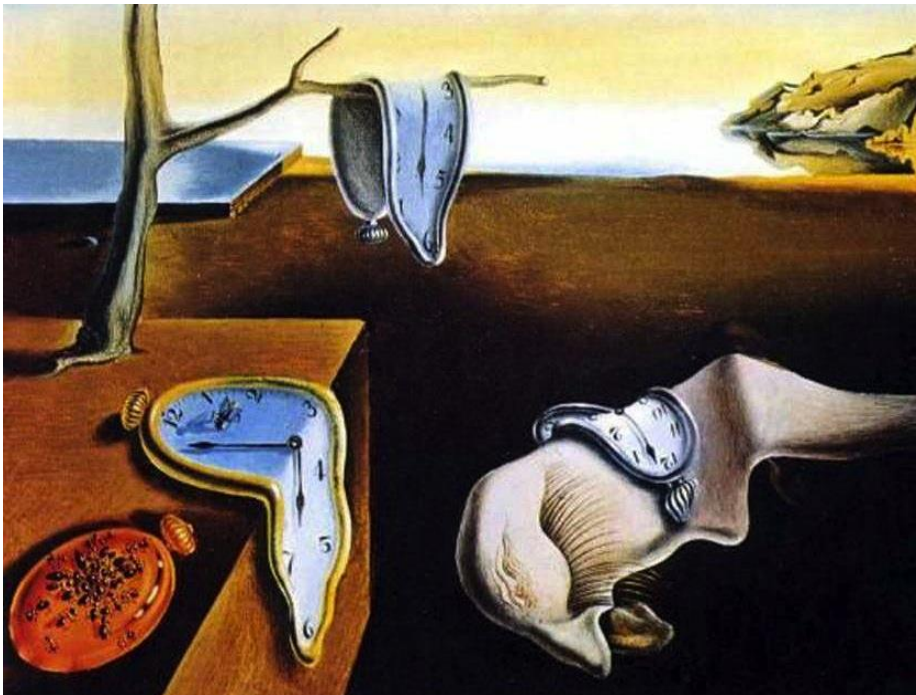


La teoria de la relativitat especial i detecció de muons en una cambra de boira



“L’important és no deixar mai de
fer-se preguntes”

Albert Einstein, 1879-1955

Allan Wheels

AGRAÏMENTS

Primer de tot vull agrair al meu tutor del treball, Gabriel Calabuig, les orientacions que m'ha donat i l'ajuda que m'ha ofert per a resoldre qualsevol tipus de dubte referent al treball. Gràcies per acompanyar-me en aquest camí.

També vull agrair a Joan Trabal i Jordi Grajera la seva ajuda en la recerca d'informació, facilitant-me llibres i pàgines web d'interès. A la Montse Pont per ampliar els meus coneixements sobre el sincrotró i aconseguir-me una entrevista amb Michele Carlà. A l'Anna Li per parlar-me de la cambra de boira com a detector de partícules i a Joan Girbau, cotutor del meu treball, per guiar-me en l'elecció del tema i per ajudar-me a solucionar dubtes.

Per últim, vull agrair molt especialment a la meva família el suport que m'han donat i molt especialment a en Guillem i l'Elena per ser-hi sempre que ho he necessitat i al meu pare, per ajudar-me en la construcció de la cambra de la boira.

Moltes gràcies a tots!

ÍNDIX

INTRODUCCIÓ	1
Motivacions	1
Objectius.....	2
Metodologia.....	2
La teoria de la relativitat especial	3
1. ANTECEDENTS A LA TEORIA.....	4
1.1 Principi relativitat de Galileu.....	5
1.1.1 El teorema d'addicions de velocitats	6
1.2 Constància de la velocitat de la llum	8
1.2.1 Electromagnetisme	9
1.2.2 Èter	10
1.2.3 Experiment Michelson i Morley.....	11
2. RELATIVITAT ESPECIAL	13
2.1 Dilatació del temps	13
2.1.1 Paradoxa dels bessons	16
2.2 Contracció de l'espai	17
2.3 Massa relativista i energia cinètica relativista	18
2.3.1 Energia cinètica i Interconversió massa-energia.....	20
2.4 Simultaneïtat, sincronització de rellotges i les transformacions de Fitzgerald-Lorentz.....	22
2.4.1 Simultaneïtat i sincronització de rellotges	23
2.4.2 Les transformacions de Fitzgerald-Lorentz	24
3. PART PRÀCTICA	28
3.1 Detecció de muons mitjançant una cambra de boira	28
3.1.1 La cambra de boira o de Wilson	28
3.1.2 Construcció de la cambra de boira i experimentació	29
3.1.3 Fonaments teòrics de l'experiment	30
3.1.4 Resultats	32
3.1.5 Conclusions	33
3.2 La relativitat especial als sincrotrons.....	33
3.2.1 Funcionament	34
3.2.2 Finalitat.....	35
3.2.3 Efectes relativistes	37
4. CONCLUSIONS	39
BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA	41

INTRODUCCIÓ

En aquest treball s'exposen els antecedents, els punts més importants i les implicacions en l'àmbit de la recerca científica (en els sincrotrons) de la teoria de la relativitat especial d'Albert Einstein. A més, en la segona part del treball, s'hi presenta una experimentació que avala les deduccions teòriques d'aquesta.

Un gran gruix del treball consisteix en les deduccions teòriques, que s'han realitzat analitzant resultats d'experiments reals o, com és el cas de la majoria d'elles, a partir d'experiments mentals que parteixen dels dos axiomes o postulats de la relativitat i desenvolupen raonadament les seves conseqüències tant a nivell qualitatiu com a nivell matemàtic en forma de les fórmules que formen part de la teoria.

Tant l'explicació teòrica dels conceptes com les deduccions intenten ser sempre entenedores i clares, per la qual cosa hi ha algunes repeticions i no sempre es busca l'elegància expositiva, sinó que aquesta queda supeditada a la claredat i a la intenció de facilitar la comprensió de les idees, seguint el precepte del físic teòric L. Boltzmann de "deixar l'elegància als sastres i als sabaters".

MOTIVACIONS

Vaig escollir fer aquest treball pel meu interès en la física i les meves ganes d'aprofundir en el meu coneixement de la teoria de la relativitat especial.

Penso que el que m'ha portat a triar aquest tema és, també, la meva curiositat. És justament la curiositat que em va portar a interessar-me per la física i, un cop endinsat en aquesta ciència, sempre m'han semblat fascinants moltes de les teories modernes que fins i tot qüestionen la nostra percepció del món i la realitat. Entre aquestes, una de les que més ganes tinc de conèixer en profunditat i de les que em semblen més fascinants i amb més possibilitats per a què la pugui treballar amb els meus coneixements és la relativitat especial d'Albert Einstein. Per això penso que serà apassionant treballar sobre aquest tema i que m'aportarà molts coneixements nous.

OBJECTIUS

La finalitat de la realització d'aquest treball és en gran mesura teòrica ja que s'articula al voltant d'una teoria ja comprovada i acceptada per la comunitat científica. No obstant això, a part de la recerca bibliogràfica, contindrà entrevistes i un disseny experimental amb l'objectiu de detectar muons, per tant, no es prescindirà del tot d'una part pràctica. Durant la realització del meu treball de recerca espero aprendre i sobretot entendre nous conceptes físics i matemàtics com també aprendre a interpretar i a treballar millor a partir d'observacions experimentals com es veu en la part pràctica, que es basa sobretot en l'objectiu de poder detectar muons. També espero descobrir experiments importants relacionats amb la relativitat i les aplicacions pràctiques que ha permès aquesta teoria en concret.

Així doncs, resumint, els objectius d'aquest treball de recerca són entendre en la seva plenitud la teoria de la relativitat especial d'Einstein i realitzar una comprovació empírica que l'empari.

METODOLOGIA

La metodologia emprada per a la realització d'aquest treball es centrarà en recopilar informació a partir de les diferents fonts de les quals dispo: llibres de text, llibres de divulgació científica i diverses pàgines web, totes elles detallades a la bibliografia i webgrafia. També aconseguiré informació a partir d'entrevistes a científics amb coneixements sobre el tema d'estudi i a partir de la visita i els documents que m'han facilitat des del sincrotró ALBA. Per últim, podré resoldre dubtes concrets en cas que sigui necessari amb l'ajuda de Joan Girbau, el cotutor del meu treball dins el programa ARGO.

LA TEORIA DE LA RELATIVITAT ESPECIAL

La teoria de la relativitat especial o restringida va ser proposada pel físic alemany Albert Einstein al 1905. En ella posa en harmonia el principi de la relativitat de Galileu i la constància de la velocitat de la llum. Entre d'altres explica la cinemàtica de cossos que viatgen a velocitats properes a les de la llum i també ens permet entendre certs aspectes relacionats amb l'electromagnetisme.

La relativitat especial és coneguda per la nova visió que aporta a la comprensió de l'espai i el temps. Dins de la teoria, aquests dos conceptes ja no són vistos com entitats diferents i absolutes, sinó que estan relacionats i són variables depenent de l'estat de moviment del sistema de referència des del qual es prenen les mesures. Un altre punt important és el fet d'interpretar el temps com una coordenada més d'un espai-temps quadridimensional. A més, la teoria va permetre establir la coneguda equivalència entre massa i energia, fent que ara els entenguem com a dos conceptes íntimament relacionats. D'altra banda, la teoria no es contradiu directament amb la física clàssica, ja que per velocitats molt petites, segueixen sent correctes les aproximacions de Galileu. Per tant, és quan la velocitat relativa entre dos cossos o sistemes és propera a la de la llum que es comencen a fer evidents els efectes relativistes predits per Einstein.

1. ANTECEDENTS A LA TEORIA

En aquest capítol s'expliquen amb detall el principi de la constància de la velocitat de la llum i el de la relativitat de Galileu que, degut a les seves aparents incompatibilitats, van esdevenir els antecedents que van motivar a Einstein a concebre la seva famosa teoria.

A finals del segle XIX es creia que les lleis de la mecànica eren les mateixes per a qualsevol sistema de referència inercial. Aquest principi rep el nom de la relativitat de Galileu i es descrivia matemàticament mitjançant les transformacions de Galileu. D'altra banda, els avenços en el camp de l'electromagnetisme van mostrar que les equacions de Maxwell no seguien aquestes transformacions i a més a més implicaven que la velocitat de la llum fos constant. Per a entendre aquest fet es va proposar un sistema de referència respecte el qual la llum es movia a velocitat constant i se'l va anomenar "èter". D'alguna manera, aquest sistema de referència seria quelcom absolut, estaria totalment en repòs. I, per tant, el moviment deixaria de ser relatiu ja que hi hauria un sistema totalment quiet. Per tant, el problema sorgeix perquè aparentment aquests dos principis elementals són contradictoris entre ells.

Semblava doncs inevitable eludir un dels dos principis exposats. Tanmateix, tots dos tenien innumerables proves experimentals de la seva validesa i no es va trobar cap fenomen que en contradigués cap dels dos. A més a més, quan un principi és àmpliament acceptat en una àrea de la física és poc probable que falli en un altre camp, de manera que podem generalitzar la relativitat de Galileu i aplicar-la no només a la mecànica, sinó també a totes les branques de la física. Així doncs, calia acceptar que la llum viatjava a una velocitat constant i, generalitzant el principi de la relativitat de Galileu, que les lleis físiques són les mateixes per a qualsevol sistema de referència inercial (principi de la relativitat especial).

La solució a aquesta situació va venir de la mà d'Albert Einstein amb la seva teoria de la relativitat especial, publicada el 1905, amb l'article *Zur elektrodynamik bewegter Körper* (*Sobre l'electrodinàmica de cossos en moviment*, en català). Tot i que algunes de les formulacions matemàtiques que utilitza la teoria ja existien, la importància d'Einstein rau en la nova interpretació que va donar als fets observats que permetia arribar a les equacions deductivament a partir de dos principis senzills i fonamentals: la relativitat especial i la invariància de la velocitat de la llum.

1.1 PRINCIPI RELATIVITAT DE GALILEU

Aquest principi bàsic de la mecànica clàssica estipula el següent: “Si K és un sistema de referència inercial, llavors també ho és qualsevol altre sistema K' que es trobi en un estat de translació uniforme i les lleis de la mecànica respecte a K' seran les mateixes lleis generals que respecte a K ”.

Entenem per sistema de referència inercial tot aquell en el qual es compleixen les lleis de Newton, per tant:

$$\frac{dp}{dt} - F_{real} = 0 \quad (1.1)$$

On p i t són, respectivament, la quantitat de moviment del cos i el temps.

En un sistema de referència d'aquestes característiques no caldrà fer servir forces fictícies per tal que es compleixin les lleis de la mecànica clàssica i no tindrà acceleració. A més a més, qualsevol sistema que es mogui amb velocitat uniforme respecte un sistema de referència inercial també ho serà i serà impossible establir quin dels dos es mou i quin està en repòs: estan en moviment relatiu un respecte l'altre.

Tot això no vol dir que les mesures preses sobre algun fenomen en K siguin les mateixes que en K' ; el significat és que ambdós sistemes són equivalents per a la descripció dels fenòmens físics i que a més, no podem trobar cap argument per definir quin dels dos està en repòs i quin està en moviment. Els valors de les mesures, com s'ha comentat, no seran les mateixes però podem aplicar una sèrie de transformacions per a relacionar els conjunts de coordenades.

Suposem un sistema de referència inercial K amb les coordenades x, y, z, t , i un altre sistema de referència K' que es mogui respecte el primer amb velocitat v amb les coordenades x', y', z', t' . Suposem també que comencem a contar el temps en el mateix moment i just quan els orígens de coordenades coincideixen, per tant quan $t = t' = 0$. Per últim, suposarem que el seu moviment és al llarg de l'eix x i prou. Les relacions, aleshores, seran les següents:

$$x' = x - vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t \quad (1.2)$$

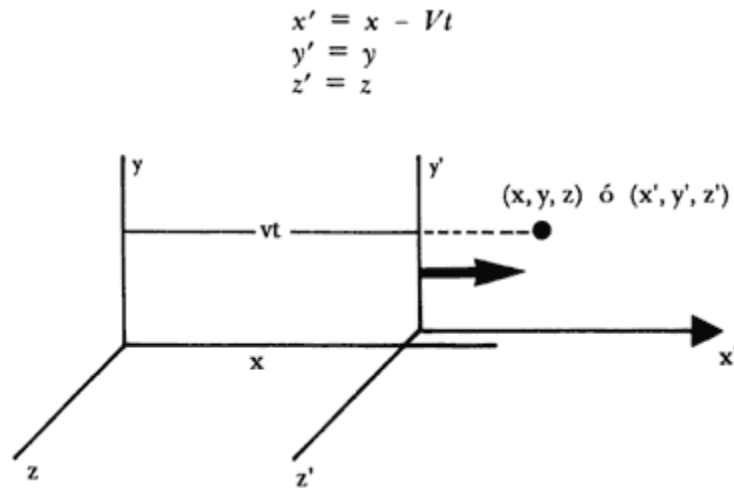


Fig. 1: El sistema de referència $X'Y'Z'$ s'ha desplaçat una distància $v \cdot t$ en l'eix de les x respecte el sistema XYZ .

Tot i que la validesa d'aquest principi es va posar en dubte, existeixen fets que recolzen la seva veracitat. El primer exemple són els moviments dels cossos celestes que són descrits amb gran exactitud per la mecànica clàssica, on és vàlid aquest principi.

L'altre argument és que, si aquest principi no fos cert, aleshores els sistemes de referència inercials K, K', K'' , etc. no serien equivalents per a la descripció de fenòmens físics. En aquest hipotètic cas, hi hauria d'haver un sistema on les lleis físiques serien més senzilles i aquest sistema seria el que qualificaríem de "sistema en repòs absolut", i a més podríem afirmar que tots els altres sistemes de referència, on les lleis físiques serien més complexes, són mòbils. Això sabem que no és així perquè la Terra en la seva translació al voltant del Sol va en diferents direccions, per tant seria impossible que coincidís sempre amb aquest hipotètic sistema de referència absolutament quiet, i tanmateix la direcció de la velocitat de la Terra no intervé en les lleis de la naturalesa ni en el comportament dels sistemes físics. Tot i que s'han intentat trobar aquestes diferències degut al moviment de la Terra, mai s'han pogut observar de manera que aquest és un argument de pes a favor del principi de la relativitat de Galileu.

1.1.1 EL TEOREMA D'ADDICIONS DE VELOCITATS

A partir de les transformacions de Galileu, que es deriven del principi de la relativitat, s'arriba al teorema d'addició de velocitats segons la mecànica clàssica.

Una manera fàcil d'entendre aquest teorema és mitjançant un exemple: imaginem un home que camina dins el vagó d'un tren. El tren es mou a velocitat constant v respecte la via i l'home es mou amb velocitat w respecte el tren. La qüestió és: amb quina velocitat W avança l'home respecte a la via?

El que sembla més lògic és pensar que si l'home estigués quiet, en un temps t avançaria respecte la via un tros igual a vt . Però com que a més està caminant, hauria de recórrer respecte el vagó i per tant també respecte la via un tros igual a wt . Per tant, per lògica pensarem que avança la suma de les dues porcions.

Així, l'espai que recorre és el següent¹:

$$x = wt + vt \quad (1.3)$$

I la seva velocitat respecte a la via, que anomenarem W i la definirem com a x/t , és la següent:

$$\frac{x}{t} = \frac{wt}{t} + \frac{vt}{t} \quad (1.4)$$

$$\boxed{W = w + v} \quad (1.5)$$

Aquest teorema de suma de velocitats també el podem obtenir a partir de les transformacions abans exposades. La velocitat de la persona caminant respecte el sistema que considerem en repòs és:

$$W = \frac{dx}{dt} \quad (1.6)$$

La velocitat relativa entre els dos sistemes l'anomenem v , i és precisament la velocitat del tren respecte la via.

La velocitat de la persona en repòs respecte el sistema que es mou en MRU (tren) és:

$$w = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x - vt)}{dt} = \frac{dx}{dt} - v = W - v; \quad (1.7)$$

¹ Com veurem més endavant, el teorema de suma de velocitats és erroni. De fet, la relativitat especial aconsegueix harmonitzar el principi de propagació i de la relativitat i és justament l'addició de velocitats una de les equacions que queden modificades. Però per mostrar les aparents incompatibilitats i la situació de la física en el moment, l'he pres com a "vàlid" per fer l'explicació.

$$W = w + v \quad (1.8)$$

Tanmateix, aquest raonament és insostenible i aquesta llei no és vàlida en realitat com tampoc ho són les transformacions de Galileu. Aquest teorema és, com tot seguit veurem, un dels punts que es contradiu amb el següent postulat de la teoria.

1.2. CONSTÀNCIA DE LA VELOCITAT DE LA LLUM

La velocitat de la llum al buit és constant i no depèn del sistema de referència des del qual es mesuri. El valor de la velocitat de propagació de la llum només depèn de les condicions físiques del medi en el que es propaga.

La velocitat de la llum tampoc depèn de l'estat de moviment de la font emissora com va demostrar De Sitter en els seus estudis sobre les estrelles dobles². Aquesta llei tan senzilla aparentment porta grans problemes quan la intentem analitzar des de la mecànica clàssica.

Per exemple, aquesta llei ens mostra que el teorema de suma de velocitats és erroni. Suposem que un raig de llum es propaga amb velocitat c respecte una via de tren. A més amés, en aquesta via hi circula un tren amb velocitat v respecte de la via. Si apliquem el teorema abans esmentat deduiríem que la velocitat de la llum respecte el tren (w) és: $w=c-v$.

Però si acceptem el principi de la relativitat, ens adonarem que no és compatible amb aquest resultat ja que si la llei de la propagació de la llum en el buit diu que c és constant aquesta velocitat hauria de ser la mateixa tan si agafem el tren com a cos de referència com si agafem les vies. El resultat, doncs, fa pensar que la llei de propagació amb les vies i amb el tren és diferent en contradicció amb el principi de relativitat.

En aquesta situació sembla evident que calia abandonar un dels dos principis. Però, com exposaré a continuació, la llei de la propagació de la llum en el buit, també té moltes proves a favor de la seva validesa.

² Com es mostra a l'apartat "No dependència de la velocitat o de l'energia de la Font" de la web https://es.wikipedia.org/wiki/Pruebas_de_la_relatividad_especial

1.2.1 ELECTROMAGNETISME

Els avanços en els camps del magnetisme i de l'electricitat van fer arribar a la conclusió que la llum es tractava d'una ona electromagnètica. A partir de les equacions de l'electromagnetisme es pot deduir teòricament la velocitat de la llum.

En primer lloc, suposem que el medi està en equilibri i que, per tant, les forces magnètiques i elèctriques induïdes són iguals:

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad (1.9)$$

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.10)$$

$$\vec{F}_B = \vec{F}_E \quad (1.11)$$

$$q\vec{v} \times \vec{B} = q\vec{E} \quad (1.12)$$

On F_E és la força elèctrica; q , la càrrega; E , el camp elèctric; F_B , la força magnètica; v , el camp magnètic.

Abans d'aïllar la velocitat, definirem el camp elèctric i el camp magnètic produït pel moviment d'una càrrega al buit:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (1.13)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Q\vec{v}}{r^2} \quad (1.14)$$

A continuació, aïllem la velocitat de l'equació 1.12, substituïm els valors de la permeabilitat, operem i obtenim el valor de c al buit:

$$\vec{v} = \frac{\vec{E}}{\vec{B}} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}}{\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Q\vec{v}}{r^2}} \quad (1.15)$$

$$\vec{v} = \frac{1}{\epsilon_0\mu_0\vec{v}}; \quad \vec{v} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \quad (1.16)$$

$$\vec{v} = \frac{1}{\sqrt{8,854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{C^2/s^2}}} = 3 \cdot 10^8 m/s \quad (1.17)$$

Com acabem de veure en la deducció, la velocitat de la llum (c) és constant i depèn només de les condicions del medi. Tot i això encara ens podem preguntar respecte a què és constant. En un primer moment es va teoritzar que la velocitat de la llum era constant respecte un hipotètic medi que s'anomenava èter, que era com un sistema de referència absolutament en repòs.

1.2.2 ÈTER

L'èter era una hipotètica substància molt lleugera que es creia que ocupava tots els espais com un fluid. L'èter no era només el sistema de referència respecte el qual es movia la llum, sinó que també era el medi pel qual es propagava. En algunes teories de Maxwell i Tesla entre d'altres, el concepte d'èter el podem relacionar amb el modern concepte de camp electromagnètic.

Per les característiques pròpies de la llum, es podien deduir varies característiques de l'èter. La velocitat de propagació d'una ona per oscil·ladors connectats és la següent:

$$v = a \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.18)$$

En aquesta equació v és la velocitat, a és la distància entre els oscil·ladors, k és la constant d'elasticitat del medi i m la massa dels oscil·ladors. Així, es creia que l'èter tenia una densitat ínfima, es tractava d'un medi molt rígid i amb les partícules que el constituïen molt separades entre si. A més d'això, es creia que era incompressible, sense viscositat i transparent.

La seva existència es donava per suposada i es pensava que encara no s'havia detectat per la dificultat que això suposava. No obstant això, quan la tècnica ho va permetre, l'experiment més famós per tal detectar l'èter (Michelson i Morley) va resultar tenir resultats negatius deixant com a insostenible la hipòtesi de la seva existència.

1.2.3 EXPERIMENT MICHELSON I MORLEY

L'any 1887, el físic nord-americà Michelson i el seu ajudant, Morley, van dur a terme un experiment per tal de demostrar la presència de l'èter i calcular la velocitat de la Terra en el seu moviment de translació respecte aquest.

L'experiment consistia en enviar rajos de llum en direccions perpendiculars (una en la direcció del moviment de la Terra i l'altra en direcció perpendicular) que havien de recórrer distàncies iguals. Tanmateix, pel fet que anaven en direccions diferents respecte l'èter, s'esperava trobar una diferència en els temps que tardava cada raig en completar el seu recorregut. Com que la velocitat de la terra al voltant del sol és d'uns 30km/s, calia un muntatge experimental molt precís per tal de detectar aquesta petita diferència. Per això, es va utilitzar un interferòmetre que permetia detectar les interferències entre les radiacions lluminoses, mesurar-ne les longituds d'ona i també conèixer-ne la velocitat.

Esquemàticament, el muntatge era el següent:

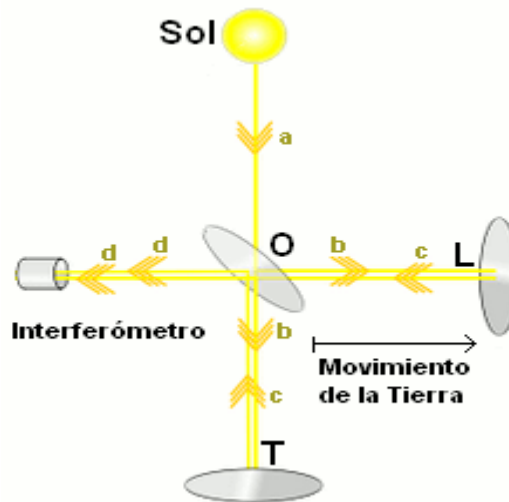


Fig. 2: Esquema del muntatge de l'experiment de Michelson i Morley

Si la velocitat de la llum és constant respecte l'èter, de l'experiment es podria deduir el següent:

El raig que fes el trajecte OL d'anada i tornada tardaria el temps següent:

$$t_{OL} \frac{d}{c-v} + \frac{d}{c+v} = \frac{d(c+v) + d(c-v)}{(c+v) \cdot (c-v)} = \frac{dc + dv + dc - dv}{c^2 - v^2} = \frac{2dc}{c^2 - v^2} \quad (1.19)$$

En canvi, el raig que fes el trajecte perpendicular a la velocitat de la Terra faria un trajecte amb forma triangular respecte l'èter ja que mentre fes el trajecte OT , la terra s'hauria mogut en direcció cap a L un tros igual a $v \cdot t$. Així, el raig que fes el trajecte OT d'anada i tornada tardaria el temps següent:

$$(c \cdot t)^2 = (v \cdot t)^2 + d^2 \quad (1.20)$$

$$c^2 \cdot t^2 - v^2 \cdot t^2 = d^2; t^2 = \frac{d^2}{c^2 - v^2}; t = \frac{d}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad (1.21)$$

$$t_{OT} = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad (1.22)$$

El sorprenent va ser quan, en realitzar l'experiment no es van trobar les interferències que s'esperaven. Es suposava, pel que hem deduït matemàticament, que el raig de llum que es movia perpendicularment a la translació de la Terra hauria d'arribar abans que l'altre i això hauria de produir una interferència. Que tots dos rajos arribessin al mateix temps significava que el temps que havien tardat en fer el recorregut era el mateix i això només podria ser així si v fos 0. I evidentment, la Terra, en realitzar un moviment circular no pot estar parada sempre respecte de l'èter i per tant, es va arribar a la conclusió que l'èter no existia, la qual cosa implicava que no hi havia un sistema de referència absolut, i que la velocitat de la llum era constant independentment del sistema de referència respecte el qual es mesurés i es propagava pel buit.

2. RELATIVITAT ESPECIAL

Amb tot el que s'ha exposat en el capítol anterior, el que semblava més lògic era abandonar un dels dos principis. En canvi, Einstein els va fer servir com a postulats i va conjuguar-los de manera harmònica en una teoria lògicament impecable i en la qual va transformar la nostra visió dels conceptes de l'espai i el temps.

2.1 DILATACIÓ DEL TEMPS

Una de les conseqüències d'acceptar que la velocitat de la llum és constant i que les lleis físiques són iguals per tots els sistemes de referència inercials és la dilatació o alentiment del pas del temps en un sistema que es mou respecte d'un altre. Però com bé diu el nom de la teoria, tot és relatiu, per tant també ho és el moviment d'un cos. Així doncs, també podríem afirmar que el segon sistema és el que està en repòs i si comparéssim el temps que passa en aquest respecte l'altre, podríem afirmar que el temps que s'ha alentit és el de l'altre sistema.

Tot i que aquestes transformacions ja van ser proposades per Lorentz i Fitzgerald, ells les comprenien d'una forma diferent i l'aparell matemàtic que van proposar no tenia cap justificació teòrica. Va ser Einstein qui va aportar una nova interpretació i va poder justificar les transformacions matemàtiques per a l'espai i el temps.

Per explicar la relativitat del temps és útil fer servir un experiment mental. Imaginem un sistema de referència on hi ha dos miralls col·locats un al davant de l'altre. El temps que tarda la llum d'anar des d'un mirall, reflectir-se en l'altre (si la distància entre els miralls és w) i tornar serà el següent:

$$\Delta t_0 = \frac{2w}{c} \quad (2.1)$$

Ara imaginem un sistema de referència que considerarem en repòs (per tant, el primer està en moviment relatiu respecte aquest segon). En aquest sistema també hi ha dos miralls col·locats de la mateixa manera i el temps que tarda la llum en anar i tornar és exactament el mateix.

Però si des d'aquest mateix sistema s'observa al primer, el recorregut que haurà de fer la llum ja no serà w , sinó que serà un recorregut en diagonal.

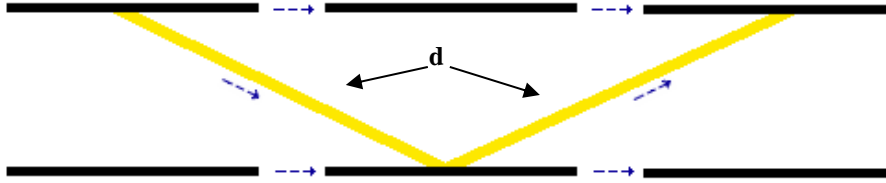


Fig. 3: Distància que ha de recórrer la llum vista des del sistema en repòs

Per tant, la meitat de l'espai que ha de recórrer la llum, aplicant Pitàgores, és:

$$d^2 = w^2 + (vt/2)^2 \quad (2.2)$$

$$d = \sqrt{w^2 + (v\Delta t/2)^2} \quad (2.3)$$

De manera, que el temps que calcularem que passa des del segon sistema (en repòs), observant el primer (en moviment), serà el següent

$$\Delta t = \frac{2d}{c} = \frac{2 \cdot \sqrt{w^2 + \frac{v^2\Delta t^2}{4}}}{c} \quad (2.4)$$

$$\Delta t^2 = \frac{4 \left(w^2 + \frac{v^2\Delta t^2}{4} \right)}{c^2} = \frac{4w^2 + v^2\Delta t^2}{c^2} \quad (2.5)$$

$$c^2 \cdot \Delta t^2 - v^2\Delta t^2 = 4w^2 \quad (2.6)$$

Com que podem expressar $4w^2$ en funció del temps segons l'equació 2.1:

$$2w = c \cdot \Delta t_0; \quad 4w^2 = (c \cdot \Delta t_0)^2 \quad (2.7)$$

$$c^2 \cdot \Delta t^2 - v^2\Delta t^2 = 4w^2 = c^2\Delta t_0^2$$

$$\Delta t^2 = \frac{c^2\Delta t_0^2}{c^2 - v^2}$$

$$\Delta t^2(c^2 - v^2) = c^2\Delta t_0^2$$

$$\frac{\Delta t^2 (c^2 - v^2)}{c^2} = \Delta t_0^2$$

$$\Delta t^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \Delta t_0^2$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad (2.8)$$

Per tant, un mateix esdeveniment dura temps diferents en sistemes de referència diferents. El temps mesurat en el propi sistema (en repòs, però en moviment relatiu respecte l'altre) és més petit que el temps que mesurem quan observem el sistema de referència que es mou des d'un sistema en repòs. Això és així perquè sabem que la velocitat v mai pot ser més gran que c , així doncs Δt_0 queda dividit sempre per un número més petit que 1.

Podem dir que una unitat de temps en el sistema en moviment, vist del sistema en repòs, dura més segons que una unitat de temps en el sistema que està quiet i per tant, un esdeveniment en el sistema en moviment mesurat des d'aquest mateix dura menys que aquest mateix esdeveniment mesurat des d'un sistema estàtic. Aquest fenomen és el que rep el nom de dilatació del temps.

Com que les quantitats v^2/c^2 i $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ apareixen molt sovint en la relativitat tenen noms propis:

$$\beta = \frac{v^2}{c^2} \quad (2.9)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad (2.10)$$

2.1.1 PARADOXA DELS BESSONS

La paradoxa dels bessons és un dels exemples més cèlebres sobre la dilatació del temps. Tot i això, en el seu plantejament normal, no constitueix cap paradoxa dins l'àmbit de la relativitat, si bé es contradiu directament amb el nostre sentit comú.

Imaginem dos germans bessons, l'Àlicia i en Bernat. En Bernat decideix fer un viatge per l'espai en una nau que pot assolir velocitats properes a les de la llum. El dia que ell marxa, com és d'esperar, els dos tenen exactament la mateixa edat.

Després de viatjar durant uns quants anys per l'espai en Bernat torna a la Terra i es sorprèn al veure que sembla més jove que la seva germana bessona. I de fet, no només li ho sembla, sinó que podem afirmar que **ÉS** més jove. Com podem afirmar això?

La teoria de la relativitat especial ens explica que el temps passa a diferent ritme entre sistemes de referència que es mouen entre ells. I de fet, aquest és el cas de l'Àlicia i en Bernat. Mentre l'Àlicia es trobava en un sistema en repòs, en Bernat es movia a velocitats properes a les de la llum i quan això passa, l'interval de temps que passa per en Bernat és més petit que el temps transcorregut per l'Àlicia com hem demostrat a l'apartat anterior.

Així, podem dir que seran germans bessons d'edats diferents i a més, podem afegir, que no es tracta de cap paradoxa sinó de l'aplicació dels postulats de la teoria de la relativitat.

Però, tot i això, en aquest cas, sí que ens apareix una paradoxa que no es pot resoldre a partir d'aquesta teoria únicament. Aquesta contradicció apareix en adonar-nos que, si acceptem el primer postulat de la relativitat (segons el qual totes les lleis de la física són les mateixes en tots els sistemes de referència inercials i, per tant, no existeix el concepte de repòs absolut). Si els dos cossos es mouen entre si en un MRU, podem acceptar que en Bernat es mou i l'Àlicia està en repòs però també podem acceptar el cas contrari. D'aquesta manera, acceptant que és l'Àlicia la que es mou, hauria de ser ella la que envelleix menys.

Com que els dos raonaments són vàlids (en Bernat veuria que el rellotge de l'Àlicia s'endarrereix mentre que l'Àlicia veuria que el rellotge d'en Bernat va més lent) ja que no podem afirmar qui està en repòs, ens trobem en una paradoxa ja que no poden ser els dos més joves o més vells a la vegada.

Aquesta paradoxa es pot resoldre a partir de la teoria de la relativitat general que va postular Einstein el 1915. El que ens explica (de forma molt simplificada ja que en aquest treball no entrarem en aquesta teoria) és que, perquè en Bernat marxi i torni ha d'accelerar i frenar, de manera que podrem afirmar que és ell realment qui es mou i per tant aplicarem les transformacions de Lorentz referents al temps considerant a l'Àlícia en repòs i a en Bernat en moviment.

2.2 CONTRACCIÓ DE L'ESPAI

A conseqüència de la relativitat del temps i la constància de la velocitat de la llum l'espai també ha de ser relatiu. Per tant, pel mesurament d'una mateixa distància des de sistemes de referència inercials diferents, s'obtidran valors diferents. Per mostrar aquest efecte de la relativitat va bé imaginar els sistemes que hem utilitzat en l'apartat 2.1.

Si des del sistema en repòs mesurem el temps que tarda el feix de llum en fer el recorregut (que ens semblarà en diagonal) veurem que tarda un temps que anomenarem Δt . Aquest temps que mesurem des del sistema en repòs, com hem vist, serà més gran que el temps que mesuraríem des del sistema en moviment. Per tant veurem que la distància mesurada des del sistema en repòs també serà més gran que la presa des del sistema en moviment. Expressat en llenguatge matemàtic veiem que l'espai que recorre el sistema en moviment mesurat des del que està en repòs es defineix de la següent manera:

$$\Delta l = v \cdot \Delta t = v \cdot \Delta t' \cdot \gamma = \Delta l' \cdot \gamma$$

$$\Delta l = \Delta l' \cdot \gamma \tag{2.11}$$

La longitud mesurada en un sistema en repòs és més gran que la mesurada en un sistema en moviment. Aquesta reducció de la longitud rep el nom de contracció de la longitud i es fa palesa sobretot en sistemes que es mouen amb velocitats properes a les de la llum.

2.3 MASSA RELATIVISTA I ENERGIA CINÈTICA RELATIVISTA

En el marc de la relativitat especial, la massa deixa de ser una magnitud constant del cos i passa a dependre de l'estat de moviment del cos respecte al sistema des del qual prenem la mesura, de manera semblant a la que ho fan tant l'espai com el temps.

Segons el primer postulat de la teoria, les lleis de la física són les mateixes per a tots els sistemes de referència inercials i, a partir d'unes transformacions, els valors de totes les quantitats s'han de mantenir invariants. D'altra banda, la segona llei de Newton escrita en funció del moment lineal ($p=mv$) no compleix aquest postulat ja que la quantitat dp/dt sota les transformacions de Lorentz no es manté invariant d'un sistema inercial a un altre. Per resoldre això, el camí que va seguir Einstein va ser modificar la definició del concepte de moment perquè aquest es conservés i, per tant, també es complís la segona llei de Newton en qualsevol sistema de referència inercial. La nova definició de moment és la següent on v_s és la velocitat relativa entre els dos sistemes:

$$f = \frac{dp}{dt}; p = \gamma m_0 v = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v_s^2}{c^2}}} \quad (2.12)$$

Per explicar aquest canvi en la definició del moment que implica el fenomen d'augment de la massa es pot utilitzar un experiment mental semblant a l'utilitzat en l'apartat anterior en el qual imaginarem el xoc de dues partícules d'igual massa (en repòs) i analitzarem el seu moment lineal.

Considerem un sistema de referència O en repòs i un altre en moviment relatiu respecte aquest amb velocitat v en el sentit positiu de l'eix x i que anomenarem O' . Des del sistema O es llança amunt una partícula R de massa m_0 i velocitat v_y respecte aquest sistema. D'altra banda, des del sistema O' també es llança avall una partícula M de massa m amb velocitat v_y respecte aquest sistema de manera que les dues partícules xoquin i retornin al seu punt d'origen. Com que sabem que respecte el seu sistema cada partícula es mou amb la mateixa velocitat, és lògic pensar que el xoc serà simètric i les dues partícules, després de la col·lisió, aniran a la mateixa velocitat.

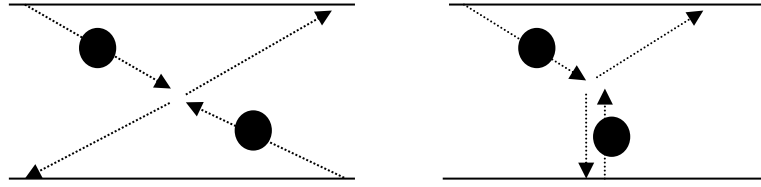


Fig. 4: A l'esquerra, esquema del xoc vist des d'un sistema exterior, considerant que els dos sistemes es mouen un a l'encontre de l'altre amb la mateixa velocitat i amb sentits oposats. A la dreta, esquema del xoc vist des del sistema O .

Però vist des del sistema O , la partícula M no va a velocitat v_y en aquest eix y , a més a més, no té només moviment en l'eix y sinó que també es mou en l'eix x amb vel (1.13) D'aquesta manera, en mesurar la velocitat en l'eix y (v_y') de la partícula M des del sistema O abans del xoc hem de fer el següent: primer definim la velocitat v_y' que depèn de la distància y i del temps t' . La y no cal que indiquem que és "prima" perquè les y dels dos sistemes coincideixen. Per això, només ens cal aplicar la transformació de Lorentz pel temps i ja obtenim el valor de la velocitat de M respecte el sistema O :

$$v_y' = \frac{dy}{dt'} = \frac{dy}{\gamma dt} = \frac{dy \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{dt} = v_y \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.13)$$

Això és degut a que el temps en el sistema O' vist des de O passa més lentament que en el propi sistema O arran del seu moviment relatiu a velocitat v . El problema apareix perquè, vist des d'aquest sistema, ens trobem amb dues masses (que mesurades en repòs són iguals) que, en xocar a velocitats diferents, segueixen anant cadascuna a la mateixa velocitat. Perquè segueixin anant a la mateixa velocitat totes dues han de tenir el mateix moment lineal per tant, arribem a la conclusió que el que passa és que no tenen la mateixa massa, sinó que la partícula en moviment M augmenta la seva massa relativa en moure's respecte el nostre sistema estàtic.

$$m_0 \cdot v_y = m \cdot v_y \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.14)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.15)$$

2.3.1 ENERGIA CINÈTICA I INTERCONVERSIÓ MASSA-ENERGIA

El fet de canviar la definició de moment fa que també haguem de canviar la nostra manera d'entendre l'energia. Com que la massa canvia amb la velocitat, i l'energia cinètica depèn de la velocitat, podem calcular l'energia cinètica d'un cos a partir de la variació de la seva massa. A més a més, la teoria de la relativitat restringida estableix una relació entre l'energia i la massa d'un cos de manera que podem afirmar que els cossos contenen certa quantitat d'energia degut a la seva massa de la mateixa manera que certes quantitats d'energia es poden convertir en partícules amb massa.

L'energia cinètica, en física clàssica es defineix de la forma següent:

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.16)$$

Al mateix temps sabem que el treball que es fa sobre un cos és igual a la variació de la seva energia cinètica i, com que la força que actua sobre un cos pot prendre qualsevol valor, la seva energia cinètica també ha de poder fer-ho. D'altra banda, amb aquesta definició d'energia cinètica això no podria ser així ja que la velocitat està limitada a $3 \cdot 10^8$ m/s.

Amb aquests dos raonaments queda clar que cal reformular l'expressió de l'energia cinètica. En definitiva, el que es fa és aplicar el concepte de moment relativista (massa variable) a la fórmula del treball. Partim, doncs, que la variació d'energia cinètica d'un cos és igual al treball que ha fet una força sobre aquest:

$$W = \Delta E_C \quad (2.17)$$

$$\Delta E_C = \int_0^v F \cdot dx \quad (2.18)$$

$$E_C = \int_0^v \frac{dp}{dt} \cdot dx = \int_0^v v \cdot dp = \int_0^v v \cdot d(m \cdot v) = \int_0^v v \cdot d\left(\frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right) \quad (2.19)$$

Com que dins la integral hi ha una funció i la derivada d'una altra podem fer:

$$E_C = v \cdot \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \int_0^v dv \cdot \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.20)$$

A la integral hi afegim dos termes: un dos i c^2 , per tal de facilitar-ne la resolució. Al mateix temps entrem el signe menys a la integral i deixem les dues expressions en forma de suma:

$$E_c = v \cdot \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \int_0^v dv \cdot \frac{-2 \cdot c^2 \cdot m_0 \cdot v}{2 \cdot c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = v \cdot \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \int_0^v m_0 \cdot c^2 \frac{\frac{-2 \cdot v}{c^2}}{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.21)$$

En aquest punt ens cal trobar una funció la derivada de la qual sigui el terme que ens ha aparegut a la integral:

$$y = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}; y' = \frac{1}{2\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot -2v \cdot c^{-2} = \frac{\frac{-2v}{c^2}}{2\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.22)$$

Integrem:

$$\begin{aligned} E_c &= v \cdot \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \left[\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right]_0^v = \frac{m_0 \cdot v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 \right) = \\ &= \frac{m_0 \cdot v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2 = \\ &= \frac{m_0 \cdot v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{m_0 \cdot c^2 \cdot \frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2 = \\ &= m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2 = (m - m_0) \cdot c^2 \quad (2.23) \end{aligned}$$

Així doncs, l'energia cinètica d'un cos es pot calcular com la diferència entre la seva massa relativista i la seva massa en repòs multiplicada pel quadrat de la velocitat de la llum. També ho podem entendre com la diferència entre la seva energia total i la seva energia en repòs. D'aquesta fórmula també podem extreure'n dues més: la de l'energia relativista d'un cos, o sigui la seva energia total; i l'energia d'un cos en repòs deguda a la seva massa.

$$\begin{array}{l}
 E_{Relativista} = m \cdot c^2 \\
 E_{Repòs} = m_0 \cdot c^2
 \end{array}
 \tag{2.24}$$

2.4 SIMULTANEÏTAT, SINCRONITZACIÓ DE RELLOTGES I LES TRANSFORMACIONS DE FITZGERALD-LORENTZ

Una de les conseqüències de la dilatació del temps i la contracció de l'espai és un gran gir en la nostra manera d'entendre la simultaneïtat, ja que des de la perspectiva de la relativitat especial, un esdeveniment pot ser o no ser simultani depenent del sistema de referència des del qual l'analitzem.

Primer de tot, però, cal tenir clar el concepte al que ens referim quan afirmem que dos fets són simultanis. La simultaneïtat la podríem definir, utilitzant un exemple, de la manera següent: imaginem un segment AB amb punt mitjà M. Suposem que cauen dos llamps, un al punt A i l'altre al punt B. Aquests dos esdeveniments seran simultanis si la llum arriba al punt M al mateix moment, en temps iguals. Lligat a aquesta definició hi ha el concepte de temps en física. Com veurem, el temps en el que succeeix un esdeveniment depèn de la posició en l'espai d'aquest respecte nosaltres. Així doncs, s'entén per temps l'hora que marca un rellotge (posició de les agulles) immediatament contigu (espacialment) al esdeveniment. Tot això ho haurem de tenir en compte a l'hora de traduir les coordenades a les quals es dona un esdeveniment d'un sistema a un altre com veurem amb les transformacions de Fitzgerald-Lorentz.

2.4.1 SIMULTANEÏTAT I SINCRONITZACIÓ DE RELLOTGES

Per explicar aquest fenomen torna a ser útil utilitzar un exemple. Imaginem un tren del qual el darrere l'anomenarem C (cua) i el davant D . A més a més, suposem un observador extern respecte el qual el tren es mou cap a D .

Si al segment mitjà del tren, M , hi hagués una bombeta que s'encengués, des de dins el tren veuríem com arriba als dos extrems C i D alhora, simultàniament. No obstant, si analitzem el mateix succés des de l'observador en repòs, ens adonarem que per a ell la llum ha arribat abans a C que a D . És important matissar que aquest fet no és perquè la llum vagi a més velocitat en un sentit que en l'altre, sinó que el que succeeix és que tot i moure's en la mateixa velocitat endavant que endarrere, des de fora veiem com el tren avança i així l'espai que ha de recórrer la llum fins a C és lleugerament més curt.

L'important d'aquest fet és entendre que les dues observacions són iguals de vàlides i correctes per descriure la realitat. Simplement cal matissar des de quin sistema de referència estem descrivint-lo. Per tant, podem afirmar que un esdeveniment pot ser simultani o no depenen des del sistema des del qual l'observem.

Si apliquem aquest concepte de simultaneïtat i posem números en aquest experiment mental podrem arribar al desfasament en la sincronització de rellotges entre diferents sistemes. Normalment, per treballar suposarem que el rellotge situat a C es troba al inici de l'eix de coordenades del sistema en moviment està sincronitzat amb el del sistema en repòs, això serà especialment important pel punt següent.

Recuperant l'exemple anterior, si col·loquem un rellotge a cada punta del tren i fem que aquests s'engeguin just en rebre la llum provinent de la font central, podem afirmar que estaran sincronitzats. Per ser més precisos, sincronitzats respecte el sistema mòbil. Però com ja hem vist, al observar-ho des de fora veurem com la llum arriba abans al rellotge de la cua. Però, quant més tard? Matemàticament ho podem expressar així:

Si t_c és el temps que tarda la llum en arribar a C , la distància que haurà recorregut el tren serà $v \cdot t_c$ i la distància que haurà recorregut la llum serà $c \cdot t_c$. Si la longitud del tren és L , la suma d'aquestes distàncies haurà de ser $L/2$, però com que les observacions les fem des del sistema en repòs aquesta longitud la veiem contraïda en un factor gamma:

$$vt_c + ct_c = \frac{L}{2\gamma}; t_c = \frac{L}{(c + v)2\gamma} \quad (2.25)$$

De manera semblant podem deduir que la distància que recorre la llum per anar fins a D serà la suma de $L/2$ i el tros que hagi avançat el tren:

$$vt_d = \frac{L}{2\gamma} + ct_d; t_d = \frac{L}{(c-v)2\gamma} \quad (2.26)$$

A partir d'aquests dos temps podem treure el desfasament entre els dos rellotges vist des del sistema en repòs fent la resta dels dos:

$$t_d - t_c = \frac{L}{(c-v)2\gamma} - \frac{L}{(c+v)2\gamma} = \left(\frac{1}{c-v} - \frac{1}{c+v} \right) \cdot \frac{L}{2\gamma} = \frac{2v}{c^2-v^2} \cdot \frac{L}{2\gamma} = \frac{vL}{c^2} \gamma \quad (2.27)$$

Aquesta és la diferència entre els temps que observaria un observador en repòs respecte el tren. Cal tenir en compte que el temps que trobarem serà el propi del sistema en repòs i que per expressar-lo en unitats de temps del sistema de referència en moviment (ja que els temps mesurats per part de l'observador en repòs estan dilatats) caldria treure el factor gamma. També cal tenir en compte que encara que la donem en unitats del sistema que es mou, la diferència de temps C i D observada des del sistema mòbil és 0, o sigui, els rellotges són síncrons. I per últim, també cal tenir en compte que L és la longitud del tren presa des del propi tren, o sigui la que mesuraria un observador que es moguéss amb el tren.

El rellotge D va retardat respecte el rellotge C , que comença a contar el temps abans, en la mesura anteriorment demostrada. El fet que el rellotge que va avançat és el que va a darrere es compleix sempre en relativitat sigui quina sigui la direcció del sistema mòbil.

2.4.2 LES TRANSFORMACIONS DE FITZGERALD-LORENTZ

Aquestes transformacions serveixen per relacionar les coordenades d'un succés determinat, mesurades en els sistemes propis de dos observadors diferents. Per convenció direm que O és el sistema en repòs i O' el sistema que es mou respecte O . Però hem de recordar que res diferencia un sistema de l'altre i que les lleis de la física són les mateixes en els dos sistemes. Tot el que fem es podria fer del revés, considerant a O' com a sistema en repòs. L'única asimetria seria la de canviar $+v$ per $-v$ ja que si O' es mou en el sentit positiu de l'eix x respecte O , aleshores O es mou en el sentit negatiu de l'eix de les x respecte O' .

Per a respondre a això, suposem un esdeveniment S que passa en les coordenades $(t', x', 0, 0)$ preses des de O' . La velocitat entre els sistemes de referència l'anomenarem v i serà en el sentit positiu de l'eix x . A més, començarem a contar temps quan O i O' coincideixen, és a dir $x=x'=0$ quan $t=t'=0$, de manera que O' estarà al punt $(t, vt, 0, 0)$ de O . A partir d'aquí hem de deduir quines seran les coordenades del succés S preses des de O .

Per un observador en O' , tots els rellotges del seu sistema estan sincronitzats i si t' és el temps que marca el rellotge de S , en l'origen d' O' el temps que marcarà el rellotge serà el mateix. Però hem de tenir en compte que vist des de O els rellotges de O' i S no estan sincronitzats. Per tant, si l'esdeveniment passa en un temps igual a t' en el rellotge local³ d'aquest, el temps que marcarà el rellotge en O' vist per l'observador del sistema estàtic serà aquest mateix temps més el temps degut a que vist des de O , el rellotge en S va endarrerit.

$$t' + \frac{v \cdot x'}{c^2} \quad (2.28)$$

Ara hem de passar del temps que deduïm que marcaria el sistema O' vist des de O , al temps que mesuraríem en O . Per tal de fer això hem d'afegir el factor de dilatació gamma.

$$t = \gamma \left(t' + \frac{v \cdot x'}{c^2} \right) \quad (2.29)$$

Qualitativament podem entendre aquest canvi tenint en compte el que hem explicat a l'apartat anterior i, per tant, entenent que el rellotge en S va endarrere respecte el que està en O' (tot això vist des del repòs). Per tant, si sabem el temps en S és lògic que per tenir el temps en O' calgui sumar-hi el desfasament i acte seguit, per tenir el temps en O afegir-hi el factor gamma ja que per l'observador en repòs haurà passat més temps (el desfasament i el temps és més gran en unitats de O que expressat en unitats de O').

³ Local fa referència al rellotge directament contigu a l'esdeveniment que analitzem, ja que, com hem vist, el temps mesurat des de O dependrà en part de la posició espacial del succés.

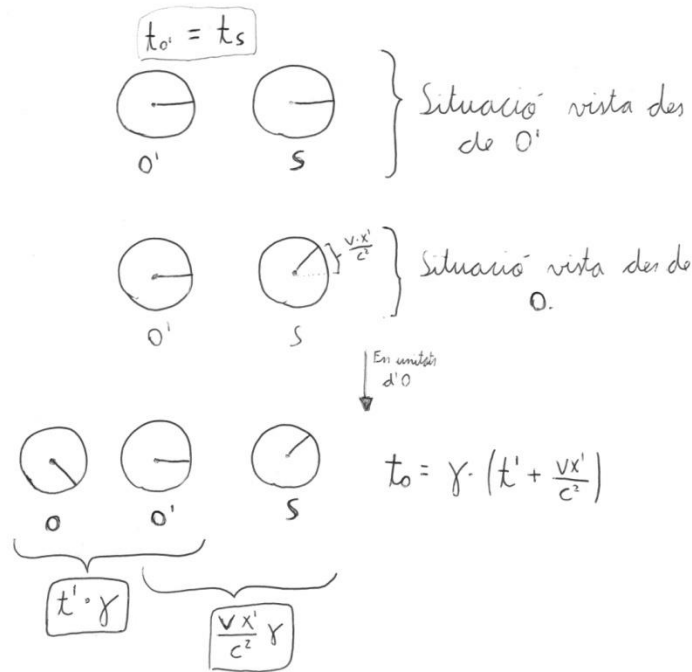


Fig. 5: Esquema de la interpretació de la transformació de Lorentz per al temps.

Ara que ja tenim el temps ens centrarem en l'espai. Com hem fet notar abans, l'origen de O' es troba en la coordenada $x=v \cdot t$ de O . Per saber on es troba S a aquest valor de x li hem d'afegir x' que al ser mesurada en el sistema O' li hem d'afegir un factor de contracció.

$$x = v \cdot t + \frac{x'}{\gamma} \quad (2.30)$$

Com que ens interessa poder relacionar les mesures d'un sistema a un altre, és millor expressar x en funció de x' i també t' . Per això substituïm t per t' i obtenim:

$$x = v \cdot \gamma \left(t' + \frac{v \cdot x'}{c^2} \right) + \frac{x'}{\gamma} = \gamma(x' + v \cdot t') \quad (2.31)$$

A partir d'aquestes expressions podem trobar les que ens relacionen velocitats de cossos respecte dos sistemes dividint l'expressió de l'espai obtinguda pel temps hi s'arriba a les següents transformacions (cal tenir en compte que les coordenades y i z no pateixen transformacions i per això la fórmula de la velocitat en aquestes dues direccions és diferent que la de l'eix x).

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} \cdot v'_x} \quad (2.31)$$

$$v_y = \frac{v'_y}{\gamma \left(1 + \frac{v}{c^2} \cdot v'_x\right)} \quad (2.32)$$

$$v_z = \frac{v'_z}{\gamma \left(1 + \frac{v}{c^2} v'_x\right)} \quad (2.33)$$

Com podem veure, en aquestes relacions entre sistemes de coordenades, la velocitat de la llum es manté constant sigui quina sigui la velocitat v entre els sistemes. Si un cos es mou a la velocitat de la llum respecte O' i apliquem aquestes relacions, veiem que també es mourà a la velocitat de la llum respecte O . Per tant, aquestes transformacions compleixen el segon principi de la relativitat especial segons el qual la velocitat de la llum és un límit infranquejable i el seu valor és constant respecte qualsevol observador, sigui quin sigui l'estat de moviment relatiu entre font lluminosa i aquest.

3. PART PRÀCTICA

La part pràctica d'aquest treball té l'objectiu de realitzar una comprovació empírica de la teoria i també de conèixer algun dels àmbits de recerca en els quals aquesta es té en compte. El capítol està dividit en dues parts principals: l'experiment de la cambra de boira i la relativitat als sincrotrons.

3.1 DETECCIÓ DE MUONS MITJANÇANT UNA CAMBRA DE BOIRA

Els muons són unes partícules amb càrrega negativa i amb molta més massa que els electrons. Es formen a les capes altes de l'atmosfera i el seu temps de vida és tan curt que mai podrien arribar a la superfície terrestre des del punt de vista de la física clàssica. L'objectiu d'aquesta pràctica és la detecció de muons ja que és justament la relativitat especial la teoria que pot explicar la presència d'aquestes partícules a la superfície del nostre planeta.

3.1.1 LA CAMBRA DE BOIRA O DE WILSON

Per tal de detectar muons utilitzarem la cambra de Wilson. Aquesta cambra permet la detecció de partícules carregades. Dins del recipient trobem vapor sobrefredat⁴ que, al tractar-se d'un estat molt fràgil, al passar-hi partícules carregades el condensen de tal manera que es formen gotes líquides que generen traces observables per allà on han passat les partícules. Això és degut a la propietat que tenen les partícules carregades d'ionitzar les molècules de vapor que després actuen com a nuclis de condensació al voltant dels quals creixen les gotes líquides i visibles. D'aquesta manera es formen les traces de boira de diferents formes depenent de la partícula que ha travessat la cambra. Cal tenir en compte la forma però no la llargada, ja que aquesta depèn sobretot de l'angle d'entrada de la partícula a la cambra.

⁴ Estat que es produeix quan una substància es troba per sota de la seva temperatura de condensació, però es manté en estat gasós degut a un refredament lent i gradual. Es tracta d'un estat molt inestable.

Les cambres de boira se solen situar en camps magnètics que desvien la trajectòria de les partícules segons la seva càrrega i la seva energia. En les cambres de boira es poden detectar tot tipus de partícules carregades, però les més comunes són: les partícules beta (electrons), els muons, els protons i les partícules alfa (nuclis d'heli).

3.1.2 CONSTRUCCIÓ DE LA CAMBRA DE BOIRA I EXPERIMENTACIÓ

Per tal de construir la cambra de boira es va utilitzar una caixa de metacrilat, una placa metàl·lica, tires de feltre, isopropanol, un recipient de plàstic, rivets de goma, cinta aïllant, una làmpada i gel sec (CO_2 sòlid).

El primer pas és enganxar els rivets de goma al perímetre de la placa metàl·lica que serà la base del nostre detector. La resta de la superfície metàl·lica es cobreix amb la cinta aïllant de color negre per tal de facilitar l'observació dels rastres (que seran blancs). Tot seguit s'enganxen les tires de feltre a la part superior de la caixa de metacrilat. El següent pas és humitejar el feltre amb alcohol isopropílic (l'utilitzem perquè té una pressió de vapor baixa, no es congela amb facilitat al estar en contacte amb la base metàl·lica i té una baixa energia de ionització) i col·locar la caixa sobre la base prèviament preparada. Per últim es posa tot el conjunt dins d'una palangana de plàstic amb gel sec (s'ha d'aconseguir el mateix dia que es faci la pràctica, ja que sublima 1,5kg cada 24h aproximadament) per tal de refredar la base metàl·lica i es posa una làmpada a la part superior (on hi ha el feltre) per escalfar l'alcohol. Després d'esperar uns quinze minuts, es començarà a formar una capa de vapor a la part inferior de la cambra i en passar-hi les partícules carregades ja deixaran els rastres que podrem analitzar comparant-los amb les formes teòriques que s'exposaran a continuació.



Fig. 6: Fotografia de la cambra de boira

3.1.3 FONAMENTS TEÒRICS DE L'EXPERIMENT

En la cambra de boira podem trobar tot tipus de partícules amb càrrega elèctrica. Les més comunes són les següents:

- **Electrons:** formen rastres molt corbats i plens d'angles aguts degut a que, amb la seva poca massa, els impactes amb nuclis d'àtoms de la boira o de l'aire que hi ha dins la cambra afecten molt a la seva trajectòria.
- **Muons:** tenen molta més massa que els electrons de manera que no es desvien tan i solen fer una trajectòria llarga i estreta
- **Protons:** encara tenen més massa i la seva càrrega és positiva. Per això, si sotmetem la cambra a un camp magnètic, es corbaran en sentit contrari als electrons. El seu rastre és molt recte (en absència de camp magnètic) i més gruixut.
- **Partícules alfa:** Degut a que tenen més càrrega i més massa creen traces més gruixudes i curtes amb forma de balda.
- **Decaïment d'un muó:** veiem un rastre prim i recte que fa un canvi de direcció clar. Després del canvi de direcció la traça es deu a l'electró mentre que les altres partícules resultants (un neutrí i un antineutrí) no interaccionen amb la boira i per tant no poden ser detectats en la nostra cambra.
- **Col·lisió entre un muó i un electró:** Veiem tres línies amb un punt central en comú. Es tracta del xoc d'un muó (que en xocar canvia de direcció) amb un electró. El muó en xocar directament amb un electró l'arrenca de l'àtom i li transfereix suficient energia per a què ionitzi a altres partícules generant una traça, mentre que el muó també segueix generant una estela amb un canvi de direcció degut al xoc.

En l'experiment realitzat es posa èmfasi especialment en trobar traces que demostrin la presència de muons. Els muons són unes partícules elementals (sense estructura interna) de la família dels leptons. Tenen la mateixa càrrega elèctrica que l'electró (1.13) 200 vegades més massa. El seu temps de semivida és de $2,2\mu\text{s}$ ⁵ i es formen de la interacció entre els rajos còsmics i els àtoms de les capes altes de l'atmosfera a uns 9.000m de la superfície terrestre. Per tant, són el que anomenem rajos còsmics secundaris. Tenint en compte el seu temps de vida amb repòs i la distància que han de recórrer veiem que, encara que viatgessin a la velocitat de la llum, és impossible que arribin a la Terra des del punt de vista de Galileu:

⁵ Dada extreta de la pàgina 360 del llibre *Física 2 Batxillerat* de l'editorial Santillana

$$t = \frac{L}{v} = \frac{9000m}{3 \cdot 10^8 m/s} = 0,00003s = 30\mu s \gg 2,2\mu s \quad (3.1)$$

Però si tenim en compte la teoria de la relativitat, veurem com l'espai que han de recórrer els muons es contrau i el seu temps, respecte el nostre, passa més lentament degut a la seva velocitat (aquestes partícules viatgen a $0,9978c$)⁶. Així doncs, els càlculs adequats són els següents:

$$L' = \frac{L}{\gamma} = \sqrt{1 - \frac{(0,9978 \cdot 3 \cdot 10^8)^2}{(3 \cdot 10^8)^2}} \cdot 9000 = 596,7m \quad (3.2)$$

$$t' = \frac{L'}{v} = \frac{596,7}{0,9978 \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,99 \cdot 10^{-6}s \quad (3.3)$$

O també podríem procedir calculant la dilatació del temps:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{9000}{0,9978 \cdot 3 \cdot 10^8} = 3 \cdot 10^{-5} \quad (3.4)$$







$$t' = \frac{t}{\gamma} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,9978 \cdot 3 \cdot 10^8)^2}{(3 \cdot 10^8)^2}} = 1,99 \cdot 10^{-6}s \quad (3.5)$$

Per tant, el fet de detectar muons des de la superfície terrestre és un fet que avala la validesa de la teoria de la relativitat especial.

⁶ Dada extreta de la pàgina 360 del llibre *Física 2 Batxillerat* de l'editorial Santillana

3.1.4 RESULTATS

En la taula que es mostra a continuació es recullen algunes de les traces que es van formar a la caixa i la hipòtesis sobre quina partícula les va generar. Es poden comprovar els vídeos de l'experiment en la carpeta "multimèdia" del CD.

<u>Descripció i hipòtesi de partícula</u>	<u>Rastre</u>
<p>Veiem un rastre curt i ample amb forma de balda, per tant podria tractar-se d'una partícula alfa.</p>	
<p>Aquesta traça és molt més estreta, llarga i recta. Per això podria ser un muó o un protó. Pel fet de ser bastant prima i pel fet que aquesta cambra per configuració sol detectar muons⁷, crec que es tracta d'un muó.</p>	
<p>Aquí veiem una traça recta amb un clar canvi de direcció. Per ser traces bastant rectes podem descartar que sigui un electró amb un impacte per tant el més probable és que sigui un muó que decau en un electró i dos neutrins (que no detectem).</p>	
<p>En aquesta imatge veiem trajectòria en forma d "s". Es tracta d'una traça prima i corbada que podria haver fet un electró.</p>	
<p>Aquesta traça (la horitzontal) és molt recta, llarga, i més gruixuda que les anteriors, per tant, es podria tractar d'un protó. Tanmateix, per la configuració de la cambra, com he comentat abans, podria ser un muó.</p>	
<p>Aquí veiem una trajectòria que es bifurca en dues més en un punt. Per això, es podria tractar de la col·lisió entre un muó i un electró</p>	

⁷ Com expliquen al document "La cámara de niebla" com expliquen Francisco Barradas Solas i Paloma Alameda Meléndez, professors de ciències de Batxillerat de la comunitat autònoma de Madrid.

3.1.5 CONCLUSIONS

A partir de l'experiment, s'han pogut aconseguir un bon grapat d'evidències d'haver detectat muons i, per tant, de tenir una prova ferma a favor de la teoria de la relativitat especial com està argumentat a l'apartat sobre fonaments teòrics. Conseqüentment, els resultats són satisfactoris i s'ha assolit l'objectiu principal d'aquest experiment.

D'altra banda, construir i utilitzar una cambra de boira ha estat una gran experiència ja que abans de fer-ho pensava que era impossible per a mi poder detectar partícules d'una forma més o menys casolana. A més a més, a part dels muons, s'han pogut observar altres partícules i he après molt sobre dues parts clau a l'hora de realitzar experiments científics: la paciència i l'observació. La cambra de bombolles tarda força temps en començar a detectar partícules, es van haver de fer varies proves abans que funcionés i un cop va funcionar també van caldre diferents intents fins aconseguir una bona il·luminació i una bona gravació de la pràctica. A més un cop estàs observant cal molta paciència per a poder veure traces clares i cal observar repetides vegades amb molta atenció per tal de poder distingir partícules, ja que n'has d'haver vist moltes per poder comparar gruixos, longituds i trajectòries.

3.2 LA RELATIVITAT ESPECIAL ALS SINCROTRONS

Un sincrotró és un accelerador de partícules en el qual s'acceleren electrons fins a velocitats properes a les de la llum per tal que després, en corbar la seva trajectòria, aquests emetin llum que és aprofitada per a fer diferents experiments. Els sincrotrons són una de les eines més útils que tenim per investigar sobre les propietats de la matèria.

En els sincrotrons s'acceleren els electrons fins a velocitats a les quals emeten radiació de rajos X i aquesta radiació és la que es fa servir en els experiments que s'hi realitzen. Per tal que els electrons emetin aquesta longitud d'ona, cal que tinguin velocitats molt altes i és en aquest punt on es fan evidents els efectes de la relativitat especial sobre les partícules.

3.2.1 FUNCIONAMENT

Per aconseguir accelerar els electrons fins el punt que emetin llum de la longitud d'ona que es vol s'utilitzen camps magnètics i elèctrics.

En primer lloc, s'acceleren els electrons en un accelerador lineal amb l'ajuda de camps elèctrics oscil·lants que fan coincidir els seus màxims amb el pas dels electrons. Després les partícules passen a l'anell d'acceleració on giren per l'acció de camps magnètics i segueixen rebent energia per a ser accelerats a partir de camps elèctrics de freqüència variable depenent de l'energia que tenen els electrons. En aquesta fase aconseguixen arribar a la velocitat de $0.999999c$.

A continuació, els electrons passen a l'anell d'emmagatzematge on segueixen una trajectòria circular deguda a l'acció uns camps magnètics molt forts i mantenen la seva energia (ja que en van perdent en forma de radiació) gràcies a camps elèctrics. És en punts tangents a aquesta anella a on es realitzen els experiments.

En aquest punt, la rapidesa dels electrons es manté constant (mòdul de la velocitat), però la seva direcció canvia i tota partícula amb càrrega accelerada sota l'acció d'un camp magnètic emet radiació electromagnètica de forma tangencial a la corba que descriu. Aquesta llum passa per una cabina òptica on es selecciona la freqüència concreta a la que es vol treballar utilitzant un monocromador. Aquest, consisteix en un sistema de reflexió que desvia els fotons en angles diferents depenen de la seva longitud d'ona.

A la cabina experimental on es troba la mostra també hi trobem detectors que recullen la llum reflectida, difractada o transmesa depenent del que es vulgui estudiar en cada cas.

3.2.2 FINALITAT

La radiació de sincrotró pot ser utilitzada en molts àmbits diferents per les seves propietats ja que la longitud d'ona d'aquesta és comparable a la mida dels àtoms i això la fa molt útil per a estudiar la matèria amb experiments de difracció, entre d'altres. Les finalitats i els objectius principals dels experiments que s'estan fent actualment al Sincrotró ALBA són els següents:

- **BOREAS:** utilitza raigs X polaritzats per a l'estudi de materials magnètics avançats. S'hi realitzen estudis diversos des de la física fonamental fins a aplicacions tecnològiques com l'emmagatzematge de dades, la nanotecnologia i superconductivitat. Una de les aplicacions de l'experiment és determinar de forma precisa les propietats dels materials magnètics per aconseguir dispositius d'emmagatzematge de dades més compactes, més ràpids i eficients energèticament. Una altra de les seves branques d'estudi és el magnetisme a escala nanomètrica que permet pensar en aplicacions tecnològiques com els motors moleculars.

- **CIRCE:** s'hi realitzen experiments de fotoemissió de dos tipus ja que consta de dues estacions experimentals:

- **Microscòpia electrònica de fotoemissió:** s'analitzen els electrons que perden les mostres quan absorbeixen radiacions que hi incideixen i això en permet saber les propietats. A més a més a més, es fan passar els fotoelectrons per un microscopi per tal d'obtenir un mapa de la superfície de la mostra. Aquesta informació és útil per a fer més eficients els dispositius electrònics d'emmagatzematge d'informació.
- **Espectroscòpia de fotoemissió a pressió ambiental:** també s'analitzen els electrons que perden les mostres, però a diferència d'utilitzar un microscopi, en aquest experiment es varia la polarització de la llum per tal d'estudiar la magnetització i la orientació de les molècules. Aquest experiment serveix per entendre millor els processos catalítics com, per exemple, convertir un gas tòxic en innocu, com es fa en els tubs d'escapament dels cotxes.

- **CLÆSS:** Estudia l'absorció de rajos X en cristalls atòmics. Els àtoms veïns es causen interferències en els espectres d'absorció i a partir d'aquestes interferències o ondulacions podem extreure informació sobre l'estructura del material. Les aplicacions d'aquests estudis són molt àmplies. Poden servir per a estudiar la composició de substàncies contaminants i, per tant, per poder desenvolupar processos de descontaminació del sòl i de l'aigua. També serveix per a dissenyar catalitzadors més eficients per fer els vehicles menys contaminants. Una altra de les seves aplicacions és la conservació d'obres d'art ja que en podem saber la seva composició sense malmetre-les i entendre'n el seu mecanisme de deteriorament, cosa que ens permet deduir el millor mètode per a la seva conservació.

- **MISTRAL:** utilitza microscopis de raigs X per obtenir l'estructura tridimensional de mostres que són massa grans per estudiar-les amb la microscòpia electrònica. Una de les seves utilitats és fer tomografies de cèl·lules infectades per virus. Les tomografies són reconstruccions en 3D fetes a partir de varies imatges en 2D des de diferents angles. Una altra de les seves aplicacions és en l'àmbit de la nanociència, ja que seleccionant la polarització dels rajos X que incideixen en una mostra podem distingir els dominis de magnetització oposada.

- **MSPD:** utilitza la difracció de raigs X en mostres (en forma de pols, cosa que caracteritza aquesta línia d'investigació i que la fa idònia per la caracterització de productes farmacèutics) en diferents condicions de pressió, temperatura i ambients amb concentracions definides de certs gasos per tal de determinar la posició dels àtoms en materials molt diversos. Així es poden estudiar, entre d'altres, els efectes de les altres pressions sobre la matèria. Les seves aplicacions van encaminades sobretot a la identificació de compostos que formen un material i per a desenvolupar nous fàrmacs.

- **NCD:** S'hi utilitza la tècnica de difracció d'angle petit que permet estudiar l'estructura molecular interna de matèria condensada tova, com per exemple proteïnes en dissolució, col·loides i fibres d'interès industrial o biològic. El seu principal objectiu és l'estudi de les fibres musculars ja que se sap que l'actina i la miosina són les proteïnes principals que intervenen en la contracció muscular, però no es comprèn exactament com funcionen aquestes fibres. A partir d'aquesta tècnica de difracció de raigs X podem veure com s'organitzen les molècules i entendre com produeixen força i moviment de forma tan ràpida.

- **XALOC:** es dedica a determinar l'estructura tridimensional de macromolècules (proteïnes, ADN i ARN) mitjançant la cristal·lografia de raigs X. Aquesta tècnica consisteix en fer incidir la radiació de sincrotró a una mostra cristal·litzada (s'aconsegueix amb un flux congelador a -173°C) i analitzant-ne el patró de difracció per a poder disposar d'un model 3D a nivell atòmic de la macromolècula. Les seves aplicacions són múltiples i, sobretot en l'àmbit de la biologia ja que ens permet entendre la vida a nivell atòmic.

3.2.3 EFECTES RELATIVISTES

A baixes energies, en règim no relativista, la freqüència de la llum que emeten els electrons al corbar-se és igual a la seva freqüència de gir a l'anella principal. Però en un sincrotró, els electrons s'acceleren a velocitats molt properes a la de la llum. A aquestes velocitats ens trobem en l'àmbit de la relativitat especial i la freqüència de la radiació augmenta en un factor γ^2 .

Aquest factor és degut principalment a dos efectes de la relativitat:

-Contracció de l'òrbita en el sistema de referència dels electrons respecte el del laboratori degut a la velocitat a la que es mouen de manera que el temps que tarden els electrons a donar una volta a l'anell és inferior al que observem al laboratori en un factor γ (com s'ha demostrat als punts 2.1 i 2.2 del treball).

-Efecte Doopler relativista. La font emissora de llum (l'electró) es mou cap a la mostra de manera que hi ha una contracció en la longitud d'ona que percebem. I com que els electrons són relativistes cal afegir un factor γ per passar del sistema de referència dels electrons al sistema de referència del laboratori (en repòs).

Un altre efecte que percebem als sincrotrons és la relació que estableix la relativitat entre massa i energia. Quan la velocitat d'un cos (en aquest cas, d'un electró) augmenta també ho fa la seva massa. A velocitats petites, en subministrar energia a un cos augmenta pràcticament només la seva velocitat, però en aproximar-se a la velocitat de la llum la major part de l'energia que li subministrem serveix per augmentar la massa del cos. Així mateix com que té més massa costa encara més d'accelerar de manera que l'energia que cal per fer que la velocitat dels electrons sigui el màxim de pròxima a la de la llum és molt elevada.

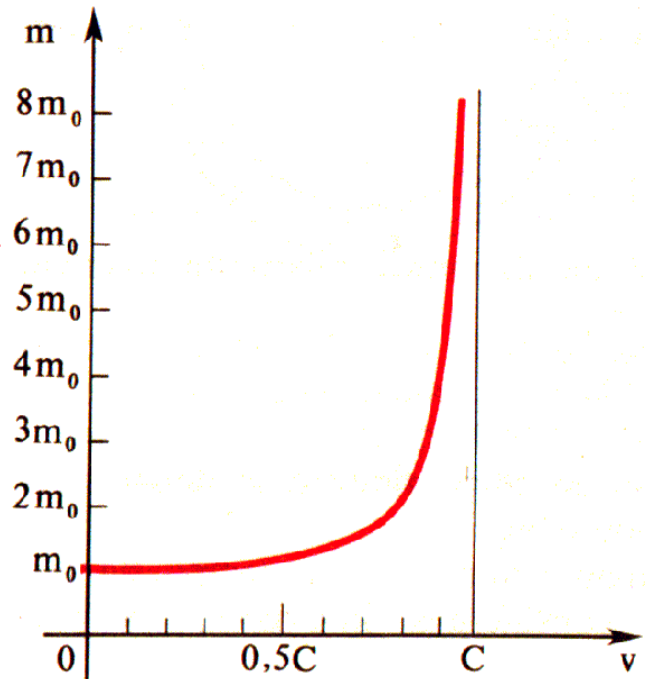


Fig. 7: Gràfica que mostra la relació entre massa relativista i la velocitat a la que es mou el cos

4. CONCLUSIONS

A nivell científic, la relativitat especial és una teoria que va canviar totalment la nostra manera d'entendre tan l'espai com el temps i que, a més a més, va aparèixer en un moment en què s'apostava per un model amb un hipotètic sistema en repòs absolut, mentre que la teoria reforça la idea de la relativitat del moviment que ja va defensar Galileu, on tots els sistemes de referència inercials són equivalent a l'hora de descriure la realitat física.

A part d'aquestes, les implicacions que té la relativitat especial són molt més àmplies. Un exemple està en les seves aportacions en l'electromagnetisme on, gràcies a la generalització del principi de la relativitat, ens permet relacionar com mesuren dos observadors una mateixa força: una càrrega elèctrica en repòs respecte un observador genera un camp elèctric mentre que la mateixa càrrega vista per un observador que la considera en moviment genera un camp elèctric variable en el temps i, per tant, també un camp magnètic. Així, la llei d'Ampere generalitzada i la Llei de Faraday (tercera i quarta llei de Maxwell respectivament) queden estretament relacionades, ja que el fet que un camp elèctric o magnètic siguin variables dependrà del seu moviment relatiu a l'observador que els mesura. Amb aquest exemple ens podem fer una idea de la importància que té entendre bé el moviment per la física.

La relativitat també ens mostra la importància que pot tenir una idea en la física, la importància que té comprendre. I és que el mèrit d'Einstein va ser poder deduir totes les transformacions anteriors a partir de dos postulats fonamentals, que a més de relacionar-los entenen la llei de la propagació de la llum a velocitat constant com a conseqüència de la relativitat (si c no fos constant per a qualsevol sistema de referència inercial podríem afirmar quin dels sistemes es mou), van portar a donar una nova interpretació de conceptes que preníem com a absoluts i invariables.

Al tractar-se d'una teoria que parla de conceptes molt fonamentals és interessant conèixer les interpretacions que se'n fan. Per exemple, el concepte d'èter va ser rebutjat en la física com ja s'ha explicat, però en realitat, Einstein no demostra la inexistència del sistema absolut de referència sinó que demostra que aquest és innecessari i que no es pot detectar. El que ens mostren els postulats és que els càlculs són vàlids suposant com a sistema en repòs qualsevol sistema de referència inercial, de manera que l'hipotètic sistema en repòs absolut no tindria cap utilitat ni posseiria cap peculiaritat que ens

permetés detectar-lo. Això ens porta a la conclusió que no podem saber si existeix o no l'èter, però sí que podem afirmar que la seva existència és supèrflua pel que fa a la realitat física. Es diu, doncs, que allò que no podem detectar, no existeix. Un altre cas on passa quelcom semblant és amb la paradoxa dels bessons, ja que es podria donar que els dos es moguessin a velocitat constant i per tant no tindríem manera de dir quin és el que envelleix menys, ens trobaríem en una paradoxa irresoluble en la qual cada bessó veuria més jove a l'altre. Però si es moguessin a velocitat constant els dos, no hi hauria possibilitats que es tornessin a trobar i, per tant, la física no es pot ocupar de resoldre quin dels dos bessons seria realment més jove, ja que seria físicament impossible que es creuessin de nou.

A nivell més personal, aquest treball m'ha servit per aprendre sobre una de les teories de la física que em cridaven més l'atenció. Tot i que al final no he aconseguit l'objectiu d'abordar-la en plenitud perquè no he entrat en tots els aspectes de la dinàmica, crec que he assolit l'objectiu d'entendre la major part de la relativitat especial.

En la realització del treball he après sobre el context científic de finals del segle XIX en el que neix la teoria. També he après a treballar molt millor amb deduccions matemàtiques a partir d'experiments mentals, ja que gran part del treball es basa en explicar les deduccions que es poden fer a partir dels dos principis dels que parteix Einstein i d'imaginar-se certes situacions amb les conseqüències que hi tindrien el compliment dels dos postulats.

D'altra banda, amb la part pràctica he conegut les influències que té la relativitat especial en els sincrotrons i quines investigacions s'hi duen a terme. També he viscut en primera persona l'aplicació del mètode científic, ja que a partir dels coneixements teòrics he pogut justificar que un fenomen concret demostraria la teoria i, a partir d'un disseny experimental pensat per a això, la he pogut comprovar empíricament.

Per últim, estic satisfet de la realització d'aquest projecte perquè crec que m'ha servit per apropar-me al que, en definitiva, era l'objectiu principal del meu treball: entendre una mica més l'univers en què vivim.

BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- AADD. Física 2 batxillerat. 1a edició. Barcelona. Grup Promotor/Santillana Educación, 2009.
- ASIMOV, Isaac. Cien preguntas básicas sobre la ciencia. 1a edició. Madrid. Alianza editorial, 1977.
- BLANCO, David. Einstein , la teoria de la relatividad. El espacio es una cuestión de tiempo. 1a edició. Rodesa, Villatuerta (Navarra). Editoria RBA, 2012.
- FERNÁNDEZ-VIDAL, Sònia. Esmorzar amb partícules. 1a edició. Barcelona. Rosa dels vents, 2013.
- GREENE, Brian. El universo elegante. 1a edició. Barcelona. Crítica, 2012
- EINSTEIN, Albert. Sobre la teoría de la relatividad especial y general. 3a edició. Madrid. Alianza editorial, 2012.
- Fernández, Enrique. *Notas sobre Relatividad Especial* [document PDF]
- Pont, Montse. *Efectes relativistes en acceleradors de partícules* [document PDF]

WEBGRAFIA

- Miquel Calvet. *Caçadors de partícules*[document PDF]
http://srvcnpbs.xtec.cat/cdec/images/stories/SPFQ/Curs_2012-13/Sessio_2/Cacadors_particules.pdf [Consulta 14/07/15]
- Francisco Barradas Solas i Paloma Alameda Meléndez. *La cámara de niebla. Manual de uso y construcción y cómic divulgativo* [document PDF]
http://palmera.pntic.mec.es/~fbarrada/cloud_chamber_spanish.pdf [Consulta 15/07/15]
- *Honors Project 13: A Simple Proof That $E = mc^2$* [document PDF]
<http://www.math.iupui.edu/~jwatt/16500/honors/HP13.pdf> [Consulta 8/09/15]
- *Equivalència entre massa i energia* [pàgina web]
http://es.wikipedia.org/wiki/Equivalencia_entre_masa_y_energ%C3%ADa
[Consulta 17/05/15]

- *Paradigmes de la ciència* [pàgina web]
<http://cuentos-cuanticos.com/2013/07/21/los-paradigmas-y-las-revoluciones-cientificas-hoy-va-de-kuhn/> [Consulta 24/06/15]
- *Sistema de referència inercial* [pàgina web]
[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema de referencia inercial](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_referencia_inercial) [Consulta 24/06/2015]
- *Relatividad especial* [pàgina web]
[https://es.wikiversity.org/wiki/Relatividad Especial](https://es.wikiversity.org/wiki/Relatividad_Especial) [Consulta 16/07/15]
- *Experimento de Michelson-Morley* [pàgina web] http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3240/html/21_experimento_de_michelsonmorley.html [Consulta 16/07/15]
- *El experimento Michelson-Morley* [pàgina web] http://www.maslibertad.com/El-experimento-Michelson-Morley_p697.html [Consulta 16/07/15]
- *Monografías* [pàgina web] <http://www.monografias.com/trabajos47/teologia-relatividad/teologia-relatividad2.shtml> [Consulta 20/07/15]
- *Algunos conceptos de dinámica* [pàgina web]
http://www.unedcervera.com/c3900038/estrategias/teoria/teo_dinamica.html [Consulta 24/08/2015]
- *Magnetismo* [pàgina web]
<http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/magnet/campomagn.html> [Consulta 30/08/15]
- *Electrostática* [pàgina web]
http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/electro/fuerza_electr.html [Consulta 30/08/15]
- *Éter* [pàgina web] [https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%89ter_\(f%C3%ADsica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%89ter_(f%C3%ADsica)) [Consulta 31/08/15]
- *Relatividad sin fórmulas – Aumento de masa* [pàgina web]
<http://eltamiz.com/2007/05/28/relatividad-sin-formulas-aumento-de-masa/> [Consulta 6/09/15]
- *Pòsters divulgació* [pàgina web]
<https://www.cells.es/ca/divulgacio/educacio/posters> [Consulta 13/10/15]

- *Dinámica relativista* [pàgina web]
<https://www.algosome.com.br/fisica/dinamica-relativista.html> [Consulta 17/10/15]
- *Experimento de Michelson y Morley – segunda parte* [vídeo]
<https://www.youtube.com/watch?v=6-2HcBtlM-U> [Consulta 16/07/15]
- *39 El universo mecánico. Las ecuaciones de Maxwell* [vídeo]
<https://www.youtube.com/watch?v=xFyZrq8XIhA> [Consulta 30/08/15]

Annex 1:

Entrevista a un investigador del sincrotró Alba

Introducció

Per tal de completar la part pràctica del treball vaig visitar el sincrotró Alba on, degut a les velocitats a les que viatgen els electrons amb els quals treballen, es fa molt palesa la teoria de la relativitat especial. Així vaig poder obtenir informació de primera mà sobre la relativitat, que és pròpiament el tema del treball, i sobretot pel que fa al funcionament d'aquests acceleradors de partícules que ocupen bona part de la secció pràctica del treball.

Aquesta entrevista té l'objectiu d'entendre millor el funcionament d'un sincrotró, saber com hi afecta la relativitat, quines feines fa un investigador en un centre com aquest i també conèixer una mica l'experiència personal de treballar-hi i saber com s'arriba a poder accedir en un centre d'investigació com aquest.

L'entrevistat és Michele Carlà, estudiant de doctorat Italià que porta dos anys al sincrotró investigant en l'àrea dels acceleradors. L'entrevista es va realitzar en castellà i a continuació es presenta la transcripció traduïda de la mateixa.

Entrevista

Al: Quina és la teva feina aquí al sincrotró Alba?

Michele: Jo estic treballant amb el grup de dinàmica amb el qual duem a terme el desenvolupament de la màquina: optimització, millorar el seu rendiment... Més en específic, jo estic desenvolupant un sistema per a mesurar l'òptica dels acceleradors per aconseguir veure és la més adequada o calen correccions.

Ga: L'òptica de la màquina en què consisteix exactament? Cal que el feix sigui el més estret possible?

Mi: L'òptica de la màquina al final són imans per enfocar el feix. Però no sempre es tracta d'aconseguir que el feix sigui el més estret possible, depèn. Hi ha llocs on vols això i altres en els quals vols que sigui bastant gran. En el punt on vols emetre raigs X vols que el feix sigui el més petit possible perquè en aquest cas es pot enfocar millor per fer les mesures, però per exemple, allà on fem injecció dels electrons a l'anella volem que el feix sigui el més gran possible perquè així són més fàcils d'injectar. Aleshores s'ha de fer una mica de gimnàstica d'òptica per adaptar-se.

Ga: Però tu treballes en un ordinador o també has d'anar a la màquina?

Mi: Les dues coses però al final amb les mans fas poques coses... Aquest és el problema d'una màquina tan gran. Al final hi ha gent que està especialitzada en ajustar i fer el treball manual i gent que s'especialitza en el treball més teòric. M'agradaria treballar una mica més amb les mans. Fem mesures, però per nosaltres prendre mesures el que significa és anar a la sala de control i assentar-nos a davant d'un altre ordinador i fer més o menys el mateix que fem al despatx, però l'ordinador està connectat amb la màquina.

Ga: Perquè les màquines aquestes, quina empresa les munta? Això no ho pot reparar qualsevol.

Mi: Aquí mateix tenim taller amb gent especialitzada per fer-ho. Però per exemple, si jo necessito que un iman sigui modificat, no ho faig jo.

Ga: Però hi ha una empresa externa per reparacions o ho arreglen aquí mateix?

Mi: Aquí mateix també tenim cooperacions amb altres laboratoris. Al final no hi ha gaires empreses que es dediquin a això perquè és molt específic. Per imans, per exemple, hi ha una empresa que en fa i prou.

Al: I treballes sol en el teu projecte o és un grup de treball?

Mi: És un grup. No som molts en el grup que treballo jo, som jo i dos més. Ells també estan fent una tesi de doctorat.

Al: Tu estàs treballant en l'anell en el qual les partícules emeten llum. Com es mantenen els electrons amb energia suficient?

Mi: Exacte, en l'anella exterior no accelerem més els electrons, només hem de mantenir la seva energia. El que necessitem fer és accelerar-los una mica, això sí, perquè cada volta perden energia perquè emeten radiació.

Al: En quins àmbits es fa investigació aquí?

Mi: És bastant difícil perquè jo treballo en la màquina, no en les investigacions. Actualment hi ha set línies de llum que investiguen de diferents maneres, però en específic no ho conec. Hi ha línies que treballen amb el magnetisme, altres en cristal·lografia...

Al: Necessites coneixements sobre la teoria de la relativitat per a treballar aquí?

Mi: Al final sí, ja que tot el mecanisme d'emissió de raigs X dels electrons és degut a la relativitat, per tant una mica sí. Però molt treball al final és de física clàssica, és difícil que calgui fer càlculs dins la teoria de la relativitat.

Però al final tot el mecanisme dels electrons dins la màquina està governat per la relativitat ja que tenen una energia molt alta.

Al: Et volia demanar també per la mida de la màquina. Per què aquesta mida? Podria ser més gran per tal que els electrons tinguessin més energia o ja són suficients els 270 metres?

Mi: La mida depèn del que vulguis fer. Hi ha acceleradors, com l'LHC de Suïssa, que són molt més grans. En aquest cas és perquè volen accelerar partícules amb energia molt alta. Però aquí, al final necessitem només produir electrons amb 3GeV, que no és una energia massa gran al final. Fins i tot es podria fer l'accelerador més petit per a fer

aquesta energia. Però el problema és que pel mateix, es necessita una mica d'espai per posar imans, produir raigs X, per a posar el número més gran possible de línies de llum. Per exemple, el més gran d'Europa és l'ESRF, a Grenoble, que és un accelerador com aquest però d'una mica menys d'un quilòmetre, uns vuit-cents quaranta metres. I més o menys els sincrotrons com aquest per fer raigs X fan el mateix. Però al ser més gran té unes quaranta línies de llum mentre que aquest d'aquí ara en té set, però se'n poden posar moltes més fins a trenta-dues. D'altra banda, al final, la física que es pot fer amb la màquina és més o menys la mateixa.

Al: Aquí us baseu en l'emissió de llum per part dels electrons que giren. Em podries explicar una mica com funciona aquest fenomen?

Mi: És com... Saps més o menys com funciona una antena? És un conductor on hi ha càrregues elèctriques que es mouen i una càrrega elèctrica produeix un camp elèctric i si es mou crea un camp elèctric que canvia en el temps i això pot produir una ona electromagnètica. Aquí no tenim una antena, però al final és més o menys el mateix perquè hi ha electrons que es mouen en el buit i per la interacció amb el camp magnètic produït pels imans estan en òrbita i llavors oscil·len com els electrons en una antena però en comptes de produir una altra radiació electromagnètica aquí es produeixen rajos X. El fet pel qual aquí es produeixen rajos X i una antena emet radiofreqüència és per la relativitat perquè els electrons no es mouen ben bé com en una antena sinó que aquí tenen una velocitat molt gran. Llavors, es mira la radiació dels electrons i hi ha un efecte Doppler en la radiació produïda perquè es mouen molt ràpidament respecte nosaltres i la longitud d'ona es contrau.

Al: Per tant, les partícules no emetrien llum si no fos perquè estan en un camp magnètic, no?

Mi: Sí, cada partícula que té carrega, si és accelerada pot produir una radiació electromagnètica. Després, si aquesta radiació és radiofreqüència, si és llum, si són raigs X, depèn de la freqüència d'oscil·lació i de la velocitat de l'observador que mira la partícula. La velocitat relativa entre la partícula i l'observador. En aquest cas, l'observador està quiet i la partícula es mou. Per tant és el mateix que si jo miro una antena que produirà una radiació electromagnètica i jo em moc, tinc velocitat molt alta, i aquesta radiació electromagnètica és una radiofreqüència pot esdevenir un raig X vist per mi.

Al: A nivell més personal. Com vas decidir dedicar-te al camp dels acceleradors?

Mi: Al final jo a Itàlia vaig estudiar física de partícules però jo sempre he sentit curiositat d'estudiar la física dels acceleradors però a Florència, on vaig estudiar, no n'hi havia. La física dels acceleradors m'agrada perquè hi ha moltes coses diferents: hi ha una mica de relativitat, electromagnetisme, una mica de mecànica quàntica, molta física clàssica, òptica... Per això vaig anar a Suïssa a fer el màster. I ara també estem cooperant amb un projecte de l'LHC.

Al: Però a l'LHC la màquina és bastant diferent no?

Mi: Al final, la màquina està construïda per fer física diferent, però la física de l'accelerador és la mateixa. Per tant, el projecte que estic fent ara per millorar la òptica es podria aplicar també a l'LHC. En definitiva només els números són diferents, perquè les partícules tenen més energia, però els principis i el codi són el mateix.

Al: Com vas conèixer el sincrotró i com vas arribar a treballar aquí des de Itàlia?

Mi: Jo vaig estudiar a Itàlia i vaig fer la tesi de màster a Suïssa. Al final, a Europa no hi ha molts centres com aquest. Hi ha aquest d'Espanya, el de Trieste, el de Suïssa... No n'hi ha gaires. Llavors és bastant fàcil perquè si vols treballar en el camp dels acceleradors ja saps on has de mirar.