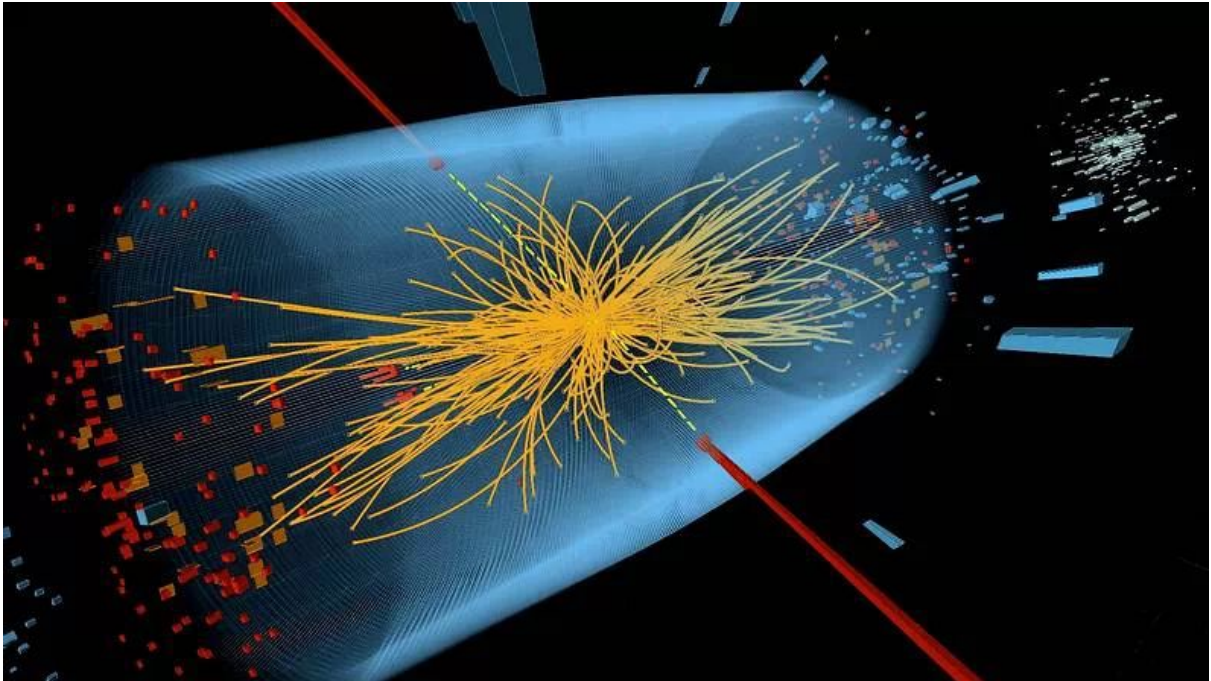


Introducción a la física nuclear y desarrollo de una cámara de niebla



Guillermo Galve Barranco

2n BTX A

Daniel Parcerisas Brossa

08/01/2019



Índice:

1.	Introducción.....	4
2.	Introducción a la física nuclear.....	6
2.1	Fuerzas fundamentales.....	6
2.1.1	La interacción gravitatoria.....	6
2.1.1.1	Explicación del tirón gravitatorio según los dos modelos.....	7
2.1.2	La interacción electromagnética	8
2.1.3	Interacción nuclear fuerte.....	9
2.1.4	Interacción nuclear débil.....	10
2.2	Radioactividad en las partículas.....	11
2.2.1	Radiación no ionizante.....	11
2.2.1.1	Ondas de radio.....	11
2.2.1.2	Luz visible.....	12
2.2.1.3	Microondas.....	12
2.2.2	Radiación ionizante.....	13
2.2.2.1	Radiación directamente ionizante.....	14
2.2.2.1.1	Partículas alfa.....	15
2.2.2.1.2	Partículas beta.....	16
2.2.2.1.3	Núcleos cargados.....	17
2.2.2.1.4	Positrones y otros tipos de antimateria.....	18
2.2.2.2	Radiación indirectamente ionizante.....	18
2.2.2.2.1	Radiación gamma.....	18
3.	Detectores de partículas.....	20
3.1	Contador Geiger.....	21
3.2	Cámara de niebla.....	22
3.3	Fotomultiplicador.....	23
3.3.1	Tipo de reacción de los fotones en un fotomultiplicador.....	24
3.3.2	Reacciones de electrones:.....	24



3.3.2.1	La dispersion de Compton.....	24
3.3.2.2	Efecto Fotoelectrico.....	24
3.3.2.3	Producción de pares.....	25
3.3.3	Fotomultiplicador de silicio.....	25
3.4	Cámara de burbujas.....	26
3.5	Cámara de chispas.....	27
3.6	Cámara proporcional de multihilos.....	28
3.7	Detectores de partículas modernos:.....	29
3.7.1	LHCb.....	29
3.7.2	ALICE.....	30
3.7.3	ATLAS.....	31
3.7.4	TOTEM.....	32
3.7.5	LHCf.....	32
3.7.6	MOEDAL.....	33
3.7.7	Super-Kamiokande.....	33
4.	Aceleradores de partículas.....	34
4.1	Acelerador de partículas electroestático.....	34
4.2	Aceleradores de partículas electrodinámicas/electromagnéticas.....	36
4.2.1	Aceleradores de inducción magnética.....	36
4.2.1.1	Aceleradores de inducción magnética lineales.....	36
4.2.1.2	Betatron.....	37
4.2.1.3	Aceleradores lineales	37
4.2.2	Aceleradores circulares/cíclicos.....	38
4.2.2.1	Ciclotrón.....	38
4.2.2.2	Ciclotrón Isócrono.....	39
4.2.2.3	Sincrociclotrón:	40
4.2.2.4	Sincrotón.....	40



5. Montaje y recopilación de resultados de una cámara de niebla.....	41
6. Práctica detección de partículas.....	46
7. Práctica UB.....	49
8. Conclusiones.....	52
9. Referencias... ..	53
Anexos.....	55



1.Introducción:

En este trabajo de investigación trataré de dar una idea generalizada sobre los conceptos que acompañan a una de las ramas en la física más importantes:

❑ **La física nuclear**

Al final la física nuclear se resume en el estudio de las propiedades y el comportamiento de los núcleos atómicos, asimismo, en un contexto más amplio, se define la **física nuclear y de partículas** como la rama de la física que estudia la estructura fundamental de la materia y las interacciones entre las partículas subatómicas que la forman.

No obstante, mi trabajo no solo se adentrará en el margen teórico de esta, sino que para entender realmente qué es lo que nos rodea usare el instrumento que nos ha permitido entender y “observar” estos pequeños de la naturaleza:

❑ **Los detectores de partículas**

Concretamente se dará uso de dos detectores donde uno nos enseña el mundo de la detección de partículas desde la digitalización de datos que este obtiene (**TimePix MX-10**), mientras que el otro se basa en su estudio de una forma más primitiva ya que su detección consiste en visualizar el rastro que dejan las partículas ionizantes en un gas saturado (**cámara de niebla**).

Motivación de la investigación y objetivos:

A la hora de escoger este tema del trabajo de investigación pensé en hacerlo sobre algún aspecto relacionado con la física o la ingeniería, pero fue gracias a la oportunidad que me dio el profesorado del colegio Sagrada Familia de Gava al comentarme que podríamos participar en un proyecto con colaboración del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) debido a su relación con un



exalumno que actualmente trabaja en sus instalaciones, el Dr. Rafael Ballabriga. El hecho de haber escogido este tema también está motivado por mi interés por la física nuclear y de partículas, porque es una forma de explicar el mundo oculto que nos rodea y que aunque nos veamos como entes macroscópicos y uniformes nunca deberíamos olvidar que es lo que realmente nos hace ser, además de por dar respuestas a preguntas que nos formula el complejo mecanismo del universo. Sin embargo, fue debido a la orientación que me proporcionó mi tutor de TR el profesor licenciado en física Daniel Parcerisas Brossa que me hizo decantar por una mayor focalización en los detectores de partículas para finalmente optar por la construcción y experimentación de una cámara de niebla.

A grandes rasgos el trabajo consiste, por una banda, entender que es la física nuclear, qué conceptos forman esta rama tan importante de la física, que instrumentos de precisión se utilizan para su estudio, etc. Y, por otra, en explorar y experimentar con detectores de partículas las propiedades de las partículas ionizantes.

Concretamente los objetivos de mi trabajo han sido:

- Investigar con profundidad los tipos de radiaciones ionizantes y sus características además de los instrumentos de experimentación para estudiarlas
- Dominar el detector de partículas MiniPix (Utilización de este para la experimentación)
- Desarrollar de forma casera una cámara de niebla para la detección a simple vista de partículas ionizantes



2. Introducción a la física nuclear:

2.1 Fuerzas fundamentales:

Las fuerzas fundamentales son las cuatro fuerzas de interacción fundamentales que se encuentran en el universo y son la interacción gravitatoria, la electromagnética, la nuclear fuerte y por último la nuclear débil.

		Intensidad	Alcance (m)	Partícula
Fuerte		1	10 ⁻¹⁵ (Diámetro del tamaño promedio del núcleo)	gluón π (nucleones)
Electromagnética		$\frac{1}{137}$	Infinito	fotón masa = 0 espín = 1
Débil		10 ⁻⁶	10 ⁻¹⁸ (0,1% del diámetro del protón)	bosones vectoriales intermedios W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰ masa > 80 GeV espín = 1
Gravitatoria		6 x 10 ⁻³⁹	Infinito	gravitón ¿? masa = 0 espín = 2

2.1.1 La interacción gravitatoria:

La gravedad es descrita con mayor precisión por la teoría general de la relatividad (propuesta por Albert Einstein en 1915) que describe la gravedad no como una fuerza, sino como una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo causada por la distribución desigual de la masa. El ejemplo más extremo de esta curvatura del espacio-tiempo es un agujero negro, del cual nada, ni siquiera la luz, puede escapar una vez que pasa el horizonte de eventos del agujero negro. Sin embargo, para la

¹ Tabla de las 4 fuerzas fundamentales



mayoría de las aplicaciones, la gravedad se aproxima bien a la ley de Newton de la gravitación universal, que describe la gravedad como una fuerza que hace que dos cuerpos se atraigan entre sí, con la fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.

La gravedad es la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales de la física. Como consecuencia, no tiene influencia significativa a nivel de partículas subatómicas. En contraste, es la fuerza dominante en la escala macroscópica, y es la causa de la formación, forma y trayectoria de los cuerpos astronómicos. Por ejemplo, la gravedad hace que la Tierra y los otros planetas orbiten alrededor del Sol, también la Luna orbita la Tierra y provoca la formación de mareas , la formación y evolución del Sistema Solar , las estrellas y las galaxias.

2.1.1.1 Explicación del tirón gravitatorio según los dos modelos:

Dos objetos ejercen una fuerza de atracción una sobre la otra conocida como "gravedad". Sir. Isaac Newton cuantificó la gravedad entre dos objetos cuando formuló sus tres leyes del movimiento. La fuerza que tira entre dos cuerpos depende de cuán masiva sea cada uno y de cuán alejados estén los dos. A pesar de que el centro de la Tierra te empuja hacia ella, tu centro de masa retrocede hacia la Tierra. Pero el cuerpo más masivo apenas siente el tirón de ti, mientras que con tu masa mucho más pequeña te encuentras firmemente arraigado gracias a esa misma fuerza. Sin embargo, las leyes de Newton suponen que la gravedad es una fuerza innata de un objeto que puede actuar sobre una distancia.

Albert Einstein, en su teoría de la relatividad especial, determinó que las leyes de la física son las mismas para todos los observadores que no aceleran, y demostró que la velocidad de la luz dentro de un vacío es la misma, sin importar la velocidad a la que viaje un observador. Como resultado, descubrió que el espacio y el tiempo estaban entrelazados en un solo continuo conocido como espacio-tiempo. Los



eventos que ocurren al mismo tiempo para un observador podrían ocurrir en diferentes momentos para otro.

Mientras elaboraba las ecuaciones de su teoría general de la relatividad, Einstein se dio cuenta de que los objetos masivos causaban una distorsión en el espacio-tiempo. Para concebir este concepto se hace símil a colocar un gran cuerpo en el centro de una membrana. El cuerpo presionaría hacia abajo en la tela, causando que se forme un hoyuelo. Una canica rodada alrededor del borde giraría en espiral hacia el interior del cuerpo, tirada de la misma manera que la gravedad de un planeta atrae a las rocas en el espacio.

2.1.2 Interacción electromagnética:

Para entender esta interacción es necesario saber que en la teoría atómico existen tres tipos de partículas que forman los átomos: los electrones, neutrones y protones. Estas partículas son caracterizadas por la masa y una carga eléctrica. Al igual que en la gravitatoria de un cuerpo con presencia de masa produce esta interacción en el electromagnetismo se produce gracias a estas cargas eléctricas.

En el electromagnetismo se diferencian dos tipos de fuerzas: una es la fuerza de repulsión es producida cuando dos cuerpos interaccionan entre sí con la misma carga y el otro es la de atracción que se da en caso de que dos cuerpos de diferente carga interaccionan entre sí.

Al final la fuerza electromagnética explica cómo interactúan las partículas cargadas en movimiento y estacionarias. Su nombre fuerza electromagnética es debido a que incluye la fuerza eléctrica y la fuerza magnética; De forma que las fuerzas magnéticas y las fuerzas eléctricas son en realidad la misma fuerza fundamental.

La fuerza eléctrica actúa entre todas las partículas cargadas, estén o no moviéndose. Y a diferencia la fuerza magnética actúa entre las partículas cargadas



en movimiento. Esto significa que cada partícula cargada emite un campo eléctrico, se mueva o no. Las partículas cargadas en movimiento (como las de la corriente eléctrica) emiten campos magnéticos .Einstein desarrolló su teoría de la relatividad a partir de la idea de que si el observador se mueve con las partículas cargadas, los campos magnéticos se transforman en campos eléctricos y viceversa.

2

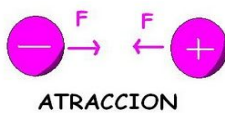
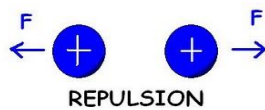
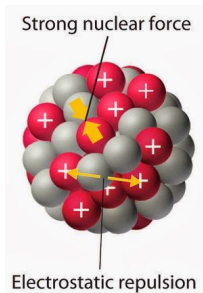


Figura 1

2.1.3 Interacción nuclear fuerte:

Esta fuerza a diferencia de las otras dos ya mencionadas se encuentra únicamente en situaciones de dimensiones atómicas muy pequeñas. Concretamente esta interacción es la responsable de mantener unidos los nucleones, es decir, los neutrones y protones dispuestos en el núcleo atómico venciendo así a las fuerzas de repulsión electromagnética producidas por la presencia de la misma carga positiva entre protones produciendo la unión entre neutrones y protones en el núcleo. Sobre esta fuerza hay que recalcar que sólo se encuentra a distancias muy pequeñas de la medida de núcleos atómicos. Bajo el Modelo Estándar, una de las partículas más pequeñas y fundamentales, es decir, una que no se puede dividir en partes más pequeñas, es el quark. Estas partículas son los bloques



de construcción de una clase de partículas masivas conocidas como hadrones, que incluyen a los ya nombrados protones y neutrones. De forma que la interacción fuerte fundamental mantiene

_____ e la repulsión y atracción entre cargas eléctricas.



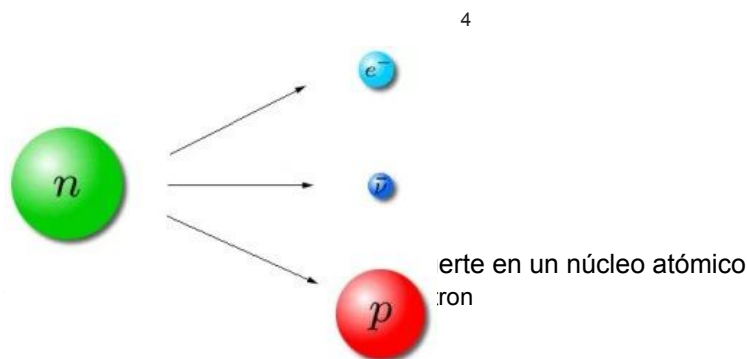
³unidos los quarks constituyentes de un hadrón, y la fuerza residual mantiene juntos los hadrones, como el protón y los neutrones en un núcleo.

2.1.4 Interacción nuclear débil:

Esta interacción define principalmente el concepto de las desintegraciones radiactivas. Como interacción débil no sólo puede ocasionar efectos puramente atractivos o repulsivos, sino que también puede producir el cambio de identidad de las partículas involucradas, es decir, lo que se conoce como una reacción de partículas subatómicas.

En caso de la interacción débil, fermiones pueden intercambiar tres tipos distintos de portadores de fuerza conocidos como los bosones W^+ , W^- y Z . La masa de cada uno de estos bosones es mucho mayor que la masa de un protón o neutrón, lo cual es consistente con el corto alcance de la fuerza débil. De hecho, la fuerza se denomina débil porque su intensidad de campo en una distancia dada suele ser de varios órdenes de magnitud menor que la de la fuerza nuclear fuerte o la fuerza electromagnética.

Los quarks, que forman partículas compuestas como neutrones y protones, vienen en seis "sabores" (arriba, abajo, extraño, encanto, arriba y abajo) que dan a esas partículas compuestas sus propiedades. La interacción débil es única porque permite que los quarks intercambien su sabor por otro. El intercambio de esas propiedades está mediado por los bosones portadores de fuerza. Por ejemplo, durante la desintegración beta menos, un quark down dentro de un neutrón se transforma en un quark up, convirtiendo así el neutrón en un protón y dando como resultado la emisión de un electrón y un antineutrino electrónico.





2.2 Radioactividad en las partículas:

El concepto de radiación es la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material. Y esta se puede subdividir en dos principales tipos, la radiación no ionizante y la radiación ionizante.

2.2.1 Radiación no ionizante:

En cuanto a su definición, se refiere a cualquier tipo de radiación electromagnética que no transporta suficientes cuantos de energía para ionizar átomos o moléculas, es decir, para eliminar completamente un electrón de un átomo o molécula. En lugar de producir iones cargados al pasar a través de la materia como la radiación ionizante, la radiación electromagnética no ionizante tiene suficiente energía solo para la excitación, el movimiento de un electrón hacia un estado de energía superior.

En cuanto a tipos existe una amplia variedad de radiaciones no ionizantes, pero las principales y con las que más convivimos en nuestro día a día son:

2.2.1.1 Ondas de radió:

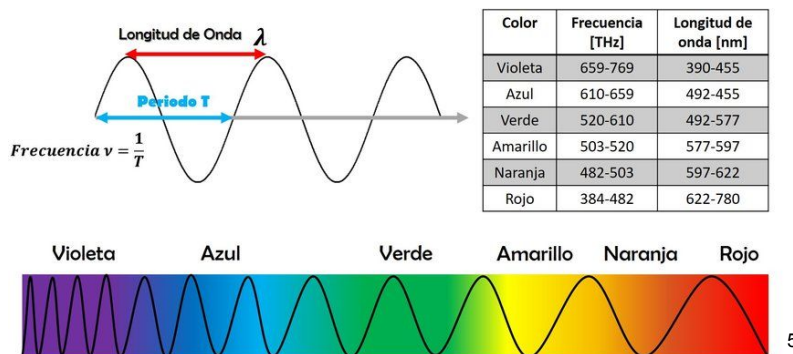
Las ondas de radio son un tipo de radiación electromagnética con longitudes de onda en el espectro electromagnético más largas que la luz infrarroja. Como todas las demás ondas electromagnéticas, viajan a la velocidad de la luz. Las ondas de radio que ocurren naturalmente son hechas por rayos o por objetos astronómicos. En cuanto a sus usos en la tecnología las ondas de radio generadas artificialmente se utilizan para comunicaciones de radio fijas y móviles, radiodifusión, radar y otros sistemas de navegación, comunicación por satélite, redes de computadoras e innumerables otras aplicaciones. Además estas según las diferentes frecuencias de



las ondas de radio tienen diferentes características y propiedades de propagación en la atmósfera de la Tierra.

2.1.2.2 Luz del espectro visible (Luz visible):

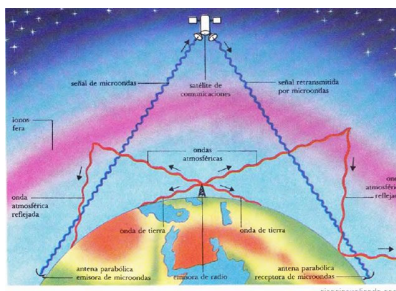
La luz, o luz visible, es el rango muy estrecho de la radiación electromagnética que es visible para el ojo humano con una longitud de onda de aproximadamente 400–700 nm, o hasta 380–750 nm.



2.2.1.3 Microondas:

Las microondas son una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda que van desde aproximadamente un metro a un milímetro

Las microondas viajan únicamente por caminos de línea de visión a diferencia de las ondas de radio de baja frecuencia. Además no viajan como ondas terrestres que siguen el contorno de la Tierra, ni se reflejan en la ionosfera. En cuanto a sus usos la radio de microondas se utiliza en transmisiones de radiodifusión y telecomunicaciones, además tienen un gran protagonismo en el ámbito de la astronomía radial debido a la recepción de microondas emitidas por cuerpos celestes lejanos como planetas, estrellas, galaxias, etc... también se encuentra el uso del microondas en el calentamiento dieléctrico principalmente por la absorción de la energía en el agua que contengan los cuerpos sometidos a las microondas.⁶



ctro visible
electromagnéticas en la atmósfera según su longitud de onda



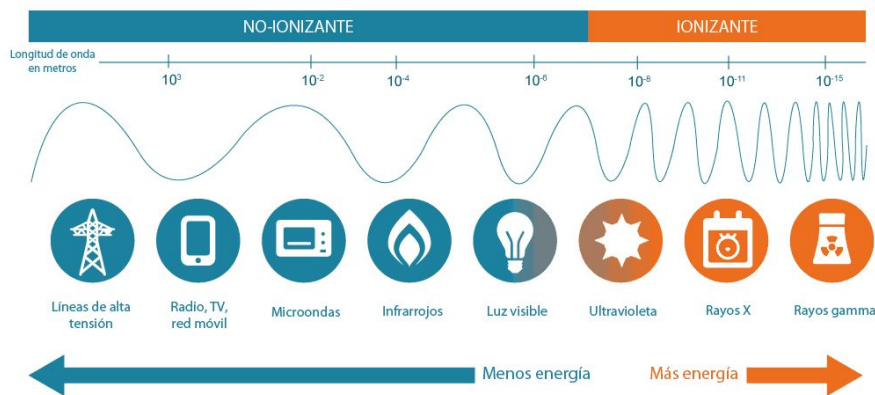
2.2.2 Radiación ionizante:

Las radiaciones ionizantes son aquellas formadas por fotones o partículas que interactúan con la materia y producen iones, como ejemplo de radiaciones ionizantes por partículas o corpusculares son ejemplos la radiactividad alfa y la radiactividad beta ya mencionadas anteriormente y respecto a radiaciones electromagnéticas también son ejemplos desde los rayos ultravioleta a los rayos gamma o los rayos X.

Estas radiaciones en cuanto a su procedencia hay varias, principalmente se encuentran en sustancias radiactivas que emiten estos tipo de radiaciones de forma espontánea o también se pueden encontrar estas radiaciones en generadores artificiales como podría ser una máquina de rayos X o en un acelerador de partículas.

La utilización de estas es muy importante hoy en día para el desarrollo de la industria y medicina. En industria se han podido encontrar formas de conseguir grandes cantidades de energía gracias a la fisión nuclear, o en el caso de la medicina se encuentran diversos procedimientos mediante radiaciones ionizantes para diagnosticar enfermedades o tratamientos como puede ser la radioterapia.

7



⁷ Diagrama de radiaciones según su energía y longitud de onda.



La radiación ionizante se clasifica por la naturaleza de las partículas u ondas electromagnéticas que crean el efecto ionizante. Estos tienen diferentes mecanismos de ionización, y pueden agruparse como ionizantes directa o indirectamente.

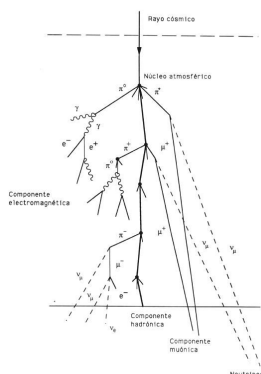
2.2.2.1 Radiación directamente ionizante:

Cualquier partícula masiva cargada puede ionizar átomos directamente por interacción fundamental a través de la fuerza de Coulomb si transporta suficiente energía cinética. Esto incluye núcleos atómicos, electrones, muones, piones cargados, protones y núcleos cargados de energía despojados de sus electrones.

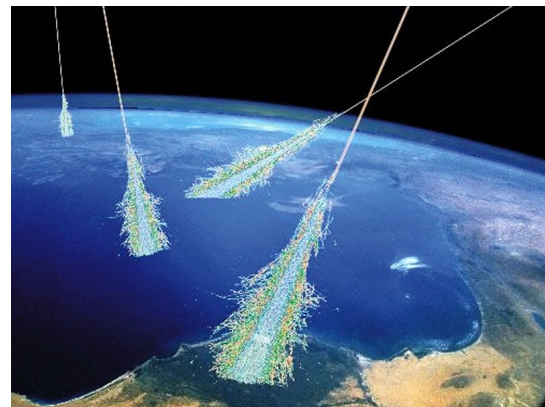
Cuando se mueven a velocidades relativistas, estas partículas tienen suficiente energía cinética para ser ionizantes, pero no se requieren velocidades relativistas. Por ejemplo, una partícula alfa típica es ionizante, pero se mueve a aproximadamente 5% c, y un electrón con 33 eV (suficiente para ionizar) se mueve a aproximadamente 1% c.

Los rayos cósmicos naturales se componen principalmente de protones relativistas, pero también incluyen núcleos atómicos más pesados como los iones de helio y los iones HZE. En la atmósfera, tales partículas a menudo son detenidas por moléculas de aire, y esto produce piones cargados de corta duración, que pronto se descomponen en muones, un tipo primario de radiación de rayos cósmicos que llega al suelo. Además, los piones también se pueden producir en grandes cantidades en aceleradores de partículas.⁸

9



ando en la atmósfera en 3D
cada de partículas en 2D





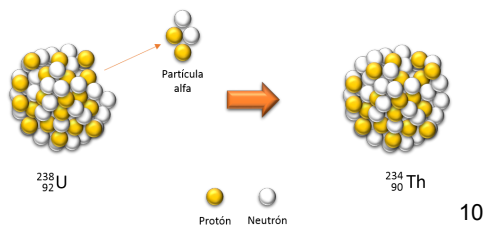
2.2.2.1.1 La radiación alfa:

La radiació alfa està constituïda per nuclis d'heli ionitzats (He^{2+}), ja que, no presenten electrons (e^-) llançats a una gran velocitat aproximadament $1/20c$ (on "c" és la velocitat de la llum).

Son una forma altamente ionizante de la radiación de partículas, aunque tienen una profundidad de penetración baja, ya que puede ser detenida por unos pocos centímetros de aire, o por la piel.

Para la organización de radiación alfa se debe dar la desintegración alfa la cual es un tipo de desintegración radiactiva en la que un núcleo atómico emite una partícula alfa (núcleo de helio) y, por lo tanto, se transforma o 'descompone' en un núcleo atómico diferente, con un número de masa que se reduce en cuatro y un atómico número que se reduce en dos. La energía de las partículas alfa emitidas varía, con las partículas alfa de mayor energía emitidas desde núcleos más grandes, pero la mayoría de las partículas alfa tienen energías de entre 3 y 7 MeV (mega-electron-voltios), correspondientes a vidas medias extremadamente largas y extremadamente cortas.

Esta energía es una cantidad sustancial de energía para una sola partícula, pero su gran masa significa que las partículas alfa tienen una velocidad más baja (con una energía cinética típica de 5 MeV; la velocidad es de aproximadamente 15,000 km / s, que es el 5% de la velocidad de luz) que cualquier otro tipo común de radiación (partículas β , neutrones, etc.) Debido a su carga y gran masa, las partículas alfa son absorbidas fácilmente por los materiales y pueden viajar solo unos pocos centímetros en el aire.



2.2.2.1.2 La radiación beta:

La radiación beta está constituida por partículas beta, que en este caso no son más que electrones a velocidades muy cercanas a las de la luz, aproximadamente $0,99c$ (donde "c" equivale a la velocidad de la luz = $3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Más adelante se descubrió que aparte de la emisión de radiación beta para electrones a altas velocidades también existía de una forma de reacción inducida artificialmente la aparición de una radiación beta compuesta por positrones (antipartícula del electrón) a la misma velocidad que el electrón.

El proceso en el que un neutrón se transforma en protón y viceversa se denomina desintegración beta. La desintegración beta se produce cuando, en un núcleo con demasiados protones o demasiados neutrones, de forma que uno de los protones o neutrones se transforma en el otro, y para la emisión de estas partículas se ha de producir una reacción nuclear la cual puede ser de dos formas:

De los tres tipos comunes de radiación emitida por los materiales radiactivos, la beta tiene un poder de penetración medio y el poder de ionización dentro de sus competentes también catalogado como medio.

Aunque las partículas beta emitidas por diferentes materiales radiactivos varían en energía, la mayoría de las partículas beta pueden detenerse unos milímetros de aluminio. Sin embargo, esto no significa que los isótopos emisores beta puedan ser completamente protegidos por tales escudos delgados: a medida que se

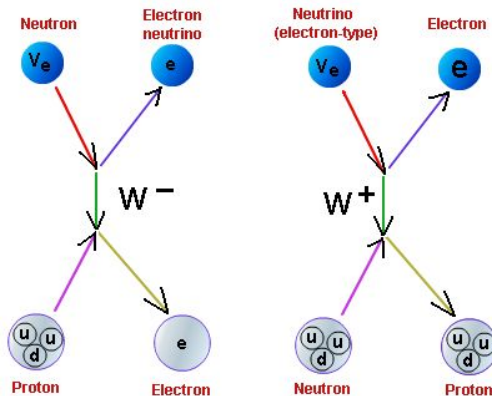
¹⁰ Proceso de desintegración alfa en un núcleo de Uranio 238(U238) que da lugar a una partícula alfa, y el cambio a un núcleo de Torio 234(Th234)



desaceleran en la materia, los electrones beta emiten rayos gamma secundarios, que son más penetrantes que los betas de por sí.

Al estar compuesto de partículas cargadas, la radiación beta es más fuertemente ionizante que la radiación gamma. Y es así que esta cuando pasa a través de la materia, una partícula beta es desacelerada por las interacciones electromagnéticas y puede emitir rayos X bremsstrahlung .

11



β^+ , un protón se descompone en un neutrón, un positrón y un neutrino.

β^- , descomposición de un neutrón que se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino.

2.2.2.1.3 Núcleos cargados:

Los núcleos cargados son característicos de los rayos cósmicos galácticos y los eventos de partículas solares y, a excepción de las partículas alfa, no tienen fuentes naturales en la Tierra. Sin embargo, en el espacio, los protones de muy alta energía, los núcleos de helio y los iones HZE pueden detenerse inicialmente mediante capas relativamente delgadas de protección, ropa o piel. Por otra parte, la interacción resultante generará radiación secundaria. En caso de que colisionara con nuestro tejido biológico, si solo un átomo de tejido es desplazado por un protón energético, la colisión causará más interacciones en el cuerpo. Y a este suceso se le denomina transferencia de energía lineal (LET).

Para tener una idea de este suceso LET se puede visualizar como una bola de billar que golpea a otra conservando el impulso inicial, enviando así a ambas con la

¹¹ Representación de los dos tipos de desintegraciones beta



energía de la primera bola dividida entre las dos de manera desigual. Pues lo mismo pasa cuando un núcleo cargado golpea un núcleo de movimiento relativamente lento de un objeto en el espacio, se produce LET y las colisiones liberan neutrones, partículas alfa, protones de baja energía y otros núcleos que contribuyen a la dosis total absorbida por el tejido.

2.2.2.1.4 Positrones y otros tipos de antimateria:

El positrón o antielectrón es la antipartícula o la contraparte de antimateria del electrón. Cuando un positrón de baja energía choca con un electrón de baja energía, se produce la aniquilación, lo que resulta en su conversión en la energía de dos o más fotones de rayos gamma.

También los positrones pueden generarse por desintegración nuclear por emisión de positrones (a través de interacciones débiles) o por producción de pares a partir de un fotón suficientemente energético. En cuanto a una aplicación de los positrones son las fuentes artificiales comunes de radiación ionizante que se utilizan en las tomografías médicas por tomografía por emisión de positrones (TEP).

Además, como los positrones son partículas cargadas positivamente, también pueden ionizar directamente un átomo a través de las interacciones de Coulomb.

2.2.2.2 Radiación indirectamente ionizante:

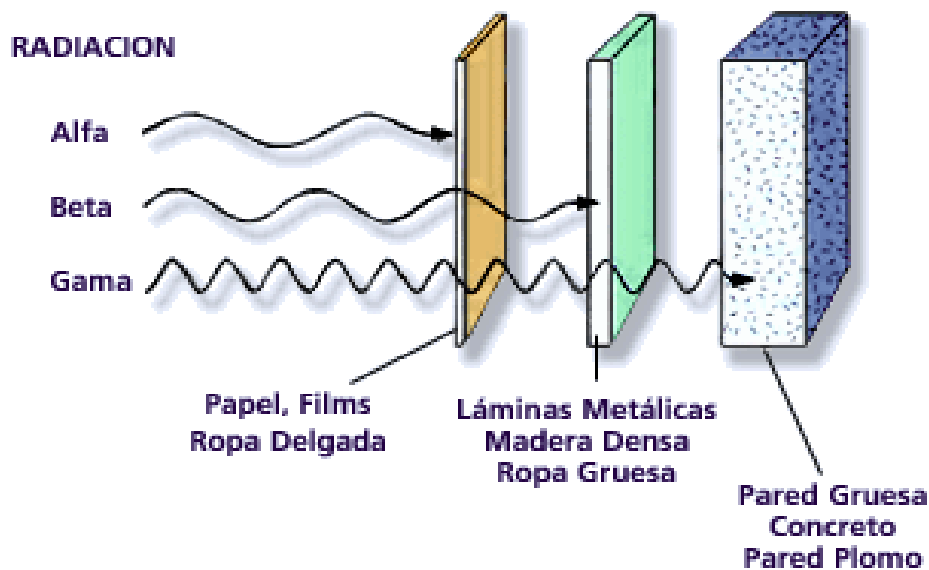
La radiación ionizante indirecta es eléctricamente neutra y, por lo tanto, no interactúa fuertemente con la materia. La mayor parte de los efectos de la ionización se deben a ionizaciones secundarias.

2.2.2.2.1 Radiación gamma:



La radiación gamma es un tipo de radiación electromagnética, que por tanto, es capaz de propagarse por el vacío a la velocidad de la luz (c). Y normalmente suelen tener una energía equivalente a un megaelectronvoltio (MeV). La característica de esta radiación es que suele estar ligada a la radiación alfa o beta debido a que cuando se produce una de estas para la estabilidad del núcleo el diferencial de energía que se pierde se expulsa en forma de ondas electromagnéticas, en este caso por radiación gamma. Debido a las altas energías que poseen, los rayos gamma constituyen un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa y la beta. Es así, que pueden llegar a causar grave daño al núcleo de las células, por lo cual esta radiación se suele usar para esterilizar equipos médicos y alimentos. Los rayos gamma se producen durante la descomposición gamma, que normalmente ocurre después de que ocurren otras formas de descomposición, como la desintegración alfa o beta. La descomposición gamma también puede seguir reacciones nucleares como la captura de neutrones, la fisión nuclear o la fusión nuclear.

La desintegración gamma es también un modo de relajación de muchos estados excitados de núcleos atómicos que siguen a otros tipos de desintegración radiactiva, como la desintegración beta, siempre que estos estados posean el componente necesario del espín nuclear.



12

3. Detectores de partículas:

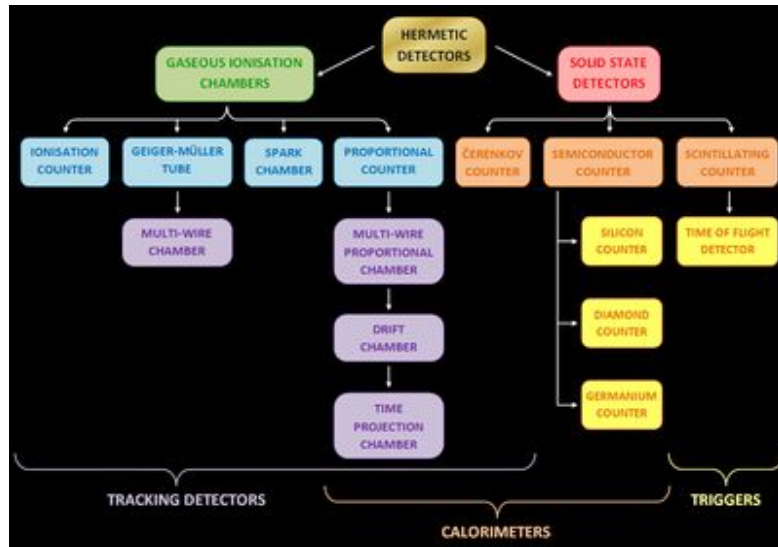
En la física experimental y de partículas aplicadas, la física nuclear, y la ingeniería nuclear, un detector de partículas, también conocido como un detector de radiación, es un dispositivo utilizado para detectar, seguir y identificar partículas ionizantes, tales como los producidos por la desintegración nuclear, las radiaciones cósmicas (rayos cósmicos), o reacciones en un acelerador de partículas. Los detectores pueden medir distintas propiedades y características de la partícula como pueden ser la energía de esta y otros atributos como el momento, giró, carga, tipo de partícula, además de simplemente registrar la presencia de la partícula.

¹² Penetración de las diferentes radiaciones según el material que atraviesan



Al final, los detectores de partículas, son dispositivos que identifican las partículas subatómicas, haciéndolas muchas veces visibles, es decir, son basados en la transferencia de parte o toda la energía de radiación hacia el detector, donde es convertida en una forma más accesible a la percepción humana ya sea mediante impulsos eléctricos que serán interpretados por variedad de programas de simulación de estos fenómenos o a simple vista mediante la observación de sus trayectorias.

13



3.1 Contador Geiger

La dificultad de tratar con materiales radiactivos se complementa con el hecho de que sus emisiones son invisibles y muy difíciles de detectar. Es por eso que no podemos detectarlas convencionalmente. Y una solución es convertir de alguna manera estas cantidades inconmensurables e invisibles en cantidades detectables y medibles. Y esto es exactamente lo que hace el contador Geiger.

Se trata de un medidor de elementos radioactivos a través de un gas inerte dentro de la máquina y debido a su naturaleza polar, las partículas radiactivas ionizan el

¹³ Clasificación de los diferentes tipos de detectores de partículas

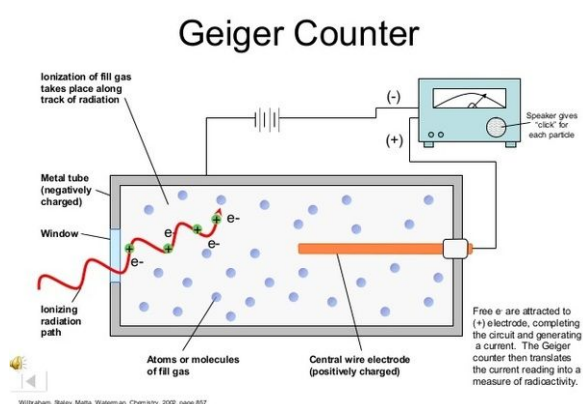


gas en el que se dispersan, de este modo, los iones resultantes pueden detectarse muchísimo más fácilmente en relación con la radioactividad en sí.

Al final, un contador Geiger es un cilindro de metal sellado por una ventana de mica o cerámica en un extremo. junto a unas películas delgadas que permiten que las partículas radiactivas serpenteantes en los alrededores lo penetren fácilmente, compuesto por un tubo que es un alambre metal delgado generalmente compuesto de tungsteno. El extremo de este tubo se encuentra conectado a una fuente alimentación relativamente grande en el otro extremo, la cual acumula una carga positiva. De esta forma este extremo actúa como un electrodo positivo, es decir, un ánodo. Mientras que la superficie curva el tubo de metal actúa como un electrodo negativo, es decir, un cátodo.

El cilindro es llenado con un gas inerte, ya sea neón o argón. A medida que las partículas radiactivas pasan, ionizan este gas. Los iones positivos y negativos chocan alrededor del tubo cilíndrico, además los electrones cargados negativamente son atraídos instantáneamente al ánodo mientras que los iones positivos son repelidos por la gran carga positiva hacia el cátodo. Además, a medida que los electrones descienden por el gas, chocan en más átomos, lo que acabará por provocar una reacción en cadena de ionización que produce más iones y electrones.

14



Esto es conocido como la descarga de Geiger. Finalmente, muchos electrones llegarán al ánodo, generando un pulso de electricidad que se medirá en un medidor y en función del pulso recibido sabremos la gravedad de la radiación en el área determinada que estamos midiendo.

14 Esquema de la estructura interna de un contador Geiger



3.2 Cámara de niebla:

El funcionamiento de una cámara de niebla está basado en el mismo fenómeno por el cual se forman las nubes. La atmósfera interior de estas cámaras se encuentra compuesta por un gas fácilmente ionizable, es decir, que este requiere poca energía para extraer un electrón de un átomo, de forma que, basta una mínima perturbación para que se condense este gas.

Cuando una partícula ionizante cómo puede ser una partícula alfa, beta o gamma, es capaz de ionizar algunos átomos del gas contenido en el interior de la cámara. Estos átomos ionizados del gas pasan actuar como núcleos de condensación, que son partículas las cuales aumentan la tensión superficial del gas a su alrededor permitiendo que este se condense inmediatamente. De esta forma, podemos distinguir los trazos de estas radiaciones ionizantes como nubecillas dentro de la cámara. Asimismo, podemos evidenciar diferencias entre la radiación alfa y beta como por ejemplo, como que la radiación alfa es mucho más pesada que los ligeros electrones que componen la radiación beta, ya que la alfa sus trazas serán en mayor parte rectas mientras que las radiaciones beta presentan cambios de dirección por las colisiones elásticas contra los átomos. Además, si se sitúa un campo magnético en la cámara se podrán observar las trayectorias curvas de las partículas debido a la interacción de su carga eléctrica con este campo. Y así confirmar que la radiación alfa y beta son de cargas opuestas debido a que se curvan en sentidos opuestos dentro del campo magnético.



15

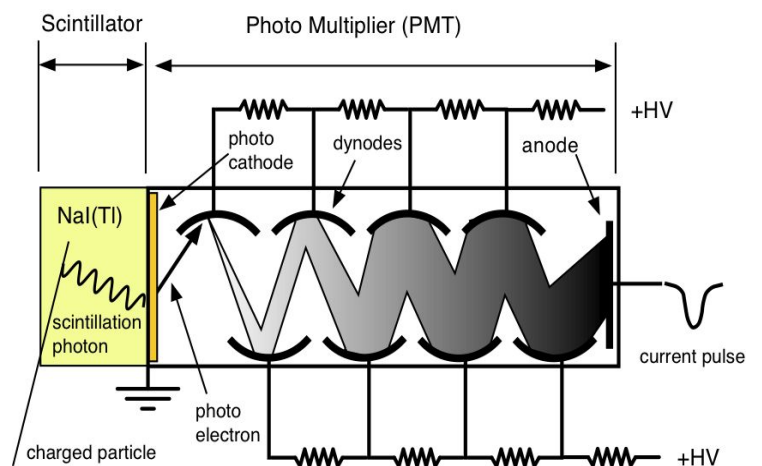
3.3 Fotomultiplicador:

16

El fotomultiplicador es un instrumento que puede detectar fotones. Un fotón entrante golpea el cátodo fotográfico y, mediante un efecto fotográfico, libera un electrón. La probabilidad de este proceso es de aproximadamente el 20%, por lo que necesita en promedio de 5 fotones para producir un único fotoelectrón.

A continuación, el electrón liberado se acelera hacia una placa metálica llamada dínodo donde, al impactar, libera más electrones, generalmente dos. Estos, a su vez, se aceleran al siguiente dinodo, donde cada electrón quita 2 electrones más.

De esta forma se obtiene un número de electrones en crecimiento exponencial. Al final, todos los electrones liberados se recolectan en el ánodo, donde producen un



¹⁵ Trazas del recorrido de partículas ionizantes detectadas por una cámara de niebla

¹⁶ Esquema de la estructura interna de un fotomultiplicador



pulso de corriente eléctrica que se amplifican y luego se registran. El tamaño de un pulso es proporcional al número de fotones que llegan al fotocátodo. Estos a su vez son proporcionales a la cantidad de energía que la partícula cargada deposita en el centelleador. Por lo tanto, el impulso de salida es proporcional a la energía depositada en el centelleador.

3.3.1 Tipos de reacción de los fotones en un fotomultiplicador:

Un centelleador es principalmente sensible al paso de partículas cargadas. Los fotones de alta energía, como todos los fotones, no están cargados y solo se pueden observar si producen una partícula cargada en movimiento rápido que posteriormente interactúa con el material centelleador. La energía que se mide en un centelleador es, por lo tanto, la energía depositada por las partículas cargadas, en su mayoría electrones, que interactúan con el fotón de alta energía entrante.

- **En cuanto a las principales reacciones son:**

3.3.1.1 La dispersión de Compton:

Se da cuando, un fotón dispersa un electrón atómico, el electrón retrocede y tiene energía cinética, el fotón original cambia de dirección y pierde energía correspondiente a la energía de retroceso del electrón.

3.3.1.2 Efecto fotoeléctrico:

Cuando un fotón incide sobre el metal, transfiere toda su energía a alguno de los electrones. Si esta energía es suficiente para romper la ligadura del electrón con el metal, entonces el electrón se desprende. Si el fotón transporta más energía de la necesaria, este exceso se transforma en energía cinética del electrón.

3.3.1.3 Producción de pares:



Un fotón con una energía superior a 1.2 MeV, se convierte en un par de electrones - positrones (antielectrones).

El electrón se detiene en el cristal, mientras que el positrón finalmente se aniquila con un electrón atómico y produce dos fotones de 0.511 MeV que pueden o no detectarse.

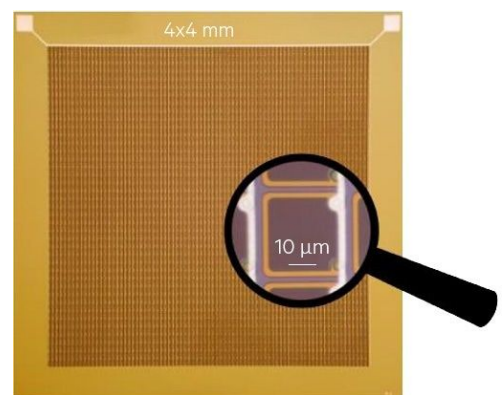
3.3.3 Fotomultiplicador de silicio:

El fotomultiplicador de silicio (SiPM) es un detector de radiación con una sensibilidad muy alta, una fluctuación de tiempo extremadamente baja poseyendo así una alta eficiencia en comparación a su correspondiente antecesor el fotomultiplicador anteriormente nombrado. Se basa en dos diodos positivo y negativo, con polarización inversa, además es capaz de detectar directamente la luz desde el espectro ultravioleta hasta el infrarrojo. Los SiPM se utilizan en todas aquellas aplicaciones donde es necesario medir y cuantificar los niveles bajos de luz y radiación con alta precisión.

La luz está formada por fotones (cuantos de luz). Los SiPM están diseñados para tener una alta eficiencia de detección y una alta ganancia, de modo que incluso un fotón que incide en un píxel SiPM puede detectarse produciendo un pulso de corriente de salida con una fluctuación de tiempo extremadamente baja (<100 picosegundos(ps)). La estructura de un SiPM permite la detección de fotones en paralelo, lo que significa que se pueden detectar más fotones simultáneamente.¹⁷

3.4 Cámara de burbujas:

Una cámara de burbujas está diseñada para detectar partículas cargadas a través de las pistas



¹⁷ Malla de 4*4 mm de un fotomultiplicador de silicio

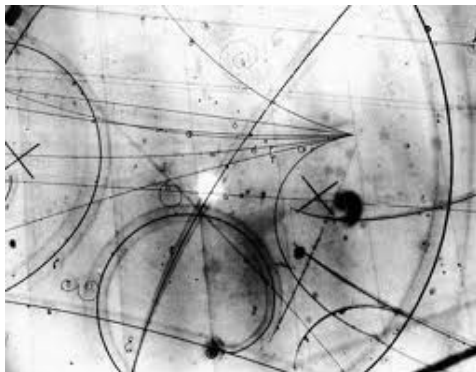


de burbujas presentes en una cámara que consiste en gas licuado o hidrógeno líquido. Este detector fue inventado por Donald Glaser en el año 1952.

Esta cámara de burbujas consiste en una cavidad sellada que se llena con un gas licuado para reducir la presión interior. El hidrógeno líquido y el helio son los líquidos más utilizados en las cámaras de burbujas y poseen un dispositivo controlado para mantener estos gases en su estado líquido.

Cuando las partículas de hidrógeno líquido entran en la cámara, un pistón reduce inmediatamente la presión dentro de esta cavidad, que a su vez disminuye el punto de ebullición del líquido, dejando el líquido calentado a la temperatura adecuada.

Cuando una partícula cargada pasa a través de este líquido calentado, crea pequeñas burbujas de gas. El tamaño de las burbujas aumenta a medida que la cámara se expande, de modo que las burbujas se pueden iluminar y fotografiar. Una vez que se toman las fotografías, las burbujas colapsan al volver a comprimir el líquido. Además, la cámara se somete a un campo magnético constante lo cual hace



que las partículas cargadas viajen en trayectorias helicoidales cuyo radio se determina por el cociente de la carga a la masa de la partícula. De esta manera se pueden observar la masa y la carga de las partículas. Sin embargo, no hay manera de medir con eficacia su velocidad.¹⁸

3.5 Cámara de chispas:

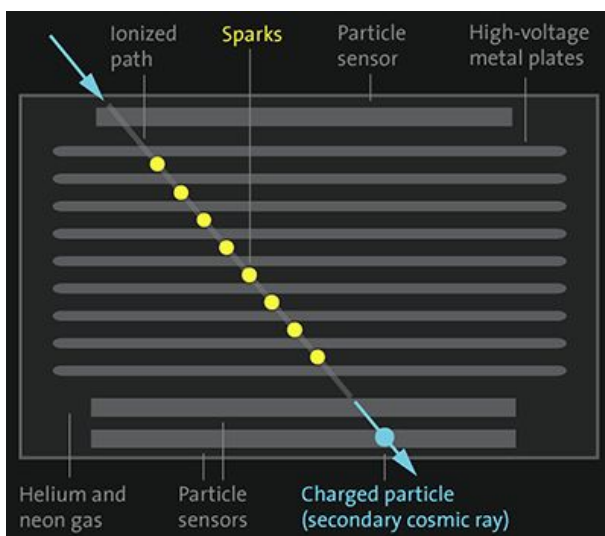
¹⁸ Fotografía tomada de los resultados obtenidos por una cámara de burbujas



Cámara de chispas, es un detector de radiación útil para la investigación de partículas subatómicas en la física de partículas de alta energía. Consiste en una serie de finas placas metálicas paralelas entre sí, separadas por pequeños espacios y encerradas en un recipiente lleno de neón u otro gas inerte.

Cuando una partícula cargada pasa a través de la cámara, se ioniza el gas a lo largo de su trayectoria. Si a su vez, se aplica un voltaje muy alto o una caída de potencial en un breve impulso a través de las placas alternativas, se producirán chispas a lo largo de los rastros ionizados dejados por las partículas ionizantes. Las trayectorias de ionización permanecen en la cámara durante aproximadamente una millonésima de segundo, un intervalo de tiempo suficiente para que un circuito lógico identifique si las partículas que han emergido son de interés y, en consecuencia, si el pulso de alto voltaje debe enviarse a las placas para que el patrón de chispa resultante se puede grabar con el fin de un análisis posterior. En cuanto al modo de análisis del patrón de chispas, hay distintos modos: se puede grabar fotográficamente, electrónicamente o acústicamente.

19



¹⁹ Esquema del funcionamiento de una cámara de chispas

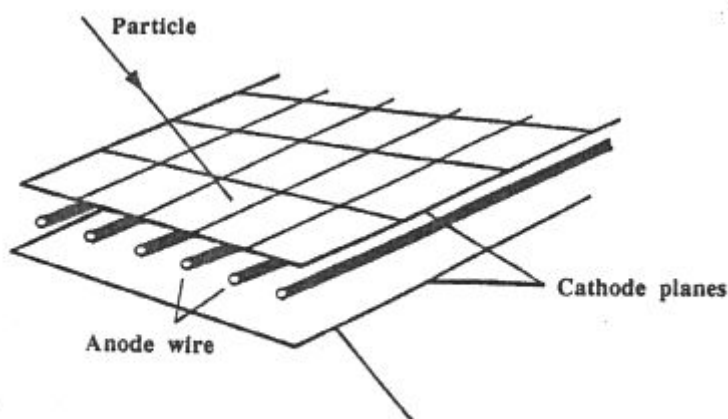


3.6 Cámara proporcional de multihilos:

La cámara proporcional de multihilos utiliza una serie de cables de alto voltaje (ánodo), que atraviesan una cámara con paredes conductoras mantenidas en el potencial de tierra (cátodo). Alternativamente, los cables pueden estar en un potencial de tierra y el cátodo se mantiene en un voltaje negativo alto. Lo importante, es que un campo eléctrico uniforme atrae electrones extra o iones negativos a los cables del ánodo con poco movimiento lateral.

La cámara se llena con gas cuidadosamente elegido, como una mezcla de argón / metano, de manera que cualquier partícula ionizante que pase a través del tubo ionizará los átomos gaseosos circundantes. Los iones y electrones resultantes son acelerados por el campo eléctrico a través de la cámara, causando una cascada localizada de ionización conocida como **avalancha Townsend**.

Esto se acumula en el cable más cercano y produce una carga proporcional al efecto de ionización de la partícula detectada. Al calcular los pulsos de todos los cables, se puede encontrar la trayectoria de las partículas.



20

²⁰ Componentes de una cámara multihilos



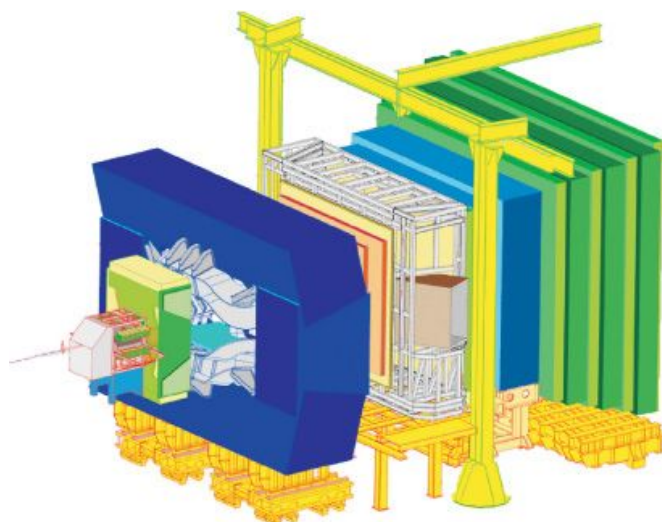
3.7 Detectores de partículas modernos:

3.7.1 LHCb:

Se especializa en investigar las ligeras diferencias entre materia y antimateria mediante el estudio de un tipo de partícula llamada 'quark fondo' o 'quark b'.

En lugar de rodear todo el punto de colisión con un detector cerrado, el experimento LHCb utiliza una serie de detectores secundarios para detectar principalmente partículas hacia adelante. El primer sub-detector está montado cerca del punto de colisión, mientras que los siguientes se colocan uno detrás del otro, sobre una longitud de 20 m.

El LHC creará una gran cantidad de diferentes tipos de quark antes de que se descompongan rápidamente en otras formas. Para atrapar a los b-quarks, LHCb ha desarrollado sofisticados detectores de rastreo móviles cerca de la trayectoria de los haces que giran en círculos en el LHC.



21

²¹ Diagrama del LHCb



3.7.2 ALICE:

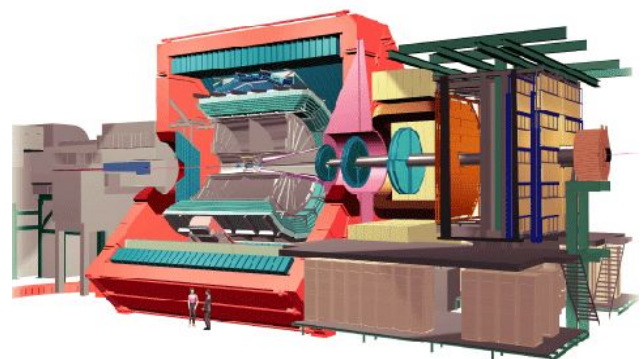
El LHC colisiona iones de plomo para recrear las condiciones justo después del Big Bang en condiciones de laboratorio. Los datos obtenidos permitirán a los físicos estudiar un estado de la materia conocido como plasma de quark-gluones, que se cree que existió poco después del Big Bang.

Las colisiones en el LHC generarán temperaturas más de 100,000 veces más altas que el corazón del sol. Los físicos esperan que bajo estas condiciones, los protones y los neutrones se "derriten", liberando a los quarks de sus enlaces con los gluones. Esto debería crear un estado de la materia llamado plasma de quark-gluón, que probablemente existió justo después del Big Bang cuando el Universo todavía estaba extremadamente caliente. La colaboración de ALICE planea estudiar el plasma de quark-gluón a medida que se expande y se enfría, observando cómo se originan progresivamente las partículas que constituyen la materia de nuestro Universo hoy.

El detector consiste en dos principales componentes: la parte central, compuesta de subdetectores dedicados al estudio de señales de hadrones y electrones, y el espectrómetro de muones dedicado al estudio del comportamiento de los quarkonios (mesones formados por la pareja de un quark y su antiquark) en la materia de alta densidad.

La parte central está encajada en un gran solenoide de campo magnético débil. Y la parte más interior del detector es el tracking system (sistema de trazas), que consiste en the inner tracking system (ITS) y el outer tracking system (TPC).

22



²² Diagrama del ALICE

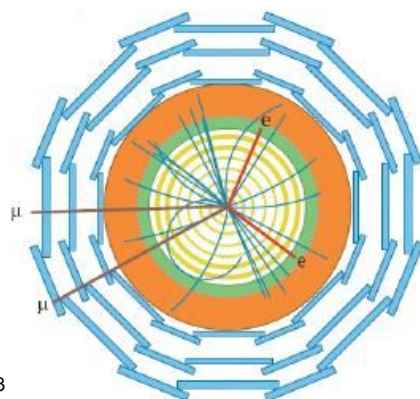
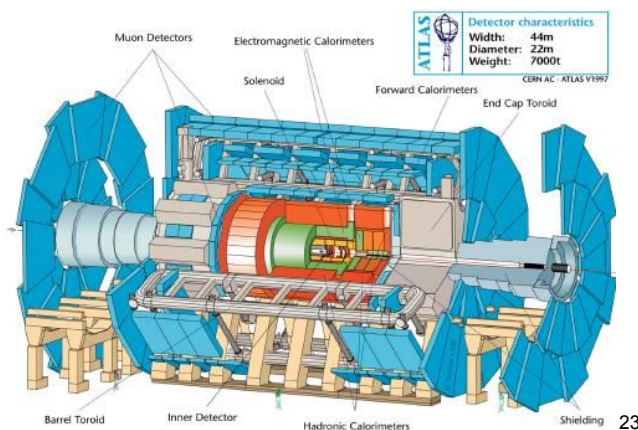


3.7.3 ATLAS:

Es el más grande detector en la Física de Partículas dedicado a propósitos generales (designado para "ver" un amplio rango de partículas y fenómenos producidos en las colisiones en el LHC). Principalmente trata de investigar una amplia gama de física, incluida la búsqueda del bosón de Higgs, las dimensiones adicionales y las partículas que podrían formar la materia oscura.

Esto se logra en ATLAS a través de seis subsistemas de detección diferentes que identifican partículas y miden su impulso y energía. Otro elemento vital de ATLAS es el enorme sistema de imanes que dobla los caminos de las partículas cargadas para medir el momento.

Además, de las interacciones en los detectores ATLAS crearán un enorme flujo de datos y es así que, para digerir estos datos, ATLAS necesita un sistema de adquisición de datos y activador muy avanzado, y un gran sistema informático.



²³ Componentes internos del detector ATLAS

²⁴ Ejemplo de las trayectorias que toman las partículas dentro del detector ATLAS tras una colisión



3.7.4 TOTEM:

El experimento TOTEM mide la sección eficaz total protón-protón y estudia la dispersión elástica y difractiva en el LHC.

Utiliza sensores de silicio en el túnel del LHC a una distancia de unos 200 metros del centro del CMS. Su funcionamiento se basa en que la medida de dispersión de las partículas a muy pequeños ángulos permite el estudio de procesos físicos que no pueden ser estudiados de ninguna otra forma. Por ejemplo, cómo el tamaño y la forma de los protones varían con la energía.

El experimento TOTEM usa tres tipos de detectores: un tipo llamado Roman Pot, utilizados para detectar protones; y otros dos -Cathode Strip Chambers y GEM Detectors- que miden los chorros de partículas producidas en las colisiones y que salen frontalmente.



25

3.7.5 LHCf:

Sus dos detectores, hechos de placas de tungsteno y plástico escintilante, pueden medir con gran precisión el número y energía de los piones neutros y otras partículas producidas en las direcciones frontales (forward direction) en las colisiones

²⁵ Imagen del detector TOTEM

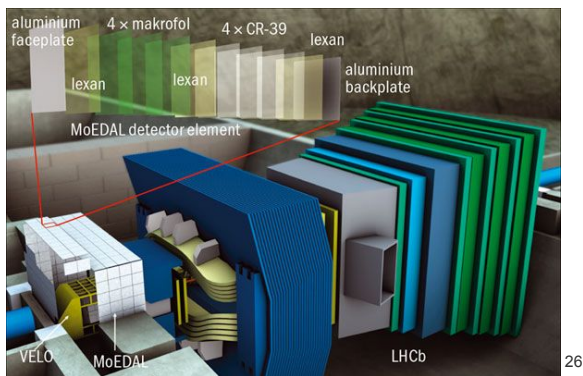


en ATLAS. El experimento LHCf usa partículas frontales creadas dentro del LHC como una fuente para simular los rayos cósmicos en condiciones de laboratorio. Estudiar cómo las colisiones dentro del LHC causan cascadas similares de partículas ayudará a los científicos a interpretar y calibrar experimentos de rayos cósmicos a gran escala que pueden cubrir miles de kilómetros.

3.7.6 MoEDAL:

Se centra en la búsqueda de partículas muy exóticas, monopolos magnéticos y partículas masivas.

El detector MoEDAL tiene una naturaleza dual. Primero, actúa como una cámara gigante, compuesta por detectores de pistas nucleares, analizados fuera de línea por microscopios de escaneo ultra rápidos y sensibles. En segundo lugar, es excepcionalmente capaz de atrapar a los mensajeros de partículas de la física más allá del Modelo Estándar para su posterior estudio. En cuanto al entorno de radiación de MoEDAL se monitorea mediante una matriz de detectores de píxeles MiniPix en tiempo real de última tecnología.



3.7.7 Super-Kamiokande:

El Super-K está ubicado a 1.000 m bajo tierra en la mina Mozumi en el área de Kamioka de Hida. Consiste en un tanque cilíndrico de acero inoxidable que mide

²⁶ Representación 3D del detector MoEDAL



41.4 m de altura y 39.3 m de diámetro y contiene 50,000 toneladas de agua ultrapura. Sobre la superestructura se montan 11,146 tubos fotomultiplicadores de 50 cm de diámetro.

En cuanto al funcionamiento de este detector se basa en la interacción de neutrinos con los electrones o núcleos de agua que puede producir una partícula cargada que se mueve más rápido que la velocidad de la luz en el agua. Esto crea un cono de luz conocido como radiación de Cherenkov. La luz Cherenkov se proyecta como un anillo en la pared del detector y es grabada por los PMT. Usando la información de tiempo y carga registrada por cada PMT, se determina el vértice de interacción, la dirección del anillo y el sabor del neutrino entrante. Y a partir de la nitidez del borde del anillo, se puede inferir el tipo de partícula.

4. Aceleradores de partículas:

Un acelerador de partículas es una máquina que utiliza campos electromagnéticos para propulsar partículas cargadas a velocidades y energías muy altas, que a su vez son contenidas en haces bien definidos para finalmente realizar una colisión entre estas para obtener como resultado la aparición de nuevas partículas, mucho más inestables que sus antecesoras y que apenas sobreviven un segundo. Al final, dentro de un entorno de extrema seguridad, el acelerador de partículas imita la acción de los rayos cósmicos sobre la atmósfera terrestre, que produce una lluvia de partículas de lo más hermosa y exótica.

Dentro de los aceleradores de partículas se distinguen dos tipos principales:



4.1 Acelerador de partículas electrostático:

Los primeros aceleradores utilizaron una tecnología simple de un solo alto voltaje estático para acelerar las partículas cargadas. La partícula cargada se acelera a través de un tubo evacuado con un electrodo en cada extremo, con el potencial estático a través de él. Dado que la partícula pasa solo una vez a través de la diferencia de potencial, la energía de salida se limitó al voltaje de aceleración de la máquina.

Si bien este método sigue siendo extremadamente popular en la actualidad, dado que los aceleradores electrostáticos superan en número a cualquier otro tipo, son más adecuados para estudios de menor energía debido al práctico límite de voltaje de aproximadamente 1 MV para máquinas con aislamiento de aire, o 30 MV cuando los aceleradores se operan en un tanque de gas presurizado con alta resistencia dieléctrica.

En el acelerador tándem, el potencial se usa dos veces para acelerar las partículas, al invertir la carga de las partículas mientras están dentro del terminal. Esto es posible con la aceleración de los núcleos atómicos mediante el uso de aniones, y luego pasando el haz a través de una lámina delgada para quitar los electrones de los aniones dentro del terminal de alto voltaje, convirtiéndolos en cationes, que se aceleran de nuevo al salir de la terminal.

Los dos tipos principales de aceleradores electrostáticos son el acelerador de Cockcroft-Walton, que usa un multiplicador de voltaje diodo-capacitor para producir alto voltaje, y el acelerador de Van de Graaff, que usa una correa de tela en movimiento para llevar la carga al electrodo de alto voltaje.



4.2 Aceleradores de partículas electrodinámicas/electromagnéticas:

Debido al alto voltaje impuesto por la descarga eléctrica, para acelerar las partículas a energías más altas, se utilizan técnicas que involucran campos dinámicos en lugar de campos estáticos. La aceleración electrodinámica puede surgir de cualquiera de dos mecanismos. Ya sea mediante inducción magnética no resonante, circuitos o cavidades resonantes excitados por campos de radiofrecuencia oscilantes. Los aceleradores electrodinámicos pueden ser lineales, con partículas que aceleran en línea recta, o circulares, que usan campos magnéticos para doblar partículas en una órbita aproximadamente circular.

4.2.1 Aceleradores de inducción magnética:

Los aceleradores de inducción magnética aceleran las partículas por inducción desde un campo magnético creciente. A fin de que este creciente campo magnético cree un campo eléctrico circulante que pueda configurarse para acelerar las partículas. Dentro de este tipo de aceleradores de partículas se pueden diferenciar dos tipos, aceleradores de inducción lineales o circulares.

4.2.1.1 Aceleradores de inducción magnética lineales:

Los aceleradores de inducción lineal utilizan cavidades de inducción no resonantes cargadas con ferrita. Cada cavidad puede considerarse como dos discos grandes con forma de arandela conectados por un tubo cilíndrico exterior. Y entre los discos hay un toroide de ferrita donde un impulso de voltaje aplicado entre los dos discos



provoca un campo magnético creciente que acopla de manera inductiva el haz de partículas cargadas.

4.2.1.2 Betatron:

El Betatron es un acelerador de inducción magnética circular. Estas máquinas, como los sincrotrones, usan un imán anular con forma de rosquilla con un campo B que aumenta cíclicamente, pero aceleran las partículas por inducción del campo magnético creciente, como si fueran el devanado secundario en un transformador, debido al cambio del flujo magnético a través de la órbita.

4.2.1.3 Aceleradores lineales:

En un acelerador de partículas lineal, las partículas se aceleran en una línea recta con un objetivo de interés en un extremo. A menudo se utilizan para proporcionar un “empujón” inicial de baja energía a las partículas antes de inyectarlas en aceleradores circulares.

Los aceleradores lineales de alta energía utilizan una serie lineal de placas a las que se aplica un campo de alta energía alterna. Cuando las partículas se acercan a una placa, se aceleran hacia ella por una carga de polaridad opuesta aplicada a la placa. A medida que pasan a través de un orificio en la placa, la polaridad se cambia de modo que la placa ahora los repele y se aceleran hacia la siguiente placa. Normalmente se acelera una corriente de "grupos" de partículas, por lo que se aplica un voltaje de corriente alterna cuidadosamente controlado a cada placa para repetir continuamente este proceso para cada grupo.

A medida que las partículas se acercan a la velocidad de la luz, la velocidad de conmutación de los campos eléctricos llega a ser tan alta que operan a frecuencias de radio, y las cavidades de microondas se utilizan en máquinas de mayor energía en lugar de placas simples.



4.2.2 Aceleradores circulares/cíclicos:

Un el acelerador circular, las partículas se mueven en un círculo hasta que alcanzan suficiente energía. La pista de partículas se dobla típicamente en un círculo usando electroimanes . La ventaja de los aceleradores circulares sobre los aceleradores lineales es que la topología en anillo permite una aceleración continua, ya que la partícula puede transitar indefinidamente. Otra ventaja es que un acelerador circular es más pequeño que un acelerador lineal de potencia comparable (es decir, un acelerador lineal tendría que ser extremadamente largo para tener la potencia equivalente de un acelerador circular).

Dependiendo de la energía y la aceleración de la partícula, los aceleradores circulares sufren una desventaja porque las partículas emiten radiación de sincrotrón si en el sistema aparecen velocidades relativistas en caso de que no, se denomina emisión de ciclotrón. Cuando cualquier partícula cargada se acelera, emite radiación electromagnética y emisiones secundarias. Cuando una partícula que viaja en un círculo siempre está acelerando hacia el centro del círculo, irradia continuamente hacia la tangente del círculo. Esta radiación se llama luz de sincrotrón y depende en gran medida de la masa de la partícula de aceleración. Por esta razón, muchos aceleradores de electrones de alta energía son linacs. Sin embargo, ciertos aceleradores (sincrotrón) están diseñados especialmente para producir luz de sincrotrón.

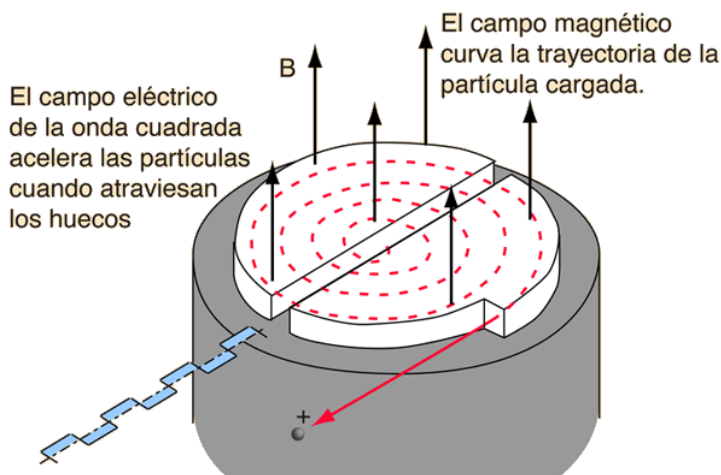
4.2.2.1 Ciclotrón:

Las partículas se mantienen en una trayectoria espiral mediante un campo magnético estático y se aceleran mediante un campo eléctrico que varía rápidamente.

El ciclotrón fue el primer acelerador "cíclico". La ventaja del diseño del ciclotrón sobre los aceleradores "electrostáticos" existentes de la época, era que en estas



máquinas las partículas solo se aceleraban una vez por el voltaje, por lo que la energía de las partículas era mayor. igual a la tensión de aceleración en la máquina, que estaba limitada por la descomposición del aire a unos pocos millones de voltios. En el ciclotrón, por el contrario, las partículas se encuentran con el voltaje de aceleración muchas veces durante su trayectoria en espiral, y así se aceleran muchas veces, por lo que la energía de salida puede ser muchas veces mayor que el voltaje de aceleración.



27

4.2.2.2 Sincrociclotrón:

La solución a la pérdida de frecuencia del ciclotrón fue ideada, basándose en los



trabajos de estabilidad de fase de Szilárd de 1934. Éste percibió que la solución para que no se perdiera la sincronización era disminuir la frecuencia de alternancia del campo eléctrico con el tiempo. Con esta medida solo un pequeño paquete de partículas podía ser acelerado, pero alcanzaban energías de hasta 740 MeV para protones.²⁸

²⁷ Diagrama de un ciclotrón.

²⁸ Parte del electroimán del sincrociclotrón de Orsay



4.2.2.3 Ciclotrón Isócrono:

Es un tipo de sincrociclotrón para electrones que consistía en aumentar el campo magnético con el radio del ciclotrón permitiendo de esta forma que lo acelerado no fuera sólo un pequeño grupo de partículas.

4.2.2.4 Sincrotón:

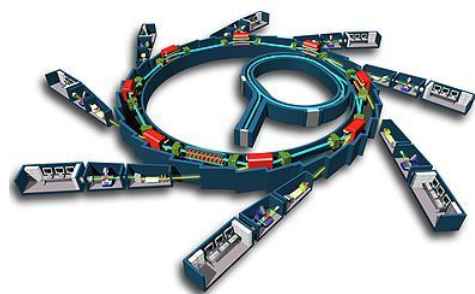
Para alcanzar energías aún más altas, con una masa relativista que se aproxima o excede la masa en reposo de las partículas (para protones, billones de voltios de electrones o GeV), es necesario usar un sincrotrón .

Este es un acelerador en el que las partículas se aceleran en un anillo de radio constante. Una ventaja inmediata sobre los ciclotrones es que el campo magnético solo necesita estar presente sobre la región real de las órbitas de las partículas, que es mucho más estrecha que la del anillo.

Hoy en día en los sincrotrones modernos, la apertura del haz es pequeña y el campo magnético no cubre toda el área de la órbita de partículas como lo hace para un ciclotrón, por lo que se pueden separar varias funciones necesarias. En lugar de un gran imán, uno tiene una línea de cientos de imanes doblados, que encierran tubos de conexión de vacío.

Además cabe recalcar que un sincrotrón no puede acelerar un haz de partículas desde velocidad cero a diferencia de sus antecesores como el caso del ciclotrón. Si no que este necesita para poder usarse la ayuda de otros aceleradores como un acelerador de inducción lineal o un microtron.

29



²⁹ Representación 3D de un sincrotón



Montaje y recopilación de resultados de una cámara de niebla:



Index part pràctica

1.Objetivos

2.Materiales

3.Procedimiento

4.Resultados

4.1 Identificación de partículas

5. Conclusiones



1. Objetivos:

Mis principales objetivos para realizar la práctica han sido los siguientes:

- Aprender sobre el funcionamiento de las cámaras de niebla
- Montar una cámara de niebla de forma casera
- Realizar observaciones de las trayectorias de las radiaciones ionizantes detectadas
- Identificación de las partículas mediante un análisis cualitativo de los sucesos registrados y compararlos con las teorías que los sustentan.
- Hipòtesis: Según los fenómenos físicos estudiados con anterioridad seré capaz de aplicarlos para poder distinguir y clasificar las partículas ionizantes por sus trayectorias tomadas en la cámara de niebla.

2. Material:

Un recipiente de plástico transparente con los lados planos y abierto por la parte superior, de 20 cm x 30 cm (el lado abierto) x 15 cm (altura).

- Una chapa metálica plana (de al menos 5 mm de grosor) más grande que la caja para cubrir completamente la cara abierta del recipiente y de superficie negra.
- Una pieza de fieltro grueso (unos pocos mm) de tamaño menor que el fondo de la caja.
- 4 piezas bridas para cables y soportes autoadhesivos para las bridas para sujetar el fieltro al interior del fondo de la caja .
- Una caja pequeña de madera cuya base sea sólo un poquito mayor que la placa metálica y de unos 5 cm de altura.
- Linterna LED potente para poder dirigir la luz.
- Alcohol isopropílico puro.
- 5 Kg hielo seco
- Guantes para manejar el hielo y el alcohol.
- Gafas de seguridad para manejar el hielo.



3. Procedimiento:

Para empezar la realización de esta práctica se utilizó una cantidad de 25 ml de alcohol isopropílico con una pureza del 99.9%, a lo largo de la tira de fieltro, se empleó este tipo de alcohol debido a que se evapora con facilidad y requiere de una baja energía de ionización para formar los núcleos de condensación.

Se depositó una buena cantidad de hielo seco CO₂ en fragmentos pequeños en el contenedor, intentando esparcirse de manera uniforme, después se procedió al sellado de la cámara con cinta de aislar alrededor del perímetro de la bandeja de horno con las paredes laterales (es muy importante que la cámara sea hermética y no haya fugas por donde pueda salir el alcohol isopropílico evaporado), en seguida se colocó sobre el contenedor, cuidando que la bandeja de horno hiciera un buen contacto con el hielo seco. Una vez armada la cámara se oscureció parcialmente la habitación y se iluminó el área sensible con una linterna LED desde un costado de la cámara. Transcurrieron entre 10 y 15 minutos antes de empezar a funcionar.

La diferencia de temperatura es la que permite obtener el gradiente térmico, iniciándose con la evaporación del alcohol, el cual desciende por la gravedad en forma de rocío o niebla hacia la zona más fría de la cámara, creando una atmósfera saturada de vapor de alcohol, al ser atravesada por una partícula ionizante deja un rastro visible debido a los núcleos de condensación del vapor de alcohol. Al momento en que se empezó a crear la niebla, se procedió a grabar un video para registrar las trazas de las partículas incidentes a la vez que una serie de fotografías para su futuro estudio.



4. Resultados:

Para la identificación de partículas, se realizó un análisis cualitativo de los diferentes sucesos registrados en la grabación mediante la comparación de las trayectorias reportadas por cámaras de niebla más sofisticadas y la teoría que lo sustenta

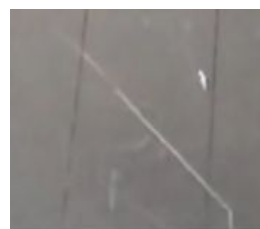
4.1 Identificación de partículas:

Debido a que no sabría decir con certeza por los datos experimentales recopilados si se detectaron partículas alfa que provienen de los rayos cósmicos o se trata de otra partícula, me gustaría enfatizar en su reconocimiento, estas partículas tienen un alto poder ionizante y depositan su energía en un corto espacio debido a su gran interacción con el aire, formando una traza gruesa, corta y recta.

- La traza de los fotoelectrones y electrones Compton es fina, su trayectoria es corta y presenta múltiples cambios de dirección debido a las colisiones:

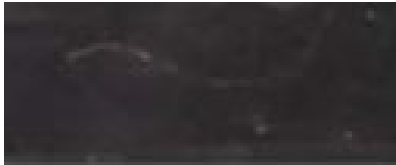


- Los muones se desintegran en dos neutrinos (indetectables) y un electrón, se detectó su traza, la cual es fina y recta, con un cambio súbito de dirección, adaptando así su trayectoria en forma de L:





- También se detectaron electrones β (radiación beta). Estos tienden a curvarse menos que las de los fotoelectrones y los electrones Compton, su traza es fina y su trayectoria es errática presentando curvaturas por efectos de dispersiones múltiple:



5. Conclusiones:

Se construyó una cámara de niebla para visualizar las trazas de partículas ionizantes correctamente aunque cabe recalcar que tuve un inconveniente ya que he tenido que realizar la práctica dos veces debido a un problema con el hielo seco.

Junto a ese percance a la hora de realizarse la parte experimental una de las partes más difíciles a realizar ha sido la identificación y clasificación de las diferentes partículas ionizantes según sus trayectorias a seguir. Quitando estos dos elementos a parte la creación de una cámara de niebla casera se podría considerar una práctica muy interesante y cautivadora para hacerse tanto de cara al público en general interesado por la física de partículas como para su realización dentro del ámbito didáctico.

5.1 Comentarios personales:

En cuanto a mi realización de la práctica me gustaría haber podido conseguir mis objetivos sin tener que repetir el procedimiento por un descuido a su vez que hubiese estado muy interesante la utilización de campos magnéticos y fuentes radioactivas para conseguir un estudio en mayor profundidad de los datos que se pueden llegar a recopilar sobre la física de partículas mediante una simple cámara de niebla.



Práctica de detección de partículas:

1.Objetivos/hipòtesis:

- Aprender a utilizar el detector de partículas TimePix-MX10
- Dominar el programa (software) que controla el detector.
- Recopilar datos sobre las partículas ionizantes que atraviesan el detector.
- Proceder a la realización de una serie de cálculos físicos mediante los resultados obtenidos

2. Materiales:

- Detector TimePix-MX10
- Ordenador
- Minerales radioactivos
- Pinzas

3. Procedimiento:

Primero se indago sobre qué minerales podrían usarse como fuentes radioactivas para empezar nuestra práctica, a continuación, para no entrar en contacto directo con el mineral utilizamos unas pinzas para poder sostenerlo y manipularlo con el fin de acercarlo al detector MiniPix-MX10. Entonces, se observó en el programa los diferentes tramos realizados por las partículas ionizantes provenientes de nuestra fuente de radiación.



Finalmente recopilamos una serie de datos de las diferentes partículas detectadas como las alfa, beta y gamma para realizar una serie de cálculos dentro de la física clásica y relativista para poder extraerlos y comprobar su nivel de correlación.

4. Resultados

Datos de la práctica de detección de partículas:

4.1 Partículas alfa:

E_K (KeV)	8199	6561	4624	12289	7674
v (relat.) (ms⁻¹)	$1'98 \cdot 10^7$	$1'77 \cdot 10^7$	$1'49 \cdot 10^7$	$2'42 \cdot 10^7$	$1'92 \cdot 10^7$
v (class.) (ms⁻¹)	$1'98 \cdot 10^7$	$1'77 \cdot 10^7$	$1'49 \cdot 10^7$	$2'98 \cdot 10^7$	$1'92 \cdot 10^7$
v/c (relat.) (ms⁻¹)	0'066	0'059	0'05	0'081	0'064
v/c (class.) (ms⁻¹)	0'066	0'059	0'05	0'099	0'064
Desviació (%)	0	0	0	0'231	0



4.2 Partículas beta:

E_K (KeV)	2660	1884	3106	3107	843
v (relat.) (ms⁻¹)	$2'96 \cdot 10^8$	$2'56 \cdot 10^7$	$2'08 \cdot 10^7$	$2'08 \cdot 10^7$	$1'72 \cdot 10^7$
v (class.) (ms⁻¹)	$9'67 \cdot 10^8$	$2'57 \cdot 10^7$	$2'08 \cdot 10^7$	$2'08 \cdot 10^7$	$1'72 \cdot 10^7$
v/c (relat.) (ms⁻¹)	0'99	0'085	0'069	0'069	0'057
v/c (class.) (ms⁻¹)	3'22	0'085	0'069	0'069	0'057
Desviació (%)	2'27	0	0	0	0

4.3 Partículas gamma:

E_K (KeV)	126	46	73	70	75
f (Hz)	$1'9 \cdot 10^{35}$	$6'94 \cdot 10^{34}$	$1'1 \cdot 10^{35}$	$1'05 \cdot 10^{35}$	$1'13 \cdot 10^{35}$
λ (m)	$1'58 \cdot 10^{-27}$	$4'32 \cdot 10^{-27}$	$2'73 \cdot 10^{-27}$	$2'83 \cdot 10^{-27}$	$2'65 \cdot 10^{-27}$
p (kg·mm/s)	$4'19 \cdot 10^{61}$	$1'53 \cdot 10^{61}$	$2'43 \cdot 10^{61}$	$2'34 \cdot 10^{61}$	$2'5 \cdot 10^{61}$

5. Conclusiones:

En cuanto a la realización de la práctica fue un poco tediosa en algunos aspectos de la recopilación de datos y cálculos pero sin duda cumplimos con los objetivos propuestos desde un principio además de adquirir un mayor conocimiento sobre el funcionamiento del programa PixetPro.

Uno de las incógnitas que no se han podido especificar de la práctica ha sido que minerales fueron utilizados para su ejecución debido a que no estaban señalizados ni clasificados en su gran mayoría.



Práctica UB

Introducció:

El jueves día 5 de abril, las cuatro personas que estamos haciendo el proyecto de investigación sobre partículas y el tutor del proyecto, Dani Parcerisas, fuimos con a la universidad de Barcelona, en el laboratorio de física moderna para experimentar con el detector de partículas que nos ha sido cedido.

Asistentes:

Durante la sesión de experimentación contamos con varios profesionales, que ayudaron a entender con más claridad los diferentes procesos experimentales realizados; algunos de estos fueron el Dr. Rafael Billabraga, actual ingeniero electrónico en el CERN, y otros profesionales de la Universidad de Barcelona estos fueron el doctor en física Eugeni Graugés Pozos, el doctor en electrónica Sergio Gómez Fernández y el estudiante para doctor en física David Sánchez Gonzalo.

Objetivos:

El objetivo de esta visita fue, principalmente, realizar diferentes tipos de procesos experimentales relacionados temáticamente con la física de partículas y aprendizaje sobre el funcionamiento de nuestro detector de partículas Timepix MX-10 (estas explicaciones fueron realizadas por el ingeniero electrónico Rafael Billabraga y el Dr. Eugeni Graugés)

30

³⁰ Imagen de la facultad de física de la UB





Procedimiento:

31

Primero se escoge el objeto que se quiere estudiar internamente mediante el bombardeo constante de rayos X generados por una fuente de rayos X Phywe concretamente el modelo XR 4.0. A continuación una vez se seleccionó el objeto el Dr. Rafael Ballabriga decidió acoplar una lente a la máquina XR 4.0 con la finalidad de focalizar los rayos de forma más precisa.



Después, se activa el generador de rayos X una vez colocada la muestra a una distancia de 20 cm aproximadamente y situado el detector MX-10 detrás de la muestra. Estas ondas electromagnéticas interactúan con la materia de nuestra muestra y según la cantidad de energía absorbida por el material debido a sus propiedades, el detector detecta diferentes niveles de energía en la placa de silicio y gracias a estos diferenciales utilizamos un programa capaz de interpretarlos adoptando esta secuencia de matrices que acoge como valores numéricos las diferentes intensidades energéticas. Y de esta forma para lograr una visualización más sencilla el propio programa dota a cada valor numérico de la matriz un color que será visualizado en la pantalla LED del ordenador.

Finalmente, con la ayuda del análisis previo a la llegada de las ondas y el programa del detector, conseguimos generar una imagen más nítida de la radiografía al hacer la diferencia de la matriz de la segunda imagen con la primera.

Algunos de los objetos estudiados son los siguientes:

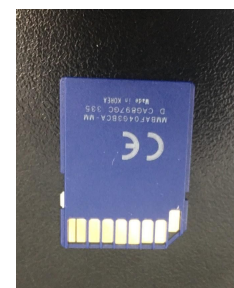
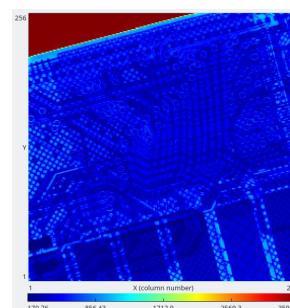
-Hormiga: Debido a que esta era de pequeñas dimensiones, al observar la pantalla que indicaba el resultado de la detección no pudimos observar una diferencia notable a simple vista. Esto fue debido a la facilidad de los rayos X para traspasar la ínfima masa presente durante el análisis, además, la energía transmitida por estos fue considerablemente reducida, hasta una energía de 10 kV de valor pero no dio resultado.

-SD Card: Al analizar este objeto debido a su tamaño y masa fue mucho más fácil apreciar su estructura interna compuesta por los diferentes circuitos.

32

³¹ Phywe XR 4.0

³² Imagen de la SD por rayos X y vista de forma natural





-Clip: En el análisis de este objeto debido al recubrimiento de plástico que posee el alambre que lo forma se pudo distinguir claramente la diferencia entre los dos materiales ya que la atenuación de los rayos X en cada uno es notablemente diferente.

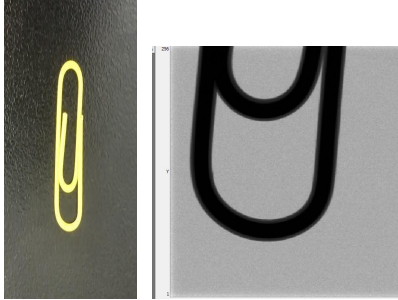


Imagen del clip por rayos X y visto de forma natural

-Trozo de madera: En cuanto a la madera se pudo observar que aunque las células que la conforman no se encuentran activas estas son igualmente penetradas por los rayos X, así mismo, se observan franjas de tonalidad más oscura debido a que esas zonas del trozo de madera son más densas, dificultando así la penetración de los rayos X.

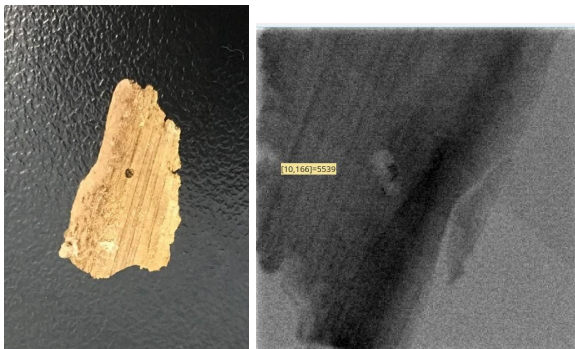


Imagen del trozo de madera por rayos X y visto de forma natural

Conclusión:

Durante la realización de esta práctica en la UB hemos podido aprender nuevos conceptos y fenómenos físicos que desconocíamos como la generación de rayos X, de la misma forma, hemos podido proceder a utilizar nuestro detector MX-10 de una forma totalmente diferente a la que conocíamos, ya que esta vez en vez de simplemente detectar las partículas ionizantes para medir sus propiedades, hemos elaborado radiografías de nuestros objetos mediante la fuente de rayos X que nos fue prestada.



Conclusiones:

Una vez acabado el trabajo, puedo afirmar que los objetivos principales planteados se han conseguido. He aprendido no solo una gran cantidad de conceptos y fenómenos dentro de la física nuclear y partículas, si no que a su vez he podido aplicar estos conocimientos para la identificación de partículas ionizantes en mi trabajo experimental a la hora de interpretar los trazos generados en el interior de la cámara de niebla que he desarrollado. Estos factores cumplen dos de mis objetivos principales: investigar con profundidad los tipos de radiación ionizante y sus características además de los instrumentos de experimentación para estudiarlas y desarrollar de forma casera una cámara de niebla para la detección y clasificación a simple vista de partículas ionizantes.

De igual modo, también he podido cumplir con mi objetivo restante de dominar el detector de partículas MiniPix debido a la realización de dos prácticas diferentes donde hemos utilizado el detector TimePix MX-10 con su correspondiente software. En general creo que he aprendido muchas cosas haciendo este trabajo, tanto de contenido como aplicaciones de estos desde un ámbito más práctico y experimental. Esto me ha llevado bastante trabajo y tiempo, pero exceptuando un problema con mi parte práctica de la cámara de niebla mirándolo desde un punto de vista global mi trabajo se me ha hecho muy llevadero y interesante en cuanto a su desarrollo, por añadidura, ha valido la pena. Como idea final adquirida una vez acabado el trabajo me gustaría remarcar lo rápido que hoy en día está avanzando la tecnología en la detección de partículas y por consiguiente la física nuclear y partículas dando como ejemplo que en cuestión de un siglo hemos evolucionado de una pequeña cámara de gas saturado para detectar las trayectorias de partículas ionizantes a poder detectarlas mediante detectores del tamaño de un PenDrive y estudiar su velocidad, energía y muchas otras propiedades de estas.



Referencias:

- **Detectores de partículas:**

http://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L1_Introduction_HEPdetectors.pdf **04/05/18**

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Particles/cloud.html> **04/05/18**

<https://stfc.ukri.org/public-engagement/activities-for-schools/particle-physics-for-you/what-is-particle-physics/what-is-a-particle-detector/> **07/05/18**

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Nuclear/geiger.html> **16/05/18**

<https://atlas.cern/discover/detector> **22/06/18**

<http://public-archive.web.cern.ch/public-archive/en/research/Detector-en.html> **22/06/18**

<http://cms.web.cern.ch/news/what-cms> **23/06/18**

<http://www.iop.org/resources/topic/archive/cern/index.html> **18/05/18**

http://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/1.detectors/idioma/es_ES **18/05/18**

https://www.ntu.edu.sg/ias/upcomingevents/iassppcit/Documents/Lecture%20Notes/Day7_0200pmt0355pm_EmanuelTsismelis_ApplicationsofDetectors.pdf **28/06/18**

http://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L1_Introduction_HEPdetectors.pdf **02/07/18**



https://conferences.fnal.gov/EDIT2012/Lectures/2_Nygren_HistoryPP.pdf 04/07/18

- **Aceleradores de partículas:**

<https://espaciociencia.com/acelerador-de-particulas/amp/> 23/07/18

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Particles/linac.html> 23/07/18

http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/235_cienciorama.pdf 23/07/18

<https://www.infoplease.com/encyclopedia/science-and-technology/physics/physics/particle-accelerator/circular-accelerators> 23/07/18

https://www.sciencedaily.com/terms/particle_accelerator.htm 02/08/18

<https://www.energy.gov/articles/how-particle-accelerators-work> 06/08/18

- **Fuerzas fundamentales:**

https://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental_interaction 02/02/18

<https://briankoberlein.com/2015/02/25/the-four-horsemen/> 02/02/18

<https://www.livescience.com/37115-what-is-gravity.html> 12/03/18

<https://spaceplace.nasa.gov/what-is-gravity/en/> 16/03/18

<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-14/electromagnetism/> 16/03/18



<https://www.visionlearning.com/es/library/F%C3%ADsica/24/Luz-y-Electromagnetismo/138>
20/03/18

<http://www.thestargarden.co.uk/Weak-nuclear-force.html> **20/03/18**

https://es.wikipedia.org/wiki/Bosones_W_y_Z **22/12/18**

<https://www.livescience.com/48575-strong-force.html> **24/03/18**

<http://aether.lbl.gov/elements/stellar/strong/strong.html> **25/03/18**

- **Libros:**

Física nuclear y de partículas “Antonio Ferrer Soria

Física de partículas y de astropartículas “Antonio Ferrer Soria/ Eduardo Ros Martínez”

Las 4 fuerzas que rigen el universo “Jordi Pereyra”

Agujeros negros y tiempo curvo “Kip.S.Thorne”



Anexos:

Carles Vallés

Detector de partícules Timepix

Introducció

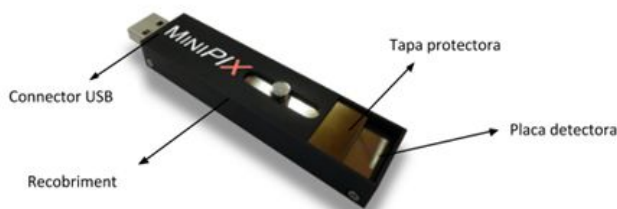
El detector de partícules o chip Medipix/Timepix creat pel CERN és utilitzat, normalment amb aplicacions mèdiques, anàlisi de materials, òptica o, fins i tot, programes espacials. No obstant, un ajust del dispositiu permet que aquest sigui utilitzat per a l'estudi de partícules radioactives (com és el nostre cas).

El detector consta d'un detector de píxels montat pel chip Medipix (pixelat $300\ \mu\text{m}$ Si, 256×256 píxeles, $55\ \mu\text{m}$ de to). A diferència dels detectors tradicionals com els tubs Geiger, el detector ofereix una visualització de les partícules en temps real, sent capaç de reconèixer els diferents tipus de partícules, mostrar pistes de partícules i funcionar com a espectròmetre (permet mesurar l'energia dipositada per cada partícula).

Parts

El dispositiu consta diverses parts:

- Una tapa protectora (controlada amb una palanca)
- Connector USB
- Recobriments de l'electrònica amb forma rectangular
- Placa detectora de doble capa (composat per un sensor, un chip electrònic, metall, una capa de silici, un aïllant, un diode i un elèctrode de tensió de polarització)



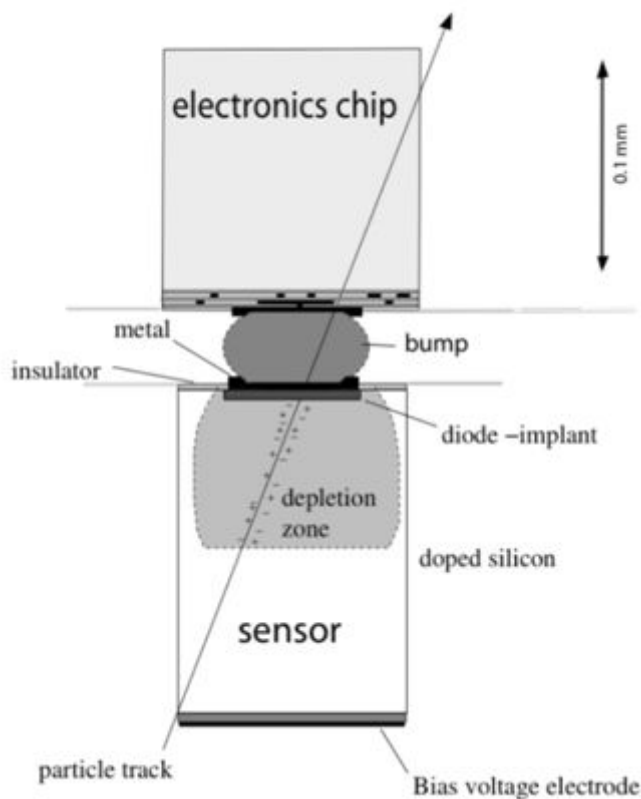


Funcionament

Funcionament de detectors de partícules híbrids

Els detectors de píxels híbrids tenen dues capes. La primera és un material pixelat, semi-conductor, on la radiació ionitzant que es transmet diposita determinades quantitats d'energia depenent del camí i l'impuls de les partícules mentre es recorre el material. Aquesta energia es pot mesurar mitjançant processos de ionització en el material semiconductor amb una matriu d'amplitud sensible a les càrregues. La informació podrà ser representada gràcies a un xip de lectura.

Aquest xip de lectura representa la segona capa i està segmentada en el mateix nombre de píxels. Les dues capes estan connectades una per una als píxels corresponents del sensor a través de solapaments de soldadura.





Principi de detecció

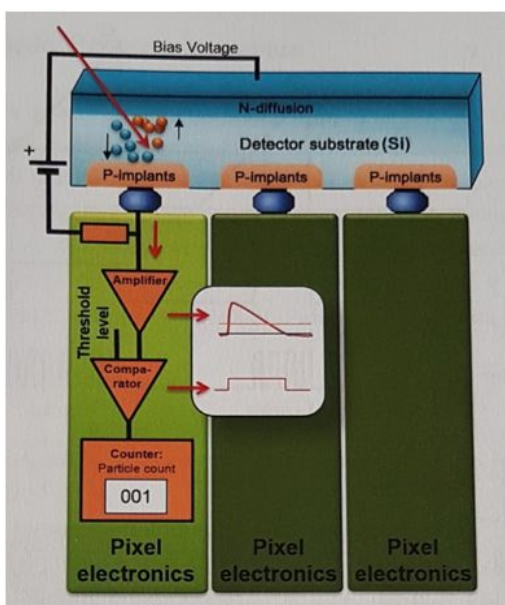
L'energia que diposita la radiació ionitzant allibera parells de forats d'electrons a la zona d'esgotament d'un o diversos píxels en el material del sensor (fet de silici en el cas del nostre detector).

Els electrons o forats es recullen a través d'un camp elèctric aplicat externament, convertit en polsos de voltatge i digitalitzats per Timepix. (Aquí podria dir alguna cosa més, però entro dins de software).

Electrònica

En aplicar una font de radiació, els electrons i els forats generats són atrets per electrodes que generen un pols de corrent elèctric. El pols de corrent elèctrica que es crea després de l'impacte d'una partícula ionitzant es converteix en un pols de tensió i s'amplifica a l'amplificador. El pols amplificat continua amb una entrada d'un comparador que, en funció de la mida del pols, decideix comptar o ignorar l'impacte de la partícula. La segona entrada de comparador s'estableix en un nivell de separació definit anomenat llindar de detecció. Si el pols entrant és superior al nivell del llindar, es transmet un pols posterior a la sortida del comparador i es registra al comptador (mode comptador) o s'utilitza per determinar l'energia absorbida (mode espectròmetre). Un impuls inferior al nivell de llindar no es traslladarà a la sortida i serà ignorat. Establir el llindar pot limitar la detecció de pulsacions dèbils, que

significa limitar el soroll, ja que poden donar-se senyals que no siguin polsos, però tindran un voltatge inferior. El nivell mínim de llindar correspon a la detecció d'energies de 3,5 keV en un píxel.



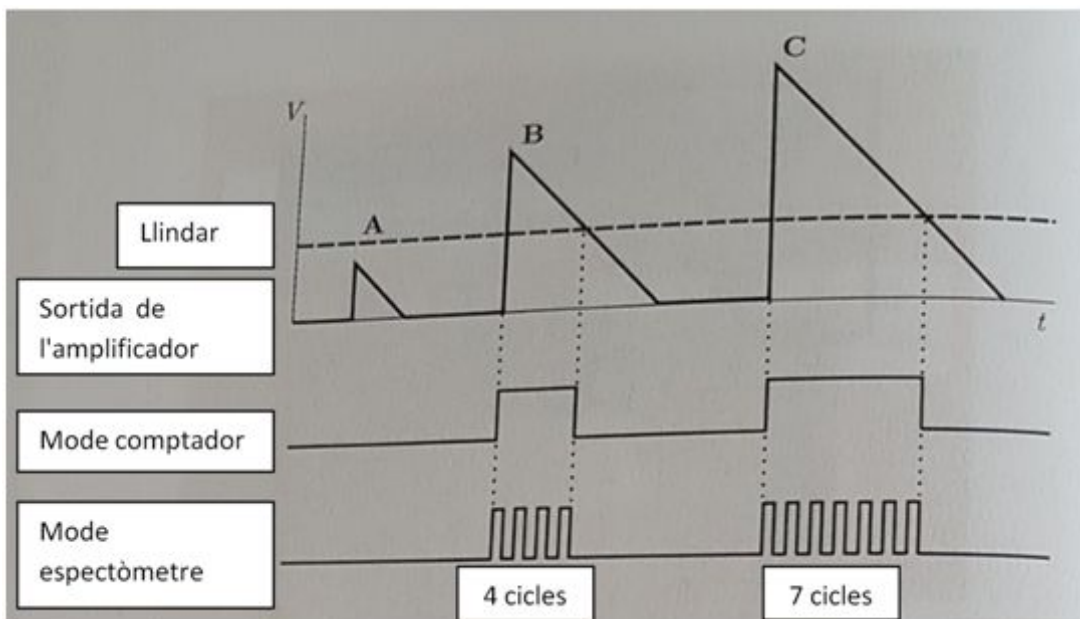


El càtode comú (a la part superior) està connectat a un potencial elèctric més alt que els ànodes del píxel inferior, el que significa que tots els díodes estan connectats en sentit invers. Cada píxel es connecta al xip de lectura mitjançant una bola de connexió.

L'operació del mode comptador i el mode espectròmetre es pot veure a la imatge. El gràfic de tensió en funció de temps mostra tres polsos entrants marcats A, B i C, cadascun amb càrregues generades (és a dir, energia absorbida). El pols A es correspon amb la menor energia absorbida i el pols C correspon a l'energia més alta absorbida.

L'energia corresponent al pols A és baixa i, per tant, el pols no assoleix el nivell de llindar i no és registrat pel comptador. Els polsos B i C superen el llindar i cada un ha incrementat el valor del comptador en un.

En el mode espectròmetre, el detector assigna un número de cicles a cada pols basat en el principi ToT (temps sobre el llindar). D'aquesta manera, un oscil·lador envia un senyal amb una freqüència definida i el comptador compta quants cicles han passat no només a l'amplada del pols, sinó també a l'alçada d'aquest. Per tant, compta l'energia absorbida. Si realitzem un calibratge energètic del detector (comparant els polsos creats per fonts de radiació a la seva energia coneguda), podem (utilitzant una corba de calibratge) mostrar energies directament en kiloelectronvolts. Es pot veure el procés a la següent imatge:





Pol Marcos

Software de PixetPro

Introducción

El **PIXET Pro** es un software multiplataforma desarrollado en la empresa ADVACAM. Es un paquete de software para el control de adquisición de datos para los chips de la familia Medipix. Es compatible con la mayoría de los Medipix disponibles basados en dispositivos (Medipix2, Medipix3, Timepix, MedipixQuad, TimepixQuad, Widepix, Timepix3) y con las interfaces de lectura comúnmente utilizadas (MiniPIX, FitPIX, ModuPIX, WidePIX, RasPIX, etc)

En particular nosotros lo hemos utilizado sobre un chip Timepix con interfaz **MiniPIX**.

Pixet proporciona muchas herramientas para la optimización de los parámetros del detector, procesamiento de datos, correcciones de imágenes y scripting en **Python** con resaltado de sintaxis.

Pixet está escrito en lenguaje C++ y utiliza bibliotecas Qt multiplataforma.

Aplicaciones

Nosotros hemos usado el software para:

- Medir y leer los datos que nos proporciona el detector **Medipix**.
- Visualizar y modificar los datos.
- Configurar el detector.
- Guardar los datos medidos en diferentes tipos de formatos (ASCII, PNG, pixel log,....).
- Aplicar scripts como **Flat-field** para mejorar las imágenes.
- Aplicar herramientas para realizar un diagnóstico de la imagen.



Ventana principal:

Esta ventana consta de 6 zonas bien diferenciadas:

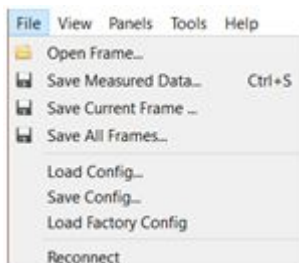
- La barra de menús:** con diferentes acciones y comandos.
- La barra de herramientas:** con botones con las principales acciones.
- La barra de dispositivos:** con los dispositivos conectados
- La barra de estado:** con información de la medición.
- La barra de paneles: con diferentes paneles de configuración y muestra de datos.
- La imagen detectada: con una barra de estado y las escalas de energía.



La barra de menús

Esta ventana tiene una barra de menús superior con diferentes opciones:

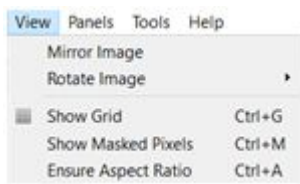
La opción de **File** nos permite abrir el archivo que queremos analizar o modificar. Dentro de esta encontramos la opción de diferentes tipos de guardado dependiendo de lo que queramos guardar. También encontraremos la opción de cargar la configuración usada en archivos anteriores.



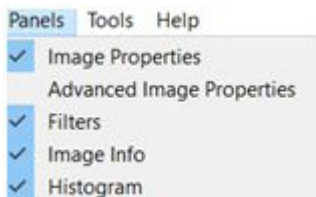


La opción de **View** nos permitirá cambiar la manera en que vemos la imagen. Otras opciones son:

- Mirrorimage** nos permitirá superponer una imagen igual a la que tenemos.
- Rotateimágenes** permite girar la imagen.
- Show Griddivide** todos los píxeles rodeándolos con una línea gris.
- Show MaskedPixelsnos** permite visualizar los Píxeles que están enmascarados, es decir, los que a simple vista no se ven o se eliminan para una mejor calidad de imagen.
- EnsureAspect Ratio** nos permite mostrar la imagen con la ratio anchura y altura fijas.



La opción de **Panels** permite elegir los paneles que deseamos que se vean en nuestra ventana principal.



La opción de **Tools** nos permite usar algunas herramientas para mejorar o modificar nuestra imagen.

Clusteringnos permitirá agrupar todos los píxeles ya sea por similitud o distancia, consiguiendo que la imagen se vea más suave o homogénea.

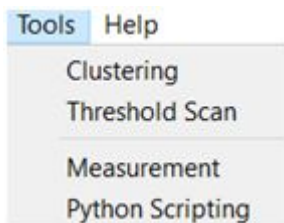


ThresholdScan te permite detectar alguna detección fuera de lugar.

Measurement mide la cantidad de píxeles ya sea en número o por cantidad de energía.

Python Scripting modifica el documento pero de una manera más profesional ya que lo modificas directamente en el script (código) de la imagen.

La opción de **Helpnos** proporciona ayuda para poder usar el programa o resolver alguna duda.



En la parte izquierda del menú encontramos el/ los detectores que estamos usando en ese momento. El color cambiará dependiendo de si está enviando información o no.

En mi caso sale de esta manera porque no tengo el detector conectado.



En caso de tener varios chips conectados aparece una imagen como la siguiente:





Barra de herramientas

Debajo de la barra de opciones superior encontramos la barra de herramientas que también nos permitirá modificar la imagen.



- La primera y segunda opción nos permiten abrir y guardar la imagen actual.
- La tercera y cuarta nos permiten mostrar la rejilla de píxeles y mostrar el número de serie del chip.
- La quinta nos permite girar la imagen.
- La sexta nos permite cambiar el tipo de color con los que se ve la imagen.
- La séptima y octava nos permiten modificar el rango de colores según nuestras necesidades.
- La novena nos permite pasar de frame en frame.
- La décima nos permite activar o desactivar la opción de auto refrescar.
- La undécima nos permite editar la configuración de los píxeles.
- La duodécima nos permite mostrar o no el icono en el menú de **PixetPro**

La barra de estado

En la parte inferior encontraremos la barra de estado:



Primero encontramos **Messages** esto nos indica el número de mensajes que nos envía el propio programa.

A continuación encontraremos el número de frames (**FPS**) que se han medido por segundo.

Después encontramos el tiempo (**T**) en el que se ha medido.



Más adelante encontramos el contador que nos indicará cuántas repeticiones de la misma imagen se han realizado (**R**).

Después encontramos el marcador (**A**) que nos indica cuántas imágenes se han podido medir en total.

También encontraremos el icono del estado (Verde-Ok, Amarillo-advertencia, Rojo-error).

Por último encontraremos la barra de progreso.

A la derecha encontramos:

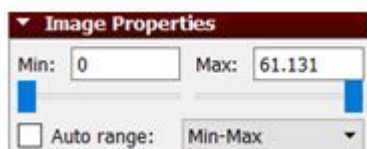
ImageProperties:

Nos permite ajustar el valor de energía del rango visible de los fotogramas que deseamos ver. Esto nos permitirá resaltar algunos colores y opacar otros.

Estos valores van desde el valor mínimo (Min) hasta el valor máximo (Max) y se corresponden con la escala de colores que se haya seleccionado. Por ejemplo, si se trabaja en la escala de grises, los más bajos son los que corresponden al negro y a medida que vamos subiendo aparecerán otros, que se juntarán hasta llegar al blanco. Así, si definimos una matriz 3x3 entre los valores 1 (min) y 6 (max) todos los valores por de 1 o menos se verán negros, todos los valores de 6 o más se verán blancos y los valores intermedios tomarán diferentes tonos de gris.

5	1	0
3	4	1
5	6	2

Existe la opción de auto range que ajustará automáticamente estos valores para que la imagen cubra todo el rango.





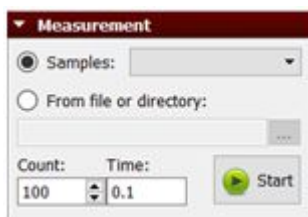
Measurement

Este menú nos permite elegir desde donde vamos a adquirir los datos para generar la imagen. Las opciones disponibles son desde el propio detector, instantáneamente o desde un documento guardado.

También nos va a permitir seleccionar los parámetros de tiempo y de cantidad de las veces que vamos a realizar la prueba.

Igualmente nos permite seleccionar el tipo de medida, pudiendo seleccionar por frames (imágenes individuales), integral (suma de imágenes) o por inyección de pulsos (solo para comprobación del chip).

Por último nos va a permitir ejecutar el programa e iniciar el proceso de medida.



Filters

Este menú nos permite aplicar filtros para que la imagen se vea de la mejor manera posible utilizando varios métodos y scripts. Un análisis del script flat-field se encuentra disponible en la parte práctica del TR.





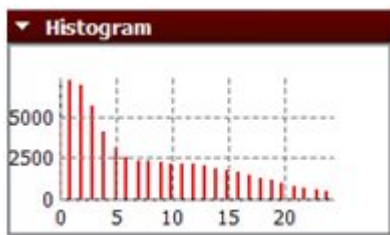
ImageInfo

Este panel nos muestra la información de la imagen estadística de la imagen.

Image Info	
[X,Y]:	[170, 94]
Count:	7
Min:	0
Max:	112
Pixel Count:	60922
Total:	585153
Mean:	8.92873

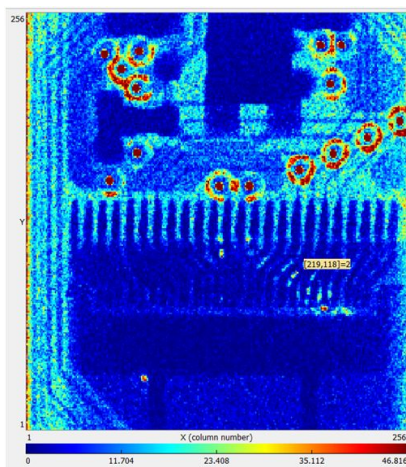
Histogram

Este menú nos crea un histograma de la imagen o imágenes con las que estamos trabajando.



Panel de imagen

Por último encontramos en el centro de todo la parte donde veremos la imagen y sus medidas y parámetros.



En este caso se muestra una de las pruebas que se hicieron en la universidad de Barcelona con el detector. En concreto esta muestra una memoria SD vista con rayos X. Se ha seleccionado como escala de colores Jet y una escala de energías entre 0 i 46,82 keV



Mario Agustíño

Els Fonaments de la Física Moderna

2.1.-Models de la llum:

Discrepància entre models: Model ondulatori i model corpuscular:

Durant tota la història, la llum va ser interpretada per dos models diferents. Un d'aquests era el model ondulatori, el qual defensava que aquesta es comportava com a un conjunt d'ones, en canvi, l'altre model, el model corpuscular, defensava l'existència d'una estructura interna de la llum més definida, conformada per diversos feixos de partícules, anomenades fotons.

En les següents taules, podem observar clarament les característiques de cadascun d'aquests models, a més a més dels fets que apunten al compliment de cadascun, i els fets que els fan abolir:

-Característiques dels models:

MODEL CORPUSCULAR	MODEL ONDULATORI
Proposat per Isaac Newton (1704)	Proposat per Cristian Huygens (1670)
La llum està formada per partícules, emeses en totes direccions i a gran velocitat	La llum està formada per un conjunt d'ones mecàniques, que es propagaven per mitjà d'un medi material de gran elasticitat.
Aquestes partícules produeixen la visió en arribar al nostre ull, estimulades per un moviment rectilini uniforme	Defensen l'existència de l'èter, el qual és definit com una substància imperceptible, present a tota zona de l'univers



Els corpuscles de diferent naturalesa es combinen per a formar els diferents colors	Les ones creen els diferents colors existents a partir de les seves respectives longituds d'ona, fenomen mesurat per Thomas Young
---	---

-Fets que confirmen cadascun dels models:

FETS QUE CONFIRMEN EL MODEL CORPUSCULAR	FETS QUE CONFIRMEN EL MODEL ONDULATORI
<u>Formació d'ombres:</u> Les ombres projectades sobre els objectes són nítides, fet per culpa del rebot i a la continuació del moviment dels corpuscles que formen la llum, a l'instant d'impactar contra el cos.	<u>Lleis de la refracció i la reflexió:</u> Aquestes poden ser demostrades fàcilment amb el principi de Huygens, que enuncia l'apropament del raig refractat a la normal quan el raig de llum passa a un medi amb major densitat.
<u>El camp gravitatori no sembla afectar la trajectòria rectilínia de la llum:</u> Això és degut a la gran velocitat de la llum, que fa que els corpuscles no es vegin afectats pels diferents camps de gravitació.	<u>Colors que formen la llum blanca:</u> Això, és fàcilment raonable si es considera que cadascun dels colors correspon a una longitud d'ona diferent; així, aquest fenomen seria conseqüència dels processos de difracció i refracció lumínica.
<u>Llei de la reflexió:</u> Es pot extrapolar com a una conseqüència d'un xoc elàstic, dut a terme pels corpuscles en impactar amb la superfície reflectora. A més, es poden aplicar els principis de conservació de la quantitat de moviment, juntament amb l'energia.	<u>Dos raigs de llum es creuen sense pertorbar la seva trajectòria:</u> Això és fàcilment demostrable si considerem la llum com un gran conjunt d'ones mecàniques, sense massa, pel que no desviaran les seves respectives trajectòries.

-Fets que deneguen la veracitat dels diferents models:

FETS QUE REFUTEN EL MODEL CORPUSCULAR	FETS QUE REFUTEN EL MODEL ONDULATORI
Si veritablement la llum fos un gran feix	La llum no presenta la capacitat de



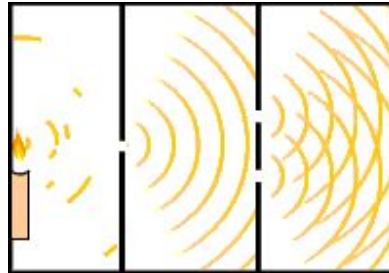
de partícules, aquesta hauria de perdre massa de forma considerable, aquest fet no és perceptible a la realitat.	crear obstacles, pels quals desviarà la seva trajectòria, per mitjà de la difracció. Aquest fenomen és propi d'ones.
Si aquest model fos vàlid completament, els raigs de llum secants entre si haurien de desviar les seves respectives trajectòries, fet que no és donat a terme a la realitat.	La propagació de la llum en forma d'ones a través dels medis materials pot ser explicada com la vibració de les respectives partícules del medi al pas del raig de llum. En canvi, aquesta explicació no és acceptable pels raigs de llum provinents del Sol.
Segons aquest model, els processos de reflexió i refracció en un mateix sistema d'estudi són inexplicables, ja que no existia una explicació raonable per la qual alguns corpuscles rebotaven davant la superfície reflectora i altres seguien la seva trajectòria al segon medi.	
Quan Newton dedueix el procés de refracció a partir del model corpuscular, dedueix que el raig refractat s'allunya de la normal quan el raig passa d'un medi a un altre més dens, fet que a la realitat és totalment el contrari.	

Al segle XIX, per mitjà d'un experiment realitzat pel físic Thomas Young, molt conegut pel nom de l'experiment de la doble escletxa, es va aconseguir establir que la llum tenia característiques d'un caràcter plenament ondulatori, refutant així, fins a principis del segle XX, el model corpuscular. Aquest experiment, realitzat l'any 1801, va consistir en el següent:

En una habitació fosca, Young va fer entrar un raig ben fi de llum solar, a partir d'un mirall exterior i un forat a la finestra de l'habitació; aquest raig, va ser dirigit a una fina làmina de cartró de perfil respecte al raig, en el qual es podien diferenciar dos tipus de franges: les franges clares i les franges fosques, reflectides a la paret oposada a la làmina, i a cadascun dels forats que els corresponia; aquests, formaven un patró d'interferència, constituït per punts d'interferència constructiva i destructiva.



Si analitzem els resultats de l'experiment, observem que la làmina va separar el raig de llum primari en dues parts o subraigs, aquests difracten en impactar amb aquesta, formant així el patró d'interferència. A partir d'aquest fet, Young va mesurar el gruix de la làmina, les distàncies entre franges i la distància de la làmina a la paret, i aplicant les condicions d'interferència constructiva i destructiva va ser capaç de calcular la longitud d'ona dels subraigs.



Imatge de l'experiment de la doble escletxa

2.2.-Electromagnetisme:

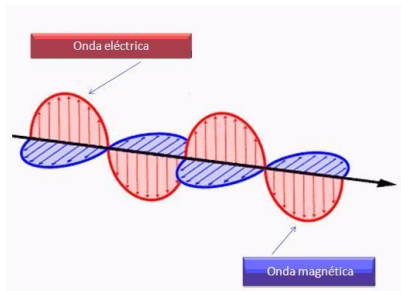
Inconvenients del model ondulatori:

La confirmació del model ondulatori va fer acceptar diferents fets especulats amb la veracitat d'aquest model. El principal d'aquests fets acceptats va ser l'existència de l'èter, com a substància present a tot l'univers; aquest presentava molts inconvenients, ja que aquesta havia de ser molt densa, per permetre la propagació de la llum com a ona transversal i a gran velocitat, i al mateix temps molt tènue, per no arribar a dificultar el moviment dels planetes i dels altres astres. Aquests inconvenients van ser resolts en gran part per James Clerk Maxwell, l'any 1873; aquest, a partir dels fonaments establerts per Faraday, Ampère i Thomson, va dur a terme un estudi sobre els fenòmens elèctrics i magnètics, que, en principi, no guardaven relació amb els fenòmens lluminosos. Els científics anteriorment esmentats, van imposar les bases dels camps elèctrics i els camps magnètics; Maxwell, en canvi, va suposar que aquests dos camps no eren independents entre sí, sinó que cadascun d'ells són originats sota determinades circumstàncies, sent originades per la mateixa magnitud física, la càrrega elèctrica.

A partir d'aquest estudi, Maxwell va poder establir les seves quatre lleis, i combinant-les entre sí, va obtenir una equació semblant a la d'una ona mecànica transversal, però amb un camp elèctric oscil·lant perpendicular a un camp magnètic també oscil·lant. Gràcies a aquest fet, va poder establir que els camps



electromagnètics es propagaven per ones, a una velocitat c , equivalent a la velocitat de la llum.



Imatge que mostra l'estructura esquemàtica presentada per les ones electromagnètiques

Així, Maxwell va aconseguir unir les ones electromagnètiques amb els fets lluminosos. La llum, a partir de la publicació de les lleis de Maxwell, va ser considerada com a una ona electromagnètica, fet que semblava explicar la propagació d'aquesta, i que semblava reforçar la idea de l'èter.

Llavors, amb les lleis de Maxwell es podia calcular la velocitat de la llum en un medi determinat (v), a partir del coneixement de la permeabilitat elèctrica (ϵ) i magnètica (μ), responent a la següent fórmula:

$$v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$$

Responent a aquesta mateixa fórmula, al buit, la velocitat de la llum s'expressa amb la lletra c :

$$c = 2,9986 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Aquest valor també és vàlid a l'aire, ja que posseeix les mateixes constants elèctriques del buit.



2.4.-Trencament de la visió mecanicista: El naixement de la física moderna:

La física clàssica, en estar basada els principis del moviment establerts per Newton l'any 1687, estava dotada d'un caràcter altament mecànic, fet que va ser trencat definitivament amb la publicació de les lleis de Maxwell, ja que va suposar l'existència d'un nou fet físic, fet que no podia ser explicat per termes de matèria i moviment, aquest fet era la radiació.

Segons les lleis de Maxwell, dita radiació havia de ser emesa quan s'accelerava un sistema compost per partícules elèctriques, aquesta emissió junt amb l'absorció d'energia, segons les mateixes lleis, havia de produir-se de manera contínua, en canvi, més endavant, a partir de diferents mètodes experimentals, es va demostrar tot el contrari, es va demostrar l'existència de la discontinuïtat de l'emissió i absorció de la llum, de manera que recordava a una espècie de paquets. Paradoxalment, si considerem cadascun d'aquests paquets com a una partícula, observem que la llum, en ser absorbida o emesa per la matèria, ho fa com si estès constituïda per partícules, fet inexplicable per la teoria de Maxwell.

Aquest fet, més endavant seria conegut com a dualitat ona-còrpuscle, o dualitat ona-partícula, que juntament amb els avenços en l'estudi de la radioactivitat i amb l'aparició de la Teoria de la Relativitat, van donar lloc al gran avenç físic del segle XX, el qual va originar la física moderna.

Radiació del cos negre:

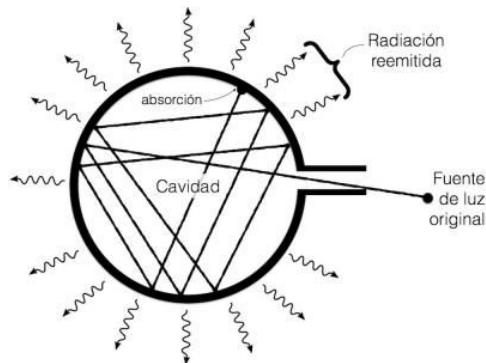
Per entendre aquest apartat, cal entendre que l'augment de la temperatura d'un cos fins a cert punt, provoca que l'espectre d'emissió del dit cos augmenti, pel que les ones emeses per aquest, posseiran una longitud d'ona més petita. A més, qualsevol cos absorbeix una certa part de la radiació imposada sobre aquest, i en reflecteix la part restant.

A principis del segle XX, les lleis de Maxwell havien creat un ingent interès en l'estudi de la radiació a tota la comunitat científica, pel que els científics van imposar, hipotèticament, l'existència d'un cos que absorbís tota la radiació que rebés, un cos ideal, el cos negre.

En la pràctica, dit cos és pràcticament existent, ja que, si fem una petita obertura a un cos que té les seves parets interiors recobertes de pols negra, dita obertura es comportarà com el cos anteriorment esmentat, ja que tota la radiació dirigida cap aquesta, seria absorbida, com a conseqüència de la reflexió d'aquesta a les seves

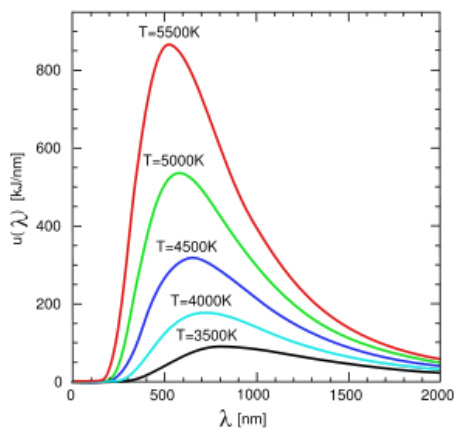


parets interiors. Aquest cos s'aproxima molt a la condició de cos negre, però no ho arriba a ser, ja que tot i que la probabilitat que la dita radiació sigui expulsada novament per l'obertura és ínfima, un cert nombre de radiació acabarà sent expulsada del cos.



Imatge esquemàtica del cos negre experimental

Si estudiem l'espectre de radiació emès per un cos negre per a cada temperatura, representant dit fet en una gràfica que relacioni les energies irradiades pel cos i les longituds d'ona de les dites radiacions, obtenim les corbes experimentals corresponents a la radiació del cos negre:



Imatge que mostra les corbes de radiació d'un cos negre

Per tant, la radiació havia d'estar formada per ones d'una longitud d'ona molt curta, com per exemple de radiació ultraviolada, aquest fet va ser conegut com a catàstrofe de l'ultraviolat.

L'any 1900, el físic alemany Max Planck, va deduir les corbes anteriorment esmentades teòricament. Per fer-ho, va suposar que l'energia radiada per un cos era absorbida i emesa d'una manera discontinua, en forma de paquets, que aquest va anomenar quants. L'energia de cadascun d'aquests quants responia a l'equació següent



$$E = h\nu$$

on h és la constant de Planck i ν és la freqüència de radiació

Pel que l'energia completa de la radiació serà un múltiple de l'energia d'un únic quant.

La hipòtesi de Planck va fer retornar el model corpuscular de la llum, ja que cadascun dels quants que conformaven la llum podien ser considerats com a partícules, aquesta idea va ser recuperada uns anys més tard per Albert Einstein qui va utilitzar dita hipòtesi per demostrar teòricament l'efecte fotoelèctric.

L'efecte fotoelèctric

L'experiment de l'efecte fotoelèctric consistia en un tub de vidre o quars, en el que es va recrear el buit, a l'interior d'aquest tub, hi havia dos elèctrodes, un càtode i un ànode. Quan aquest experiment es va completar, es va crear un corrent elèctric, el qual va ser creat per un voltatge V , molt gran, com per arrencar els electrons i dirigir-los cap a l'ànode. Aquest escapament és provocat pel transport d'energia d'una ona electromagnètica per part dels electrons del metall incidit, amb aquesta energia els electrons s'escapen dels àtoms dels metalls, passant a ser anomenats fotoelectrons.

Aquest fenomen era inexplicable per a la física clàssica, ja que, a partir d'un estudi detallat d'aquest, es van poder establir les següents conclusions:

- Quan s'augmenta la intensitat de radiació augmenta la intensitat del corrent elèctric
- L'emissió fotoelectrònica és gairebé instantània, encara que la intensitat de radiació sigui molt petita
- L'emissió fotoelectrònica per a un metall determinat només té lloc si la freqüència de la radiació incident és més gran que un cert valor anomenat freqüència llindar ν_0 .
- Per a una radiació d'intensitat determinada, la intensitat del corrent augmentava fins a una intensitat de saturació, si augmentem el valor de potencial.
- Quan fem disminuir el valor de potencial fins a un valor negatiu, l'emissió fotoelectrònica disminueix fins a un valor fix, a partir del que ja no pot disminuir.

A principis del segle XX, Einstein va ser el primer a donar una explicació lògica al dit efecte, raonant que la llum estava formada per partícules anomenades fotons, que



viatjaven a una velocitat c i que constituïen tots els altres tipus de radiació electromagnètica.

Aquest justificava la creació de corrent elèctric a partir de la llum amb l'impacte dels fotons que formaven dita radiació amb els àtoms del metall, provocant l'escapament dels seus electrons.

L'energia necessària per arrencar els electrons de la xarxa cristal·lina del metall va ser anomenada treball d'extracció W_0

$$W_0 = h\nu_0$$

A partir d'aquests resultats, Einstein va crear l'equació de l'efecte fotoelèctric

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + h\nu_0$$

A més, es va concloure que la quantitat de moviment d'un fotó és

$$p = E/c = h\nu/c$$

Dualitat ona-corpúscle:

L'any 1923, el físic francès Louis De Broglie, va generalitzar la dualitat entre els caràcters corpuscular i ondulatori de la llum a totes les partícules elementals existents. Tot seguit, va imposar la següent equació:

$$\lambda = h/mv = h/p$$

A més a més, l'expressió donada per De Broglie permetia conèixer el moment lineal dels fotons:

$$\lambda = h/\nu \rightarrow p = E/c$$



Principi d'incertesa:

A la mecànica quàntica, existeix un terme conegut com a funció d'ona, que ens permet conèixer la probabilitat de trobar una partícula qualsevol en una determinada regió de l'espai. Aquest terme s'expressava amb el símbol ψ , i va ser introduït per Erwin Schrödinger l'any 1926, com a conseqüència del seu model atòmic, en el que parlava d'ones de probabilitat.

Un altre dels aspectes fonamentals de la física quàntica és el principi d'incertesa, aquest diu: és impossible mesurar amb exactitud la posició i la quantitat de moviment d'una determinada partícula:

$$\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$$

on Δx és la incertesa en la posició i Δp és la incertesa en la quantitat de moviment.

2.5.-Teoria de la Relativitat:

Es va publicar com a conseqüència del desig de mesurar la velocitat de la terra respecte a l'èter, desig molt present a finals del segle XIX.

A partir dels resultats negatius de l'experiment de Michelson-Morley es va veure que no hi havia moviment relatiu entre el moviment de la Terra i l'èter luminífer. Per tant es va arribar a les següents conclusions:

- La llum recorre els espais amb la mateixa velocitat c , a la que no es poden aplicar les transformacions de Galileu
- L'èter mai va existir, era una hipòtesi errònia

Els postulats de la teoria de la relativitat restringida:

Einstein, a part de per la demostració de l'efecte fotoelèctric, va ser molt reconegut per la creació de la Teoria de la Relativitat.

Aquesta, es pot separar en dues subteories: la teoria de la relativitat restringida, que estudia sistemes amb moviments uniformes, i la teoria de la relativitat general, que inclou l'estudi dels sistemes amb moviments accelerats.



En aquesta teoria, Einstein refuta l'existència de l'èter, com a conseqüència dels resultats obtinguts per Michelson i Morley l'any 1887.

Els seus postulats eren:

-Principi d'equivalència: Les lleis de la física es verifiquen de manera idèntica en tots els sistemes inercials, sense que sigui possible deduir a través seu cap distinció entre un sistema inercial i un altre.

-Segon postulat: La velocitat de la llum és una constant universal, invariant per a tots els observadors inercials. Aquest postulat, desencadenava diverses conseqüències:

-Que la velocitat c sigui independent de la velocitat relativa de l'observador, contradiu definitivament les lleis de Newton, i com a conseqüència, també té altres influències en l'espai i el temps. Així, si s'accepta dit postulat, s'observa que el temps és dependent de les característiques del sistema, és a dir, el temps és relatiu.

Aquesta expressió es pot matematitzar:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

A més a més, aquesta dilatació temporal es fa present a la nostra vida quotidiana, tot i que és pràcticament imperceptible, com a conseqüència de l'ínfima relació de v i c .

Les transformacions Einstein-Lorentz: Contracció de la longitud:

Quan la velocitat v és molt més petita que la velocitat de la llum, es duen a terme dos processos: el de dilatació temporal, anteriorment esmentat, i el de dilatació longitudinal; aquest últim sempre es durà a terme en la direcció del moviment.

La denominada contracció Lorentz respondrà a la següent fórmula:

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$



on l és la longitud obtinguda, l_0 és la longitud impròpia i $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ és el factor de Lorentz

Equivalència entre massa i energia:

La teoria de la relativitat, esmenta el fet que la massa d'un cos no és la mateixa per a tots els observadors de diferents sistemes, i que augmentava a mesura que adquiria certa velocitat:

$$m = m_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Així, s'expressa que cada massa existent a l'univers contenia una quantitat neta d'energia, responent a la següent expressió:

$$E = mc^2$$

Així, la combinació de la física quàntica i la teoria de la relativitat, juntament amb els estudis sobre el comportament de la radioactivitat, van conformar els pilars de la física actual, ajudant-nos a progressar més que mai al nostre coneixement sobre l'univers.

