las partículas  $\alpha$ .  $V'$  será, como cota superior, una capa sobre el plano del medio activo de espesor  $L$ , pues los puntos más allá de  $L$  no alcanzan dicho medio.

Los núcleos que se desintegran emiten las partículas  $\alpha$  en dirección arbitraria, y en promedio la radiación es isótropa radial en torno al punto. La consecuencia de esto es que los puntos en el interior del medio activo siempre emiten radiación que genera una traza. No obstante, un punto justo por encima del medio activo sólo emite hacia el medio activo la mitad de veces; la otra mitad, en promedio, tiene dirección hacia arriba y no llega al medio. Esto nos indica que estaremos registrando una actividad parcial  $A'$ , pues no tenemos en cuenta todo el ángulo sólido de emisión.

$$A' = A * \chi \quad (5)$$

El factor  $\chi$  se obtiene calculando qué porcentaje de la radiación de todo el ángulo sólido entra en el detector. Para ello utilizamos el siguiente esquema:



**Figura 15:** Esquema del cálculo del factor de corrección geométrico

Como se observa, para un punto de coordenada  $z$  sobre el medio activo, la proporción detectada corresponde al área  $S'$  de la esfera de radio  $L$  que interseca con el medio activo respecto al área total  $S$ . Una analogía visual sería la situación de una pelota flotando en el agua que podemos hundir más o menos (coordenada  $z$ ) respecto al nivel del agua. Lo que tratamos de calcular es qué porcentaje ( $S'/S$ ) de la superficie de la pelota está mojada.

El área  $S'$  se calcula mediante la integración en coordenadas esféricas locales, centradas en el punto de coordenada  $z$  y con el eje hacia abajo:

$$z = L \cos(\eta/2) \quad (6)$$

$$S = 4\pi L^2 \quad (7)$$

$$S' = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\eta/2} L^2 \sin(\theta) d\theta d\phi = 2\pi L^2 [1 - \cos(\eta/2)] \quad (8)$$

$$\chi = S'/S = \frac{1 - \cos(\eta/2)}{2} \quad (9)$$

Para calcular el volumen efectivo de exceso  $V'$ , supondremos que:

$$V' = abc' \quad (10)$$

donde  $c'$  es la altura del volumen efectivo que contribuye a la radiación. El valor de  $c'$  se obtiene mediante integración de la ecuación 9 para valores de  $z$  desde 0 hasta  $L$ , es decir, pesando cada diferencial de  $z$  por la proporción que contribuye a la radiación:

$$c' = \int_{z=0}^L \chi dz \quad (11)$$

Utilizando la relación 6 para cambiar a la variable  $\eta$ :

$$c' = \int_{z=0}^L \frac{1 - \cos(\eta/2)}{2} dz = \int_{\eta=\pi}^0 \frac{1 - \cos(\eta/2)}{2} \frac{(-L) \sin(\eta/2)}{2} d\eta \quad (12)$$

$$c' = \frac{L}{4} \int_0^\pi [1 - \cos(\eta/2)] \sin(\eta/2) d\eta = \frac{L}{4} \int_0^\pi \sin(\eta/2) d\eta - \frac{L}{4} \int_0^\pi \sin(\eta/2) \cos(\eta/2) d\eta \quad (13)$$

$$c' = \frac{L}{4} \left[ -2 \cos(\eta/2) \right]_0^\pi - \frac{L}{4} \left[ \sin^2(\eta/2) \right]_0^\pi = \frac{L}{4} (2 - 1) = \frac{L}{4} \quad (14)$$

Por consiguiente, el factor de corrección geométrico  $\epsilon_{vol}$  es, de acuerdo con la fórmula a demostrar del [5, Guión de laboratorio]:

$$\epsilon_{vol} = \frac{V}{V_{ef}} = \frac{V}{V + V'} = \frac{1}{1 + \frac{c'}{c}} = \frac{1}{1 + \frac{L/4}{c}} < 1 \quad (15)$$

De acuerdo con los valores tabulados en [5, Guión] y lo deducido en el apartado 2.4.2, el valor de  $L$  promedio para las distintas partículas  $\alpha$  de la cadena del radón a  $T=0^\circ\text{C}$  (medio activo y sus proximidades están a esa temperatura) es de  $5,0 \pm 1,2$  cm. Este valor se obtiene tomando la media aritmética, dado que la actividad de los tres hijos es similar en el equilibrio secular (figura 12).

El factor geométrico que se obtiene, conocido el valor de  $c = 5,0 \pm 2,5$  mm, es:

$$\epsilon_{vol} = 0,29 \pm 0,10 = (29 \pm 10)\% \quad (16)$$

Este resultado coincide con el valor obtenido mediante la simulación de Monte Carlo ( $\epsilon_{vol} \approx 30\%$ ), que tiene en cuenta además que  $a$  y  $b$  son finitos.

Por tanto, si se miden  $N'$  partículas  $\alpha$  (debidas exclusivamente a la desintegración del radón) en un cierto intervalo de tiempo  $T_0$ , y la concentración  $C_{rad}$  de radón por unidad de volumen y tiempo es:

$$C_{rad} = \frac{N'}{T_0 V_{ef}} = \frac{N'}{T_0 V} \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \quad (17)$$

Los tres núcleos de esta cadena cuyas partículas  $\alpha$  se detectan en el medio son el  $^{222}\text{Rn}$ , el  $^{218}\text{Po}$  y el  $^{214}\text{Po}$ , indistinguibles entre sí. Las restantes desintegraciones producen partículas  $\beta$  o bien tienen una vida media mucho mayor que el tiempo de observación.

Por tanto, ambos polonios se producen en la cadena del Rn y alcanzan con rapidez el equilibrio secular frente a núcleos de mayor estabilidad, y suponemos que la actividad de los tres núcleos es aproximadamente la misma. Es decir, por cada átomo de radón que haya en la atmósfera, observamos tres partículas  $\alpha$  asociadas.

Por consiguiente, si contamos  $N_0$  partículas  $\alpha$  en la cámara en el intervalo de tiempo  $T_0$ , el número de núcleos de radón  $N'$  desintegrados (ecuación 17) es  $N' = N_0/N_{iso}$ , donde  $N_{iso} = 3,0 \pm 0,5$  es el número de núcleos que contribuyen a la emisión de partículas  $\alpha$ , como se ha comentado.

En definitiva, el valor de la concentración de radón atmosférico (actividad en aire por unidad de volumen) es:

$$C_{rad} = \frac{1}{\epsilon_{obs}} \frac{N_0}{N_{iso}} \frac{1}{T_0} \frac{1}{ab(c + L/4)} \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \quad (18)$$

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

El error asociado a esta medida, a partir de la propagación de errores, es:

$$\frac{\delta(C_{rad})}{C_{rad}} = \sqrt{\frac{\delta(\epsilon_{abs})^2}{\epsilon_{abs}^2} + \frac{\delta(N_0)^2}{N_0^2} + \frac{\delta(N_{iso})^2}{N_{iso}^2} + \frac{\delta(a)^2}{a^2} + \frac{\delta(b)^2}{b^2} + \frac{\delta(\frac{L}{4})^2 + \delta(c)^2}{(\frac{L}{4} + c)^2}} \quad (19)$$

Para obtener un valor de  $N_0$  fiable, realizamos en vivo dos contajes de partículas  $\alpha$  de 5 minutos por persona en grupos de 4, para comparar entre los distintos observadores y distintos momentos de observación. Posteriormente se recuentan las partículas  $\alpha$  a partir de tres intervalos de 5 minutos de la grabación. Finalmente se extraen dos valores valor promedio de  $N_0$ , uno para el método en vivo y otro para el de la grabación, y se comparan entre sí. La fluctuación a cada recuento, de acuerdo con la distribución de Poisson, es la raíz del número de cuentas.

Esta medida de  $C_{rad}$  es una estimación la concentración del radón atmosférico con un error considerable, dadas las aproximaciones teóricas realizadas, que el tiempo de recuento es pequeño (tres medidas de 5 minutos) y que no utilizamos ningún criterio objetivo para discernir si las partículas  $\alpha$  observadas se corresponden o no a rayos cósmicos, salvo la discriminación “a ojo” según la longitud de la traza.

El orden de magnitud del valor obtenido debe ser comparable al valor tabulado en la bibliografía [1, Radon levels] para la ciudad de Valencia y alrededores (el experimento se realiza en el IFIC, situado en Paterna). Para la zona de l'Horta, el valor tabulado es:

$$C_{rad,tab} = 32,2 \pm 1,2 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$$

El experimento se realiza un martes a las 10h00, con lo que suponemos que el lugar está adecuadamente ventilado (artificialmente). De esta manera excluimos aumentos significativos de la concentración en lugares con escasa ventilación o que lleven varios días cerrados.



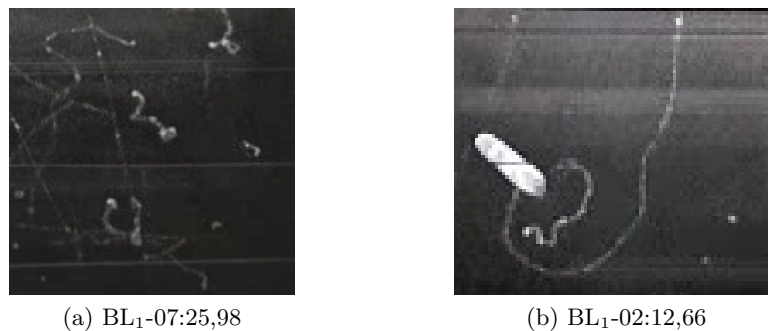
## 5 Medidas y resultados

### 5.1 Identificación de partículas

De acuerdo con el procedimiento experimental ya comentado, se identifican las siguientes partículas en la cámara de niebla de difusión a partir de tres videos de grabación realizados por los distintos grupos del laboratorio durante 20 minutos para la radiación de fondo, y uno de 2 minutos con la fuente radioactiva junto a la cámara.

Se utiliza la notación BG, BL<sub>1</sub> y BL<sub>2</sub> para cada uno de los videos del fondo, y RA para el de la muestra radioactiva. Se especifica el punto temporal donde se han tomado los fotogramas del video en el formato mm:ss,cs (minutos : segundos , centésimas de segundo).

**Fotoelectrones y electrones Compton** Su trayectoria es tortuosa y corta, con múltiples cambios de dirección debido a colisiones, y la traza es fina. Proviene de la interacción de los fotones con la materia (absorción fotoeléctrica, dispersión Compton y producción de pares). En el caso de producción de pares, el electrón y positrón generados dejan una traza en forma de V (como se ve en el centro de la figura 16a. Para fotones de alta energía se aprecian con mayor claridad Vs grandes y rectas, que se tratan específicamente el apartado 5.2.3.



**Figura 16:** Fotoelectrones y electrones Compton, junto a una partícula  $\alpha$  en (b)

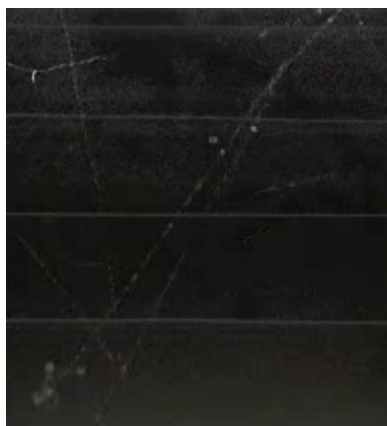
**Electrones  $\beta$**  Su traza es fina, errática y suelen curvarse menos que los fotoelectrones o electrones Compton. Proviene de la desintegración  $\beta$  (presente por ejemplo en la cadena del radón). La diferenciación con los otros electrones no siempre está clara, con lo que no es un método plenamente objetivo ni una ciencia exacta, sino más bien un análisis cualitativo aproximado.



**Figura 17:** Electrón  $\beta$ , BG-01:16,69

Las trayectorias tienen curvatura por efectos de scattering múltiple aleatorio, pero no por campos magnéticos, que no se han utilizado en este experimento.

**Electrones cósmicos** Son electrones muy energéticos, de traza fina, muy larga y sin apenas desviaciones. De hecho, pueden atravesar toda la cámara sin sufrir desviaciones.



**Figura 18:** Electrones cósmicos, BL<sub>1</sub>-08:33,68

También podría ser un muón, aunque la densidad de ionización es algo baja. Lo que sí podemos decir con certeza es que son partículas ligeras de alta energía.

**Partículas  $\alpha$**  Su trayectoria es recta, corta, y la traza muy gruesa y brillante, debido a su alto poder ionizante (depositan su energía en muy poco espacio). Si la longitud de la traza es menor de 7 cm, proviene de la cadena del radón; en caso contrario, de los rayos cósmicos.



(a) BL<sub>1</sub>-12:34,32



(b) BG-19:45,24

**Figura 19:** Partículas  $\alpha$  debidas al radón atmosférico (a) y a los rayos cósmicos (b)

Las imágenes (a) y (b) mantienen las proporciones relativas, con mayor longitud de traza para el caso de los rayos cósmicos que para el radón atmosférico, de acuerdo con lo ya comentado. No obstante, la partícula  $\alpha$  cósmica, de unos 10 cm (longitud de traza se ha estimado sobre la imagen proporcionalmente respecto a las dimensiones de la cámara) también podría ser una  $\alpha$  del  $^{214}\text{Po}$ , que tiene el mayor alcance de acuerdo con lo desarrollado en los fundamentos teóricos. La razón es que en las zonas laterales de la cámara, el medio activo fluía con mayor velocidad, con lo que las trazas se alargaban más (por la zona de la izquierda).

Por tanto, no podemos excluir esta posibilidad, aunque nos inclinamos más por pensar que tiene origen cósmico.

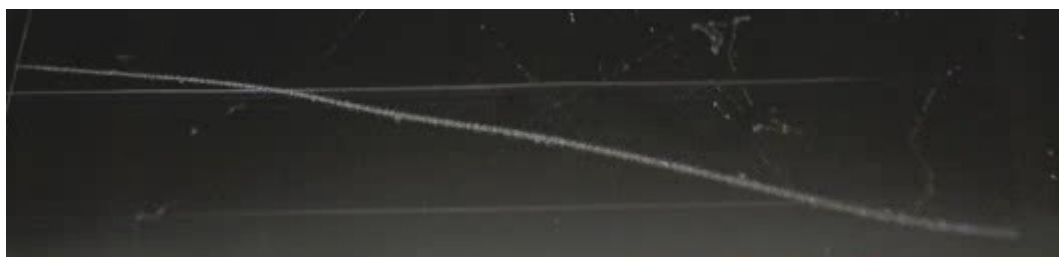
En la figura 19b se aprecia claramente la curva de Bragg, con el punto más intenso a la derecha, al final de la trayectoria de la partícula  $\alpha$ . En la figura 19a la luminosidad es más uniforme porque la imagen se ha tomado cuando la traza está a punto de desaparecer, es decir, cuando la ionización y luminosidad han alcanzado su máximo.

**Protones** Su trayectoria es recta, larga, y la traza de grosor y luminosidad medios. Proceden de los rayos cósmicos.

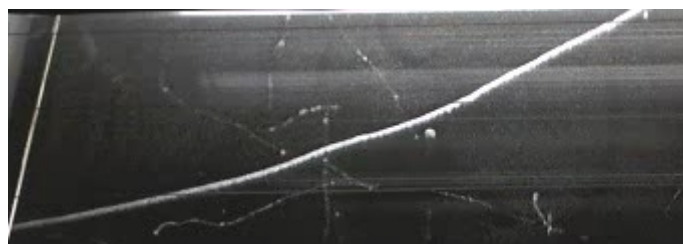


**Figura 20:** Protón energético proveniente de los rayos cósmicos y partícula  $\alpha$  del radón, BG - 19:10,19

Se observa la partícula  $\alpha$  a la derecha, de traza corta y luminosidad algo mayor (se comprueba en los fotogramas siguientes), por lo que descartamos que se trate de un protón que entre oblicuo en la cámara y recorra menos camino en el volumen activo que el otro.



(a) BG-01:18,01



(b) BG-02:22,94

**Figura 21:** Dos protones provenientes de los rayos cósmicos

En este caso, los protones tienen una traza más gruesa y son menos rectos. Esto puede ser debido a que tienen menor energía que en la figura 20, con lo que se son más lentos (ionizan más por unidad de longitud) y sufren más scattering múltiple (cambio de dirección en dos o tres puntos) provocando la curvatura de la trayectoria.

También es posible que sean muones de baja energía, aunque el grosor y luminosidad de la traza, comparados con los que se presentan en un apartado posterior como muones, nos inclinan a pensar que se trata de protones (traza más intensa).

De acuerdo con las relaciones energía-alcances para protones de la figura 6, los protones observados, que recorren unos 20 a 40 cm, tienen una energía de unos 3 a 6 MeV.

**Positrones** Su trayectoria es recta y de traza similar a la del electrón. Aparecen en las Vs de materialización. Dada la ausencia de campos magnéticos, es indistinguible qué rama corresponde al electrón y cuál al positrón, pero la traza es similar, por lo que se representa una de las ramas arbitrariamente. No se ha conseguido distinguir con claridad ninguna aniquilación de un electrón con un positrón.



**Figura 22:** Positrón, BL<sub>1</sub>-07:22,49

**Muones** Su trayectoria es recta, similar a la de los electrones  $\beta$ , pero con una más gruesa (mayor densidad de ionización). Como provienen de los rayos cósmicos, suelen ser muy energéticos y recorren toda la cámara sin sufrir apenas desviaciones. Sólo es posible distinguirla del electrón si estos muones son muy energéticos (y en consecuencia su densidad de ionización), o bien si se observa la desintegración muón electrón en L (donde es más fácil apreciar la diferencia de densidades).

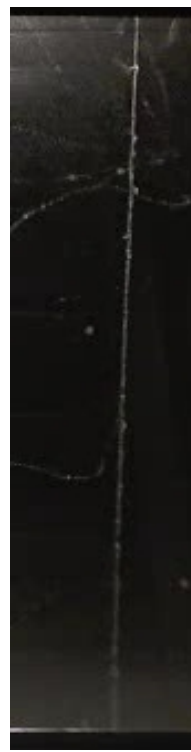


**Figura 23:** Muón y partícula  $\alpha$  provenientes de los rayos cósmicos, BG-19:45,40

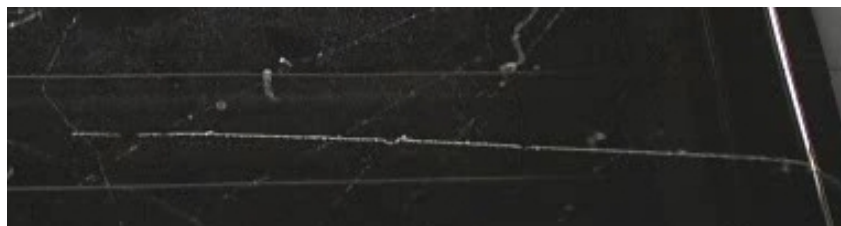
La identificación del muón es algo dudosa, dado que tiene una zona (arriba) donde la densidad de ionización es mayor, similar a la de un protón. No obstante, por la longitud (cruza toda la cámara) y grosor medio de la traza nos inclinamos a pensar que es un muón.



(a) BL<sub>1</sub>-01:20,27



(b) BL<sub>1</sub>-02:35,11



(c) BG-05:27,12

**Figura 24:** Tres muones energéticos provenientes de los rayos cósmicos cruzando toda la cámara

En el caso (a), la trayectoria es algo curvada debido a que sufre un proceso de dispersión múltiple, lo que puede suceder cuando el muón ya ha cedido gran parte de su energía.

Estas trazas podrían confundirse en ocasiones con protones, por ejemplo en el caso (c), con luminosidad algo mayor, aunque nos inclinamos por pensar que son muones. Si dispusiésemos de campos magnéticos, sería fácil distinguirlos a partir de su curvatura opuesta (cambio de signo en la carga) y excluir una u otra posibilidad con mayor garantía y justificaciones menos subjetivas.

**Fuente radioactiva** Colocamos junto a la cámara una fuente de  $^{226}\text{Ra}$  sellada herméticamente, es decir, el radón producido no migra a la cámara. Esta muestra emite distintas partículas radioactivas, principalmente partículas  $\alpha$  y  $\beta$ , además de fotones.



**Figura 25:** Radiación de una muestra de  $^{226}\text{Ra}$ , RA-00:24,61

Observamos un abanico de partículas  $\alpha$  con origen en la fuente (zona de la izquierda), con una traza menor y menos luminosa que las asociadas al radón atmosférico. Esto es lógico, puesto que dichas partículas pierden parte de su energía en atravesar la pared del continente de la muestra.

Se aprecian muchas partículas  $\alpha$ , debido a que la muestra emite más radiación que la asociada al radón atmosférico (mayor concentración de núcleos radioactivos). Aparte, se observan muchos fotoelectrones y electrones Compton en toda la cámara, a raíz de los fotones que provienen principalmente de la desintegración de la cadena del radón (la radiación ambiental queda enmascarada), que está contenido herméticamente dentro de la muestra.

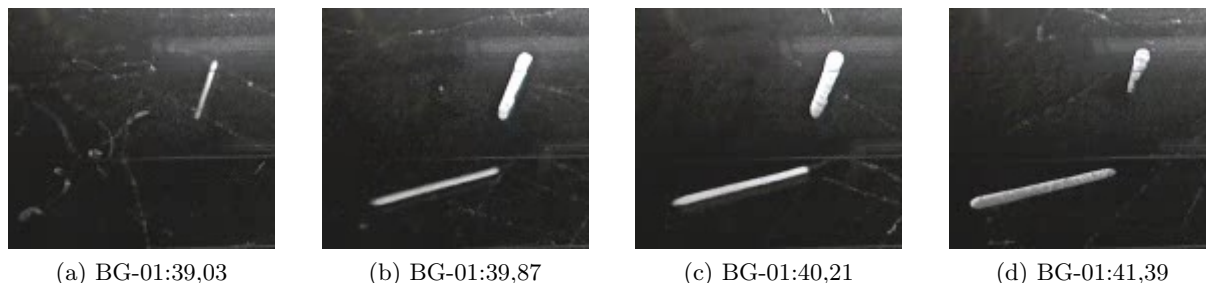
En este caso se puede excluir la presencia de electrones  $\beta$  porque las trazas observadas están relativamente lejos de la fuente. Los electrones  $\beta$  deberían atravesar la pared del continente y cruzar la cámara, lo cual es poco probable dada su energía y recorrido libre medio. Por contra, los fotones sí atraviesan fácilmente la pared y la cámara, y pueden interactuar en el medio activo y generar fotoelectrones o electrones Compton. Por tanto, se observan dichas trazas en cualquier punto de la cámara con bastante probabilidad.



## 5.2 Identificación de sucesos

### 5.2.1 Cadena de partículas $\alpha$

Dos partículas  $\alpha$  consecutivas en forma de V según la secuencia detallada en el procedimiento experimental.

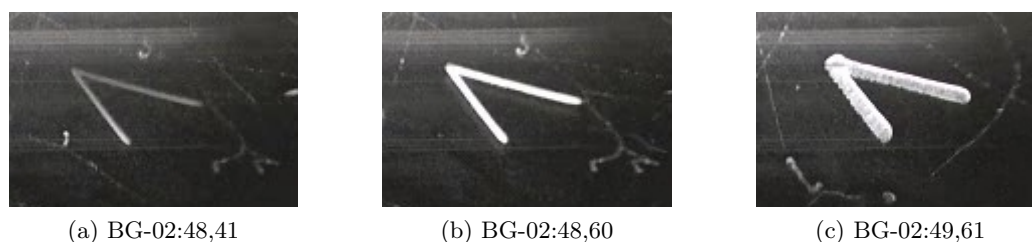


**Figura 26:** Partículas  $\alpha$  en forma de V con retroceso del núcleo intermedio

Se observa claramente que si se prolonga la primera partícula  $\alpha$  (situada arriba) hacia la segunda (abajo), tienen un origen común, lo que implica que se trata de la cadena del radón. Además, se observa que la secuencia temporal de aparición de cada  $\alpha$  es la adecuada, así como la dirección de movimiento de éstas (desde el punto menos al más brillante, de acuerdo con la curva de Bragg).

Se aprecia que la traza de las partículas  $\alpha$  va haciéndose gruesa conforme pasa el tiempo, hasta desaparecer. En la figura 26d ya ha desaparecido la parte inicial de la trayectoria de la primera partícula  $\alpha$ . La secuencia de desaparición de la traza también nos da información sobre la dirección de movimiento de ésta, cuando la aparición es demasiado rápida o la traza igual de luminosa en todos los puntos como para distinguirlo a partir de estos criterios.

A partir de la secuencia temporal de imágenes, se observa que el núcleo intermedio se ha desintegrado en escasas centésimas de segundo, concretamente en  $0,8 \pm 0,2s$ . Por contra, en el siguiente ejemplo vemos que el núcleo intermedio no tiene tiempo de retroceder, dado que se desintegra prácticamente al instante (el video no tiene suficientes fotogramas por segundo como para resolver el orden).



**Figura 27:** Partículas  $\alpha$  en forma de V sin retroceso del núcleo intermedio

Se observa que el suceso en forma de V es prácticamente instantáneo, es decir, la desintegración del núcleo intermedio tiene lugar en un intervalo de tiempo menor a la resolución de la cámara de video (12,5 fotogramas por segundo). Por tanto, la desintegración tiene lugar en un intervalo de tiempo menor a 0,08s.

También se aprecia que la rama izquierda de la V está algo más definida que la derecha, lo que es un indicio de que se ha producido antes que la rama derecha. Además, dicha rama va en

la dirección correcta, es decir, la partícula  $\alpha$  se aleja del origen y tiene su punto más brillante al final de su recorrido, de acuerdo con la curva de Bragg.

El hecho de que la desintegración sea tan rápida puede extrañar en primera instancia, puesto que según la cadena radioactiva la vida media de los isótopos que separan partículas  $\alpha$  es de decenas minutos (figura 11). La explicación es que la probabilidad de que la desintegración sea tan rápida es relativamente pequeña, por lo que dichos sucesos en forma de V son bastante escasos. Si la vida media de los isótopos fuese del orden de segundos, estaríamos observando continuamente Vs.

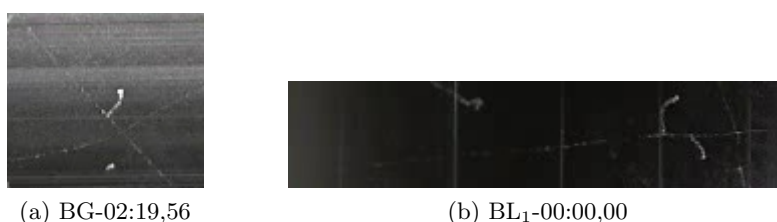
En concreto, podemos suponer que las dos partículas  $\alpha$  provienen de la desintegración del  $^{222}\text{Rn}$  seguida de la del  $^{218}\text{Po}$ , con una vida media de 3,1 minutos. Las que provengan del  $^{218}\text{Po}$  seguidas del  $^{214}\text{Po}$  son mucho más improbables, con una vida media acumulada (varios isótopos en la cadena) de 46,7 minutos.

Por tanto, las Vs provendrán fundamentalmente del primer caso, y la probabilidad de que dada una partícula  $\alpha$  del radón, se produzca la siguiente antes de  $t_{max} = 1$  segundo es  $P(t_{max}) = 1 - e^{-t_{max}/\tau} \simeq t_{max}/\tau = 0,5\%$ . Para el segundo caso, la probabilidad es del 0,04%. Una comprobación experimental sencilla de estos porcentajes es medir qué porcentaje de las partículas  $\alpha$  observadas vienen seguidas de una segunda partícula antes de  $t_{max}$ .

Otra posible explicación es que se traten de Vs accidentales (la probabilidad de que esto suceda no es nula) de desintegraciones de distintos núcleos padres (dos  $\alpha$  no consecutivas). Por ello, es fundamental fijarse en que tengan exactamente el mismo origen (tras prolongar la traza) para descartar este hecho, y que el retroceso no sea muy grande. Aproximadamente el 2% del calor de reacción se transfiere al núcleo hijo como energía cinética. Si las partículas  $\alpha$  son de 6 MeV y recorren en promedio unos 5 cm, el núcleo se llevaría 0,3 MeV y recorrería una distancia bastante menor, aunque hay que tener muy en cuenta el movimiento del medio activo (en el video se puede observar su dirección y velocidad).

### 5.2.2 Rayo delta

Se aprecian ionizaciones secundarias debidas a electrones en forma de pequeñas ramificaciones de la traza principal más gruesa.



**Figura 28:** Rayos delta

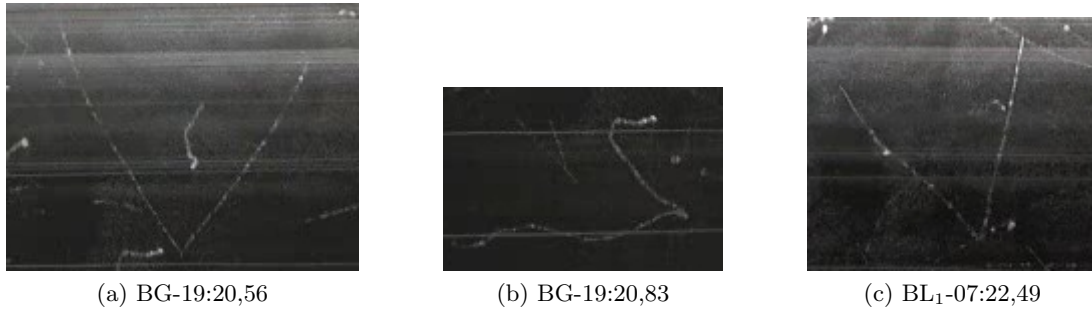
Se observan dos rayos delta en la parte derecha de la figura 28b (imagen rotada 90° en sentido horario) como ramificaciones de la traza principal, que provienen de una partícula ligera energética, seguramente de un electrón cósmico.

Esta situación se da con relativa frecuencia en las trazas observadas correspondientes a partículas energéticas, que además de ionizar el medio activo (excitar), tiene suficiente energía para arrancar a dos electrones en distintos puntos, que a su vez dejan su traza al ser una partícula cargada.

Se puede ver un ejemplo similar en el caso (a) y a la derecha de la V de  $\alpha$  en la figura 27b, donde se aprecian las ramificaciones de la traza de un electrón.

### 5.2.3 Producción de pares

Trazas similares en forma de V, con un origen común. No se distingue entre electrón y positrón por no disponer de campos magnéticos. La aniquilación del positrón genera dos fotones de 511 keV, que podrían producir fotoelectrones o electrones Compton, pero no se logra observar dicho fenómeno.



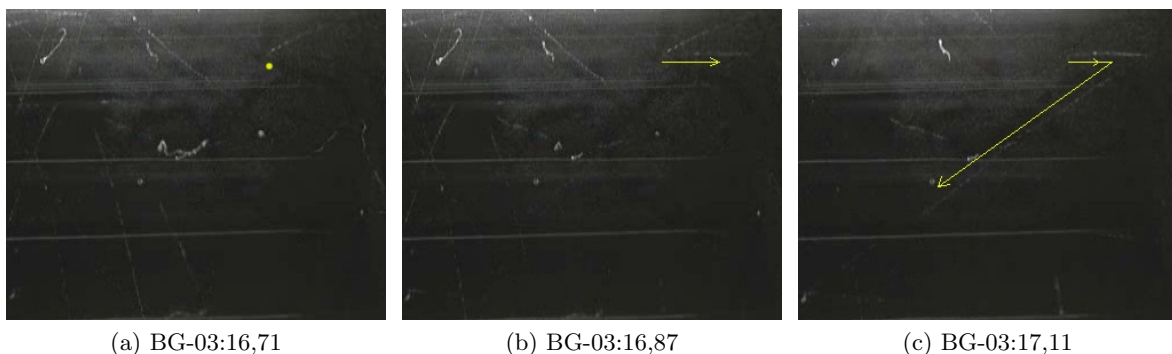
**Figura 29:** Vs de materialización

Las trayectorias están ligeramente curvadas no por la presencia de un campo magnético, sino por efectos de scattering múltiple aleatorio. En la figura 29a se observa un electrón Compton,  $\beta$  o fotoelectrón entre las ramas de la V. En la figura 29b se aprecian una V más pequeña en la parte superior izquierda aparte de la V grande.

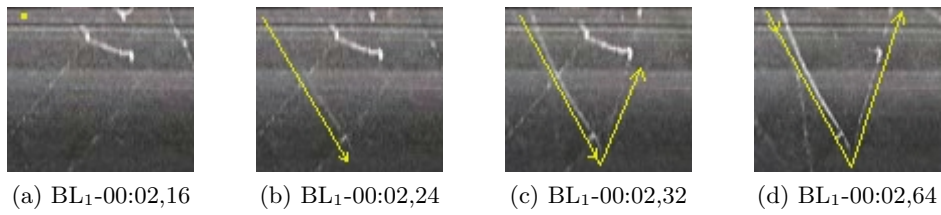
### 5.2.4 Desintegración de un muón

Se observa la secuencia de desintegración de varios muones en distintos puntos del video (hasta 18). Se hace una selección de los tres candidatos más visibles, que se presentan en las figuras a continuación. Las imágenes no tienen buena definición, por lo que se ha marcado con una línea amarilla paralela a las trazas del suceso.

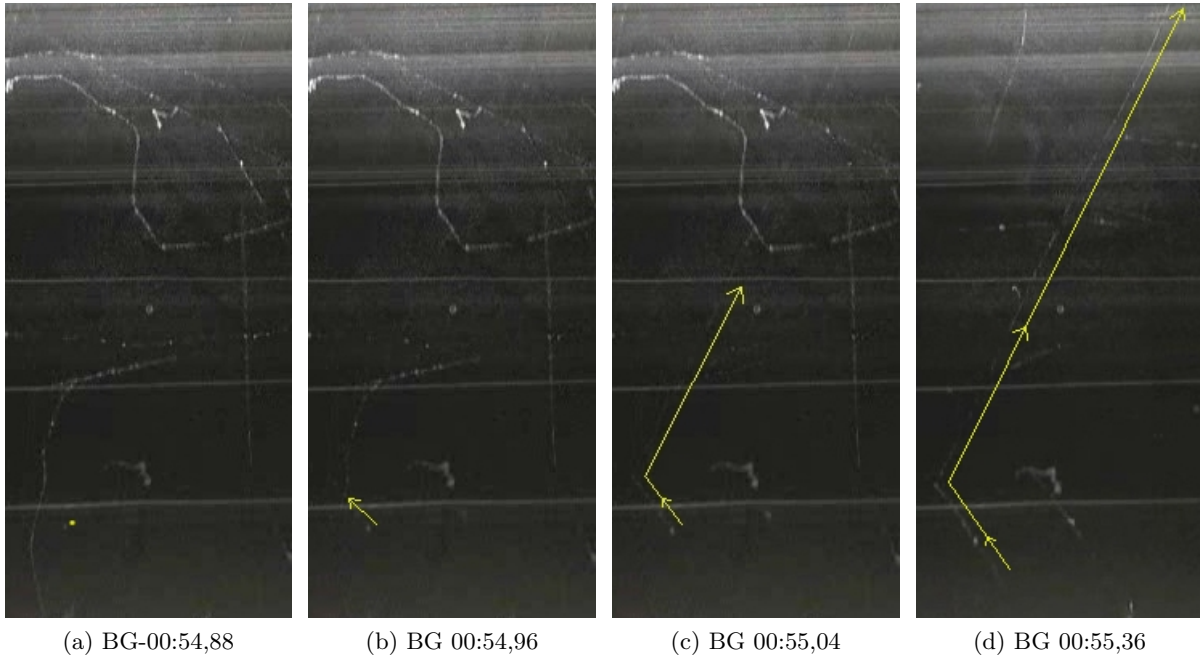
Para analizar la desintegración con mayor detalle, puede consultarse el video fotograma a fotograma en los puntos indicados. Aparte, la secuencia de fotogramas de los 18 candidatos se entrega en formato electrónico al profesor del laboratorio.



**Figura 30:** Desintegración en vuelo de un muón cósmico



**Figura 31:** Desintegración en vuelo del segundo muón cósmico



**Figura 32:** Desintegración en vuelo del tercer muón cósmico

En los tres casos se verifica la forma de L de la traza, la diferente densidad de ionización del muón y el electrón, y la secuencia temporal correcta (primero aparece el muón, con mayor densidad de ionización, se desintegra, y a continuación se observa la traza fina del electrón).

Por otro lado, a partir de la secuencia temporal se comprueba que el proceso de aparición de la traza del muón en la cámara, desintegración y aparición de la traza del electrón tiene lugar en un tiempo muy corto, entre 0,08 y 0,16 segundos, lo que es consistente con la vida media de los muones en el sistema laboratorio (teniendo en cuenta efectos relativistas).

### 5.3 Medida de la concentración de radón atmosférico

Contando el número de partículas  $\alpha$  en la cámara en un intervalo de tiempo  $T_0 = 5$  min (error despreciable), podemos estimar el concentración de radón, utilizando la ecuación 18. Los valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  se detallan en la sección 3 y los de  $L$ ,  $\epsilon_{abs}$  y  $N_{iso}$  en el apartado 4.3. El error de nuestra medida de la concentración se estima mediante propagación cuadrática de errores (ecuación 19).

En la tabla 2 se pueden ver las partículas contadas por cada grupo. Para calcular la concentración, se ha utilizado la media de las medidas, y se ha tomado como error el mayor entre la desviación estándar y la raíz de la media.

**Tabla 2:** Partículas  $\alpha$  contadas en vivo en 3 intervalos independientes de  $T_0 = 5$  minutos

Grupo	Medidor	1ª tanda	2ª tanda	$N_{0,grupo}$	$C_{rad,grupo}$	$N_0$	$C_{rad}$
1	C	93	121	$100 \pm 19$	$31 \pm 11 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$	$98 \pm 14$	$31 \pm 10 \text{ Bq/m}^3$
	P	80	95				
	Pa	87	114				
	L	80	131				
2	F	118	119	$97 \pm 13$	$30 \pm 10 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$		
	R	87	90				
	Ca	91	88				
	E	90	91				
3	J	112	101	$99 \pm 10$	$31 \pm 10 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$		
	M	104	89				
	La	93	92				

Se observa que la dispersión de las medidas entre grupos es compatible con las fluctuaciones asociadas a la distribución de Poisson. No obstante, cabe señalar que el criterio de recuento de las partículas  $\alpha$  en vivo es subjetivo, por lo que las discrepancias entre uno y otros medidores del mismo grupo se deben a contar o no algunas partículas con traza sobre los 6-7 cm, así como al conteo o no de los puntos luminosos gordos cuando estas partículas entran en vertical. A pesar de estos errores sistemáticos, las discrepancias son del orden de la raíz de la media (algo mayores), con lo que el método experimental es aceptable.

En la tabla 3 se pueden ver las partículas  $\alpha$  contadas a partir de la grabación, en distintos intervalos de tiempo. En este caso, se ha usado como error la raíz de la media, por ser mayor que la desviación estándar.

**Tabla 3:** Partículas  $\alpha$  contadas a partir de la grabación

Intervalo	Cuentas	$N_0$	$C_{rad}$
0:00-5:00	97	$94 \pm 10$	$29 \pm 9 \text{ Bq/m}^3$
5:00-10:00	99		
14:34-19:34	87		

Vemos que el valor obtenido para la concentración  $C_{rad}$  de radón por el método en vivo es de  $31 \pm 10 \text{ Bq/m}^3$  y con la grabación de  $29 \pm 9 \text{ Bq/m}^3$ , resultados que son plenamente compatibles con el valor tabulado para la zona de l'Horta,  $32, 2 \pm 1, 2 \text{ Bq/m}^3$ . Esto indica que el edificio estaba bien ventilado, y no había acumulación de radón.

Nuestra medida tiene un error relativo grande (30%) y no podemos dar un valor más preciso a causa de las aproximaciones realizadas y los errores experimentales comentados, pero sí podemos concluir que no hemos encontrado niveles nocivos de radón de acuerdo con la tabla 1.

## 6 Conclusiones

Durante la realización de esta práctica, hemos podido ver cómo funciona una cámara de niebla, hemos observado la radiación de fondo y hemos cumplido el objetivo de visualizar las trayectorias de partículas cargadas, distinguir su traza, así como estudiar distintos procesos de desintegración que ilustran de una manera muy clara los conceptos teóricos estudiados en la asignatura de Física Nuclear. Además, se ha determinado la concentración de radón atmosférico en el edificio del IFIC.

En la identificación de partículas, hemos reconocido electrones de distintas energías (distintos orígenes), positrones, partículas  $\alpha$  del radón y cósmicas, y protones y muones cósmicos. También se ha comparado la radiación ambiental con la provocada por una fuente radioactiva de  $^{226}\text{Ra}$ . En la identificación de sucesos, se ha encontrado la V de partículas  $\alpha$  del radón, rayos delta, la V de materialización, así como un suceso raro: la desintegración en vuelo de un muón cósmico.

Una de las mayores dificultades a la hora de observar en la cámara de niebla ha sido distinguir ciertas partículas de otras. En concreto, los protones, muones y electrones muy energéticos, procedentes de los rayos cósmicos, dejaban una traza en ocasiones indistinguible para el ojo poco experimentado. Aparte, la elevada velocidad de las partículas y formación de la traza, y el número de fotogramas por segundo de la grabación, han hecho que en ocasiones resultase complicado reconstruir un suceso, sobre todo aquellos en los que es importante ver la dirección de movimiento las partículas o el orden en que se produce trazas en V ó L.

En ese sentido, podemos recalcar que las imágenes seleccionadas son aquellas en las que se ha observado en la cámara con mayor claridad una traza característica, que se ha identificado con una partícula con cierta fiabilidad (alta probabilidad), aunque la garantía no es total ya que en ocasiones se producen coincidencias accidentales, la imagen tiene mala resolución, o la traza es muy similar para dos partículas distintas.

Con respecto a la medida de la concentración de radón en la atmósfera, el procedimiento experimental de conteo de partículas  $\alpha$  no es plenamente fiable, en especial a la hora de discriminar las partículas  $\alpha$  que no vienen del radón a partir de la longitud de la traza por distintas razones.

En primer lugar está el hecho de que, cuando la partícula se detectaba cerca del borde de la cámara, el movimiento del alcohol alargaba las trazas considerablemente. En segundo lugar, no podíamos saber el ángulo exacto con el que entraban las partículas, de modo que una traza corta podía provenir de una partícula energética entrando con el suficiente ángulo. En tercer lugar, en la grabación resultaba muy complicado estimar la longitud de las trazas, debido sobre todo a la perspectiva de la imagen, lo que quizás podría solucionarse colocando la cámara desde arriba con un trípode grande. En cuanto al conteo en vivo, también era complicado ajustar a ojo la longitud de la traza y a tiempo real, en especial aquellas que estarían en el límite de los 6-7 centímetros.

A pesar de estas dificultades, los errores debidos al conteo de partículas  $\alpha$  provenientes de otras fuentes no son excesivamente influyentes, pues las partículas  $\alpha$  provenientes de la desintegración de otros radioisótopos terrestres no tienen energía suficiente como para llegar hasta la cámara, y el que las partículas  $\alpha$  del espacio tengan la suficiente energía como para atravesar la atmósfera sin sufrir colisiones, es un suceso muy poco probable que se produce muy pocas veces en toda la grabación. En definitiva, los errores sistemáticos y la dispersión asociada al criterio subjetivo de recuento son ligeramente mayores que las fluctuaciones estadísticas asociadas a la distribución de Poisson (raíz de la media). Esta desviación entra dentro de lo aceptable



experimentalmente, en especial dado el objetivo de determinar el nivel de radón mediante un experimento visual, intuitivo y sencillo que nos da un orden de magnitud para descartar niveles nocivos y una estimación buena de la concentración de radón, más allá de valores precisos que requerirían de aparatos específicos e intervalos de tiempo de recuento mayores.

Algunas posibles mejoras a las fuentes de error señaladas, son la introducción de una cámara con mayor resolución y número de fotogramas por segundo, así como la grabación desde un punto cenital para reducir la angulación de la imagen y poder medir mejor las distancias.

Otra mejora sustancial sería la introducción de campos magnéticos que permitan distinguir la carga de distintas partículas. Esto supondría un salto cualitativo grande a la hora de identificar distintas partículas y sucesos con mayor garantía.

En resumen, mediante la cámara de niebla hemos observado la radiación de fondo, identificado distintas partículas y sucesos que ilustran los conceptos teóricos estudiados, y hemos estimado la concentración de radón en el edificio del IFIC sin detectar niveles nocivos para la salud.

## Bibliografía

- [1] *Radon Levels in the Valencian Community (Spain). Results in the province of Valencia (1990-1991)*, J. Environ. Radioactivity, vol 27, nº 2 pp 125-131 (1995)
- [2] *Medición de la concentración de gas Rn-222 en el interior de edificios*, J.J. Llerena Cristobo, Trabajo DEA (2006), Facultad de Física, U. de Santiago de Compostela.
- [3] *Física nuclear y de partículas*, por Antonio Ferrer Soria, Universidad de Valencia (2006) – 2ª edición
- [4] *Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions*, NIST, Physics Laboratory
- [5] Guión de Prácticas del Laboratorio de Física Nuclear y de Partículas, 4º de Física, UVEG
- [6] Transparencias de la asignatura Física Nuclear y de Partículas, 4º de Física, UVEG