

Estudio de la radiación de fondo a distintas alturas y su comparación con el proyecto TimPix

Autor: David Martínez Hermoso

Curso: 2º A de Bachillerato

Año: 2019-2020

Tutor: Daniel Parcerisas Brossa

COLEGIO SAGRADA FAMILIA

GAVÀ

RESUM

Partint de l'interès per la física i l'oportunitat de poder treballar amb un detector de partícules MiniPix i les dades de l'IRIS (Institute for research in Schools), s'ha plantejat fer un estudi de les idees principals de la física moderna i física nuclear per després aprendre a treballar i, veure el funcionament d'un detector de partícules, estudiar la radiació de fons i fer una anàlisi de les dades oferides pel projecte plantejat a l'IRIS i, si és possible, comparar-ho amb les nostres dades.

Després de fer unes pràctiques introductòries per conèixer el funcionament del detector i el seu programari respectiu, s'ha procedit a recollir dades a diferents ciutats, altura i graus d'inclinació per poder fer l'anàlisi de aquestes dades.

A partir d'això, s'ha realitzat una anàlisi estadística de l'energia mitjana rebuda, el nombre de píxels impactats al detector i el percentatge d'ocupació d'aquest als diferents llocs per veure si aquestes variables afectaven a les dades rebudes. S'ha estudiat la dependència del grau d'inclinació del detector respecte l'aparició de muons. Després d'això, s'ha fet una anàlisi de les dades que ofereix l'IRIS sobre l'Estació Espacial Internacional a un projecte anomenat TimPix, on afegim l'estudi de les dades sobre la mateixa ciutat durant un any i sobre diferents parts del món durant el mateix mes.

Finalment, s'ha comprovat que existeix una dependència important en l'aparició de muons respecte a la inclinació del detector i, que les dades a La Terra varien molt poc entre si, mentre que, podem veure diferències importants entre aquestes dades i les dades recollides a l'Estació Espacial Internacional.

ABSTRACT

This research project arises from the interest in physics and the opportunity to work with a MiniPix particle detector and the IRIS (Institute for research in Schools) data. It is proposed to study the main ideas of modern physics and nuclear physics to learn how to work and see the operation of a particle detector, study the background radiation and analyse the data provided by the proposed project at IRIS and compare it with our data.

After introductory practices to know the operation of the detector and its respective software, the data was collected in different cities, height and inclination to be able to analyse this data.

From the results, a statistical analysis has been done, including the average energy received, the number of pixels impacted on the detector and the percentage of occupancy of the detector in each of the different places was performed to detect if these variables affected the received data. The dependence of the degree of tilt of the detector on the appearance of muons has also been studied. In addition, an analysis of the data provided by IRIS on the International Space Station has been performed to a project called TimPix, where we add the study of data on the same city for a year and on different parts of the world during the same month.

Finally, it has been proved that there is a significant dependence on the appearance of muons with the tilt of the detector and that the data on Earth vary very little with each other. However, there are abysmal differences between these data and the data collected at the International Space Station.

ÍNDICE

1. Introducción	5
2. Objetivos.....	7
3. Introducción teórica.....	8
3.1. Detector MiniPix	8
3.2. Rayos X.....	10
3.3. Radiación y rayos cósmicos	12
4. Práctica introductoria al detector	14
5. Análisis rayos X mediante diferentes muestras	19
6. Estudio radiación de fondo.....	27
6.1. Análisis de los datos obtenidos	28
6.1.1. Comparación con el proyecto TimPix.....	48
6.2. Análisis proyecto TimPix	51
7. Entrevista a Josep Campmany	60
8. Conclusión.....	63
9. Fuentes de información	65
Anexos	69
Anexo 1. Los fundamentos de la Física Moderna.....	69
1.1. La radiación del cuerpo negro.....	70
1.2. El efecto fotoeléctrico.....	73
1.2.1. Explicación de Einstein. El fotón.....	77
1.3. El efecto Compton	79
1.4. Dualidad onda-corpúsculo. Introducción a la mecánica cuántica	80
1.4.1. Hipótesis de Broglie.....	81
1.4.2. Principio de incertidumbre	83
1.5. Introducción a la teoría de la relatividad.....	84
1.5.1. El experimento de Michelson-Morley.....	85
1.5.2. Los postulados de la teoría de la relatividad restringida	88

1.5.3. Consecuencias del segundo postulado. La dilatación temporal.....	90
1.5.4. Las transformaciones de Einstein-Lorentz. La contracción de la longitud.....	94
1.5.5. Equivalencia masa-energía	96
Anexo 2. Introducción a la física nuclear	98
2.1. Las partículas elementales	98
2.1.1. Historia	98
2.1.2. El modelo estándar	99
2.2. La radiactividad.....	102
2.2.1. El núcleo atómico	102
2.2.2. Origen	103
2.2.3. La partícula Alfa	105
2.2.4. La partícula Beta	106
2.2.5. Los rayos Gamma	108
2.2.6. Los rayos X	109
2.2.7. Los rayos cósmicos	111
2.3. Reacciones nucleares.....	114
2.3.1. Fisión y Fusión Nuclear	115

1. Introducción

Cuando me planteé la necesidad de buscar un tema para mi trabajo de investigación, solo tenía clara una cosa, estaría relacionado con la física.

Comencé a indagar en este campo meses antes de comenzar primero de bachillerato y, me di cuenta que lo que realmente me interesaba era la física de partículas sabiendo, antes de documentarme, que mi conocimiento sobre este campo era prácticamente nulo.

Sin saber muy bien cómo enfocar mi trabajo de investigación llegamos a principios del año 2019. En ese momento, tuve la oportunidad de ver los trabajos que se presentaban por los alumnos que en aquel momento estaban cursando segundo de bachillerato.

Hubo cuatro trabajos que me llamaron mucho la atención y que, para mi sorpresa, estaban todos ellos relacionados con la física de partículas. Todos tenían como base el uso de un detector de **partículas TimePix, el detector MiniPix.**

Tras ver aquellos trabajos, mis objetivos a la hora de escoger el tema de mi trabajo de investigación se redujeron a querer realizar un trabajo relacionado con este dispositivo. Fue ese mismo día cuando le pregunté, al que finalmente ha sido el tutor de este trabajo, Daniel Parcerisas, si se podrían realizar otros trabajos con el detector como soporte, y la respuesta fue un sí.

Ese mismo día supe que no era el único interesado en realizar el trabajo de investigación sobre física de partículas y, que tendría a mi compañera Esther Salvador acompañándome en este camino y, de esta forma poder ayudarnos mutuamente cuando fuera necesario.

Una vez tuve claro en qué se basaría mi trabajo, me planteé como objetivo primordial documentarme para tener una buena base sobre los conceptos teóricos de la física moderna y física nuclear y, de esta manera, poder aprender a utilizar un detector de partículas TimePix y estudiar la radiación de fondo.

Para poder conseguir las metas que me había propuesto, decidí estructurar mi trabajo de la siguiente manera:

Tuve claro que tenía que desarrollar una primera parte más teórica, que definiera los conceptos clave y, de esta forma, poder realizar la parte práctica: una introducción del detector utilizado, una base sobre rayos X y rayos cósmicos y una base sobre la radiación de fondo y la radiación alfa, beta y gamma.

Por eso, he dedicado el primer bloque de mi trabajo a estudiar estos conceptos básicos y necesarios para poder realizar las diferentes prácticas. Además de esta introducción teórica, en los anexos se ha incorporado toda esta información ampliada y, también la teoría sobre física moderna y nuclear.

Por lo que respecta a la parte práctica, está dividida en cuatro bloques:

- Una práctica introductoria para familiarizarnos con el detector. *(ver página 14)*
- Realización de una práctica en la Universidad de Barcelona donde pudimos estudiar el comportamiento de rayos X en distintas muestras escogidas por nosotros. *(ver página 19)*
- Estudio de radiación de fondo y el análisis del proyecto TimPix. *(ver página 27)*
- Entrevista a Josep Campmany, físico de Gavà que trabaja en el Sincrotrón ALBA, situado en el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona en Cerdanyola del Vallés. *(ver página 60)*

Espero que este trabajo sirva para que el lector indague, en mayor medida, sobre el tema tratado y anime a más personas a adentrarse en este campo científico.

2. Objetivos

Los objetivos que me propuse conseguir al inicio del trabajo de investigación (TR) fueron los siguientes:

- Estudiar distintos apartados de la física moderna (Estudiar el efecto fotoeléctrico, estudiar el efecto Compton, estudiar la dualidad onda-corpúsculo y el principio de incertidumbre y estudiar los fundamentos de la teoría de la relatividad).
- Estudiar el origen, los fundamentos básicos, cómo se producen y cuáles son las principales aplicaciones de los rayos X y los rayos cósmicos.
- Aprender a utilizar un detector de partículas TimePix.
- Estudiar el comportamiento de las partículas alfa, beta y gamma.
- Calcular valores de la radiación de fondo en distintos lugares y compararlos con los datos ofrecidos por el proyecto TimPix
- Realizar un análisis de los datos ofrecidos por el proyecto TimPix.

3. Introducción teórica

Para poder realizar las prácticas planteadas en el trabajo es necesaria una base teórica en temas muy concretos.

Además de esta introducción teórica básica, de la página 69 en adelante se ha desarrollado, con mayor profundidad, una parte teórica sobre física moderna y nuclear, con la que se amplían los temas tratados en este apartado.

3.1. Detector MiniPix

El **MINIPIX** es una solución de cámara de radiación miniaturizada y de baja potencia con detector de conteo de partículas (o seguimiento de partículas) **Timepix**.

El sistema MINIPIX estándar incorpora un detector Timepix único (256 x 256 píxeles con paso de 55 μm) con sensor de acuerdo con las preferencias del cliente (silicio de 300 μm de espesor estándar). Utiliza una interfaz USB 2.0 capaz de leer hasta 45 cuadros por segundo (con un tiempo de exposición de 1 ms). El detector Timepix es sensible a la energía, lo que aporta una nueva dimensión a las imágenes radiográficas.

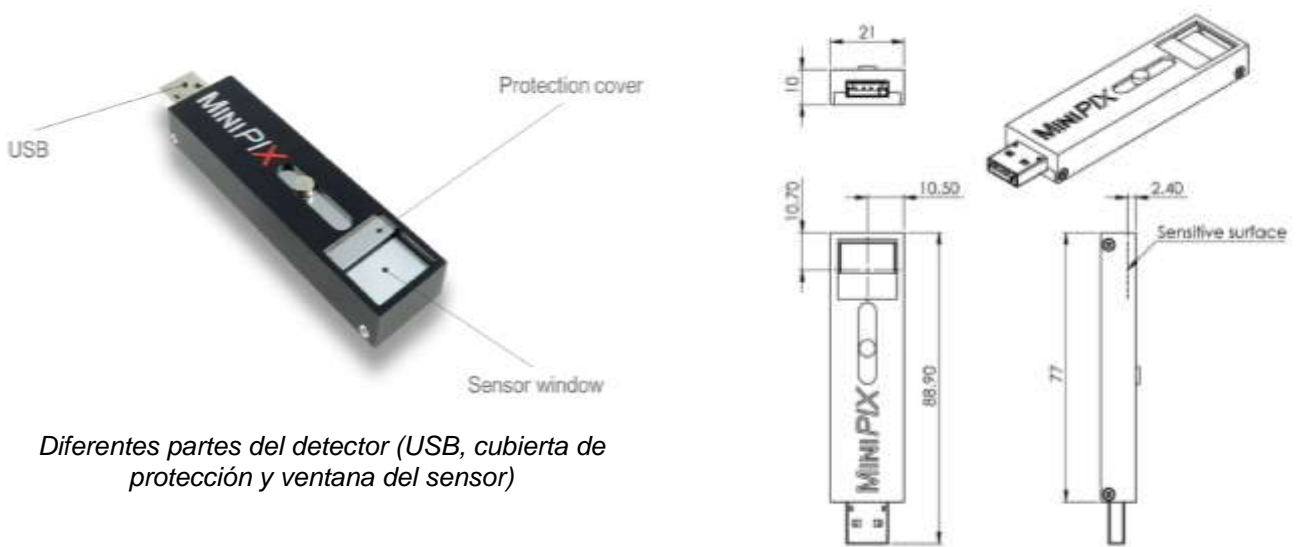
El dispositivo MINIPIX se controla a través de la interfaz USB. Los principales sistemas operativos son compatibles (MS Windows, Mac OS y LINUX). El complejo software **PIXET PRO** utilizado para la operación del detector se proporciona de forma gratuita.



Detector MiniPIX



Ejemplo de los píxeles ocupados en una medida de 1h solamente con la radiación de fondo



Diferentes partes del detector (USB, cubierta de protección y ventana del sensor)

Dimensiones del detector en milímetros

Las características principales del detector son las siguientes:

- Material del sensor: Silicio
- Grosor del sensor: 100 μm , 300 μm y 500 μm
- Área sensitiva: 14 mm x 14 mm
- Número de píxeles: 256 x 256
- Tamaño de píxel: 55 μm
- Resolución: 9 lp/mm
- Velocidad de lectura: 45 frames/s
- Paso umbral: 0,1 keV
- Resolución energética: 0,8 keV (THL) y 2 keV (ToT)
- Energía mínima detectable: 5keV para rayos X
- Velocidad de recuento de fotones: Hasta 3 x 10⁶ fotones/s/píxel
- Chip de lectura: Timepix
- Modo de operación de píxeles: Conteo, tiempo por encima del umbral, hora de llegada
- Conectividad: USB 2.0
- Dimensiones: 60 mm x 12 mm x 5 mm (L x W x H)
- Peso: 50 g
- Software: Pixet PRO

3.2. Rayos X

Rayos X:

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas, como lo es la luz visible, o las radiaciones ultravioleta e infrarroja. Lo único que los distingue de las demás radiaciones electromagnéticas es su llamada longitud de onda, que es del orden de 10^{-10} m (equivalente a la unidad de longitud que conocemos como Angstrom). Este tipo de radiación es invisible para el ojo humano.

Cuando menor es la longitud de onda de los rayos X, mayor es su energía y, por lo tanto, su poder de penetración.

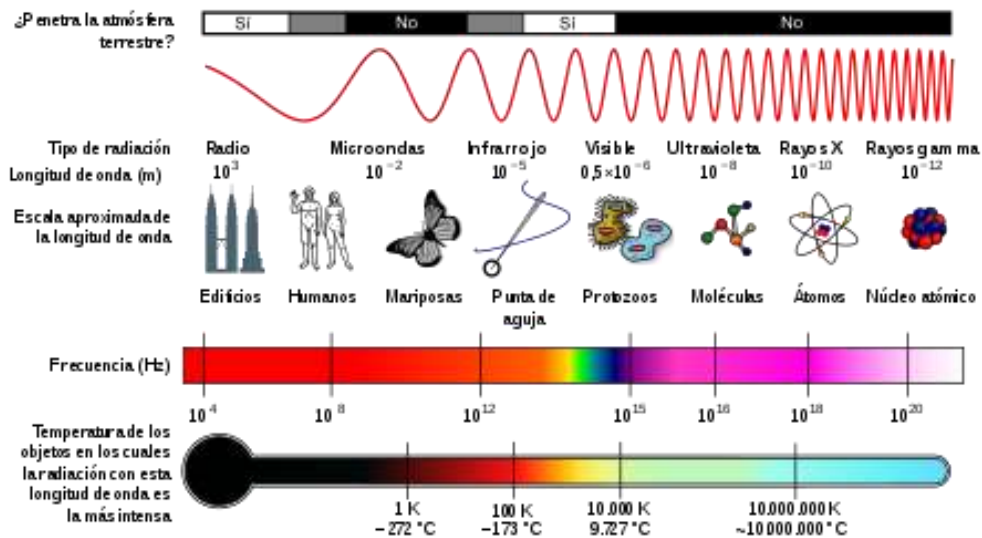


Diagrama del espectro electromagnético

Podemos dividir los rayos X en dos tipos: los rayos X cercanos a la banda ultravioleta de espectro, que son los conocidos como “blandos” y los próximos a la banda de radiación gamma, conocidos como “duros”.

Los rayos X, al igual que la luz visible, se producen a raíz de las transiciones de los electrones atómicos de una órbita a otra. La luz visible corresponde a transiciones de los electrones más externos y los rayos X a los electrones más internos.

Este tipo de radiación electromagnética fue descubierta en el año 1895, de manera accidental, por **Wilhelm Röntgen**. No tuvo que pasar mucho tiempo para que se definieran claramente dos tipos de aplicaciones en la medicina: el diagnóstico de enfermedades y el tratamiento de tumores.



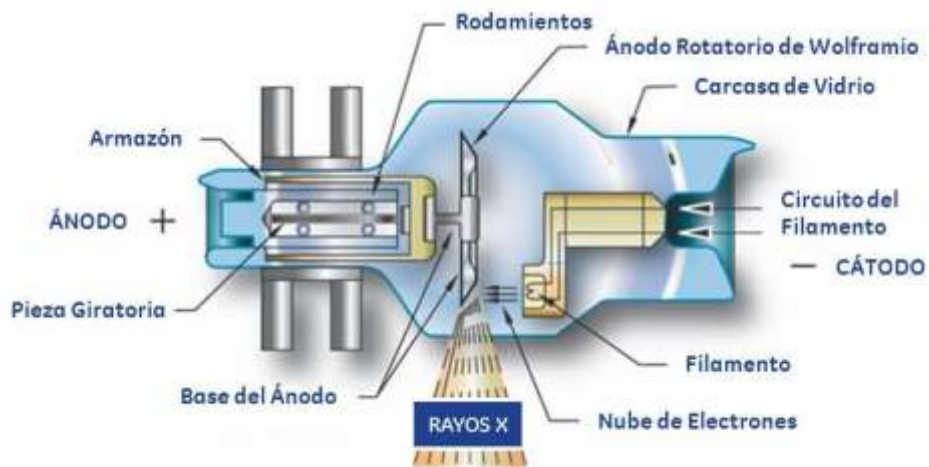
Wilhelm Röntgen



Radiografía del tòrax amb carcinoma bronquial.

Desde entonces, el uso de los rayos X en el campo de la medicina ha jugado un papel cada vez más importante. Además, gracias al avance de otras tecnologías como la electrónica y la ciencia de materiales, ha permitido su aplicación a niveles muy sofisticados.

Los rayos X se producen cuando hacemos incidir un haz de electrones acelerados contra átomos de un material “blanco”. Al chocar, los electrones se frenan y pierden parte de su energía. Parte de esa energía perdida se transforma en calor, y otra parte se emite en forma de radiación electromagnética: los rayos X. Tan solo el 1% de la energía que pierden los electrones se transforma en calor, lo que hace que los tubos de rayos X no sean tan eficaces como se querría.



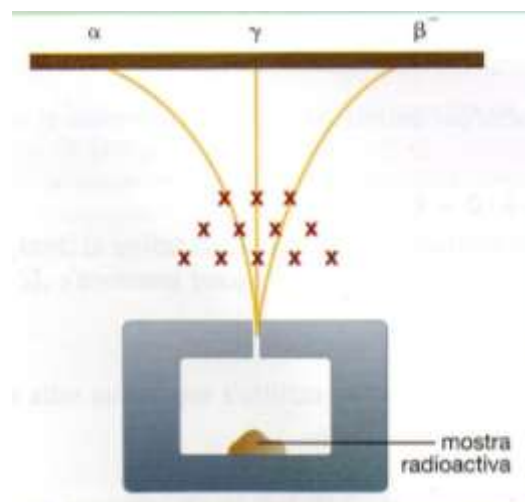
Tubo de rayos X

3.3. Radiación y rayos cósmicos

El año 1896, **Becquerel** descubrió que los cristales de una sal de uranio emitían unas partículas, que en aquel momento eran desconocidas. A este fenómeno se le denominó **radioactividad**. Se observó que estas partículas podían atravesar la materia, dejar señales en las placas fotográficas, ionizar el aire y los gases, transformarlos en conductores eléctricos y provocar la fluorescencia de ciertas sustancias. Más tarde, otros científicos como el **matrimonio Curie**, descubrieron otros elementos radioactivos como el polonio y el radio y detectaron una gran cantidad de calor emitida junto con las emisiones radioactivas.

Por lo tanto, llamamos radiación radiactiva al conjunto de partículas emitidas por una muestra radiactiva.

Para identificar las partículas emitidas en la radiactividad natural, **Rutherford** llevó a cabo un experimento en el que había una muestra radiactiva perfectamente aislada y, de la cual solo puede salir una pequeña cantidad de partículas emitidas por una rendija muy pequeña. Cuando la radiación emergente se hace pasar a través de un campo magnético, que tiene la propiedad de desviar partículas cargadas eléctricamente, podemos diferenciar tres partículas bien diferenciadas:



Experimento de Rutherford

Partículas α : son núcleos de helio-4 completamente ionizados emitidos a velocidades entorno de $1/20 c$. Estos núcleos están formados por dos protones y dos neutrones. Al carecer de electrones, su carga eléctrica es positiva, mientras que su masa es de 4 uma.

Poseen una gran energía cinética, ya que tienen mucha masa y una gran velocidad. Este tipo de radiación puede ser detenida por una hoja de papel.

Partículas β : es un electrón o positrón de alta energía y alta velocidad, emitido por la desintegración radiactiva de un núcleo atómico durante el proceso de desintegración beta. Podemos distinguir entre emisión β^- o emisión de electrones y emisión β^+ o emisión de positrones. Este tipo de radiación es detenida por una hoja de papel de aluminio.

Partículas γ : es un tipo de radiación electromagnética, por lo tanto, se propagan por el vacío a velocidad c , de energía alrededor del megaelectronvoltio (MeV). La emisión gamma suele seguir las emisiones α y β y se debe al hecho de que el núcleo radiactivo pasa de un estado energético excitado a un estado estable, emitiendo la energía en exceso en forma de fotones. Estas partículas son emitidas por núcleos de átomos inestables, es decir, núcleos de átomos radiactivos. Este tipo de radiación es absorbida cuando penetra en un material denso.

Rayos cósmicos:

Los rayos cósmicos son partículas subatómicas que llegan desde el espacio exterior y bombardean constantemente a la Tierra desde todas las direcciones. La mayoría de estas partículas son núcleos de átomos o electrones. En el caso de los núcleos, la mayoría son protones únicos, como pueden ser los núcleos de átomos de hidrógeno, aunque algunos son mucho más pesados, llegando hasta los núcleos de átomos del plomo.

Estas partículas subatómicas viajan casi a la velocidad de la luz, por lo tanto, tienen una energía muy alta. Los rayos cósmicos ultra-energéticos son las partículas más energéticas jamás vistas en la naturaleza, llegando a tener cien millones de veces más energía que las partículas producidas en el acelerador de partículas más poderoso del mundo.



Cascada de rayos cósmicos

4. Práctica introductoria al detector

El objetivo de esta práctica introductoria es poder utilizar por primera vez el detector en distintos modos y el software **Pixet Pro**.

Material:

- Detector TimePix
- Ordenador
- Software Pixet Pro
- Hoja de cálculo
- Muestra radiactiva
- Guantes de plástico
- Cucharilla
- Pinzas

Montaje de la experiencia:

En esta experiencia utilizaremos el detector en dos modos diferentes y, por lo tanto, habrá que hacer dos medidas con parametrizaciones diferentes del programa. Cuando terminemos la primera, completamos la sección adquisición y registro de los datos.

Conectamos el detector a un puerto USB del ordenador, sin abrir la protección. En primer lugar, nos aseguramos de que el programa conecta con el detector, seleccionando el botón Show Chip Numbers de la Toolbar. En el cuadro debe aparecer, en grande, G08-W0253.

1. Determinación de las trayectorias

Una vez estamos seguros que el detector se comunica correctamente con el programa, fijamos la ratio de la imagen en el menú View y seleccionamos el color Jet White a la Toolbar. Es interesante activar el botón grid para una mejor visualización de los píxeles del sensor. Para hacer estas medidas, es necesario configurar el detector con la parametrización que se muestra en la imagen lateral. Abrimos la puerta de protección del detector. Acercamos la muestra radiactiva al sensor y pulsamos el botón Start para iniciar la captura de datos. Como hemos seleccionado el modo integral, los cuadros que

detectamos se van acumulando. A medida que se van obteniendo datos veremos 3 tipos de trayectorias, una para cada tipo de radiación.

Se apreciarán trayectorias grandes y redondeadas, llamadas **Blobs (gotas)** causadas por las partículas alfa. Más comunes son unas trayectorias largas y a menudo curvadas, llamadas **Worms (gusanos)**, producidas por la radiación beta de alta energía. Finalmente, la radiación beta de baja energía y la radiación gamma producen trayectorias pequeñas y cortas, normalmente de uno (o pocos) píxeles. No es posible distinguir qué tipo de radiación han producido estas trayectorias con nuestro detector. Una vez terminado este proceso de obtención de datos, hemos de cerrar el protector.

2. Energía cinética absorbida por el sensor y velocidad de las partículas en los modelos clásicos i relativista

A continuación, trabajamos en modo energía. Una partícula detectada en el chip puede ser absorbida en el sensor y depositar toda su energía cinética (como ocurre en el caso de las partículas alfa y beta de baja energía) o atravesar todo el detector depositando sólo una parte de su energía (caso de las partículas beta de alta energía). En este caso, puede ser interesante seleccionar la opción Auto range, que ajustará el color de la energía detectada de cada píxel mostrado en la imagen. Para ello, abrimos la puerta de protección del detector, acercamos la muestra radiactiva al sensor y pulsamos el botón Start para iniciar la captura de datos. Como hemos seleccionado el modo Frames, cada cuadro detectado sustituye el cuadro anterior. Una vez terminado este proceso de obtención de datos, hemos de cerrar el protector.

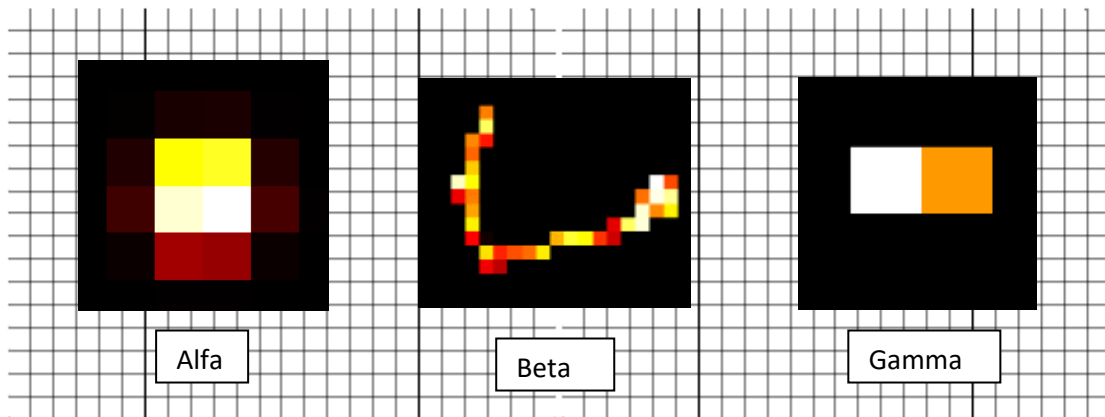
Si observamos el panel Image Info, veremos una serie de valores interesantes, como el valor máximo de energía detectada y el total de energía que se ha depositado en las partículas detectadas en el cuadro que se muestra. Este es el valor de energía cinética que tenía la partícula al entrar en el detector.

Pasando por los diferentes cuadros con el selector de la Toolbar y haciendo zoom sobre diferentes trayectorias de las partículas alfa, beta y gamma, de forma que aparezcan solas en la imagen, anotamos la energía que aparece en el panel Image Info para cada una de las partículas. Este valor está calibrado en keV. Una vez terminado este proceso, hemos de cerrar el protector.

Adquisición y registro de los datos

1. Determinación de trayectorias.

1.1 Dibuja a continuación una de las trayectorias de una partícula alfa, una partícula beta y una partícula gamma y etiqueta cada uno de los tipos.



1.2 Busca en internet la masa en reposo y calcula la energía en reposo que tienen las partículas alfa y beta.

$$m_{\alpha} = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$E_{\alpha} = 5,98 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$m_{\beta} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$E_{\beta} = 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

1.3 A partir de las características que tienen las partículas de cada tipo de radiación, haz hipótesis de cómo estas partículas interactúan con los átomos de silicio y son detectadas por el sensor, dando lugar a los diferentes tipos de trayectorias (aprox. 50 palabras).

Las partículas alfa son las que chocarán y ionizarán los átomos de silicio debido a su carga y energía. En el caso de las partículas Beta no tendrán el mismo efecto y formarán unas estructuras curvadas ya que irán rebotando en las estructuras de silicio. Por último, las gammas son las que interactuarán menos y tan solo rebotarán y en algunos casos dejarán una pequeña marca.

2. Energía cinética absorbida por el sensor y velocidad de las partículas alfa en los modelos clásico y relativista.

Crea una tabla como la siguiente. Anota los resultados en esta tabla. Para hacer los cálculos habrá que hacer cambios de unidades.

EK[keV]	9314	11331	9177	8247	8008
EK[J]	1,49E-12	1,82E-12	1,47E-12	1,32E-12	1,28E-12
v [ms ⁻¹] (relat.)	21160125,79	23329675,45	21004503,59	19915491,89	19625733,089
v [ms ⁻¹] (clas.)	21199730,05	23382790,24	21043238,62	19948498,45	19657317,22
v/c (relat.)	0,0705	0,0778	0,0700	0,0664	0,0654
v/c (clásica)	0,0707	0,0779	0,0701	0,0665	0,0655
Desviación (%)	0,1869	0,2274	0,1842	0,1656	0,1608

2.1 Anota en la hoja de cálculo el valor de las energías cinéticas que has medido para las partículas alfa.

2.2 Calcula el valor de la velocidad de las partículas, tanto con el modelo clásico como con el modelo relativista.

2.3 Valora a continuación la corrección, o no, de los dos modelos para describir la energía de este tipo de partículas.

Los resultados en este tipo de partículas sí que son razonables, ya que da unos resultados con alta energía y no hay resultados incoherentes entre los dos modelos.

3. Energía cinética absorbida por el sensor y velocidad de las partículas beta en los modelos clásico y relativista.

En una nueva página de la hoja de cálculo crea una tabla como la siguiente. Anota los resultados en esta tabla.

EK[keV]	3528	2169	1566	1675	2911
EK[J]	5,651E-13	3,474E-13	2,508E-13	2,683E-13	4,663E-13
v [ms ⁻¹] (relat.)	297586882,81	294490910,44	290770573,41	291680733,33	296632959,39
v [ms ⁻¹] (clas.)	1113913207,78	873407347,78	742135051,51	767528429,59	1011831435,56
v/c (relat.)	0,9919	0,9816	0,9692	0,9722	0,9887
v/c (clásica)	3,713	2,911	2,474	2,558	3,372
Desviació (%)	115,6	99,13	87,39	89,84	109,31

3.1 Anota en la hoja de cálculo el valor de las energías cinéticas que has medido para las partículas beta.

3.2 Calcula el valor de la velocidad de las partículas, tanto con el modelo clásico como con el modelo relativista.

3.3 Valora a continuación la corrección, o no, de los dos modelos para describir la energía de este tipo de partículas.

En este caso los resultados tendrían que ser revisados ya que es incoherente que el modelo clásico vaya a más velocidad que el modelo relativista.

4. Energía cinética absorbida por el sensor y características de las partículas gamma.

En una nueva página de la hoja de cálculo crea una tabla como la siguiente. Anota los resultados en esta tabla.

EK[keV]	80	205	186	75	121
EK[J]	1,281E-14	3,284E-14	2,979E-14	1,201E-14	1,938E-14
f (Hz)	1,935E+19	4,960E+19	4,501E+19	1,814E+19	2,928E+19
λ (m)	1,549E-11	6,047E-12	6,665E-12	1,652E-11	1,024E-11
p (kg · m/s)	4,272E-23	1,094E-22	9,932E-23	4,005E-23	6,461E-23

4.1 Anota en la hoja de cálculo, en una nueva página, el valor de las energías cinéticas que has medido para 5 partículas gamma.

4.2 Calcula el valor de la frecuencia del fotón, de su longitud de onda y de la cantidad de movimiento que ha cedido el fotón a el átomo de silicio.

5. Análisis rayos X mediante diferentes muestras

Durante el pasado mes de mayo tuvimos la oportunidad de ir a realizar una práctica al laboratorio de física a la Universidad de Barcelona (UB). En ésta pudimos usar una fuente de rayos X de molibdeno y poder observar cómo afectaban a distintos materiales.

Objetivo:

Observar la absorción de los rayos X de distintos materiales a nuestra elección.

Material:

- Filtro y fuente de rayos X de Molibdeno
- Detector de partículas TimePix
- Material observado
 - Balines de plomo
 - Cable de cobre
 - Caracol marino
 - Tomate cherry
 - Fruto x
 - Fruto de palmera
 - Micro SD
 - Moneda de 20 céntimos
 - Moneda de 50 céntimos
 - Pata de pollo con 1 fractura
 - Pata de pollo con 2 fracturas
 - Pitosporo congelado
 - Pitosporo seco
 - Pitosporo verde
 - Reloj

Registro de datos:

Hay que remarcar que, para poder ver bien los registros, se tuvieron que sujetar los materiales con celo para que los rayos pudieran impactar en ellos y, seguidamente en el detector, como se verá en las siguientes fotografías.

Balines de plomo:



Balines de Plomo

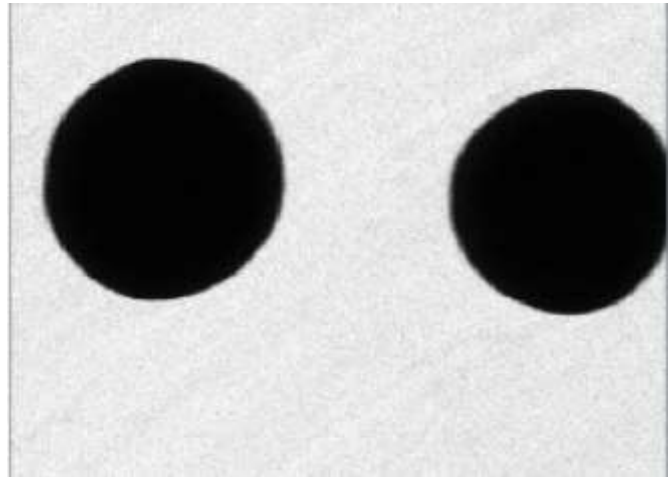
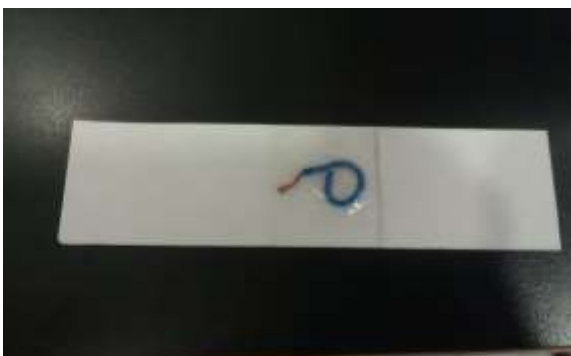


Imagen de los balines de Plomo proporcionada por el detector

En el caso de los balines de plomo podemos apreciar que no dejan pasar ningún rayo y, por lo tanto, observamos las esferas a la perfección.

Cable de cobre:



Cable de cobre



Imagen del cable de cobre proporcionada por el detector

Al ser un cable de cobre recubierto de plástico, gracias a la vista del detector, podemos apreciar a la perfección la diferencia entre el cobre y el plástico que lo envuelve.

Caracol marino:



Caracol marino

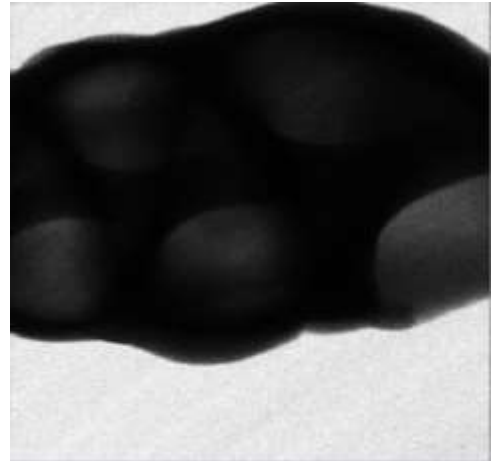
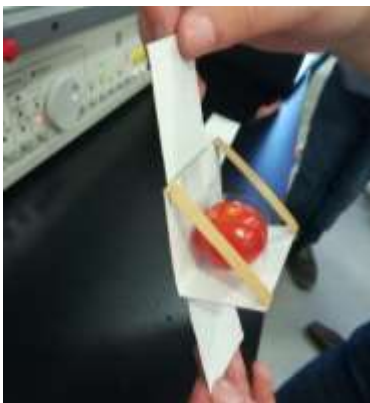


Imagen del caracol marino proporcionada por el detector

Podemos ver diferenciada la cavidad interior y la exterior del caracol.

Tomate Cherry:



Cherry

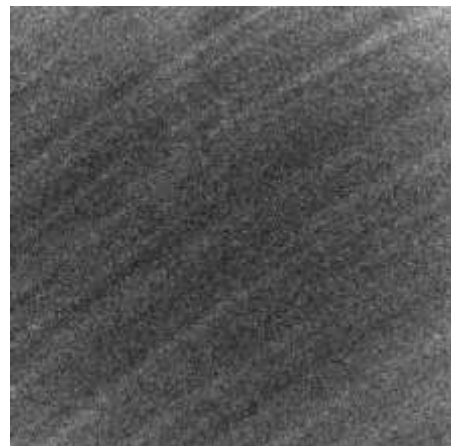


Imagen del tomate cherry proporcionada por el detector

En este caso, tuvimos que diseñar un soporte especial para poder obtener las imágenes, aunque como se puede apreciar no podemos diferenciar ninguna estructura del Cherry.

Fruto x:



Fruto x

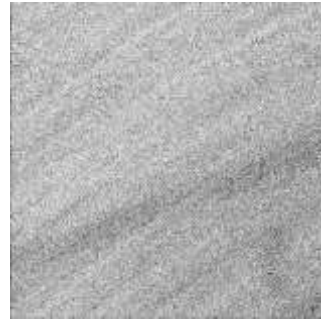


Imagen del fruto x proporcionada por el detector

En este caso tampoco pudimos ver ninguna estructura del fruto.

Fruto de palmera:



Fruto de palmera maduro



Imagen del fruto de palmera maduro proporcionada por el detector



Fruto de palmera poco maduro

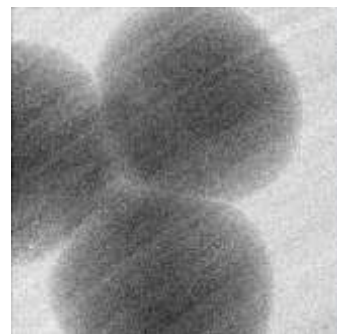


Imagen del fruto de palmera poco maduro proporcionada por el detector

En el caso del fruto de palmera maduro podemos diferenciar claramente la estructura interna de la externa, mientras que en el fruto poco maduro podemos ver su división en tres, pero no se puede apreciar tan claramente la diferencia entre la estructura externa e interna.

Micro SD:



Micro SD

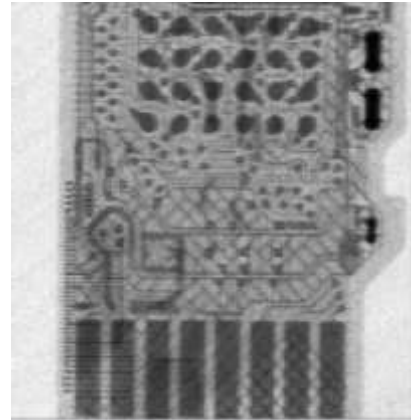


Imagen de la tarjeta SD proporcionada por el detector

En el caso de la micro SD podemos ver, a la perfección, todos los circuitos internos.

Monedas:



Moneda de 20 céntimos

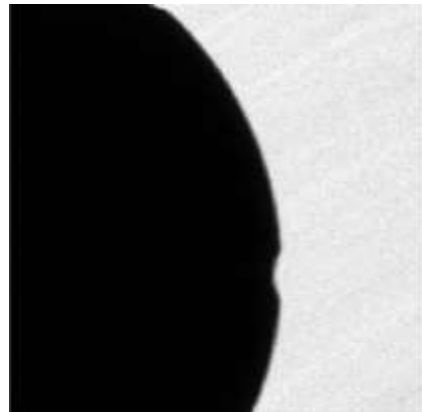


Imagen de la moneda de 20 céntimos proporcionada por el detector



Moneda de 50 céntimos

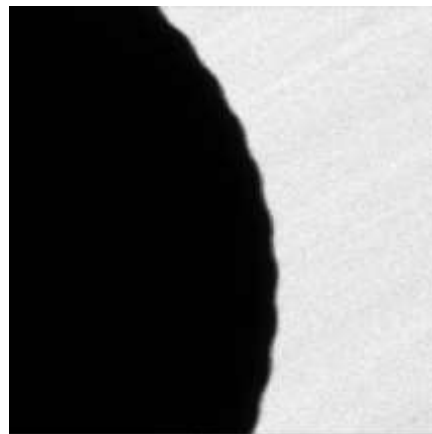


Imagen de la moneda de 50 céntimos proporcionada por el detector

En el caso de las monedas podemos ver a la perfección las ondulaciones que tienen sus respectivas circunferencias. Del resto de la moneda no podemos observar nada debido a que el material del cual está formado no deja pasar los rayos X.

Pata de pollo:



Pata de pollo con una fractura

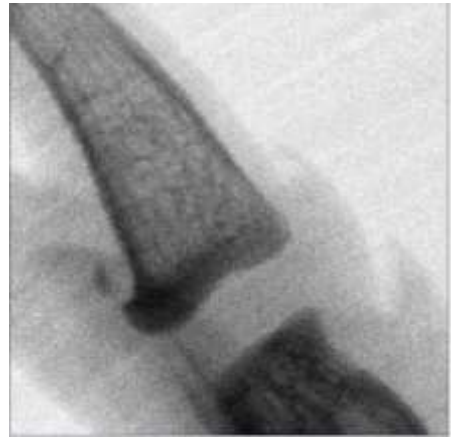


Imagen de la pata de pollo con una fractura proporcionada por el detector



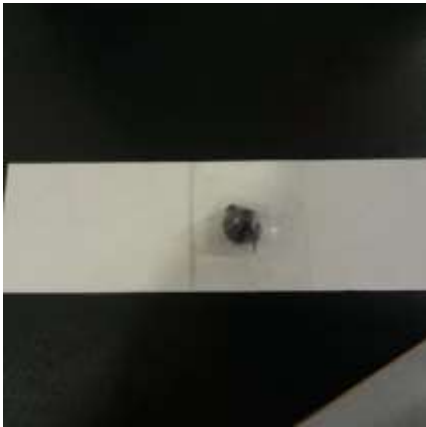
Pata de pollo con una segunda fractura



Imagen de la pata de pollo con una segunda fractura proporcionada por el detector

En el caso de la pata de pollo podemos ver a la perfección, en las dos muestras, la fractura y los huesos diferenciados de los músculos.

Pitosporo:



Pitosporo congelado

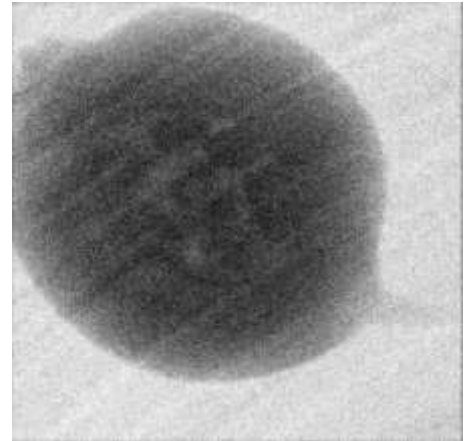


Imagen del pitosporo congelado proporcionada por el detector



Pitosporo normal

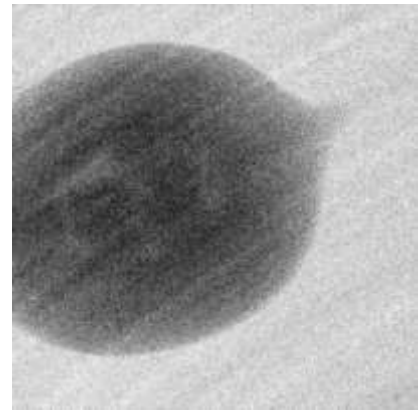


Imagen del pitosporo normal proporcionada por el detector



Pitosporo seco

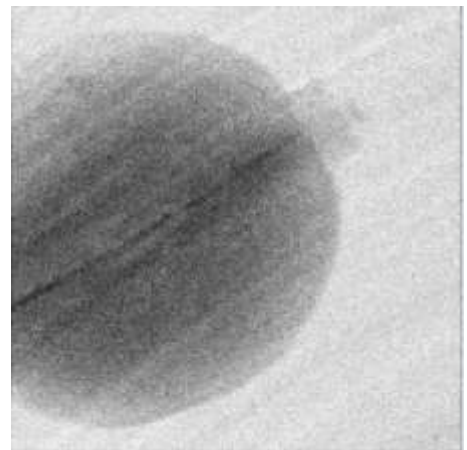


Imagen del pitosporo seco proporcionada por el detector

En el caso del pitósporo congelado no se llega a ver muy bien, aunque se aprecia la estructura interna pero muy difuminada. En el pitósporo normal sucede lo mismo que en el congelado, y, por último, en el seco podemos ver la grieta bien definida.

Reloj:



Reloj

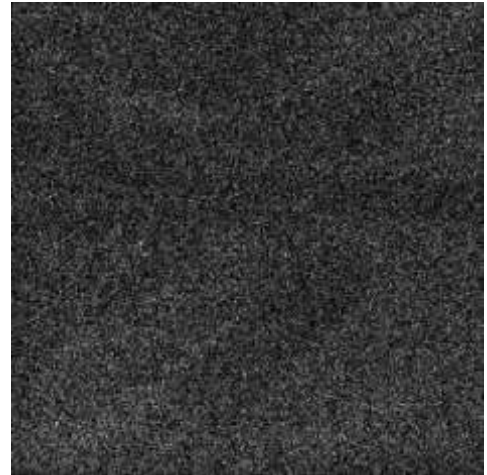


Imagen del reloj proporcionada por el detector

Con el reloj, igual que con el tomate cherry, no pudimos observar ninguna de sus estructuras con el detector.

En conclusión, pudimos observar estructuras internas muy complejas, como el caso de la micro SD, mientras que a la vez también pudimos confirmar con el caso de los balines de plomo que este material absorbe todos los rayos X y tan solo observamos las esferas.

Pudimos observar que no hay una gran dependencia (según el caso que nosotros estudiamos) a la hora de cómo afectan los rayos X a un mismo material congelado, seco y en su estado natural.

También pudimos apreciar, con la pata de pollo, una fractura que hicimos de forma intencionada de una manera muy clara.

Por último, lo que respecta al resto de materiales, observamos ciertas estructuras internas con bastante claridad y pudimos diferenciar de una manera muy clara como en el caso del cable como afectaban los rayos X a distintos materiales a la vez.

6. Estudio radiación de fondo

La práctica principal del TR es un proyecto en el cual estudiamos la radiación de fondo para ver si el espacio es o no isótropo.

Para ello, mi compañera de trabajo Esther Salvador, se encargará de programar una placa para poder tomar medidas con el detector TimePix de cero a noventa grados.

En mi caso, me encargaré de analizar los datos del proyecto TimPix, que ofrece datos de la **Estación Espacial Internacional (ISS)** y, de esta forma, realizar nuestro propio análisis de la radiación que nos llega del espacio. Esto lo podemos llevar a cabo gracias a que nuestra escuela, nos puede ofrecer un libre acceso a los datos del **IRIS Data Server**, incluyendo todos sus proyectos además del proyecto TimPix.

El **proyecto TimPix** consiste en un estudio que llevo a cabo **Tim Peake**, astronauta británico que en diciembre de 2015 llegó a la Estación Espacial Internacional. Se convirtió en el primer astronauta británico de la **Agencia Espacial Europea (ESA)** en residir en la ISS. Una vez allí, además de participar en muchas otras actividades científicas y de ingeniería, participará en investigaciones para comprender cómo reacciona el cuerpo en el espacio durante largos períodos de tiempo. En colaboración con el profesor **Larry Pinsky**, de la Universidad de Houston y con la NASA, el Instituto de Investigación en las Escuelas fue capaz de liberar datos de los detectores de Timepix a bordo del ISS y dar la oportunidad a los estudiantes y profesores de participar en esta investigación, como es nuestro caso.

En este proyecto existen datos desde 2015 hasta mediados de 2017. Entre los tres años solo se pusieron en marcha los detectores 22 meses, ya que en 2015 solo se recogieron datos en octubre y diciembre y en 2017 solo se recogieron datos de enero a agosto. Por lo tanto, utilizaremos la información del año 2016, ya que es el único que tiene datos recogidos de los 12 meses.

Los parámetros que nos ofrecen en el proyecto TimPix son la latitud, que proporciona la localización de un lugar, en dirección Norte o Sur desde el ecuador y se expresa en medidas angulares que varían desde los 0° del Ecuador hasta los 90°N (+90°) del polo Norte o los 90°S (-90°) del polo Sur.

La longitud, que proporciona la localización de un lugar, en dirección Este u Oeste desde el meridiano de referencia 0°, o meridiano de Greenwich,



Tim Peake

expresándose en medidas angulares comprendidas desde los 0° hasta 180°E (+180°) y 180°W (-180°).

La altitud y el Timestamp, que es un formato de tiempo **UNIX**.

El tiempo en el cual se inició la medida y la duración de esta, la energía de los frames que viene dada en KeV y, por último, el número de píxeles que ha recibido durante una medida y la ocupación del detector, que es el número de los píxeles que han sido impactados dividido por el número total de píxeles.

6.1. Análisis de los datos obtenidos

Nuestro análisis será realizado en tres lugares situados en alturas diferentes: Begues, Gavà y Montserrat.

En Begues y en Gavà el detector recogerá los datos de los 0 a los 90 grados divididos en 7 intervalos de una hora. Por lo tanto, recogerá los datos de 15 en 15 grados incluyendo el 0 y el 90 y parará tras este último. Esto nos servirá para estudiar, si hay una dependencia en la recogida de datos según el ángulo en el cual esté situado el detector.

Junto a estas medidas, en Montserrat solo recogeremos los datos situado en 0 grados y, aprovechando las medidas ya recogidas en los 0 grados en Begues y en Gavà, podremos estudiar si hay una dependencia en la recogida de datos, según a la altura respecto al mar a la cual está situado el detector.

Una vez realizado este análisis, podremos analizar los datos que recogió la Estación Espacial Internacional durante la misma época del año, pero en distintos años. Para ello, tendremos en cuenta la latitud y la longitud a la cual estamos situados nosotros aproximadamente y comprobar si los datos son similares o muy diferentes aquí y en el espacio. En nuestro caso, la referencia serán los datos de latitud y longitud de Barcelona.

Los datos recogidos en los tres lugares son los siguientes:

Gavà (9 metros de altura respecto el nivel del mar):

Grados	Energía Media (KeV)	Píxeles	Media de ocupación (%)
0	119204	869	1.325
15	142827	1002	1.528
30	143156	873	1.332
45	154446	904	1.379
60	142830	916	1.397
75	131095	955	1.457
90	130926	826	1.260

Begues (399 metros de altura respecto el nivel del mar):

Grados	Energía Media (KeV)	Píxeles	Media de ocupación (%)
0	125278	1106	1.687
15	113115	1107	1.689
30	107533	1087	1.658
45	107529	1018	1.553
60	107483	1039	1.585
75	107394	983	1.499
90	107542	1152	1.757

Montserrat (1236 metros de altura respecto el nivel del mar):

Grados	Energía Media (KeV)	Píxeles	Media de ocupación (%)
0	118710	601	0.9171

Para comprobar si hay una dependencia de los datos obtenidos, debido a la altura donde estos se recogen, hay que hacer un análisis más específico de los datos en alturas diferentes. Para ello, no es necesario analizar de una forma más específica todos los grados de las diferentes medidas, sino que basta con coger las medidas que compartan el mismo grado. En nuestro caso, cogimos el momento en el que el detector estaba situado a 0 grados, ya que era la única medida tomada en Montserrat.

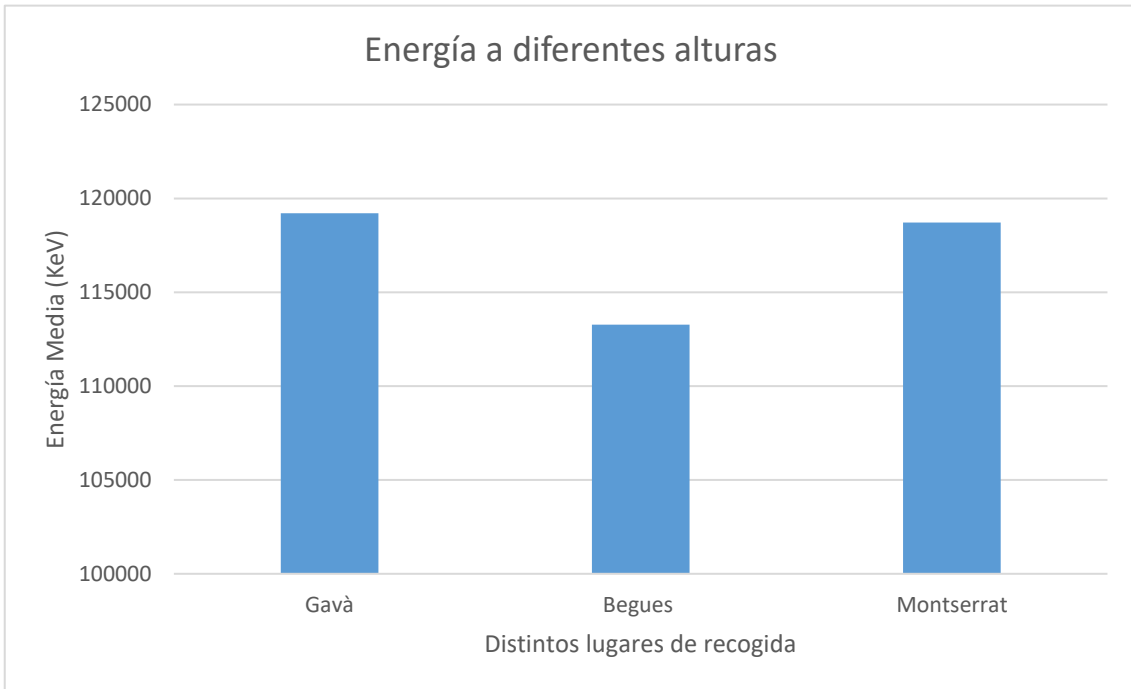
Además de los datos analizados anteriormente, calculamos su desviación estándar y su error relativo, para comprobar si los resultados eran coherentes y muy dispares entre los tres lugares.

Los resultados son los siguientes:

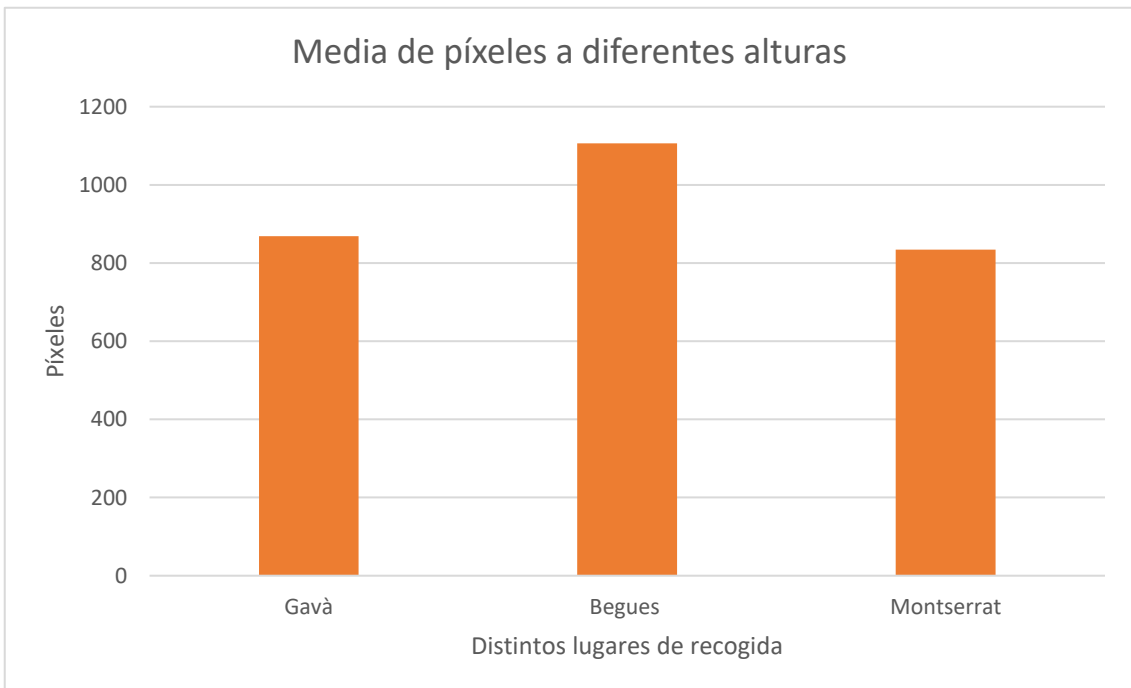
A 0 grados:

A 0 grados	Gavà	Begues	Montserrat	Desv. Est.
Energía media (KeV)	119204	113276	118710	2685.6
Er. Absoluto	0.02252	0.02371	0.02262	
Píxeles	869	1106	834	147.97
Er. Absoluto	0.1702	0.1337	0.1774	
Ocupación (%)	1.325	1.687	0.9171	0.3855
Er. Absoluto	0.2907	0.2284	0.4204	

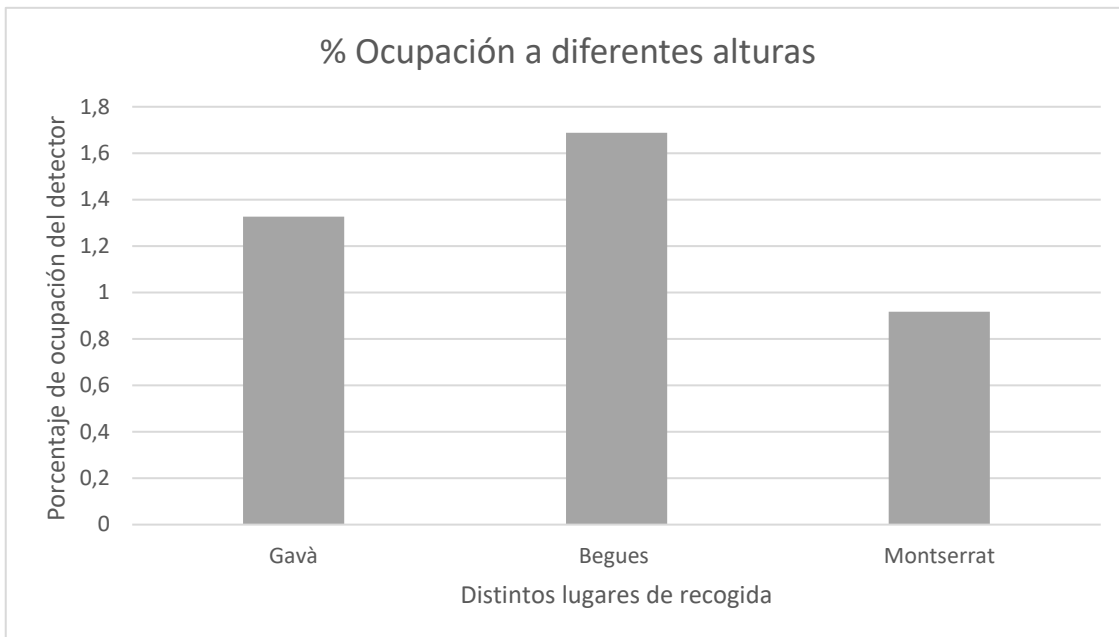
En la tabla podemos ver que no hay una gran dependencia de la altura a la hora de recoger los datos, ya que son muy similares en las tres zonas.



Energía media recogida a diferentes alturas



Media de píxeles recogida a diferentes alturas



Media del porcentaje de ocupación ocupado en el detector a diferentes alturas

En los gráficos se puede observar, de una manera más visual, lo mencionado anteriormente y, podemos concluir, que la altura no afecta a la recogida de datos con el detector.

0-90 grados:

Para analizar la variación en la recogida de datos según el ángulo de inclinación, solo hace falta revisar los datos recogidos en Gavà y en Begues, ya que son las dos zonas en las que el detector hizo este recorrido.

El detector recogió datos 7 veces de los 0 a los 90 grados, parándose cada 15 grados. Por lo tanto, el análisis se realizará teniendo en cuenta estas 7 pausas en las dos zonas.

A 0 grados	Gavà	Begues	Desv. Est.
Energía media (KeV)	119204	113276	4191.7
Er. Absoluto	0.03513	0.03700	

Píxeles	869	1106	167.58
Er. Absoluto	0.1928	0.1515	
Ocupación (%)	1.325	1.687	0.2557
Er. Absoluto	0.1928	0.1515	

A 15 grados	Gavà	Begues	Desv. Est.
Energía media (KeV)	142827	113115	21009.5
Er. Absoluto	0.1471	0.1857	
Píxeles	1002	1107	74.25
Er. Absoluto	0.07409	0.07409	
Ocupación (%)	1.528	1.689	0.1132
Er. Absoluto	0.07409	0.06706975	

A 30 grados	Gavà	Begues	Desv. Est.
Energía media (KeV)	143156	107533	25189.3
Er. Absoluto	0.1759	0.2342	
Píxeles	873	1087	151.3
Er. Absoluto	0.1733	0.1392	
Ocupación (%)	1.332	1.658	0.2309
Er. Absoluto	0.1733	0.1392	

A 45 grados	Gavà	Begues	Desv. Est.
Energía media (KeV)	154446	107529	33175.3

Er. Absoluto	0.2148	0.3085	
Píxeles	904	1018	80.61
Er. Absoluto	0.08917	0.07918	
Ocupación (%)	1.379	1.553	0.1230
Er. Absoluto	0.08917	0.07918	

A 60 grados	Gavà	Begues	Desv. Est.
Energía media (KeV)	142830	107483	24994.1
Er. Absoluto	0.1749	0.2325	
Píxeles	916	1039	86.97
Er. Absoluto	0.09494	0.08370	
Ocupación (%)	1.3977	1.585	0.1327
Er. Absoluto	0.09494	0.08370	

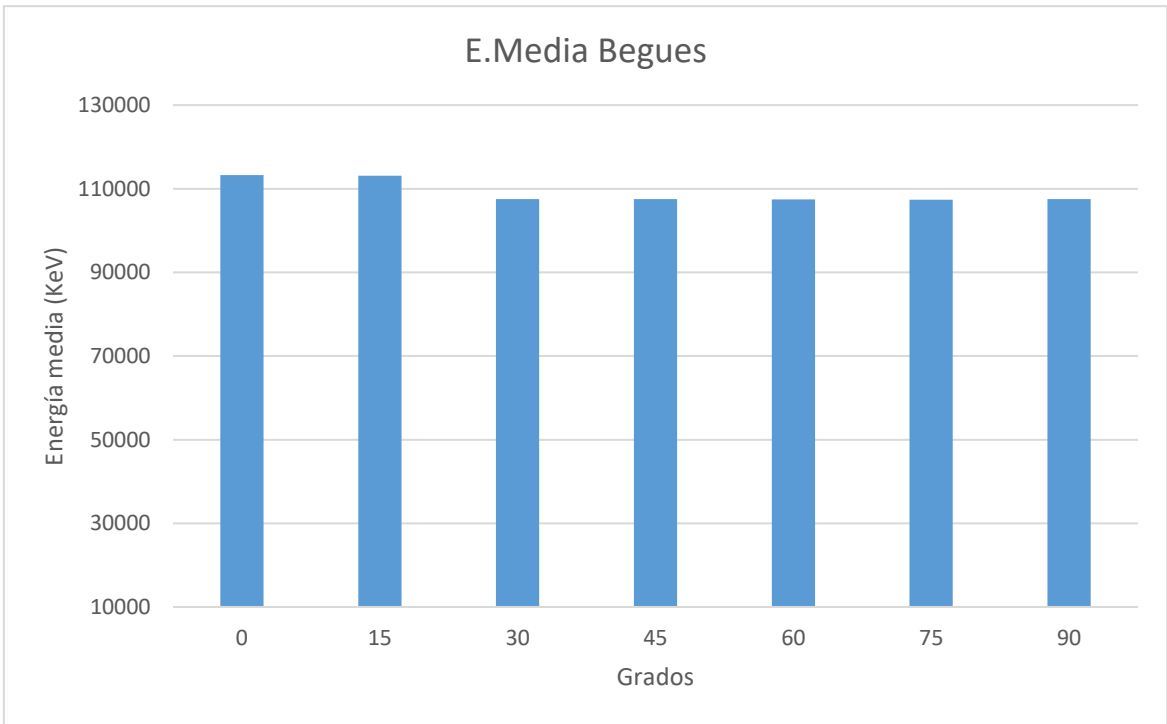
A 75 grados	Gavà	Begues	Desv. Est.
Energía media (KeV)	131095	107394	16759.1
Er. Absoluto	0.1278	0.1560	
Píxeles	955	983	19.79
Er. Absoluto	0.02073	0.02014	
Ocupación (%)	1.457	1.499	0.03021
Er. Absoluto	0.02073	0.02014	

A 90 grados	Gavà	Begues	Desv. Est.
Energía media (KeV)	130926	107542	16534.9
Er. Absoluto	0.1262	0.1537	
Píxeles	826	1152	230.5
Er. Absoluto	0.2790	0.2001	
Ocupación (%)	1.260	1.757	0.3517
Er. Absoluto	0.2791	0.2001	

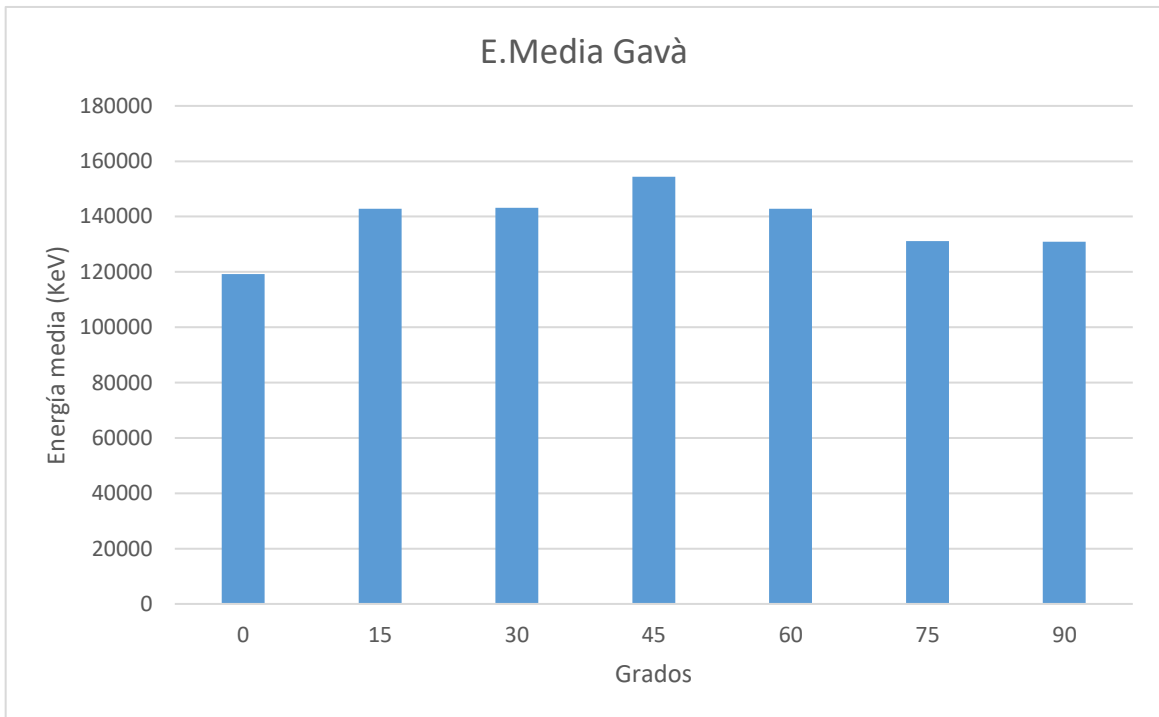
Tras realizar el análisis numérico extraemos la siguiente conclusión: los grados tampoco afectan a la hora de recoger datos con el detector, pero sí que afectan más que la altura, por lo menos hasta donde alcanza nuestro análisis.

Tanto en Gavà como en Begues, los grados afectan muy poco en la variación de los datos. Hay diferencias, pero no lo suficientemente amplias como para decir que las variaciones de los datos dependan de los grados a los que esté girado el detector.

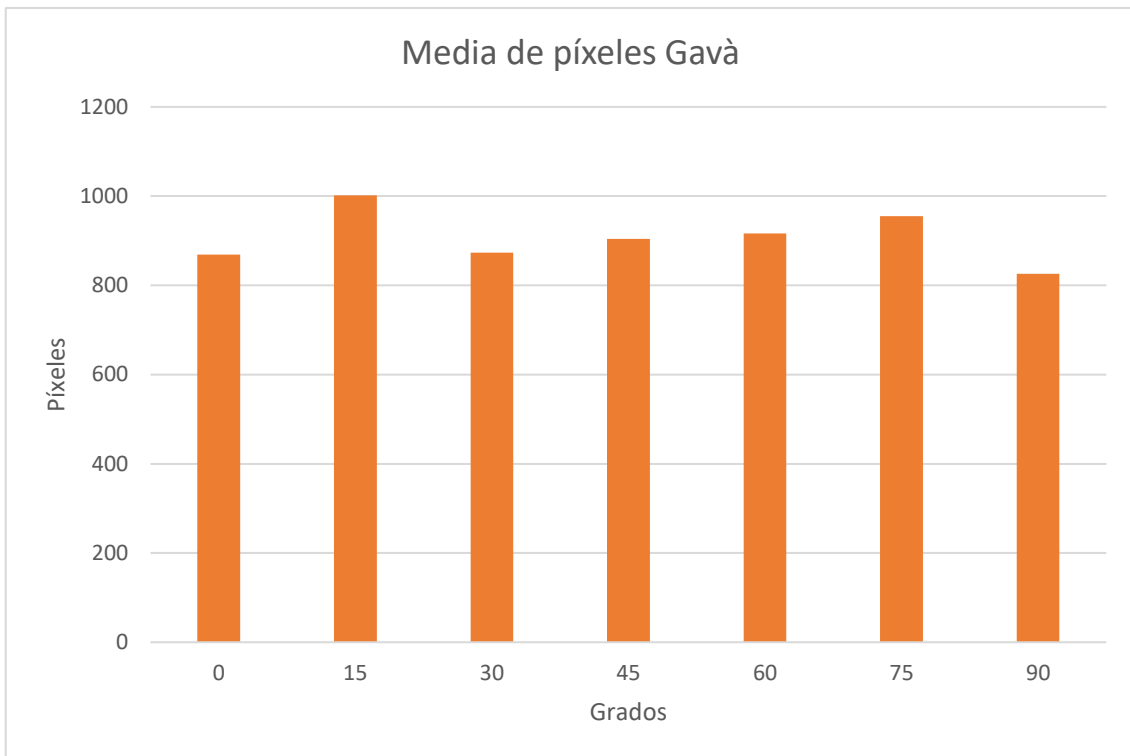
Gráficamente se puede apreciar más fácilmente, que las diferencias entre los diferentes grados son muy leves tanto en Gavà como en Begues:



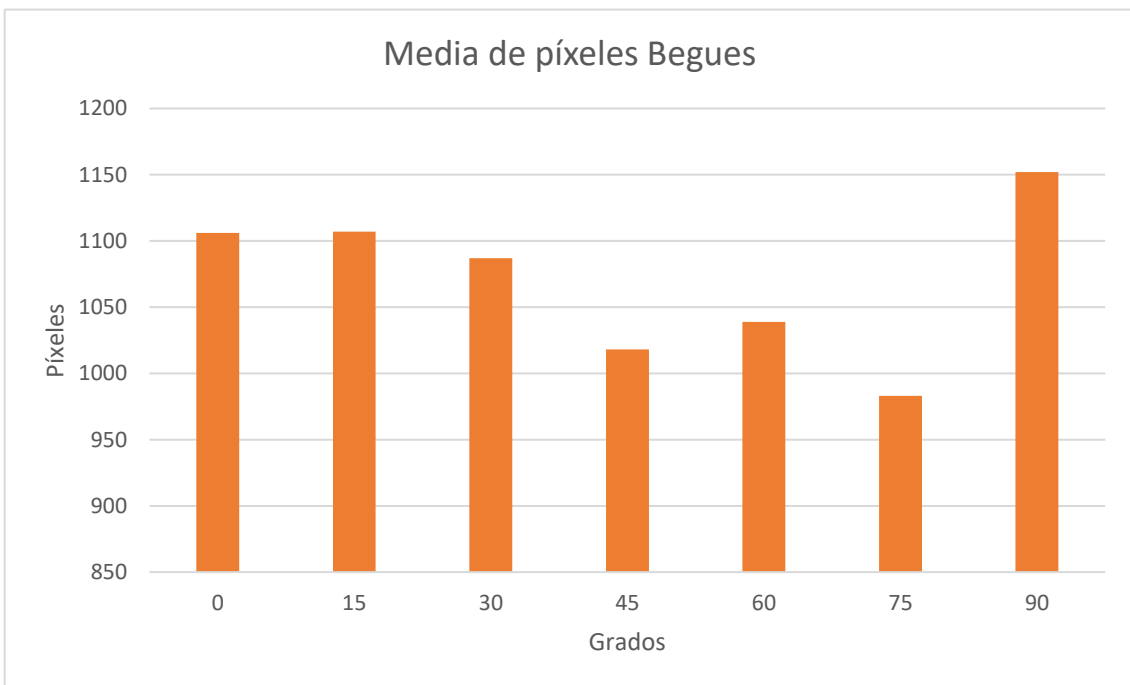
Energía media de los datos recogidos en Begues



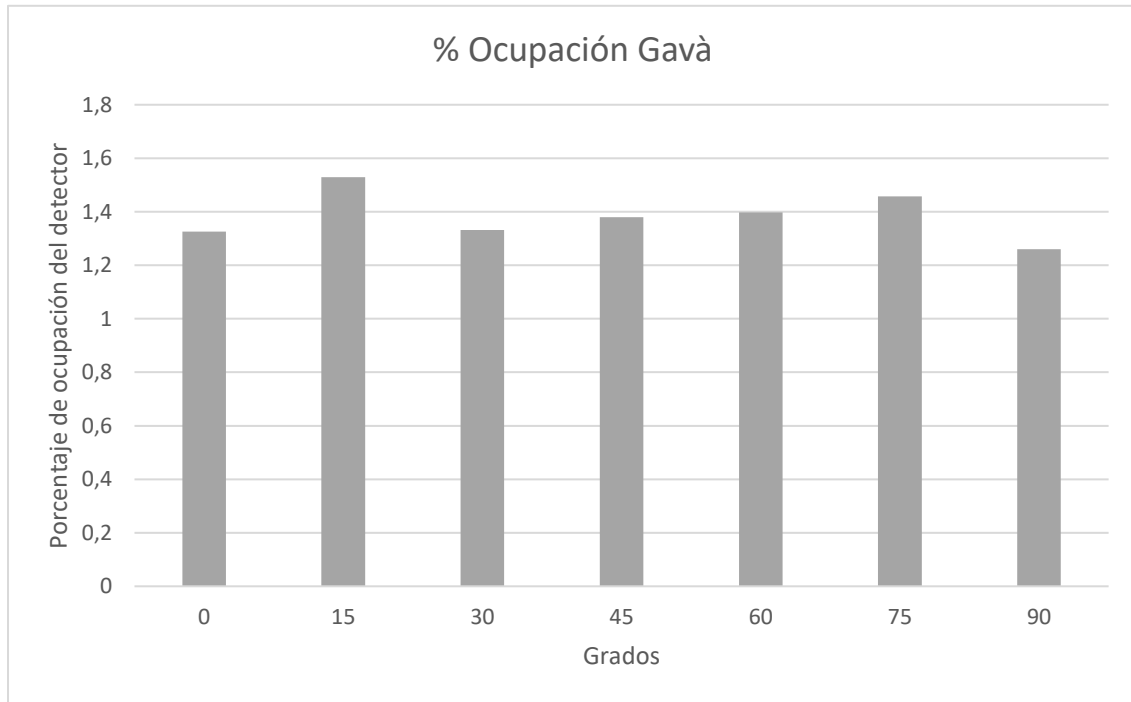
Energía media de los datos recogidos en Gavà



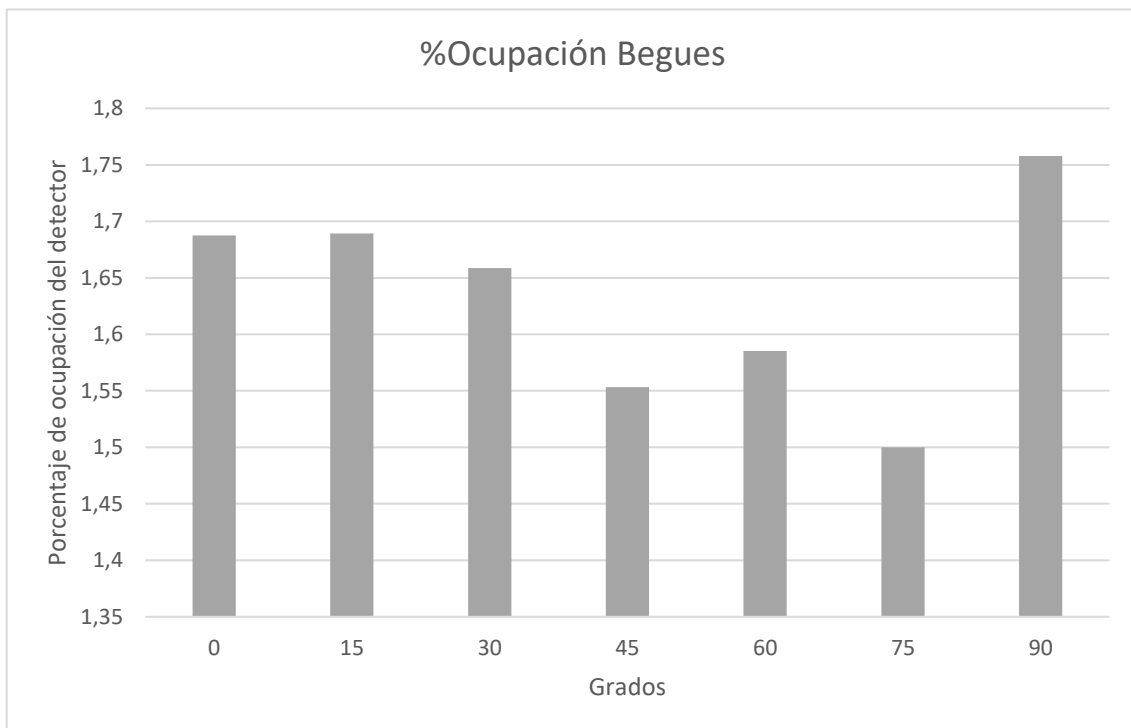
Media de píxeles impactados en la recogida de datos realizada en Gavà



Media de píxeles impactados en la recogida de datos realizada en Begues



Porcentaje de ocupación del detector en la recogida de datos realizada en Gavà



Porcentaje de ocupación del detector en la recogida de datos realizada en Gavà

El único caso en el que se puede apreciar una diferencia significativa, es en la energía media de los datos recogidos en Begues. La energía media a los 0 y 15 grados es significativa y superior al resto. Pero al ser solo en este caso, no podemos afirmar que los datos dependan de esta diferencia de grados, ya que, seguramente ello sea debido a factores externos, como por ejemplo a una mayor presencia de luz mientras se recogían esas medidas, entre otros.

Segundo análisis:

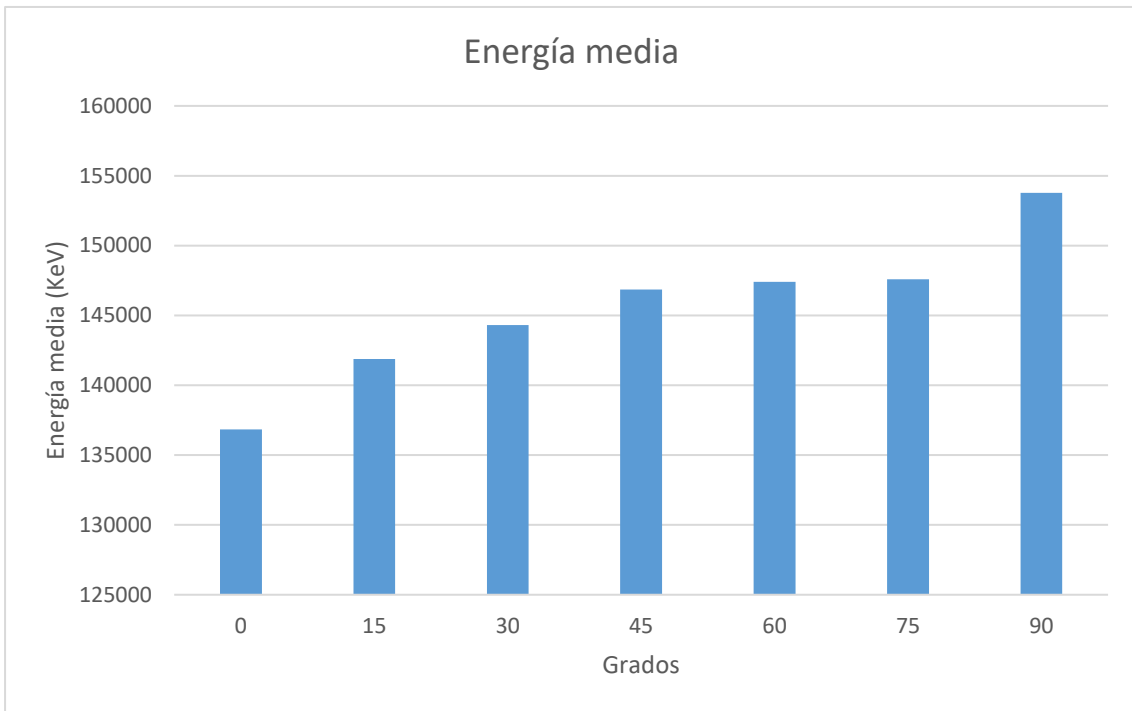
Tras analizar todos los datos anteriores, pudimos ver que no se apreciaban muones, lo cual era muy extraño. Al hacer varias pruebas para intentar localizar el problema, acabamos dando con él. El problema era un pequeño desajuste en la configuración del software PixetPro.

Por tanto, decidimos realizar otra recogida de datos, de los 0 a los 90 grados, en Gavà. De esta manera podríamos estudiar otra vez la dependencia en la recogida de datos según las 7 posiciones a distintos grados y estudiar los muones que en este caso sí que fueron apareciendo.

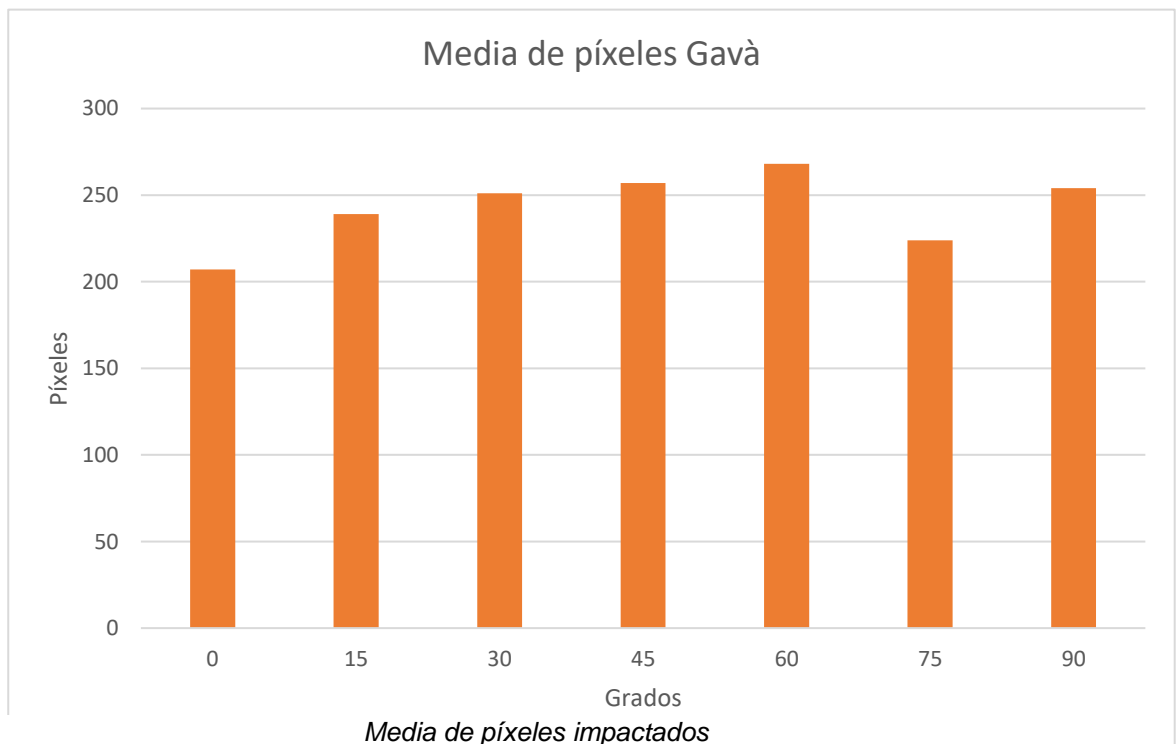
Hay que tener en cuenta que estas medidas fueron tomadas de una manera diferente. Se recogían los datos cada 120 segundos, de tal forma que cada hora había 30 datos disponibles que facilitaban el trabajo a la hora de contar los muones que impactaban en el detector.

Primero observamos la diferencia de energía, píxeles y ocupación del detector a los diferentes grados:

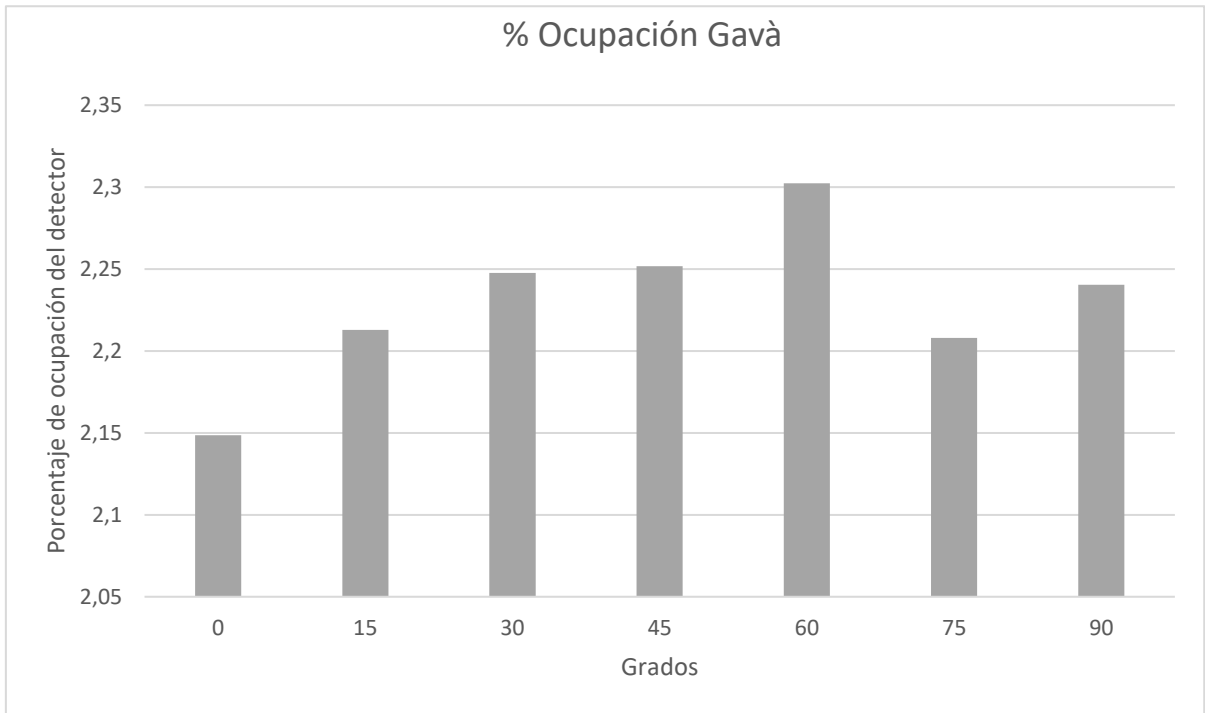
Grados	Energía Media (KeV)	Píxeles	Media de ocupación (%)
0	136846.1	207	2.148
15	141885.2	239	2.212
30	144308.4	251	2.247
45	146852.2	257	2.251
60	147395.8	268	2.302
75	147583.2	224	2.207
90	153771.7	254	2.240



Energía media de los datos recogidos en Gavà



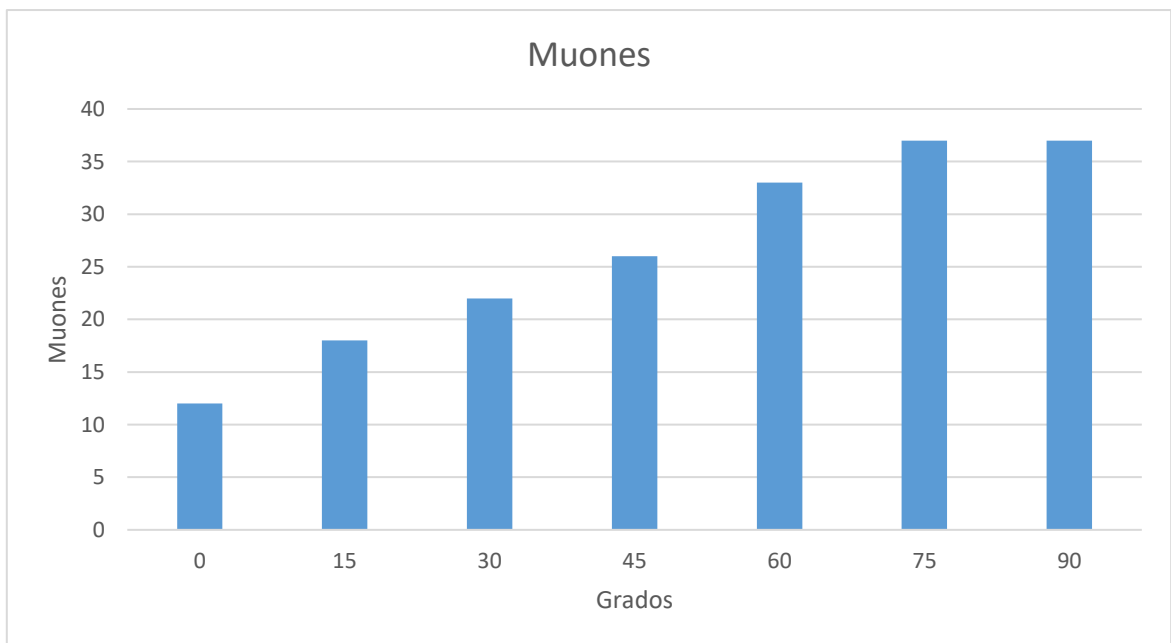
Media de píxeles impactados



Porcentaje de ocupación del detector

Tras analizar los datos podemos observar que la energía media aumenta con el aumento del ángulo de inclinación. Por otro lado, podemos observar que la media de píxeles y de ocupación no sigue ningún patrón.

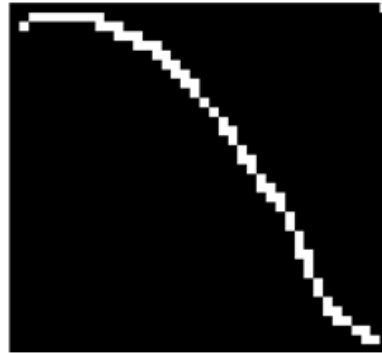
Se puede ver claramente la dependencia del ángulo de inclinación en la aparición de muones:



Aparición de muones en los distintos grados

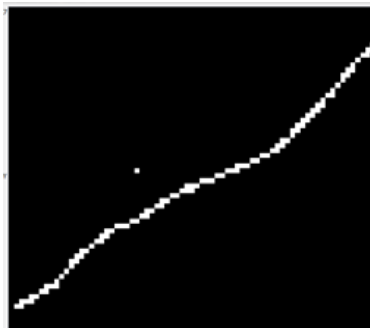
Junto a estos datos también se puede observar el muon con más energía en cada ángulo.

- A los 0 grados: han aparecido 12 muones
El muon con más energía presenta una energía de 1.420,32 keV y ocupa 63 píxeles.



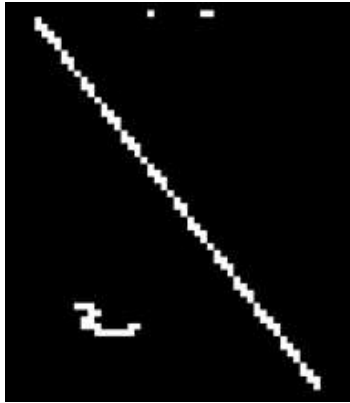
Muon con más energía a los 0 grados

- A los 15 grados: han aparecido 18 muones
El muon con más energía presenta una energía de 1.795,47 keV y ocupa 102 píxeles.



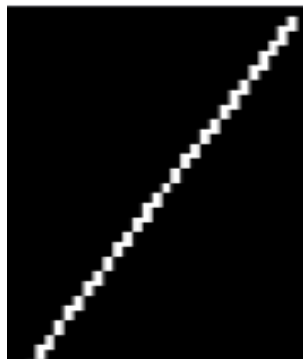
Muon con más energía a los 15 grados

- A los 30 grados: han aparecido 22 muones
El muon con más energía presenta una energía de 1.554 keV y ocupa 81 píxeles.



*Muon con más energía a los
30 grados*

- A los 45 grados: han aparecido 26 muones
El muon con más energía presenta una energía de 1.653,91 keV y ocupa 87 píxeles.



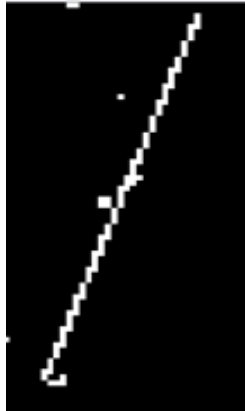
*Muon con más energía a
los 45 grados*

- A los 60 grados: han aparecido 33 muones
El muon con más energía presenta una energía de 2.171,6 keV y ocupa 120 píxeles.



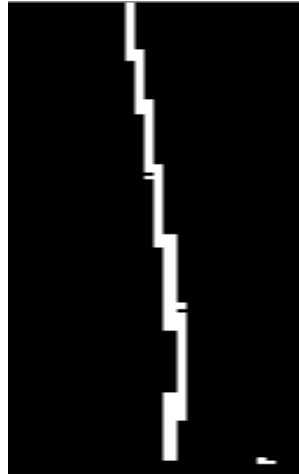
Muon con más energía a los 60 grados

- A los 75 grados: han aparecido 37 muones
El muon con más energía presenta una energía de 2.019,07 keV y ocupa 94 píxeles.



Muon con más energía a los 75 grados

- A los 90 grados: han aparecido 37 muones
El muon con más energía presenta una energía de 3.380,69 keV y ocupa 159 píxeles.

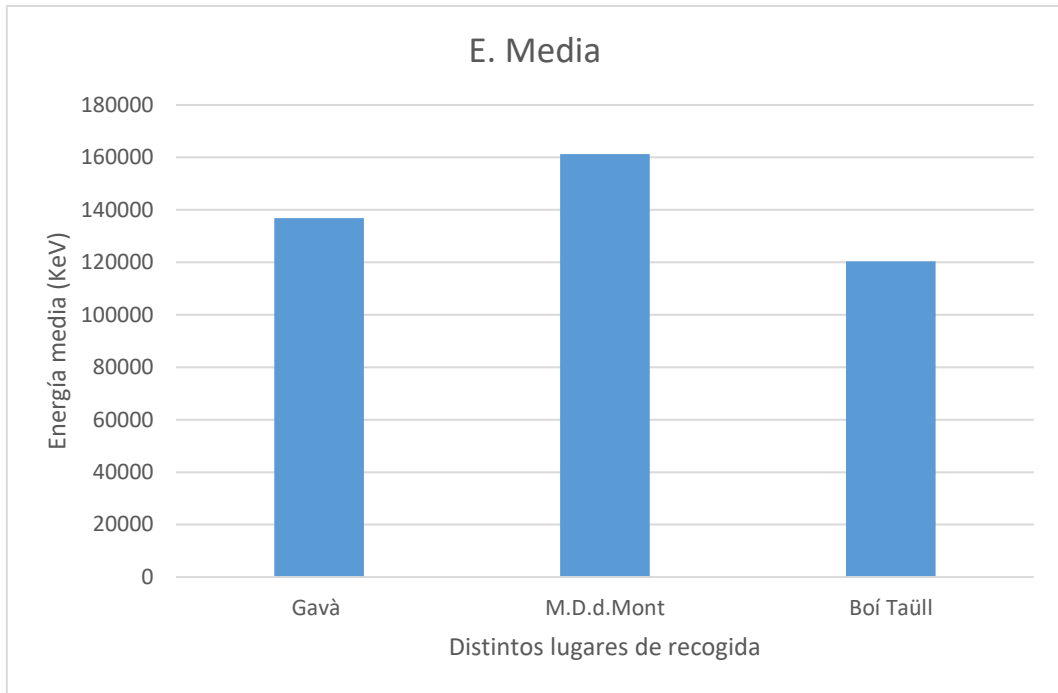


*Muon con más energía
a los 90 grados*

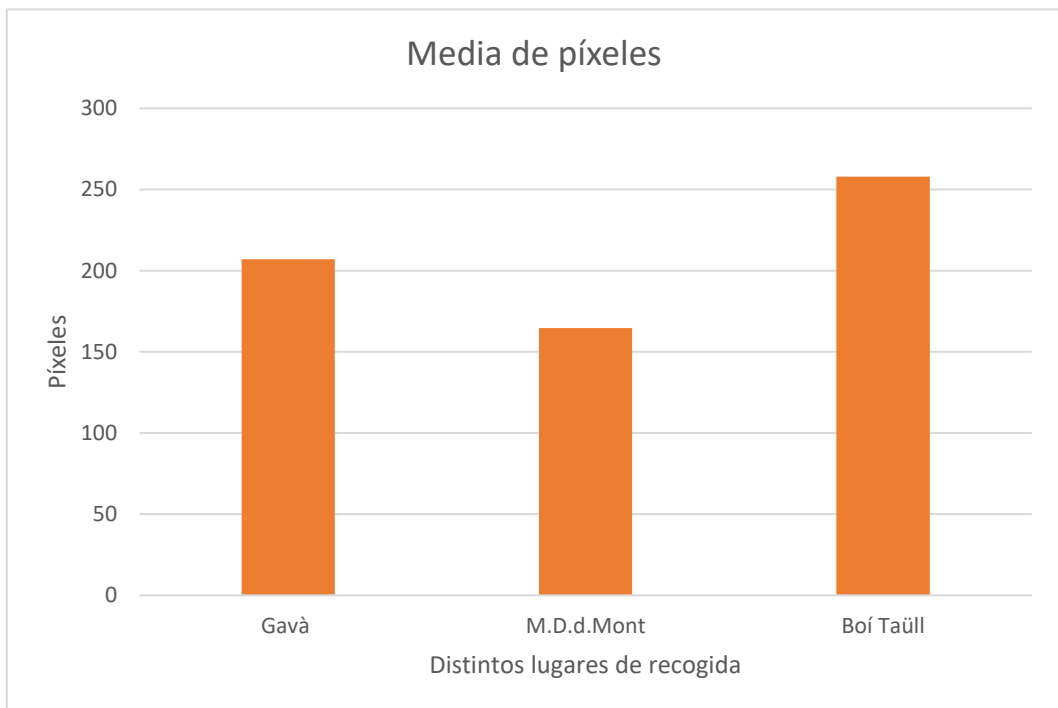
Por último, observamos la diferencia de energía, píxeles y ocupación del detector a diferentes alturas, como en el primer análisis. En este caso los datos fueron recogidos en Gavà (9 metros de altura respecto el nivel del mar), Boí Taüll (1800 metros de altura respecto el nivel del mar) y el santuario de la Mare de Déu del Mont (1200 metros de altura respecto el nivel del mar).

Los datos resultantes son los siguientes:

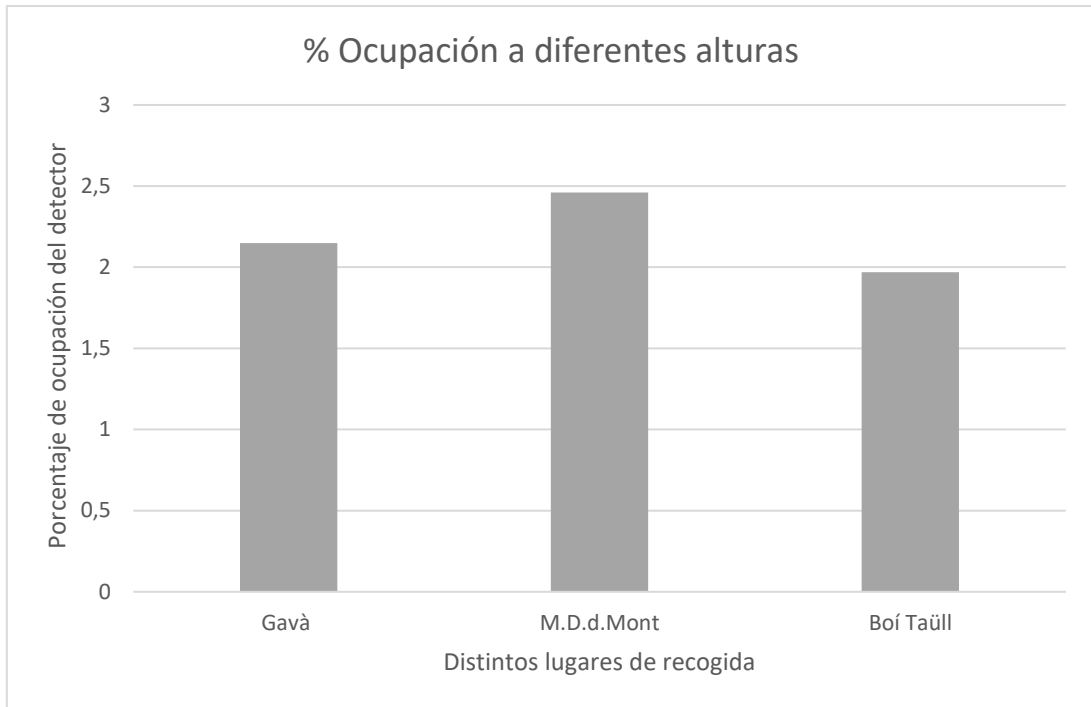
A 0 grados	Gavà	Mare de Déu del Mont	Boí Taüll	Desv. Est.
Energía media (KeV)	136846.1	161309.6	120433.5	16795.1
Er. Absoluto	0.1227	0.1041	0.1394	
Píxeles	207	164.6	258	46.76
Er. Absoluto	0.2259	0.2841	0.1812	
Ocupación (%)	2.14	2.46	1.97	0.2479
Er. Absoluto	0.1154	0.1008	0.1258	
Muones	12	22	30	7.363
Er. Absoluto	0.6136	0.3347	0.2454	



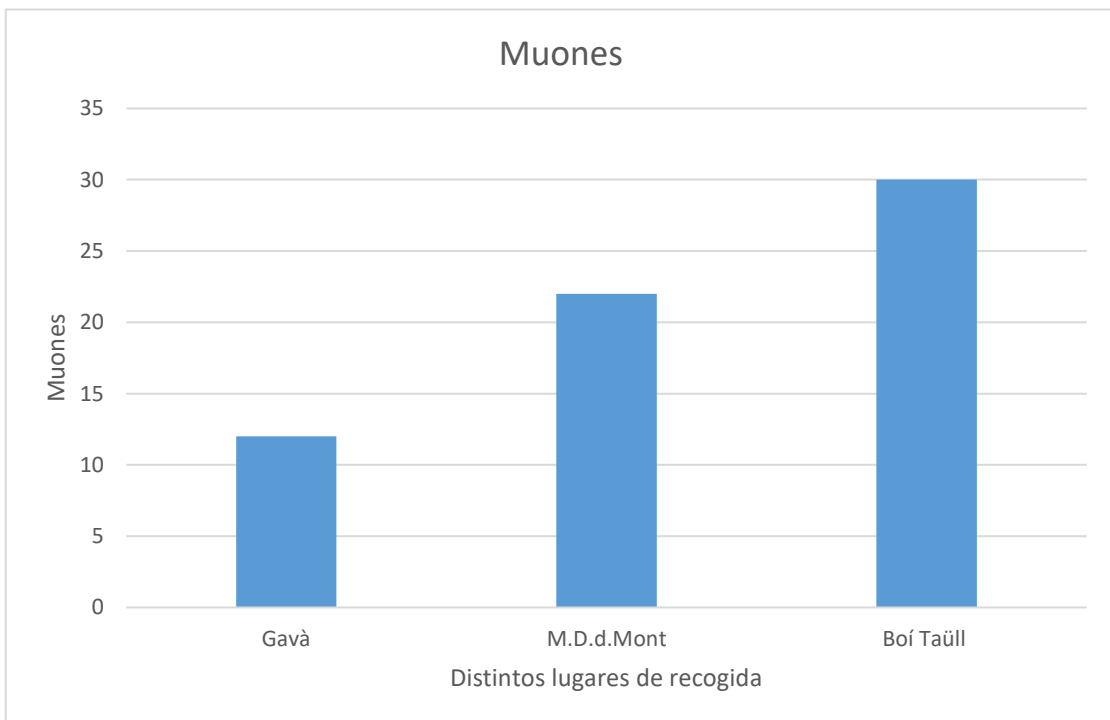
Energía media a diferentes alturas



Media de píxeles a diferentes alturas



Porcentaje de ocupación del detector a diferentes alturas



Muones impactados a diferentes alturas

Tras analizar esta nueva recogida de datos en 3 lugares distintos, los datos obtenidos por lo que respecta a la energía media, los píxeles y el porcentaje de ocupación siguen el mismo patrón. Numéricamente son muy distintos a los del primer análisis, pero ambos ofrecen unos resultados muy irregulares con diferencias muy poco significativas que no dependen de la altura, por lo que no podemos afirmar que ninguna de estas variables dependa de la altura.

En el caso de los muones, igual que en el análisis a diferentes grados, podemos ver que, en este caso a distintas alturas, cuanto más alto se recogen los datos más muones impactan en el detector.

6.1.1. Comparación con el proyecto TimPix

Para comparar nuestros datos con los del proyecto TimPix, tenemos que tener en cuenta la latitud y la longitud a la que nos encontramos nosotros.

La latitud y la longitud seleccionadas, para el análisis de los datos, es la de Barcelona: 41.3888° N y 2.159° E, ambos datos en grados decimales.

Para poder realizar la comparación, los datos analizados serán los de octubre y septiembre, por ser los meses donde nosotros hemos recogido los datos y, teniendo en cuenta, los datos de esos mismos meses, pero de los distintos años disponibles en el proyecto TimPix.

Hay que tener en cuenta que las medidas obtenidas por nosotros son de 1 hora y las disponibles en el proyecto TimPix son de tan solo de 20 segundos y están recogidas a 40.000 metros de altura.

Octubre 2016:

Latitud	Longitud	Energía media (KeV)	Píxeles	Media de ocupación (%)
41.903415	1.761	3993.8	183	0.002792
41.743555	2.062	2972.5	129	0.001968
41.582741	2.361	2465.2	129	0.001968
41.421491	2.657	1798.6	76	0.00116
41.257395	2.956	10144.5	432	0.006592

Septiembre 2016:

Latitud	Longitud	Energía media (KeV)	Píxeles	Media de ocupación (%)
40.995526	-3.915	9057.4	295	0.004501
40.83617	-3.633	5220.9	132	0.002014
40.674983	-3.350	3925.1	153	0.002335
40.513882	-3.071	1560.5	82	0.001251
40.349594	-2.788	6985.2	268	0.004089

Como ya hemos indicado anteriormente, estas medidas fueron obtenidas a 40.000 metros de altura. Además, al tratarse de medidas que tan solo duran 20 segundos, es muy difícil realizar una comparación con los datos recogidos por nosotros.

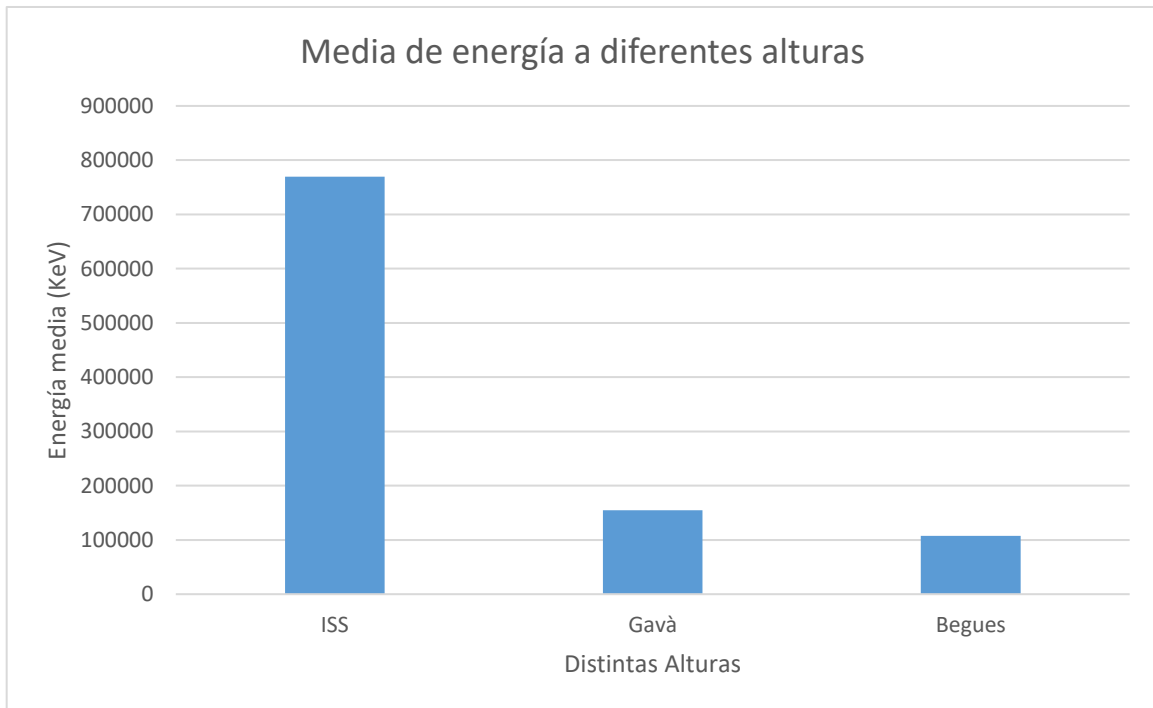
Lo que sí podemos confirmar, al analizar estos datos, es que en el espacio impactan muchas más partículas en un período de tiempo muy inferior y con mucha más energía. En concreto, en intervalos de 20 segundos, los datos son una décima parte de los datos que nosotros recogimos en intervalos de 3.600 segundos.

Para verificar esto, se han multiplicado por 180 los datos recogidos en el proyecto TimPix en el mes de octubre de 2016. Se puede apreciar, como los datos resultantes son muy superiores a los recogidos por nosotros, llegando a ser 180 veces más grandes.

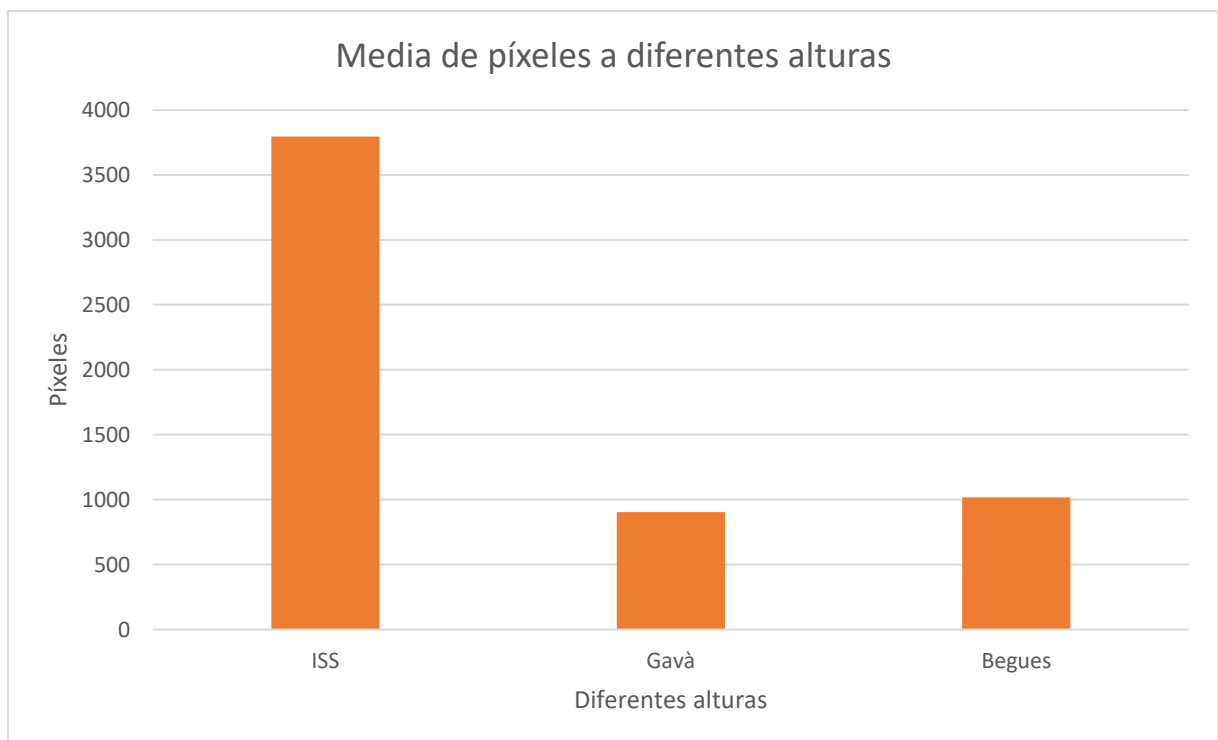
De esta manera, el mes de octubre de 2016 quedaría así:

Latitud	Longitud	Energía media (KeV)	Píxeles	Media de ocupación (%)
41.903415	1.761	718894.1	3660	5.584
41.743555	2.062	535060.9	2580	3.936
41.582741	2.361	443750.1	2580	3.936
41.421491	2.657	323751.6	1520	2.319
41.257395	2.956	1826015.9	8640	13.18

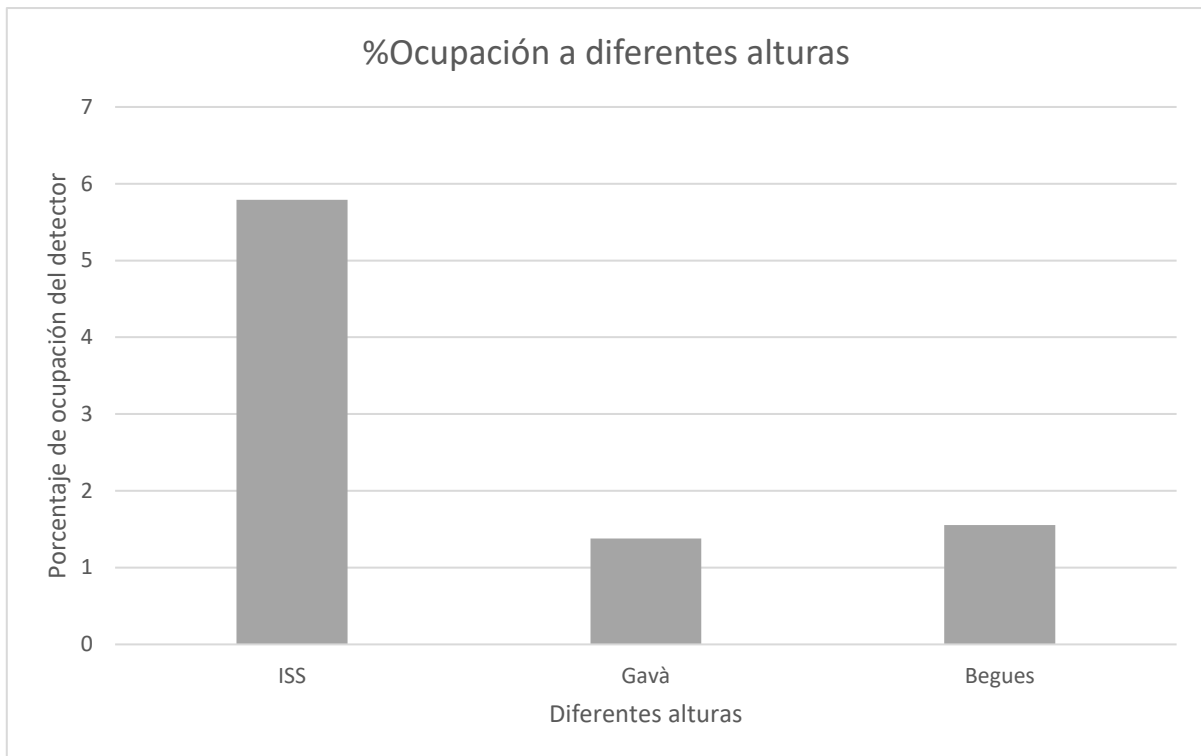
Para ver esta diferencia de una forma más clara, he realizado un gráfico comparando los datos recogidos a 45 grados en Gavà y Begues, con estos otros datos y quedaría de la siguiente manera:



Comparación de la energía media a 3 alturas distintas



Comparación del total de píxeles impactados del detector a 3 alturas distintas



Comparación del porcentaje de ocupación del detector a 3 alturas distintas

Analizando los gráficos podemos comprobar que los datos del proyecto TimPix, recogidos desde la Estación Espacial Internacional, son muy superiores a los recogidos por nosotros en La Tierra, a un máximo de 400 metros por encima del nivel del mar (Begues).

Además, también podemos ver que la diferencia de píxeles y porcentaje de ocupación es muy pequeña en comparación a la diferencia que hay en la energía media, la cual da números muy superiores en los datos recogidos en la Estación Espacial Internacional, como ya se ha comentado anteriormente.

6.2. Análisis proyecto TimPix

Además de esta comparación con los datos que nosotros hemos podido recoger con el detector, también podemos realizar otros análisis, teniendo en cuenta solo los datos que este proyecto nos proporciona. En este caso, estudiaré si los datos recogidos varían más o varían menos según dos factores:

En primer lugar, haré un análisis de los datos de un mes en diferentes posiciones geográficas, para comprobar si existen diferencias.

En segundo lugar, analizaré los datos recogidos durante todos los meses de un año (2016) en las mismas coordenadas geográficas, que serán las coordenadas de Barcelona. Si en algún mes las coordenadas de Barcelona no están disponibles, cogeré para el análisis las coordenadas geográficas de sus alrededores.

Comenzaré por el análisis posicional en distintas zonas geográficas:

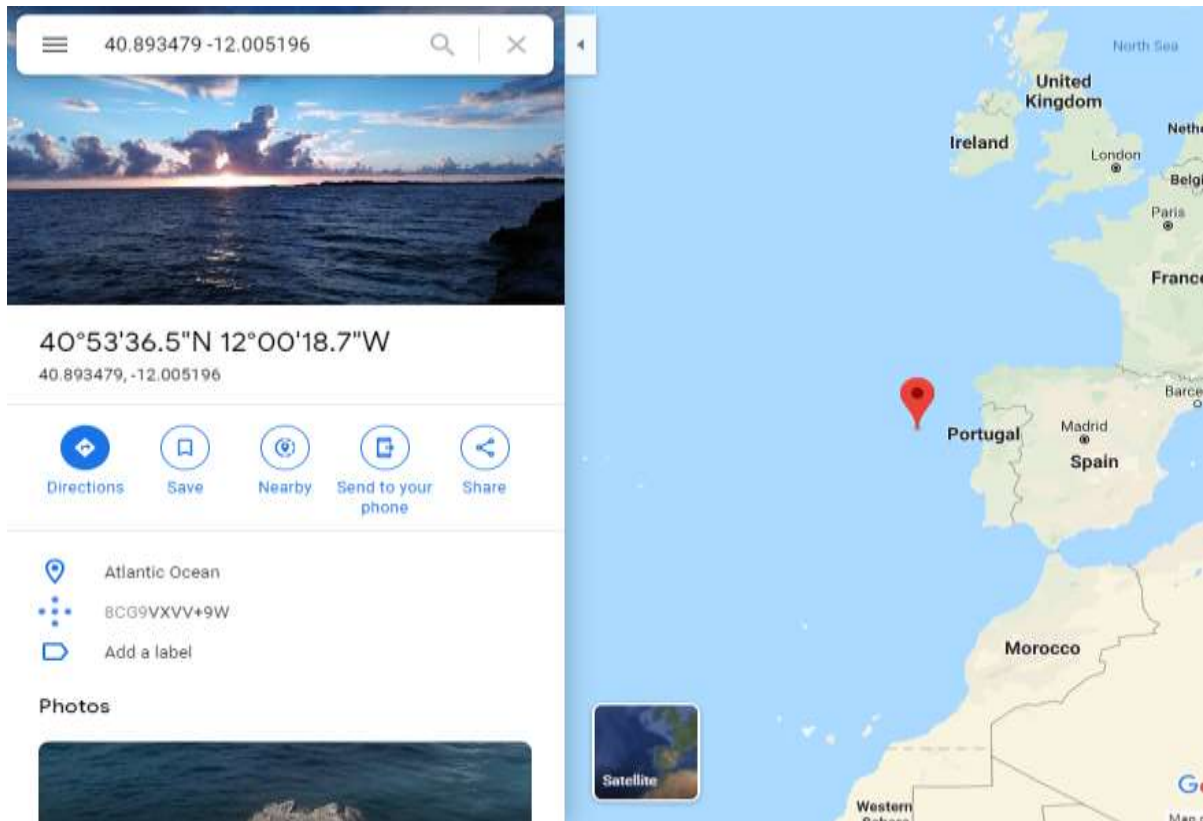
Análisis posicional:

En este análisis, recogeré los datos de las coordenadas alrededor de España creando un círculo a su alrededor de unos 1.300 metros de radio.

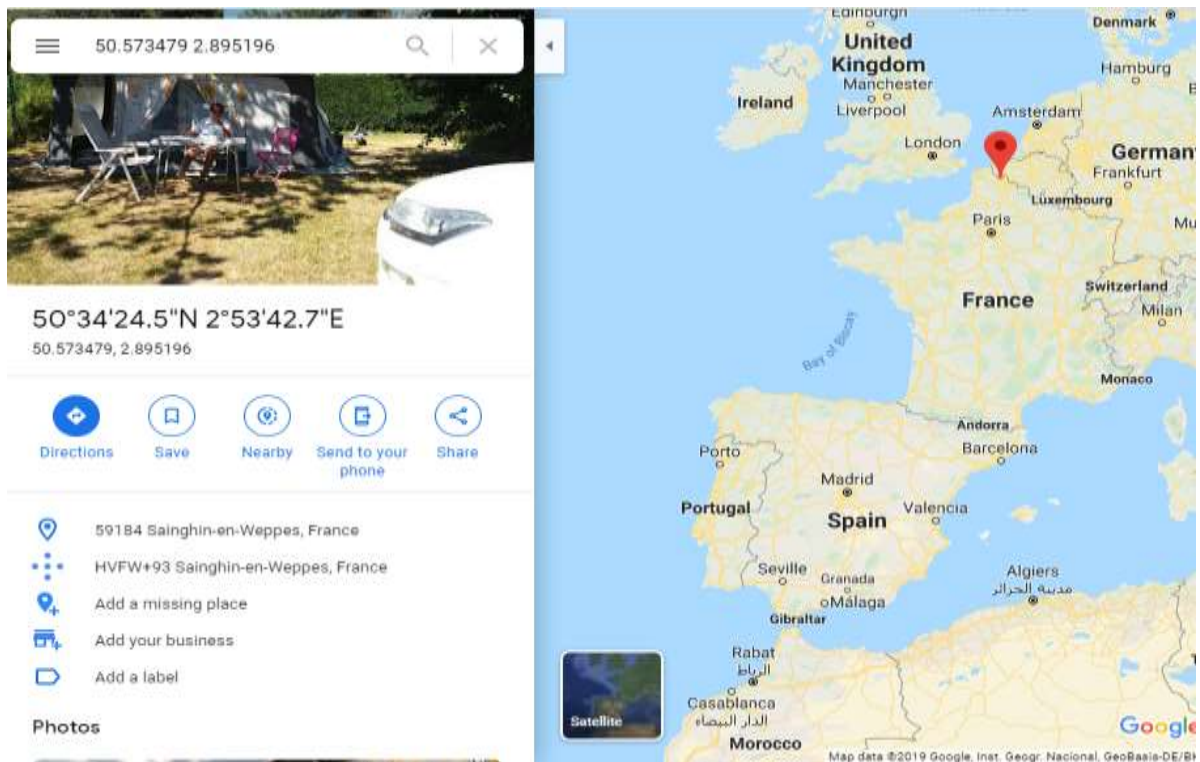
Las coordenadas geográficas de Barcelona son las siguientes: 41.3887901 y 2.1589899. Las zonas geográficas seleccionadas llegan hasta una latitud de 50 y 30 y una latitud de -12 y +12 (todo esto teniendo en cuenta el sistema estándar decimal simple).

Las zonas que cumplen estas condiciones son las siguientes:

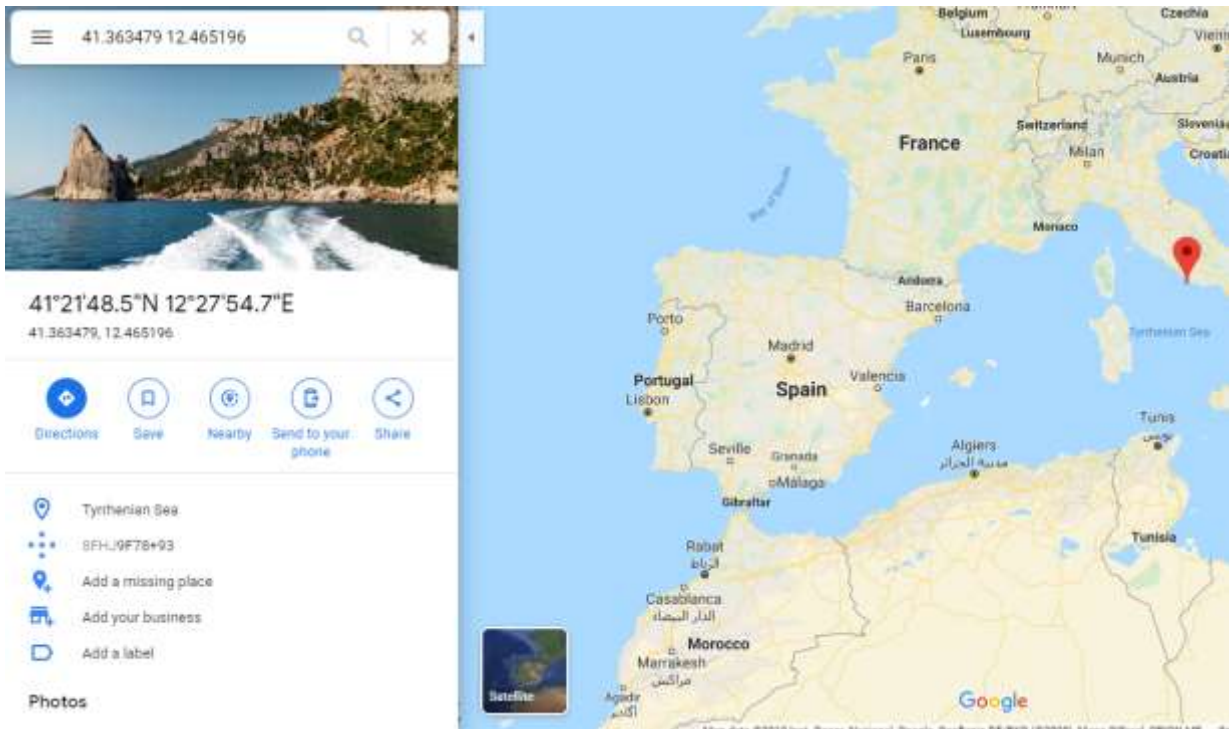
- Una zona del Océano Atlántico situada unos kilómetros al oeste de Portugal
- Lille, al norte de Francia
- Una zona del mar Tirreno, situada unos kilómetros al suroeste de Roma
- La provincia de Ghardaïa, situada al sur de Argelia



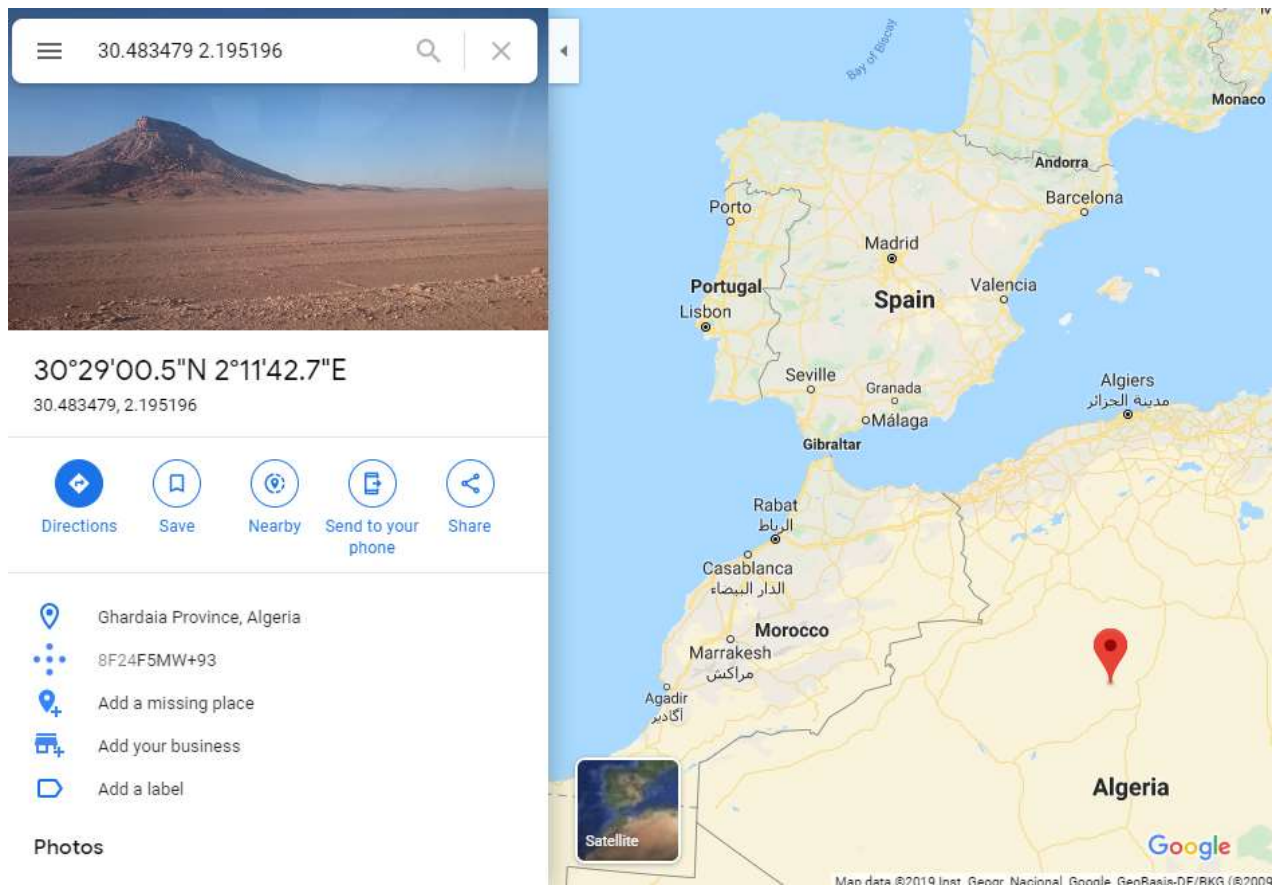
Zona del Océano Atlántico situada unos kilómetros al oeste de Portugal



Lille, al norte de Francia



Una zona del mar Tirreno, situada unos kilómetros al suroeste de Roma

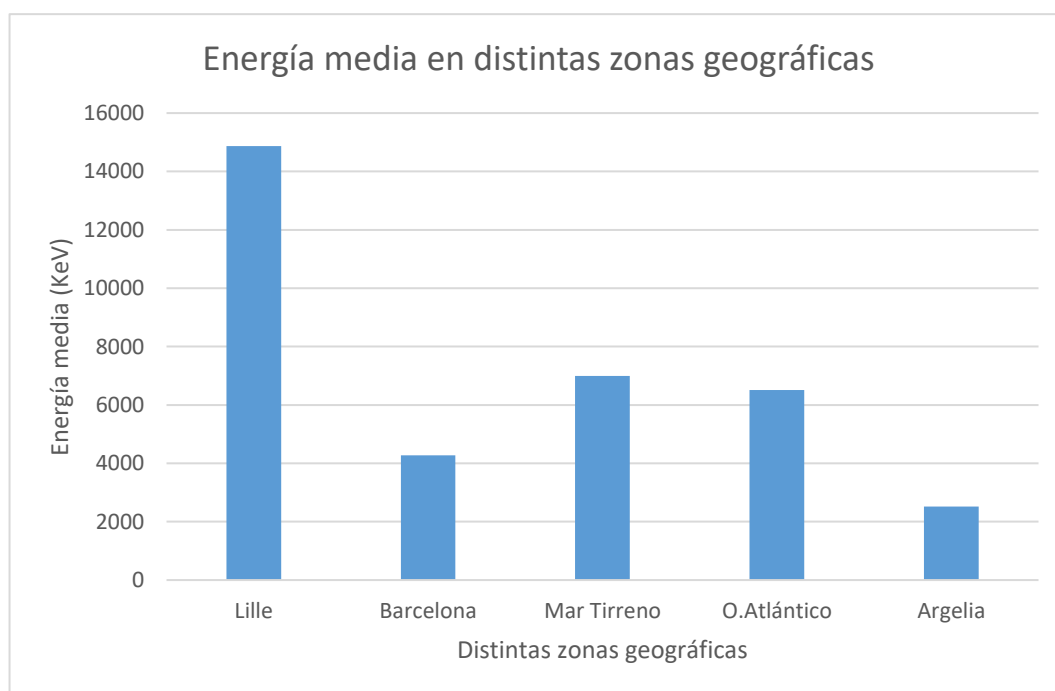


La provincia de Ghardaïa, situada al sur de Argelia

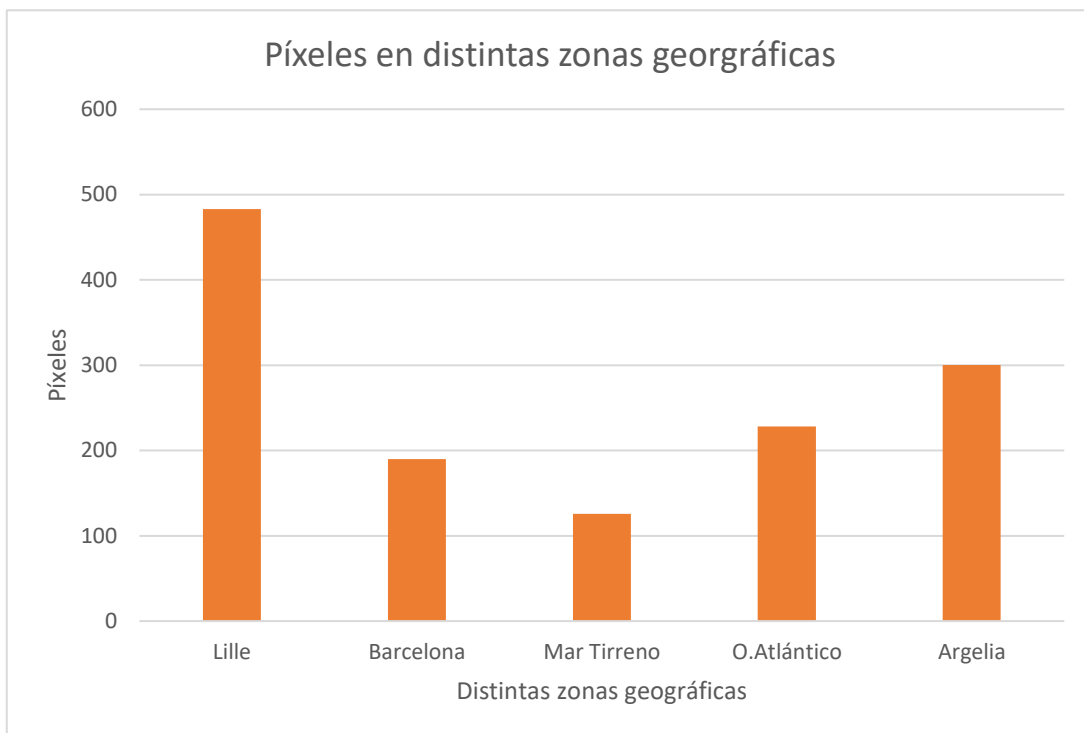
Una vez seleccionadas las coordenadas de las distintas zonas, hay que ver si existe una diferencia entre los datos recogidos por la Estación Espacial Internacional, en éstas, durante el mismo mes.

El mes seleccionado ha sido el de octubre de 2016 y los resultados obtenidos son los siguientes:

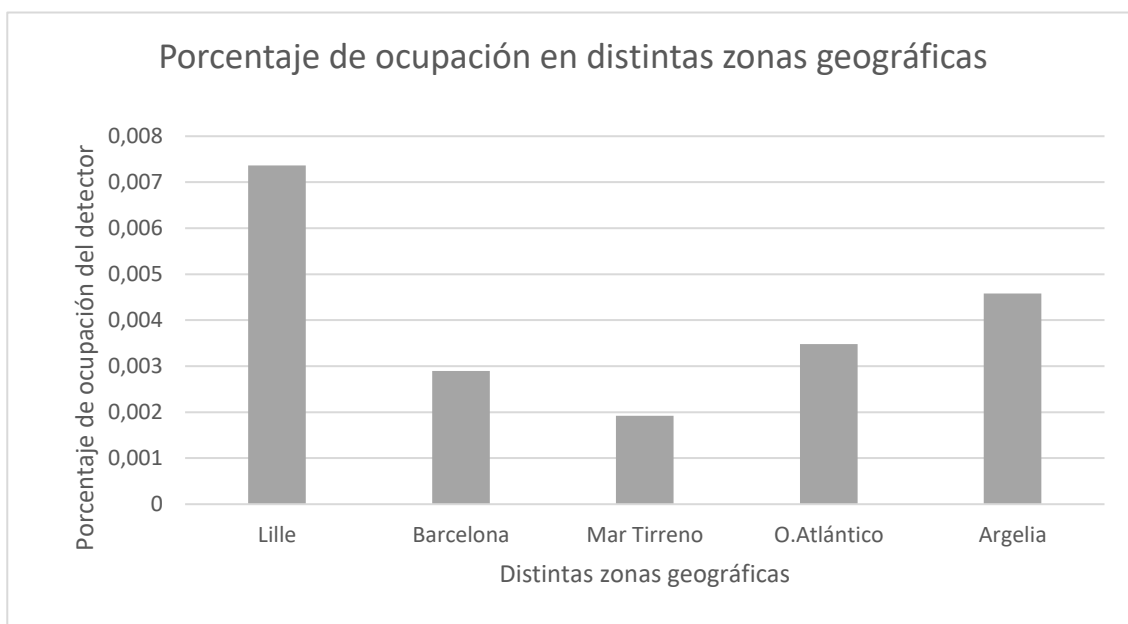
Zona geográfica	Latitud	Longitud	Energía Media (KeV)	Píxeles	Ocupación (%)
Lille	51.74	1.893	14864.1	482.8	0.007366
Barcelona	41.58	2.35	4274.9	189.8	0.002896
Mar Tirreno	41.48	12.69	6993.3	228	0.003479
Océano Atlántico	40.63	12.35	6508.7	300.2	0.004063
Argelia	32.09	12.59	2523.7	125.8	0.001919



Comparación de las energías medias obtenidas durante el mismo mes en distintas zonas geográficas



Comparación de la media de píxeles impactados durante el mismo mes en distintas zonas geográficas



Comparación del porcentaje de ocupación del detector en distintas zonas geográficas

Tras analizar los datos podemos extraer varias conclusiones. La primera y más fácil de apreciar, revisando las gráficas, es que la zona situada a la latitud más baja (Argelia), es en la que observamos la media más baja respecto a energía media recibida, mientras que en la zona de latitud más alta (Lille), podemos observar todo lo contrario.

También podemos observar que la zona de Lille es la zona con más media de píxeles impactados, aunque en este caso no podemos decir que Argelia es la zona con el valor más bajo.

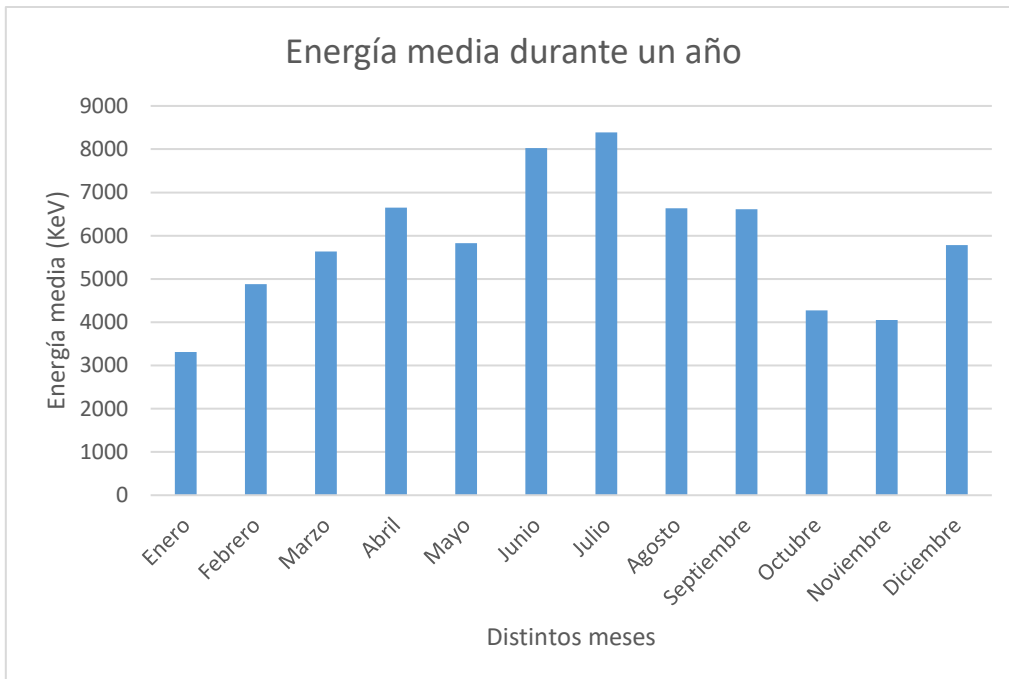
Por último, podemos confirmar que la energía media depende del valor de la latitud y no de la longitud. En los datos analizados, las tres zonas situadas a una latitud similar tienen una diferencia en los datos muy inferior entre ellos comparado con las otras zonas situadas en una latitud ya sea superior o inferior.

Análisis temporal:

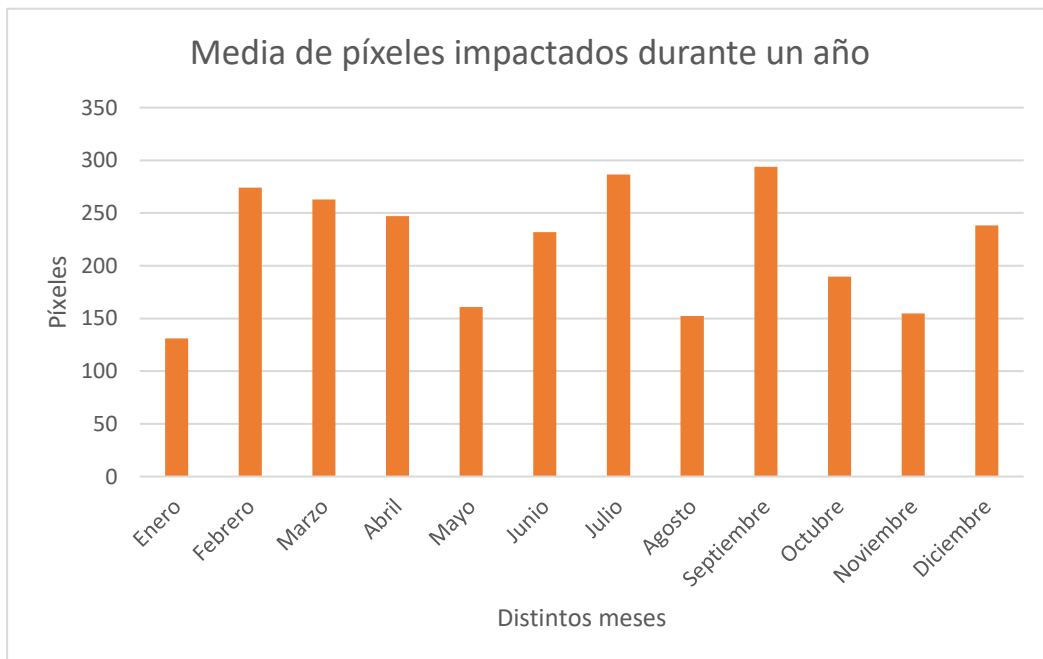
El segundo análisis se realiza para comprobar si hay una mayor o menor variación en los datos dependiendo del tiempo y no el lugar. En este caso analizaré los datos durante todos los meses de un año (2016) del mismo lugar, Barcelona.

Los datos obtenidos son los siguientes:

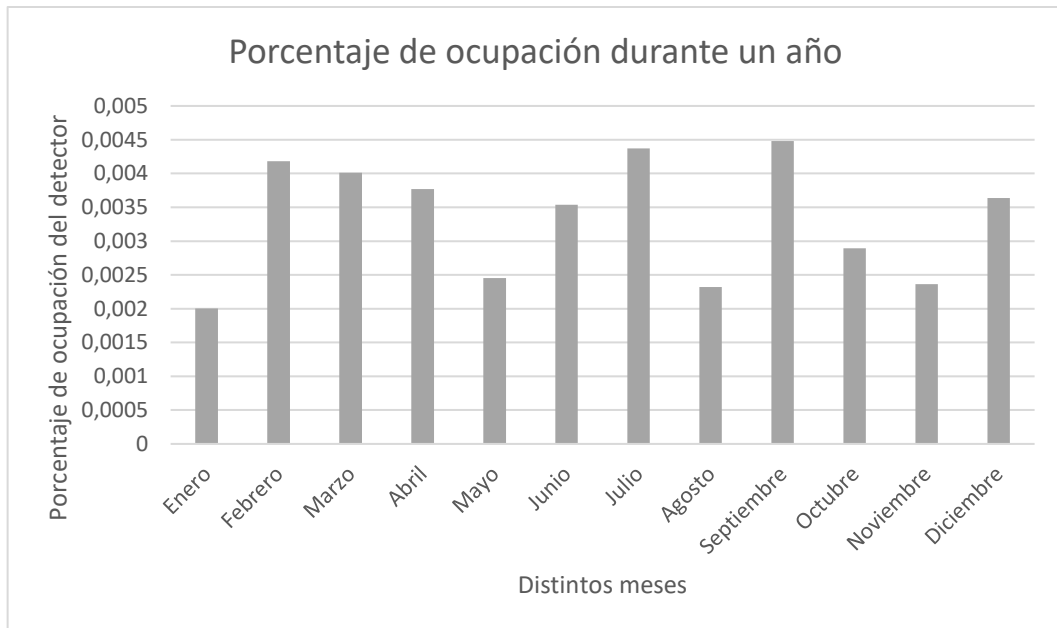
Mes	Energía Media (KeV)	Píxeles	Ocupación (%)
Enero	3311.9	131.2	0.002002
Febrero	4881.5	274	0.004181
Marzo	5638.3	263	0.004013
Abril	6646.1	247.2	0.003772
Mayo	5826.4	160.8	0.002453
Junio	8025.5	231.8	0.003537
Julio	8384.9	286.6	0.004373
Agosto	6636.8	152.2	0.002322
Septiembre	6612.4	293.8	0.004483
Octubre	4274.9	189.8	0.002896
Noviembre	4050.3	154.8	0.002362
Diciembre	5780.4	238.4	0.003637



Comparación de la energía media detectada en Barcelona y sus alrededores durante un año



Comparación de la media de píxeles impactados en Barcelona y sus alrededores durante un año



Comparación del porcentaje de ocupación del detector en Barcelona y sus alrededores durante un año

Tras analizar los datos, podemos comprobar que donde varían de una manera más significativa es en el caso de la energía media detectada por el detector. Se aprecia claramente como los primeros meses del año reciben una media más baja que el resto, exceptuando el mes de diciembre. Los meses con más energía detectada son los meses de abril, junio, julio, agosto y septiembre, seguidos por marzo, mayo y diciembre.

Podemos concluir que estos datos son bastante coherentes (exceptuando el mes de diciembre), ya que los meses con más radiación solar (los meses de verano), son los meses con la media de energía más alta. En cambio, los meses que deberían tener menos radiación solar, debido a la época del año son, efectivamente, los meses con la media de energía más baja.

El impacto de los píxeles es más irregular y, no podemos decir, que sigan patrón alguno. Lo que sí podemos indicar es que los dos meses con más y menos energía media, son los meses con más y menos píxeles. Aun así, el resto de meses no siguen este patrón y, por ello, se confirma que los datos son muy irregulares.

7. Entrevista a Josep Campmany

Tuve la oportunidad de poder realizar una visita al **Sincrotrón ALBA**, localizado en Catalunya, en concreto en el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona en Cerdanyola del Vallés. Allí pude realizar una entrevista a **Josep Campmany**. Josep se dedica al tema del magnetismo. Una gran parte de su tiempo lo dedica a medir imanes que le llegan, tanto de laboratorios cercanos como del resto del mundo. Además, también trabaja en el diseño de estructuras magnéticas, tanto para proyectos internacionales como propios.

David: *Eres físico cuántico... ¿Por qué decidiste estudiar física?*

Josep: Bueno, cuando yo hacía BUP y COU había un programa que se llamaba Cosmos que me llamó mucho la atención. Además, tenía un amigo en mi grupo que estudiaba física y siempre hablaba maravillas, por eso decidí estudiar física.

D: *¿Qué haces/investigas en tu trabajo en un día normal y qué permite investigar exactamente este sincrotrón? ¿Podríamos decir que es un LHC en escala reducida?*

J: El acelerador es como un LHC en escala reducida. La diferencia es que el LHC utiliza imanes superconductores y nosotros imanes convencionales. Aquí solo hay superconductividad en un dispositivo de inserción, pero podríamos decir que no tiene nada que ver con el acelerador. Entonces, que investigo yo, básicamente me dedico al tema del magnetismo, las obras magnéticas, diseño de estructuras magnéticas y trabajo tanto para proyectos internacionales como propios. También medimos imanes, en el laboratorio de medidas magnéticas, que nos llegan de empresas cercanas o de institutos de investigación de todas partes.

D: *¿Cuáles son los objetivos del sincrotrón a corto y largo plazo?*

J: Son los mismos, dar servicio a la comunidad científica que investiga materiales, ya sean biológicos, inertes o de cualquier tipo, incluso de patrimonio cultural y artístico, es un servicio a la comunidad. Es decir, nosotros somos una instalación de servicio, proporcionamos rayos X a usuarios que vienen de fuera.

D: *Aproximadamente, ¿Cuántas personas trabajan a diario en el sincrotrón?*

J: La plantilla actual es de unas 215 personas.

D: *¿De dónde provienen los costes de financiación?*

J: El financiamiento normal viene dado un 50% por la Generalitat de Catalunya y el otro 50% por el Estado. Cuando de forma puntual se tiene que realizar una inversión, por ejemplo, para un laboratorio nuevo, entonces el 50% lo aporta la Unión Europea, el 25% la Generalitat de Catalunya y el 25% el Estado.

D: *¿Aceptáis cualquier tipo de donación?*

J: Sí, de hecho, el laboratorio que yo llevo, cuando hacemos medidas para terceros cobramos el trabajo. El poco dinero que se obtiene va a una caja común y se utiliza para reinvertir en la propia instalación.

Ahora entrando en materia:

D: *¿Crees que este universo es azaroso o predeterminado?*

J: A ver, yo afirmaré que a nivel cuántico es azaroso, pero a nivel macroscópico es determinado.

D: *¿Qué aplicaciones útiles tiene la mecánica cuántica actualmente?*

J: Pues la verdad es que no lo sé, se habla mucho de los computadores cuánticos, pero yo no lo he entendido aún porque para mí son cosas antagónicas, es decir, cuando quieres hacer un cálculo quieres algo determinista, muy exacto, en cambio un computador cuántico... Ahora, que se llame computador cuántico a una cosa que no lo es podría ser, porque tal vez se le llama computador cuántico a un computador que computa en paralelo, pero, yo creo que se abusa mucho de la palabra cuántica, yo conozco una mujer que dice que es psicóloga cuántica y realmente lo pone en el currículum. Se abusa mucho de este término cuando la cuántica realmente es un instrumento para describir las partículas elementales y su comportamiento respecto a la estadística.



Josep Campmany

D: *¿Crees que será posible unificar la relatividad y la mecánica cuántica?*

J: Se está trabajando mucho, de momento dicen que han conseguido medir gravitones. Vinieron aquí a hacer una charla hace poco, es posible que algún día se consiga.

D: *¿Crees que, en un futuro, no muy lejano, seremos capaces de descubrir las leyes de la materia y de la energía oscura?*

J: Esto ya es más complicado. A ver, nosotros tenemos el modelo estándar que de momento explica todo lo conocido, pero claro la materia oscura es desconocida entonces... Yo sé que en el Cern están produciendo antimateria y quieren ver si se

comporta igual que la materia desde el punto de vista del peso, masa, aceleración, etc. Si se comportan igual es difícil saber de dónde proviene, si se comporta diferente tenemos un reto científico muy grande y tal vez se podría explicar.

D: *¿Crees que la física cuántica evolucionara durante este siglo cómo ha evolucionado en los anteriores o nos quedaremos estancados?*

J: Es muy difícil saberlo... Ya sabes que a finales del s.XIX diferentes físicos decían que la física ya se había acabado y de repente apareció Planck y dijo solo quedan un par de detalles como el efecto fotoeléctrico y la radiación del cuerpo negro y a partir de ahí hubo una revolución... yo me curo en salud y digo que no podemos saber que puede pasar.

D: *Y, por último, yo he tenido la oportunidad de hacer mi TR sobre física de partículas gracias a que en mi caso la escuela Sagrada Familia de Gavà nos ha proporcionado un detector de partículas TimePix que nos ha permitido realizar prácticas que podríamos situar mejor como prácticas del ámbito universitario e introducirnos en el mundo de la física moderna y sobre todo física de partículas la que prácticamente no se estudia en el bachillerato. Sin estar completamente dentro de este proyecto, ¿Crees que es una buena iniciativa que se debería implementar en muchas más escuelas o que este mundo es demasiado complicado como para trabajarlo en el bachillerato y en vez de motivar a los alumnos podría desmotivar a estos?*

J: No, no hay ninguna complicación todo lo contrario la gente joven es la que tiene el cerebro más despierto.

Tras finalizar la entrevista seguimos hablando sobre el tema de mi TR y Josep me hizo una breve visita guiada por todo el Sincrotrón y sus zonas de trabajo.

Al final de la visita le agradecí sinceramente su atención y las facilidades que me dio para poder realizarle la entrevista, que por cierto me pareció muy interesante.

8. Conclusión

Llegados a este punto, se realizará un balance del estudio realizado teniendo en cuenta las principales aportaciones y conclusiones que se pueden extraer.

En primer lugar, respecto al marco teórico cabe destacar que se han logrado los objetivos planteados. A pesar de que mis conocimientos matemáticos me pueden limitar a la hora de profundizar en gran parte de los temas tratados, gracias a la investigación bibliográfica y las páginas web he podido ampliar mis conocimientos en relación a la física moderna y física nuclear. Por lo tanto, esta indagación me ha permitido poder entender mejor aquellos conceptos que antes no conocía tan en profundidad y enfocar la parte práctica con más seguridad. Uno de los aspectos que más me ha sorprendido, en referencia al marco teórico, es la cantidad de conclusiones que podían extraer con los limitados recursos de los que disponían.

En segundo lugar, en cuanto a la parte práctica es importante mencionar los aprendizajes conseguidos, así como los problemas con los que me he encontrado. Mientras se llevaba a cabo la práctica introductoria y la práctica en la Universidad de Barcelona, no hubo ningún problema y ambas me sirvieron para poder familiarizarme con el detector de partículas, que posteriormente se utilizaría en la práctica más importante del trabajo. Los dos problemas que hubo durante la realización del estudio de radiación de fondo fueron los siguientes:

Por un lado, cuando fuimos a registrar datos en una visita de 8 horas a Montserrat, éstos se borraron al terminar este período de tiempo y no se pudieron recuperar. Este contratiempo provocó que tuviera que volver a Montserrat para registrar los datos de nuevo. Esta segunda vez tan solo registré una hora (cuando el detector estaba situado a 0° de inclinación) porque nos dimos cuenta que no eran necesarias todas las otras medidas, ya que solo nos interesaba poder comparar los datos a distintas alturas. De esta manera, nos asegurábamos de poder repetirlo el mismo día.

Por otro lado, una vez recogidos todos los datos, comprobamos que no aparecían los muones. Durante el mes de diciembre dimos con la solución que nos permitió resolver este problema. Se trataba de un ajuste que venía predeterminado en el Software Pixet Pro y nunca habíamos visto. Una vez solucionado este problema, hicimos otra recogida de datos para estudiar la aparición de muones en los distintos grados de inclinación.

En conclusión, a pesar de estos pequeños contratiempos y del estrés que me ha causado tener que acabar el trabajo durante el primer trimestre de segundo de

bachillerato, he disfrutado mucho realizándolo. Las expectativas que tenía al escoger el tema de estudio se han cumplido y, además me ha servido para ampliar mis conocimientos en un campo que siempre me ha interesado.

AGRADECIMIENTOS

No puedo acabar este trabajo sin agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado a que este proyecto haya podido salir adelante y tenga sentido.

En primer lugar, quiero agradecerle a Daniel Parcerisas, su paciencia y comprensión. Ha estado a mi disposición en todo momento, me ha ayudado siempre que lo he necesitado incluso cuando estábamos de vacaciones. Sin sus correcciones, consejos, conocimientos y experiencia este proyecto no hubiera sido posible.

Quiero agradecer a Alex Benítez que me ayudase a ponerme en contacto con Josep Campmany y poder realizarle una entrevista en su lugar de trabajo, el sincrotrón ALBA.

A Pedro Escoriza por la ayuda que me ha dispensado durante todo el trabajo y poniendo a mí disposición sus conocimientos de informática.

A Eugeni Greuges del Instituto de Ciencias del Cosmos (ICCUB) y Aniol Lobo por dejarnos acceder a realizar una práctica en su lugar de trabajo y estudio respectivamente y guiarnos en esta práctica.

También a Esther Salvador, mi compañera de TR, por su ayuda en todo momento y haberme acompañado durante el desarrollo de proyecto.

En cuanto a Rafael Ballabriga, su aportación ha sido fundamental, ya que nos ha facilitado el detector de partículas, clave en este estudio.

Tampoco puedo olvidar la aportación de Josep Campmany. Su conocimiento acerca del tema me ha permitido ampliar el trabajo y darle otro punto de vista.

Por último, agradecer a mis padres y mi hermana su comprensión, cariño y ayuda. Ellos son los que me han animado a seguir adelante, pese a las dificultades y momentos de agotamiento.

9. Fuentes de información

Bibliografía:

Climent, F. (1987). Las radiaciones. Barcelona, España: Confederación Española de Cajas de Ahorros

Martínez, V. J., Galadí-Enríquez, D., & Miralles, J. A. (2005). Astronomía fundamental (Vol. 81). Universitat de Valencia.

Mercadé, J; Serra, Salvador; & Armengol, M. (2007). Física 2. Batxillerat. (págs. 385-409). Madrid, España: Mc GrawHill

Jenkins, E. N. (1982). Radiactividad: una ciencia en su contexto histórico y social. Madrid, España: Alhambra.

Tipler, P. A. (1991). Física preuniversitaria. I (Vol. 1). Reverté.

Mercadé, J; Serra, Salvador; & Armengol, M. (2009). Física 2. Batxillerat. (pàgs. 321-353). Madrid, España: Mc GrawHill

Webgrafía:

Foster, J; Greenwood, S; Tyzack, L; Grocott, M; Turnbull, C; & Parker, B. (s.f). The Institute for Research in Schools. Recuperado de:
<http://www.researchinschools.org/index.html>

Física moderna. (2012). En Wikipedia. Recuperado el 24 de julio de 2019 de
https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_moderna

Radiación de cuerpo negro. (s.f). En Wikipedia. Recuperado el 18 de mayo de 2019 de
https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_cuerpo_negro

Física Nuclear. (s.f). En Wikipedia. Recuperado el 13 de julio de 2019 de
https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_nuclear

Claudio, P. (2014). Historia de la física moderna – siglos XIX y XX: *Historias y biografías*. Recuperado de <https://historiaybiografias.com/diminuto/>

Lunitabb's. (2013). Historia Física Moderna: *Timelines*. Recuperado de
<https://www.timetoast.com/timelines/historia-fisica-moderna>

Monzález, M. (2010). La Física Moderna: *La Guía*. Recuperado de
<https://fisica.laguia2000.com/relatividad/la-fisica-moderna>

La historia de la física moderna. (21 de noviembre de 2013). [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www-fisicamod.blogspot.com/2013/11/la-historia-de-la-fisica-moderna.html>

La radiación del cuerpo negro. (s.f). Recuperado de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm#El%20cuerpo%20negro>

Capítulo 4- Conceptos básicos de física nuclear. (s.f). *Foro de la Industria Nuclear Española*. Recuperado de <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-4>

Capítulo 4- Conceptos básicos de física nuclear. (s.f). ¿Qué son las reacciones nucleares?: *Foro de la Industria Nuclear Española*. Recuperado de <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-4/115664-49-ique-son-las-reacciones-nucleares>

Significado de Física nuclear. (2013-2019). *Significados*. Recuperado de <https://www.significados.com/fisica-nuclear/>

Centro Nacional de Física de Partículas Astropartículas y Nuclear. (2010). ¿Qué es la Física Nuclear?: *CPAN*. Recuperado de <https://www.icpan.es/es/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-f%C3%ADsica-nuclear>

Las partículas elementales. (s.f). Recuperado de https://bio.m2osw.com/gcartable/physique/particules_elementales.htm

Partículas elementales. (s.f). *EcuRed*. Recuperado de https://www.ecured.cu/Part%C3%ADculas_elementales

Caballero, J. (s.f). Partículas Alfa: Descubrimiento, Características, Aplicaciones: *Lifeder.com*. Recuperado de <https://www.lifeder.com/particulas-alfa/>

Partícula alfa. (s.f). *Energía Nuclear*. Recuperado de <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/radioactividad/particula-alfa>

Sánchez, J. (s.f). Desintegración alfa, beta y gamma [Mensaje en blog]. El físico loco. Recuperado de <http://elfisicoloco.blogspot.com/2017/03/desintegracion-alfa-beta-y-gamma.html>

Moreno, F. (2007). Elementos básicos de la física nuclear. *Los lagartos terribles*. Recuperado de <http://www.escrioscientificos.es/trab1a20/carpetas/nuclear/nu04.htm>

International Atomic Energy Agency. (2013). Rayos X: *IAEA*. Recuperado de https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/Patients/patient-information-x-rays/index.htm#PIG_FAQ01

Los rayos X. (s.f). *CSIC Cristalografía*. Recuperado de https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_02.html

Radiological Society of North America. (2019). Rayos X óseo (radiografía): *RadiologyInfo.org*. Recuperado de <https://www.radiologyinfo.org/sp/info.cfm?pg=bonerad>

Villatoro, F. (2008). Dualidad onda-partícula (o el electrón como onda en el espacio de momentos) [Mensaje en un blog]. *Naukas*. Recuperado de <https://francis.naukas.com/2008/02/27/dualidad-onda-particula-o-el-electron-como-onda-en-el-espacio-de-momentos/>

Tomé, C. (2018). Equivalencia entre masa y energía. *Experientia Docet*. Recuperado de <https://culturacientifica.com/2018/02/06/equivalencia-masa-energia/>

Equivalencia masa – energía. (s.f). Recuperado de <http://www.rinconsolidario.org/higgs/equivalencia.htm>

El principio de incertidumbre de Heisenberg. (s.f). *Superconductividad*. Recuperado de <https://wp.icmm.csic.es/superconductividad/fisica-cuantica-y-transiciones/fisica-cuantica/principio-de-incertidumbre-de-heisenberg/>

El misterio de los rayos cósmicos. (2018). *Turismodeestrellas.com*. Recuperado de <https://www.turismodeestrellas.com/que-son-los-rayos-cosmicos>

Los rayos cósmicos. (s.f). Recuperado de https://www.auger.org.ar/argentina/rayos_cosmicos.shtml

La radiación cósmica de fondo. (s.f). Radioastronomía VI: *Astrocuencia*. Recuperado de <http://www.astrocuencia.es/joomla/index.php/divulgacion/896-la-radiacion-cosmica-de-fondo>

Anexos

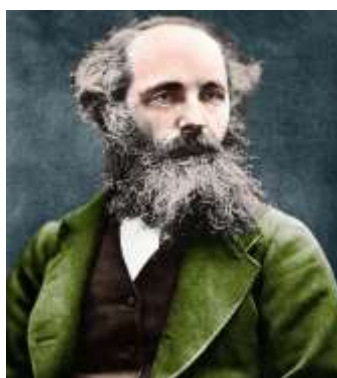
Anexo 1. Los fundamentos de la Física Moderna

Nos tenemos que remontar a los inicios del siglo XX para poder hablar de la época en la cual tiene su origen la física moderna.

A finales del siglo XIX, científicos de todo el mundo creían que los conocimientos sobre las leyes físicas habían llegado a su fin. Hasta entonces, las leyes de electromagnetismo propuestas por **James Clerck Maxwell** y **Michael Faraday**, eran consideradas el punto final del conocimiento físico y nada más podría ser descubierto en la ciencia de la naturaleza. Todo esto cambió cuando en el año 1900, **Max Planck**, intentando explicar los fenómenos de la radiación térmica investigando sobre el “**cuanto**” de energía, revolucionó la física, presentando lo que llamamos actualmente **física cuántica**.



Michael Faraday



James Clerck Maxwell

Hasta el momento, todos los temas tratados se podían resolver con la física clásica, ya que se daban problemas que se podían resolver basándose en las certezas que presentaban las leyes que ayudaban a resolver esos problemas, en cambio, estas teorías empezaron a fallar en esta nueva rama de la física, ya que ésta se basaba en probabilidades, lo cual hizo que a los físicos de la época les costara mucho adaptarse.

La misión de esta física, la actual, es comprender la relación que existe entre las fuerzas que rigen la naturaleza: la gravedad, el electromagnetismo, la energía nuclear fuerte y la nuclear débil. Comprender y lograr una **teoría de unificación**, para así poder entender el universo y sus partículas. Por esta razón, casi todo lo planteado en el siglo XIX fue puesto en duda y, en la mayoría de casos, finalmente reemplazado durante el

siglo XX. Tampoco podemos descartar que esto no pase en un futuro tal vez no muy lejano con las teorías y planteamientos actuales.

El fenómeno de la **dualidad onda-corpúsculo**, junto con una nueva teoría, la de la **relatividad**, obra de uno de los científicos más reconocidos en toda la historia y probablemente el más representativo de esta época, **Albert Einstein**, entre muchos otros descubrimientos y estudios, se dio una revolución científica que hizo tambalear a la física clásica y fue la base de esta nueva rama de la física que nos ha permitido alcanzar un grado más en el conocimiento de la naturaleza.

1.1. La radiación del cuerpo negro

Si vamos aumentando la temperatura de un cuerpo sólido, llega un momento en el que este cuerpo empieza a emitir luz. Esto lo podemos ver claramente en el filamento de una lámpara de incandescencia cuando nos ilumina: la energía eléctrica hace aumentar la temperatura del filamento, que comienza a emitir energía calorífica y luminosa, de acuerdo con el llamado **efecto Joule**. Decimos por lo tanto que el filamento emite radiación térmica y radiación visible, que consisten en ondas electromagnéticas.

Realmente, cualquier cuerpo que esté a una temperatura determinada emite radiación electromagnética, con un espectro característico que depende de esta temperatura. Si aumentamos la temperatura del cuerpo, aumenta su espectro de emisión, y el cuerpo emite radiación que contiene frecuencias cada vez más grandes o, lo que es lo mismo, longitudes de onda cada vez más pequeñas.

Por otra parte, un cuerpo absorbe parte de la radiación que incide y refleja el resto; así, por ejemplo, un cuerpo que vemos de color verde absorbe todas las longitudes de onda que corresponden al resto de colores, y refleja la longitud correspondiente al color verde. A finales del siglo pasado, una vez descubiertas las ondas electromagnéticas, los físicos se interesaron en el estudio de la emisión y la absorción de la radiación y se imaginaron un cuerpo denominado como "**cuerpo negro**". El nombre *Cuerpo negro* fue introducido por **Gustav Kirchhoff** en 1862. El cuerpo negro imaginario de **Kirchhoff** era un simple recipiente oscuro con un pequeño orificio en una de sus paredes. Una vez en el interior, la radiación sufre diversas reflexiones en las paredes de la cavidad hasta que acaba siendo completamente absorbida. El agujero también actúa como emisor perfecto, puesto que las radiaciones que escapan a través de él muestran

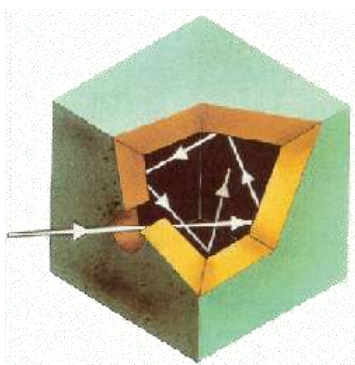


Kirchhoff

todas las longitudes de onda presentes, a esa temperatura, en el interior del recipiente. A día de hoy, describimos lo que es un cuerpo negro sin alejarnos mucho del cuerpo que se imaginó **Kirchhoff**.

Hoy en día decimos que un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro.

En la práctica, podemos suponer que, si hacemos una pequeña apertura en un cuerpo vacío que tiene las paredes interiores recubiertas de polvo negro, la apertura se comporta como un cuerpo negro, ya que toda la radiación que penetraba se va reflejando en la pared interior, y en cada reflexión es absorbida una parte importante de la radiación incidente; como la probabilidad de que vuelva a salir por la apertura es muy baja, la radiación acaba siendo absorbida prácticamente del todo, y así se verifica la condición de cuerpo negro.

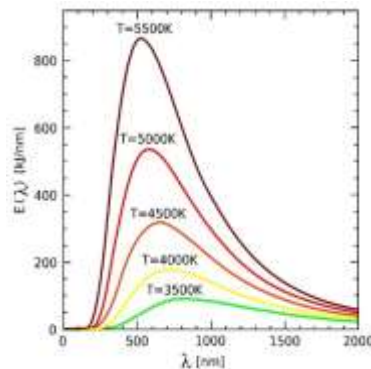


Simulación de un cuerpo negro

Es interesante ver como varía el espectro de emisión de un cuerpo negro como el que hemos descrito cuando aumenta su temperatura. A temperaturas inferiores a los 600 °C, la radiación no es visible, ya que su espectro contiene longitudes de onda más grandes que las de la luz visible. A 600 °C, la apertura emite una débil luz roja, que indica que su espectro de emisión empieza a incluir longitudes de onda que corresponden a la franja inferior del espectro visible, es decir, al color rojo; esta luz se vuelve más blanca a medida que se incrementa la temperatura, ya que se van añadiendo las otras longitudes de onda del espectro visible.

Si estudiamos el espectro de la radiación que emite un cuerpo negro a diferentes temperaturas y representamos el espectro de la energía irradiada E en función de la

longitud de onda λ , obtenemos las curvas experimentales correspondientes a la radiación de cuerpo negro. Los científicos de final del siglo XIX, en cambio, se encontraron con la sorpresa que, cuando intentaban conseguir teóricamente estas curvas aplicando los principios de la teoría electromagnética, las gráficas que obtenían no concordaban con las anteriores, ya que suponían que la energía irradiada era mucho más grande que la que se observaba realmente para longitudes de onda cortas.



Curvas experimentales en la radiación de un cuerpo negro

El espectro de emisión, por lo tanto, debía contener mayoritariamente radiación con longitudes de onda cortas como, por ejemplo, radiación ultravioleta. Esta predicción teórica se llamó, por este motivo, **catástrofe ultravioleta**, ya que no se correspondía con lo que se observaba experimentalmente y por lo tanto demostraba que fallaba algún aspecto de la teoría.

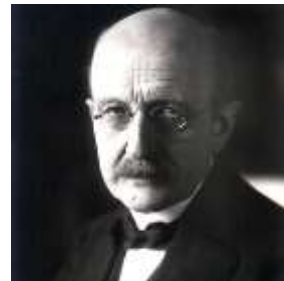
Primero se intentó resolver con la **ley de Rayleigh-Jeans**, y más adelante con las aportaciones de **Wilhelm Wein**, pero se solucionó el problema hasta que llegó **Max Planck**.

El físico alemán **Max Planck** consiguió deducir teóricamente las curvas anteriores en el año 1900, pero tuvo que hacer un supuesto nuevo en las leyes de la física de la época: la energía que irradia un cuerpo en forma de onda electromagnética no es emitida de forma continua, sino a saltos, como en paquetes de energía. **Planck** llamó "**cuantos**" a cada una de estas unidades discretas de energía, unidad que tenía que tener una energía E dada por la expresión:

$$E = hf$$

Donde f es la frecuencia correspondiente a la radiación emitida o absorbida, y h una constante denominada constante de **Planck**, de valor $6,62 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$. La hipótesis de los cuantos implica que la energía E asociada a una radiación de frecuencia determinada $f=f_1$ tiene que ser un múltiplo del valor fundamental $E_1=hf_1$; es decir, $E_n=nE_1$ on $n=1,2,\dots$

Por este motivo decimos que la energía transmitida por una onda electromagnética está **cuantizada**. La hipótesis de **Planck** representa un cierto retorno al modelo corpuscular de la luz, ya que, si la luz es irradiada de manera discreta en forma de cuanto, de energía, podemos considerar que cada uno de estos es una partícula, y que la luz está formada por un conjunto de estos corpúsculos. Esta idea fue la que adoptó **Einstein** unos años más tarde para explicar este fenómeno y otros; así, reveló que la expresión anterior es rigurosamente cierta e hizo que la constante de Planck h fuese considerada, desde aquel momento, una constante fundamental de la física.



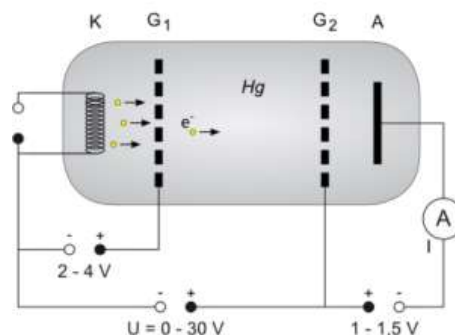
Max Planck

1.2. El efecto fotoeléctrico

Hertz fue el primer científico que demostró experimentalmente la existencia de las **ondas electromagnéticas**, pero también es conocido por otro descubrimiento que contradice los postulados de la física clásica. **Hertz** observó las descargas que se producían entre dos electrodos metálicos conectados a una diferencia de potencial V .



Hertz



Tubo de descarga

En el dispositivo experimental, los electrodos son dos placas situadas en el interior de un tubo hermético de vidrio o cuarzo en el cual se ha hecho el vacío; la descarga eléctrica se produce cuando el potencial V es suficientemente grande para arrancar los electrones del cátodo y acelerarlos hasta el ánodo, cerrando el circuito. Cuando esto pasa, el amperímetro mide el paso de un corriente eléctrica a través del circuito.

Hertz observó un hecho curioso: si se iluminaba el cátodo con radiación ultravioletada, el amperímetro indicaba el paso de una corriente eléctrica de intensidad I , aunque el potencial no fuese tan alto para producir una descarga. A este fenómeno se le denominó **efecto fotoeléctrico**. Fue estudiado durante los siguientes años y se comprobó que, cuando los electrodos se construían con determinados metales, la emisión de los electrones por el cátodo también se daba una luz visible.

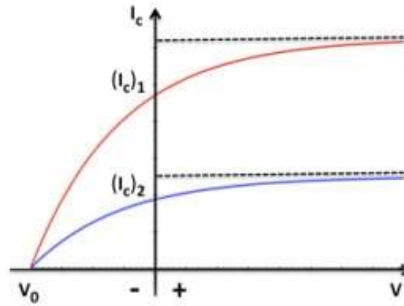
Para explicar el efecto fotoeléctrico, recordamos primero que en un metal hay electrones que se pueden mover libremente en el interior de la red cristalina; estos electrones no pueden, en principio, escaparse del metal, excepto si se les suministra energía.

Como una onda electromagnética transporta energía, los electrones situados en la superficie del metal pueden absorber parte de esta energía y escaparse. En el montaje anterior, la superficie metálica que se ilumina es el cátodo (placa negativa), de manera que la radiación electromagnética incidente libera del metal **fotoelectrones** que son acelerados por el potencial V .

Un estudio detallado del efecto fotoeléctrico revela algunas conclusiones que pueden ser sorprendentes desde el punto de vista de la física clásica; los resultados a los cuales se llega experimentalmente son las siguientes:

- Cuando se aumenta la intensidad de la radiación que incide sobre el cátodo, aumenta el número de fotoelectrones que son liberados, de manera que la intensidad eléctrica I del circuito aumenta proporcionalmente a la intensidad de radiación.
- La emisión fotoelectrónica es prácticamente instantánea, aunque la intensidad de la radiación sea muy pequeña.
- La emisión fotoelectrónica para un metal determinado solo tiene lugar si la frecuencia de la radiación incidente es más grande que un cierto valor, llamado frecuencia umbral f_0 , característica del metal. Si la frecuencia de la radiación es superior a f_0 , se produce el efecto fotoeléctrico, aunque la intensidad de la radiación incidente sea muy pequeña.
- Para una intensidad de radiación determinada, si vamos aumentando el valor del potencial V , la intensidad de corriente I crece hasta que llega a un valor de saturación I_s ; si se continúa incrementando V , no aumenta el valor de I .

Para cada intensidad de radiación, hay una intensidad de saturación diferente, de manera que I aumenta proporcionalmente respecto a V .



- Cuando el potencial V se hace negativo, la emisión fotoelectrónica decrece bruscamente, hasta que se llega a un potencial V_0 a partir del cual no se observa el efecto fotoeléctrico; por este motivo, este potencial, que se llama potencial de frenada, es independiente de la intensidad de radiación, si bien depende de su frecuencia.

La sorpresa de los científicos del final del siglo XIX fue que la mayoría de los resultados experimentales que acabamos de exponer no fuesen compatibles con la **teoría electromagnética de Maxwell**. Esta teoría preveía que la energía de la radiación era absorbida por los electrones de manera continua, a medida que llegaba al metal transportado por la onda electromagnética, y que la radiación electromagnética transportaba una energía que era proporcional a su frecuencia, de manera que una radiación de frecuencia pequeña transportaba una cantidad de energía más baja que una radiación de frecuencia más grande.

Comparemos estas predicciones con los hechos experimentales que acabamos de exponer:

- Si tenemos en cuenta que la radiación electromagnética transporta energía, es de esperar que un aumento de la intensidad de la radiación incidente comporte un aumento de la intensidad eléctrica. Este hecho experimental no se contradice con las **leyes de Maxwell**, y, así, cuando la intensidad de la radiación es grande, los electrones absorben rápidamente una cantidad de energía suficiente para escapar del metal, y podemos decir que la emisión fotoeléctrica es prácticamente instantánea.
- Cuando la intensidad de la radiación es muy pequeña, pero, deducimos que los electrones tendrían que esperar un intervalo de tiempo más o menos grande hasta que hubiesen absorbido suficiente energía para escaparse del metal, en

contra del hecho experimental que muestra una emisión instantánea también para intensidades pequeñas.

- Haciendo un razonamiento similar al anterior, tendríamos que observar como, también frecuencias pequeñas, y después de un intervalo de tiempo determinado, los electrones podrían escapar del metal después de haber absorbido la energía suficiente para hacerlo. Por lo tanto, no tiene explicación el hecho que el efecto fotoeléctrico no se produzca a frecuencias más pequeñas que f_0 .
- El hecho que si se invierte el potencial se anula el corriente eléctrico se puede justificar diciendo que ahora los electrones son repelidos por la otra placa, de manera que, si conseguimos absorber la energía necesaria para escapar, el potencial V los hace volver a la placa irradiada. No tiene sentido, pero, que haya un potencial fijo V_0 bajo el cual no se observe el efecto; en principio, si se espera un intervalo de tiempo suficiente, algunos electrones podrían escapar una vez hubiesen absorbido la energía necesaria para hacerlo, aunque el potencial fuese muy negativo.
- El potencial de frenada nos da la idea, por lo tanto, que hay una energía cinética máxima E_{cmax} con la que pueden salir los electrones de la placa irradiada, que se ve compensada por la energía potencial eV_0 cuando se anula el corriente eléctrico:

$$E_c = E_p \rightarrow \frac{1}{2} m v_{m\grave{a}x}^2 = eV_0$$

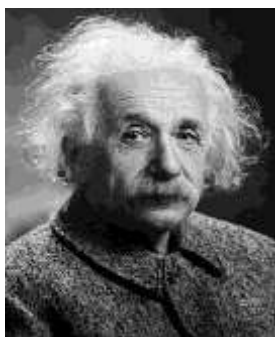
De esta manera, vemos como muchas predicciones teóricas, tanto del fenómeno que acabamos de conocer como del anterior, se contradicen con los hechos experimentales. Se demuestra, así, que algún aspecto de la **teoría de Maxwell** era erróneo, aunque en conjunto sea válido, ya que permite deducir la existencia de las ondas electromagnéticas y está de acuerdo con muchos hechos experimentales observados primero por **Hertz** y después por otros científicos.

Pero los mismos hechos experimentales muestran como ciertas conclusiones de esta teoría no se aguantan, sobre todo cuando se estudia la interacción de la radiación electromagnética con la materia. **Las ondas de Maxwell** no son como él las había imaginado y así, fenómenos como el efecto fotoeléctrico tienen una interpretación fácil si aceptamos como válida, de nuevo, la idea que la energía de la radiación electromagnética es absorbida en forma de cuánta, es decir, en forma discontinua.

Esta nueva hipótesis, juntamente con otras que veremos más adelante, hizo que todas las leyes de la física, no solo las del electromagnetismo, sino también las de la mecánica, se tuviesen que formular de nuevo. La contribución más importante en esta tarea la hizo **Albert Einstein**, que resolvió brillantemente todas las contradicciones que presentaba la teoría con los hechos observados, y fue el principal artífice de una nueva física.

1.2.1. Explicación de Einstein. El fotón

Albert Einstein fue el primer científico que se dio cuenta que las evidencias experimentales a las cuales se habían llegado se podían coger como hipótesis de partida. El gran mérito de **Einstein** es que, a partir de estas premisas básicas, dedujo de una manera muy sencilla una serie de consecuencias que explicaban los fenómenos observados hasta el momento, como, por ejemplo, el efecto fotoeléctrico.



Albert Einstein

Einstein hizo pública su explicación del efecto fotoeléctrico en el año 1905. En su trabajo retomó la idea de **Planck** de los **cuántos de energía** y afirmaba que tanto la luz como cualquier otro tipo de radiación electromagnética consiste en un haz de partículas, que llamó fotones, que se transmiten a través del espacio vacío **en forma de ondas electromagnéticas**, y que se mueven siempre a la misma velocidad c ; cuando la radiación interactúa con la materia se muestra su aspecto corpuscular, y la radiación es absorbida o emitida en **forma de fotones**. Así pues, los fotones son los paquetes de energía, o cuántos, que ya había postulado **Planck** unos años atrás.

Si admitimos que los fotones tienen una energía E dada por la expresión que ya planteó **Planck**: $E = h f$, podemos interpretar fácilmente el efecto fotoeléctrico si aplicamos el principio de conservación de la energía y si consideramos que los electrones del electrodo metálico pueden absorber un fotón de la radiación incidente, adquirir su energía y escapar del metal.

Una parte de la energía del fotón absorbida se usa para superar la energía mínima necesaria para que el electrón se libere de la red cristalina del metal; esta energía se llama trabajo de extracción W_0 . El resto de energía se transfiere en forma de energía cinética comunicada al electrón. Por lo tanto, podemos establecer:

$$E = E_c + W_0 \rightarrow hf = \frac{1}{2} m v_{m\grave{a}x}^2 + W_0$$

Así, se explica fácilmente el hecho que el efecto fotoeléctrico no tenga lugar para radiaciones de frecuencia más pequeña que la frecuencia umbral; en este caso, un fotón no proporciona la energía $E = hf$ suficiente para que se supere el trabajo de extracción de un electrón, a causa del valor pequeño de f : $hf < W_0$.

En cambio, existe una frecuencia f_0 para la cual la energía del fotón iguala el trabajo de extracción, y que produce el efecto fotoeléctrico; esta frecuencia es la frecuencia umbral:

$$W_0 = hf_0$$

Para frecuencias más grandes que la frecuencia umbral, la energía excedente se comunica en forma de energía cinética del electrón, y podemos establecer:

$$hf = \frac{1}{2} m v_{m\grave{a}x}^2 + hf_0$$

El potencial de frenada V_0 también se interpreta ahora fácilmente si consideramos que, para una radiación de frecuencia fija f , es imposible que un fotón comunique a un electrón una energía cinética adicional que le permita superar la barrera de energía potencial eV_0 . Si recordamos que

$$eV_0 = \frac{1}{2} m v_{m\grave{a}x}^2$$

vemos que:

$$hf = eV_0 + hf_0 \rightarrow eV_0 = hf - hf_0 \rightarrow V_0 = \frac{h}{e}f - \frac{hf_0}{e}$$

Esta última expresión nos demuestra que el potencial de frenada V_0 es directamente proporcional a la frecuencia f de la radiación incidente, completamente de acuerdo con los hechos experimentales.

El efecto fotoeléctrico tiene una aplicación práctica en las células fotoeléctricas: se aplica para detectar luz, y poder gobernar un circuito eléctrico como, por ejemplo, el de un relé.

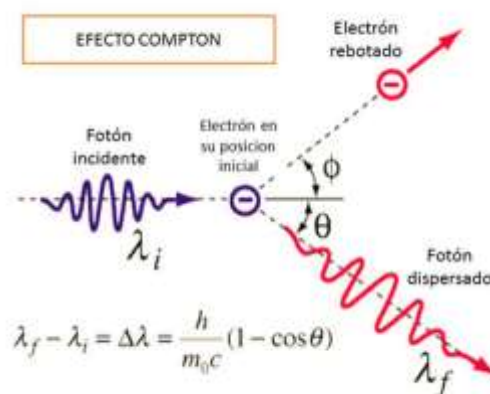
Para acabar, cabe decir que, como demostraremos más adelante, la cantidad de movimiento de un fotón es:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

1.3. El efecto Compton

La **teoría fotónica de Einstein** representa un cierto retorno al modelo corpuscular de la luz, sin que se pueda dejar de banda su carácter ondulatorio; de hecho, este nuevo modelo es una teoría híbrida entre el modelo ondulatorio y el corpuscular. Este nuevo modelo quedó reforzado el año 1923, cuando el científico norteamericano **Compton** descubrió el fenómeno que lleva su nombre.

Mientras estudiaba la absorción de rayos X para materiales que contienen carbono, **Compton** observó como la radiación incidente era difundida por los electrones del material, de manera que la radiación difundida tenía una frecuencia más baja que la radiación incidente y se liberaban electrones del material. Este fenómeno se puede interpretar fácilmente si pensamos que la **radiación electromagnética** consiste en un haz de partículas o fotones, que chocan elásticamente con los electrones del material.



Efecto Compton

Si consideramos que los fotones de la radiación incidente tienen suficiente energía, como pasa con los rayos X, los electrones ligados a los átomos pueden ser arrancados con facilidad y se pueden considerar partículas libres en reposo. Durante el choque elástico que se verifica entre el fotón y el electrón, el electrón absorbe parte de la energía $E = hf$ del fotón incidente, de manera que el fotón difundido sale con una energía $E' = hf'$ más pequeña que la del fotón incidente, y el electrón adquiere una energía cinética determinada $E_c = \frac{1}{2} m_e v_e^2$. Por lo tanto, si aplicamos el principio de conservación de la energía, entonces:

$$hf = hf' + \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

También podemos aplicar el principio de conservación de la cantidad de movimiento. Como veremos en el siguiente punto, la cantidad de movimiento de un fotón de frecuencia f viene dada por la expresión:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

Mientras que la cantidad de movimiento del electrón es $p_e = m_e v_e$. Por lo tanto:

$$p = p' + p_e$$

$$\left(\frac{hf}{c}, 0\right) = \left(\frac{hf'}{c} \cos\theta, \frac{hf'}{c} \sin\theta\right) + (m_e v_e \cos\phi, -m_e v_e \sin\phi)$$

Si combinamos esta última ecuación con la expresión anterior para la energía, obtenemos, en una primera aproximación:

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{f'} = \frac{h}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \rightarrow \frac{c}{f'} - \frac{c}{f} = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

Como h , m_e i c son constantes, podemos ver que el término $\frac{h}{m_e c}$ también es una constante, conocida con el nombre de longitud de onda Compton de los electrones, que se representa por λ_c . Si sustituimos los valores de estas constantes, se puede comprobar que λ_c vale $2,4262 \cdot 10^{-12}$ m.

Si recordamos que $\frac{c}{f}$ corresponde a la longitud de onda del fotón, llegamos finalmente

a:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta)$$

Esta última expresión, demostrada experimentalmente por **Compton**, refuerza el concepto de fotón y muestra la validez de las ideas de **Einstein** sobre la radiación electromagnética.

1.4. Dualidad onda-corpúsculo. Introducción a la mecánica cuántica

Ya hemos visto que la hipótesis de **Einstein** del fotón representa un retorno al modelo corpuscular de la luz, sin que ahora se puedan dejar de banda sus características ondulatorias y, así, se iba a convertir en la base de un nuevo modelo. Esta idea, o **hipótesis de la dualidad onda-corpúsculo** de la luz y de cualquier radiación electromagnética, fue generalizada posteriormente con el argumento que, así como

ocurre con los fotones, cualquier otra partícula elemental, como por ejemplo los electrones, tienen este carácter dual, que les hace mostrar aspectos ondulatorios en determinadas circunstancias y aspectos corpusculares entre otros.

1.4.1. Hipótesis de Broglie

En el año 1923, el físico francés **Louis de Broglie** extendió a todas las partículas la doble característica onda-corpúsculo de la luz, y postuló que no solo los fotones sino todas las otras partículas elementales tienen a la vez características típicamente corpusculares al lado de otras típicamente ondulatorias.

Para demostrar este hecho, **De Broglie** indicó que la longitud de onda λ correspondiente a la onda asociada a una partícula de masa m que se mueve a una velocidad v es:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$



Louis de Broglie

donde h es la constante de **Planck**, y p la cantidad de movimiento de la partícula.

El comportamiento ondulatorio de los electrones se demostró empíricamente el año 1927, cuando científicos británicos y americanos consiguieron difractar un haz de electrones mediante un cristal. Posteriormente se consiguió difractar un haz de neutrones, así como también iones de hidrógeno y helio. Ahora bien, si intentamos poner en evidencia el carácter ondulatorio para cuerpos macroscópicos, obtendremos resultados nulos a causa del pequeño valor de la constante de Planck h .

Aunque esta idea pueda parecer contradictoria, tenemos que pensar que las partículas elementales como el fotón, el electrón, el protón, etc., tienen unas dimensiones microscópicas, y, en estas condiciones, no podemos aplicar los modelos de la naturaleza que utilizamos a escala macroscópica. La dualidad onda-corpúsculo de la materia y la radiación dieron lugar a una nueva mecánica llamada mecánica cuántica, en la cual las partículas son consideradas “paquetes” de ondas. Esta nueva teoría física también denominada **mecánica ondulatoria**, fue desarrollada por los científicos **Erwin Schrödinger** y **Werner Heisenberg** durante los años inmediatamente posteriores al 1926.



Erwin Schrödinger



Werner Heisenberg

Una aplicación de la doble naturaleza onda-corpúsculo es el **microscopio electrónico**, en el cual se utilizan haces de electrones en lugar de haces de luz que se utilizan en un microscopio óptico. En el microscopio electrónico, los electrones son acelerados por el campo eléctrico proporcionado por una diferencia de potencial.

La imagen se forma de manera análoga a la de un microscopio óptico, pero se utilizan lentes magnéticas en lugar de lentes ópticas. La lente magnética consiste en una bobina por la cual pasa una cierta corriente y, cuando un electrón atraviesa la bobina, cambia la dirección de su movimiento a causa de la fuerza magnética efectuada por la bobina sobre el electrón, el cual se focaliza en un punto determinado.



Microscopio electrónico

La expresión dada por **De Broglie** para la longitud de onda de una partícula nos permite deducir cual es la cantidad de movimiento de los fotones:

$$\lambda = \frac{h}{p} \rightarrow p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cdot f}{c} \rightarrow p = \frac{E}{c}$$

1.4.2. Principio de incertidumbre

La mecánica cuántica considera que cada partícula tiene asociada una función de onda ψ que depende tanto de la posición como del tiempo, de manera que la amplitud de esta función de onda representa la probabilidad de encontrar una partícula en una región del espacio determinada; aparece, así, una cierta deslocalización de la posición de la partícula, de manera que esta no se puede determinar de manera exacta, y no puede ser descrita en términos de su trayectoria, tal y como hacia la mecánica clásica. Se substituyen las trayectorias perfectamente definidas de la mecánica clásica para las funciones de onda de la mecánica cuántica, las cuales determinan las regiones del espacio donde es probable encontrar la partícula.

Es en este sentido que se suele decir que la física moderna **rompe el determinismo** de la física clásica. Recordemos, de nuevo, que las dimensiones que hace falta considerar cuando se estudia el movimiento de una partícula son tan pequeñas, que no podemos explicar los fenómenos implicados aquí con modelos basados en nuestra visión del mundo macroscópico.

El hecho de que en la mecánica cuántica no se pueda determinar de manera exacta la posición de una partícula tiene consecuencias importantes sobre la concepción del mundo microscópico; en efecto, esta idea dio lugar a un nuevo principio fundamental, conocido como **el principio de incertidumbre**, formulado por **Heisenberg** el año 1927.

El principio de incertidumbre establece que es imposible medir simultáneamente y con total exactitud la posición y la cantidad de movimiento de una partícula, de manera que la incertidumbre en la posición Δx y la incerteza en la cantidad de movimiento Δp verificamos que:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

donde h es la constante de **Planck**.

Este principio nos indica que, si intentamos medir la posición de una partícula con exactitud muy grande, de manera que su incertidumbre Δx sea prácticamente nula, entonces la incertidumbre de la cantidad de movimiento será muy grande, para así satisfacer la expresión anterior, y, por lo tanto, la cantidad de movimiento queda indeterminada, y no podemos saber el valor exacto. Este hecho se evidencia en el siguiente ejemplo.

El principio de incertidumbre es igualmente válido para cualquier par de magnitudes que sean conjugadas, como la posición y la cantidad de movimiento. Así, si en la expresión anterior multiplicamos y dividimos por el término $\frac{\Delta p}{2m}$, se puede demostrar que la energía y el tiempo, que también son magnitudes conjugadas, verifican el principio de incertidumbre:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

El principio de incertidumbre no es sino una consecuencia del hecho que es imposible observar un sistema atómico o subatómico sin estorbarle. Cuando estudiamos algún fenómeno microscópico: lo tenemos que iluminar para observarlo. Pero si, por ejemplo, queremos observar una partícula elemental, como un electrón, cuando la iluminamos estamos lanzando fotones contra él, que le chocarán y alterarán su posición y la velocidad. Así, deducimos que el mismo proceso de observación altera el sistema que se observa.

El ejemplo anterior muestra que el principio de incertidumbre y, por lo tanto, la mecánica cuántica, solo se tiene que tener en cuenta cuando consideramos cuerpos de dimensiones muy pequeñas, como es el caso de las partículas elementales, los átomos y las moléculas. Cuando sobrepasamos los órdenes de magnitud implicados en estos cuerpos, el principio de incertidumbre queda enmascarado y podemos aplicar la mecánica clásica y considerar que el movimiento de los cuerpos se puede determinar de manera prácticamente exacta, con trayectorias perfectamente definidas.

En contra, considerando de nuevo el átomo, la mecánica cuántica nos indica que no podemos hablar de órbitas perfectamente definidas por los electrones que se mueven alrededor del núcleo atómico, ya que sus posiciones y velocidades están indeterminadas tal y como indica el principio de incertidumbre. En este caso, tenemos que hablar de ondas de probabilidad, es decir, regiones alrededor del núcleo donde es probable encontrar los electrones. Para un electrón determinado, esta región de probabilidad configura lo que se conoce con el nombre de **orbital** y se dice que el electrón está en un **estado cuántico** concreto.

1.5. Introducción a la teoría de la relatividad

La mecánica cuántica se desarrolló a partir del descubrimiento de la dualidad onda-corpúsculo de la materia y la radiación, y constituye una de las teorías principales de la

física moderna. Otro pilar de la nueva física es **la teoría de la relatividad**, que también fue propuesta por el genio creador de **Einstein**.

Para entender esta teoría nos hemos de remontar a finales del s.XIX. Durante esta época, antes que se descubriesen fenómenos como el de la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y otros, la física clásica newtoniana parecía haber llegado a su cima. Los científicos de la época pensaban que los fenómenos naturales se podían explicar a partir de sus postulados, los cuales se basaban en las leyes de la mecánica de **Newton** y en las leyes del electromagnetismo de **Maxwell**; la óptica es deducida de estas últimas, ya que la luz es una onda electromagnética.

La mecánica había demostrado hasta entonces su influencia en la búsqueda de un sistema de referencia en reposo absoluto; pero, aunque no ofrecía ninguna explicación convincente, la predicción del éter a la cual parecía que daban pie **las leyes de Maxwell**, hacía creer que se estaba en condiciones de detectar este sistema de referencia absoluto a base de procedimientos electromagnéticos o ópticos, sistema que tenía que ser el mismo éter.

Por lo tanto, durante esta época los físicos buscaban un método que les permitiese medir la velocidad de la Tierra respecto al éter, y que confirmase de una manera absoluta. A pesar de todo, como veremos a continuación, todos los intentos que ha habido para medir esta velocidad han tenido un resultado nulo, lo cual demuestra que el concepto de éter no tiene ningún sentido, tal y como demostró un experimento a finales del siglo XIX. Este experimento se repitió diversas veces durante el siglo XX y siempre dio un resultado nulo.

El fracaso de la idea del éter supuso, en cierta manera, el fracaso de la física clásica, ya que hizo ver que la hipótesis del sistema de referencia en reposo absoluto era un concepto sin significado real. El abandonamiento de la idea del éter, juntamente con los hechos experimentales que dieron pie a la mecánica cuántica, puso en evidencia la necesidad de replantear toda la física. Como ya hemos comentado, a principios del siglo XX se origina una nueva revolución científica que hizo cambiar los conocimientos que hasta entonces se tenían de la naturaleza.

1.5.1. El experimento de Michelson-Morley

Durante el año 1881 tuvo lugar un experimento crucial que permitió refutar la idea del éter y que se convirtió en uno de los fundamentos de la física moderna.

El mismo **Maxwell** se había preguntado, dos años antes, sobre la posibilidad de medir la velocidad de la Tierra respecto al éter mediante la observación de los eclipses de los satélites del planeta Júpiter, y así lo hizo saber a compañeros norteamericanos.

Uno de ellos el físico **Albert A. Michelson**, se interesó por el tema, pero propuso que se midiese esta velocidad con procedimientos que no implicasen observaciones astronómicas, sino únicamente terrestres, y al cabo de dos años dio a conocer sus resultados.

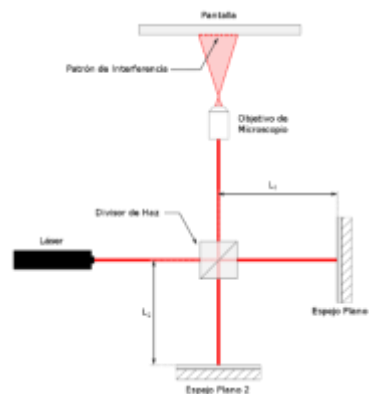


Albert Abraham Michelson

Para entender el experimento de **Michelson**, tenemos que tener en cuentas si, suponemos un éter en reposo absoluto y una tierra que se mueve respecto a este éter, la velocidad de la luz que mide un observador terrestre se tendría que ver incrementada o disminuida por la velocidad absoluta de la Tierra relativa al éter, siempre que se considere la luz como una onda la velocidad de la cual no depende de la velocidad de la fuente, como pasa con el resto de ondas.

El dispositivo experimental de **Michelson**, conocido con el nombre de **interferómetro de Michelson**, está formado por una fuente de luz F , un sistema de láminas de vidrio semitransparentes y de espejos y un telescopio T .

El interferómetro funciona de la manera siguiente: un rayo de luz procedente de F incide sobre una lámina semitransparente L y se separa en dos, un rayo que atraviesa la lámina y otro que se refleja; estos dos rayos se reflejan en dos espejos, invierten su recorrido y llegan otra vez a la lámina L . Otra vez tiene lugar la separación de cada rayo en dos, de manera que dos rayos llegan al telescopio T , e interfieren dando una serie de franjas claras y oscuras alternándose.



Funcionamiento del interferómetro de Michelson-Morley

Supongamos que uno de los brazos del interferómetro, es paralelo a la velocidad v de la Tierra respecto del éter; es de esperar que, si esta velocidad hace variar la velocidad de la luz, los dos rayos recorran sus respectivos caminos en un tiempo que dependerá de v . En efecto, por el brazo paralelo, la velocidad de la luz y de la Tierra son paralelas, mientras que estas velocidades son perpendiculares por el otro brazo; por lo tanto, la velocidad de la luz relativa al interferómetro tendría que ser $c + v$ y $c - v$ para el primer brazo y $\sqrt{c^2 + v^2}$ para el segundo. Estos valores influirán en la diferencia entre el tiempo de llegada de los dos rayos a T y definirán una posición determinada de las franjas de interferencia.

Si ahora giramos el interferómetro 90° , la situación queda invertida, y, en principio, es de esperar una diferencia de tiempo entre los caminos recorridos diferente de la del caso anterior, ya que las velocidades de la luz relativas a cada brazo cambian respecto del caso anterior; por lo tanto, hace falta esperar una posición de las franjas de interferencia también diferente o, dicho de otra manera, se tendría que observar un corrimiento de las franjas. Por sorpresa del mismo **Michelson**, una vez hechas diversas observaciones, las franjas no experimentaban ningún corrimiento cuando se situaba el interferómetro en diversas orientaciones.

Este resultado nulo del experimento indicaba que las suposiciones en las cuales se basaba eran erróneas y que, en palabras de **Michelson**, *“la interpretación de estos resultados es que no había corrimiento de las bandas de interferencia y, por lo tanto, el resultado de la hipótesis de la existencia de un éter estacionario demuestra que esta hipótesis es incorrecta”*.

El año 1887, **Michelson** volvió a efectuar su experimento, esta vez en colaboración con **Edward Morley**, utilizando un interferómetro más preciso; otra vez obtuvo unos resultados negativos, ya que no observó ningún corrimiento de las franjas. Esta evidencia experimental nos permite deducir que la luz recorre los dos brazos siempre con la misma velocidad c , sin que se pueda aplicar la ley de adición de velocidades establecida por las transformaciones de **Galileo**.

Así pues, este experimento tiene dos consecuencias muy importantes; la primera es que los científicos habían estado buscando una cosa que no existía, el éter, y que las suposiciones en las cuales se basaba la física clásica no eran aplicables a un fenómeno como la luz, ya que las transformaciones de **Galileo** de la velocidad no se verifican en el caso de la luz. La segunda es que prueba experimentalmente que el valor de la velocidad de la luz es una constante universal y que, por lo tanto, no depende de la

velocidad del observador que mide su valor. Como veremos a continuación, **Einstein** cogió estas dos ideas como la base de una nueva teoría física.

1.5.2. Los postulados de la teoría de la relatividad restringida

A parte de su explicación del efecto fotoeléctrico, la contribución más importante de **Einstein** a la ciencia es que fue el creador de unas nuevas concepciones físicas, que quedan recogidas en la teoría de la relatividad.

Esta teoría tiene dos campos de aplicación: **la teoría de la relatividad restringida**, cuando estudiamos fenómenos en los cuales el movimiento es uniforme, y **la teoría de la relatividad general**, aplicable a sistemas de referencia acelerados.

Einstein dedujo la teoría de la relatividad restringida cogiendo como punto de partida las conclusiones del experimento de **Michelson-Morley**; como esta había dado dos resultados negativos, quedaba demostrado que no era posible detectar en ninguna situación el movimiento respecto al éter. Por lo tanto, delante de esta imposibilidad, **Einstein** concluyó que el éter no existía, y afirmó que la idea de un éter como sistema de referencia en reposo había fracasado.

De esta manera se hace evidente que no puede existir ningún sistema de referencia inercial que esté privilegiado sobre los otros. En efecto, hemos de concluir que todos los sistemas tienen que ser igualmente equivalentes, de manera que no solo las leyes de la mecánica, sino también las leyes del electromagnetismo, no permitían distinguir el uno del otro y tienen que ser las mismas en todos. Esta idea fue cogida por **Einstein** como el primero de los postulados básicos de la teoría de la relatividad restringida:

Primer postulado o principio de equivalencia: *las leyes de la física se verifican de manera idéntica en todos los sistemas inerciales, sin que sea posible deducir a través suyo ninguna distinción entre un sistema inercial u otro.*

Otra conclusión importante se puede extraer también del experimento de **Michelson-Morley** cuando dirigimos el interferómetro hacia la luz de una estrella fija. Las estrellas fijas son un conjunto de estrellas tan alejadas que su movimiento respecto al sistema solar es prácticamente inapreciable. Sabemos que la Tierra se mueve alrededor del Sol y, por lo tanto, podemos considerar que la Tierra está en movimiento respecto a las estrellas fijas; así, si en un instante determinado la Tierra se mueve acercándose a la

estrella con velocidad v , seis meses más tarde se moverá alejándose de la estrella a velocidad $-v$.



Ejemplificación de la distancia de la Tierra respecto a una estrella fija

Si situamos el interferómetro en una posición adecuada, se puede conseguir que un brazo sea paralelo a la velocidad de la luz de la estrella y el otro perpendicular, y se tendría que esperar un corrimiento de las franjas cuando se gira el aparato; el experimento da, en cualquier caso, un resultado negativo, y la velocidad de la luz que proviene de la estrella no se ve afectada por el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, y se mide siempre el mismo valor c sea cual sea el movimiento del observador terrestre.

Este principio sustituye, así, un concepto de lo absoluto por otro; no existe ningún sistema de referencia absoluto, pero el que hemos de considerar absoluto es el valor de la velocidad de la luz, ya que todos los observadores miden el mismo valor c , sea cual sea su movimiento. **Einstein** tomó esta constatación como **el segundo postulado de la teoría de la relatividad restringida**.

Segundo postulado: *la velocidad de la luz es una constante universal, invariable para todos los observadores inerciales.*

Cabe remarcar que este valor es precisamente eso, una constante, y que su valor es el mismo en cualquier situación, aunque la luz se transmita a través de un medio transparente; recordemos que, en este caso, habíamos visto como la velocidad es más pequeña que en el vacío. En realidad, la velocidad de la luz continúa siendo c , pero lo que sucede es que los fotones que forman la luz interactúan con los átomos que forman el medio, y pueden ser absorbidos y posteriormente reemitidos por algunos de estos átomos, por la cual cosa sufren un retraso; este hecho no es más que una consecuencia

de los fenómenos de dispersión que tienen lugar cuando la luz se propaga a través de un medio.

Aunque los fotones se mueven siempre con velocidad c , la dispersión efectuada por el medio sobre los fotones origina, en conjunto, una transmisión *atrasada* de la onda a través del medio, y da la impresión que la velocidad de la luz en el medio es más pequeña que la velocidad de la luz en el vacío.

Este hecho es insignificante en el caso del aire, pero se aprecia cuando la luz se transmite por el agua y por medios transparentes como el vidrio, mucho más densos que el aire. En todos estos medios, la transmisión de la onda, en conjunto, se hace a una velocidad media más pequeña que c .

1.5.3. Consecuencias del segundo postulado. La dilatación temporal

Los fotones se mueven siempre a la velocidad de la luz c . Esto quiere decir que cualquier observador siempre mide el mismo valor c para la velocidad de la luz, sea cual sea su velocidad respecto a otros observadores, exceptuando el caso que acabamos de comentar, en el cual la luz sufre un retraso a causa de la dispersión cuando se transmite en un medio más o menos denso.

Este hecho sorprende desde el punto de vista de la física clásica. En efecto, de acuerdo con las leyes de **Newton**, si un observador O solidario a un sistema inercial S mide una velocidad c para la luz, otro observador inercial O' que se mueva a una velocidad v' respecto a O tendría que medir una velocidad $c' = c - v'$; recordemos que esto es lo que establece la ley de transformaciones de las velocidades de la mecánica clásica, que se resume en las llamadas **transformaciones de Galileo**.

El hecho que c tenga un valor constante independientemente del observador indica que estas leyes no pueden ser correctas y que se tienen que sustituir por otras. Por lo tanto, la física clásica deja de tener validez en el mismo momento en el cual afirmamos el postulado de la invariancia de la velocidad de la luz, y, como demostró **Einstein**, esto tiene unas consecuencias muy importantes sobre las concepciones del espacio y del tiempo.

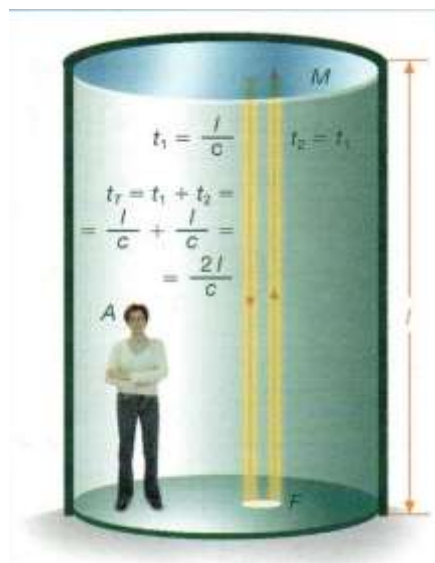
Según **Newton**, el tiempo es absoluto, es decir, es el mismo para cualquier observador; pero si se admite como válido el postulado de la constancia de c , se deduce que el

tiempo va íntimamente ligado a cada observador, y que los sucesos que tienen una duración determinada en un sistema pueden tener una durada diferente cuando se observan desde otro sistema en movimiento respecto al primero.

Se demuestra, así, que el tiempo es relativo y depende del sistema de referencia.

Para entender esta constatación, consideramos la siguiente situación, propuesta por el mismo **Einstein**. Supongamos que construimos un **reloj de luz** con una fuente luminosa F , situada en la base de un cilindro muy largo de longitud l , y un espejo M situado en la cara superior. La fuente emite un polvo de luz en un instante determinado, de manera que la unidad de tiempo del reloj t_T viene fijada por el intervalo de tiempo que tarda la señal luminosa en hacer el camino de ida hasta el espejo superior, reflejarse y recorrer el camino de vuelta hasta la base; llamamos **tiempo propio** a este intervalo de tiempo t_T . La longitud total recorrida por el rayo es $2l$, por lo tanto, el tiempo propio es:

$$t_T = t_1 + t_2 = 2t_1 = \frac{2l}{c}$$



Reloj de luz; la unidad de tiempo t_T es el tiempo que tarda el rayo de luz para ir hasta M , reflejarse y volver al punto de partida

Así lo mide un observador A , solidario con el sistema de referencia S definido por el cilindro.

Consideramos ahora que el reloj, que define el sistema de referencia S , se mueve respecto a otro sistema inercial S' con una velocidad v , de manera que, en el instante inicial t_0 , ambos sistemas coinciden; si en este instante t_0 , el reloj emite un polvo

luminoso, el suceso representado por la emisión del polvo y la llegada de éste al punto de partida es observado de la manera siguiente:

Para un observador B , solidario con el sistema S' , el rayo de luz tiene que recorrer una

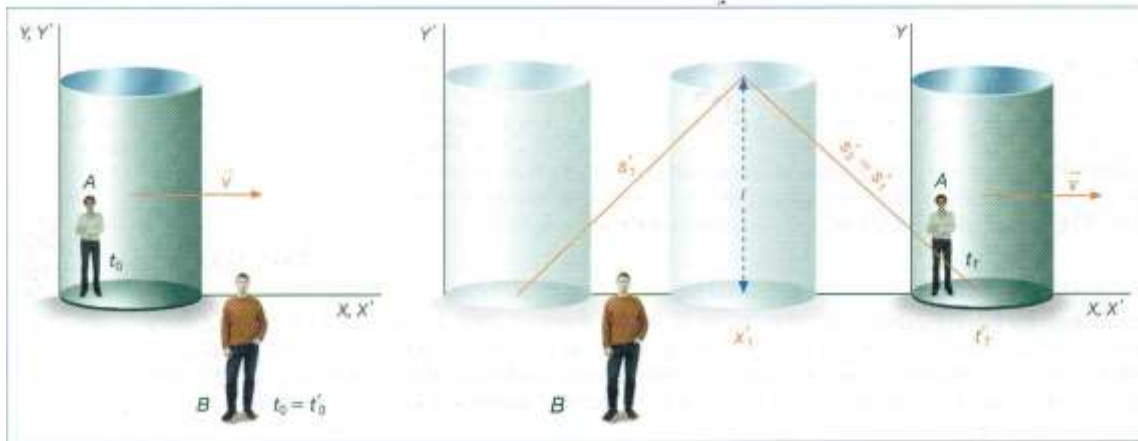


Figura explicativa del párrafo anterior

distancia más grande, pero la velocidad de la luz tiene que ser la misma para A , de acuerdo con el segundo postulado de la relatividad restringida. Esto implica que la velocidad v del sistema de referencia no puede influir, de ninguna manera, en la velocidad del rayo de luz, en contra de lo que indican las transformaciones de **Galileo**. Por lo tanto, el observador B verá el suceso con una duración t'_T diferente a t_T ; en efecto, el rayo de luz recorre, para B , una distancia s'_T dada por $s'_T = 2s'_1$.

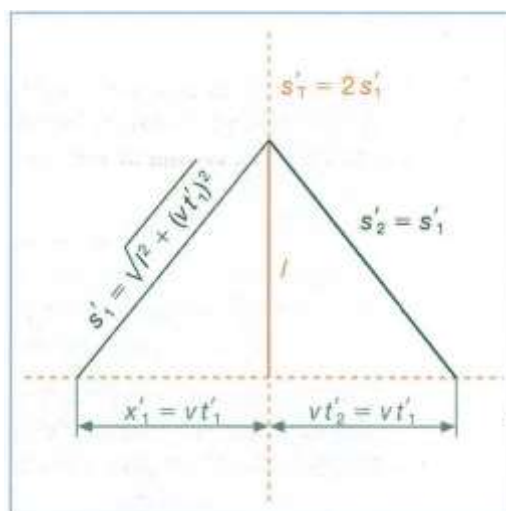


Figura explicativa del párrafo anterior

En el tiempo t_1' que tarda el polvo de luz en llegar al espejo, el cilindro se ha movido hasta la posición $x_1' = vt_1'$; por lo tanto, el camino recorrido por el rayo es:

$$s_1' = \sqrt{l^2 + x_1'^2} = \sqrt{l^2 + (vt_1')^2}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad de la luz tiene el mismo valor c para los dos observadores, el tiempo t_1' es:

$$t_1' = \frac{s_1'}{c} = \frac{\sqrt{l^2 + (vt_1')^2}}{c} \rightarrow c^2 t_1'^2 = l^2 + v^2 t_1'^2 \rightarrow t_1'^2 (c^2 - v^2) = l^2$$

$$t_1' = \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{\frac{l}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow t_1' = \frac{t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde hemos tenido en cuenta que $t_1 = \frac{l}{c}$. Si recordamos que $t_T = 2t_1$ y $t_T' = 2t_1'$, llegamos al siguiente resultado final:

$$t_T' = 2t_1' = \frac{2t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow t_T' = \frac{t_T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esta última expresión demuestra que el suceso tiene una duración diferente según si se observa en el sistema S o en el sistema S' ; el observador B mide un intervalo de tiempo t_T' más grande que el observador A , y, por lo tanto, concluye que los sucesos que observa en el sistema S transcurren más lentamente de lo que sería esperable si S estuviese en reposo. Digamos que el intervalo de tiempo que dura un determinado suceso no es el mismo en diferentes sistemas de referencia en movimiento relativo, y que hay una dilatación cuando se mide en un sistema de referencia en movimiento respecto del mismo suceso. Así, los relojes en movimiento se ralentizan.

1.5.4. Las transformaciones de Einstein-Lorentz. La contracción de la longitud

Se podría pensar que el fenómeno de *la dilatación temporal* se debe a la forma de medir el tiempo en este experimento mental. En el caso de un reloj de pared, es el período de un péndulo el que nos marca la unidad de tiempo; en el caso de un reloj digital, es la oscilación de un cristal de cuarzo el que indica este tiempo. Podemos ver que, en cualquier situación, la medida del tiempo viene fijada por el período de oscilación indicado por algún suceso, como es el caso, por ejemplo, del movimiento de un péndulo, de la oscilación de un cristal de cuarzo o, incluso, del movimiento de ida y vuelta del polvo luminoso en el reloj de **Einstein**.

Incluso podríamos utilizar la duración de nuestra vida como unidad de tiempo, y, en cualquier situación, observar como los relojes se retrasan en los sistemas que se mueven respecto a nosotros, y los sucesos que observar se frenan; de todos modos, esta ley fundamental, consecuencia del postulado de invariancia de la luz, pasa prácticamente desapercibida en la mayoría de situaciones de nuestra vida cotidiana, ya que las velocidades v implicadas son muy pequeñas comparadas con c .

Por lo tanto, la diferencia entre los tiempos medidos en diversos sistemas es prácticamente inapreciable cuando estos sistemas se mueven a una velocidad mucho más pequeña que c ; el tiempo transcurre de manera prácticamente idéntica y podemos utilizar las transformaciones de **Galileo** en estas situaciones, excepto en el caso de la luz.

Sin embargo, cuando la velocidad del observador tiene un valor próximo a c , el efecto de dilatación temporal se hace patente y entonces hemos de aplicar otras transformaciones para pasar de un sistema a otro, conocidas como las transformaciones de **Einstein-Lorentz**:

$$x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad t' = \frac{t-\frac{x \cdot v}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad y' = y \quad z' = z$$



Hendrik Antoon Lorentz

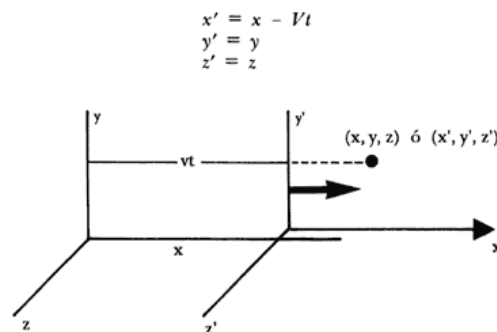
Estas expresiones se reducen a las propuestas por las transformaciones de **Galileo**, siempre que se considere v mucho más pequeña que c ; en este caso el término

$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ es prácticamente la unidad mientras que $\frac{x}{c}$ es prácticamente nulo.

Por lo tanto, obtenemos las leyes de transformación de **Galileo**.

Una consecuencia de estas transformaciones es el efecto de la dilatación temporal, que ya se ha comentado. Otro fenómeno que deriva es la contracción que experimenta la longitud de un objeto cuando se mide en un sistema de referencia en movimiento respecto a este objeto.

Con las transformaciones de **Einstein-Lorentz** se puede demostrar que esta contracción solo tiene lugar en la dirección del movimiento. Consideremos por ejemplo una varita que se mueve a una determinada velocidad respecto de un sistema de referencia en reposo S , de manera que su longitud coincide con la dirección del movimiento.



Demostración de la contracción unidireccional

Supongamos que la longitud de la varita, respecto del sistema de referencia S' que le es solidario, es l_0 ; esta longitud se llama longitud propia. Si ahora medimos la longitud de la varita respecto del sistema en reposo S , encontramos un valor para l dado por la siguiente expresión, obtenida aplicando la transformación de **Lorentz** para la coordenada x :

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

1.5.5. Equivalencia masa-energía

Otra consecuencia importante de la teoría de la relatividad es que la masa de un cuerpo no es la misma cuando se observa desde diferentes sistemas de referencia en movimiento relativo, en contra de la idea que proponía la física clásica según la cual la masa era invariante. **Einstein** demuestra que la masa de un cuerpo aumenta cuando este se mueve a una velocidad determinada v de acuerdo con la siguiente expresión:

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

donde m_0 es la masa del cuerpo cuando está en reposo respecto del observador y m es la masa del cuerpo cuando se mueve a una velocidad v respecto al observador. Este hecho es fácil de entender si admitimos que, al comunicar energía a un cuerpo, su masa aumenta; así, si vamos incrementando la velocidad del cuerpo, también aumenta su energía cinética y, consecuentemente, su masa.

Por lo tanto, podemos considerar que estas dos magnitudes, la energía y la masa, son intercambiables; dicho de otra manera, podemos considerar que la masa de un cuerpo es otra forma en la cual se puede presentar la energía. Así, un cuerpo de masa m contiene una cantidad neta de energía E dada por la expresión:

$$E = mc^2$$

Estas dos expresiones han estado demostradas experimentalmente en muchas ocasiones, y han de ser consideradas como principios básicos de la naturaleza; pero la primera solo se evidencia cuando las velocidades tienen valores próximos a la velocidad de la luz. Las partículas elementales como el electrón, por ejemplo, pueden ser aceleradas hasta velocidades muy altas que nunca pueden sobrepasar la velocidad de la luz, en concordancia con la expresión de la variación de la masa.

Por otra parte, se ha comprobado la validez de la equivalencia entre la masa y la energía estudiando los choques entre partículas elementales aceleradas, ya que en estos choques la desaparición de una cierta cantidad de masa m comporta la aparición de una cantidad de energía equivalente E en forma de fotones dada por la expresión anterior. Esto es lo que también pasa cuando se forma un determinado núcleo a partir de los

nucleones que lo forman. En este caso, la diferencia entre la masa de un núcleo determinado y la suma de las masas de sus protones y neutrones cuando están aislados, o **defecto de masa**, se transforma en una cantidad equivalente de energía dada por la expresión anterior.

Anexo 2. Introducción a la física nuclear

La física nuclear es una rama de la física que estudia las propiedades y el comportamiento de los núcleos atómicos. 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.

2.1. Las partículas elementales

2.1.1. Historia

En 1897 el físico **J. J. Thomson** descubrió el electrón, partícula de carga negativa, que está en las capas exteriores del átomo. En 1920 se descubrió una partícula de carga positiva llamada protón, más tarde en 1932, se descubrió una de carga neutra, llamada neutrón. Estas tres clases de partículas componían **el modelo atómico de Bohr**. Mediante este modelo, se podían descubrir los átomos que conforman la materia, o sea, los elementos químicos.

Pero esta teoría no explicaba el resultado de ciertos experimentos, hasta que algunos científicos postularon la existencia de partículas más pequeñas. **A. M. Dirac** postuló que existía una partícula con la misma masa del electrón, pero con carga positiva, el positrón. Esta teoría se demostró en 1932 con la radiación cósmica; cuando un electrón y un positrón chocan, se destruyen, y producen una radiación de aniquilación. Las partículas que desaparecen al chocar se llaman antipartículas, los antiprotones se descubrieron en 1955 y los antineutrones en 1956. Estos trabajos pudieron encontrar la **antimateria**, y posteriormente crearla en los laboratorios.



J.J. Thomson



Paul Dirac

Las propiedades de las partículas elementales se estudian bombardeando con ellas núcleos atómicos u otras partículas, después de acelerarlas para darles gran energía. Las partículas utilizadas se obtienen de la radiación cósmica u otras veces de un acelerador. Después pasan por un detector donde chocan con otras partículas, los choques de estas y los cuerpos resultantes de estas interacciones violentas, se ven como trazas en una placa fotográfica, o como liquido en una cámara de burbujas, o como una nube en una cámara de niebla o expansión.

En la actualidad se sabe que estas partículas (más de cien) están compuestas por otras más pequeñas llamadas **quarks**, encuadradas en 3 familias. Es decir, que la materia está compuesta por **leptones** (electrón y su neutrino electrónico) y **quarks** (up y down, en el protón y neutrón, o sea, en los nucleones).

Con la detección de quark top en 1995 se inicia, para los físicos de partículas, la tarea de explicar el origen de la masa de las partículas elementales. El primer obstáculo es la confirmación de la existencia de la **partícula higgs**, para lo cual Europa se afana por construir el gran acelerador de partículas LHC (CERN).

2.1.2. El modelo estándar

El **Modelo Estándar** (habitualmente abreviado como SM, del inglés Standard Model) en física de partículas trata de describir los fenómenos conocidos asociados al mundo de las partículas fundamentales y a sus interacciones. Uno de los pilares del modelo es la identificación de cantidades conservadas en las interacciones entre las partículas fundamentales y la relación entre estas cantidades y el espacio-tiempo o con simetrías internas.

Según el modelo estándar, toda la materia conocida está constituida de partículas de espín 1/2 (fermiones) clasificadas en dos grupos dependiendo de las interacciones que pueden sufrir. Así, el grupo de los leptones lo forman aquellos fermiones que no sufren la interacción fuerte. El resto de fermiones fundamentales se denominan quarks. Tanto unos como otros se agrupan en tres familias (también llamadas generaciones) y los componentes de cada una se diferencian de los del resto tan solo en la masa.

Por último, en el modelo estándar encontramos las partículas elementales portadoras de las interacciones fundamentales. Estas partículas elementales son:

Los fotones, las partículas de la luz, los bosones W+, W- et Z, los gluones, los bosones de Higgs (cuya confirmación de su descubrimiento en el L.H.C., con 99,9999 % de

certeza ha sido anunciado por el CERN en junio 2012) y, por último, las partículas (graviton).

Para cada tipo de partícula existe su correspondiente antipartícula, denotada por una barra sobre el símbolo de la partícula (a menos que presenten carga positiva o negativa). Partícula y antipartícula tienen la misma masa y spin, pero carga opuesta. Algunos bosones eléctricamente 0 neutros (por ejemplo, Z^0) son sus propias antipartículas.

Con todo esto, nos queda el siguiente modelo estándar:

Tres generaciones de la materia (fermiones):

	I	II	III		
masa	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	173.2 GeV/c ²	0	0
carga	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	2
nombre	u up	c charm	t top	γ Fotón	G Graviton
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3	0	0
	1/2	1/2	1/2	1	0
Quark	d down	s strange	b bottom	g Gluon	H Boson Higgs
	<0.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν _e Neutrino electrónico	ν _μ Neutrino muónico	ν _τ Neutrino tauónico	Z ⁰ Boson Z	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	-1	
	1/2	1/2	1/2	1	
Lepton	e Electrón	μ Muón	τ Tau	W [±] Boson W	

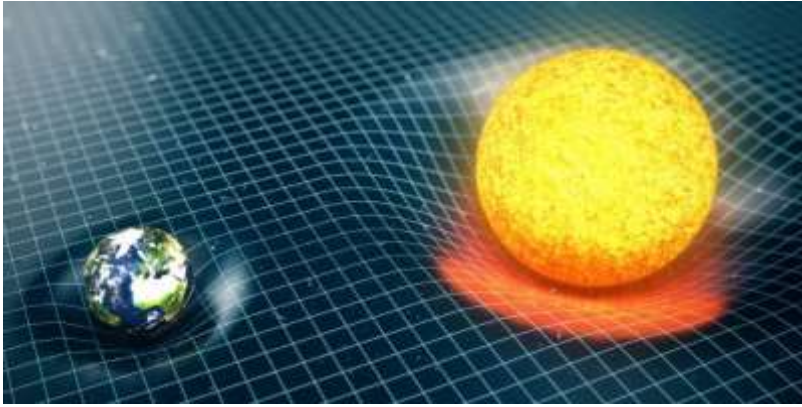
Bosones de gauge

Partículas fundamentales del Modelo Estándar

Debido a la existencia de estas partículas elementales portadoras, en la naturaleza, existe la interacción de cuatro fuerzas a saber: **la fuerza gravitacional, la fuerza nuclear fuerte, la fuerza electromagnética y la interacción débil.**

Entre las características de las interacciones de las fuerzas fundamentales en la naturaleza se encuentran:

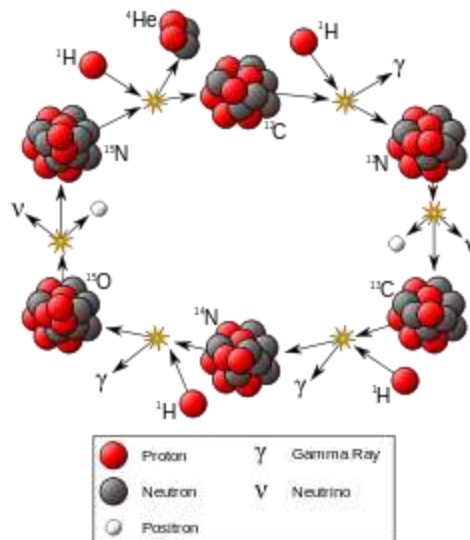
Fuerza gravitatoria: Todos los cuerpos son atraídos por una fuerza que es directamente proporcional a sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. La fuerza gravitacional es la causante de que los cuerpos caigan y del movimiento de los cuerpos celestes que se encuentran en el universo: planetas, satélites, estrellas, galaxias, cometas, entre otros. Su partícula mediadora es el **gravitón**. Posee un radio de acción infinito.



Representación fuerza gravitatoria

Fuerza electromagnética: Es considerada la fuerza que actúa sobre las partículas con carga eléctrica. Toda carga en movimiento produce un campo magnético a su alrededor y es de naturaleza atractiva o repulsiva, dependiendo de las cargas. La partícula mediadora es el **fotón**. Al igual que la interacción gravitacional, posee un radio de acción infinito.

Fuerza nuclear fuerte: Es la interacción más fuerte que existe y permite mantener los nucleones (protones y neutrones), en interacción. Se refiere a la interacción que mantiene unidos a los quarks para formar hadrones, (protones, neutrones y mesones), por lo tanto, permite mantener el núcleo unido. Esta fuerza es la responsable de la estabilidad en toda la materia. La partícula mediadora en esta interacción es el **gluon**.



Interacción nuclear fuerte

Fuerza nuclear débil: Este tipo de fuerza es responsable de la desintegración beta de los núcleos de los átomos. Esta interacción es de corto alcance, es decir, distancias menores que las dimensiones del núcleo.

2.2. La radiactividad

2.2.1. El núcleo atómico

Un átomo está formado por una serie de partículas portadoras de carga negativa (electrones) que se mueven en el espacio que rodea al núcleo central positivo.

La dimensión del núcleo respecto al conjunto del átomo es muy reducida, del orden de $1/100000$. Así, mientras el tamaño medio de un átomo es del orden de algunos angstroms ($1\text{Å}=10^{-10}\text{ m}$), el del núcleo tiene una magnitud de 10^{-15} metros.

El núcleo es el responsable de la carga positiva y de la mayor parte de la masa del átomo. A las partículas presentes en el núcleo (protones y neutrones) se las conoce con el nombre genérico de **nucleones**.

Los portadores de carga positiva son los protones. La carga de un protón es idéntica en magnitud a la del electrón, razón por la que queda asegurada la neutralidad eléctrica del átomo.

Al número de protones presentes en el núcleo se le conoce como **número atómico (Z)**, y es característico de todos los átomos de un mismo elemento.

Los responsables de la masa del átomo son protones y neutrones. La contribución de los electrones, unas 1836 veces más ligeros que un nucleón, es, en la práctica, despreciable. Las masas de protones y neutrones, aunque similares, no son exactamente iguales.

El número de nucleones de un átomo se denomina **número másico**. Ocurre, a veces, que dos átomos presentan igual número atómico (Z) pero diferente número másico (A), debido a que sus núcleos contienen diferente número de neutrones. Estos átomos, que pertenecen al mismo elemento químico, ya que poseen idéntica carga nuclear, reciben el nombre de **isótopos**.

En el interior del núcleo las fuerzas nucleares mantienen unidos a los nucleones y se caracterizan por su corto radio de acción (circunscribiéndose únicamente al volumen

nuclear) y su actuación sobre todas las partículas presentes (protones y neutrones) independientemente de si son o no portadoras de carga eléctrica.

Un hecho importante, en el caso de los núcleos estables, es que la masa nuclear siempre es menor que la suma de las masas de los protones y neutrones presentes, considerados independientemente. Esta circunstancia permite definir una magnitud importante, el “**defecto de masa**”, como la diferencia entre la masa teórica de los constituyentes y la masa real del núcleo.

Si se tiene en cuenta la proporcionalidad entre masa y energía establecida por **Einstein** en su conocida ecuación, se puede relacionar el “defecto de masa” nuclear con la Energía del enlace del núcleo en cuestión que quedaría establecida como el producto del “**defecto de masa**” por el cuadrado de la velocidad de la luz.

2.2.2. Origen

La radiactividad fue descubierta por el científico francés **Antoine Henri Becquerel** en 1896. El descubrimiento tuvo lugar de una forma casi ocasional: **Becquerel** realizaba investigaciones sobre la fluorescencia del sulfato doble de uranio y potasio y descubrió que el uranio emitía espontáneamente una radiación misteriosa. Esta propiedad del uranio — después se vería que hay otros elementos que la poseen— de emitir radiaciones, sin ser excitado previamente, recibió el nombre de **radiactividad**.



Henri Becquerel

El descubrimiento dio lugar a un gran número de investigaciones sobre el tema. Quizás las más importantes en lo referente a la caracterización de otras sustancias radiactivas fueron las realizadas por el matrimonio, también francés, **Pierre y Marie Curie**, quienes descubrieron el polonio y el radio, ambos en 1898.

La naturaleza de la radiación emitida y el fenómeno de la radiactividad fueron estudiados en Inglaterra por **Ernest Rutherford**, principalmente, y por **Frederick Soddy**. Como resultado pronto se supo que la radiación emitida podía ser de tres clases distintas, a las que se llamó **alfa, beta y gamma**, y que al final del proceso el átomo radiactivo original se había transformado en un átomo de naturaleza distinta, es decir, había tenido lugar una transmutación de una especie atómica en otra distinta.



Pierre y Marie Curie

También se dice (y esta es la terminología actual) que el átomo radiactivo ha experimentado una **desintegración**.



Ernest Rutherford



Frederick Soddy

Hoy sabemos que la radiactividad es una reacción nuclear de "**descomposición espontánea**"; es decir, un nucleido inestable se descompone en otro más estable que él, a la vez que emite una "**radiación**". El nucleido hijo (el que resulta de la desintegración) puede no ser estable, y entonces se desintegra en un tercero, el cual puede continuar el proceso, hasta que finalmente se llega a un nucleido estable. Se dice que los sucesivos nucleidos de un conjunto de desintegraciones forman una serie radiactiva o **familia radiactiva**.

Son radiactivos todos los isótopos de los elementos con número atómico igual o mayor a 84 (el polonio es el primero de ellos), y que hoy se obtienen en el laboratorio isótopos radiactivos de elementos cuyos isótopos naturales son estables; es la llamada **radiactividad artificial**. La primera obtención en el laboratorio de un isótopo artificial radiactivo (es decir, el descubrimiento de la radiactividad artificial) la llevó a cabo en 1934 el matrimonio formado por **Frédéric Joliot e Irene Curie**, hija de los esposos Curie.



Frédéric Joliot



Irene Curie

2.2.3. La partícula Alfa

Una **partícula alfa** es una partícula cargada positivamente emitida por varios materiales radioactivos durante la descomposición. Consiste en dos neutrones y dos protones, y por lo tanto es idéntica al núcleo de un átomo de helio.

Algunas de sus principales características son las siguientes:

- 4 unidades de masa atómica; es decir, $6,68 \cdot 10^{-27}$ kg.
- Carga positiva, dos veces la carga del electrón, lo que equivale a: $3,2 \cdot 10^{-19}$ C.
- Una velocidad del orden de entre $1,5 \cdot 10^7$ m/s y $3 \cdot 10^7$ m/s.
- Tienen una alta capacidad para ionizar gases, transformándolos en gases conductores.
- Una energía cinética muy alta debida a su gran masa y velocidad.
- Una baja capacidad de penetración. En la atmósfera pierden velocidad rápidamente al interactuar con distintas moléculas como consecuencia de su gran masa y carga eléctrica.

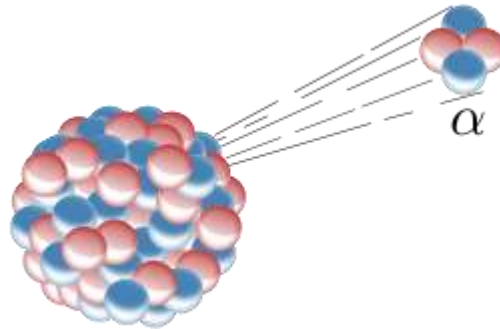
Las partículas alfa cuentan con distintas aplicaciones. Algunas de las más importantes son las siguientes:

- Tratamiento contra el cáncer.
- Eliminación de la electricidad estática en aplicaciones industriales.
- Utilización en detectores de humo.
- Fuente de combustible para satélites y naves espaciales.
- Fuente de energía para marcapasos.
- Fuente de energía para estaciones de sensores remotos.

- Fuente de energía para dispositivos sísmicos y oceanográficos.

Desintegración alfa:

La desintegración alfa o decaimiento alfa es una variante de desintegración radiactiva por la cual un núcleo atómico emite una partícula alfa y se convierte en un núcleo con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico.

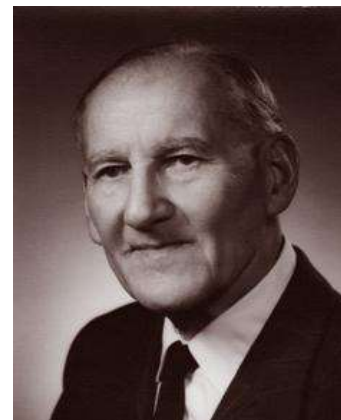


Desintegración alfa

Se le puede considerar emisión espontánea de núcleos de Helio-4 (${}^4\text{He}^{2+}$), en adelante partículas α , a partir de núcleos de átomos más pesados, mediante un proceso de fisión nuclear espontánea. Este tipo de desintegración es típico únicamente de los núcleos atómicos muy pesados.

2.2.4. La partícula Beta

Una partícula beta también llamado rayos beta o radiación beta, es un electrón o positrón de alta energía y alta velocidad emitido por la desintegración radiactiva de un núcleo atómico durante el proceso de desintegración beta. Hay dos formas de desintegración beta, decaimiento β^- y emisión β^+ , que producen electrones y positrones, respectivamente. Es un electrón que sale despedido de una desintegración beta. Por la **ley de Fajans**, si un átomo emite una partícula beta, su carga eléctrica aumenta en una unidad positiva y el número de masa no varía. Esto se debe a que el número de masa o másico sólo representa el número de protones y neutrones; en este caso el número total no se ve afectado, ya que un neutrón pasa a



Kasimir Fajans

ser protón, emitiendo un electrón. Cabe destacar que el electrón emitido proviene del núcleo del átomo (transformación entre quarks) y no de un orbital de éste.

Este tipo de radiación es detenida por una hoja de papel de aluminio.

Desintegración β^- (emisión de electrones):

Un núcleo atómico inestable con un exceso de neutrones puede experimentar una desintegración β^- donde un neutrón se convierte en un protón, un electrón y un electrón antineutrino (la antipartícula del neutrino):

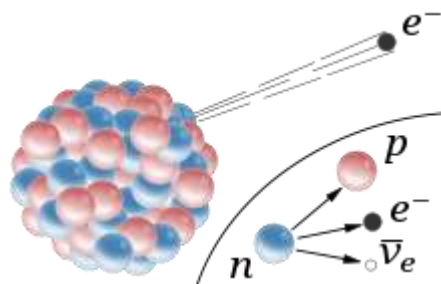
Este proceso está mediado por la interacción débil. El neutrón se convierte en un protón a través de la emisión de un W-bosón virtual. A nivel de quark, la emisión W- convierte un quark abajo en un quark arriba, convirtiendo un neutrón (un quark arriba, y dos quarks abajo) en un protón (dos quarks arriba y un quark abajo). El bosón virtual W- luego se descompone en un electrón y un antineutrino.

La descomposición β^- ocurre comúnmente entre los subproductos de fisión ricos en neutrones producidos en reactores nucleares. Los neutrones libres también se descomponen a través de este proceso. Ambos procesos contribuyen a las copiosas cantidades de rayos beta y antineutrinos electrónicos producidos por las barras de combustible del reactor de fisión.

Desintegración β^+ (emisión de positrones):

Los núcleos atómicos inestables con un exceso de protones pueden experimentar una desintegración β^+ , también llamada decaimiento de positrones, donde un protón se convierte en un neutrón, un positrón y un neutrino de electrones.

La desintegración Beta-plus solo puede ocurrir dentro de los núcleos cuando el valor absoluto de la energía de unión del núcleo hijo es mayor que el del núcleo principal, es decir, el núcleo secundario es un estado de menor energía.



Decaimiento Beta

2.2.5. Los rayos Gamma

La radiación gamma o rayos gamma (γ) es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituida por fotones, producida generalmente por elementos radiactivos o por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. También se genera en fenómenos astrofísicos de gran violencia.

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. Pueden causar grave daño al núcleo de las células, por lo cual se usan para esterilizar equipos médicos y alimentos.

- Su energía se mide en megaelectronvoltios (MeV). Un MeV corresponde a fotones gamma de longitudes de onda inferiores a 10^{-11} m o a frecuencias superiores a 10^{19} Hz.
- Se producen por desexcitación de un nucleón de un nivel o estado excitado a otro de menor energía y por desintegración de isótopos radiactivos.
- Generalmente la radiactividad se vincula con la energía nuclear y con los reactores nucleares, aunque existe en el entorno natural: a rayos cósmicos, expelidos desde el sol y desde fuera de nuestro sistema solar: de las galaxias; isótopos radiactivos en rocas y minerales.
- En general, los rayos gamma producidos en el espacio no llegan a la superficie terrestre, pues los absorbe la alta atmósfera. Para observar el universo en estas frecuencias es necesario utilizar globos de gran altitud u observatorios exoespaciales. Para detectarlos, en ambos casos se utiliza el efecto Compton. Estos rayos gamma se originan por fenómenos astrofísicos de alta energía, como explosiones de supernovas o núcleos de galaxias activas.

Para protegerse de los rayos gamma se requiere gran cantidad de masa. Los materiales de número atómico y densidad altos protegen mejor; y a mayor energía de los rayos el espesor de la protección debe ser superior. Tales materiales se clasifican según el espesor necesario para reducir la intensidad de los rayos gamma a la mitad, espesor conocido como HVL (del inglés *half-value layer*, capa de valor medio). Por ejemplo, los rayos gamma que requieren 1 cm de plomo para atenuar su intensidad en un 50% también la disminuyen en igual proporción al atravesar 6 cm de hormigón o 9 cm de tierra compacta.

2.2.6. Los rayos X

Llamamos rayos X a una radiación electromagnética, invisible para el ojo humano, capaz de atravesar cuerpos opacos y de imprimir las películas fotográficas. Los actuales sistemas digitales permiten la obtención y visualización de la imagen radiográfica directamente en un ordenador sin necesidad de imprimirla.

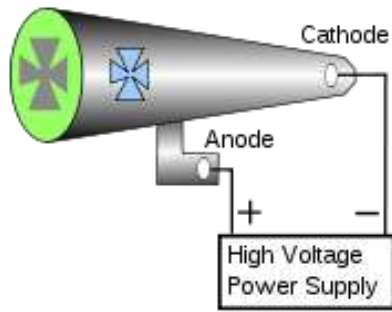
La longitud de onda de los rayos X está entre 10 a 0,01 nanómetros, correspondiendo a frecuencias en el rango de 30 a 30000 PHz (de 50 a 50.000 veces la frecuencia de la luz visible).

Lo que diferencia a los rayos X de los rayos gamma es su origen: los rayos gamma son radiaciones de origen nuclear que se producen por la desexcitación de un nucleón de un nivel excitado a otro de menor energía y en la desintegración de isótopos radiactivos, mientras que los rayos X surgen de fenómenos extra nucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración de electrones.

Normalmente solemos encontrar su energía entre los rayos gamma y la radiación ultravioleta y su radiación es ionizante porque cuando interactúan con la materia crean partículas con carga (iones).

Para hablar de su origen tenemos que remontarnos al año 1895. **Wilhelm Conrad Röntgen**, físico alemán, descubrió los rayos X mientras experimentaba con los tubos de **Hittorff-Crookes** y la bobina de **Ruhmkorff** para investigar la fluorescencia violeta que producían los rayos catódicos. Observó un resplandor proveniente con una capa de platino-cianuro de bario, que desaparecía al apagar el tubo después de haberlo cubierto con un cartón negro para eliminar la luz visible.

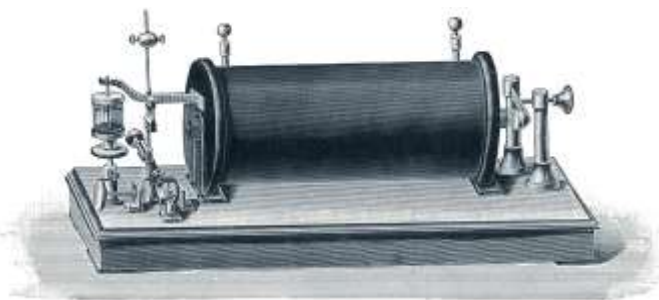
Determinó que los rayos creaban una radiación muy penetrante, pero invisible, que atravesaba grandes espesores de papel e incluso metales poco densos. Usó placas fotográficas para demostrar que los objetos eran más o menos transparentes a los rayos X dependiendo de su espesor y realizó la primera radiografía humana, usando la mano de su mujer. A este tipo de rayos los llamó "**rayos incógnita**", o "**rayos X**", porque no sabía qué eran, solo que eran generados por los rayos catódicos al chocar contra ciertos materiales. A día de hoy siguen conservando ese nombre.



Tubo de Crookes



William Crookes



Bobina de Ruhmkorff



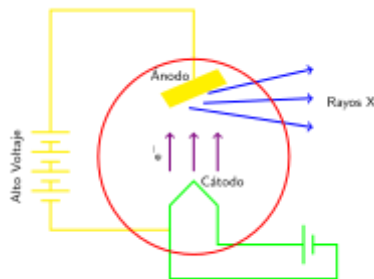
Heinrich Ruhmkorff

Podemos observar los rayos X cuando un haz de electrones muy energéticos (del orden de 1 keV) se desaceleran al chocar con un blanco metálico.

En las últimas décadas del siglo XX se empezaron a desarrollar detectores bidimensionales capaces de generar directamente una imagen digitalizada. Entre estos se cuentan las «placas de imagen», recubiertas de un material fosforescente, donde los electrones incrementan su energía al absorber los rayos X difractados y son atrapados en este nivel en centros de color. Los electrones liberan la energía al iluminarse la placa con luz láser, emitiendo luz con intensidad proporcional a la de los rayos X incidentes en la placa. Estos detectores son un orden de magnitud más sensibles que la película fotográfica y poseen un margen dinámico superior en varios órdenes de magnitud. Otro tipo de detector bidimensional digital muy utilizado consiste en una placa fosforescente acoplada a una cámara.

Para su producción, en laboratorios y hospitales se usan los **tubos de rayos X**, que pueden ser tubos con filamento o tubos con gas. El tubo de rayos X está conformado por dos electrodos (cátodo y ánodo), una fuente de electrones (cátodo caliente) y un

blanco. Los electrones se aceleran mediante una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo. La radiación es producida justo en la zona de impacto de los electrones y se emite en todas direcciones.



Esquema de un tubo de rayos X

A día de hoy su mayor uso se da en el campo de la medicina. En éste, se ha desarrollado una tecnología que permite su uso donde su especialidad es la radiología, aunque también se usa en la angiografía o en estudios de contraste.

Por otro lado, este tipo de radiación también puede generar riesgos para nuestra salud. Estos solo se dan cuando recibimos dosis muy elevadas, en principio a nadie le deberían llegar a perjudicar. En los casos donde sí se dan normalmente los efectos van desde quemaduras en la piel, caída del cabello, náuseas, cataratas, esterilidad, defectos de nacimiento, retraso mental, cáncer, hasta la muerte. Cada uno relacionado con el valor de la dosis equivalente

2.2.7. Los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas que constantemente nos llegan desde el espacio en todas direcciones. Las partículas de rayos cósmicos viajan casi a la velocidad a la luz, lo que hace que tengan una energía muy alta.

La mayoría de estas partículas son núcleos de átomos o electrones. Algunas de ellas son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza llegando a tener cien millones de veces más energía que las partículas producidas por cualquier acelerador en el mundo.

Para hablar de su descubrimiento tenemos que remontarnos al año 1909. Durante este año **Theodor Wulf** desarrolló el primer **electrómetro**, instrumento con el que quería

demostrar que los niveles de radiación ionizante en la cúspide de la Torre Eiffel eran mayores que en su base.



Theodor Wulf



Electrómetro Bifilar de Wulf

En agosto de 1912 **Victor Hess** hizo un viaje en globo en el cual elevó tres electrómetros de Wulf de precisión mejorada a 5300 metros de altura. De esta manera encontró que la tasa de ionización se multiplicaba aproximadamente por cuatro en comparación con la que podía medirse a nivel del suelo.



Victor Hess



Hess aterriza de su vuelo en globo



Werner Kolhörster

En 1913-1914, **Werner Kolhörster** confirmó las primeras observaciones de Hess al medir el incremento de la tasa de ionización a 9 km de altitud.

Aún no está claro el origen de los rayos cósmicos, aunque en 2007, un grupo de científicos del **Observatorio Pierre Auger** realizó un gran descubrimiento. Los científicos del laboratorio encontraron evidencias de que la mayor parte de las partículas de rayos cósmicos provienen de una constelación cercana: **Centaurus**. Ésta contiene un núcleo activo que debe su existencia a un agujero negro (probablemente supermasivo), al caer la materia a la ergosfera del agujero negro y rotar velozmente.

Los rayos cósmicos que alcanzan la atmósfera en su capa superior son principalmente protones y partículas alfa de energía. A éstas, junto a los electrones y partículas pesadas ionizadas se les denomina partículas primarias.

Estas partículas cargadas interactúan con la atmósfera y el campo magnético terrestre, así convirtiéndose en partículas secundarias) y se distribuyen de tal modo que, debido al campo magnético, la mayor intensidad de las partículas que alcanzan el suelo ocurre en los polos.

Por tanto, la componente de partículas que alcanzan el suelo varía según la altitud (a mayor altura, menos atmósfera con la cual interactúan) y por la latitud (a mayor latitud, mayor cantidad de partículas desviadas por el campo magnético), y propician cierta variación con el ciclo solar (de 11 años).

A nivel del mar y a una latitud de unos 45° N, los componentes importantes de estas partículas son:

muones: 72%

fotones: 15%

neutrones: 9%



Esquema de la llegada de rayos cósmicos a la Tierra

Este tipo de rayos han revolucionado la física de partículas y la astrofísica, ya que la investigación de esta radiación se ha dado con el afán de comprender cómo trabaja la naturaleza, en especial, de estudiar los fenómenos que ocurren en los rincones más energéticos del universo. Además, las investigaciones se han extendido progresivamente al estudio de sus efectos sobre nuestra tecnología, las telecomunicaciones, el clima, la atmósfera y la salud del hombre, esto último debido al incremento del tráfico aéreo, las estancias espaciales de los astronautas y la posibilidad de desarrollar viajes interplanetarios tripulados en un futuro cercano.

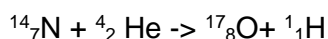
A día de hoy, las aplicaciones prácticas son muy pocas. Aun así, la radiación penetrante producida en los chubascos de partículas ha sido usada para obtener tomografías del interior de volcanes y pirámides (México y Egipto), y encontrar material radioactivo como Uranio y Plutonio que pudiera ser transportado clandestinamente en vehículos.

Queda mucho por descubrir de los rayos cósmicos y probablemente hagan falta muchos años y mentes curiosas para descubrir todo lo que estos conllevan y todas sus aplicaciones útiles.

2.3. Reacciones nucleares

Una reacción nuclear es un procedimiento que lleva a combinar y modificar los núcleos de los átomos y las partículas subatómicas. A través de esta clase de procesos, los núcleos pueden combinarse o fragmentarse, absorbiendo o liberando partículas y energía de acuerdo a cada caso.

La primera reacción nuclear llevada a cabo en el laboratorio la realizó **Rutherford**, en 1919, bombardeando el isótopo 14 del nitrógeno con partículas alfa. En la reacción se producen el isótopo 17 del oxígeno y un protón. Simbólicamente se representa por la ecuación:



Al igual que en química se considera que la descomposición espontánea de una molécula inestable es la reacción química más simple (reacción monomolecular), la radiactividad es el tipo más simple de reacción nuclear, y es la que se descubrió primero.

En los demás tipos de reacciones nucleares hay, en general, dos núcleos o partículas que reaccionan, para dar lugar a productos de reacción. A semejanza de lo que ocurre en una reacción química, para producir una reacción nuclear normalmente es necesario comunicar al sistema inicial una energía de activación. En la reacción se libera energía, que se manifiesta en forma de energía cinética de los productos de la reacción, acompañada en ocasiones por la producción de radiación gamma.

Cuando los núcleos se fragmentan, la reacción se conoce como **fisión nuclear**. En cambio, si los núcleos se unen, se habla de fusión nuclear. Por otra parte, si la reacción nuclear requiere de energía para llevarse a cabo, se la califica como reacción endotérmica. Si, en el marco del proceso, libera energía, estamos ante una reacción nuclear de tipo exotérmica.

El estudio y la gestión de las reacciones nucleares son de gran importancia para el ser humano, ya que a través de estas es posible obtener grandes cantidades de energía que luego se emplean para generar electricidad, permitir la movilidad de vehículos, etc.

Debido al nivel de energía que pueden liberar, las reacciones nucleares implican un gran riesgo. Por eso muchos critican la existencia de las centrales nucleares donde se impulsan estos procesos.

2.3.1. Fisión y Fusión Nuclear

Tanto la fisión como la fusión nuclear son reacciones nucleares que liberan la energía almacenada en el núcleo de un átomo. Pero hay importantes diferencias entre ambas.

Fisión:

La fisión nuclear se trata de una reacción en la cual un núcleo pesado, al ser bombardeado con neutrones, se convierte en inestable y se descompone en dos núcleos, cuyas masas son del mismo orden de magnitud, y cuya suma es ligeramente inferior a la masa del núcleo pesado, lo que origina un gran desprendimiento de energía y la emisión de dos o tres neutrones.

Estos neutrones, a su vez, pueden ocasionar más fisiones al interactuar con otros núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones, y así sucesivamente. Este efecto multiplicador se conoce con el nombre de reacción en cadena. En una pequeña fracción de tiempo, los núcleos fisionados liberan una energía un millón de veces mayor que la obtenida, por ejemplo, en la reacción de combustión de un combustible fósil.

Si se logra que solo uno de los neutrones liberados produzca una fisión posterior, el número de fisiones que tienen lugar por unidad de tiempo es constante y la reacción está controlada.



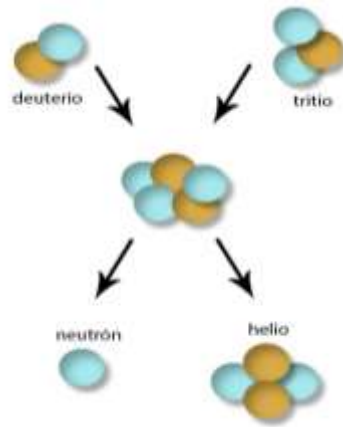
Fisión Nuclear en el Uranio 235

Fusión:

La fusión nuclear es una reacción en la que dos núcleos muy ligeros se unen para formar un núcleo estable más pesado, con una masa ligeramente inferior a la suma de las masas de los núcleos iniciales. Este defecto de masa da lugar a un gran desprendimiento de energía. La energía producida por el Sol tiene este origen.

Para que tenga lugar la fusión, los núcleos cargados positivamente deben aproximarse venciendo las fuerzas electrostáticas de repulsión. En la Tierra, donde no se puede alcanzar la gran presión que existe en el interior del Sol, la energía necesaria para que los núcleos que reaccionan venzan las interacciones se puede suministrar en forma de energía térmica o utilizando un acelerador de partículas.

Una reacción típica de fusión nuclear consiste en la combinación de dos isótopos del hidrógeno, deuterio y tritio, para formar un átomo de helio más un neutrón.



Fusión Nuclear de dos isótopos de hidrogeno, deuterio y tritio, que forman un átomo de helio más un neutrón