

# El Tragaluz

# Cuántico

Material de muestra  
para Institutos



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

*im*<sup>2</sup>  
Instituto Universitario  
de Matemática Multidisciplinar



GENERALITAT  
VALENCIANA



EXCELENCIA  
SEVERO  
OCHOA



FECYT  
INNOVACIÓN

Ayuda CEX2023-001292-S financiada por:



el AGENCIA  
ESTATAL DE  
INVESTIGACIÓN



VNIVERSITAT  
DE VALÈNCIA

IFIC  
INSTITUT DE FÍSICA  
CORPUSCULAR



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

## Índice

<b>Introducción: El tragaluz cuántico.....</b>	<b>2</b>
<b>Sobre el material de muestra.....</b>	<b>4</b>
<b>Explorando los pilares de la física moderna.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Fondo Cósmico de Microondas.....</b>	<b>7</b>
<b>2. La indeterminación en la mecánica cuántica .....</b>	<b>9</b>
<b>3. La doble rendija fotón a fotón.....</b>	<b>11</b>
<b>4. El Efecto Cherenkov.....</b>	<b>13</b>
<b>5. El Fotomultiplicador.....</b>	<b>15</b>
<b>6. El superneutrino.....</b>	<b>17</b>
<b>7. La protonterapia.....</b>	<b>19</b>
<b>Anexo.....</b>	<b>21</b>

## Introducción: El tragaluz cuántico

La historia del universo y de nuestra comprensión de la realidad está profundamente ligada a la **luz**. A través del ojo humano, esa ventana al cosmos, observamos formas, colores y movimiento. Pero sin fotones, el ojo no percibe nada: sin luz, no hay día ni noche, ni imagen del universo. Comprender el origen y la naturaleza de la luz nos lleva a explorar los eventos más antiguos del cosmos y los fundamentos más profundos de la física.

El **universo nació hace unos 14.000 millones de años** a partir de una singularidad conocida como el **Big Bang**. En sus primeros instantes, el universo estaba compuesto por partículas elementales, como **protones, neutrones, electrones, fotones y neutrinos**, que interactuaban en un entorno extremadamente energético. Con el tiempo el universo se fue enfriando y expandiendo, permitiendo que los electrones se unieran a los núcleos y se formaran los primeros **átomos**. Este proceso liberó los **fotones del fondo cósmico de microondas**, una radiación que aún hoy llega hasta nosotros y que guarda información crucial sobre la historia térmica del cosmos.

El estudio de la luz y su naturaleza ha sido una de las preguntas más profundas de la ciencia. Durante siglos, se debatió si la luz era **una partícula o una onda**. Newton propuso su naturaleza corpuscular, mientras que Huygens defendía un modelo ondulatorio. La interferencia observada por Young en el siglo XIX dio fuerza a la idea de las ondas, que culminó con las **ecuaciones de Maxwell**, demostrando que la luz es una **onda electromagnética**. Pero con la llegada del siglo XX, nuevos experimentos revelaron que la luz también se comporta como paquetes discretos de energía, llamados **fotones**. Así nació la **mecánica cuántica**, un nuevo marco para entender la realidad, donde las partículas no siguen trayectorias definidas, sino que tienen **amplitudes de probabilidad**, y donde las **interferencias cuánticas** revelan fenómenos imposibles de explicar con la lógica clásica.

Una herramienta esencial en esta exploración es el **fotomultiplicador**, un tubo de vacío que detecta la luz más tenue, incluso **fotón a fotón**, amplificándola hasta generar una señal eléctrica medible. Esta tecnología permite estudiar fenómenos extremos como el **efecto Cherenkov**, una radiación azulada que se produce cuando una partícula cargada se mueve más rápido que la luz en un medio como el agua o el aire. Este efecto no solo se ha observado en reactores nucleares, sino también en el

espacio: **los astronautas del programa Apolo reportaron destellos azules** causados por partículas cósmicas atravesando sus ojos en ausencia de atmósfera.

El efecto Cherenkov es clave para proyectos científicos como **ANTARES** y **KM3NeT**, enormes telescopios submarinos diseñados para detectar **neutrinos**, partículas casi indetectables que viajan por el universo sin ser alteradas. Gracias a los **fotomultiplicadores anclados en el fondo del mar**, se ha logrado incluso detectar **neutrinos de altísima energía**, que permiten estudiar fenómenos cósmicos lejanos y extremos.

Más allá de la astrofísica, estas tecnologías están encontrando **aplicaciones médicas revolucionarias**. En técnicas de imagen como la **tomografía por emisión de positrones (PET)**, se está investigando cómo los **fotones Cherenkov** pueden mejorar la **precisión temporal** de las imágenes, permitiendo diagnósticos más exactos con menos radiación. También en la **protonterapia**, una técnica de tratamiento contra el cáncer que usa **protones acelerados** para destruir tumores con una precisión milimétrica, se estudia cómo estos fotones pueden ayudar a **monitorizar en tiempo real** la radiación administrada.

Todos estos avances se enmarcan en una larga tradición de investigación científica basada en el **método científico**, un proceso que requiere observar, plantear hipótesis, experimentar y validar. Desde **Galileo y Newton**, hasta **Einstein y Planck**, pasando por **Heisenberg, Young y Maxwell**, la ciencia ha ido construyendo un conocimiento cada vez más profundo del universo.

## Sobre el material de muestra

El tragaluz cuántico es un medimetraje documental en formato 4K, centrado en investigaciones en torno al tubo fotomultiplicador. Este dispositivo, en cierta forma, podría asimilarse a una ventana, a través de la cual, según el sentido en que se dirija la mirada, se observa el macrocosmos o el mundo microscópico.

Su carácter multiconceptual lo hace adecuado para extraer de él, pequeños clip o fragmentos que pueden servir de base para la revisión o profundización de distintos temas monoconceptuales. Esto es lo que se pretende con esta publicación. Se han extraído una serie de fragmentos del documental, que a modo de módulos independientes, pueden servir de base para la discusión y profundización de distintos temas monográficos. En todo caso, los módulos presentados son sólo una selección de conceptos abordados en el documental. Se podrían seleccionar otros. Como anexo incorporamos una relación de otros conceptos que podrían tratarse como los módulos seleccionados.

Cada uno de estos módulos consta del minidocumental, un resumen textual del mismo, y una pequeña guía docente en la que se incluyen actividades, cuestiones y en algún caso, referencias externas al documental. Por su interés y relación con los temas tratados hemos incluido, como ampliación, enlaces a dos artículos de José Bernabéu. En uno de ellos se analiza la composición de universo mientras que en el otro se discute las contradicciones que, tras cien años de mecánica cuántica, acarrea seguir utilizando el término onda-corpúsculo.

## Explorando los pilares de la física moderna

Para comprender en profundidad el funcionamiento del universo y las tecnologías que lo estudian o lo aplican, es necesario detenerse primero en algunos **conceptos fundamentales de la ciencia**. Estos conceptos no solo permiten explicar fenómenos naturales, sino que también han sido la base para desarrollar instrumentos, tratamientos médicos y métodos de observación que antes parecían imposibles.

A lo largo de los siglos, la humanidad ha ido desentrañando los secretos de la luz, de la materia y del espacio-tiempo. La mecánica cuántica, el estudio del fondo cósmico de microondas, la detección de neutrinos o el efecto Cherenkov son ejemplos de avances que, aunque puedan parecer complejos, se apoyan en principios bien definidos que pueden ser comprendidos con una mirada atenta y curiosa.

En las secciones siguientes, nos adentraremos en estos **bloques temáticos**, explicando qué es el fondo cósmico de microondas, en qué consiste el principio de indeterminación de la mecánica cuántica, cómo funciona un fotomultiplicador, qué ocurre en el efecto Cherenkov y cómo detectamos neutrinos. Cada uno de estos elementos representa una **pieza clave del conocimiento científico actual** y nos ayudará a entender cómo se ha construido nuestra visión moderna del universo.

Esta base conceptual será imprescindible para abordar después aplicaciones más avanzadas, como la protonterapia o la imagen médica con Cherenkov, así como para reflexionar sobre los retos sociales asociados a la ciencia.

## AMPLIACIÓN

José Bernabéu *¿De qué está hecho el mundo?*, Real Academia de Ciencias (2022)

<https://rac.es/ficheros/doc/2cec5a4fc5926c63.pdf>



# 1. Fondo Cósmico de Microondas

## OBJETIVOS

- Que seas capaz de comparar la edad del universo con la duración de otros procesos cotidianos.
- Que se sepa enunciar las diferencias del Fondo Cósmico de Microondas (FCM) de una radiación convencional.

## MATERIAL DE CONSULTA

### RESUMEN

El **fondo cósmico de microondas** está formado por **fotones liberados** cuando el universo tenía unos **380.000 años** de edad, momento en el que se volvió **eléctricamente neutro**. A partir de entonces, los fotones comenzaron a viajar libremente, ya que al no haber partículas cargadas con las que interactuar, su trayectoria quedó libre hasta llegar a nosotros.

La edad del universo es de aproximadamente **14.000 millones de años**. Esta cifra se menciona como el tiempo transcurrido desde que el universo emergió de una **singularidad**, un evento que se conoce como el **Big Bang**.

Aunque ese número parece enorme, se pone en perspectiva mediante una analogía con un **año calendario**: si el Big Bang ocurriera a las **0:00 del 1 de enero**, el momento en el que el universo se volvió eléctricamente neutro (y se liberó el fondo cósmico de microondas) correspondería a los **15 primeros minutos del 1 de enero**, y el **presente** sería el **31 de diciembre a punto de dar las campanadas**. Esta comparación permite visualizar lo temprano que ocurrió ese evento en la historia cósmica.

Estos fotones han viajado durante **13.800 millones de años**, convirtiéndose en una **huella fósil del universo primitivo**. El fondo cósmico de microondas contiene información esencial sobre la **historia térmica del universo**, ya que registra las condiciones del cosmos en sus primeras etapas. Además, presenta **pequeñas irregularidades** en la densidad, del orden de una parte por cada 100.000, que fueron las semillas de la estructura a gran escala actual: cúmulos, supercúmulos y galaxias.



Estas irregularidades permitieron que, con el tiempo, se formaran astros que, mediante reacciones de **fusión nuclear**, se volvieron visibles al ojo humano. El fondo cósmico de microondas fue además **predicho teóricamente** antes de ser confirmado experimentalmente, lo que supuso un gran logro para la cosmología.

### CLIP



[Pulsa en este enlace para ver el video.](#)

## ACTIVIDADES/AUTOEVALUACIÓN

- 1- Discute la frase: “el Universo primigenio era totalmente homogéneo”. Tras discutir la anterior afirmación, indica las consecuencias derivadas de ello.
- 2- ¿Cuál es la edad del Universo? ¿Es fiable este dato?
- 3- Indica la relevancia del descubrimiento del Fondo Cósmico de Microondas (FCM), en el asentamiento del método Científico
- 4- ¿Cuál fue la causa por la que los fotones se expandieran tras una primera etapa de confinamiento?
- 5- Indica en % lo que representa en tiempo el origen del FCM frente a la edad del universo.

## 2. La indeterminación en la Mecánica Cuántica

### OBJETIVOS

- Que sepas distinguir entre un proceso determinista frente a otro indeterminista
- Que sea capaz de aplicar este concepto a la Física clásica y cuántica

### MATERIAL DE CONSULTA

#### RESUMEN

La mecánica cuántica es intrínsecamente no determinista. Pero eso no quiere decir que no conozcamos los estados del sistema.

Lo que no sabemos es cuál es el resultado de las medidas sobre ese Sistema. Eso es lo que es indeterminista.

#### CLIP



[Pulsa en este enlace para ver el video](#)

## ACTIVIDADES/AUTOEVALUACIÓN

1-Si lanzamos un dado, ¿podemos conocer el número que va a salir? ¿Quiere esto decir que la Mecánica Clásica es indeterminista?

2- ¿Dónde se encuentra la indeterminación en la Mecánica cuántica?

3- ¿Conoces algún Principio Físico con el que se explica esa indeterminación?

### 3. La doble rendija fotón a fotón

#### OBJETIVOS

- Que sepas distinguir el comportamiento corpuscular del ondulatorio.

#### MATERIAL DE CONSULTA

##### RESUMEN

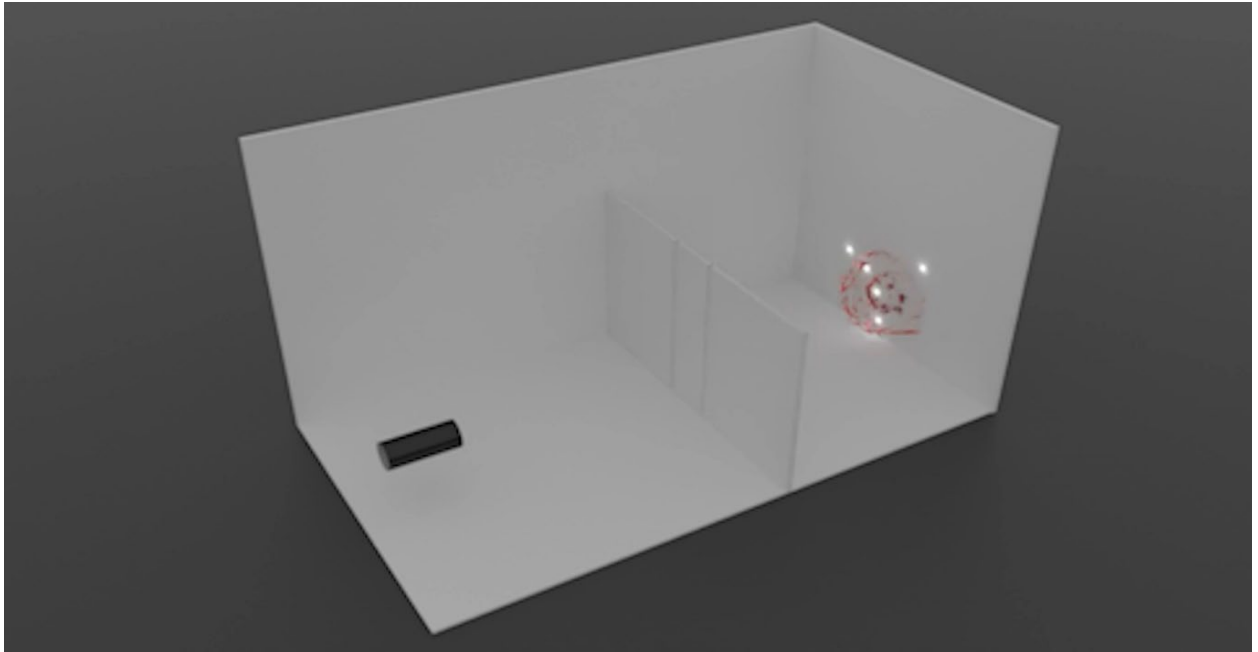
La **indeterminación** en la **mecánica cuántica** se manifiesta en cómo se describe el comportamiento de partículas como los **fotones**, **electrones** o **átomos**. En lugar de seguir trayectorias bien definidas como en la física clásica, en cuántica se habla de **amplitudes de probabilidad**.

Por ejemplo, en el experimento de la doble rendija, un fotón no pasa necesariamente **por una rendija o por la otra**, como diría la lógica clásica. En cambio, existe una **amplitud de probabilidad** de que pase por cada una, y el resultado no se obtiene sumando probabilidades, sino **sumando amplitudes** y luego calculando el **cuadrado de esa suma** para obtener la probabilidad.

Este principio se llama **superposición**, y da lugar a fenómenos como las **interferencias**, incluso cuando los fotones se emiten **uno a uno**. Si fueran partículas clásicas, no se formaría un patrón de interferencia. Sin embargo, sí aparece, lo que demuestra que no se comportan como objetos definidos sino como estados de probabilidad que solo se concretan al medir.

La mecánica cuántica no describe trayectorias exactas, sino un abanico de posibilidades con amplitudes que se **combinan cuánticamente**, haciendo que los resultados dependan de la **interferencia entre esas posibilidades**.

## CLIP



[Pulsa en este enlace para ver el video.](#)

## ACTIVIDADES/AUTOEVALUACIÓN

- 1-¿En qué consiste el experimento clásico de doble rendija?
- 2- ¿Por qué el experimento de la doble rendija fotón a fotón no se realizó hasta el año 1982?
- 3- ¿Qué consecuencias tuvo este experimento?

## AMPLIACIÓN

*Fin a 100 años del misterio “dualidad onda-partícula” en física cuántica*, José Bernabéu, Revista Española de Física, V39, 1(2025) [Fin a 100 años del misterio "dualidad onda-partícula" en la física cuántica | Bernabéu | Revista Española de Física](#)

## 4. El Efecto Cherenkov

### OBJETIVOS

- Que sepas describir brevemente la radiación de Cherenkov
- Que sepas discernir la radiación de Cherenkov de otro tipo de radiación.

### MATERIAL DE CONSULTA

#### RESUMEN

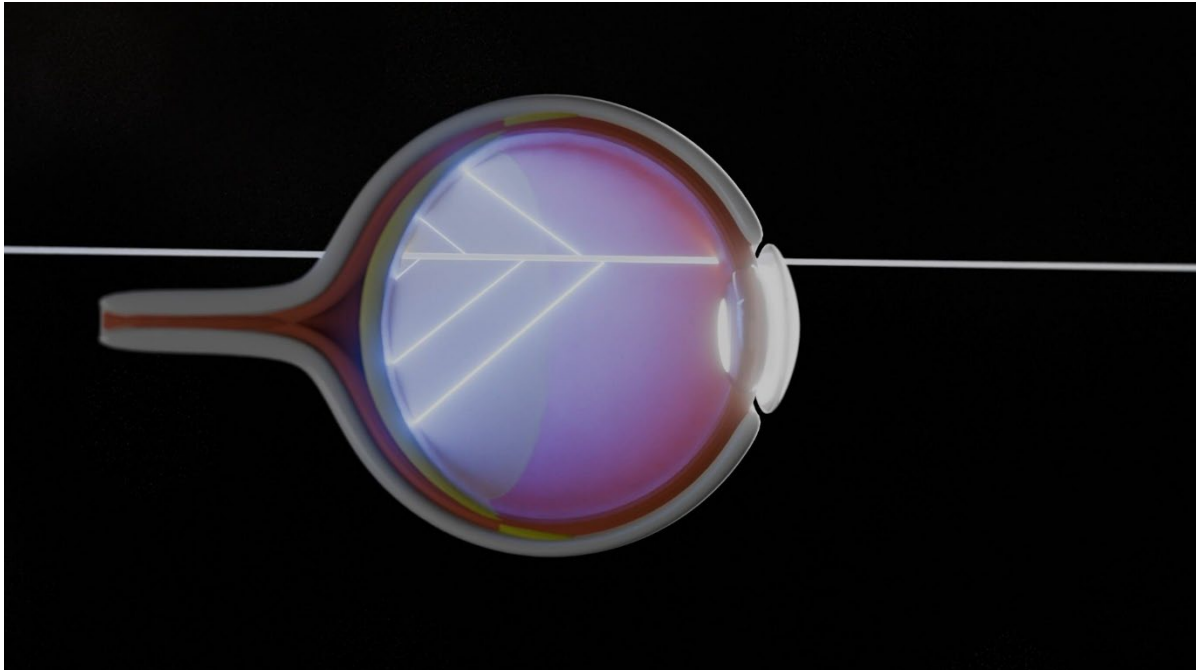
El **efecto Cherenkov** ocurre cuando una **partícula cargada**, como un electrón, se mueve a través de un **medio dieléctrico** (como el agua o el aire) a una velocidad **superior a la velocidad de la luz en ese medio**. Aunque nada puede superar la velocidad de la luz en el vacío, la luz viaja más lentamente en otros medios, lo que hace posible este fenómeno.

Cuando la partícula atraviesa el medio, **polariza los átomos y moléculas**, generando **dipolos** que emiten **fotones** casi instantáneamente. Estos fotones forman un **cono de luz azul**, similar a una onda de choque como la que produce un avión al romper la barrera del sonido. Este resplandor azul es lo que se observa como radiación de Cherenkov.

Una manifestación notable de este fenómeno ocurrió durante las misiones Apolo: astronautas reportaron ver **destellos azules** incluso con los ojos cerrados. Se atribuye a que **partículas de rayos cósmicos** atravesaban el **humor vítreo del ojo**, generando el efecto Cherenkov, lo que revela un comportamiento del ojo humano **similar al de un fotomultiplicador**, capaz de detectar luz **fotón a fotón**.

El efecto tiene múltiples **aplicaciones**. En astrofísica, se utiliza en **telescopios Cherenkov** para detectar **rayos gamma** del espacio. En medicina, se está explorando para mejorar la **resolución de imagen en técnicas como la PET**, y también para **monitorizar en tiempo real** la distribución de la radiación en **protonterapia**, optimizando tratamientos contra tumores.

## CLIP



[Pulsa en este enlace para ver el video.](#)

## ACTIVIDADES/AUTOEVALUACIÓN

- 1- ¿Puede un objeto al desplazarse en un medio tener una velocidad mayor que la luz en ese medio?
- 2- ¿Cómo se puede explicar los destellos azules reportados por los astronautas de las misiones Apollo?
- 3- Enuncia algunas aplicaciones tecnológicas basadas en el Efecto Cherenkov

## 5. El Fotomultiplicador

### OBJETIVOS

- Que se conozcan las distintas partes del tubo fotomultiplicador
- Que seas capaz de explicar el efecto fotoeléctrico

### MATERIAL DE CONSULTA

#### RESUMEN

El **fotomultiplicador** es un dispositivo diseñado para detectar luz extremadamente tenue, incluso **fotón a fotón**. Su estructura es un **cilindro de cristal** (hecho de **borosilicato**) del cual se ha retirado el gas interior para crear un **alto vacío**, permitiendo así que los electrones se propaguen sin obstáculos.

En una de las caras del cilindro se encuentra el **fotocátodo**, una superficie sensible a la luz visible. Cuando un **fotón** incide sobre esta superficie, produce un **electrón** mediante el **efecto fotoeléctrico**. Ese electrón es entonces acelerado por un campo eléctrico dentro del tubo, y choca contra una serie de **placas metálicas** llamadas **dínodos**.

Cada impacto con un dínodo **multiplica el número de electrones**, generando una **avalancha electrónica**. Finalmente, estos electrones multiplicados llegan al **ánodo**, donde se produce una **señal eléctrica** que puede ser registrada con un **osciloscopio** u otros sistemas de adquisición.

Este dispositivo también recibe el nombre de **tragaluz cuántico**, ya que permite "ver" lo invisible: detectar la presencia de fotones individuales, algo fundamental tanto en experimentos de física como en aplicaciones astrofísicas y médicas.



## CLIP



[Pulsa en este enlace para ver el video.](#)

## ACTIVIDADES/AUTOEVALUACIÓN

- ¿Para qué sirve un fotomultiplicador?
- Enuncia las partes de un tubo fotomultiplicador
- ¿Por qué tiene que hacerse el vacío en el interior del tubo fotomultiplicador?
- ¿En qué consiste el efecto fotoeléctrico? ¿Cuál es el efecto de los dinodos en el tubo fotomultiplicador?
- Accede y manipula el modelo de fotomultiplicador 3D que aparece en la web.

<https://tragaluz.uv.es/?page=Material+did%C3%A1ctico>

Con la ayuda de este modelo, haz un esquema del mismo

## 6 El superneutrino

### OBJETIVOS

- Que sepas esquematizar la detección del neutrino de gran energía, efectuada por KM3NET
- Que puedas describir el fundamento de un telescopio de neutrinos

### MATERIAL DE CONSULTA

#### RESUMEN

El proyecto ANTARES fue el **primer detector submarino de neutrinos de gran volumen** basado en el efecto Cherenkov. Estuvo operativo durante **16 años**, recogiendo datos desde las profundidades del **mar Mediterráneo**, antes de ser desmantelado recientemente. Su diseño consistía en una red de **módulos ópticos** anclados en el fondo marino, equipados con **fotomultiplicadores** capaces de detectar con precisión la luz emitida por partículas subatómicas.

Los **neutrinos** son partículas extremadamente elusivas: **no interaccionan electromagnéticamente con la materia**, lo que les permite atravesar planetas y estrellas sin ser detenidos ni desviados. Por eso, son **portadores de información intacta** sobre los procesos más extremos y lejanos del universo. No pueden detectarse directamente, pero cuando **interaccionan ocasionalmente con la materia**, generan una **partícula cargada secundaria**. Esta partícula se desplaza a gran velocidad y emite **fotones Cherenkov**, formando un **cono de luz** que puede ser registrado por los fotomultiplicadores del detector.

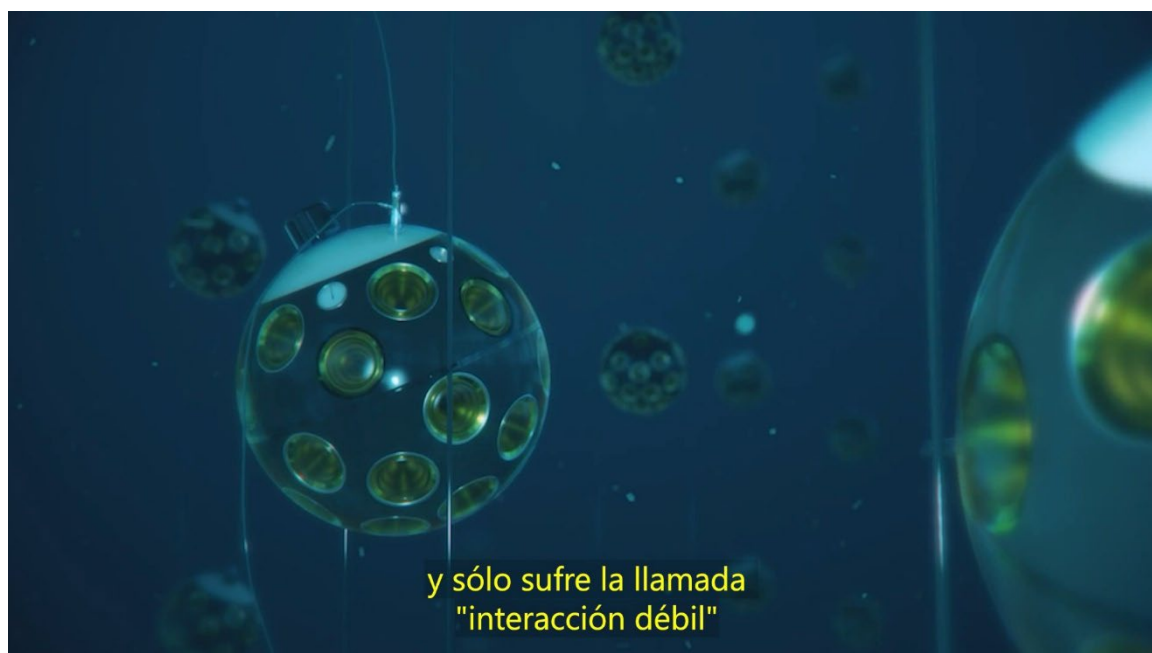
A partir del **tiempo y forma** de detección de estos fotones, se puede reconstruir con precisión la **trayectoria** y la **energía** del neutrino original.

Actualmente, el legado de ANTARES continúa con su sucesor, el proyecto **KM3NeT**, que está siendo instalado en fases. Utiliza una arquitectura similar pero más ambiciosa: grandes redes de módulos ópticos dispuestos a **profundidades de hasta 3 kilómetros**, en sectores **totalmente oscuros** del mar, libres de cualquier fuente lumínica que no provenga directamente de las interacciones físicas que se desean estudiar. Gracias a esta infraestructura, se abre la posibilidad de detectar más

neutrinos de altísima energía y avanzar en el conocimiento de **fuentes cósmicas remotas**.

Aún con el proyecto **KM3NeT** en construcción, se produjo un hito destacable: la **detección de un neutrino de muy alta energía**. Esta observación contundente confirmó que la tecnología empleada permitía estudiar fenómenos astrofísicos extremos, y se convirtió en una prueba experimental clave para entender el comportamiento de estas partículas.

## CLIP



[Pulsa en este enlace para ver el video.](#)

## ACTIVIDADES/AUTOEVALUACIÓN

- ¿Cuál es el objetivo del proyecto Antares/KM3NET?
- ¿Por qué se sitúan los sensores en las profundidades del mar?
- ¿En qué efecto están basados los sensores de Antares/KM3NET?
- ¿Qué evento de gran relevancia científica ocurrió el 13 de febrero de 2023?

## 7. La protonterapia

### OBJETIVOS

- Enunciar las ventajas de la protonterapia sobre otras terapias convencionales.

### MATERIAL DE CONSULTA

#### RESUMEN

La **protonterapia** es una técnica avanzada de tratamiento contra el cáncer que utiliza **protones de alta energía** para eliminar **células tumorales**. Su principal ventaja frente a la radioterapia convencional radica en que los protones, al penetrar en el cuerpo, **depositan poca energía en el trayecto**, pero **liberan la mayor parte justo en la profundidad del tumor**, sin dañar el tejido sano que se encuentra más allá. Esto se conoce como el **pico de Bragg**.

Esta propiedad permite **preservar órganos críticos y tejidos circundantes**, lo que reduce considerablemente los efectos secundarios. Uno de los **principales ámbitos de aplicación** es la **oncología pediátrica**, ya que los niños son especialmente sensibles a la radiación, tanto por su mayor esperanza de vida como por su desarrollo neurológico en formación. Al reducir la dosis integral recibida por el cuerpo, se disminuye también el riesgo de desarrollar **un segundo tumor** o de sufrir **secuelas cognitivas**.

Los protones utilizados en estos tratamientos se obtienen a partir del **hidrógeno del agua**, separando el gas por electrólisis y extrayendo protones individuales. Estos se **aceleran mediante un acelerador lineal**, que consta de **12 subcavidades** dispuestas dentro de un **búnker de hormigón** y un **sarcófago de plomo**, necesarios para contener la **radiación gamma** que se genera como subproducto del proceso.

El acelerador fue diseñada en el CERN y utiliza **radiofrecuencia amplificada** por **klystrones** para acelerar los protones casi hasta los **dos tercios de la velocidad de la luz**. Al alcanzar esa velocidad, los protones se dirigen al paciente, donde liberan su energía con alta precisión en la zona del tumor.

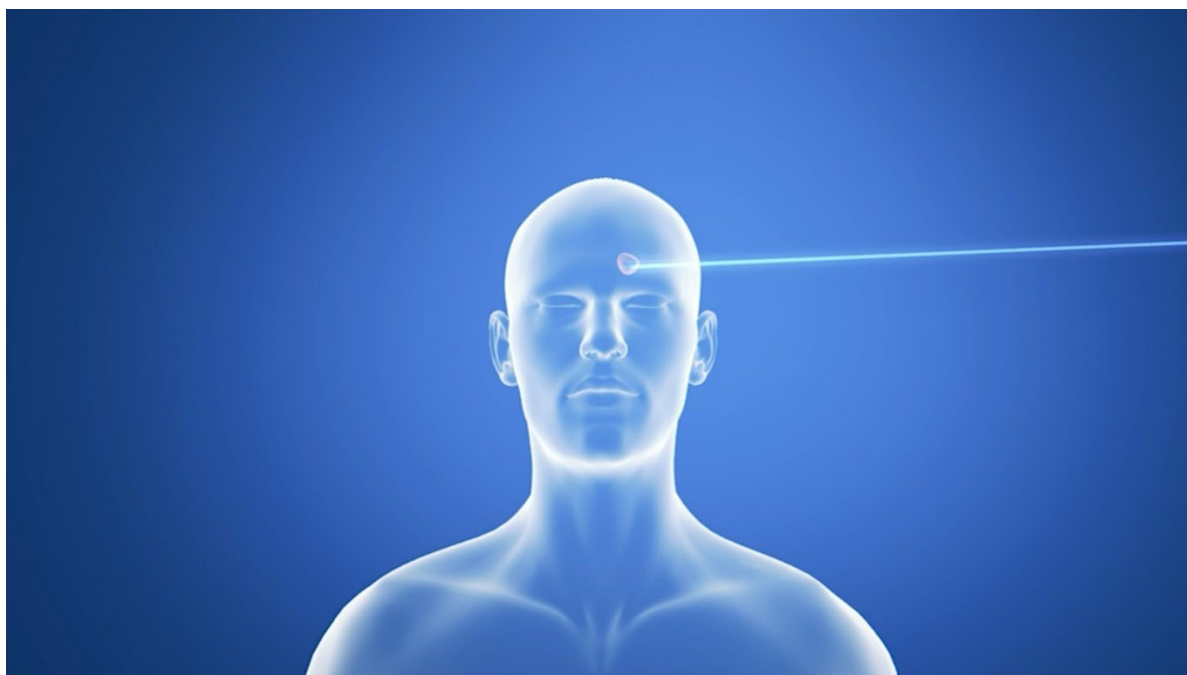
Una línea de investigación actual busca **mejorar aún más la precisión** de la protonterapia utilizando **fotones de Cherenkov** para **monitorizar en tiempo real** la

distribución de la radiación. Esta técnica permitiría ajustar el tratamiento en cada instante, minimizando todavía más los riesgos.

También se está trabajando en el desarrollo de **equipos diseñados específicamente para pacientes pediátricos**, como el proyecto **Fénix**, que emplea tecnologías de detección ultrarrápida de fotones Cherenkov y sistemas de **inteligencia artificial** para mejorar la **sensibilidad temporal**, reducir la **dosis de radiotrazador** y acortar los **tiempos de exploración**, minimizando así la necesidad de anestesia en niños.

En conjunto, la protonterapia representa un gran avance en la lucha contra el cáncer, combinando **alta tecnología, precisión física y atención personalizada**, especialmente en los casos más sensibles como el tratamiento de **tumores cerebrales infantiles**.

## CLIP



[Pulsa en este enlace para ver el video.](#)

## ACTIVIDADES/AUTOEVALUACIÓN

- ¿En qué consiste la protonterapia?
- ¿Qué ventajas tiene la protonterapia con la radioterapia convencional?
- ¿Para qué aplicaciones es muy relevante utilizar la protonterapia?
- ¿Cuál es el campo de investigación actual?
- ¿Conoces algún centro de protonterapia en tu ciudad o proximidades?

## ANEXO

Se muestra una relación no exhaustiva de otros conceptos que pueden ser extraídos de fragmentos del documental:

- Origen del universo
- Los modelos de simulación del universo
- La luz, ¿onda o corpúsculo?
- Origen de la mecánica cuántica
- El telescopio KM3NET
- Bases de la herramienta PET
- Aceleradores de protones
- La mujer en la ciencia
- Paradoja de Olber
- El método científico