

COOKING MUONS

(o cómo construir cámaras de niebla de muy bajo coste con utensilios de cocina)

Jorge Barrio Gómez de Agüero¹; Eva López Pérez²; Gökce Senkul³; Seyhan Ergül³; Supattra Thongnueaha⁴

¹Profesor de Física y Química del IES Rey Fernando VI (S. Fernando de Henares-Madrid); ²Profesora de Física y Química del IES Valmayor (Valdemorillo-Madrid); ³Profesoras de Física y Química del Özel Bilfen Lisesi (Istanbul-Turkey); ⁴Profesora de Física y Química del Thungsong School (Thailand)

Abstract: En el presente artículo se propone la construcción de una cámara de niebla casera de un coste aproximado de 40 euros empleando utensilios de cocina como por ejemplo una ensaladera y un molde de bizcochos o, en otra variante mucho más barata (de aproximadamente unos 5 euros), haciendo uso de un vaso de plástico y un molde de magdalenas. La versatilidad y facilidad de construcción de tal dispositivo permite introducir de un modo muy visual los fundamentos de detección y estudio de partículas subatómicas en las aulas de secundaria y bachillerato, así como posibilitar la realización de pequeños proyectos de investigación relacionados con la Física de partículas.

Finalidad del proyecto

En los planes de estudio de Secundaria y Bachillerato, tanto en las materias de Física como en Física y Química, la Física de partículas se estudia, desgraciadamente, de un modo muy parcial y limitado. De hecho, no es hasta 2º de bachillerato (en la materia de Física) cuando el alumnado da un paso más allá del protón y el neutrón para adentrarse en el conocimiento de su estructura íntima en combinaciones de quarks. Es entonces cuando toma un primer contacto con la estructura de la materia en términos de quarks y leptones.

La finalidad de este proyecto es dar varios pasos más allá, introduciendo la Física de partículas en las aulas de un modo experimental y sorprendentemente económico, sin necesidad de sofisticados aparatos y, en consecuencia, al alcance de todos los bolsillos, no necesitando para ello más requisitos que la voluntad de llevarlo a cabo. Se trata de la construcción de dos variantes distintas de **cámaras de niebla** como detectores de partículas (en nuestro caso **muones**) y que en función de su coste hemos bautizado en un caso como **cámara de niebla LC** (Low Cost) y en otro como **cámara de niebla SLC** (Super Low Cost).

El reto y la novedad de este proyecto reside en que emplearemos utensilios de cocina domésticos para tal fin, como sartenes, ensaladeras, moldes de repostería o simples vasos de plástico con un fin muy loable: demostrar que también se puede abordar Física de cierto nivel con los materiales más asequibles.

De ese modo tan sencillo a la par que visualmente impactante, se ofrece al profesorado y al alumnado una introducción a los principios de detección de partículas elementales, como es el caso de los muones, así como la posibilidad de llevar a cabo pequeños proyectos de investigación o aplicaciones didácticas tales como estudiar posibles variaciones en la tasa de muones en función de la altitud, latitud, horas del día, distintas estaciones del año, etc. Igualmente, el experimento puede ser una buena motivación para ilustrar cómo su detección supuso la primera confirmación experimental de la Teoría de la Relatividad Especial.

Como puede apreciarse, podemos acometer proyectos realmente ambiciosos, equipados con aparatos tan sofisticados como sartenes, ensaladeras o vasos de plástico. De un modo humorístico podríamos decir que **nuestra propuesta es hacer Física de alto nivel en tiempos de crisis**.

Fundamento teórico

El descubrimiento del muón:

No resultaría demasiado descabellado afirmar que la moderna Física de partículas arranca en 1935 con el modelo con el que el físico japonés H. Yukawa propone describir la interacción fuerte que mantiene unidos a los protones y neutrones en un rango espacial del orden del tamaño nuclear. Dicho modelo establece un paralelismo con la descripción de la interacción electromagnética que hace la Electrodinámica cuántica según la cual dicha interacción entre partículas cargadas se explica mediante el intercambio de fotones como "partículas mediadoras de la interacción". Sin embargo, en el caso de la interacción fuerte debían satisfacerse dos requerimientos: independencia de la carga eléctrica (pues la

interacción fuerte actúa de modo similar en protones y neutrones) y muy corto rango de acción (tamaño nuclear).

En respuesta a estas dos condiciones, H. Yukawa propuso la existencia de lo que hoy conocemos como *mesones* π o *piones* como posibles partículas mediadoras de dicha interacción y cuya masa debería ser del orden de 300 veces la del electrón como requisito para explicar su corto rango de acción. La relación entre masa y rango de acción puede entenderse cualitativamente en virtud del principio de incertidumbre de Heisenberg, que permite la violación de la conservación de la energía en un intervalo muy breve de tiempo, según la desigualdad:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

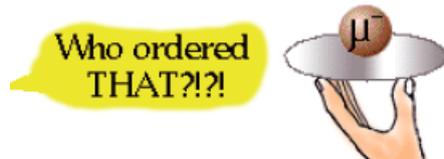
De este modo, si un protón emite un pión de masa finita, la conservación de energía es violada en una cantidad equivalente a dicha masa, lo que establece un límite en el rango de tiempo en el que el pión puede viajar que debe ser acorde con su rango de acción ($\sim 10^{-15}$ m).

Los *piones* deberían existir, según el modelo de Yukawa, en los tres estados posibles de carga (π^+ , π^0 y π^-). Así, podría explicarse la transformación de un protón en un neutrón tanto por emisión de π^+ como, alternativamente, por absorción de π^- . Igualmente podría justificarse el hecho de que el protón permanezca invariable mediante la emisión de un π^0 . Tras la predicción de Yukawa, los físicos emprendieron una afanosa búsqueda de estas partículas.

Por aquel entonces, la única fuente de partículas conocida con la suficiente energía requerida para producir los mesones era la radiación cósmica y sus posibles interacciones con los núcleos de las moléculas de aire. La radiación cósmica consiste mayoritariamente en protones de alta energía procedentes de nuestro propio Sol (los de menor energía), de nuestra galaxia (energía media) o del entorno extragaláctico (los de mayor energía). Dado el rápido decaimiento predicho para los piones, se hacía necesario buscarlos en zonas de alta montaña o incluso en vuelos en globos.

En 1936 y 1937, los físicos C. D. Anderson y S. Neddermeyer por un lado y J.C. Street y E.C. Stevenson por otro, lograron trazas en sus experimentos con cámaras de niebla realizados a gran altura de lo que podrían ser las partículas de Yukawa, pues sus mediciones de masa sugerían valores del orden de 200 veces la masa del electrón, en posible concordancia con la predicción de Yukawa. Sin embargo, había algo que no cuadraba en el esquema: dichas partículas parecían reacias a interactuar con los núcleos atómicos (como cabría esperar), dado que eran capaces de atravesar toda la atmósfera y ser detectadas también al nivel del mar. Dicho comportamiento era claramente anómalo para partículas que se suponían portadoras de interacción fuerte. Además, no se hallaron evidencias del pión neutro, por lo que se empezó a aceptar que dicha partícula no era el pión de Yukawa, sino la que se dio a conocer como **muón** μ , en sus variantes μ^+ y μ^- .

Este inesperado (e indeseado) descubrimiento generó un gran desconcierto entre los físicos que tan maravillosamente quedó plasmado en la famosa frase del físico y premio Nobel Isidor I. Rabi "**who ordered that?**" (¿quién pidió eso?).



Los muones y la relatividad especial:

Sin embargo, las "indeseables" nuevas partículas servirían para confirmar de modo experimental, en 1941, la dilatación del tiempo predicha por la Teoría de la relatividad de Einstein. La vida media de un muón es de unos 2 μ s lo que supone que, moviéndose a una velocidad de 0,998 c, recorrería tan solo 600 m desde que es generado en las capas altas de la atmósfera, por lo que sería imposible detectarlos al nivel del mar, cosa que, sin embargo, es muy habitual. Esto solo puede explicarse si tenemos en cuenta que su vida media, en el sistema de referencia de la Tierra, queda multiplicada por el factor γ que para esa velocidad tiene un valor de 15,8 lo que supone dilatar su vida media hasta 31,6 μ s en dicho sistema de referencia. Esto le permitiría recorrer unos 9500 m, lo que justifica su detección en la superficie terrestre.

¿Cómo se producen y detectan los muones?

Hoy sabemos que los rayos cósmicos colisionan con los núcleos de las moléculas de aire y producen una cascada o lluvia de partículas que incluyen protones, neutrones, piones (cargados y neutros), kaones, etc. Estas partículas secundarias, a su vez, sufren interacciones electromagnéticas o nucleares que dan lugar a otra generación de partículas en un proceso en cascada, como se aprecia en la figura 1.

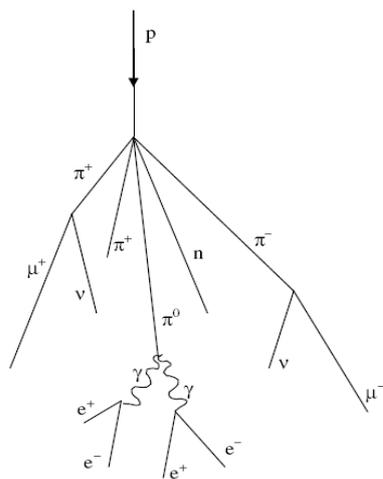
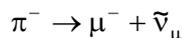
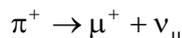


Fig. 1: Proceso en cascada de producción de muones y otras partículas elementales.

Algunos de los piones formados interactúan con los núcleos de las moléculas de aire mediante interacción fuerte, mientras que otros decaen espontáneamente, mediante interacción débil, en muón y neutrino o antineutrino:



Los elusivos neutrinos son muy difíciles de detectar. Los muones, sin embargo, al ser partículas masivas cargadas pueden detectarse por sus efectos ionizantes al atravesar medios densos, como sucede en los centelleadores plásticos o en las cámaras de niebla.

El principio de nuestras cámaras de niebla:

Las cámaras de niebla del presente proyecto constituyen una versión simplificada al máximo de las que se proponen en los cursos de formación para profesores del CERN (Ginebra). La niebla se genera gracias al gradiente térmico entre la temperatura ambiente de la bayeta *spontex* empapada en isopropanol y las proximidades de la base metálica enfriada con hielo seco, donde se forma una capa de vapor de isopropanol sobresaturado e inestable. Esta neblina se condensa alrededor de los iones que se originan por el paso de una partícula energética y cargada, como los muones, dejando a su paso una traza visible que pronto se desvanece.

Pese a que cualquier partícula cargada (por ejemplo, partículas alfa procedentes de la radiactividad natural) es susceptible de dejar trazas en nuestra cámara, la mayor parte de las trazas corresponden a muones, como se desprende de su distribución espacial azarosa, si bien su flujo es mayor para incidencias más verticales.

Y sin más preámbulo, pasemos a describir el montaje experimental de las mencionadas cámaras de niebla.

Material necesario:

Cámara de niebla 1 (low cost cloud chamber)

- ✓ Molde para tartas o bizcochos (28 cm de diámetro)
- ✓ Ensaladera (28 cm de diámetro)
- ✓ Cinta de LEDs blancos (1 m)
- ✓ Sartén (28 cm de diámetro)
- ✓ Isopropanol (en frasco lavador)
- ✓ Hielo seco o nieve carbónica (CO₂ sólido)
- ✓ Bayeta
- ✓ Alambre
- ✓ Cinta aislante



Fig. 2: Material empleado para la cámara de niebla.

Procedimiento experimental:

Para construir nuestra cámara de niebla "casera" seguiremos el procedimiento que se indica a continuación:

- Hacemos unos pequeños agujeros en el fondo de la ensaladera (con una taladradora de broca muy fina) de manera que podamos pasar después, a través de ellos, los alambres.
- Recortamos dos piezas circulares de bayeta del mismo tamaño que el fondo de nuestra ensaladera y las fijamos, superpuestas, a dicho fondo empleando para ello varios trocitos de alambre.

- Rodeamos la parte más ancha de nuestra ensaladera con la tira de LEDs blancos orientados hacia el interior de la misma, y la fijamos bien con cinta aislante de manera que tengamos una buena iluminación en el interior.
- Empapamos bien los discos de bayeta con isopropanol.
- Pegamos la base redonda y plana del molde para tartas (la parte lateral no es necesario utilizarla) al extremo abierto de la ensaladera, y los unimos bien con cinta aislante, de manera que la ensaladera quede cerrada herméticamente.
- Colocamos el hielo seco, con mucho cuidado, en la sartén (es necesario utilizar para ello guantes térmicos con el fin de evitar quemaduras, ya que el hielo seco se encuentra a la nada despreciable temperatura de -78°C), llenándola por completo y procurando que la parte superior quede lo más "lisa" posible, de modo que el contacto con la base metálica quede garantizado.
- Sobre el hielo seco colocamos el molde para tartas con la ensaladera, apagamos la luz de la habitación y encendemos la tira de LEDs. Esperamos unos minutos, hasta que el isopropanol que empapa la bayeta empieza a evaporarse y forme una niebla de finísimas gotitas. A partir de ese momento comienza el espectáculo y empezaremos a observar las trazas de las partículas cargadas que atraviesan nuestra cámara de niebla en forma de finos hilos blancos, de longitud y forma muy variables, similares a las estelas de los aviones que surcan el cielo, aunque, eso sí, mucho menos duraderas...

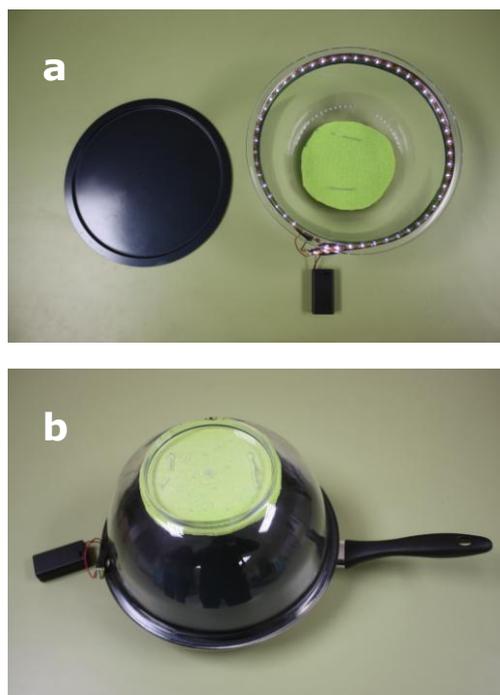


Fig 3. a) Detalle del montaje de la cámara.
b) Resultado final.

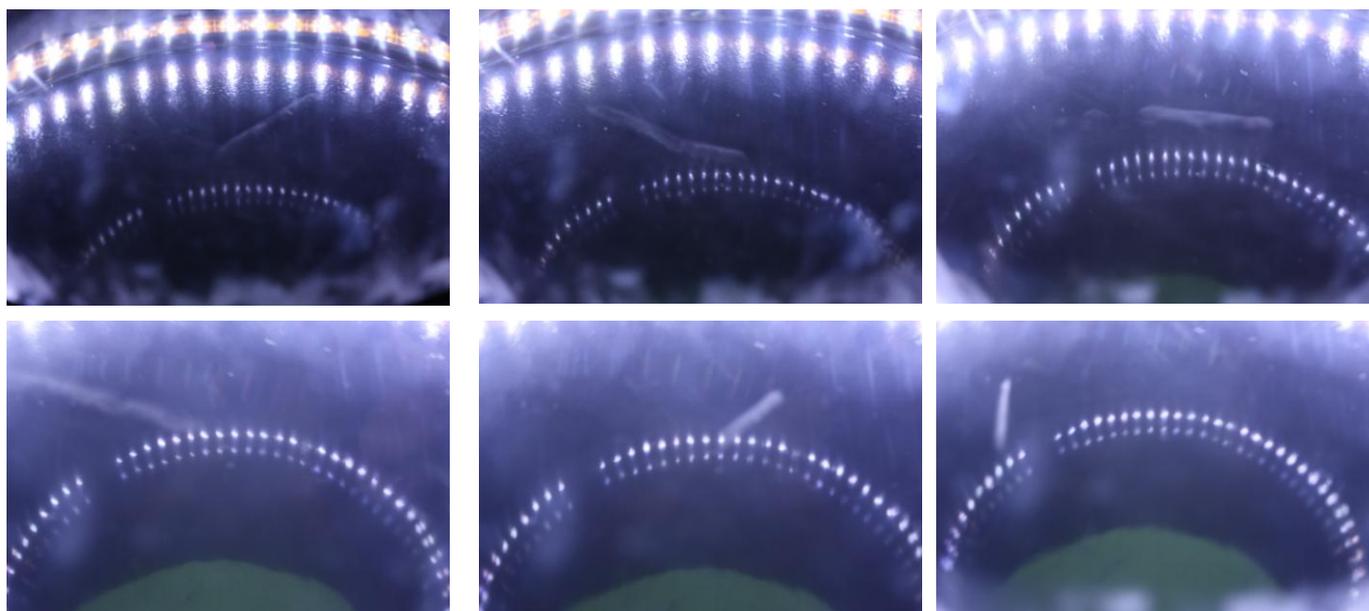


Fig. 3: Imágenes de diversas trazas obtenidas con la cámara de niebla LC. Puede apreciarse la distribución aleatoria de las direcciones de las trazas.

Si esta cámara de niebla no nos ha parecido lo suficientemente barata, he aquí una variante mucho más económica: la cámara de niebla 2 o SLC.

Material necesario:

Cámara de niebla 2 (super low cost cloud chamber)

- ✓ Molde de magdalenas desechable
- ✓ Vaso de plástico transparente y liso cuya base ancha encaje dentro del molde.
- ✓ Cristalizador (de mayor anchura que el molde)
- ✓ Linterna
- ✓ Isopropanol en frasco lavador
- ✓ Hielo seco o nieve carbónica (CO_2 sólido)
- ✓ Bayeta (o bien discos desmaquillantes de algodón)
- ✓ Alambre
- ✓ Papel de aluminio
- ✓ Pintura negra anticorrosiva.

Procedimiento experimental:

El procedimiento es muy parecido al anterior, pero cambiando algunos de los materiales:

- En primer lugar pintamos de negro, con pintura anticorrosiva, el interior del molde para magdalenas.
- En lugar de la ensaladera emplearemos en este caso un vaso de plástico, procurando que no tenga ningún tipo de dibujo ni franja, y en cuyo fondo practicaremos unos orificios de un diámetro similar al del alambre con la punta de un pequeño soldador eléctrico, por ejemplo.
- Recortamos dos discos de bayeta de un diámetro tal que ocupen el fondo del vaso de plástico y los fijamos a la base mediante varios trocitos de alambre que se harán pasar a través de los agujeros previamente practicados.
- Empapamos generosamente los discos con isopropanol, echamos el hielo seco en el cristalizador e introducimos en él el molde para magdalenas.
- Sobre el molde colocamos, boca abajo, el vaso de plástico, procurando que éste quede lo más herméticamente cerrado posible, y cubrimos con papel de aluminio la parte expuesta de hielo seco para impedir una rápida sublimación.
- Con la luz de la habitación apagada iluminamos con la linterna el interior del vaso de forma lateral y casi rasante. Esperamos unos minutos, hasta que sea visible la neblina de isopropanol condensado, y... ¡¡a observar el baile de partículas!! (Fig.6)



Fig. 5.

A) Material empleado para la cámara de niebla SLC.

B) Detalles de la base pintada y el vaso con los discos.

C) Montaje final de la cámara.



Fig. 6. Imágenes de trazas observadas con la cámara de niebla SLC cuyo coste real no supera los cinco euros.

Pequeños proyectos de investigación

El hecho de poder observar trazas de partículas elementales como los muones es ya, de por sí, lo suficientemente motivador para introducir una unidad, o una charla, referida a Física de partículas. Sin embargo, podemos atrevernos a ir más lejos y sugerir la realización de diversos proyectos de investigación que, sin grandes pretensiones en cuanto a la obtención de resultados precisos, permitirán introducir a los estudiantes de E.S.O. y Bachillerato en las técnicas experimentales de toma de datos y obtención de conclusiones.

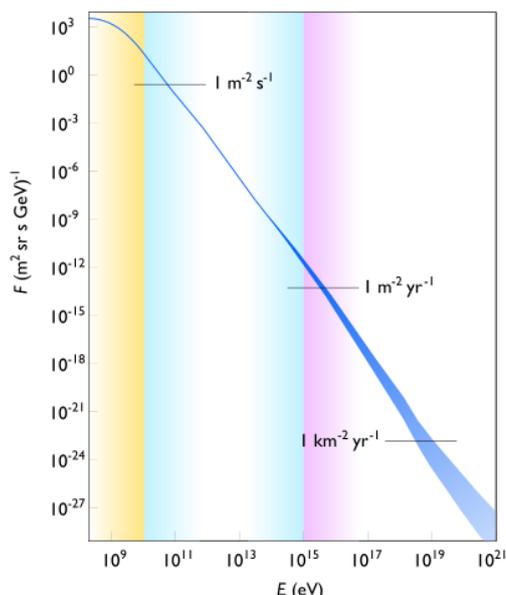


Fig. 7: Diagrama de flujo de rayos cósmicos frente a su energía [Fuente: wikipedia]

La figura 7 muestra la relación entre el flujo de muones y su energía, de modo que se diferencian tres regiones: aquella de más baja energía (amarillo) se asocia a muones procedentes mayoritariamente del Sol, mientras que la de energía mediana correspondería a muones procedentes de nuestra propia galaxia. Finalmente, los muones de mayor energía proceden del espacio extragaláctico.

Sobre la base de esta distribución, proponemos realizar las siguientes investigaciones haciendo uso de alguno de los dispositivos presentados en este proyecto:

Proyecto 1: Estudio sobre la posible variación de la tasa de muones con las horas del día.

Una buena parte del flujo de muones se asocia al Sol. Por otro lado, en las horas centrales del día, cuando el Sol está más alto, los muones atraviesan un menor espesor de capa atmosférica que al amanecer o atardecer, por lo que cabe esperar un ligero aumento en la tasa de detección de muones en dichas horas centrales.

Los alumnos, divididos en grupos, contarán en diversas horas del día, en rangos de $\frac{1}{4}$ de hora, el número de trazas observadas y las representarán en una gráfica en función de la hora del día, sacando las conclusiones oportunas.

Proyecto 2: Estudio sobre la posible variación estacional en la tasa de muones.

La temperatura atmosférica varía en las distintas estaciones; en consecuencia también lo hace la densidad atmosférica. Dado que la tasa de muones viene determinada por las interacciones de las partículas cargadas de los rayos cósmicos con las moléculas del aire, cabe esperar variaciones en dicha tasa según las estaciones.

El proyecto de investigación consiste en que un grupo de alumnos investigue, cada mes y en la misma hora y durante una hora, el número de trazas observadas, tratando de encontrar una posible dependencia y su interpretación.

Proyecto 3: Estudio sobre la variación de la tasa de muones con la altura.

Este proyecto es viable si existe la posibilidad de desplazarse a tomar medidas en zona de alta montaña. Teniendo en cuenta los procesos en cascada descritos en el fundamento teórico, la vida media de los muones y sus mecanismos de decaimiento, es previsible esperar una mayor tasa de muones en zonas de alta montaña. El proyecto de investigación se llevará a cabo, en este caso, dentro del mismo mes y a horas idénticas (tratando de evitar otras variables), en un caso en el propio instituto y en otro en zona de alta montaña. Se analizarán los datos y se buscarán interpretaciones de los mismos.

Proyecto 4: Observación de trazas originadas por fuentes radiactivas.

Cualquier fuente de radiación ionizante energética es susceptible de originar trazas en nuestra cámara. Es el caso, por ejemplo, de las partículas alfa emitidas por materiales radiactivos. Obviamente, dichas trazas se distinguirán claramente por provenir directamente de la fuente. Con este fin pueden usarse diversas fuentes de partículas alfa, como nitrato de uranio, o el mineral *torbernita*, perteneciente al grupo de los "uranilfosfatos". También podemos usar como fuentes las escalas y manillas de algunos relojes antiguos que empleaban Radio con el fin de brillar en la oscuridad o bien trozos de granito.

Proyecto 5: Dependencia de la tasa de muones con la latitud.

Este último proyecto es mucho más ambicioso, porque implica la coordinación con otros institutos de latitudes distintas a las nuestras, como, por ejemplo, un instituto del norte de Noruega. Se trataría de construir la misma cámara de niebla y efectuar medidas coordinadas en el mismo tiempo.

Debido a la estructura del campo magnético terrestre, hay un mayor flujo de partículas cargadas cerca de los polos geomagnéticos, por lo que también debe existir una mayor tasa de muones en latitudes próximas a dichos polos y deben poderse contar más trazas en la cámara de niebla. El citado proyecto permitiría verificar ese hecho y estudiar sus posibles interpretaciones, y al mismo tiempo daría lugar a un bonito trabajo de colaboración internacional entre alumnos de diversas nacionalidades.

Fuentes bibliográficas y enlaces

- F. Halzen; A.D. Martin. *Quarks and leptons*. Wiley (1984)
- I.S. Hughes. *Elementary particles*. Cambridge University Press (1996)
- G.D. Coughlan, J.E. Dodd; B.M. Gripaios. *The ideas of particle physics*. Cambridge University Press (2009)
- P.N. Diep et al. *Communications in Physics*, 14, 1, 57-64 (2004)

 http://seintl.com/manuals/M4II_Family_Spanish.pdf

 http://www.elpais.com/articulo/madrid/Altas/concentraciones/gas/radiactivo/natural/sierra/Madrid/elpepiautmad/19890122elpmad_3/Tes

 <http://nuclear.fis.ucm.es/FERIA/FERIA2.html>