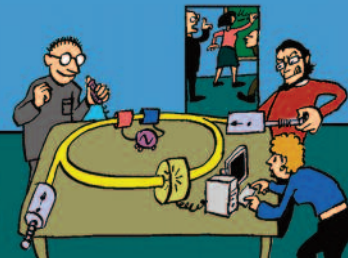


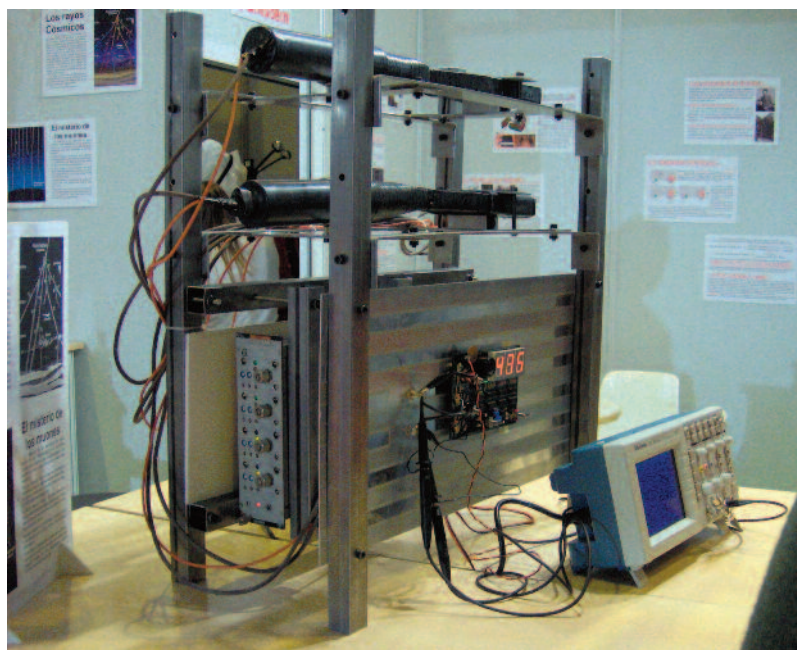
Física experimental de partículas en el Instituto



FRANCISCO BARRADAS SOLAS

Las versiones *caseras* de la cámara de niebla de difusión y el electroscoPIO permiten introducir en la enseñanza secundaria y la divulgación para el público general algunos aspectos experimentales de la física nuclear y de partículas. Por su sencillez, estos instrumentos son perfectos para hacer demostraciones cualitativas, pero con ellos es difícil ir más allá.

Aparentemente, la construcción y uso de aparatos más complejos estaría fuera del alcance de los profesores y sus talleres y laboratorios escolares. Sin embargo, este artículo mostrará cómo es posible montar un detector de partículas con el que se pueden realizar en el Instituto pequeñas investigaciones y experimentos cuantitativos, así como también exposiciones para el público general.



El telescopio de rayos cósmicos en la V Feria "Madrid por la Ciencia"

Tal instrumento, que puede denominarse *telescopio de rayos cósmicos*, consiste básicamente en dos detectores de centelleo montados en coincidencia.

Alguno de sus elementos, ciertamente difíciles de obtener en un centro escolar normal, fueron cedidos por dos laboratorios de investigación (CIEMAT e IFIC) que ya no tenían necesidad de ese material de segunda mano.

Tras abordar la construcción y funcionamiento del detector, se pasa a describir los proyectos de divulgación e investigación con él realizados por alumnos de 1º y 2º de Bachillerato y se concluye con un breve repaso de otras posibilidades para introducir la física experimental de partículas en el Instituto.

Física experimental de partículas en el aula: un paso más allá

Construcción y uso de un detector de rayos cósmicos en el Instituto

- 1 Introducción
- 2 El detector
 - 2.1 Diseño y funcionamiento
 - 2.2 El origen y montaje de las piezas
 - 2.3 Presupuesto
- 3 Los rayos cósmicos y el detector
- 4 Utilización del detector
 - 4.1 En el aula
 - 4.2 En actividades de divulgación
- 5 Otros proyectos de física experimental de partículas en el aula

1 Introducción

A juzgar por lo que sucede a menudo en la enseñanza secundaria, parece que la física se hubiera terminado en el siglo XIX. En efecto, excepto por pequeñas incursiones en la física nuclear, desarrollos posteriores tales como la relatividad, la física de partículas, la astrofísica y la cosmología están ausentes de nuestros institutos. Y si aparecen es casi peor, ya que suelen hacerlo de manera puramente teórica, sin rastros de esa peculiar e íntima interacción entre teoría y experimentos que es propia de la física.

Sin duda, la falta de formación específica entre nuestros profesores tiene mucho que ver con ese problema y una de sus consecuencias es la percepción de los aspectos experimentales de la física nuclear y de partículas como inaccesibles desde la enseñanza secundaria.

Olvidando ahora la posibilidad de acercarse a los experimentos de física de partículas sin utilizar aparatos –sobre la que se dirá algo en la sección 5– hay que recordar que sí es posible llevar a cabo demostraciones y experiencias muy sencillas en estos campos mediante versiones caseras de la cámara de niebla de difusión y el electroscopio.¹

Una primera aproximación cualitativa a la experiencia en estos campos es crucial, aunque sólo sea para establecer que las partículas son objetos físicos *tan reales* como las vacas y los aviones puesto que dejan rastros observables

en los detectores.

Siempre cabe preguntarse si podemos ir más allá y pasar de la observación y la experiencia a la experimentación cuantitativa, pero aquí las posibilidades de los instrumentos citados son escasas². Sin embargo, una revisión de la práctica educativa a nivel mundial³ revela que hay otros instrumentos más complejos que se emplean con éxito para tal fin en la enseñanza secundaria.

De entre todos los proyectos citados en la nota 3 hay uno que destaca por las facilidades que ofrece a las personas interesadas pero no ligadas formalmente a ninguno de ellos, *The Berkeley Lab Cosmic Ray Telescope Project*⁴, del laboratorio nacional estadounidense Lawrence Berkeley (más conocido como *Berkeley Lab*). En su web, *The Cosmic Connection* se ofrecen instrucciones suficientemente detalladas como para intentar construir y utilizar el detector de forma autónoma⁵.

Así fue como en 2005, un grupo de tres profe-

¹ Ver los tres trabajos premiados en la I edición del Concurso de Divulgación Científica del Proyecto Consolider-Ingenio 2010 CPAN: Barradas (2011), Barrio (2011) y Pazy (2011)

² Ver los trabajos citados en la nota 1 y sus referencias. Por ejemplo, se podría colocar un imán potente en una cámara de niebla e intentar observar la curvatura de las trazas.

³ Consultar, por ejemplo la siguiente página del programa norteamericano *Quarknet*: <http://quarknet.fnal.gov/toolkits/new/crdetectors.html> y la *agenda de la conferencia Cosmic Ray Detectors for Education* organizada en el CERN por las redes ASPERA, EPOG and EPCN en octubre de 2010.

⁴ <http://cosmic.lbl.gov/index.html>

⁵ En la web *The Cosmic Connection* hay [una relación de proyectos](#) basados en el diseño del *Berkeley Lab* que se han llevado a cabo con éxito.

sores⁶ de Enseñanza Secundaria decidimos partir del diseño del *Berkeley Lab* para intentar construir un detector de rayos cósmicos y presentarlo en la *V Feria Madrid es Ciencia*, dedicada al Año Mundial de la Física y el centenario de la relatividad especial.

2 El detector

Para poder contar el desarrollo del proyecto (especialmente la obtención de los materiales más *exóticos*, de modo que otros profesores no queden desanimados) habrá que describir antes el dispositivo:

2.1 Diseño y funcionamiento

El esquema básico (ver figura 1) es estándar en este tipo de instrumentos y común a muchos de los proyectos mencionados en la nota 3, especialmente los más antiguos (ver la sección 5 para diseños alternativos).

Los detectores de centelleo para rayos cósmicos son bien conocidos (Leo 1994) y se han usado anteriormente como instrumentos adecuados para la enseñanza de la física de partículas en

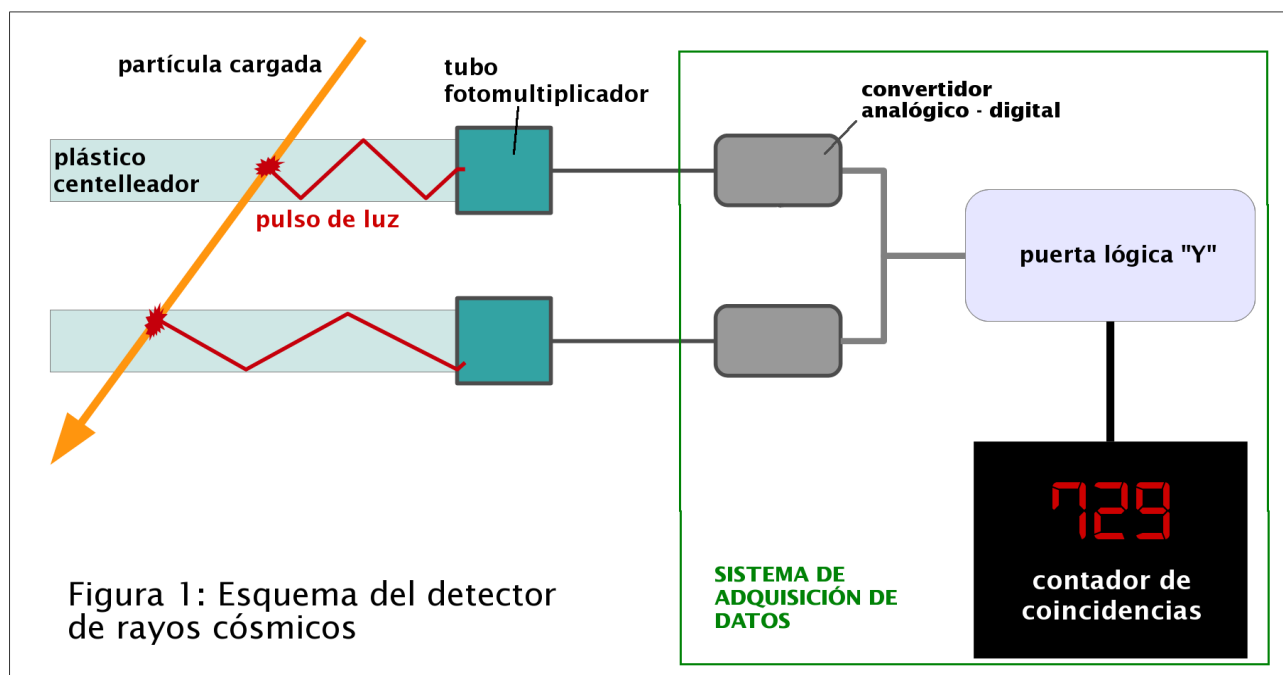
la educación secundaria; ver por ejemplo Mühry (2002) y Dunne (1998).

Cuando una partícula cargada pasa por un plástico centelleador, este material emite un pulso de luz que más tarde se refleja en sus paredes (recubiertas de papel de aluminio o teflón) y termina en una guía de ondas que lo lleva hasta un tubo fotomultiplicador, donde se transforma en una corriente eléctrica amplificada.

Esa corriente puede “verse” en un osciloscopio o mandarse a un circuito electrónico, el *sistema de adquisición de datos*, que, en nuestro caso, convierte las señales analógicas del fotomultiplicador en señales digitales y además las cuenta, emitiendo un pitido cada vez que se registra una partícula.

El motivo por el que los elementos descritos están duplicados es evitar en la medida de lo posible los “falsos positivos” debidos al ruido en la electrónica, fugas de luz, etc.

Para conseguirlo, se han montado *en coincidencia* dos detectores, lo que quiere decir que el circuito de adquisición de datos sólo cuenta las partículas que se registran simultáneamente en ambos (o más exactamente dentro de un muy corto intervalo de tiempo), lo que minimiza la



6 El profesor de tecnología Carlos Herrero, del I. E. S. “Juan de Herrera” de San Lorenzo de El Escorial (Madrid) y los profesores de Física y Química Pedro Valera (entonces en el I. E. S. “Matemático Puig Adam” de Getafe, Madrid) y Francisco Barradas (entonces también en el “Juan de Herrera”). El proyecto fue dirigido por autor del presente artículo (F. B. S.) y realizado bajo la tutela de Luciano Romero, físico del CIEMAT.

probabilidad de registrar cuentas debidas a señales aleatorias no ligadas a las partículas que se quieren detectar.

Además, la elección de un doble detector en coincidencia apunta a la intención de dedicar el instrumento al estudio de los rayos cósmicos

secundarios (ver sección 3) ya que este diseño tiende a descartar las cuentas debidas a la radiactividad. Por otro lado, la disposición geométrica de las “paletas” (los plásticos centelleadores), que son paralelas entre sí, hace que sólo puedan ser detectadas aquellas partículas que vienen de un cono alrededor de la perpendicular a las paletas (que es la vertical cuando el detector está de pie). Teniendo en cuenta esa direccionalidad –bien es cierto que limitada– se puede decir informalmente que se trata de un *telescopio de rayos cósmicos*, a pesar de que no forma imágenes.

La principal deuda de nuestro detector⁷ con el del *Berkeley Lab* es el empleo de su circuito de adquisición de datos (figura 2), cuyos elementos principales son los convertidores analógico – digital, la puerta lógica que filtra las coincidencias y el contador de las mismas.

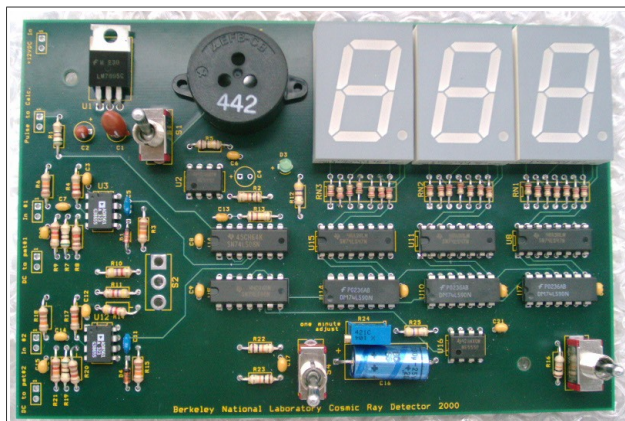


Fig. 2: El circuito de adquisición de datos de *Berkeley Lab*

2.2 El origen de las piezas

El primer (y principal) motivo de desánimo al intentar llevar a cabo un proyecto como este desde un Instituto es la dificultad de conseguir algunas de las piezas.

El *Berkeley Lab* proporciona de manera gratuita la placa del circuito y una lista exhaustiva⁸ de los componentes electrónicos necesarios (que, por otra parte, son estándar). El montaje del circuito no es difícil con el personal y medios de un instituto.

La parte mecánica del detector también es muy sencilla y puede hacerse de madera o metal con los medios y materiales al alcance del taller de Tecnología más modesto, pero, ¿qué sucede con los plásticos centelleadores y los tubos fotomultiplicadores?

No es realista pensar en comprar esos

componentes⁹, pero hay otra vía, también sugerida por la experiencias de otros profesores que habían realizado proyectos similares en otros países.

Se trataría de intentar conseguir piezas “de segunda mano” en algún laboratorio profesional, y así es como nos dirigimos, sin conocerle, al profesor Antonio Ferrer, del IFIC (Instituto de Física Corpuscular, centro mixto CSIC / Universidad de Valencia), quien nos facilitó gran parte de lo que necesitábamos.



Figura 3: Los materiales más *exóticos* del detector

El plástico centelleador de las “paletas” (figura 3) fue encargado por el IFIC para el subdetector de tiempo de vuelo (TOF) del experimento *Delphi*, uno de los cuatro detectores del LEP (el “gran colisionador de electrones y positrones”) en el CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas.

Cuando *Delphi* fue desmantelado en 2001 tras el cierre del LEP, el IFIC se llevó los tubos fotomultiplicadores, dos de los cuales terminaron en nuestro detector. Estos tubos se alimentan con una fuente de alto voltaje (fig. 3) que conseguimos en el CIEMAT¹⁰ y que había usado en el CERN en la década de 1980.

Tras el trabajo inicial en nuestros institutos (diseñar en detalle el detector, encontrar a alguien que pudiera ayudarnos, buscar y preparar los componentes y montar el circuito de adquisición de datos), el montaje final y las pruebas del detector de rayos cósmicos tuvieron lugar durante el mes de marzo de 2005 en el edificio 75 del CIEMAT, donde en esos momentos se

⁹ supondría probablemente más de mil euros, de los que no disponemos normalmente en los Institutos. Ver <http://cosmic.lbl.gov/parts.html>

¹⁰ un laboratorio nacional una de cuyas divisiones, situada en Madrid, se dedica a la Física de Altas Energías

⁷ También descrito en (Barradas 2007)

⁸ <http://cosmic.lbl.gov/documentation/PartsList.html>

estaban fabricando parte de las cámaras de tubos de deriva del detector central de muones del experimento CMS (fig. 4).

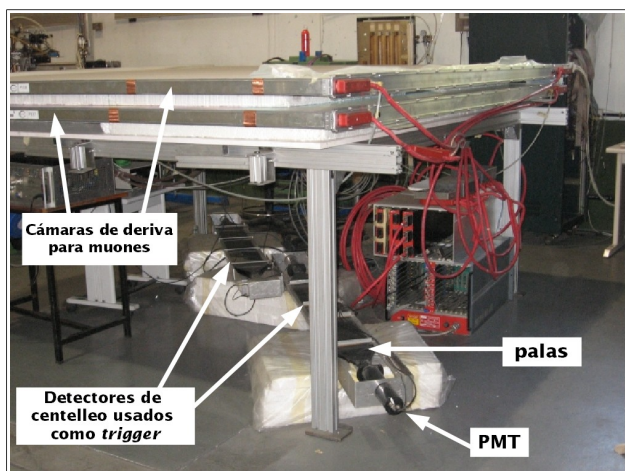


Figura 4: Detectores de centelleo y cámaras de muones en el CIEMAT

En la figura se ven además de las cámaras dos detectores de centelleo muy parecidos a los nuestros que se empleaban para probar las cámaras con muones de los rayos cósmicos. Las señales de las partículas registradas en estos detectores, que son simples, fiables y bien conocidos, disparaban (hacían de *trigger*) las cámaras de muones en las pruebas.

2.3 Presupuesto

Según se explica en el apartado anterior, sólo tuvimos que pagar los componentes electrónicos del circuito de adquisición de datos, de otro modo este proyecto hubiera sido imposible.

Aunque hay alternativas más baratas, la más conveniente es, quizá, encargar los componentes electrónicos por correo¹¹ a partir de las especificaciones de *Berkeley Lab* (ver nota 8), lo que supone una cantidad del orden de 150 euros.

Además de los elementos cedidos por los laboratorios, utilizamos otros materiales corrientes (madera, chapa, tornillos) que se encuentran en los laboratorios y talleres de tecnología de los institutos, por lo que el gasto total que hicimos no superó los 200 euros.

¹¹ Nosotros, por ejemplo, se lo encargamos a *Digi-Key*:
<http://www.digikey.es/>

3 Los rayos cósmicos y el detector

Una vez que se dispone de un detector, el ingrediente que falta son las partículas.

Afortunadamente, la naturaleza nos proporciona una fuente constante, gratuita y con la que, a diferencia de lo que sucedería con las sustancias radiactivas, no hay que preocuparse de posibles riesgos y normas de seguridad: los *rayos cósmicos*.

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía –protones sobre todo– que vienen del espacio exterior. Cuando estas partículas chocan contra los núcleos de átomos de la atmósfera, se crean más partículas que, a su vez, pueden chocar con otras o desintegrarse.

El resultado final es que un gran número de partículas, sobre todo neutrinos y muones, llegan a la superficie terrestre.

Los neutrinos son partículas sin carga y resultan muy difíciles de atrapar ya que interactúan muy débilmente con la materia.

Sin embargo, los muones –que son partículas similares a los electrones pero mucho más pesadas– pueden ser detectados fácilmente con instrumentos relativamente sencillos, como los detectores de centelleo que se describen aquí, e incluso caseros, como las cámaras de niebla a las que se refiere la nota 1.

4 Utilización del detector

El verdadero objetivo de la construcción de este detector es poderlo usar en el aula, especialmente con alumnos de Física de Bachillerato y en actividades de divulgación para cursos anteriores y para el público general.

4.1 En el aula

No es este el lugar para describir en detalle las actividades posibles, pero algunas de las más elementales pequeñas investigaciones cuantitativas que los alumnos han llevado a cabo son los estudios de:

- la variación temporal del flujo de rayos cósmicos (fig. 5), perfecta para introducir de forma significativa la estadística elemental en la enseñanza secundaria.
- la variación de flujo de rayos cósmicos con la inclinación del detector respecto

a la vertical (fig. 6¹²).

Otra posibilidad, entre varias de las sugeridas por los alumnos, es la medición y estudio de la variación del flujo de rayos cósmicos con la altitud, que aún no se ha llevado a cabo por motivos logísticos.

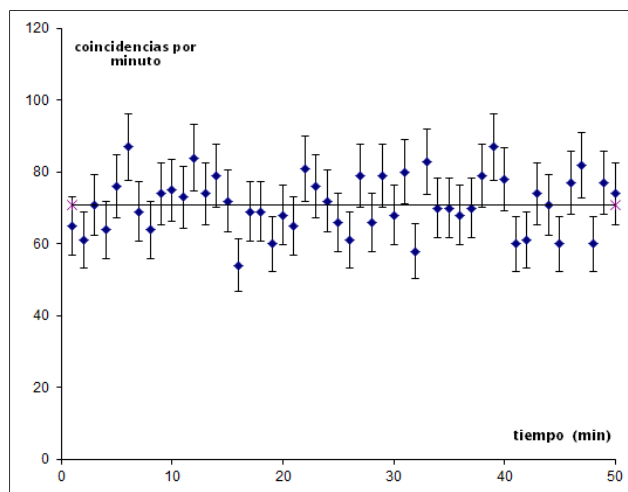


Fig. 5: variación temporal de la tasa de coincidencias por minuto.

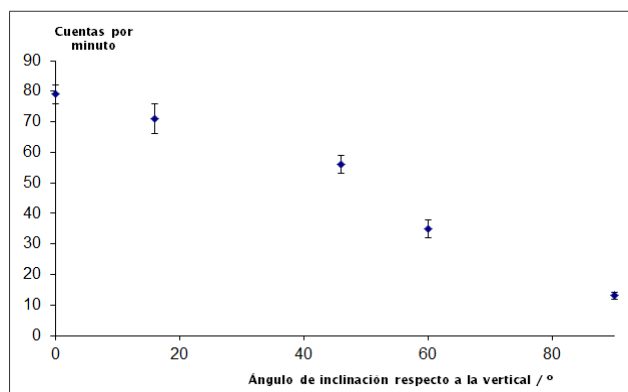


Fig. 6: variación de la tasa de coincidencias por minuto en función de la inclinación del detector

4.2 En actividades de divulgación

Otro uso importante del detector es como aparato de demostración en ferias de la ciencia y jornadas para el público general y estudiantes de Enseñanza Secundaria Obligatoria.

No debe subestimarse la importancia de acercar a la gente estos instrumentos, no tan alejados de los que se utilizan en los laboratorios profesionales y estos días aparecen con frecuencia en los medios de comunicación.

Por otro lado, este detector es un buen complemento de la cámara de niebla a la hora de in-

tentar divulgar la *realidad* de las partículas subatómicas, que a veces son presentadas -todas ellas- como entequeias de los científicos y no como objetos físicos que dejan sus huellas "tangibles" en los detectores.

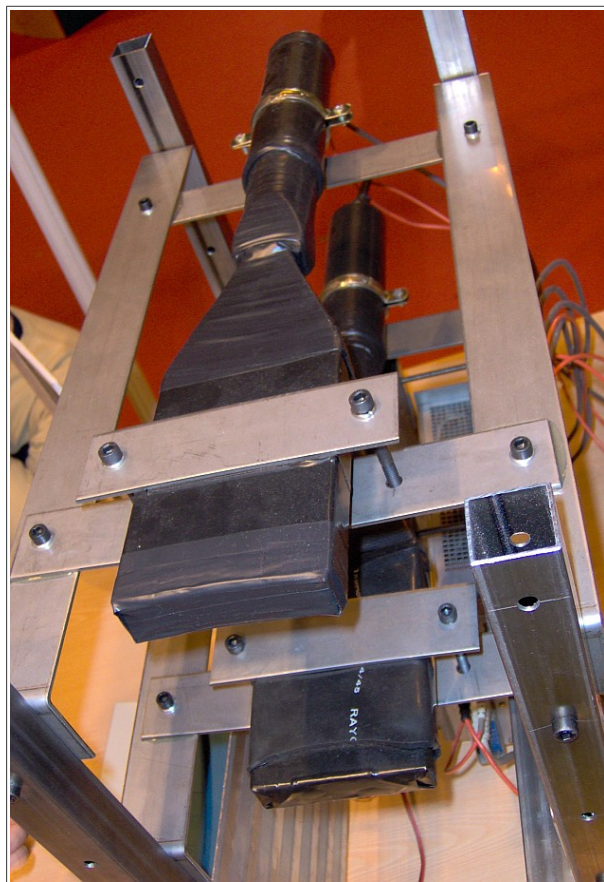


Fig. 7: vista superior del detector

Para este propósito conviene sacar del circuito las señales de ambos canales y visualizarlas mediante un osciloscopio, tal como se ha hecho en varias ferias y jornadas nacionales e internacionales¹³.

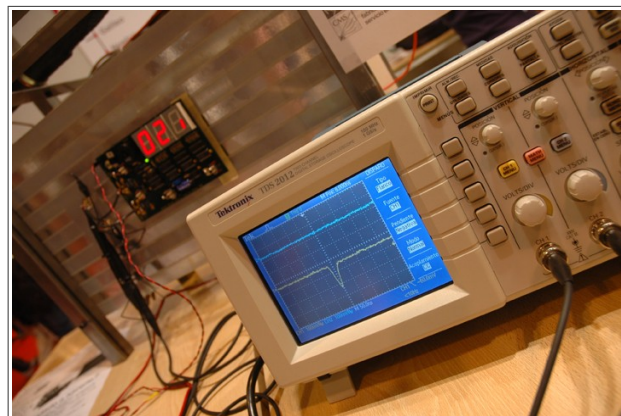


Fig. 8: señales sin coincidencia observadas en un osciloscopio (Foto Abel Valdenebro)

¹² Ambas figuras a partir de datos de los alumnos de Física y Química de 1º de Bachillerato tecnológico del I. E. S. "Alpajés" de Aranjuez (Madrid). Junio de 2007

¹³ Como las V y IX ferias "Madrid por la Ciencia", "Ciencia en Acción 2006", "Science Days 2006" en Freiburg, "Science on Stage 2007" en Grenoble....

5 Otros proyectos

Para terminar se examinarán dos cuestiones en cierto modo simétricas.

- ¿Se ha alcanzado con este detector el límite de sofisticación en cuanto a física experimental nuclear y de partículas en el instituto?
- ¿Es absolutamente necesario construir uno de estos aparatos para que los alumnos vivan el aspecto experimental de la física de partículas?

La respuesta a ambas es un rotundo **no**.

Respecto a la primera cuestión, Becky Parker, de la *Simon Langton Grammar School for Boys* en Canterbury, dio el salto a los detectores de estado sólido tras una visita al CERN. Ella y sus alumnos han transformado el chip *Medipix* en la base de una red de detectores en Inglaterra y en un nuevo detector que próximamente será puesto en órbita para hacer investigación **original** sobre los rayos cósmicos a gran altura. Más detalles en [Stanley \(2011\)](#).

Y respecto a la segunda, si usted no puede o no quiere construir un detector, eso no significa que sus alumnos no puedan conocer, como deben, el aspecto experimental de la física de partículas, ya que, tal como hacen hoy en día muchos físicos de altas energías, es posible analizar los datos *reales* obtenidos por otros. Tal es el objetivo de programas tales como las [Masterclases de física de partículas](#)¹⁴, el [Cosmic Ray e-Lab](#) de *QuarkNet*, el *Cosmic Ray Detector Data Center* de SLAC...

Como conclusión, casos como el de Becky Parker, los citados en la nota 5 y el nuestro propio muestran que merece la pena acercarse a su laboratorio de física nuclear o de partículas más cercano; no es desdeñable la posibilidad de que encuentre científicos dispuestos a ayudarle.

Agradecimientos

- A mis compañeros Pedro Valera y Carlos Herrero con los que construí el detector, y a Jose Guereñu, por retornos a hacer “algo sobre relatividad” para la feria *Madrid es Ciencia* de 2005.
- A Antonio Ferrer (IFIC) por responder con generosidad a mi extraña petición caída de la nada. Sin él y sus compañeros Miguel Ángel Sanchis y José Ramón Ros no habría detector.

- A Mick Storr, Michelangelo Mangano y Gron Jones por inocularme en el CERN el veneno de las partículas durante el programa HST 2001 para profesores de instituto.
- Y sobre todo a Luciano Romero del CIEMAT por su generosidad y paciencia infinitas. A él debemos lo que hayamos aprendido al construir el detector.

Y decía que sólo estaba cumpliendo con su deber de funcionario para con los contribuyentes...

Referencias

- Barradas, F. (2007) A New Life for Old Equipment. *Physics Education* Vol. 42, No. 1, pp 9 – 11.
- Barradas F. (2011) La cámara de niebla: Partículas de verdad. <http://www.i-cpan.es/concurso/ganadores/55CamaraNiebla.pdf>
- Barrio J. Y E. López (2011) Cooking Muons. <http://www.i-cpan.es/concurso/ganadores/73CookingMuons.pdf>
- Dunne, P; Costich D and O’Sullivan S (1998) Measurement of the mean lifetime of cosmic ray muons in the A-level Laboratory. *Physics Education* 33, 296 – 302
- Leo, WR (1994) *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments 2nd ed.*, chapter 9. Springer – Verlag
- Mühry, Henry and Patrick Ritter (2002) Muons in the Classroom, *The Physics Teacher* 40 294 – 300
- Pazi, V. (2011) Midiendo la Radioactividad con un Electroscopio casero <http://www.i-cpan.es/concurso/ganadores/71MidiendoRadioactividad.pdf>
- Stanley, S (2011) [Schoolhouse Scientists](#). *Science in School* Issue 19 : Summer 2011, 69 – 72

Francisco Barradas Solas
Centro de Intercambios Escolares
Madrid, 30 de septiembre de 2011

¹⁴ Y también [las del CPAN](#).