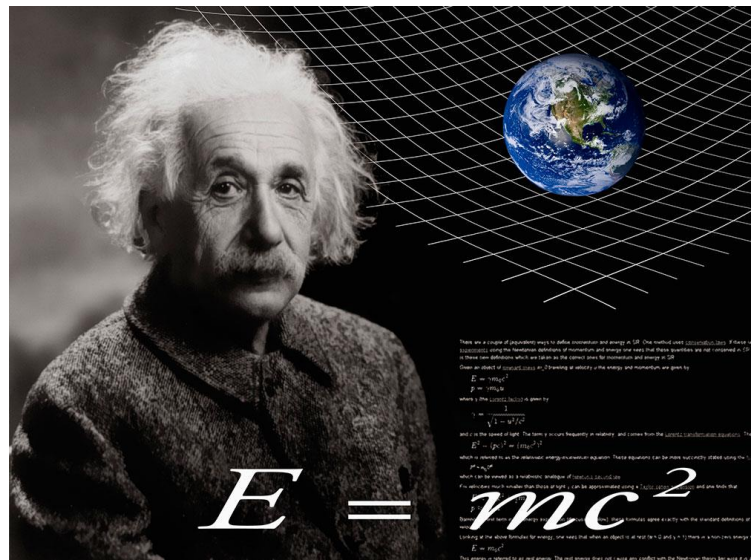


11-1-2021

Evidències experimentals de la teoria de la relativitat

“Seguint els passos d’Einstein”



Marc López
Tutor TR: Daniel Parcerisas
Curs 2020-2021
Modalitat: Tecnològic

Abstract

The theory of relativity was published by Einstein in the early 20th century. This theory is analyzed and an attempt is made to remove the limit in order to find an error in it or to reinforce it.

The objective of this work is based on attacking a small part of the theory to show that it is correct. To do this, as TimePix particle detectors are available, muons (particles that travel practically at the speed of light) were recorded with the detector and the dilation of space and time was demonstrated using various equations.

For It, first we need to investigate the background to this theory to know how it came about. Then we must familiarize ourselves with some concepts of the theory, such as the Lorentz transformations that help us understand the dilation of space-time.

Finally, it is interesting to see other phenomenal that shows that the theory is still valid. For this, we interviewed an expert in gravitational waves who is currently working at LIGO, Alicia Sintes.

Before demonstrating the muon experiment, it was necessary to do a little initiation practice to the detector and in the Pixet Pro super program. In the experiment several setbacks arose, since it was not taken into account that the muon does not deposit all its energy in the detector.

Finally, the dilation of space and time is demonstrated, and it was possible to reach the conclusion that thanks to physics we can advance a lot, but we still have much to discover.

La teoría de la relatividad fue publicada por Einstein a principios del siglo XX. Esta teoría es analizada y se intenta llevar al límite con el objetivo de encontrar algún error en ella o poder reforzarla.

El objetivo de este trabajo se basa en atacar una pequeña parte de la teoría para demostrar que es correcta. Para hacerlo, como se dispone de detectores de partículas TimePix, se registran muones (partículas que viajan prácticamente a la velocidad de la luz) con el detector y se demuestra la dilatación del espacio y el tiempo utilizando varias ecuaciones.

Para ello, primero de todo necesitamos investigar los antecedentes a esta teoría para saber cómo surgió. Después debemos de familiarizarnos con algunos conceptos de la teoría, como por ejemplo las transformaciones de Lorentz que nos ayudaran a entender la dilatación del espacio-tiempo. Por último, es interesante ver otros fenómenos que demuestran que la teoría sigue siendo válida. Para ello, entrevistamos a una experta en ondas gravitacionales que trabaja actualmente en LIGO, Alicia Sintes.

Antes de demostrar el experimento de los muones, fue necesaria una pequeña práctica de iniciación al detector y a su programa Pixet Pro. En el experimento surgieron varios contratiempos, puesto que no se tuvo en cuenta que el muon no deposita toda su energía en el detector.

Finalmente se demostró la dilatación del espacio y el tiempo y se pudo llegar a la conclusión de que gracias a la física podemos avanzar mucho, pero aún nos queda mucho por descubrir.

Índex

- Introducció 3
- Part teòrica
 - 1. Naixement de la física moderna
 - 1.1 Antecedents clàssics5
 - 1.2 Radiació del cos negre 15
 - 1.3 Efecte fotoelèctric16
 - 1.4 Quàntica17
 - 1.5 Relativitat19
 - 1.6 Naixement de la relativitat: Michelson.....20
 - 2. Relativitat
 - 2.1 Relativitat especial21
 - 2.2 Relativitat general28
 - 2.3 Paradoxes/anomalies30
 - 3. Evidències experimentals
 - 3.1 Michelson-Morley33
 - 3.2 Muons34
 - 3.3 Ones gravitacionals37
 - 4. Detectores
 - 4.1 MiniPix40
 - 4.2 Interferòmetre42
 - 4.3 LIGO43
 - 4.4 Lisa44
- Part pràctica
 - 5. Iniciació al MediPix46
 - 6. Pràctica muons54
 - 7. Entrevista Alícia Sintes64
- Conclusions73
- Agraïments75
- Referències76
- Annex 1: Càlculs pràctica iniciació MediPix
- Annex 2: Càlculs pràctica muons.
- Annex 3: Apunts conferències.

Introducció

Aquest treball es basa en la teoria de la relativitat d'Einstein i els experiments que s'han fet al llarg del temps que demostren que Einstein va crear una teoria perfecta. És una teoria que s'analitza constantment per tal de trobar algun error que ens faci replantejar una nova teoria sobre l'univers

En aquest treball s'atacarà una part de la teoria de la relativitat (concretament la dilatació de l'espai i el temps) per tal de demostrar que Einstein no estava equivocat i que, efectivament, a grans velocitats, segons l'observador, l'espai i el temps passen diferent.

Es va decidir escollir aquest tema perquè recentment havia assistit a diverses conferències del Rafael Ballabriga sobre el CERN i els detectors de partícules i em van semblar interessants per orientar el meu TR per aquest àmbit. L'altre motiu per al qual vaig fer el meu treball sobre física és perquè encara no tinc clar el meu futur i volia aclarir els meus dubtes de si realment m'agradaria treballar d'això en algun futur.

Primer es van concretar uns objectius que s'anirien complint a mesura que avancés el treball:

1. Investigar sobre els orígens de la relativitat i els seus antecedents
2. Cercar la informació necessària sobre la teoria de la relativitat per poder fer la part pràctica.
3. Descobrir quins tipus de detectors hi ha i quina part de la relativitat podem demostrar amb ells.
4. Esbrinar quins experiments han demostrat fins ara que la teoria d'Einstein és vàlida.
5. Detectar partícules amb el detector MiniPix.
6. Aprendre a fer servir el programa PixetPro.
7. Realitzar l'experiment dels muons per donar veracitat a la teoria d'Einstein.
8. Trobar les equacions que es poden utilitzar per a demostrar la dilatació del temps i l'espai.
9. Entrevistar a alguna persona que pugui aportar informació que no es trobi per Internet.
10. Aclarir dubtes sobre el meu futur.

Aquests serien els objectius del treball i ens centrarem bàsicament en l'objectiu 7 del qual se suporta tot el treball. En aquest experiment, s'enregistren muons amb el detector MiniPix, que després són analitzats amb el programa PixetPro d'on podem extreure

l'energia que han dipositat els muons al detector. Amb aquesta energia es poden utilitzar unes equacions per trobar la velocitat que portaven aquests muons. Un cop trobada la velocitat, es pot demostrar que han patit una dilatació de l'espai i el temps en el seu viatge fins a arribar a la superfície de la Terra.

En realitzar l'experiment dels muons s'espera com a hipòtesi que els muons enregistrats amb el detector hagin patit una dilatació de l'espai i el temps que va enunciar Einstein mitjançant les transformacions de Lorentz.

La segona hipòtesi del treball és que amb l'evolució de la física podrem arribar a saber l'origen del nostre univers.

Aquest treball està dividit en una part teòrica, on se cerca informació mitjançant diverses fonts i on s'aprèn tot el necessari per a la realització de la part pràctica, i una part pràctica.

A la part teòrica trobem una introducció a la relativitat d'Einstein, que és la base de la part teòrica del treball. En aquesta introducció està explicat l'origen de la relativitat així com els misteris sense resoldre que hi havia en aquella època i que Einstein va agafar com a objectiu donar-li una explicació a aquests fenòmens sense solució. Un cop introduïda, s'explica la divisió de la relativitat en teoria de la relativitat general i teoria de la relativitat especial. D'aquestes dues només s'expliquen els conceptes més importants i els conceptes que ens fan falta per realitzar la pràctica. Per acabar la part teòrica del treball s'hi han reservat dos apartats per la demostració de la teoria de la relativitat. En un d'ells s'exposen diferents tipus de detectors amb els quals es pot demostrar, mitjançant experiments i anàlisi, la veracitat de la teoria d'Einstein, i en l'altre s'expliquen diferents experiments que s'han fet per discutir la teoria de la relativitat.

Per altra banda trobem la part pràctica del treball que està dividida en 3 parts. La primera part és una pràctica amb el detector TimePix que analitza partícules alfa, beta i gamma i utilitza el programa PixetPro per enregistrar-les. Aquesta pràctica és simplement una introducció a l'experiment amb muons per tal de familiaritzar-nos amb el detector i el seu programa. Després trobem la base de tot el treball que és l'experiment amb muons que servirà per demostrar que Einstein estava encertat. Finalment trobem una entrevista a Alcía Sintés a la qui li preguntem sobre les ones gravitacionals i el LIGO.

El treball finalitza amb una conclusió que explica com ha evolucionat el treball i els problemes que s'han trobat

Part teòrica

Aquí trobarem la part teòrica del treball que necessitem per tal de familiaritzar-nos amb alguns conceptes i equacions que més tard s'aplicaran a la part pràctica. La informació està dividida en 4 parts:

1. Naixement de la física moderna: Inclou les teories anteriors a la relativitat i la seva evolució fins a arribar al naixement de la relativitat.
2. Relativitat: s'expliquen conceptes bàsics i necessaris de les dues teories de la relativitat per a poder realitzar la part pràctica amb els suficients coneixements.
3. Evidències experimentals: s'exposen tres experiments històrics amb els quals es pot demostrar que una part de la relativitat és correcta.
4. Detectors: aquesta part ajuda a familiaritzar-nos amb el detector TimePix que es fa servir a la part pràctica, i coneixem uns altres tipus de detectors

Malgrat que l'entrevista a Alícia Sintès s'ha situat en la part pràctica d'aquest treball, també la podem considerar una font d'informació de la part teòrica, ja que l'objectiu principal de l'entrevista era rebre coneixement sobre les ones gravitacionals i el funcionament del detector LIGO

1. Naixement de la física moderna

A l'apartat 1 trobem com una mena d'introducció a la relativitat on s'expliquen tots els antecedents i expressions que més tard Einstein combina o afegeix a la seva teoria. També trobem els misteris de la ciència que els científics no eren capaços de resoldre i que Einstein es va dedicar a trobar una resposta

1.1 Antecedents clàssics

1.1.1 Ones

Una ona és propagació d'una pertorbació d'alguna propietat de l'espai, per exemple, densitat, pressió o camp elèctric. En aquest apartat trobem les característiques de les ones i el fenomen que poden donar.

Model clàssic (La llum)

Homer va recollir la creença popular dels grecs a la Ilíada i a l'Odissea on parla de raigs (efluvis) que surten dels ulls. Plató i Demòcrit van formular les primeres idees sobre la llum.

Pensaven que la llum eren partícules de diverses formes i que s'ajunten entre elles per formar els colors. Aristòtil va enunciar una teoria dinàmica que deia que la llum modificava el medi.

Després de molts anys buscant una resposta, van sorgir dues grans idees. A finals del segle XVII, va aparèixer una de les discussions més grans de la història de la naturalesa.

- Teoria corpuscular (Isaac Newton i Descartes)

Suposa que la llum està formada per partícules materials anomenats corpuscles que són llançats a gran velocitat pels cossos que desprenen llum. Aquesta teoria explica la propagació rectilínia de la llum en un medi, ja que els focus lluminosos emeten partícules que es propaguen en totes direccions en línia recta. També explica la reflexió com que les partícules reboten quan troben un obstacle. La refracció l'explicava com que les partícules eren atretes per l'aigua, la seva velocitat augmenta i per tant en entrar a l'aigua, canviava la seva direcció. És a dir, va enunciar que la llum es propaga a més velocitat en els medis més densos. Per últim també va suposar que els diferents colors que forma la llum blanca es deuen a la varietat de corpuscles que hi havia.

- Teoria ondulatoria (Huygens i Hooke)

La llum es propaga a gran velocitat a través de vibracions les quals generen una esfera que creix de forma regular (ones mecàniques). Aquestes ones feien un moviment específic que corresponia a la propagació de la llum a través del buit en un medi invisible anomenat èter. Explicava els diferents colors de la llum blanca segons la longitud de l'ona. El principi de Huygens va explicar els fenòmens lluminosos:

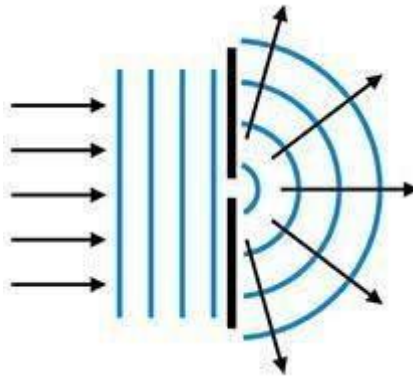
Principi de Huygens – Fresnel

La idea principal d'aquest principi és que els punts que formen un front d'ona poden convertir-se com a nous focus d'emissors d'ones, les quals es propaguen en totes direccions amb la mateixa velocitat de fase v , i originen un nou front d'ones anomenades ones secundàries a una distància λ .

Aquest principi va ajudar a entendre millor la refracció

Difracció

La difracció es produeix quan una ona troba un obstacle que impedeix la seva continuïtat en línia recta i hi trobem un canvi en la direcció de propagació. Quan l'ona es troba amb l'obstacle, o bé el volta, o bé s'obre després de passar per l'obertura. Només les ones tenen la capacitat de difractar-se.



Il·lustració 1

Esquema que mostra els fronts d'ona difractant-se en un obstacle.

Si les dimensions d'aquest obstacle són molt més grans que l'ona, no es produeix difracció. Podem trobar diferents tipus de difraccions:

- Difracció per una esclatxa

Succeeix quan un raig de llum travessa una petita esclatxa vertical. La intensitat de llum que sortiria de la difracció en funció de l'angle és causada per la següent expressió:

$$I(\theta) = \left[\frac{\sin\left(\frac{kd}{2}\sin\theta\right)}{\frac{kd}{2}\sin\theta} \right]^2$$

on d és l'amplada de l'esclatxa i

$$k = 2\pi/\lambda$$

- Difracció per una obertura circular

Intensitat en un punt P provocada per la difracció d'una obertura circular de radi R és causada per l'expressió:

$$I\theta = \left(2 \frac{J_1(kR\sin\theta)}{kR\sin\theta} \right)^2$$

on J_1 és la funció de Bessel de primer ordre.

- Difracció del so

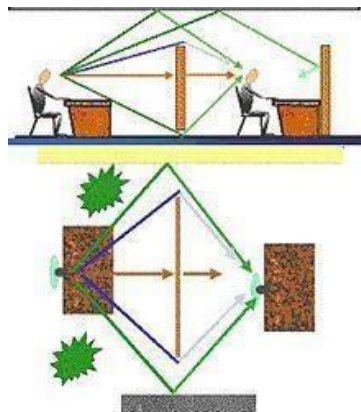
Huygens va dir que el so necessitava un medi de propagació.

Aquesta difracció es pot produir perquè:

1. Una ona sonora troba un obstacle petit i el rodeja
2. Una ona sonora troba un forat petit i el travessa.

Si l'obstacle és molt més gran que la longitud de l'ona, l'efecte de difracció és més petit.

Les ones sonores es propaguen en línia recta o raigs, com la llum.



Il·lustració 2

La línia blava representa la difracció; la verda, la reflexió i la marró, la refracció

Reflexió i refracció

Quan una ona es troba amb un obstacle, sorgeixen els fenòmens de reflexió i refracció.

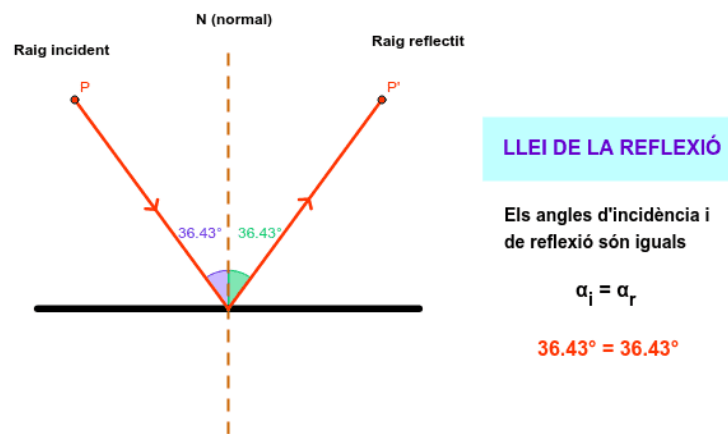
- Reflexió

És el canvi de direcció de propagació de l'ona en una superfície de separació entre dos medis diferents (obstacle). D'aquesta manera el front d'ona retorna cap al medi del qual havia sorgit. La velocitat és la mateixa abans i després de la reflexió. Uns bons exemples de reflexió serien l'eco i el fet de sonar en l'acústica, l'estudi de les ones sísmiques en geologia, les ones electromagnètiques i la llum visible. Podem definir tres lleis:

El raig incident, el raig reflectit i el normal a la superfície de reflexió al punt d'incidència es troben en el mateix pla.

L'angle que el raig incident forma amb la normal equival a l'angle que el raig reflectit forma amb la mateixa normal.

El raig reflectit i el raig incident es troben en costats oposats de la normal.



Il·lustració 3

Com funciona la reflexió

- Refracció

És la transmissió d'una part de l'energia de l'ona al segon medi canviant la direcció de propagació. La relació que trobem entre els raigs incidents i els raigs refractats és la llei de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

n_1 i n_2 són els índexs de refracció dels dos medis i si 1 i 2 són els angles que formen el raig incident i el refractat respecte a una línia perpendicular a la superfície. Trobem que raig incident, raig refractat i la normal estan al mateix pla.

Per tant trobem que en el fenomen de reflexió, les ones queden retingudes al medi del qual provenen. En canvi en la refracció, l'ona canvia al segon medi canviant la direcció. Definim l'índex de refracció d'un medi com el quocient entre la velocitat de la llum en el buit i en el medi:

$$n = \frac{c}{v}$$

- Dispersió de la llum

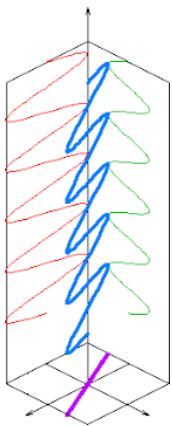
Es produeix quan un raig de llum es refracta en algun obstacle. La llum que proveeix del sol (llum blanca) es divideix en colors quan refracta per exemple amb un prisma. Aquesta divisió es deu al fet que l'índex de refracció disminueix quan augmenta la longitud d'ona de manera que les longituds d'ona més llargues (vermell) es desvien menys que les curtes (blau). Per tant l'índex de refracció depèn de la longitud d'ona:

$$n = n(\lambda)$$

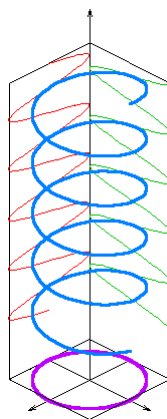
Polarització

En les ones transversals, que són aquelles on el moviment de les partícules és perpendicular a la direcció de propagació de les ones, la polarització descriu la direcció de travessa d'un camp elèctric.

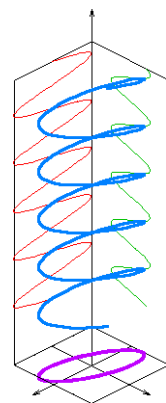
Trobem tres tipus de polaritzacions segons la figura que descriu el camp elèctric.



lineal



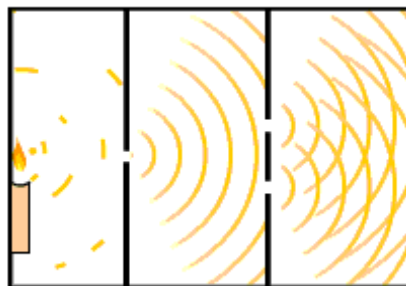
circular



el·líptica

1.1.2 Thomas Young

A principis del segle XIX, Thomas Young va demostrar que la teoria ondulatoria de Huygens era certa. I per tant va descartar com a correcta la teoria corpuscular de Newton. Això ho va demostrar mitjançant l'experiment de la doble escletxa.



Il·lustració 4

Representació de l'experiment de Thomas Young

Thomas va dividir un raig de llum en dos mitjançant unes esclatxes i tot seguit els tornà a ajuntar damunt d'una pantalla. A sobre d'aquesta va observar que es produïa un patró d'interferències. És a dir, a la pantalla s'observaven franges clares i fosques espaiades regularment. Això demostra que llum més llum pot donar fosc. En la interferència que resulta, té lloc una redistribució espacial de la intensitat lluminosa sense que es perdi la conservació de l'energia. Aquest experiment va fer caure la teoria corpuscular perquè si aquesta hagués sigut certa, s'hauria d'observar només un punt de llum i no franges. En canvi, aquest experiment feia més certa la teoria ondulatoria. Aquest experiment es pot explicar matemàticament:

$$d \cdot v = D \cdot \lambda$$

La relació entre la separació de les esclatxes es pot formular com el producte de la distància que separa les dues esclatxes (d) per la distància entre el màxim d'interferència (y), és igual al producte de la distància entre les esclatxes i la pantalla (D) per la longitud d'ona (λ).

És el primer cop que podem afirmar que la llum és una ona i també podem mesurar la longitud d'ona a partir de la separació de les esclatxes per mitjà de la fórmula anterior:

$$\lambda = \frac{d \cdot y}{D}$$

Gràcies a això podem saber que la llum visible té una longitud d'ona de l'ordre de centenars de nanòmetres. Amb això també es permet explicar la no difracció.

Tot i això la gent va seguir mantenint la teoria de Newton com a certa i van seguir refusant la teoria ondulatoria.

Interferències

Una interferència és un fenomen que trobem quan tenim dues ones que se sobreposen, és a dir que trobem dues ones en la mateixa regió d'espai i com a resultat formen una ona d'amplitud major o menor. Podem trobar aquest efecte, per exemple, en ones de llum, de ràdio, de so o de superfície.

El principi d'ones analitza la perturbació total produïda per les dues ones:

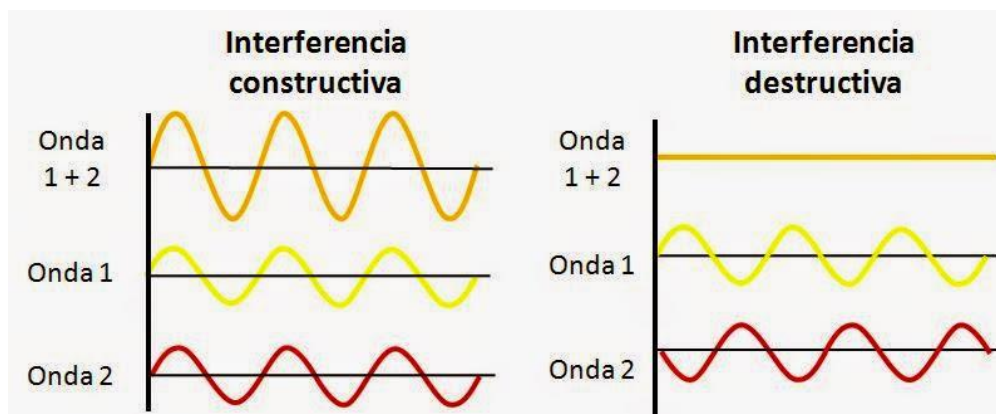
Quan dues o més ones són incidents en un mateix punt, el desplaçament total en aquest punt equival al vector suma dels desplaçaments de les ones individuals. Trobem dos tipus d'interferències:

- Interferència constructiva

Propagació de polsos amb desplaçaments en el mateix sentit. Quan dues crestes (punt d'una ona que té el màxim valor) de dues ones amb la mateixa freqüència es troben al mateix punt. La magnitud del desplaçament és la suma de les magnituds individuals. Els polsos interfereixen, però no interactuen: quan se separen tenen la mateixa forma.

- Interferència destructiva

Propagació de polsos amb desplaçaments en sentits oposats. La cresta d'una ona es troba amb la vall (punt d'una ona que té el mínim valor) d'una altra ona. La magnitud del desplaçament és igual a la diferència de les magnituds individuals. La interferència afecta, però, al desplaçament de cada punt de la corda.



Il·lustració 5

Comparativa dels dos tipus d'ones

1.1.3 Maxwell

A la segona meitat del segle XIX, Maxwell ajunta totes les lleis de l'electromagnetisme i va predir l'existència d'ones electromagnètiques.

Maxwell va ampliar els treballs previs sobre l'electricitat i el magnetisme de Michael Faraday, André-Marie Ampère i altres en un conjunt interrelacionat d'equacions diferencials anomenades equacions de Maxwell. Amb elles, com ja s'ha mencionat anteriorment, Maxwell demostra l'existència d'ones de camps elèctrics i magnètics oscil·latoris que viatgen pel buit a una velocitat que es podria conèixer mitjançant experiments senzills. Amb les dades de les quals disposava va obtenir una velocitat de 310.740.000 m/s. Amb aquests càlculs Maxwell aconsegueix un dels triomfs més importants en Física, la llum és un tipus particular d'ona electromagnètica.

Equacions de Maxwell.

Maxwell aconsegueix agrupar les següents equacions.

- Llei de Gauss

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_i$$

Relaciona el flux del camp elèctric a través d'una superfície tancada amb la quantitat de càrrega que es troba a l'interior de la superfície.

- Llei de Gauss per al magnetisme

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

No existeixen els monopols magnètics, és a dir, que no es pot aïllar un punt on només entrin línies de camps magnètics o només en surtin, sinó que totes les línies de camp són tancades

- Llei de Faraday

$$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

Estableix la relació entre la força electromotriu induïda a una espira i la variació del flux del camp magnètic a través de la superfície de l'espira

- Llei d'Ampère-Maxwell

$$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$$

Expressa que el corrent produeix camps magnètics.

Amb aquestes lleis va arribar a la conclusió que quan una càrrega accelera, es forma una ona transversal electromagnètica que té uns camps elèctrics i magnètics perpendiculars oscil·lants entre si. Les anteriors equacions tenen la mateixa forma que l'equació d'ona, és a dir, que els camps electromagnètics en el buit es comporten com ones tridimensionals que es propaguen a velocitat

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

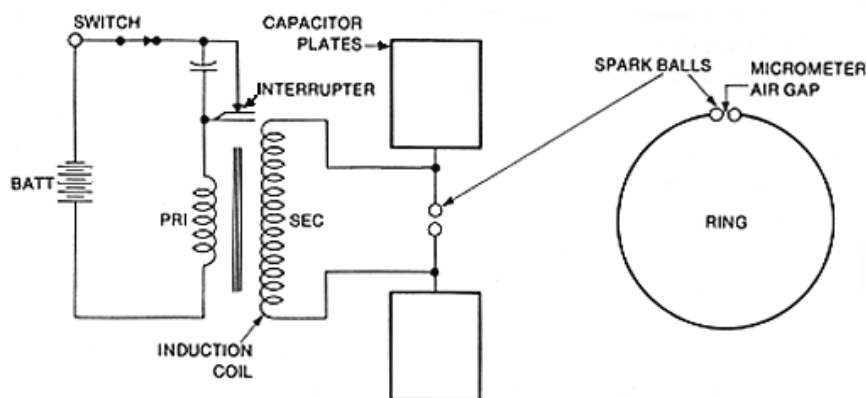
Aquesta velocitat c és la velocitat de la llum en el buit, la qual cosa suggereix (tal com ja he mencionat abans) que la llum és un tipus particular d'ona electromagnètica.

Aquesta idea va acabar de demostrar que la teoria ondulatoria era certa i va reforçar la idea de l'èter luminífer.

1.1.4 Hertz

Hertz va reformular les lleis de Maxwell fent-les més simples i simètriques. Maxwell volia detectar les ones electromagnètiques que Maxwell havia predit. Ho va aconseguir a finals del segle XIX mitjançant un experiment senzill.

Va agafar un transformador que produeix un voltatge molt gran i el va connectar a dues varetes de coure. A un dels extrems de les varetes va posar una esfera gran, i a l'altre una esfera petita. Les esferes grans serveixen per emmagatzemar càrrega elèctrica. Quan el voltatge era prou alt, es produïa una guspira entre les dues esferes petites i això va crear un camp elèctric i Hertz va deduir que s'hauria de crear per tant una ona electromagnètica que es propagues. Per detectar aquesta ona, Hertz va construir un detector i el va posar a 30 metres per tal de demostrar que l'ona es propaga. Quan va realitzar l'experiment, va demostrar que efectivament les ones electromagnètiques existeixen.



Il·lustració 6

Experiment d'Hertz amb el qual va demostrar que les ones electromagnètiques existeixen.

Més tard, Hertz va demostrar que aquestes ones es reflecteixen, es refracten i es comporten com les ones de la llum. També va determinar que la freqüència d'ona era de

3×10^8 m/s i que la seva longitud era de 10 m. Amb aquestes dades va poder calcular la velocitat de l'ona que va resultar ser la velocitat de la llum.

$$v = f\lambda = (3 \cdot 10^7 \text{ Hz}) \cdot (10 \text{ m}) = 3 \cdot 10^8$$

Després de les demostracions de Young, Maxwell i Hertz, la teoria ondulatoria va establir-se com a certa durant uns anys.

Tot i això, hi havia fenòmens que la física clàssica encara no podia explicar:

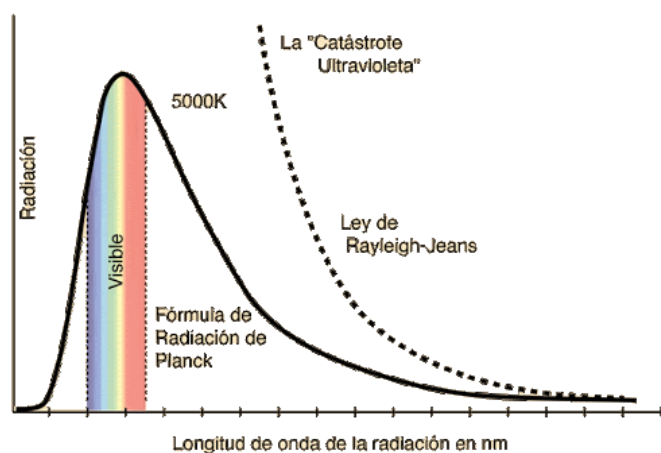
1.2 Radiació del cos negre

Un cos negre és un objecte opac que emet radiació tèrmica. Un cos negre perfecte és aquell que absorbeix tota la llum entrant i no en reflecteix gens ni mica. A temperatura ambient, dit objecte hauria d'aparèixer perfectament negre (d'aquí el terme cos negre). No obstant això, si és escalfat a una alta temperatura, un cos negre començarà a brillar intensament amb radiació tèrmica.

Tots els objectes emeten radiació tèrmica sempre que la seva temperatura sigui superior a $-273,15$ graus Celsius però cap emet una radiació tèrmica perfecta.

La radiació del cos negre és la radiació electromagnètica tèrmica dins o al voltant d'un cos en equilibri termodinàmic en el seu entorn o, emesa per un cos negre. El seu espectre i la seva intensitat només depenen de la temperatura del cos.

Aquest fenomen era inexplicable amb la Física Clàssica de Maxwell per l'ultraviolat. Segons la fórmula de Rayleigh-Jeans en la Física Clàssica, a mesura que la longitud d'ona anava creixent, l'energia emesa pel cos tendia a l'infinit, cosa que no acabava de quadrar. Aquesta llei funcionava amb freqüències petites, però a mesura que augmenta la freqüència, perd tot el sentit. Aquest fet es va anomenar com la catàstrofe ultraviolada.



Il·lustració 7

Gràfic on es pot veure l'error que cometia la llei de Rayleigh-Jeans (catàstrofe ultraviolada) on l'energia tendeix a infinit.

Aquest problema el va solucionar Planck.

Planck va buscar la corba matemàtica que més s'ajustés als experiments realitzats. Va suposar que l'energia s'absorbeix i que s'emet de manera discreta en paquets anomenats quàntums. Amb això s'arriba a la fórmula:

$$E = h \cdot \nu$$

On l'energia dels quàntums (E) és proporcional a la freqüència (ν).

La h és la constant de Planck que pren el valor de $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

1.3 Efecte fotoelèctric

L'efecte fotoelèctric és la capacitat de la llum per a alliberar electrons d'una superfície metàl·lica. Aquests electrons deixen el metall a una velocitat que no depèn de la intensitat de la llum, sinó de la longitud d'ona.

L'explicació de l'efecte fotoelèctric està relacionat amb la radiació del cos negre.

Després de realitzar experiments es troben amb característiques que són raonables des del punt de vista de Maxwell i les ones electromagnètiques però també es troben amb algunes que no poden explicar:

Si la llum tenia una freqüència inferior a la freqüència llindar, no es produïa cap mena d'efecte fotoelèctric. És a dir, que no importava el temps que estiguessis il·luminant els electrons. Els electrons no rebien mai la suficient energia per sortir. Això no eren capaços

d'explicar-ho perquè a la Física Clàssica la llum era una ona que es podia anar absorbint de manera contínua.

En canvi quan la freqüència supera aquesta freqüència llindar, els electrons tenen la suficient energia per sortir.

La freqüència inicial (F_0) no depèn de la quantitat de llum que se li aplica però sí del material. És a dir que cada material té una freqüència llindar diferent.

Aquest problema no s'explica fins que arriba Einstein

Albert Einstein afirma l'evidència de Planck i la reprèn. Einstein diu que la llum i totes les altres ones electromagnètiques són un feix de partícules (fotons) de massa nul·la en repòs que es transmeten per l'espai buit en forma d'ona electromagnètica amb velocitat c . És a dir que la llum és a la vegada una ona i una partícula.

Quan la llum ha de ser absorbida o emesa per un electró, ho fa en forma de fotó, de partícula:

$$E=h \cdot f$$

Quan la llum viatja a través de l'espai buit ho fa en forma d'ona

$$c= \lambda \cdot f$$

Amb això trobem que hi ha electrons lligats a l'àtom amb una certa energia que s'anomena treball d'extracció o funció de treball. A aquest àtom li arriba un fotó de la llum que té una energia de $h \cdot f$. Si la freqüència és més gran o igual que la freqüència llindar, aleshores el fotó té suficient energia per donar a l'electró i superar el treball d'extracció, és a dir se separa de l'àtom.

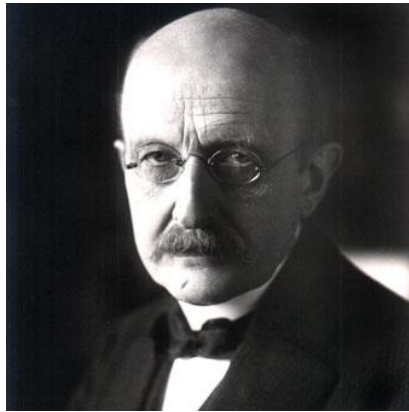
1.4 Quàntica

Abans del 1900 explicaven tots els fenòmens mitjançant la Física Clàssica però hi havia alguns fenòmens que no aconseguia explicar, com per exemple la radiació de cos negre i l'efecte fotoelèctric. Per això va aparèixer la quàntica.

És la branca de la física que estudia el comportament de la llum i de la matèria a escales microscòpiques, en què l'acció és de l'ordre de la constant de Planck. Es diferencia de la mecànica clàssica, generalment, a escala atòmica (molècules i àtoms) i subatòmica (protons, electrons, neutrons o fins i tot partícules més petites). Per tant, va sorgir a principis del segle XX per tal d'explicar diversos resultats experimentals de fenòmens d'origen microscòpic que no es poden entendre amb la física clàssica.

La quàntica s'inicia amb la llei de Planck que he mencionat a l'apartat de la radiació de cos negre on deia que la llum s'emet de manera discreta en forma de paquets (quàntums). També va suposar el seu inici l'explicació d'Einstein de l'efecte fotoelèctric on deia que la llum és ona i partícula.

Realment el naixement de la mecànica quàntica el trobem amb la dualitat ona-corpúscle. De Broglie estén a totes les partícules la característica d'ona-corpúscle. És a dir, que els electrons, els protons, els àtoms, etc poden comportar-se com a ones.



Il·lustració 8

Max Planck

1.4.1 Principi d'incertesa de Heisenberg

El tercer pilar fonamental de la física quàntica el trobem en el principi d'incertesa de Heisenberg, que diu que és impossible mesurar simultàniament i amb absoluta precisió la posició i el moment lineal d'una mateixa partícula en una direcció determinada (variables conjugades), com ara x i p_x .

Com més precís sigui el nostre coneixement d'una d'aquestes magnituds, més incertesa tindrem sobre el valor de l'altra.

1.4.2 Equació d'Schrödinger

Els objectes deixen de ser partícules determinades. Es representen mitjançant una ona de matèria que indica la probabilitat de trobar la partícula en una posició determinada en un cert instant.

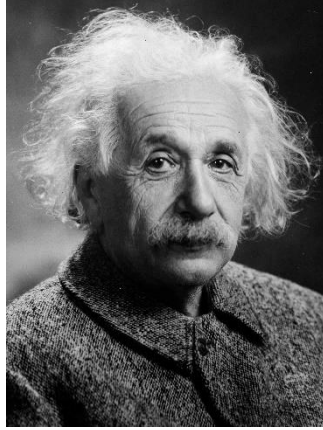
1.5 Relativitat

La teoria de la relativitat, que inclou relativitat general i especial, va ser formulada per Albert Einstein a principis del segle XX. Amb ella pretenia resoldre incompatibilitat entre la mecànica newtoniana i l'electromagnetisme. Tant la relativitat general com l'especial tenen en comú el principi de relativitat, que afirma que les lleis de la física són les mateixes per a tots els observadors. Això no significa que els diferents observadors no arriben a fer mesures iguals, sinó que les mesures segueixen les mateixes equacions sigui quin sigui el sistema de referència de l'observador.

En aquest punt es farà un resum sense concretar sobre la relativitat i la seva història i en el punt 2 ja es detallaran més a fons els conceptes.

La relativitat especial (1905) tracta de la física del moviment dels cossos en absència de forces gravitatòries, en el qual es feien compatibles les equacions de Maxwell i l'electromagnetisme amb una reformulació de les lleis del moviment. També es van unificar els conceptes de l'espai i el temps en un ramat tetradimensional al qual se li va denominar espai-temps. La relativitat especial va ser una teoria revolucionària per a la seva època, amb la qual el temps absolut de Newton va quedar relegat i conceptes com la invariabilitat en la velocitat de la llum, la dilatació del temps, la contracció de la longitud i l'equivalència entre massa i energia van ser introduïts.

La teoria general (1915) és una teoria de la gravetat que reemplaça a la gravetat newtoniana, encara que coincideix numèricament amb ella per camps gravitatoris febles i "petites" velocitats. La teoria general es redueix a la teoria especial en absència de camps gravitatoris. La relativitat general estudia la interacció gravitatòria com una deformació en la geometria de l'espai-temps. En aquesta teoria s'introdueixen els conceptes de la curvatura de l'espai-temps com la causa de la interacció gravitatòria, el principi d'equivalència que diu que per a tots els observadors locals inercials les lleis de la relativitat especial són invariants i la introducció del moviment d'una partícula per línies geodèsiques.



Il·lustració 9

Albert Einstein

1.6 Naixement relativitat: Michelson

En 1887, l'experiment de Michelson-Morley va acabar de refusar la idea que les ones lluminoses viatgen a través de l'èter.

Aquest experiment utilitzava la tècnica de Michelson, la interferometria. La interferometria depèn del fet que quan dues ones es creuen formen patrons molt exactes. Per un experiment d'interferometria, comença dividint un feix de llum, fent que cada un dels dos nous raigs es desplacin per camins diferents, per després ajuntar-los en una pantalla.

Pel seu experiment, Michelson i Morley van fer que dos raigs de llum viatgessin formant un angle recte, un viatjava a la mateixa direcció de l'èter i l'altre la creuava. Si hi hagués èter, el raig que viatja en la mateixa direcció que l'èter hauria de tardar menys. Aquesta va ser la hipòtesi de l'experiment.

Quan van realitzar l'experiment es van trobar que els dos raigs arriben al mateix temps. Van repetir l'experiment diverses vegades i van obtenir sempre el mateix resultat. Els científics van arribar a la conclusió que hi havia un problema amb la teoria de l'èter.

Aquest experiment es troba explicat amb més detall al punt 3.

Així va sorgir la necessitat de renovar la teoria i Einstein ho va resoldre el 1905 amb la teoria de la relativitat especial.

2. Relativitat

La teoria de la relativitat inclou tant la teoria de la relativitat especial com la de la relativitat general, formulades principalment per Albert Einstein a principis de segle XX, que pretenien resoldre la incompatibilitat existent entre la mecànica newtoniana i l'electromagnetisme.

En aquest apartat explicarem només els temes que necessitem per realitzar la pràctica dels muons, ja que aquestes teories són d'un nivell massa avançat per a la seva comprensió. També trobarem un apartat d'anomalies que fa el treball més interessant.

2.1 Relativitat especial

La teoria especial de la relativitat va ser publicada per Albert Einstein el 1905, i descriu la física del moviment en absència de camps gravitacionals. Fins aleshores la mecànica clàssica d'Isaac Newton descrivia els conceptes de velocitat i força per a tots els observadors, o sistemes de referència. Però Hendrik Lorentz i altres van demostrar que l'electromagnetisme, amb les equacions de Maxwell, no es comportaven com Newton preveia quan el sistema de referència canvia. Per exemple, quan es considera el mateix problema físic des del punt de vista de dos observadors que es mouen l'un respecte de l'altre.

La transformació de les lleis de la física respecte als observadors és la que dóna nom a la teoria, que s'ajusta amb el qualificatiu d'especial o restringida per cenyir-se a casos de sistemes en els quals no es té en compte els camps gravitatoris.

2.1.1 Postulats

1r postulat: Principi especial de la relativitat

Cap sistema de referència es pot considerar com a absolut. És a dir, les lleis de la física són les mateixes en tots els sistemes de referència inercials.

2n postulat: Invariància de c

La velocitat de la llum al buit és una constant universal, c , que és independent del moviment de la font de llum i val aproximadament 300.000 km/s.

Quan s'apliquen aquests dos principis a les equacions de Maxwell trobem que aquestes només són invariants sota les transformacions de Lorentz*, el que implica que l'interval de temps entre dos successos o la distància entre dos punts han de ser relatius a l'observador.

És a dir, no tots els observadors mesuraran el mateix temps entre dos successos o la mateixa longitud per un mateix objecte. Aquest caràcter relatiu de l'espai i el temps és una conseqüència de requerir que les mesures preses per diferents observadors deixin les equacions de Maxwell invariants. Això és la font de tots els resultats sorprenents de la relativitat general.

*La transformació de Lorentz permet calcular com varien les propietats d'un sistema físic entre diferents observadors inercials i actualitza la transformació de Galileu utilitzada a física fins aleshores. La transformació de Lorentz permet preservar el valor de la velocitat de la llum constant per a tots els observadors inercials.

2.1.2 Les transformacions de Lorentz

Lorentz va aconseguir resoldre el problema que hi havia entre l'electromagnetisme realitzat per Maxwell i la mecànica clàssica. Aquest problema era que els físics pensaven que la llum era una ona electromagnètica i es propagava per mitjà de l'èter.

Per tant, Lorentz va anar desenrotllant unes transformacions en les quals les equacions de Maxwell eren correctes sense tenir en compte l'èter. Tot i això, Lorentz no exclouïa l'èter. Va proposar que la interacció elèctrica entre dos cossos carregats es feia mitjançant corpuscles anomenats electrons que interactuen per mitjà de l'èter, el qual era contret pels electrons d'acord amb transformacions específiques, mentre aquests es troben en moviment relatiu al mateix. Aquestes transformacions es coneixen com a transformacions de Lorentz.

Es té un sistema S de coordenades (x, y, z, t) i un sistema S' de coordenades, (x', y', z', t') d'aquí les equacions que descriuen la transformació d'un sistema a un altre són:

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right), \quad x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z$$

on:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

és l'anomenat factor de Lorentz i c, és la velocitat de la llum en el buit.

2.1.3 Simultaneïtat

Dels postulats i les transformacions de Lorentz es dedueix que no podem dir amb sentit absolut que dos esdeveniments hagin passat al mateix temps en diferents llocs. Si dos successos passen al mateix temps en llocs diferents des del punt de vista d'un observador, qualsevol altre observador inercial que es mogui respecte al primer els presència en diferents moments.

Matemàticament es pot demostrar amb la primera equació de les transformacions de Lorentz:

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2} \right)$$

Dos esdeveniments simultanis verifiquen que $\Delta t = 0$, si succeeixen en diferents espais $\Delta x \neq 0$, un altre observador amb moviment relatiu obté $\Delta t' \neq 0$. Només en el cas que dos esdeveniments succeeixin en el mateix espai al mateix temps no succeeix això.

Per analitzar el concepte de simultaneïtat tenim que dos esdeveniments puntuals (E_1 i E_2) ocorren respectivament en els instants de temps (t_1 i t_2) i en els espais (P_1 i P_2). Totes les teories físiques coincideixen que només es pot donar una d'aquestes tres possibilitats:

1. És possible que un observador estigui present a E_1 i després a E_2 . Per tant trobem que E_1 és anterior a E_2 . Si això succeeix no pot haver-hi un altre observador que verifiqui 2.
2. És possible per a un observador estar present a E_2 ; i després a E_1 . Això passa perquè E_1 és posterior a E_2 . Si això succeeix no pot haver-hi un altre observador que verifiqui 1.
3. És impossible que un observador puntual estigui present en E_1 i E_2 .

Totes les teories físiques permeten classificar la resta d'esdeveniments en passat, futur i la resta d'esdeveniments (ni passat ni futur) respecte a un esdeveniment fixat.

2.1.4 Dilatació en el temps i contracció de la longitud

En la relativitat especial el temps deixa de ser absolut com es deia a la mecànica clàssica. El temps deixa de ser el mateix per a tots els observadors. Un observador immòbil que mesura el temps que triga a succeir un esdeveniment i un altre que es mou a una velocitat relativista no mesuren el mateix temps.

Mitjançant les transformacions de Lorentz trobem que:

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2} \right)$$

$$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$$

i

$$\Delta t = \gamma \left(\Delta t' + \frac{v\Delta x'}{c^2} \right)$$

$$\Delta x = \gamma(\Delta x' + v\Delta t')$$

Si aïllem les dues primeres equacions, trobem que quan $\Delta x = 0 \rightarrow \Delta t' = \gamma\Delta t$

Troblem que els esdeveniments que es realitzin en el sistema S' seran més llargs que els del sistema S. La relació entre les dues és γ . Aquest fenomen es coneix com a dilatació del temps.

Si el temps varia a velocitats relativistes, la longitud també ho fa. Si tenim dos observadors inicialment immòbils i aquests mesuren un vehicle en el qual un d'ells viatjarà a velocitats molt grans, obtindran el mateix resultat. Si un d'ells entra al vehicle i quan adquireix suficient velocitat mesura el vehicle obté el resultat esperat. Però si el que està immòbil torna a mesurar, obtindrà un valor menor. Això passa perquè la longitud també es contrau.

Si ara aïllem la x a les transformacions de Lorentz i condicionat a $\Delta t' = 0$ obtenim:

$$\Delta x' = \gamma\Delta x$$

Podem veure que existeix una disminució a causa del quocient. Només podem veure aquests fenòmens a grans velocitats, és per això que a la nostra vida quotidiana les conclusions obtingudes pels càlculs no tenen molt de sentit.

Un bon exemple d'aquestes contraccions i dilatacions va ser proposat per Einstein en la seva paradoxa dels bessons, i verificat experimentalment per l'anomalia en el temps de vida dels muons (part pràctica d'aquest TR), produïts pels raigs còsmics.

2.1.5 La transformació de Galileu

La transformació de Galileu ens permet calcular les mesures que farà un observador O2 sabent les mesures que ha fet un altre observador O1 i la velocitat v relativa entre ells. Mesurant la posició dels objectes en l'eix x i suposant que la velocitat relativa entre els dos

observadors és també en l'eix x , si al començament ($t_1 = t_2 = 0$) els sistemes de coordenades dels dos observadors tenen els orígens coincidents ($x_1 = x_2$), llavors si en un moment t_1 l'observador O1 observa un objecte en la posició x_1 , l'observador O2 l'observarà en:

$$x_2 = x_1 + v \cdot t_1$$

$$t_2 = t_1$$

Per entendre-ho millor és preferible deduir aquesta transformació a partir de principis més elementals.

$$x_2 = f(v, x_1, t_1)$$

$$t_2 = g(v, x_1, t_1)$$

Els principis més elementals o resultats d'experiments són:

1. L'extensió i la duració dels objectes són acumulatives. Si es fiquen dos objectes un a continuació de l'altre en línia recta, per a tots dos observadors la longitud total és la suma de longituds. Si dos esdeveniments succeeixen un a continuació de l'altre, per a tots dos observadors la durada total és la suma de durades.
2. Si un objecte resta quiet, respecte d'un observador l'altre el veu moure's amb la mateixa velocitat amb què veu que es mou aquest observador.
3. Si un observador veu que un altre es mou a una determinada velocitat v l'altre el veu a ell movent-se a la mateixa velocitat però en sentit contrari: $-v$.
4. A l'espai no hi ha direccions privilegiades: Si l'observador O1 es mou amb velocitat $-v$ el resultat és el mateix que si es mou amb velocitat v .

2.1.6 Equivalència de massa i energia

La relativitat especial postula l'equació que va arribar a ser la més important del planeta, $E = m \cdot c^2$. El moviment i l'energia d'una partícula estan relacionades mitjançant l'equació:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

La relació energia-moment ens permet observar la independència de l'observador tant de l'energia com de la quantitat de moment. Per les velocitats no relativistes, l'energia pot ser aproximada mitjançant:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

Trobat així l'energia cinètica de la mecànica de Newton. El primer terme d'aquesta aproximació és l'energia en repòs (energia potencial). És l'energia que pot mesurar un observador en repòs d'acord amb el postulat d'Einstein. Aquesta energia no genera conflicte en les lleis de Newton perquè és constant i persisteix l'energia en moviment.

2.1.7 Quantitat de moviment

Com existeix una variació en la massa relativista, la quantitat de moviment d'un cos també ha de ser modificada. Segons Newton la quantitat de moviment està definida per: $p = m \cdot v$ on m era la massa del cos. Com aquesta massa ja no és invariant hem d'incloure el factor de Lorentz:

$$p = \gamma m v = M v$$

Les conseqüències d'això s'aprecien en la secció de força.

2.1.8 Força

La segona llei de Newton diu que la variació de la quantitat de moviment d'un cos és proporcional a la força aplicada i al temps durant el qual s'aplica aquesta força:

$$F \cdot \Delta t = \Delta(m \cdot v)$$

Com la massa i la velocitat depenen de la velocitat relativa entre els observadors cal imposar que la força es transformi de manera adequada per tal que es continuï complint les lleis de Newton. El fet de mesurar l'augment de la quantitat de moviment que provoca durant un temps és la forma de mesurar la magnitud de la força. Una manera de duplicar la força és duplicar l'efecte o fer-lo actuar durant el doble del temps, la llei diu que la força que es mesurarà fent això serà el doble.

Per estudiar una força determinada es pot aplicar la força a un objecte i mesurar el temps i l'augment de quantitat de moviment que ha produït i obtenir el valor de la força mitjançant:

$$F = \frac{\Delta(m \cdot v)}{\Delta t}$$

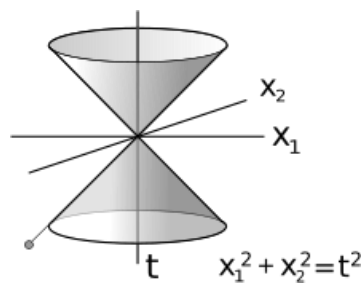
2.1.9 Espai de Minkowski

Amb les dades d'espai i temps d'un fet puntual preses per un observador i mitjançant les transformacions de Lorentz, podem esbrinar l'espai i el temps del mateix fet observat per un altre observador. Aquesta transformació, per cada velocitat relativa entre els dos observadors és una aplicació lineal:

$$\begin{pmatrix} x' \\ t' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \begin{pmatrix} 1 & -v \\ -v/c^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ t \end{pmatrix}$$

On x , i t són la posició i el temps mesurats pel primer observador i x' i t' són els mesurats pel segon, v és la velocitat del segon observador respecte del primer i c és la velocitat de la llum.

A la relativitat especial s'utilitzen tensors (certa classe d'entitat algebraica de diversos components i que és independent a qualsevol punt de coordenades elegit) i quadriectors (representació matemàtica en forma de vector de quatre dimensions) per representar un espai euclidià.

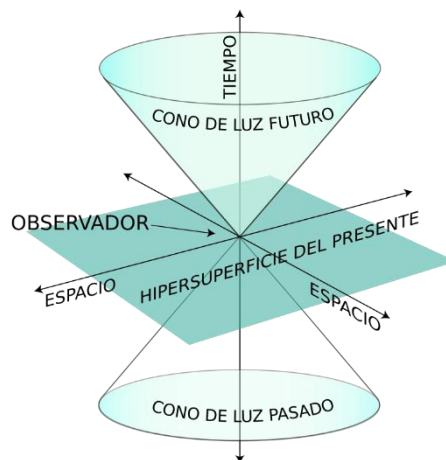


Il·lustració 10

Con dual

2.1.10 Causalitat física

Antigament la causalitat estava lligada al concepte de “per una causa existeix un efecte”. Gràcies a Laplace es creia que per a tot esdeveniment es devia obtenir un resultat que podia predir-se. Amb aquesta perspectiva, es va originar el con de llum de probabilitats:



Il·lustració 11

Ara un esdeveniment en el con de llum del passat no necessàriament ens condueix a un sol efecte en el con de llum futur. Deslligant així la causa i l'efecte. L'observador que se situa en el vèrtex del con ja no pot indicar quina causa del con del passat provocarà l'efecte en el con del futur.

Quan hi ha una acceleració la geometria no roman constant, el que comporta l'aplicació d'una força. Aquests factors indicaven la necessitat d'una teoria més àmplia que permetés estudiar les relacions de transformació entre sistemes de referència no inercials o sotmesos a l'acció de forces. Aquests indicis van dur finalment a la formulació de la teoria de la relativitat general.

2.2 Relativitat general

La relativitat general és una teoria geomètrica de la gravitació publicada per Albert Einstein el 1915 com a segona part de la seva teoria de la relativitat. La relativitat general generalitza i unifica la relativitat especial i la llei de la gravitació universal d'Isaac Newton. És una teoria del moviment, la matèria, l'espai i el temps vàlida per a tots els observadors del cosmos.

La diferenciem de la teoria especial perquè a la teoria general es té en compte la gravetat.

Les prediccions de la física clàssica que involucren el pas del temps, la geometria de l'espai, el moviment dels cossos en caiguda llibre i la propagació de la llum són substituïdes per unes altres prediccions a la relativitat general. Alguns exemples d'aquestes diferències inclouen la dilatació gravitacional del temps, les lents gravitatòries, el desplaçament cap al roig a causa de la gravitació i l'efecte Shapiro.

La teoria d'Einstein implica l'existència de paradoxes com forats negres, estrelles de neutrons, supernoves que les trobem explicades al punt 2.3.

2.2.1 Sistemes de referència

No podem parlar de velocitat o acceleració sense haver escollit un punt de referència. Això significa que qualsevol moviment dependrà relativament al sistema de referència escollit. La relativitat general tracta tant els sistemes de referència accelerats (en el sentit vectorial) com els inercials (els estudiats a la relativitat especial).

Les lleis de Newton només són vàlides a un sistema de referència local inercial. La trajectòria de les partícules lliures com els fotons és una línia recta dins d'un sistema de referència local inercial. Quan aquestes línies s'estenen més enllà del sistema de referència local, ja no són rectes i són conegudes amb el nom de geodèsiques. Cal reemplaçar la primera llei de Newton per la llei del moviment geodèsic.

Els sistemes de referència inercials són els que un cos, lliure de qualsevol acció exterior, manté un moviment uniforme. La força centrífuga n'és un exemple. En canvi, els sistemes de referència no inercials són els que un cos lliure rep una acceleració l'origen de la qual és l'acceleració del mateix sistema de referència. L'efecte Coriolis n'és un exemple.

2.2.2 Principi d'equivalència

El principi d'equivalència és el nexa entre la relativitat especial i la relativitat general. Aquest principi estableix que localment no es pot diferenciar un moviment de caiguda lliure (sense rotació) que es produeix en un camp gravitacional, d'un moviment uniformement accelerat en absència de gravetat. Això passa perquè mai s'ha pogut trobar la diferència entre una massa inercial i una massa gravitacional.

Aquest resultat no és vàlid per un volum amb acceleròmetres sensibles on s'observarà un camp de gravetat, una acceleració i un efecte centrífug. Per tant, aquest resultat és local, és a dir, vàlid per un espai restringit.

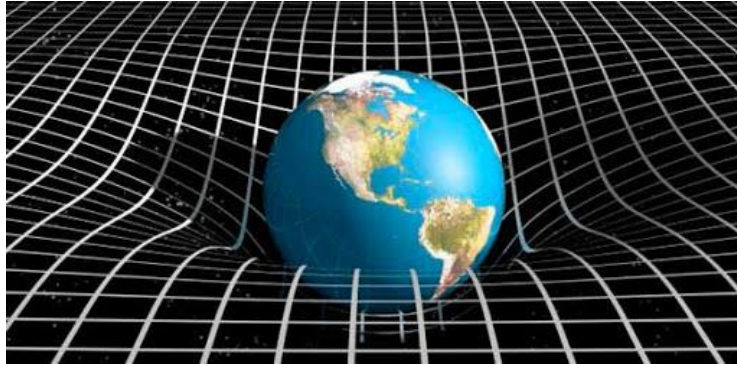
Aquesta equivalència s'utilitza a l'entrenament dels astronautes, fan pràctiques a avions que efectuen vols parabòlics on la força centrífuga compensa durant alguns minuts la força de gravetat, simulant la "caiguda lliure" d'un cos en òrbita (que en tenir una òrbita circular està indefinidament en caiguda lliure).

Per tant trobem que el principi d'equivalència ve a dir-nos que la massa inercial i la massa gravitacional representen la mateixa cosa.

2.2.3 Tensor d'energia i curvatura de l'espai

Einstein va modelitzar l'espai-temps amb una variació pseudo-riemanniana quadri-dimensional.

La curvatura de l'espai defineix el moviment de la matèria, i la matèria defineix la curvatura de l'espai. Per poder representar la geometria de l'espai-temps ens hem d'imaginar que es comporta com una superfície elàstica (com una malla) afectada localment per la presència d'un objecte que fa enfonsar-la, com una bola per exemple.



Il·lustració 12

Representació de com hem d'entendre la curvatura de l'espai

Si traslладem això a l'espai físic, la presència d'un cos massiu afectarà la curvatura de l'espai. Si ho observem des de l'espai, aquesta curvatura afectarà la trajectòria d'un raig de llum o d'un objecte en moviment que passi a prop del cos. La frase d'un físic teòric nord-americà, defineix a la perfecció com afecta la curvatura de l'espai a la matèria: *“La massa i l'energia li diuen a l'espai com s'ha de corbar, i la curvatura de l'espai temps li diu a la matèria com s'ha de comportar”* John Archibald Wheeler.

La curvatura de l'espai també afecta en astronomia que provoca l'efecte de lent gravitatòria. Aquest succeeix quan, a causa de la curvatura de l'espai temps, es produeix un efecte de deflexió dels raigs lluminosos.

L'estudi de solucions de l'equació d'Einstein és una branca de la física anomenada cosmologia. Entre altres coses, permet d'explicar l'avançament del periheli de Mercuri, predir l'existència de forats negres, de les ones gravitacionals i d'estudiar els diferents escenaris d'evolució de l'Univers.

2.3. Paradoxes/anomalies

2.3.1 Avançament del periheli de Mercuri

Mercuri és el planeta més proper al Sol. El 1973 es va enviar una sonda (el Mariner 10) que va determinar que a Mercuri no hi ha pràcticament aire i que té una pressió molt gran. D'això aquí en diem “buit”.

Mercuri es mou al voltant del Sol formant el·lipses. Quan Mercuri es troba a la part més propera del Sol està al periheli, i quan es troba a la part més allunyada es troba a l'afeli. Quan Mercuri es troba al periheli, es mou més ràpidament.

L'el·lipse de Mercuri va girant amb el temps, és a dir, no està sempre orientada de la mateixa manera. Per tant el periheli es mou i d'això se'n diu precessió del periheli de Mercuri.

El problema és que segons les lleis de Newton aquesta el·lipse havia de girar a raó de 575 segons d'arc per segle que és com dir el mateix que al cap de 225.000 anys l'esmentada el·lipse donaria una volta completa quan s'havia comprovat que en realitat, girava a raó de 532 segons d'arc per segle, el que equivaldria a dir que en 244.000 anys donaria una volta.

Tots els planetes presenten una precessió del seu periheli, però la diferencia de calcular-lo segons les lleis de Newton o les de la Relativitat General només es nota de forma tan voluminosa amb Mercuri.

Quan Albert Einstein va introduir les seves equacions de la relativitat general per calcular la precessió del periheli de Mercuri li va donar 532 segons.

Encara que molts pensessin que el gran èxit de la Relativitat General era explicar la curvatura dels rajos de llum en un camp gravitatori, en realitat, durant aquells anys, l'èxit de la Relativitat General va ser en realitat l'explicació d'aquest comportament anòmal de Mercuri.

2.3.2 Forats negres

A pesar d'haver pogut visualitzar un forat negre, no sabem exactament el funcionament d'un forat negre però podem afirmar que un forat negre és una regió en l'espai on la força de gravetat és tan forta que res, ni tan sols la llum, és capaç d'escapar. La gravetat és tan forta perquè la matèria ha estat compresa en un espai petit.

Una estrella és un equilibri estable entre dues forces oposades. Per una part trobem la pressió de radiació que és la que fa que l'estrella estigui emetent llum constantment, i per l'altra part, trobem la força de gravetat que tendeix a l'estrella a comprimir-se. Quan s'esgota el combustible i l'estrella s'apaga és perquè perd la pressió de radiació. En aquest moment, l'estrella deixa de brillar i es comprimeix fins a un límit. En aquest moment l'estrella es denomina nana blanca. Si aquesta estrella tenia una massa molt gran, pot arribar a col·lapsar-se per la seva pròpia atracció gravitatòria i passa a ser un forat negre.

La velocitat d'alliberament és la velocitat necessària perquè un cos escapi del camp gravitatori:

$$\frac{1}{2}mv_e^2 = \frac{GMm}{r}$$

Perquè això succeeixi necessitem que l'energia cinètica del cos sigui igual a l'energia potencial gravitatòria que el lliga al cos celeste.

Per tant trobem que com més compacte estigui la massa, més velocitat d'alliberament necessita el cos per escapar. I això és el que succeeix a un forat negre. La massa es comprimeix tant que col·lapsa i la velocitat d'alliberament és superior a la velocitat de la llum. Fet que fa que ni la llum pugui escapar, per això són forats "negres".



Il·lustració 13

Primer forat negre capturat en imatge. Abril, 2019

2.3.3 Forats de cuc

Tot i que encara no s'ha pogut demostrar que els forats de cuc existeixin, no deixa de ser un fenomen estrany que és possible contemplar a partir de les equacions de la relativitat general.

Un forat de cuc és una entitat teòrica permesa per la teoria de la relativitat general d'Einstein en la qual la curvatura de l'espai-temps connecta dues ubicacions (o temps) distants en l'espai.

Es tracta una gola que connecta dos extrems i que permet que la matèria es pugui desplaçar d'un extrem a un altre.

Aquesta permetria teòricament viatjar en el temps. Això es podria dur a terme accelerant l'extrem final d'un forat de cuc a una velocitat relativament alta respecte al seu altre extrem.

Remarco que no està demostrat i que per tant és una teoria hipotètica.

3. Evidències experimentals

Aquest treball de recerca es basa en les evidències experimentals que demostren la relativitat. Entre elles trobem l'experiment dels muons que és la part pràctica d'aquest treball, però no és l'única evidència experimental. En aquest apartat en podem veure d'altres evidències que certifiquen la teoria de la relativitat

3.1. Michelson-Morley

Fou un experiment realitzat per Albert Abraham Michelson i Edward Williams Morley l'any 1887 amb l'objectiu de detectar el moviment relatiu de la Terra a través de l'èter lumínic que omplia el buit i era el medi de propagació de les ones electromagnètiques. L'experiment consistia a mesurar la velocitat de la llum en direcció del moviment de translació de la Terra i al mateix en una direcció perpendicular. La mesura es realitzà mitjançant l'observació d'un patró d'interferències amb un interferòmetre dissenyat pels autors.

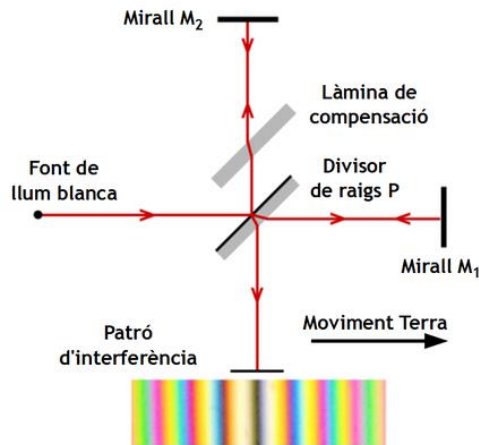
L'experiment va resultar negatiu, cosa que va suposar ser la primera evidència forta en contra de la teoria de l'èter.

Troblem l'experiment resumit a l'apartat 1.6.

L'interferòmetre va ser construït a un subterrani perquè era molt sensible i calia aïllar-lo de vibracions i efectes tèrmics.

A cada cantonada de la pedra quadrada foren col·locats quatre miralls de metall ben polit. Des d'un cantó un focus emetia un feix de llum que en passar per una lent formava un feix de raigs paral·lels. Al mig de la pedra hi havia un mirall transparent, que formava un angle de 45° amb la direcció del feix de llum, que dividia el feix en dos. Un era reflectit cap a un mirall i l'altre era refractat cap al mirall restant.

L'interferòmetre s'orientà de manera que un raig seguia un camí paral·lel al del moviment de translació de la Terra i l'altre un camí perpendicular. La llum impactava contra els miralls i retornava fins a la lent del mig de la pedra. Aquesta lent orientava els dos feixos de llum cap a un detector.



Il·lustració 144

Camí que segueixen els raigs de l'interferòmetre.

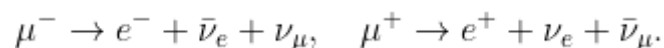
Un dels feixos, el que viatja en la direcció del desplaçament de la Terra, hauria de patir l'arrossegament de l'èter i arribar més tard al punt de trobada, perdent la sincronia amb l'altre feix. No obstant això, el que van trobar va ser inesperat: es va trobar un perfecte acord entre tots dos, per a qualsevol orientació de l'interferòmetre les franges d'interferències romanien, sense desplaçar-se, en la mateixa posició. El moviment de la Terra respecte a l'èter no va poder ser detectat.

Això va posar en dubte l'existència de l'èter.

3.2 Muons

El muó és una partícula de càrrega -1, i massa de $0,1056 \text{ GeV}/c^2$. Forma part de la segona família de partícules elementals conegudes com a fermions. És un leptó, com l'electró, però d'una generació i massa superiors.

La desintegració del muó ha de produir un electró més altres partícules les quals les seves càrregues siguin nul·les. El resultat més freqüent és un electró, un antineutrí-electrònic i un μ -neutrí. La seva antipartícula, l'antimuó, es desintegra en un positró, un e-neutrí i un μ -antineutrí:



Experiment dels muons

Aquest experiment és una part pràctica del meu TR. Trobem l'experiment al punt 6. En ella s'intenta demostrar la dilatació de l'espai i el temps que pateixen els muons ja que viatgen a velocitats pròximes a la de la llum.

Els raigs còsmics d'alta energia que provenen de l'espai exterior donen lloc a muons quan arriben a la troposfera i es produeixen interaccions amb les molècules dels gasos que formen l'aire.

Un muó té una vida mitjana de $2,2 \cdot 10^{-6} s$, es formen a 10000 m d'altura i tenen una velocitat de $0,998c$. Per tant trobaríem que:

$$y = v \cdot t \rightarrow y = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} s = 599m$$

i

$$t = \frac{y}{v} \rightarrow t = \frac{10000m}{(0,998 \cdot 3 \cdot 10^8)m/s} = 3,34 \cdot 10^{-5} s$$

Això seria l'espai que podrien recórrer els muons en el seu temps de vida utilitzant l'expressió clàssica. Podem observar que si fos així, no arribarien a la superfície de la Terra i per tant no els podríem detectar.

Com és possible? Si això fos així, arribarien molt pocs muons al nivell del mar. Si suposem que en un temps determinat es produeixen 10^8 muons, al cap de 32 microsegons, arribarien a la superfície:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = 10^8 e^{-\frac{33,1}{2,2}} = 25,5 \text{ muons}$$

On:

N és el nombre de muons que queden sense desintegrar-se al llarg d'aquell temps

N_0 és el nombre inicial de muons

t és el temps que ha passat.

τ és el temps de vida dels muons

Si mesurem el nombre de muons a nivell del mar, veurem que trobem un nombre 10^6 cops més gran que el resultat obtingut.

El problema és que estem calculant de forma clàssica sense tenir en compte la relativitat d'Einstein. Estem suposant que el temps passa igual per un observador extern que es troba a la Terra que per un muó que viatja a velocitats properes a la velocitat de la llum.

Si calculem amb les teories modernes, trobem que:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,998)^2}{1}}} 2,2 \mu\text{s} = 34,8 \mu\text{s}$$

Aquest seria el temps que tarda el muó a desintegrar-se realment. És a dir, el temps de vida vist des d'un observador que es mou a la velocitat del muó. Amb això ara sí que podem calcular el que pot recórrer un muó realment:

$$y = v \cdot t \rightarrow y = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 34,8 \cdot 10^{-6} s = 10419 m$$

Ara sí que podem entendre el perquè detectem tants muons a nivell de mar:

t és el temps que triga a arribar a la superfície terrestre: 33,4 μs

τ és el temps de vida dels muons per un observador en repòs: 34,8 μs

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = 10^8 e^{-\frac{33,4}{34,8}} = 3,8 \cdot 10^7 \text{ muons}$$

El resultat ara s'adapta a la realitat.

Ara podem analitzar com succeeixen les coses vistes pel muó. És a dir com un observador que es troba en repòs respecte al muó.

Pel muó, la seva vida mitjana és de 2,2 μs però la distància fins a la superfície terrestre (en comptes de ser 10000 m) és de 600 m:

$$\Delta L_0 = \delta \cdot \Delta L; \Delta L = \frac{\Delta L_0}{\delta} = \frac{10000}{15,82} = 632 m$$

Per recórrer aquest espai, el muó necessitarà:

$$t = \frac{y}{v} = \frac{632 m}{0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 m/s} = 2,11 \cdot 10^{-6} s$$

Per tant 2,11 μs

I si calculem el nombre de muons que arribarien a la superfície ens tornaria a donar exactament $3,8 \cdot 10^7$ muons.

Aquest experiment és una clara evidència que el temps i l'espai són relatius segons l'observador. Trobem que pel muó, el temps i l'espai es dilaten gràcies a la velocitat tan gran amb la que viatgen.

3.3 Ones gravitacionals

Són deformacions de l'espai-temps, creades per l'acceleració d'una massa que es propaguen en forma d'ones a la velocitat de la llum. Einstein les va predir amb la seva teoria de la relativitat general. Per produir ones gravitacionals es necessiten masses i acceleracions altes. És per això que l'origen d'aquestes ones són principalment sistemes astrofísics amb objectes massius i molt densos, com ara les estrelles de neutrons o els forats negres, que poden suportar acceleracions d'aquesta magnitud.

El que fa especial a aquestes ones és que tenen la capacitat d'estendre i estrènyer el propi espai-temps al seu pas. Això és degut al fet que no són pertorbacions que viatgen en l'espai-temps, sinó que són pertorbacions de l'espai-temps mateix.

Si tenim dos punts A i B separats per una certa distància (x) i passa una ona gravitacional, x augmentarà sense que els punts A i B s'hagin mogut.

Com la velocitat d'aquestes ones és igual a la velocitat de la llum, podem triangular la posició de la qual procedeix. Les altres característiques depenen de l'origen de les ones gravitacionals:

1. Forats negres

No emet ones gravitacionals per si sol, ja que és un cos perfectament esfèric. Tot i això, el podem observar en dues formes:

- Sistemes binaris

Aquest és el fenomen que va permetre detectar directament ones gravitacionals per primera vegada. En aquest cas a mesura que els cossos s'ajunten augmenta el seu moment d'inèrcia, augmentant l'amplitud de les ones que emeten. Això fa que el senyal que arribi a la Terra sigui mínima menys en el moment de la col·lisió en el que augmenta exponencialment.

- Forats negres supermassius

Aquests poden emetre ones gravitacionals, però realment no ho fan per ells sols. Les ones gravitacionals s'emeten a través de l'Extreme Mass Ratio Inspirals (EMRI). Aquest principi es basa en el fet que els cossos que orbiten al voltant del forat negre supermassiu són els que emeten les ones. Aquests fenòmens poden ser tan massius i accelerats que poden arribar a ser detectables.

2. Supernoves

Són explosions tan grans que poden generar una acceleració tan gran de la seva massa que es formi una ona gravitacional. El seu principal problema és que és molt difícil que sigui prou energètic per a ser detectat. El més probable és que només es puguin arribar a detectar aquests fenòmens que passin dins de la nostra galàxia, i això fa que no siguin tan comuns ni regulars.

3. Estrelles de neutrons

Es tracta de cossos totalment esfèrics però que tenen una deformació de 5 mm que fa possible que provoquin ones gravitacionals. Aquests cossos també poden formar sistemes binaris entre ells o amb forats negres. El LIGO també va aconseguir detectar una col·lisió entre estrelles de neutrons.

4. L'univers primordial

A través de les ones electromagnètiques només podem observar fins 300.000 anys després del Big Bang. En canvi les ones gravitacionals ens podrien arribar a mostrar l'Univers de quan encara no havia passat ni 10^{-32} s després del Big Bang. Això ens permetria resoldre molts dels dubtes fonamentals que existeixen en la cosmologia actual. El problema és que per poder observar aquesta font es necessita una precisió molt gran.

5. L'univers invisible

La majoria de l'Univers es pot considerar fosc, ja que no emet radiacions electromagnètiques. En aquestes grans escales, llavors, la forma més efectiva d'observar l'Univers és a través de la força gravitacional que és la que domina en aquests escenaris. Les ones gravitacionals ens podrien permetre complir aquesta funció.

La detecció d'aquestes ones fins ara ha estat:

De forma directa: El febrer de 2016, l'equip del LIGO va anunciar que havien detectat ones gravitacionals d'una fusió de forat negre.

De forma indirecta: Russell Hulse i Joseph Hooton Taylor van descobrir el púlsar binari PSR B1913+16 i van observar que el seu període orbital minva precisament com ho prediu la teoria de la relativitat general si es considera que aquest sistema perd la seva energia per emissió gravitatòria.



Il·lustració 15

Representació d'ones gravitacionals produïdes per dos cossos

4 Detectors

En aquest apartat s'expliquen diferents tipus de detectors que ens permeten detectar fenòmens que havia predit Einstein en la seva teoria de la relativitat.

Entre ells es troba el detector TimePix, que és el que utilitzarem per realitzar la nostra part pràctica per detectar muons i així demostrar la dilatació de l'espai i el temps. Per cercar informació d'aquests detectors dissenyats al CERN, s'ha assistit a les conferències de Rafael Ballabriga, encarregat de dissenyar una part d'aquests detectors. Podem trobar els apunts de la conferència a l'annex 3.

També trobem en aquest apartat, els interferòmetres i LIGO. Per saber més d'aquest últim detector d'ones gravitacionals, s'ha realitzat una entrevista a una membre de l'equip directiu de LIGO, Alicia Sintès. Podem trobar l'entrevista a l'apartat 7.

4.1 MiniPix

El MiniPix és un detector de partícules que permet fer un recompte de partícules individuals (o seguiment de partícules), monitoritzada i de baixa potència, desenvolupat al CERN.

El detector consta d'un detector Single Timepix (256 x 256 píxels amb una superfície de 55 μm^2 cada un) amb un sensor de silici estàndard de 300 micres de gruix. Funciona amb tecnologia dels píxels híbrids.

El detector es pot connectar mitjançant un port USB a un ordinador, que serà el que processarà la informació.



Il·lustració 16

Detector MiniPix

El detector que utilitza el Timepix és un detector Híbrid, és a dir, que és un detector que conté més d'una tecnologia. El detector de píxels híbrid consisteix en dues capes. Una part és un material semiconductor pixelat, on la radiació ionitzada diposita certes quantitats d'energia en funció del camí i el moment de les partícules mentre travessa el material. El sensor de MiniPix conté 256x256 píxels amb una superfície de 55 μm^2 cada un. L'energia dipositada es pot mesurar a través de processos de ionització en el material semiconductor amb una sèrie d'amplificadors que varien amb la càrrega que rep el semiconductor. Aquesta part és la segona capa i se segmenta en el mateix nombre de píxels, és a dir, que cada transistor tindrà assignat un píxel del sensor.

Aquest transistor és l'encarregat d'enviar el senyal cap al xip. Per tant cada cop que una partícula arriba al sensor, diposita diversos píxels. Seguidament els amplificadors d'aquests píxels variaran amb la càrrega rebuda i enviaran un senyal elèctric. Aquest senyal elèctric haurà de ser processat per un circuit electrònic per tal que el software ho pugui analitzar.

El transistor és l'encarregat d'enviar un senyal, que el bloc d'adquisició de dades transformarà per tal de poder analitzar els resultats i presentar-los en una imatge. El senyal que envia el transistor és una variació en la intensitat quan el seu píxel està en contacta amb una partícula. El primer objectiu del bloc d'adquisició de dades és transformar el senyal que és una variació d'intensitat a una variació de tensió per tal de poder-ho comparar amb un llindar i poder analitzar més fàcilment quanta energia hem rebut

La primera part del bloc d'electrònica és el bloc amplificador i de filtratge que es dedica a transformar el senyal a un pic de tensió, amplificar-lo. Aquest bloc també és l'encarregat de minimitzar el soroll.

El segon bloc és l'encarregat de comparar el senyal d'entrada amb un llindar per tal de detectar pics. El funcionament d'aquest bloc és el següent: a la sortida hi haurà un 1, si l'entrada és més gran que el llindar que s'ha escollit, o serà un zero si l'entrada està per sota del llindar. Sent x el senyal d'entrada, L el valor de llindar i la y la sortida del bloc, la fórmula matemàtica que representa aquest bloc és la següent:

$$x \geq L \Rightarrow y = 1$$

$$x < L \Rightarrow y = 0$$

Aquest llindar anomenat L es pot configurar amb el software.

El tercer bloc de la part electrònica, el que fa és comptar quant temps el senyal de sortida del bloc de llinda és igual a 1, és a dir, quan d'ample és el pols. Ja que contra més alta és l'amplitud, més ample és el senyal. Amb aquest bloc es pot identificar com és de gran el

pic que ha provocat la partícula, i per tant saber si és una partícula que té més o menys energia. Aquesta informació s'enviarà a l'ordinador on serà processada.

Cada partícula deixa un rastre diferent i gràcies a això podem arribar a identificar quina partícula ha deixat rastre al detector:

- Les partícules alfa no recorren el sensor, i deixen una marca rodona activant diversos píxels
- Les partícules beta recorren un petit tros del detector i per tant deixen un rastre lineal
- Les partícules gamma marquen una línia molt petita a la zona que arriben del detector, també exciten uns quants píxels més llunyans.

La part pràctica del TR es centra en utilitzar aquest detector per tal de detectar muons.

4.2 Interferòmetre

És un instrument que mesura les longituds d'ona de la llum utilitzant la interferència de la mateixa ona. Hi ha molts tipus d'interferòmetres, en tots ells s'utilitzen dos feixos de llum que recorren dues trajectòries diferents, determinades per un sistema de miralls que, finalment, es combinen per formar un patró d'interferència. Poden ser útils en diversos camps:

- Mesura de la longitud d'ona de la llum

S'utilitza l'interferòmetre de tal manera que un mirall situat a la trajectòria d'un dels feixos de llum pot desplaçar una distància petita, que pot mesurar-se amb precisió, de manera que és possible modificar la trajectòria òptica del feix. Quan es desplaça el mirall una distància igual a la meitat de la longitud d'ona de la llum, es produeix un cicle complet de canvis en les franges d'interferència. La longitud d'ona es calcula mesurant el nombre de cicles que tenen lloc quan es mou el mirall una distància determinada.

- Mesura de distàncies

Quan es coneix la longitud d'ona de la llum emprada, poden mesurar distàncies petites en la trajectòria òptica analitzant les interferències produïdes. Aquesta tècnica s'empra, per exemple, per mesurar el contorn de la superfície dels miralls dels telescopis.

- Mesura d'índexs de refracció

Es tracta d'un nombre adimensional que descriu com es propaga la llum a través d'un mitjà. Poden mesurar-se amb un interferòmetre, i es calculen a partir del desplaçament en les franges d'interferència causat pel retard del feix.

- Astronomia

A astronomia el principi de l'interferòmetre també s'empra per mesurar el diàmetre d'estrelles grans relativament properes. Com els interferòmetres moderns poden mesurar angles extremadament petits, s'empren-també en aquest cas en estrelles gegants properes-per obtenir imatges de variacions de la brillantor en la superfície d'aquestes estrelles. Recentment ha estat possible, fins i tot, detectar la presència de planetes fora del sistema solar a través del mesurament de petites variacions en la trajectòria de les estrelles

- L'experiment de Michelson-Morley

Aquest experiment es troba explicat anteriorment als punts 1.6 i 3.1

L'experiment consistia a, per mitjà d'un interferòmetre, calcular la velocitat de la Terra en l'èter luminífer. En aquest experiment es va trobar que la velocitat de la llum en el buit és constant, independent de l'observador, el que és un dels postulats de la Teoria de la Relativitat Especial d'Albert Einstein

4.3 LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

És un observatori d'ones gravitacionals subterrani. Amb un cost de 365 milions de dòlars ha estat el més gran i ambiciós projecte mai fundat per la NSF (Fundació Nacional per la Ciència) Porta operatiu des de l'agost de 2002.

El LIGO opera en dos observatoris alhora: el LIGO Livingston Observatory, a Livingston, Louisiana, i el LIGO Hanford Observatory, a la Reserva Nuclear de Hanford, situada a Richland, Washington. Cada observatori consta d'un interferòmetre de Michelson modificat, format per dos braços iguals de 4 km de longitud, disposats en perpendicular i que es tallen en un dels seus extrems. Es troben dintre de tubs d'uns 1,2 m de diàmetre. Aquests tubs tenen un volum de 8500 m³ dins els quals s'ha fet un buit vuit vegades superior al de l'espai, o una bilionèsima la pressió de l'atmosfera terrestre (1013,25 hPa).

Un làser produeix un feix de llum que es divideix en la intersecció dels dos braços. La meitat de la llum làser es transmet en un braç, mentre que l'altra meitat es reflecteix en el segon braç. Hi ha uns miralls en l'extrem de cada braç i prop del divisor de feix. La llum del làser

en cada braç es reflecteix en aquests miralls, i finalment torna a la intersecció, on interfereix amb la llum que arriba de l'altre braç. Si les longituds dels dos braços s'han mantingut sense canvis, a continuació, les dues ones de llum s'anul·len completament entre si (interfereixen destructivament) i no hi ha llum observada a la sortida. Però, si una ona gravitatòria passa per l'interferòmetre pot estirar un braç i comprimir l'altre i els dos feixos de llum en retrobar-se ja no interfereixen anul·lant-se completament i donen un patró d'interferència que es detecta a la sortida. Analitzant aquests patrons de llum es pot aconseguir la informació sobre el canvi de longitud relativa entre els dos braços, que al seu torn informa de les característiques de les ones gravitatòries.

Al LIGO s'han fet dues grans deteccions:

- El setembre de 2015 es van captar uns senyals que posteriorment van ser analitzats, fins que el febrer de 2016 es va confirmar que es tractava d'ones gravitacionals. Això confirma la predicció d'Einstein a la seva teoria general.

Després d'analitzar els senyals rebuts, van arribar a la conclusió que les ones que es van detectar provenien d'una fusió de dos forats negres que van produir un altre forat negre més massiu.

- El desembre de 2015 els dos detectors van rebre un senyal sobre el soroll de fons molt petit que corresponia a una col·lisió de dos forats negres.



Il·lustració 17

Detector LIGO Livingston (Louisiana)

Podem trobar una entrevista a Alicia Sintès (membre de l'equip directiu de LIGO) al punt 7.

4.4 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

És un detector d'ones gravitacionals, pensat per enviar-lo a l'espai, en el que col·laboren l'ESA (agència espacial europea) i NASA (administració espacial aeronàutica d'Estats

Units). El projecte es basa en l'èxit que ha tingut el detector terrestre LIGO amb les seves darreres deteccions d'ones gravitacionals.

La idea del projecte és enviar a l'espai tres naus espacials, amb forma de pilota d'hoquei, orbitant a cinc milions de quilòmetres entre si, tot formant un triangle equilàter. Cada nau porta els instruments suficients per connectar-se amb les altres dues naus i treballar conjuntament per tal de mesurar ones que passin a prop. Per fer-ho utilitzaran el mètode matemàtic de la trilateració (mateix mètode que utilitzen alguns GPS).

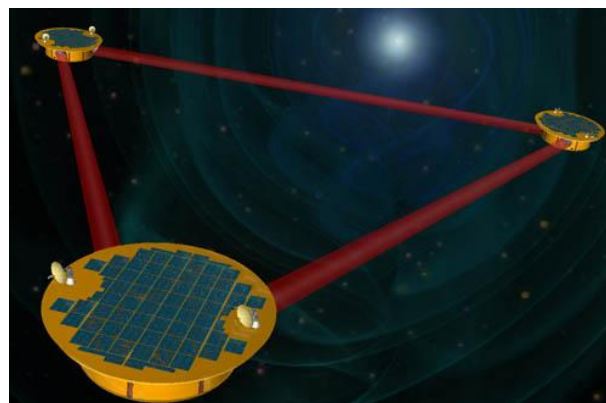
La trilateració determina la posició relativa d'un objecte utilitzant la geometria de triangles de manera analògica a la triangulació.

En comparació amb LIGO, que treballa amb un rang de freqüència entre 10Hz i 1000Hz, LISA treballarà en un rang entre 0,1 mHz i 1 Hz. I gràcies a això podríem arribar a detectar ones procedents de forats negres ultra massius o galàxies que col·lapsen entre si.

Les naus del projecte LISA tenen forma de cilíndrica d'1,8 m de diàmetre i 0,48 m de llarg. Cada nau conté panells solars que funcionen com alimentació extra. L'equip de telecomunicacions està format per dues antenes de ràdio de banda X de 30 centímetres de diàmetre, per comunicar-se amb les estacions terrestres.

Com LISA, igual que LIGO, suposa un repte en l'àmbit tecnològic i és un projecte complex, es va decidir fer una prova tecnològica el 2015. Van anomenar a aquesta prova LISA Pathfinder i treballen científics de diversos països d'arreu del món. Aquest projecte tenia com a objectiu demostrar que una massa de prova es pot col·locar en caiguda lliure, validar l'operació de l'interferòmetre làser amb un mirall en caiguda lliure i comprovar la fiabilitat respecte al temps dels propulsors, els làsers i l'òptica en l'àmbit espacial.

Aquest projecte va completar la seva missió el 2017 i va demostrar que la tecnologia dissenyada per LISA anava pel bon camí.



Il·lustració 18 Projecte LISA

Part pràctica

5. Pràctica Iniciació MediPix

Objectius

- Iniciar-se en l'ús d'un detector de partícules TimePix i del programari PixetPro.
- Identificar els diferents tipus de radiació pel rastre que deixen en el detector, i relacionar aquests rastres amb les característiques que presenten les partícules que el formen.
- Mesurar l'energia cinètica de les partícules absorbides al detector.
- Comprovar la importància de la desviació relativista en el càlcul de la velocitat de les partícules per a la radiació beta.
- Calcular la longitud d'ona de partícules alfa i beta.
- Determinar les característiques dels fotons constituents de la radiació gamma.

Introducció teòrica

Les radiacions que emeten els nuclis radioactius es divideixen en 3 tipus ben diferenciats amb naturalesa i comportament ben diferenciats:

- radiació alfa (α): formada per nuclis d'heli. En emetre una partícula alfa, el nucli perd dos protons i dos neutrons. Es tracta d'una partícula relativament pesada, amb una càrrega positiva de $+2|e|$ i que interacciona fortament amb la matèria. És molt ionitzant i, per tant, poc penetrant.

- radiació beta (β): formada per electrons (β^-) o positrons (β^+) emesos pel nucli. En emetre una partícula beta, un neutró del nucli es converteix en un protó (en el cas de l'emissió β^-), o un protó del nucli es converteix en un neutró (en el cas de l'emissió β^+). Es tracta de partícules unes 1800 vegades més lleugeres que l'anterior i amb una càrrega de valor $|e|$ (la meitat de l'anterior) i per tant molt menys ionitzant, que interaccionen menys amb la matèria i en conseqüència tenen molta més penetració.

- radiació gamma (γ): formada per fotons (ones EM) d'alta energia. En emetre fotons el nucli no canvia la seva naturalesa, sinó que només s'allibera d'energia sobrant. Es tracta

de la partícula més lleugera (un fotó no té massa) i per tant interacciona molt menys amb la matèria, cosa que la fa molt més penetrant (no obstant això els fotons interactuen amb la matèria via l'efecte fotoelèctric, l'absorció/re-emissió (scattering de Compton i de Rayleigh), i la generació de parells electró/positró).

Per la seva naturalesa, l'estudi d'aquestes partícules ha de tenir en compte el seu comportament quàntic i relativista. Així la radiació gamma es comporta com a partícules (fotons) quan interaccionen amb els àtoms de Si del sensor. Aquests fotons tenen una quantitat de moviment donada per $p = E/c$, on $c = 2,99792 \cdot 10^8$ m/s és la velocitat de la llum.

Igualment, les partícules β es mouen a una fracció significativa de la velocitat de la llum i per tant l'expressió clàssica de la energia cinètica, $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, no és vàlida i cal emprar les expressions de la relativitat especial.

Així, l'energia de les partícules ve donada per la relació d'Einstein $E = E_0 + E_k$ on E és l'energia total de la partícula, E_0 l'energia en repòs i E_k l'energia cinètica. Tenint en compte l'equivalència massa-energia, $E_0 = m_0 \cdot c^2$, i $E = \gamma m_0 \cdot c^2$ i substituint

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

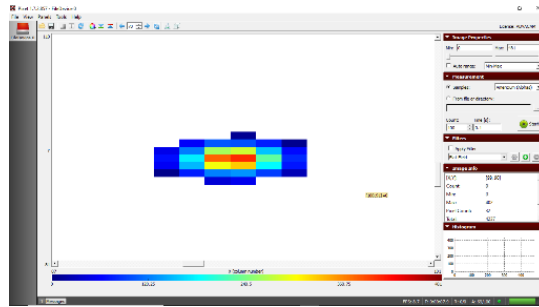
podem expressar la velocitat d'una partícula alfa o beta com

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^2}} \quad (2)$$

Adquisició i anàlisi de les dades

Primer hem de saber quin rastre deixen les partícules que volem analitzar per tal de poder distingir-les:

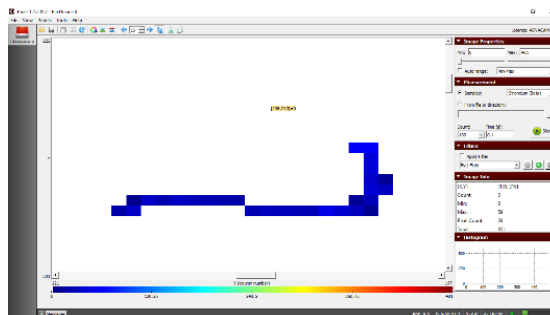
Alfa: Les partícules alfa són grans i pesades per tant no penetren profundament en els objectes. Per tant podem intuir que aquestes partícules es veuran al detector de silici com un punt pesant que no deixa trajectòria perquè no penetra.



Il·lustració 1

Partícula alfa vista amb el programa PixetPro

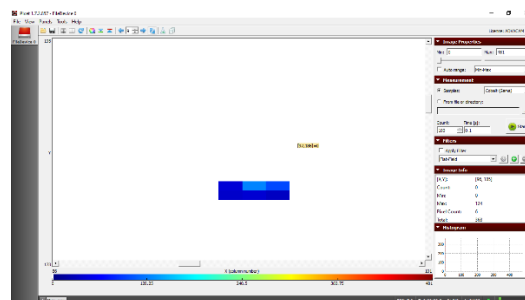
Beta: Les partícules beta són lleugeres i carregats. És per això que a vegades canvien la seva direcció i les veiem al detector amb forma de cuc.



Il·lustració 2

Partícula beta

Gamma: Les partícules gamma no solen interaccionar amb el material i és per això que la veiem al detector amb poca energia i els veiem en forma de punts petits.



Il·lustració 3

19 Partícula gamma

En aquesta pràctica volem trobar les velocitats que porten diverses partícules utilitzant els models relativista i clàssic per tal de poder comparar-los i valorar la seva correcció. També valorarem si les partícules que analitzem tenen un comportament ondulatori o corpuscular.

Per poder calcular la velocitat utilitzant els dos models necessitem saber la massa en repòs de les partícules. Buscant per internet trobem que:

$$m_{\alpha} = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \qquad m_{\beta} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Per poder calcular la velocitat amb el model relativista també es necessita l'energia en repòs de les partícules. Aquesta energia en repòs la podem calcular utilitzant:

$$E = m c^2$$

Substituint els valors de les masses en repòs d'abans a l'equació ens queda que:

$$E_{\alpha} = m_{\alpha} \cdot c^2 = 6 \cdot 10^{-10} \text{ J} \qquad E_{\beta} = m_{\beta} \cdot c^2 = 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

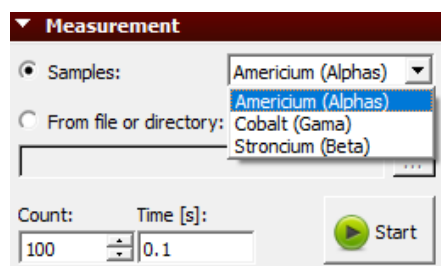
Un cop ja tenim aquests valors podem crear un full de càlcul i trobar les velocitats i la desviació entre els dos models. També obtindrem la longitud d'ona.

Alfa

	1a partícula
EK[keV]	5.642
EK[J]	9,04E-13
v [ms-1] (relat.)	16481113
v [ms-1] (class.)	16499803
v/c (relat.)	0,05494
v/c (classica)	0,05500
Desviació (%)	0,113
Longitud d'ona	6,05E-15

(veure la resta de càlculs a l'annex 1)

Seleccionem al PixetPro l'opció de mesurar solament les partícules alfa (com es mostra a la imatge).



Il·lustració 4

En aquesta finestra del programa PixetPro podem indicar al programa que ens busqui només partícules alfa/beta/gamma

Després se seleccionen 5 partícules alfa i es mira a la casella de "total" el valor que ens apareix. Aquest valor és l'energia cinètica en keV de la partícula seleccionada. Tot seguit l'anotem a la casella del full de càlcul que li correspon

Un cop aplicat el factor de conversió que passa l'energia que havíem obtingut de keV a joules, ja podem aplicar els models clàssic i relativista per trobar la velocitat que porta la partícula.

El model clàssic es pot calcular aplicant el model de l'energia cinètica: $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

El model relativista correspon a la següent expressió: $v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^2}}$

Aplicant els dos models anteriors podem obtenir la velocitat de la partícula. Com diu a la part teòrica d'aquesta pràctica, nosaltres agafarem per vàlid el valor relativista perquè és el correcte i té un valor més precís. Amb els dos valors que hem obtingut, podem comparar per veure si el model clàssic s'apropa al valor correcte de la velocitat (model relativista). En el cas de les partícules alfa veiem que la desviació entre els dos models, no supera el 0,2%. Per tant el model clàssic i el model relativista tenen un valor molt semblant.

Per saber si la partícula alfa es comporta com una ona o com una partícula, ens basarem en el fet que si la longitud d'ona que hem calculat al full de càlcul és semblant al radi de la partícula alfa, tindrà un comportament corpuscular. En canvi, si el radi de la partícula és molt diferent de la longitud d'ona, serà un comportament ondulatori.

Per calcular el radi del nucli d'una partícula d'heli, utilitzem:

$$R = r_0 \cdot A^{1/3}$$

On R és el radi de la partícula, A és el nombre màssic de l'element i $r_0 = 1.25 \times 10^{-15} \text{ m}$

Com el nombre màssic de l'heli és 4:

$$R = 1.25 \times 10^{-15} \cdot 4 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}$$

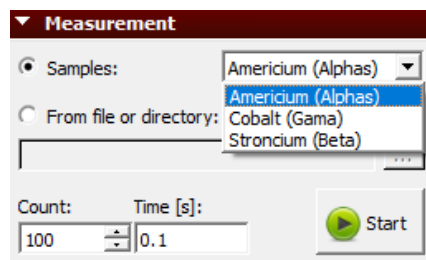
Troblem que el radi de la partícula alfa és molt semblant a les longituds d'ones que hem obtingut al full de càlcul ($5 \times 10^{-15} \text{ m} \approx 6 \times 10^{-15} \text{ m}$). Per tant podem veure que la partícula alfa té un comportament corpuscular.

Beta

	1a partícula
Energia total [keV]	847
EK[keV]	847
EK[J]	1,36E-13
v [ms-1] (relat.)	277937539,8
v [ms-1] (class.)	546093821,2
v/c (relat.)	0,926
v/c (classica)	1,820
Desviació (%)	96,48
Longitud d'ona	2,62E-12

(veure la resta de càlculs a l'annex 1)

Seleccionem al PixetPro l'opció de mesurar solament les partícules beta (com es mostra a la imatge).



Il·lustració 5

En aquesta finestra del programa PixetPro podem indicar al programa que ens busqui només partícules alfa/beta/gamma

Després se seleccionen 5 partícules beta i es mira a la casella de "total" el valor que ens apareix. Aquest valor és l'energia cinètica en keV de la partícula seleccionada. Tot seguit l'anotem a la casella del full de càlcul que li correspon

Un cop aplicat el factor de conversió que passa l'energia que havíem obtingut de keV a joules, ja podem aplicar els models clàssic i relativista per trobar la velocitat que porta la partícula.

El model clàssic es pot calcular aplicant el model de l'energia cinètica: $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

El model relativista correspon a la següent expressió: $v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^2}}$

Aplicant els dos models anteriors podem obtenir la velocitat de la partícula. Com diu a la part teòrica d'aquesta pràctica, nosaltres agafarem per vàlid el valor relativista perquè és el correcte i té un valor més precís. Amb els dos valors que hem obtingut, podem comparar per veure si el model clàssic s'apropa al valor correcte de la velocitat (model relativista). En el cas de les partícules beta trobem que la desviació entre els dos models és molt elevada. A diferència de les partícules alfa, els valors dels dos models són molt diferents. Això pot passar perquè les partícules alfa deixen molta més energia que les partícules beta i a l'hora de fer els càlculs amb nombres més grans, les diferències són més petites.

Per saber si la partícula beta es comporta com una ona o com una partícula, ens basarem en el fet que si la longitud d'ona que hem calculat al full de càlcul és semblant al radi de la partícula beta, tindrà un comportament corpuscular. En canvi, si el radi de la partícula és molt diferent del de la longitud d'ona, serà un comportament ondulatori.

A Wikipedia veiem que el radi d'un electró (partícula beta) és de $2,88 \times 10^{-15}$ m.

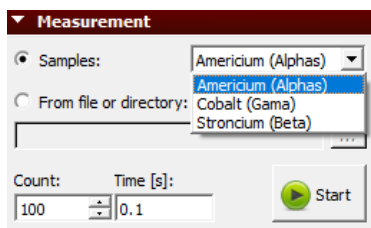
Podem veure que en aquest cas, el radi de la partícula beta és molt més superior que les longituds d'ona que hem calculat al full de càlcul. Per tant podem dir que la partícula beta té un comportament ondulatori.

Gamma

	1a partícula
EK[keV]	487
EK[J]	7,80E-14
f(Hz)	1,18E+20
λ (m)	2,55E-12
p (kg·m/s)	2,60E-22

(veure la resta de càlculs a l'annex 1)

Seleccionem al PixetPro l'opció de mesurar solament les partícules gamma (com es mostra a la imatge).



Il·lustració 6

En aquesta finestra del programa PixetPro podem indicar al programa que ens busqui només partícules alfa/beta/gamma

Després seleccionem 5 partícules gamma i mirem a la casella de “total” el valor que ens apareix. Aquest valor és l’energia cinètica en keV de la partícula seleccionada. Tot seguit l’anotem a la casella del full de càlcul que li correspon.

Per trobar la freqüència del fotó, utilitzem la següent expressió

$$E=h \cdot f$$

On E és l’energia cinètica en joules, h és la constant de Planck que pren el valor de $6,62607015E-34$ J·s i f és la freqüència.

Per trobar la longitud d’ona utilitzem:

$$\lambda = h/p$$

On λ és la longitud d’ona i p és la quantitat de moviment.

La quantitat de moviment la trobem amb:

$$p = E/c$$

on $c = 2,99792 \cdot 10^8$ m/s és la velocitat de la llum.

6. Pràctica muons

Introducció

Els raigs còsmics d'alta energia que provenen de l'espai exterior donen lloc a muons quan arriben a la troposfera i es produeixen interaccions amb les molècules dels gasos que formen l'aire.

Un muó té una vida mitjana de $2,2 \cdot 10^{-6} s$, es formen a 10000 m d'altura i tenen una velocitat de $0,998c$. Per tant trobaríem que:

$$y = v \cdot t \rightarrow y = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} s = 599 m \quad (1)$$

i

$$t = \frac{y}{v} \rightarrow t = \frac{1000m}{(0,998 \cdot 3 \cdot 10^8)m/s} = 3,34 \cdot 10^{-5} s \quad (2)$$

Com és possible? Si això fos així, arribarien molt pocs muons al nivell del mar. Si suposem que en un temps determinat es produeixen 10^8 muons, al cap de 32 microsegons, arribarien a la superfície:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = 10^8 e^{-\frac{33,1}{2,2}} = 25,5 \text{ muons} \quad (3)$$

On:

N és el nombre de muons que queden sense desintegrar-se al llarg d'aquell temps

N_0 és el nombre inicial de muons

t és el temps que ha passat.

τ és el temps de vida dels muons

Si mesurem el nombre de muons a nivell del mar, veurem que trobem un nombre 10^6 cops més gran que el resultat obtingut.

El problema és que estem calculant de forma clàssica sense tenir en compte la relativitat d'Einstein. Estem suposant que el temps passa igual per un observador extern que es troba a la Terra que per un muó que viatja a velocitats properes a la velocitat de la llum.

Si calculem amb les teories modernes, trobem que:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,998)^2}{1}}} 2,2 \mu\text{s} = 34,8 \mu\text{s} \quad (4)$$

Aquest seria el temps que tarda el muó a desintegrar-se realment. És a dir, el temps de vida vist des d'un observador que es mou a la velocitat del muó. Amb això ara sí que es pot calcular el que pot recórrer un muó realment:

$$y = v \cdot t \rightarrow y = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 34,8 \cdot 10^{-6} \text{s} = 10419 \text{ m} \quad (1)$$

Ara sí que es pot entendre el perquè es detecten tants muons a nivell de mar:

t és el temps que triga a arribar a la superfície terrestre: 33,4 μs

τ és el temps de vida dels muons per un observador en repòs: 34,8 μs

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = 10^8 e^{-\frac{33,4}{34,8}} = 3,8 \cdot 10^7 \text{ muons} \quad (3)$$

El resultat s'adapta a la realitat.

Ara es pot analitzar com succeeixen les coses vistes pel muó. És a dir com un observador que es troba en repòs respecte al muó.

Pel muó, la seva vida mitjana és de 2,2 μs però la distància fins a la superfície terrestre (en comptes de ser 10000 m) és de 600 m:

$$\Delta L_0 = \delta \cdot \Delta L; \Delta L = \frac{\Delta L_0}{\delta} = \frac{10000}{15,82} = 632 \text{ m} \quad (5)$$

Per recórrer aquest espai, el muó necessitarà:

$$t = \frac{y}{v} = \frac{632 \text{ m}}{0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2,11 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (2)$$

Per tant 2,11 μs

I si es calcula el nombre de muons que arribarien a la superfície dona exactament $3,8 \cdot 10^7$ muons.

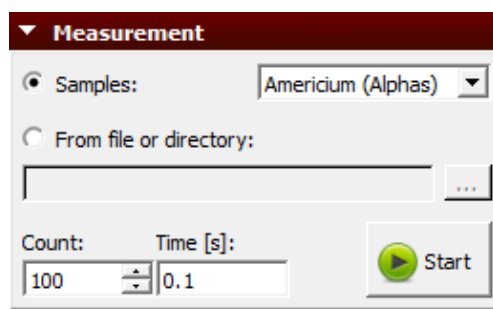
Aquest experiment és una clara evidència que el temps i l'espai són relatius segons l'observador. Trobem que pel muó, el temps i l'espai es dilaten gràcies a la velocitat tan gran amb la que viatgen.

Procediments

El primer de tot és buscar muons per poder analitzar-los. Amb el detector MiniPix recollim moltes dades per tal d'aconseguir tots els muons possibles.

Per mesurar hem d'obrir el programa Pixet Pro i connectar el MiniPix a l'ordinador via USB.

Després només cal indicar quina mena de captura de dades volem fer:



Il·lustració 20

Aquí podem indicar al programa de quina manera volem enregistrar les dades

Tenim l'opció de recopilar un cert nombre de dades (count), on cadascuna es pren cada cert temps (time). Això es pot fer de dues maneres:

- Recopilar les dades cada cert temps i que ens aparegui en una sola pantalla (un frame)
- Recopilar les dades cada certs temps i veure-les separades en diverses pantalles (varis frames)

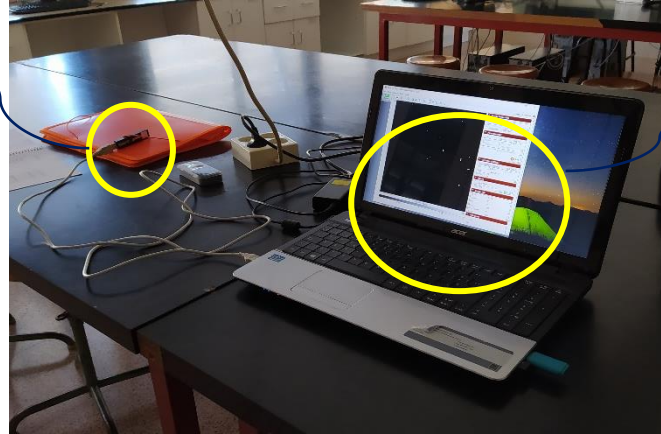
Un cop hàgim localitzat diversos muons, es tracta de calcular a partir de l'energia que han deixat al detector, la velocitat del muó, el temps que triga a arribar a la superfície terrestre vist per un observador que es troba en repòs respecte al muó i un altre que es troba a la Terra, la longitud que ha de recórrer per arribar a la superfície vista des del muó.

Per fer-ho podem utilitzar un full de càlcul.



Il·lustració 21

Detector MiniPix que ens ha deixat un exalumne que està treballant al CERN (Rafael Ballabriga)



Il·lustració 3

Enregistrament de dades al laboratori de física del centre per tal de trobar els muons per demostrar la dilatació de l'espai i el temps

Programa PixetPro amb el que podem enregistrar les dades obtingudes pel MiniPix i podem obtenir informació de les partícules detectades

Problema trobat

Després d'enregistrar algunes dades amb el MiniPix i haver localitzat alguns muons (veure tots els muons localitzats a l'annex 2.1), s'utilitza l'energia que deixa el muó al detector (la podem veure al programa PixetPro) per poder calcular la resta de dades. Primer es calcula la velocitat del muó a partir de l'energia que ha deixat el muó al detector i l'energia en repòs, prèviament calculada, amb l'expressió

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^2}} \quad (6)$$

Un cop trobada la velocitat, calculem l'espai i el temps amb les expressions (5) i (2) que recorren realment els muons. Es pot apreciar al següent full de càlcul:

	1r muó	muó exemplar
EK[keV]	1.346	
EK[J]	$2,16 \cdot 10^{-13}$	
v [m/s]	$5,93 \cdot 10^7$	$2,99 \cdot 10^8$
y [m] pel muó	9803	632
t [microsegons] pel muó	165,3	2,1

(veure la resta de càlculs a l'annex 2.2)

Com es pot observar a la taula de l'annex 2, hi ha una columna "muó exemplar" per tal de comparar els resultats obtinguts amb els resultats que s'esperaven per verificar la certesa dels resultats.

A la taula observem la velocitat del muó enregistrat en el nostre experiment, calculada utilitzant l'expressió (6). A partir d'aquesta dada es pot calcular l'espai que recorre (5) i el temps que triga (2) un observador en respòs respecte el muó en arribar a la superfície. Amb aquests càlculs es pot demostrar la dilatació de l'espai i el temps. El muó recorre 10000m però com viatja a una velocitat tan gran, es com si només estigues recorrent 600m. El temps que trigaria en recórrer 10000m són 32,2 μs però com realment el muó està recorrent 600m, el temps de vida del muó són 2,1 μs .

Es pot observar que els resultats que havien sortit no eren els esperats perquè no es demostra la teoria de la relativitat. Com es pot veure a la taula, observem que els muons enregistrats en l'experiment no s'assemblen als resultats del que s'esperava, i no demostra pràcticament res la dilatació de l'espai i el temps. Al principi es podria pensar que podia ser un error de càlcul i que hi havia alguna cosa malament al full de càlcul. Per això es posa la mateixa velocitat que a la introducció teòrica (extreta d'internet) que és la velocitat que haurien de portar els muons. Veiem a la darrera columna el valor de la velocitat que haurien de portar els muons i llavors la resta de càlculs quadren. Per tant, arribem a la conclusió que el problema era que les velocitats eren massa petites. Com aquestes velocitats depenen de l'energia que dipositen al detector, l'origen del problema es troba en l'energia dels muons. Per solucionar el problema es va demanar ajuda al tutor del treball de recerca Daniel Parcerisas.

Solució

Després d'investigar i demanar ajuda a coneixedors del tema (Rafael Ballabriga del Cern i Eugeni Graugés de la UB), vam esbrinar que el muó té energies molt altes, però al detector només diposita una petita part. El detector no és prou gruixut, no té prou material per frenar-lo del tot i aturar-lo, fent-li cedir tota la seva energia en forma de ionització del material del detector.

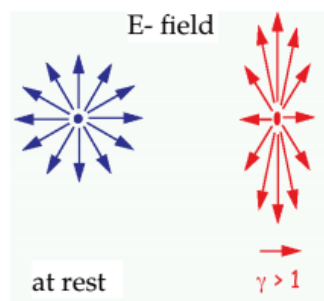
Per arreglar-lo es va utilitzar la fórmula de Bethe-Bloch per mesurar l'energia dels muons a partir de la part (d'energia) que cedeixen al detector. Amb aquesta fórmula no es troba l'energia directament però sí el seu moment. Amb la fórmula de Bethe-Bloch ens surt l'energia per unitat de distància cedida per ionització del material que travessem (en aquest cas, silici). Aleshores hem de multiplicar per la distància que ha viatjat el muó a través del material (la integral sobre la trajectòria). Aquí s'ha de fer una estimació, i posar un límit inferior i un de superior a partir de la distància màxima i mínima que pot travessar cada muó concret.

Equació Bethe-Bloch

Aquesta fórmula descriu l'energia perduda per distància recorreguda de partícules carregades que travessen la matèria. Com són partícules molt petites, la pèrdua d'energia requereix uns càlculs més complexos fets amb mesures relativistes. Aquesta equació es basa en la ionització o l'extracció que provoquen la pèrdua d'energia quan la partícula interacciona amb la matèria.

Ionització: és el fenomen mitjançant el qual es formen ions. Es tracta de partícules carregades electrònicament degut a l'excés o falta d'electrons que interaccionen amb àtoms o molècules neutres.

Tot es deu a l'electromagnetisme o camps elèctrics. A la contracció de Lorentz per línies de camp transversals, la component E creix amb γ . És a dir, distàncies de col·lisió més grans, més col·lisions.



Il·lustració 422

Efecte que ha provocat l'error als càlculs

En aquesta equació s'ha de tenir en compte que $M \gg m_e$, on M és la massa de la partícula incident. La equació només depèn de la velocitat i no de la massa. L'equació no és vàlida per a electrons perquè són massa lents.

La deducció de la fórmula és molt complexa però si la resumim queda així:

L'energia transmesa al material amb massa m_t : $\Delta E = \Delta p / (2m_t)$

on

$$\Delta p = \int_{-\infty}^{\infty} F_{Coulomb} dt \rightarrow F_{Coulomb} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} zZe^2/r^2$$

on - ϵ_0 és la permitivitat relativa en l'aire

- r és la distància entre dos punts

Forces transversals importants:

$$F_t = F_c \cdot \frac{b}{r} = F_c \cdot \cos\theta$$

Si agafem les dues anteriors equacions:

$$F_{Ct} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{zZ e^2}{r^2} \cdot \cos\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{zZ e^2}{b^2} \cdot \cos^3\theta$$

Després d'una sèrie de canvis de variables i d'afegir termes, l'equació de Bethe-Bloch és:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

on

$$n = \frac{N_A \cdot Z \cdot \rho}{A \cdot M_u},$$

Finalment obtenim que:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right],$$

on

$$K = \frac{4\pi e^4}{c^2 m_e} N_A = 0.31 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

Càlculs

El que interessa es trobar la velocitat dels muons enregistrats per tal de fer els càlculs que demostrin la dilatació de l'espai-temps [expressions (2) i (5)]. Per fer-ho es necessita trobar quina β correspon als nostres muons. És impossible aïllar β de l'equació Bethe-Bloch. Per tant, per robar-la s'agafa l'energia total dels muons en la seva trajectòria pel detector i es compten al PixetPro el nombre de píxels de la trajectòria. Es fa la divisió de l'energia entre els píxels. Com cada píxel és de 55 micròmetres, s'ha de convertir a centímetres i s'obté l'energia per centímetre. Això és així si la trajectòria i els píxels coincideixen. Com el timepix té un gruix de 300 micròmetres de silici, resultarà que no coincideixen. El nombre de píxels

determinarà la trajectòria horitzontal, i la vertical sempre serà de 300 (exceptuant en els casos en què la trajectòria horitzontal comenci o acabi a un dels límits del detector: en aquest cas pot sortir a qualsevol altura i no es podrà saber exactament el valor del desplaçament vertical). Aquests primers càlculs de l'energia depositada per cada píxel, els podem trobar en l'annex 2.3.

Per altre banda s'agafen diferents valors de β i es fan els càlculs de l'equació Bethe-Bloch i ens Els podem trobar a l'annex 2.4.

Un cop trobades les energies amb els càlculs de l'annex 2.3, s'han de comparar amb les energies extretes de l'equació Bethe-Bloch de l'annex 2.4. Cal utilitzar l'equació amb diferents valors de β incloent-hi varis decimals fins apropar-nos a les energies de l'annex 2.3. Quan s'obtingui la β que més s'apropa a l'energia que han depositat els muons enregistrats, només cal trobar la seva velocitat aïllant a l'expressió:

$$\beta = \frac{v}{c} \rightarrow v = \beta \cdot c$$

Un cop trobada la velocitat ja es pot aplicar els càlculs de les expressions (2) i (5):

	5è muó (gran)	muó ideal
ET /L (KeV/cm)	13777,99798	4,657
β^2 (fòrmula Bethe Clothe)	0,999999999999964	0,995
v [ms ⁻¹]	299999999,999995	299249060
y [m] pel muó	0,0019	707,11
t [microsegons] pel muó	0,0000063	2,36

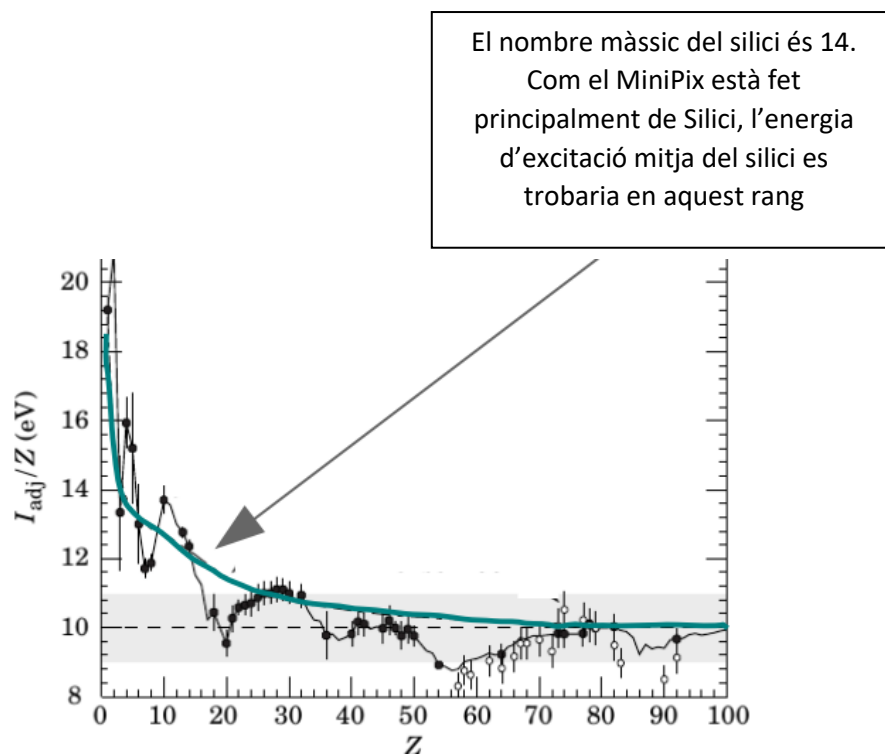
(veure resta de càlculs a l'annex 2.5)

A la taula podem observar el muó més gran que es va registrar a l'experiment i al seu costat podem veure el muó ideal (extret a internet) que demostra correctament la dilatació de l'espai i el temps. Si en els càlculs erronis (taula annex 2.2) trobàvem unes velocitats massa petites, en aquesta taula trobem unes velocitats massa grans, quasi la velocitat de la llum. Al portar velocitats tan grans i allunyar-nos tant dels resultats del "muó ideal", es podria pensar que els càlculs són erronis però realment entren dintre dels paràmetres de l'equació Bethe-Bloch i així podem demostrar que els nostres càlculs són correctes.

Es pot apreciar que els muons trobats demostren la dilatació de l'espai-temps perquè s'han format a 10000m de la superfície de la Terra, però la distància relativa per al muó és molt

més petita(massa petita potser), i el temps que triga en recórrer aquesta distancia és molt més petit del que tardaria en recórrer els 10000m.

Es podria dir que els resultats obtinguts són massa petits en comparació al que podíem esperar i que s'està demostrant massa la dilatació de l'espai i el temps. Podria ser que hi hagués algun error que no s'hagués tingut en compte o algun factor que del qual no es tingués constància. Tot i així, cal remarcar que aquests resultats varien molt només canviant una xifra decimal. Així doncs pot ser que s'hagi comés algun error instrumental el qual s'hagi arrossegat fins a l'últim càlcul i quest a significat una modificació important en els resultats finals. En tot cas, observem unes gràfiques corresponents a l'equació Bethe-Bloch:



Il·lustració 5

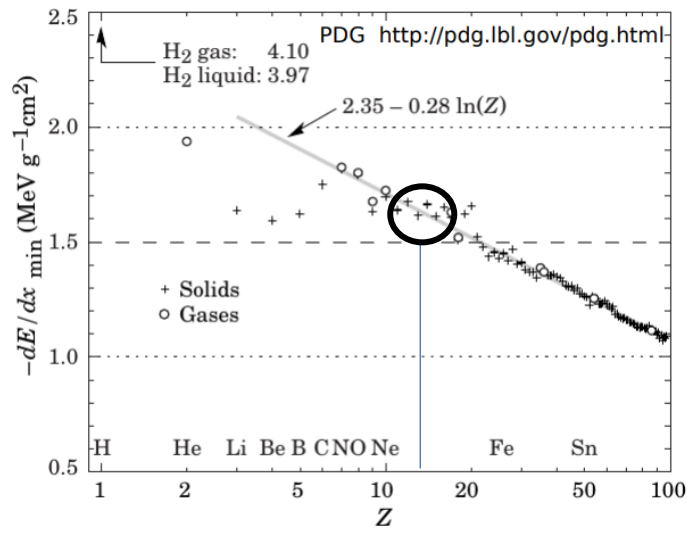
Gràfica que mostra l'energia d'excitació mitjana segons l'element

Per calcular aquesta energia d'excitació, s'ha d'utilitzar l'expressió:

$$\frac{I}{Z}$$

En el cas del silici: $Z=14$, $I=172$ eV

$$\frac{172}{14} \cong 12eV$$



Il·lustració 623

Gràfica que mostra l'energia mínima de ionització que pot perdre una partícula depenent del material i de l'estat físic de la partícula. Recordem que Z del silici és 14

7. Entrevista Alicia Sintes

Objectius de l'entrevista: Conèixer tota la informació que ens pot donar una ona gravitacional i comprendre la importància que tenen aquestes ones per revelar una part de l'origen de l'Univers.

També entendre quin repte a nivell organitzatiu (equips), econòmic (finançament) i tecnològic suposa el LIGO.

Alicia Magdalena Sintes va néixer el 1969 a un dels pobles més bonics de Menorca, Sant Lluís. És doctora en física per la Universitat de les Illes Balears (UIB) i ha realitzat estances postdoctorals així com becaria Marie Curie i investigadora sènior a l'institut Max Planck für Gravitationsphysik d'Alamània.

La seva investigació se centra en el camp de l'astronomia d'ones gravitacionals. Dirigeix un grup d'investigació que se centra en la detecció d'aquestes ones i que estan en col·laboració amb el LIGO i és membre del consell LIGO-LSC i del comitè executiu GEO.



Alicia Sintes

- **Què és una ona gravitacional?**
- “La teoria de la relativitat general d'Einstein ens diu que la gravetat no és una força qualsevol i que està relacionada amb la curvatura de l'espai-temps. Per una banda, si no tinguéssim energia tindríem un univers pla (com si fos un llit) però si tirem alguna cosa a sobre del llit, modifica la seva geometria i el corba. I per l'altra banda, si intentéssim tirar alguna cosa al llit pla, l'objecte aniria en línia recta. Però si tirem alguna cosa al llit que està corbat, trobaríem que l'objecte no va en línia recta sinó que es corba.

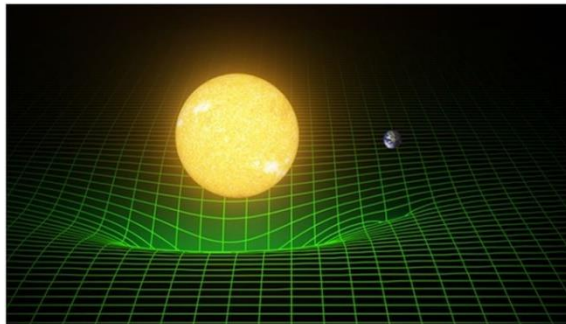
Per tant, tenim que la matèria deforma la curvatura de l'espai-temps i la curvatura de l'espai-temps li diu a la matèria com s'ha de moure.

Quan hi ha matèria en moviment, la curvatura de l'espai temps s'ha d'anar adaptant a les posicions de la matèria, però no ho pot fer de manera instantània perquè no hi ha res que vagi més de pressa que la velocitat de la llum. Això provoca ones pertorbacions. I aquestes pertorbacions són les ones gravitacionals que es propaguen per l'espai-temps.

En resum. Les ones gravitacionals són pertorbacions de la curvatura de l'espai temps produït per matèria accelerada.

Aquestes ones, a diferència de la resta, no necessiten un medi per propagar-se per l'espai-temps, ja que són pertorbacions del mateix espai-temps.

D'aquestes ones només podem detectar les que provenen de les coses més catastròfiques de l'Univers (forats negres, estels de neutrons, Big Bang, supernoves)”

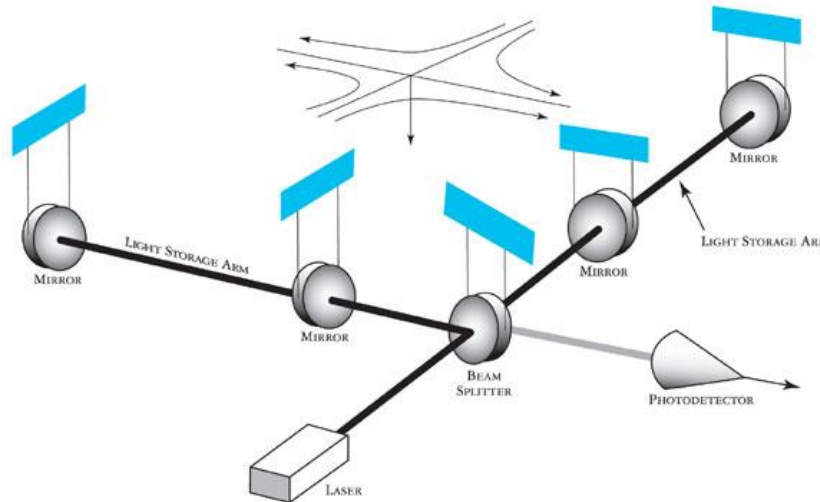


Espai-temps representat com una malla

- **Com es poden detectar aquestes pertorbacions?**
- “Per detectar aquestes ones es pot dissenyar un detector en forma de “L” que quan passi una ona, un dels braços s’acurta i l’altre s’expandeix. I aquesta seria la idea dels detectors d’interferometria amb làser.

Jo diria que LIGO és com una de les catedrals de la ciència. És el detector òptic més sensible que la humanitat ha dissenyat mai. Per poder detectar les ones gravitacionals necessitem un instrument sensible a 10^{-18} m. Estem parlant que ha de ser capaç de mesurar distorsions de la distància per davall de la mil·lèsima de la mida del protó en casos d’ones provinents d’efectes extrems. Els LIGO són detectors que cada braç de la “L” té 4 km de longitud i són detectors terrestres. Aquest interferòmetre dispara una llum làser que arriba al mig del detector on hi ha un separador de feixos que envia una llum a cadascun dels braços del detector. Al final de cada braç hi ha uns miralls que fan que la llum reboti.

Quan la llum torna i no ha passat res, trobem una interferència destructiva i la llum torna per on ha arribat. Però si passa una ona gravitacional, quan els rajos tornen no estan en fase i produeixen patrons d'interferència. Aleshores és quan hem de començar a analitzar què està passant”



Funcionament LIGO (mateixa idea que interferòmetre de Michelson)

- El LIGO es va acabar de construir el 1999 i la primera recerca d'una ona gravitacional es va fer el 2002. Quin és l'origen del LIGO? És a dir, qui va ser l'ideòleg d'aquest detector i quins van ser els països o entitats fundadores? Qui va ser el que més diners va proporcionar? Es trobava Espanya o alguna entitat privada espanyola entre els fundadors del LIGO?
- “L'origen va ser als anys setanta on l'ideòleg va ser Rainer Weiss del MIT, però també tenim a uns altres científics que hi van participar en la fundació del LIGO com Ronald Drever (Glasgow), Peter Saulson (Siracusa), un grup potent d'òptica quàntica a Alamània i més gent. Les coses no són fàcils i menys en projectes com el LIGO. Quan ens trobem en aquesta mena de projectes, cal treballar en ell durant molts anys fins que es tingui un cos considerable (anys noranta). Aleshores es presenta el projecte i es demana la seva construcció. En aquest cas, al LIGO, va ser la National Science Foundation a Estats Units qui va posar tots els diners. Els encarregats de la construcció de LIGO van ser Caltech i Emaiti. Però el segon director de LIGO es va adonar que necessitaven més mà d'obra i més científics i que havien d'obrir-se a científics d'arreu del món. Així doncs el 1997 es funda la LIGO scientific collaboration i és quan jo entro al projecte. I cada any la fundació anava creixent i s'hi anaven unint més científics d'arreu del món. Al principi del tot Espanya no va participar, fins que jo l'any 2002 firmo el primer conveni de

col·laboració amb el LIGO des d'Espanya. I així la universitat de les illes balears va formar part de la col·laboració internacional”

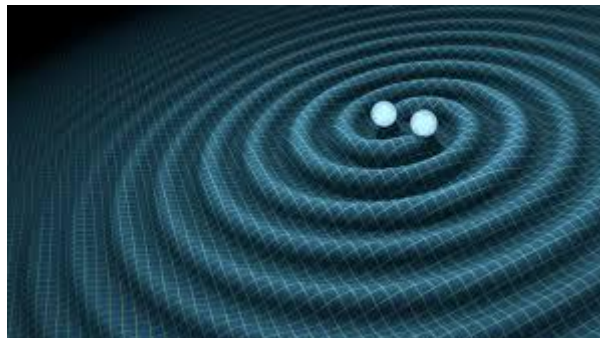
- **I actualment? Quants països o entitats/empreses hi ha implicades? Alguna a destacar?**
- “Actualment al LIGO hi ha gent de 20 països diferents participant en els seus projectes. A més a més LIGO està fent un tercer detector a l'Índia.”
- **D'on prové la major part del capital? Capital públic o privat?**
- “Tot el finançament que es rep és públic excepte en el cas de GEO que va rebre diners d'una gran empresa Alemana. La idea és que cada país contribueix de forma econòmica en el seu instrument. És a dir que cada país construeix un instrument”
- **Tornant al tema de les ones, quina informació ens pot donar una ona gravitacional?**
- “Les ones gravitacionals ens ajuden a trobar respostes a una sèrie de preguntes de diferents camps: astrofísica, física fonamental i de la cosmologia.

En el cas de la física fonamental serviria per dir quines propietats tenen realment aquestes ones, si la teoria de la relativitat general d'Einstein és vàlida o quines limitacions té, si els forats negres de la naturalesa són tal com ho va predir Einstein, com es comporta la gravetat quan tens un camp fort...

En el cas de la cosmologia t'aporta informació de com ha estat la història de l'expansió accelerada de l'Univers, t'ajuda a mesurar la constant de Hubble, a portar-te informació sobre l'univers primitiu...

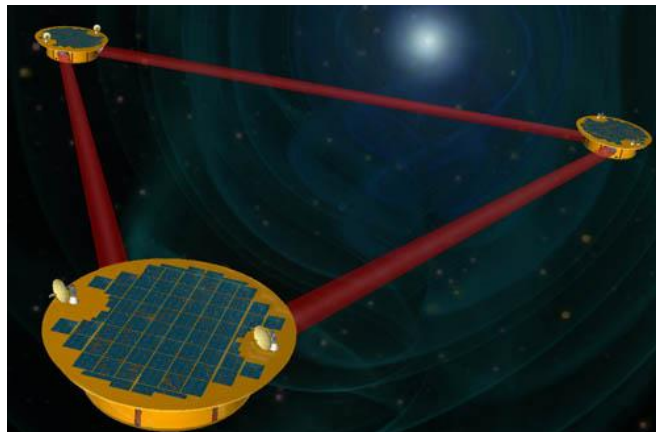
I en cas de l'astrofísica et pot aportar informació sobre els forats negres, sobre els estels de neutrons, com estan relacionades algunes d'aquestes fusions d'estels de neutrons i altres coses amb rajos gamma, com a partir de forats negres petits es poden formar aquests forats negres supermassius que es troben al centre de gairebé totes les galàxies...

No és d'estranyar que en un futur descobrim coses que avui dia no ens podem ni imaginar. És a dir, tenen un potencial de descobriment impressionant.”



Ones gravitacionals produïdes per dos cossos

- Quins fenòmens poden provocar una ona gravitacional?
- “Les ones gravitacionals es poden produir a totes les freqüències. Aquesta freqüència depèn de la massa dels objectes involucrats i de com compacte són. Com més massa tenen els cossos involucrats emeten freqüències més baixes i com més lleugers, més altes. I com més compacta, més freqüència. Els detectors d’ones electromagnètiques terrestres són sensibles només entre pocs Hz i alguns kHz i això prové de cossos de masses estel·lars. És a dir de cossos entre poc menys de la massa del nostre Sol fins a mil vegades la massa del nostre Sol. Això seria el rang de coses que podem observar des de la Terra. Dintre d’aquest rang estem parlant de fusions de forats negres de masses estel·lars, fusions d’estels de neutrons. Ara mateix formo part d’un projecte anomenat LISA que consisteix a enviar un detector com el LIGO, però en forma de triangle format per tres satèl·lits a l’espai per així poder mesurar a baixa freqüència on podríem veure forats negres molt massius que col·lapsen, galàxies que col·lapsen...”

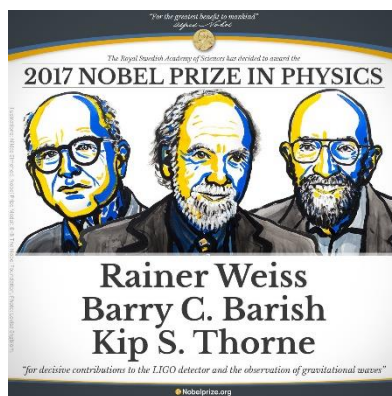


Projecte LISA que es troba en desenvolupament

- Per detectar-les, quin nivell de tecnologia es necessita? És a dir, el LIGO deu ser un gran repte pel sector de la tecnologia, que suposo, que requereix una tecnologia punta amb instruments molt sensibles, oi?
- “Efectivament. Al LIGO necessitem molt tipus de tecnologia: làsers molt estables i d’alta potència, miralls cilíndrics de 40 kg de massa, suspensions de cristalls monolítics que estan soldats d’una manera molt particular, nivells de buit molt elevat, materials d’alta qualitat perquè tinguin baix soroll tèrmic i baixes ressonàncies, sensors i controls, aïllament sísmic (capaços de detectar qualsevol

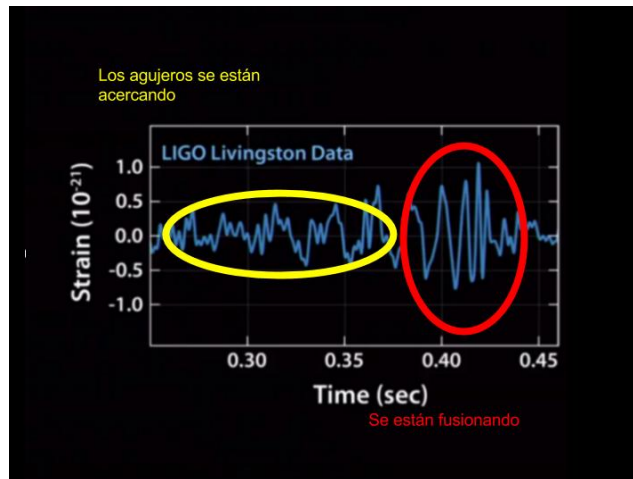
terratrèmol a la Terra amb una escala de Richter superior a 4, qualsevol avió que sobrevola el detector). Per tant la tecnologia que hi ha al LIGO és tecnologia que es pot aplicar a altres camps.”

- **Qui s'encarrega de dissenyar i fabricar tots aquests instruments?**
- “Necessites molts grups repartits en molts indrets del món allà on tens físics, però també tens enginyers, geòlegs i tota una sèrie de coses que s'han d'estudiar conjuntament. I normalment cadascun està especialitzat en un sistema (part de sensors, part òptica, part d'aïllament, part d'estudis ambientals...). Com es tracta de tecnologia punta i molt sensible s'ha de tindre en compte absolutament tot a l'hora de dissenyar i construir aquests detectors.”
- **És possible que una ona gravitacional ens doni informació de l'origen de l'univers? Com és possible?**
- “Sí. Amb ones gravitacionals podem aconseguir informació de què va passar a l'univers quan no tenia ni tan sols un segon de vida, cosa que és impossible d'obtenir amb la llum.”
- **Creus que algun dia tindrem informació sobre l'origen de l'univers?**
- “Sí, anem aprenent a poc a poc. El problema és que no sabem quan podrem arribar a aquest fons còsmic d'ona gravitacional.”
- **Quan això passi, haurem de canviar moltes teories?**
- “Quan puguem contestar a preguntes sobre el Big Bang, hi haurà un moment que la teoria d'Einstein deixarà de ser vàlida perquè és una teoria clàssica, no és una teoria quàntica. Per tant la teoria d'Einstein deixarà de ser vàlida a partir d'un rang.”
- **En un d'aquests projectes en el que estàveu en col·laboració amb el LIGO, es va detectar la primera ona gravitacional de la història i es va atorgar un premi Nobel als fundadors del projecte. Realment, quan vas començar a formar part d'aquest projecte, tenies esperances en observar alguna ona gravitacional?**
- “Bé. Jo quan vaig començar a formar part, el LIGO encara ni existia. Jo treballava amb el detector europeu que era un prototip molt més petit (braços de 600 m). Era una proposta a llarg termini. Jo sabia que els detectors inicials, la cosa estava bastant verda. Veient que els detectors avançats d'avui dia estaven en una fase de desenvolupament llarga, jo pensava que la primera observació d'una ona gravitacional seria pel 2015. Un any a una entrevista que em van fer un 14 de setembre vaig dir que observàriem la primera ona gravitacional el 2015. I just el 14 de setembre de 2015 vam detectar una ona gravitacional. Sincerament, jo no m'ho esperava perquè va ser l'any en què va entrar en funcionament. I finalment en el seu primer període de funcionament vam captar 3 senyals.”



Premi Nobel als tres propulsors de les deteccions d'ones a LIGO.

- **Com va ser el dia que vau detectar la primera ona gravitacional de la història?**
- “Era un dilluns que començaven les classes a la universitat de les Illes Balears i va ser al migdia quan van començar a arribar correus. A la tarda vam connectar amb el noi que estava a la sala de control i li vam preguntar si havia sigut una injecció (es feien a vegades com a forma de simulacre per veure si tot estava correcte) i ens va dir que no. Era una cosa astrofísica. Va ser un dia molt emocionant perquè vam ser dels primers grups que sabíem que aquest senyal va ser real.”
- **Un cop detectada, que s’havia d’analitzar? De quina part es va encarregar el teu equip d’investigació? I com funcionava el teu equip? Cadascú tenia una tasca o es treballava de manera conjunta?**
- “Hi havia un munt de coses per investigar. Necessites models molt precisos per poder extraure informació. S’hi havia d’estudiar: d’on provenia l’ona, processar quines són les masses dels cossos que l’han provocada, a quina distància va tenir lloc, quanta energia s’ha emès, quin és el forat negre resultant i tota una sèrie d’informació. A sobre aquesta detecció es va fer poques hores després que el detector es posés en marxa i per tant no estava ben calibrat i s’havia de mantenir la pertorbació en aquell estat el temps suficient per analitzar-lo.
En aquell moment el meu equip es va centrar a veure si algun hacker havia manipulat les dades i a veure si tots els instruments i tots els canals eren totalment correctes. Aquí a les Illes Balears tenim una part molt rellevant perquè ens encarreguem del modelatge d’aquests sistemes i també produïm famílies de patrons. Aquí produïm la base de dades de tots els senyals i després a l’anàlisi de dades comparem el que hem trobat amb tots els possibles senyals per tal de saber què ha produït aquesta ona. ”



Gràfica de la primera ona gravitacional detectada. En ella es pot veure on es van fusionar els dos forats negres.

- Com ho feu per saber de quin fenomen prové i a quina distància es troba l'ona gravitacional detectada?
- “Per l'amplitud del senyal. Cada model et dona un perfil diferent i s'ha de trobar de quin perfil es tracta. Quan tens el perfil, saps les masses, l'orientació i una sèrie de coses. I després amb l'amplitud del senyal pots fer els càlculs per esbrinar on s'ha produït l'ona.”
- Suposo que hi havia molts equips d'investigació de diferents països treballant únicament en aquesta ona que va trobar. Explica'ns una mica com estava tot organitzat.
- “Cada equip té una sèrie de tasques i tots volien que s'utilitzessin els seus models, les seves eines, es publicuessin els seus articles i per tant era com una mena de cursa per veure quin equip era el millor.
En el meu equip som unes 15 persones i quan vam detectar l'ona vam treballar de manera conjunta molt dur i dormint molt poc.”
- Sabeu a quina distància es trobava la unió dels forats negres que van produir l'ona i quant temps va tardar l'ona a arribar a la Terra?
- “La primera ona que vam detectar provenia de mil tres-cents milions d'anys llum de la Terra.”
- Els fundadors d'aquest projecte del qual formaves part, van acabar guanyant el premi Nobel. Com et vas sentir en formar part d'un projecte tan important?
- “Em vaig sentir molt contenta i molt orgullosa i a més a més em van deixar anar a Estocolm que va ser on van atorgar el premi Nobel pel projecte. Va ser una cosa molt emocionant.”
- Després d'això, van sorgir més equips d'investigació interessats a detectar més ones? Va créixer l'interès a investigar més aquestes ones?

- “Feia uns anys érem molt pocs i amb el pas del temps s’hi han anat afegint grups i països interessats a investigar les ones gravitacionals. Ara som molts.”
- **Per acabar. En què treballes actualment?**
- “Fonamentalment treballa al LIGO que també està vinculat al detector europeu Virgo, sóc membre del GEO (detector petit britànic-alemany), missió espacial Lisa i en el futur detector telescope.



Alícia ensenyant-me un dels premis que més gràcia li ha fet.



MOLTES GRÀCIES, Alícia

Conclusions

Un cop acabat aquest treball puc afirmar que estic molt content amb el treball realitzat i el temps dedicat. Al principi pensava que seria més dur i avorrit, però amb el pas del temps m'he adonat que estava perdent temps i treballant en un àmbit que m'agrada i em crida l'atenció.

Finalment he pogut complir tots els meus objectius excepte el número 10 (Aclarir dubtes sobre el meu futur), ja que segueixo amb els mateixos dubtes que els que tenia abans de començar el treball. La resta d'objectius s'han anat assolint pràcticament de forma automàtica perquè eren passos necessaris que s'havien de fer si es volia arribar a realitzar la pràctica així com l'objectiu 7 (Realitzar l'experiment dels muons per donar veracitat a la teoria d'Einstein), el més important.

Les dues hipòtesis del meu treball al final han acabat sent certes perquè primer de tot s'ha pogut demostrar, mitjançant l'experiment dels muons, que la dilatació del temps i de l'espai, és certa.

Ha costat arribar a aquesta hipòtesi perquè mentre es realitzava la pràctica dels muons, va sorgir un problema. No es va tenir en compte que l'energia que deixaven els muons al detector no era tota la seva energia i per tant s'obtenien energies massa petites que no demostraven la dilatació de l'espai i el temps. Malgrat tot, després de demanar ajuda al tutor de TR, Daniel Parcerissas, a l'Eugeni Graugés i al Rafael Ballabriga, els càlculs van acabar donant una aproximació del que s'esperava i es va confirmar la primera hipòtesi.

La segona hipòtesi s'ha anat confirmant durant tot el treball perquè podem veure que tecnologia i ciència avancen junts per trobar més respostes sobre l'univers, però on més podem afirmar aquesta hipòtesi és a l'entrevista amb Alícia Sintes que ens va explicar com s'organitzen els grups de científics i com podem trobar l'origen de l'Univers gràcies a les ones gravitacionals.

A més del problema trobat a l'experiment dels muons, ens hem trobat problemes per culpa de la COVID-19. El treball s'ha anat adaptant a les condicions que hi havia. En un principi es volia anar a fer unes pràctiques a l'ICFO, però per temes de seguretat no es va poder realitzar. També ens vam veure afectats per fer la pràctica amb el detector, ja que no es podia sortir del domicili i no disposàvem del TimePix. Tot i això, s'han sabut vèncer aquests contratemps i no han suposat un major problema.

Per millorar aquest treball, crec que falta una anàlisi de les dades de la pràctica, incloent-hi més gràfiques i fent més càlculs, per aprofundir. Cosa que no s'ha pogut fer per falta de temps per culpa del contratemps de la pràctica que no s'esperava.

Amb aquest treball he vist la importància que té la física per resoldre qüestions que la humanitat porta fent-se des de fa molt de temps i que encara no s'han resolt. També cal dir

que encara falta molt camí per recórrer perquè la ciència no és fàcil, i jo ho he pogut comprovar fent aquest treball que a la mínima que t'equivoques amb un càlcul, tot falla.

Agraïments

M'agradaria agrair a les persones que nomenaré a continuació per haver-me ajudat tant amb el treball. Sense elles no hauria sigut possible el treball o hauria sigut molt més complicat:

Al meu tutor de TR, Daniel Parcerissas, per ajudar-me en tot el treball, però sobretot quan va sorgir el problema a la part pràctica. S'havia d'utilitzar una equació molt complicada que jo sol no hauria pogut resoldre-la i ell em va ajudar i va demanar consell a dos experts sobre el tema. També li vull agrair que va fer possible que entrevistés a Alícia Sintès.

Al Rafael Ballabriga, exalumne del centre que treballa al CERN, per haver-nos deixat el detector i per ajudar-nos en el problema sorgit a la part pràctica.

A l'Eugeni Graugés, professor a la UB, que ens va ajudar a trobar l'error que estàvem cometent a la pràctica dels muons.

A l'Alícia Sintès, equip directiu de LIGO, per ajudar-me a completar del tot el treball amb una entrevista on vaig aprendre moltes coses sobre les ones gravitacionals i el LIGO.

Per últim, vull agrair a la meva família i als meus companys per haver-me animat quan les coses no estaven sortint del tot bé.

Referències

- WIKIPEDIA. Teoría de la relatividad [en línia].
https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_la_relatividad [consulta: 18-4-2020]
- VIQUIPEDIA. La llum [en línia]. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Llum> [consulta: 23-4-2020]
- MUSEO VIRTUAL DE LA CIENCIA. La naturaleza de la luz. José María López Sancho / Esteban Moreno Gómez / María José Gómez Díaz [en línia]
<http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz26.htm> [consulta: 23-4-2020]
- FISIC. Teorías de la luz. [en línia]. <https://www.fisic.ch/contenidos/ondas-y-la-luz/teor%C3%ADas-de-la-luz/> [consulta: 23-4-2020]
- VIQUIPEDIA. Difracció [en línia]. [https://ca.wikipedia.org/wiki/Difracció](https://ca.wikipedia.org/wiki/Difracci%C3%B3) [consulta: 23-4-2020]
- VIQUIPEDIA. Reflexió [en línia]. [https://ca.wikipedia.org/wiki/Reflexió](https://ca.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3) [consulta: 23-4-2020]
- VIQUIPEDIA. Refracció [en línia]. [https://ca.wikipedia.org/wiki/Refracció](https://ca.wikipedia.org/wiki/Refracci%C3%B3) [consulta: 23-4-2020]
- FISICALAB. Dispersión de la luz [en línia].
<https://www.fisicalab.com/apartado/dispersion-luz> [consulta: 24-4-2020]
- UCM. Experimento de Thomas Young. [en línia]
<https://www.ucm.es/data/cont/docs/136-2015-01-27-EXPERIMENTO%20DE%20YOUNG.pdf> [consulta:24-4-2020]
- VIQUIPEDIA. Interferència (propagació d'ona). [en línia]
[https://ca.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%A8ncia_\(propagaci%C3%B3_d%27ones\)](https://ca.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%A8ncia_(propagaci%C3%B3_d%27ones)) [consulta: 24-4-2020]
- MUSEO VIRTUAL DE LA CIENCIA. La naturaleza de la luz (Maxwell). José María López Sancho / Esteban Moreno Gómez / María José Gómez Díaz [en línia].
<http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz31.htm> [consulta: 28-4-2020]
- WIKIPEDIA. Ecuaciones de Maxwell. [en línia]
https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Maxwell [consulta: 28-4-2020]
- BIBLIOTECA DIGITAL. Hertz. Ondas electromagnéticas. [en línia].
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_17.htm [consulta: 15-5-2020]
- VIQUIPEDIA. Cos negre. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Cos_negre [consulta: 15-5-2020]
- VIQUIPEDIA. Efecte fotoelèctric. [en línia]
https://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte_fotoel%C3%A8ctric [consulta: 15-5-2020]

Videos física i presentacions classe PowerPoint. Daniel Parcerissas. Compartit Drive.
[consulta: tota la part teòrica]

ASTROMIA. Mecánica cuántica. [en línia]

<https://www.astromia.com/biografias/planck.htm> [consulta: 20-5-2020]

VIQUIPEDIA. Mecànica quàntica. [en línia]

https://ca.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A0nica_qu%C3%A0nticav [consulta: 20-5-2020]

NATIONAL GEOGRAPHIC. Relatividad. [en línia]

<https://www.nationalgeographic.es/ciencia/2017/05/la-teoria-de-la-relatividad-de-einstein-explicada-en-cuatro-simples-pasos> [consulta: 20-5-2020]

EXPERIENTIA DOCET. Einstein y... el experimento de Michelson-Morley. César Tomé. [en línia] <https://edocet.naukas.com/2018/12/10/einstein-y-el-experimento-de-michelson-morley/> [consulta: 27-5-2020]

NEOTEO. El experimento de Michelson y Morley. Ariel Palazzesi. [en línia]

<https://www.neoteo.com/el-experimento-de-michelson-y-morley/> [consulta: 27-5-2020]

VIQUIPEDIA. Relativitat especial. [en línia]

https://ca.wikipedia.org/wiki/Relativitat_especial [consulta: 18-6-2020]

WIKIPEDIA. Relatividad especial. [en línia]

https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_la_relatividad_especial [consulta:18-6-2020]

GIZMODO. Relatividad especial. Carlos Rebato. [en línia] <https://es.gizmodo.com/la-teoria-de-la-relatividad-especial-explicada-de-mane-1691315854> [consulta: 18-6-2020]

DATE UN VLOG. Videos diversos. Javier Santaolalla. [en línia].

https://www.youtube.com/channel/UCQX_MZRCaluNKxkywkLEgfA [consulta: tot el treball]

WIKIPEDIA. Pruebas de la relatividad especial. [en línia]

https://es.wikipedia.org/wiki/Pruebas_de_la_relatividad_especial [consulta: 10-7-2020]

WIKIPEDIA. Transformacions de Lorentz. [en línia].

https://es.wikipedia.org/wiki/Transformaci%C3%B3n_de_Lorentz [consulta: 16-7-2020]

HYPERPHYSICS. Lorentz transformation. [en línia]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Relativ/Ltrans.html> [consulta: 16-7-2020]

MULTIBLOG. Transformaciones de Galileo y Lorentz. [en línia].

<https://multiblog.educacion.navarra.es/lcordonm/files/2011/06/Transformaciones-de-Galileo-y-Lorentz.pdf> [consulta: 17-7-2020]

WIKIPEDIA. Espacio de Minkowski. [en línia] https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio-tiempo_de_Minkowski [consulta: 17-7-2020]

WIKIPEDIA. Relatividad general. [en línia].

https://es.wikipedia.org/wiki/Relatividad_general [consulta: 25-8-2020]

VIQUIPEDIA. Relativitat general. [en línia].

https://ca.wikipedia.org/wiki/Relativitat_general [consulta: 25-8-2020]

EL DIARI DE L'EDUCACIÓ. Deu preguntes per entendre la relativitat general d'Einstein. Enrique Sacristán. [en línia]. <https://diarieducacio.cat/deu-preguntes-per-entendre-la-teoria-de-la-relativitat-general-deinstein/> [consulta: 27-8-2020]

HYPERPHYSICS. Avance del perihelio de Mercurio. [en línia], <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Relativ/grel.html> [consulta: 27-8-2020]

VIQUIPEDIA. Forats negres. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Forat_negre [consulta:27-8-2020]

VIQUIPEDIA. Forats de cuc. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Forat_de_cuc [consulta:5-9-2020]7

WIKIPEDIA. Interferómetro de Michelson. [en línia]

https://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro_de_Michelson [consulta:5-9-2020]

VIQUIPEDIA. Muons. [en línia]. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Mu%C3%B3n> [consulta: 7-9-2020]

RELATIVISMO WEEBLY. Experimento de los muones. Javier Clemente. [en línia]

<http://relativismo.weebly.com/experimento-de-los-muones.html> [consulta: 7-9-2020]

REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA. Experimento de los muones y los gemelos. [en línia] <http://rsefalicante.umh.es/TemasRelatividad/relatividad15.htm> [consulta: 7-9-2020]

FISQUIWEB. Experimento de los muones. [en línia]

<https://fisquiweb.es/Apuntes/Apuntes2Fis/Muones.pdf> [consulta: tota la part pràctica]

VIQUIPEDIA. Ona gravitacional. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Ona_gravitacional [consulta: 8-9-2020]

ADMIRA. Detectors TimePix. Daniel Parcerissas. [en línia]

<https://serviparticules.ub.edu/projectes/projecte-admira> [consulta: tota la part pràctica]

CERN. TimePix. [en línia] <https://medipix.web.cern.ch/home> [consulta: 8-9-2020]

WIKIPEDIA. MediPix. [en línia]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Medipix> [consulta:8-9-2020]

VIQUIPEDIA. Interferòmetre. [en línia]

<https://ca.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B2metre> [consulta: 8-9-2020]

WIKIPEDIA. LIGO. [en línia] <https://es.wikipedia.org/wiki/LIGO> [consulta: 9-9-2020]

LIGO. Ligo. [en línia] <https://www.ligo.caltech.edu/> [consulta: 9-9-2020]

WIKIPEDIA. LISA. [en línia]

https://es.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna [9-9-2020]

WIKIPEDIA. Bethe-Bloch. [en línia] https://en.wikipedia.org/wiki/Bethe_formula

[consulta: tota la part pràctica]

USPAS. Review of formulas for relativistic motion. [en línia]

https://uspas.fnal.gov/materials/10MIT/Review_of_Relativity.pdf [consulta: tota part pràctica]

UZH. Interactions of particles with matter. Katharina Müller. [en línia]

https://www.uzh.ch/cmsssl/physik/dam/jcr:1d8375d4-bea8-450c-90a0-6518a47d1642/empp17_KM_bethebloch.pdf [consulta: tota part pràctica]

Annex 1

Càlculs de la pràctica d'iniciació al MediPix (punt 5)

- Alfa

Radiació alfa					
$m\alpha$ (kg)	6,64E-27	6,64E-27	6,64E-27	6,64E-27	6,64E-27
$E\alpha$ (J)	5,98E-10	5,98E-10	5,98E-10	5,98E-10	5,98E-10
$E\alpha$ (keV)	3,73E+06	3,73E+06	3,73E+06	3,73E+06	3,73E+06

	1a partícula	2a partícula	3a partícula	4a partícula	5a partícula
EK[keV]	5.642	4929	4997	5346	5526
EK[J]	9,04E-13	7,90E-13	8,01E-13	8,56E-13	8,85E-13
v [ms-1] (relat.)	16481113	15406768,97	15512468,32	16043912,54	16311186,69
v [ms-1] (class.)	16499803	15422032,82	15528048,85	16061151,96	16329303,25
v/c (relat.)	0,05494	0,05136	0,05171	0,05348	0,05437
v/c (classica)	0,05500	0,05141	0,05176	0,05354	0,05443
Desviació (%)	0,113	0,099	0,100	0,107	0,111
Longitud d'ona	6,05E-15	6,48E-15	6,43E-15	6,22E-15	6,12E-15

- Beta

Radiació beta	
$m\beta$ (kg)	9,10E-31
$E\beta$ (J)	8,19E-14

	1a partícula	2a partícula	3a partícula	4a partícula	5a partícula
Energia total [keV]	847	584	833	556	573
EK[keV]	847	584	833	556	573
EK[J]	1,36E-13	9,36E-14	1,33E-13	8,91E-14	9,18E-14
v [ms-1] (relat.)	277937539,8	265311792,4	277456842,6	263339878,7	264557051,6
v [ms-1] (class.)	546093821,2	453452688,4	541561843,9	442448730,5	449161856,8


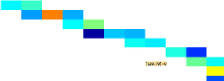

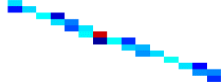
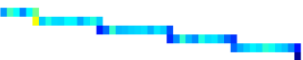
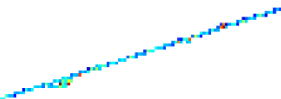


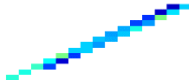
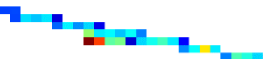
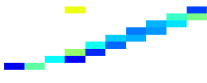
v/c (relat.)	0,926	0,884	0,925	0,878	0,882
v/c (classica)	1,820	1,512	1,805	1,475	1,497
Desviació (%)	96,48	70,91	95,19	68,01	69,78
Longitud d'ona	2,62E-12	2,74E-12	2,62E-12	2,77E-12	2,75E-12

- Gamma

	1a partícula	2a partícula	3a partícula	4a partícula	5a partícula
EK[keV]	487	256	129	477	227
EK[J]	7,80E-14	4,10E-14	2,07E-14	7,64E-14	3,64E-14
f(Hz)	1,18E+20	6,19E+19	3,12E+19	1,15E+20	5,49E+19
λ (m)	2,55E-12	4,85E-12	9,62E-12	2,60E-12	5,47E-12
p (kg·m/s)	2,60E-22	1,37E-22	6,89E-23	2,55E-22	1,21E-22

Annex 2

2.1 Muons trobats amb el MiniPix

Prova 500x02 (sense tapa)	1 muó (1346 keV)	
Prova 1100x01 (amb tapa)	1 muó (1454 keV)	
Prova 1000x01 (amb tapa)	1 muó (1250 keV)	
Prova 900x01 (sense tapa)	1 muó (1545 keV)	
Prova 500x01 (sense tapa)	1 muó (3625 keV)	
Prova 800x01 (sense tapa)	1 muó (10920 keV)	
Prova 800x01 (amb tapa)	1 muó (1367 keV)	
Prova 700x01 (sense tapa)	1 muó (1791 keV)	
Prova 600x01 (amb tapa)	1 muó (1680 keV)	
Prova 400x02 (amb tapa)	1 muó (2805 keV)	
Prova 1100x01 (sense tapa)	1 muó (1151 keV)	

2.2 Primer càlcul muons erroni

muons	
$m\alpha$ (kg)	1,19E-28
$E\alpha$ (J)	1,07E-11
$E\alpha$ (keV)	6,69E+04

	1r muó	2n muó	3r muó	4t muó	5è muó	6è muó	7è muó	8è muó	9è muó	10è muó	11è muó	muó exemplar
EK[keV]	1.346	1454	1250	1545	3625	10920	1367	1791	1680	2805	1151	
EK[J]	2,16E-13	2,33E-13	2,00E-13	2,48E-13	5,81E-13	1,75E-12	2,19E-13	2,87E-13	2,69E-13	4,49E-13	1,84E-13	
v [ms ⁻¹] (relat.)	59308009	61568618	57214113	63402942	94973662	15329376 9	59755121	68081387	66017658	84274787	54961459	29940000 0
y [m] pel muó	9802,6	9787,1	9816,5	9774,1	9485,7	8595,9	9799,6	9739,1	9754,9	9597,3	9830,7	632,1
t [microsegons] pel muó	165,3	159,0	171,6	154,2	99,9	56,1	164,0	143,1	147,8	113,9	178,9	2,1

2.3 Energia depositada al detector entre els píxels de la seva trajectòria

pixel count	total E	mean E/pixel	E(KeV)/um (1 pixel)	E(KeV/cm)
144	10920	76	1,379	13788
18	1367	76	1,381	13808
39	11015	282	5,135	51352
31	2579	83	1,513	15126
52	4447	86	1,555	15549
27	1791	66	1,206	12061
17	1752	103	1,874	18738
19	1346	71	1,288	12880
52	3625	70	1,267	12675
51	3895	76	1,389	13886
52	15277	294	5,342	53416
61	18616	305	5,549	55487
61	3672	60	1,094	10945
75	5431	72	1,317	13166
106	6521	62	1,119	11185
61	3837	63	1,144	11437
46	3022	66	1,194	11945
109	6991	64	1,166	11661
88	5679	65	1,173	11733
226	16798	74	1,351	13514
257	16904	66	1,196	11959

2.4 Equació Bethe-Bloch d'on podem trobar la β corresponen a cadascun del muons enregistrats

β^2	resultat sense densitat
0,02	36,649
0,03	26,503
0,04	20,979
0,05	17,468
0,06	15,023
0,07	13,215
0,08	11,820
0,09	10,709
0,1	9,801
0,15	6,955
0,2	5,444
0,25	4,501
0,3	3,854
0,35	3,381
0,4	3,021
0,45	2,738
0,5	2,510
0,55	2,324
0,6	2,170
0,65	2,041
0,7	1,935
0,75	1,847
0,8	1,777
0,85	1,726
0,9	1,700
0,95	1,723
0,99	1,902
0,999	2,238
0,99999	2,941
0,9999999	3,998
0,999999999999	5,759
0,999999999999	5,407
0,999999999999	5,759
0,999999999999	6,112
0,999999999999	6,464
0,999999999996	5,916
0,995	1,999

2.5 Càlcul de les expressions (2) i (5) amb la velocitat obtinguda de l'expressió: $v = \beta \cdot c$

	1r muó	2n muó	3r muó	4t muó	5è muó (gran)	6è muó	7è muó	8è muó	9è muó	10è muó	muó ideal
ET /L (KeV/cm)	12380,3	14055,7	11413,5	12605,7	13778	13214,7	11821,8	11498	14006,8	11721,6	4,66
B ² (fòrmula Bethe Clothe)	0,99999999 99982	0,9999999999 99984	0,9999999999 72	0,9999999999 903	0,99999999999964	0,999999999999 82	0,999999999999 14	0,999999999997 9	0,99999999999998 4	0,999999999999	0,995
v [ms ⁻¹]	299999999, 9997	299999999,99 9998	299999999,99 6	299999999,999 86	299999999,999995	299999999,9999 7	299999999,998 7	299999999,996 9	299999999,999998	299999999,9985	2992490 60
y [m] pel muó	0,0134	0,0013	0,0529	0,0098	0,0019	0,0042	0,0293	0,0458	0,0013	0,0316	707,11
t [microsegons] pel muó	0,00004	0,000004	0,00018	0,00003	0,00001	0,00001	0,00010	0,00015	0,000004	0,00011	2,36

Annex 3

Apunts d'una conferència online de Rafael Ballabriga. En Rafael es treballador del CERN i s'encarrega de dissenyar detectors petits de partícules. En concret, treballa amb el model de detector TimePix que s'ha utilitzat per a realitzar la pràctica d'aquest treball. Gràcies a aquesta conferència, s'ha pogut afegir informació a l'apartat 4.1.

Conferència Rafael Ballabriga

Al CERN es separen els protons dels àtoms d'hidrogen i s'ajunten en paquets de 10 protons. Aquests protons són enviats pels dos sentits de l'accelerador a alta velocitat. Quan han adquirit molta velocitat, els fan impactar dins d'uns detectors que estan situats a l'interior de l'accelerador.

Els detectors són instruments que serveixen per detectar la presència d'alguna cosa a través d'indicis.

Les partícules van deixant petjades i això ens permet esbrinar quin tipus de partícula és i quina trajectòria segueix.

Troblem 4 tipus de detectors:

- Detector de traces.
- Detector de muons.
- Detector calorímetre electromagnètic.
- Detector calorímetre hadron.

Les partícules es poden detectar amb alguns detectors, no amb tots. Rebent les d'alguna partícula en varis detectors, podem reconstruir la seva trajectòria, l'energia, la seva velocitat...

- Detectors de traces.

Processat individual del senyal depositat en el sensor de cada partícula.

Assignació de les partícules a l'instant de la col·lisió

En aquests sensors, trobem l'electrònica de lectura i el sensor. Són híbrids i combinen diferents tecnologies.

Els moviments de les partícules a dintre del sensor, detecten moviment i envien una senyal elèctrica a l'electrònica de lectura.

Senyal analògic: continu en el temps

Senyal digital: només pot prendre un conjunt de valors finit.

Els píxels de MediPix contenen senyal analògica i digital. El senyal d'entrada és amplificat.

Sensor de silici: 300µm de silici

1 pixel: 55x55 µm ≈ 2000 transistors

Un pixel és un amplificador de càrrega que es compara amb el nivell llindar, és a dir digital vs analògic.

Un transistor té un funcionament semblant al d'una aixeta que deixa passar el corrent de l'aigua.

Són molt i molt petits i condueixen el corrent elèctric de drenador a sortidor en funció de l'estat de la porta.

Ion /loff; ha de ser molt gran

loff ha de ser molt petit per estalviar la bateria.

La llei de Moore va predir que el nombre de transistors augmentaria molt i així ha passat.

Els detectors TimePix detecten qualsevol tipus de partícula que interacciona amb silícia.

Per exemple:

- Partícules alfa: nuclis d'heli
- Partícules beta: electrons
- Partícules gamma: fotos altes energies
- Raigs X

Es fabriquen 139×10^9 memòries DRAM per any

1×10^9 transistors per Gb en un any

El nombre total de transistors DRAM és 2×10^{21} que és del mateix ordre de magnitud de les gotes que cauen a tot el món durant un any.

La radiació beta està formada per electrons que interaccionen amb el silici i deixen rastre.

Raigs X i raigs gamma produeixen altes energies i interaccions amb l'efecte fotoelèctric, dispersió. Producció parells B-/B+.

Els muons van deixant un rastre però a causa de la seva energia no canvien la seva trajectòria. 80 electrons/ μm de silici.

Dosimetria a l'espai.

Si prenem dades a l'espai, podem saber a la radiació que estan sotmesos els astronautes.

Això és molt important per la NASA per no posar en perill als astronautes. i ajuda a saber quin tipus de blindatge posar a la nau.

SATRAM: pàgina web amb mesures de satèl·lits amb TimePix.

Observa la vegetació als continents i disposa d'un TimePix.

Els raigs X ens permeten determinar l'estructura de les proteïnes.

Si fem zoom en una radiografia, veiem píxels. Assignem un número en cada píxel i una escala de colors.

Amb això són fotons i ordenen els píxels i podem obtenir una imatge atenuada.

Aplicacions: estudis en patrimoni cultural com quadres per saber tècniques de treball, determinar autors i l'any de realització.

Els transistors són molt petits i es treballa amb ordinadors. Esquemes amb ordinadors amb un Software que permet simulacions. Després una empresa col·laboradora construeix els transistors.