

TALLER DE RAYOS CÓSMICOS

Análisis de imágenes de cámaras de chispas

Las cámaras de chispas son detectores de partículas que consisten básicamente en una caja llena de una mezcla de gases herméticamente cerrada que contiene una serie de placas metálicas paralelas entre las que hay una elevada diferencia de potencial. El paso de una partícula cargada ioniza el gas que hay entre las placas y el alto voltaje hace que a lo largo de la trayectoria se forme entre cada par de placas una chispa de modo que las sucesivas chispas revelan el camino que ha seguido la partícula. Aunque no haya ninguna otra fuente, las cámaras de chispas registran continuamente el paso de partículas que no pueden deberse a la radiactividad natural; se trata de los rayos cósmicos, provenientes directa o indirectamente del espacio exterior. El objetivo de este taller es investigar experimentalmente algunas de las características de los rayos cósmicos, fundamentalmente las distribuciones temporal y espacial de su llegada a nuestro detector.

LA TAREA

Este vídeo se grabó en el *Globe* del CERN y muestra un minuto de la cámara de chispas en funcionamiento:

<https://youtu.be/FiycM-Yxxsc>

Las trazas que se ven atravesando la cámara (*eventos*) corresponden con buena probabilidad a muones de los rayos cósmicos secundarios. Estos son partículas generadas en la alta atmósfera a partir de otras partículas extraterrestres de alta energía (ver apéndice 1) que chocan contra la atmósfera.

Vamos a estudiar vídeos como este para analizar la distribución de las trazas en el espacio y en el tiempo.

Hemos filmado (con la ayuda de Konrad Jende) dos vídeos de cinco y nueve minutos de la cámara de chispas que hay en el *Globe* del CERN. Sería una buena idea que visitarais el *Globe* vosotros mismos para filmar también cada uno, por ejemplo, un minuto (¡distinto de los demás!), pero de momento aquí están:

http://www.educa.madrid.org/web/cie.madrid/chispas/Chispas_Globe_5-min.mov

http://www.educa.madrid.org/web/cie.madrid/chispas/Chispas_Globe_9-min.mov

La tarea es que os repartáis esos 14 minutos divididos en grupos pequeños

(de dos o tres personas) para analizarlos. Basta ver un vídeo sin mucho cuidado para que a uno se le ocurran dos cosas, una observación y una pregunta:

- La inclinación de las trazas varía, pero hay una tendencia.
- ¿Se distribuyen las trazas aleatoriamente en el tiempo?

Os proponemos que –como mínimo– analicéis cualitativa y cuantitativamente estas dos cuestiones en vuestro minuto o minuto y pico de vídeo y luego pongáis en común los resultados.

Para eso, el primer paso es medir el intervalo entre eventos consecutivos y los ángulos que forman las trazas con la vertical y hacer dos histogramas, uno para la distribución de los ángulos y otro para la de los intervalos.

Las preguntas a las que hay que responder cuantitativamente son:

1. ¿Qué distribución de probabilidad tiene los intervalos de tiempo de llegada de los muones?
2. ¿Qué función describe la distribución angular de los muones?
3. ¿Cuál es el valor del flujo de muones verticales (por unidad de ángulo sólido, sr)? ¿Es similar a lo esperado? Discutir a qué se pueden deber las diferencias. NOTA: para esta pregunta es necesario conocer la *aceptancia geométrica* del detector, dato que os proporcionaremos en su momento.

Recordad que no hay un análisis que merezca el nombre sin una estimación estadística de errores y que las respuestas deben incluir posibles fuentes de error e incertidumbre debidas a los instrumentos, el proceso de medida, etc.

Los resultados globales (se deben juntar los datos de todos los equipos para que la estadística mejore) se presentarán el jueves 23 de junio a partir de las cuatro y media de la tarde. Cada uno de los dos equipos (cósmicos y CMS) tiene que preparar un informe final compuesto por unas cuantas transparencias en las que se den los resultados, los errores estimados y la discusión de ambos.

Para medir intervalos entre trazas y ángulos usaréis el programa libre *Tracker* (*free software* con licencia GNU GPL3, que es más que gratis: <http://physlets.org/tracker/>). El apéndice 4 contiene todo lo necesario para hacer la tarea.

Para el análisis estadístico de los resultados es posible emplear una hoja de cálculo (donde comenzaréis anotando los ángulos e intervalos entre trazas). Los histogramas se pueden hacer también en este sencillo

programa online:

<http://www.shodor.org/interactivate/activities/Histogram/>, aunque a quien tenga tiempo y ganas le recomendamos el uso de programas más potentes y específicos como R (<https://cran.r-project.org/>, también *free software* con licencia GNU S) con la interface R Studio (<https://www.rstudio.com/>, que al menos es *open source* y gratuita). El manual en español está [aquí](#).

Además, todas estas aplicaciones son multiplataforma (Linux, Mac, Windows).



Fig. 1

Finalmente, además de encontrar trazas normales, rectas, como la de la izquierda de la fig. 1, veréis otras cosas más raras, como la bonita traza de la derecha.

Sería una buena idea que guardarais pantallazos de las trazas raras para que vayáis indagando qué pueden ser y luego poder discutirlos.

Tras esta descripción de la tarea, una serie de apéndices desarrollan la información necesaria (o que simplemente viene bien) para desarrollarla.

APÉNDICES

1. LOS RAYOS CÓSMICOS
2. UN MODELO MUY SIMPLE PARA LOS RAYOS CÓSMICOS SECUNDARIOS
3. LA CÁMARA DE CHISPAS
4. MEDIDA DE TRAZAS CON *TRACKER*
5. UNA FÁBULA PRECAUTORIA SOBRE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

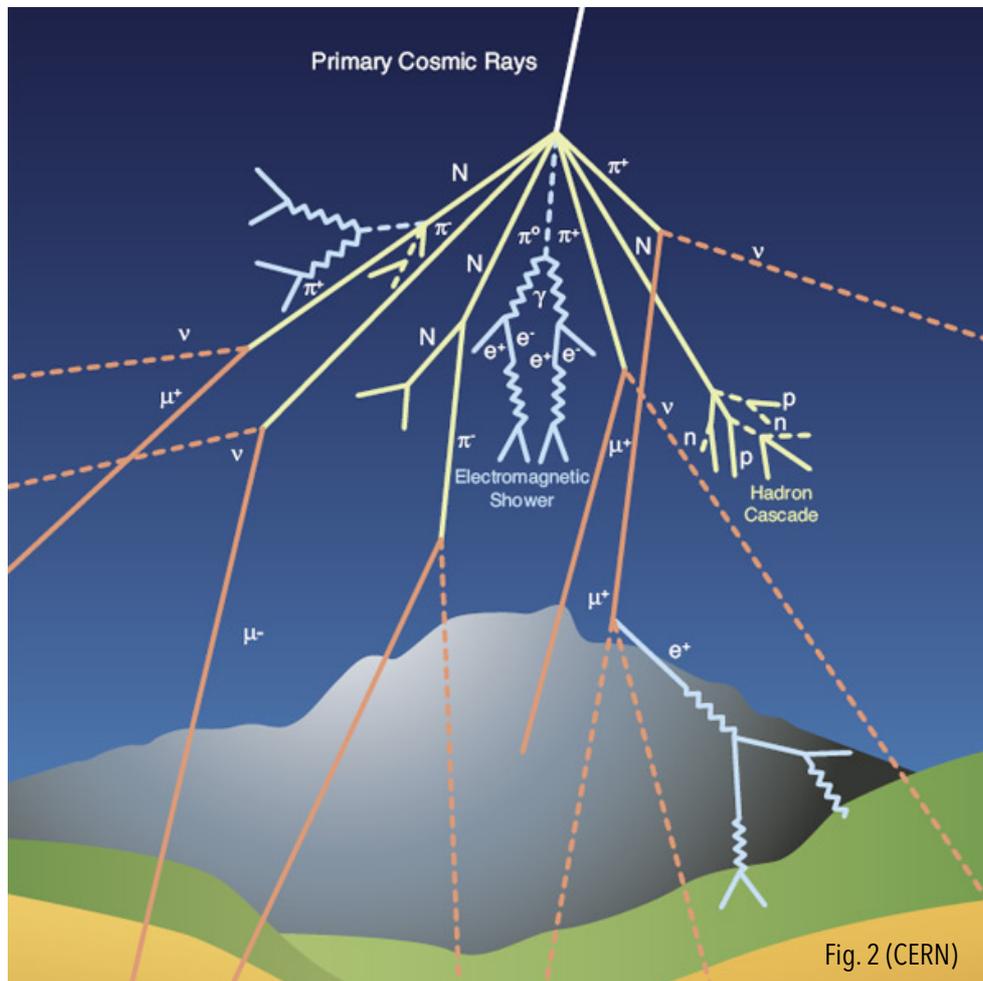
APÉNDICE 1: LOS RAYOS CÓSMICOS

Hacia 1912, Viktor Hess estaba investigando la descarga de los electroscopios, aparentemente imposible de evitar por muy bien aislados que estuviesen. La hipótesis principal que manejaban los físicos es que esa descarga se debía a las radiaciones ionizantes de las sustancias radiactivas presentes en la superficie terrestre. El hecho de que la descarga fuese más lenta en lo alto de la torre Eiffel que en la superficie parecía apoyar la conjetura. Sin embargo, Hess fue más allá y comprobó mediante una serie de vuelos en globo aerostático que esa tendencia se invertía por encima de los 1000 m de altura y que a los 5000 m el ritmo de ionización era tres veces mayor que en la superficie. Parece pues que existe una radiación ionizante que entraba en la atmósfera “desde arriba”, penetraba en los electroscopios y los descargaba: son los *rayos cósmicos*.

Los rayos cósmicos fueron la única fuente de partículas de alta energía¹ hasta la invención de los aceleradores y siguen siendo la única que tienen los no profesionales. Estas partículas son en su gran mayoría de origen extrasolar (salvo los de energía más baja) y aún extragaláctico, siendo uno de los mecanismos más probables de aceleración hasta esas inmensas energías las explosiones de supernova. Su composición es de cerca del 90 % de protones, algo menos del 10 % de núcleos de helio y trazas de núcleos más pesados. Al llegar a la Tierra, estas partículas chocan con núcleos de la atmósfera y a partir de la energía cinética de la colisión se crean muchas otras partículas, sobre todo piones; estos y sus descendientes dan lugar a los *rayos cósmicos secundarios* que nosotros podemos detectar. Los piones son partículas inestables que muy pronto (a una altura media de unos 15 km) se desintegran, principalmente en muones y neutrinos². Los neutrinos son, para nosotros prácticamente indetectables. En cuanto a los muones, partículas elementales también inestables que son algo así como una copia pesada del electrón, su interacción con la materia de la atmósfera es mucho menor que la de los piones³ y su vida media unas cien veces superior. Estos son algunos de los motivos por los que muchos muones de

-
- 1 Otras fuentes como las sustancias radiactivas que emiten radiación alfa (núcleos de helio) no pueden llamarse “de alta energía” desde hace ya muchos años. Sin embargo, las partículas más energéticas que hemos podido medir vienen de los rayos cósmicos, con valores del orden de los 10^{20} eV, diez millones de veces más que los protones del LHC. Más detalles sobre rayos cósmicos en <http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2015-rev-cosmic-rays.pdf>
 - 2 Estamos hablando de los piones cargados (π^\pm). Los neutros dan lugar a pares de fotones que luego producen cascadas electromagnéticas (de electrones, positrones y fotones que no vamos a poder detectar) Para todo esto es muy ilustrativo consultar las tablas de partículas y sus propiedades, que se pueden encontrar aquí: <http://pdg.lbl.gov> Tampoco es mala idea mirar esto: <http://arxiv.org/pdf/1005.5332v1.pdf>
 - 3 Los muones pierden energía en la atmósfera sobre todo por ionización. Nacen con energías típicas de unos 6 GeV que se reducen a unos 4 GeV en la superficie.

los creados a partir de los piones llegan a la superficie terrestre⁴ con un flujo típico de un muón por centímetro cuadrado por minuto a nivel del mar (e incluso penetran bajo tierra).



A la hora de hacer cualquier trabajo experimental –en contra de lo que parecen querer decir algunos de los partidarios extremos del *aprendizaje por descubrimiento*– más vale tener un modelo del fenómeno que estamos estudiando (lo que, cuando se hace bien, no excluye la creatividad ni las sorpresas) y conocer en profundidad el instrumento, los datos que éste produce y su tratamiento.

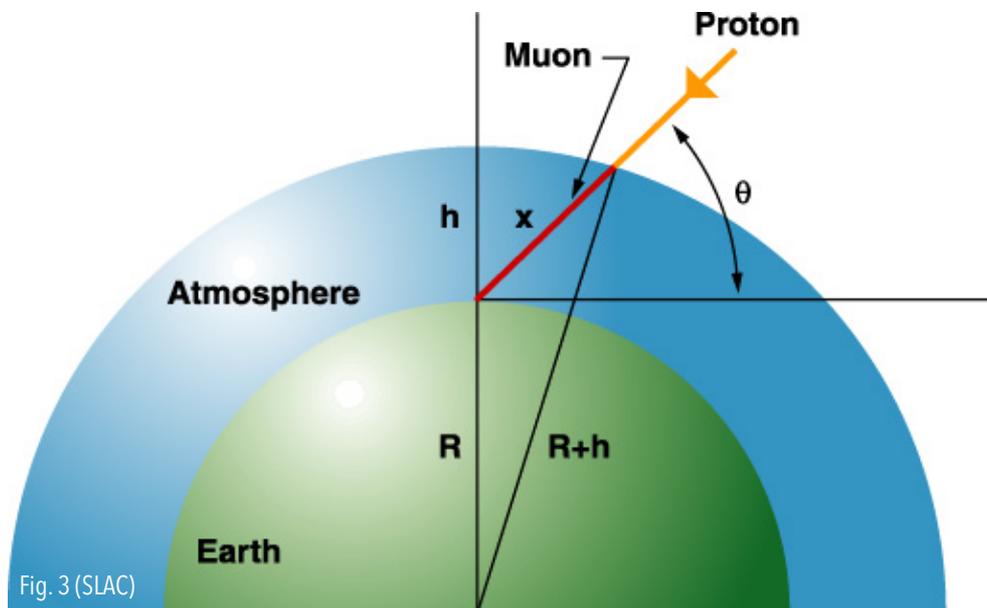
4 Dado que su vida media es de $2,2 \mu\text{s}$ y que está bien comprobado que nacen a una altura típica de unos 15 km no deberían hacerlo a pesar de que su velocidad es muy próxima a la máxima posible, c . Pero esa es otra historia que reaparecerá luego...

APÉNDICE 2 UN MODELO PARA LOS RAYOS CÓSMICOS SECUNDARIOS

Vamos a traducir esa información en un modelo muy simplificado y de validez limitada para poder entender lo que después mediremos. Parte de los protones como únicos componentes de los rayos cósmicos primarios y –aún más importante– sólo tiene en cuenta los muones como secundarios. Más detalles sobre el modelo aquí.⁵

Ya Viktor Hess pudo conjeturar a partir de las medidas que tomó durante un eclipse que el Sol no es la fuente principal de los rayos cósmicos (salvo quizá los de más bajas energías), así que un primer elemento del modelo será suponer que los rayos cósmicos primarios pueden venir de cualquier dirección que permita la geometría terrestre (los protones apenas pueden penetrar en la tierra).

Supongamos también que esta característica es aproximadamente extensible a los secundarios que se generan por desintegración de los piones cargados producidos en las interacciones entre rayos cósmicos primarios y núcleos de la atmósfera (mayoritariamente $p + N_2$ y $p + O_2$):



5 El *Virtual Visitor Center* de SLAC tenía una web muy útil sobre rayos cósmicos asociada a un detector que ofrecía imágenes y datos públicos. El laboratorio ya no mantiene esas páginas, pero quedan algunas copias en otros servidores: <http://physik.uibk.ac.at/hephy/muon/www2.slac.stanford.edu/vvc/cosmicrays/tourstop4.html> o <http://durpdg.dur.ac.uk/vvc/cosmicrays/tourstop4.html>

Esto equivale a suponer un modelo de la Tierra según el dibujo, en el que los muones se crean a una altura h y viajan con igual probabilidad con cualquier ángulo θ (entre 0 y 180°; en realidad por simetría nos basta considerar ángulos entre 0 y 90°). Téngase también en cuenta que a los muones de 4 – 6 GeV - de energía, les corresponde una velocidad de aproximadamente $0,9997c - 0,9998c$, es decir, son muones claramente relativistas.

Por el momento no nos hará falta desarrollar otros aspectos del modelo necesarios para obtener resultados cuantitativos, como las hipótesis de que todos los muones tienen la misma energía (el valor promedio E_μ) y que no interactúan con la atmósfera; en particular que no pierden energía y sus direcciones no se modifican por dispersión.

La consecuencia fundamental de este modelo es que, dentro de él, cualquier diferencia entre los muones que recibimos de distintos ángulos ha de deberse a la diferente longitud de los caminos que recorren.

Como uno de los objetivos del taller es que interpretéis físicamente los resultados, no vamos a desarrollar más el modelo ni los cálculos...

APÉNDICE 3 LA CÁMARA DE CHISPAS

Esta clase de detector se usó para investigación teniendo su época dorada en las décadas de 1960 – 1970, pero hoy ya solo pervive como aparato de demostración en museos, etc. Consiste básicamente en una caja herméticamente cerrada que contiene una serie de placas metálicas paralelas entre las que hay una mezcla de gases.

El paso de una partícula cargada a través de la cámara es detectado por el sistema de *trigger* formado por dos detectores de centelleo, uno encima y otro debajo de las placas y la electrónica correspondiente. Esto produce una señal que da lugar a una diferencia de potencial transitoria entre cada par de placas adyacentes bastante alta como para que se puede producir una descarga eléctrica en el gas. Si la energía de la partícula es suficiente, habrá ido ionizando el gas a su paso lo que facilita la formación de la chispa justo por donde la partícula atraviesa la cámara. De este modo puede visualizarse la trayectoria de la partícula.

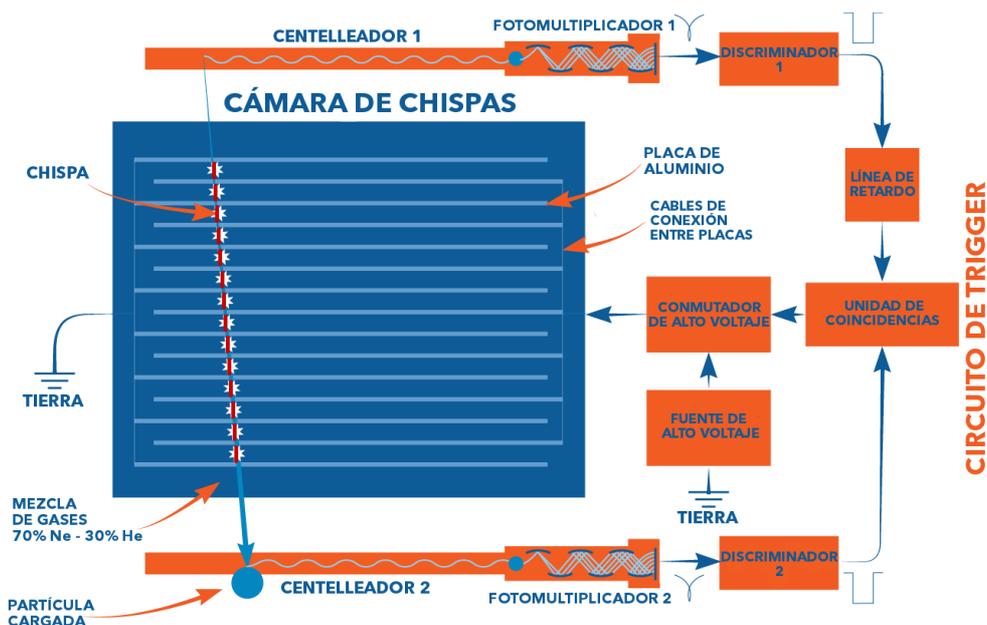
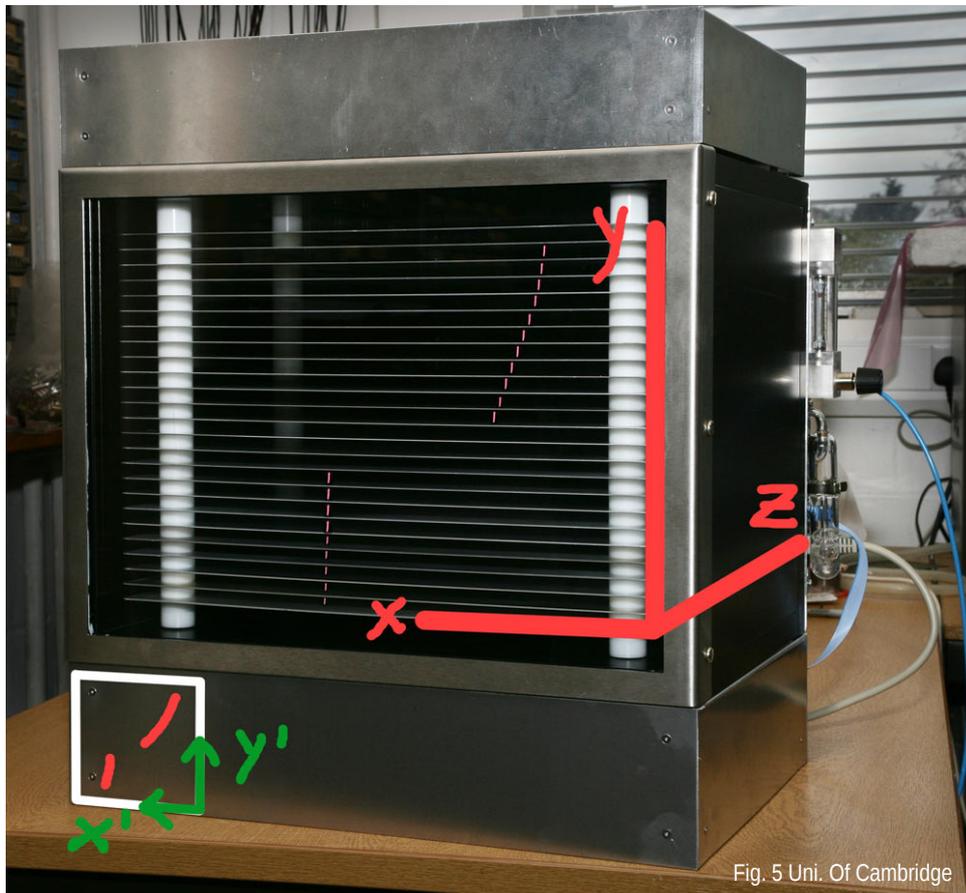


Fig. 4 Uni. Of Birmingham

Un parámetro importante en cualquier detector es el *tiempo muerto* (*dead time*), que es el intervalo mínimo entre dos detecciones consecutivas. El valor típico de varios ms para las cámaras de chispas se debe sobre todo al tiempo necesario para repetir un voltaje entre placas suficientemente elevado.

Para analizar las trayectorias, filmaremos la cámara en funcionamiento, lo que nos dará una proyección de la serie de chispas sobre un plano. Dos

factores que no se deben ignorar son el hecho de que la cámara no filma continuamente, sino generalmente a 25 o 30 fps (*frames per second*) y el modo en el que se lee el sensor (normalmente CMOS) de la cámara.⁶



Para más detalles sobre las cámaras de chispas se puede ver esto⁷.

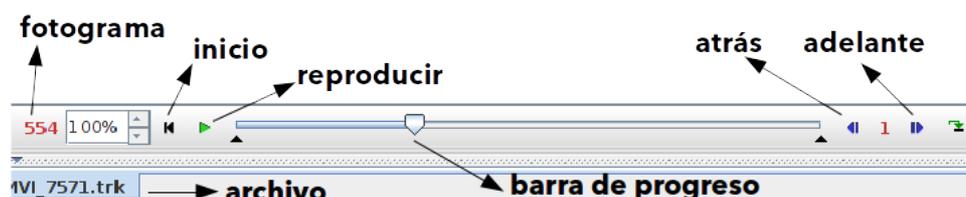
-
- 6 <http://gizmodo.com/these-neat-animations-show-how-cmos-and-ccd-sensors-wor-1702771058>
- 7 <http://www.ep.ph.bham.ac.uk/DiscoveringParticles/detection/spark-chamber/>,
<http://www.ep.ph.bham.ac.uk/twiki/bin/view/General/SparkChamber>,
<http://www.hep.ph.bham.ac.uk/general/outreach/SparkChamber2/>,
<http://arxiv.org/pdf/1010.4010.pdf>, <https://arxiv.org/pdf/0907.5461.pdf> o
<http://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/cosmic-ray-spark-chamber>

APÉNDICE 4 MEDIDA DE TRAZAS CON TRACKER

Para empezar, muchos querréis cambiar el idioma a castellano (aunque la traducción no es ni completa ni muy buena). El idioma se puede elegir en `Edit` → `Languages`. Vamos a suponer que habéis cambiado a *español*.

Lo primero es cargar un vídeo: `Archivo` → `Importar` → `Vídeo`

En la parte inferior de la ventana del vídeo hay unos controles de reproducción independientes que no requieren mucha explicación.



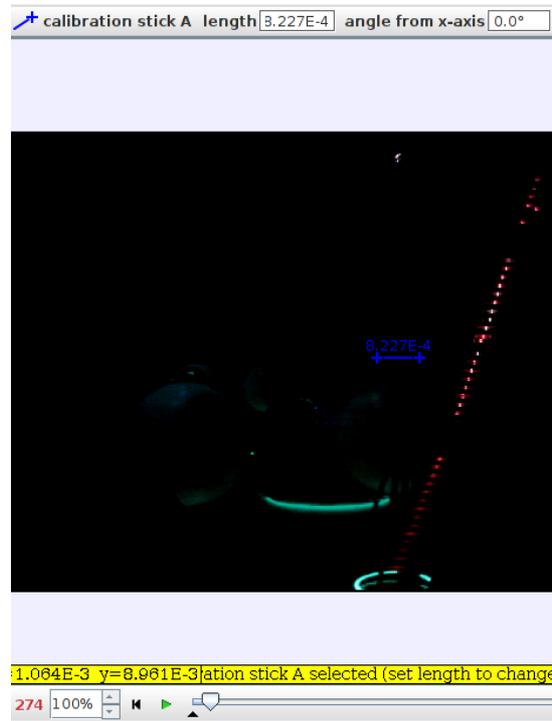
Inicialmente os pedimos que midáis dos cosas: las separaciones temporales entre eventos consecutivos y los ángulos con el eje x que forman las trazas (el ángulo θ en la figura 3).

Aquí nos interesa ir pasando el vídeo fotograma por fotograma con los botones *adelante* / *atrás* e ir anotando lo que midamos en cada uno de los que contengan trazas, lo que llamaremos un *evento*. El intervalo temporal entre fotogramas consecutivos se puede establecer consultando `Video` → `Frame durations` o `Video` → `Propiedades`. Cámaras y teléfonos normales hacen vídeo a 25 – 30 fps (*frames per second* – *fotogramas por segundo*).

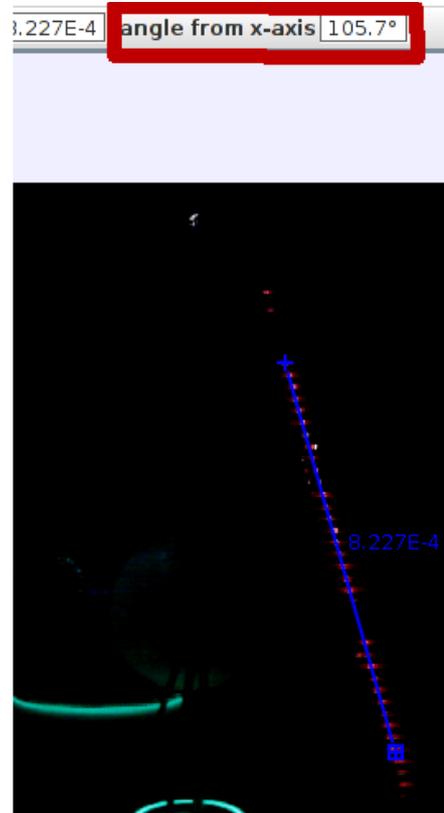
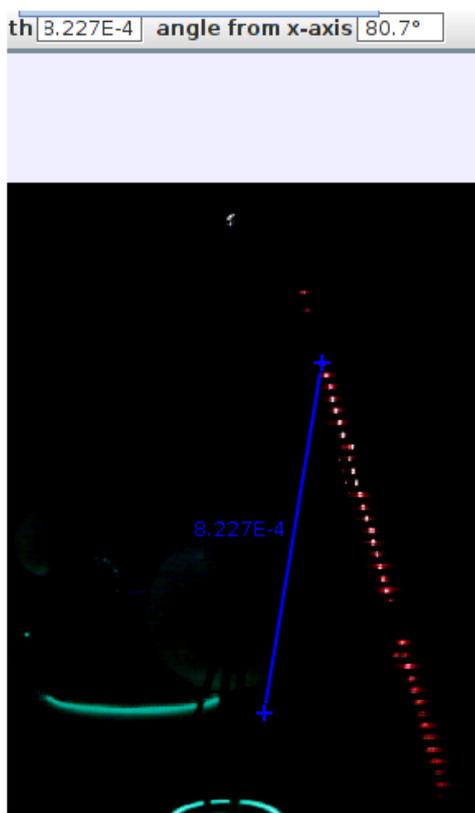
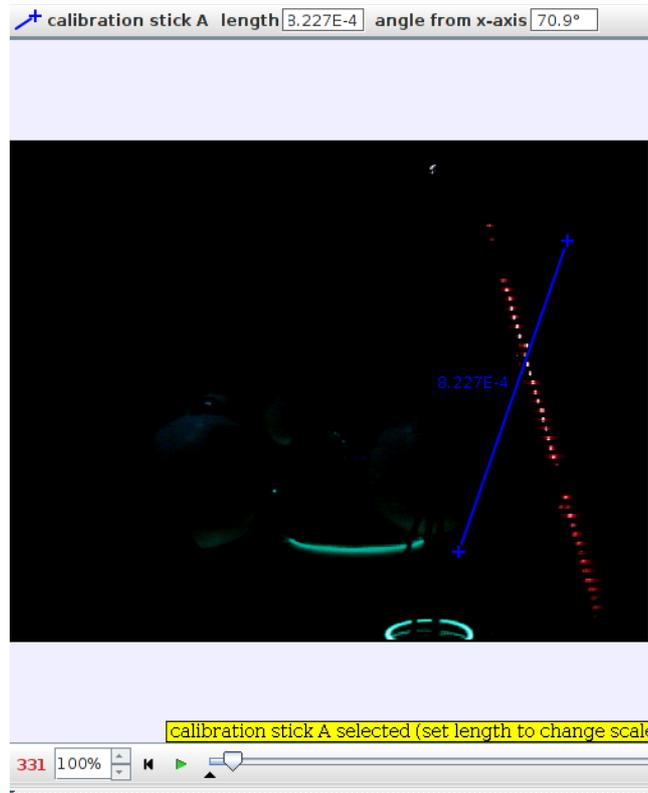
Un método sencillo para medir el ángulo con el eje x es la herramienta *vara de calibración* (`Crear` → `Calibration Tools` → `Vara de calibración` o `Trayectorias` → `Nuevo` → `Calibration Tools` → `Vara de medir`).

La herramienta consiste en una línea con dos extremos que pueden moverse libremente arrastrando con el puntero o moviendo el extremo seleccionado (marcado con un cuadrado) mediante las teclas de desplazamiento. Se superpone la vara sobre la traza y se lee el ángulo con el eje x en la pantalla. Hay que estar un poco atento para mover los extremos de modo que el ángulo se mida con la convención usual para los ejes cartesianos. Las siguientes figuras muestran un ejemplo de la medida de dos ángulos (tras medir uno no cerramos la vara de medir, sino que la adaptamos sin más a la próxima traza).

Como podréis comprobar, existe cierta ambigüedad a la hora de juzgar la bondad del ajuste de la vara a la traza. Hay que establecer un criterio consistente e, idealmente, estimar los errores de medida.



Y tras anotar las medidas vamos avanzando desde el fotograma 274 hasta que en el 331 hay otro evento que medimos con la misma vara...



Para guardar todo lo que hayamos hecho Archivo → Grabar pestaña da lugar a un archivo .trk que sólo se puede abrir si el archivo de vídeo original está a mano (en el mismo sitio desde el que Tracker accedió a él). Este .trk es el que se abre para continuar o revisar el trabajo efectuado sobre el archivo.

Con este método tenemos que copiar en una hoja de cálculo (basta como texto .csv, que R lee también sin problema) los fotogramas y los ángulos.

Obtendremos una tabla de este estilo:

	A	B	C	D	E
1	frame	angle x/°	interval	angle y/°	notes
2	28	11.2		101.2	
3	43	-14.3	15	75.7	track not straight
4	59	9.9	16	99.9	
5	77	4.7	18	94.7	

Donde también hemos calculado el intervalo en fotogramas entre eventos (que fácilmente se transforma en tiempos) y el ángulo con la vertical (eje y) que es más conveniente para el análisis.

Además de en [la web del proyecto ya citada](#), que es el mejor punto de partida pero está en inglés, se pueden encontrar más detalles sobre Tracker (que de verdad es un programa extraordinario para la clase de física), por ejemplo en:

<http://ciencia-a-conciencia.blogspot.com.es/2012/03/tracker-programa-para-analizar-videos.html>

<http://difusion.df.uba.ar/ConectarIgualdad/manual-rapido-tracker.pdf>

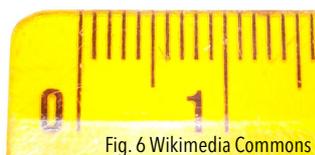
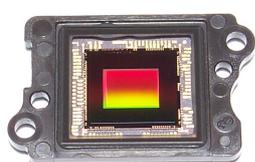
http://difusion.df.uba.ar/ConectarIgualdad/tutorial_inicial_tracker.pdf

APÉNDICE 5

UNA FÁBULA PRECAUTORIA SOBRE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Pero ¿de verdad que tenemos que aprendernos todos esos detalles sobre la cámara de chispas o sobre los vídeos, etc? Al fin y al cabo cuando hacemos “prácticas” en el instituto o incluso muy a menudo en la facultad, un termómetro es nada más que un termómetro: lo pongo donde sea y saco un número, como mucho con una estimación del error. ¿O no?

Para terminar, intentaremos mostrar claramente *uno* de los *muchos* motivos por los que no nos podemos conformar con las cajas negras que nos dan los datos que andamos buscando sin saber nada sobre cómo se han obtenido.



A lo mejor después de este curso os interesan los rayos cósmicos y queréis estudiarlos más con vuestros alumnos. Leéis que hay una aplicación para móviles –GammaPix⁸– la instaláis y os ponéis “a detectar”. Por hacer como Viktor Hess, se os ocurre probarlo en un avión y comparar las medidas con las que habéis obtenido justo antes de despegar. No es tan fácil puesto que el flujo de rayos cósmicos⁹ podría depender de otras variables además de la altura (presión atmosférica, posición

geográfica, etc.) pero supongamos que de momento podemos ignorar todo esto. Cuando estábamos en casa el teléfono estaba apoyado sobre la mesa pero, ¿y en el avión? En el avión dejamos el teléfono en el respaldo, con la revista, las instrucciones de seguridad y la bolsa de papel. ¿Podemos comparar las medidas?

Para responder es necesario saber cómo es el detector. En un teléfono móvil, el detector es el sensor de la cámara del teléfono (normalmente un CMOS, con fotodiodos¹⁰ que son sensibles a la radiación visible, pero también a las partículas). Este elemento sensible tiene dimensiones típicas del orden de las de la figura 6 ($\approx 5 \times 3$ mm) y es esencialmente plano, así que salvo que los rayos cósmicos vinieran por igual de todas direcciones no es lo mismo ponerlo horizontal, como en casa, que más o menos vertical como en el avión...

8 GammaPix: <http://www.gammapix.com/>. Para otros propósitos más relacionados con nuestro objeto aquí es mejor DECO: <https://wipac.wisc.edu/deco/home>

9 O lo que sea, ¿cómo asegurarse de que son rayos cósmicos cuando otras partículas, por ejemplo, emitidas por los materiales que ridean

10 En los que mediante el efecto fotoeléctrico la luz genera una corriente. Ver, por ejemplo http://www.canon.com/technology/s_lab0/light/003/05.html#c003s005h001

PROCEDENCIA DE LAS FIGURAS

Fig. 2 Cortesía CERN

Fig. 3 Cortesía SLAC

Fig. 4 Rebecca Pitt for *Discovering Particles*

(<http://www.ep.ph.bham.ac.uk/DiscoveringParticles/detection/spark-chamber/spark-chamber.php>)
[Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 2.0 UK: England & Wales License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/uk/)

Fig. 5 The Mark III(a) Cambridge Spark Chamber.

<http://www.hep.phy.cam.ac.uk/~lester/teaching/SparkChamber/SparkChamber.html>

Fig. 6 Wikimedia Commons by Andrzej w k 2 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%3ACMOS_SONY_EXMOR_R_IMX055CHL_sensor_side%2Bsize.jpg [CC BY-SA 4.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

El resto de las figuras son de elaboración propia.

Versión 1.0

10 de junio de 2016

Elaborada para SLTP 2016