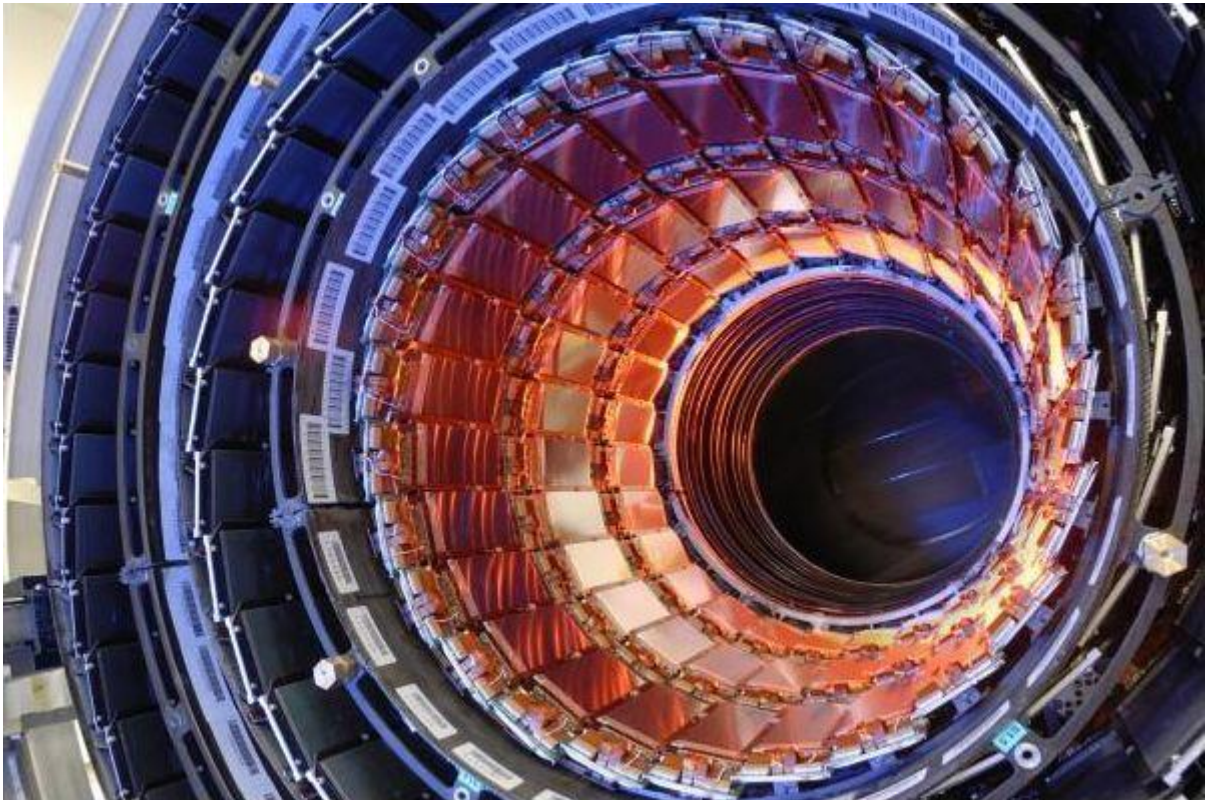


ACCELERADOR DE PARTÍCULES

És possible demostrar el funcionament d'un accelerador de partícules amb els coneixements de batxillerat?



- **Sinopsi:** Els acceleradors de partícules són una eina d'observació que, com el propi nom indica, acceleren partícules a altes velocitats i les fan col·lisionar amb una altra partícula per tal d'estudiar el resultat del xoc o bé, amb la llum que produeixen els electrons a altes velocitats, estudiar l'estructura d'altres materials. La principal finalitat dels acceleradors és l'estudiar coses impossibles de veure en microscopis convencionals. Els acceleradors de partícules no són aparells exclusius de laboratoris sofisticats, sinó que també es troben molt presents en la vida quotidiana de les persones, en forma d'acceleradors de baixa energia, exemples molt senzills d'aquests acceleradors, d'electrons principalment, són els televisors o monitors d'ordinador o els aparells de raigs X, que poden trobar-se en les clíniques dentals o als hospitals.
- **Sinopsis:** Los aceleradores de partículas son una herramienta de observación que, como el propio nombre indica, aceleran partículas a altas velocidades y las hacen colisionar con otra partícula para estudiar el resultado del choque o bien, con la luz que producen los electrones a altas velocidades, estudiar la estructura de otros materiales. La principal finalidad de los aceleradores es estudiar cosas imposibles de ver en microscopios convencionales. Los aceleradores de partículas no son aparatos exclusivos de laboratorios sofisticados, sino que también se encuentran muy presentes en la vida cotidiana de las personas, en forma de aceleradores de baja energía, ejemplos muy sencillos de estos aceleradores, de electrones principalmente, son los televisores o monitores de ordenador o los aparatos de rayos X, que pueden encontrarse en las clínicas dentales o en los hospitales.
- **Synopsis:** Particle accelerators are an observation tool that, as the name itself indicates, accelerate particles at high speeds and make them collide with another particle to study the result of the collision or with the light produced by the electrons at high speeds, study the structure of other materials. The main purpose of accelerators is to study things impossible to see in conventional microscopes. Particle accelerators are not exclusive devices of sophisticated laboratories, they are also very present in the daily life of people, in the form of low energy accelerators, very simple examples of these accelerators, electrons mainly, are televisions or Computer monitors or x-ray machines, which can be found in dental clinics or hospitals.

ÍNDIX

	Pàg.
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1.Motivació	1
1.2.Objectius	2
1.3.Metodologia	2
1.4.Estructura del treball	2
2. ACCELERADOR DE PARTÍCULES	3
2.1.Tipus d'acceleradors de partícules	3
2.1.1. Acceleradors lineals	3
2.1.2. Acceleradors circulars	3
2.1.3. Ciclotró	4
2.1.4. Sincrotró	5
3. SINCROTRÓ ALBA	6
3.1.Visió	7
3.2.Missió	7
3.3.Línies de llum	7
3.4.Investigacions dutes a terme	8
3.5.Entrevista	10
4. APLICACIONS EN LES DIFERENTS CIÈNCIES	11
5. FORMULES I LLEIS APLICABLES	11
6. ESTUDIS EN DESENVOLUPAMENT	14
7. CURIOSITATS RELACIONADES AMB ELS ACCELERADORS	15
8. CONCLUSIONS	16
9. FONTS UTILITZADES	17

1. INTRODUCCIÓ

El tema abordat dins d'aquest treball de recerca es centra en els acceleradors de partícules, més específicament en el seu aspecte metodològic. El que es busca a l'hora d'estudiar el seu funcionament és descobrir la possibilitat de la seva comprensió completa des del punt de vista d'un estudiant de batxillerat, sense el coneixement de teoremes o lleis més avançades a les que s'estudien a 1r i 2n de Batxillerat.

1.1. Motivació

El motiu pel qual vaig escollir estudiar a fons un accelerador de partícules és perquè he escoltat a parlar d'aquesta infraestructura moltes vegades en series de televisió o pel·lícules, però mai havia profunditzat més del que aquestes em mostraven, a més, recentment vaig tenir la oportunitat d'anar a una conferència realitzada a l'UPC de Vilanova i la Geltrú sobre el sincrotró ALBA.



(IMATGE 1): S.T.A.R. LABORATORIES: ES TRACTA DE L'ACCELERADOR DE PARTÍCULES DE LA SÈRIE DE CIÈNCIA FICCIÓ *THE FLASH*, LA SÈRIE QUE EM VA INSPIRAR A REALITZAR AQUEST TREBALL

Degut a això he decidit estudiar més a fons com funciona per satisfer la meua curiositat i perquè em sembla un gran invent que proporciona moltes facilitats a l'hora d'observar coses que els nostres ulls, i de vegades ni tan sols microscopis, no veuen i que si s'estudia detingudament pot arribar a ser més que una eina d'observació.

Per arribar a la hipòtesis proposada vaig escollir entre moltes opcions que havia pensat, però la que més s'adequava al batxillerat científic era aquesta. Una de les altres propostes que vaig pensar va ser la possible transformació d'un accelerador de partícules en una font de energia, com si fos una central nuclear. Però al final no la vaig escollir perquè vaig considerar que probablement no arribaria a assolir la finalitat, a més que necessitaria tenir en compte molts aspectes i coneixements sobre la transformació d'energia, de circuits elèctrics, etc, aspectes que no es treballen tant en el batxillerat científic.

1.2. Objectius

- Conèixer que és un accelerador de partícules, com funciona i per a què s'utilitza.
- Poder establir una resposta directa a la hipòtesis proposada.
- Obtenir coneixements nous sobre teoremes importants sobre la física.
- Descobrir aplicacions útils de l'accelerador de partícules per a la nostra vida i per a l'avanç en l'estudi de la física.

1.3. Metodologia

- Recerca rigorosa d'informació d'interès pel treball a pàgines webs, llibres de text, enciclopèdies, etc.
- Consulta en llibres de text de 2n de Batxillerat en busca d'apartats relacionats amb l'accelerador de partícules.
- Visita guiada al Sincrotró ALBA per recollir informació sobre els seus descobriments, les investigacions en les què participen i de quina manera utilitzen l'accelerador de partícules.
- Entrevista a una persona que treballa al Sincrotró ALBA.
- Comparar els teoremes que estan al meu abast i el que es necessita per explicar plenament com funciona un accelerador de partícules

1.4. Estructura del treball

En el procés del treball començaré explicant en que consisteix un accelerador de partícules, una descripció general del que són. Després esmentaré els diferents tipus d'acceleradors, la seva estructura, com funcionen i per què s'utilitzen. A continuació faré un estudi més precís del sincrotró ALBA on exposaré, les diferents parts, investigacions i la finalitat. Més endavant explicaré el procés que segueixen els electrons des del principi del sincrotró fins que arriben a l'anell d'emmagatzematge, demostrant com funciona cada procés amb càlculs. Per últim explicaré alguns aspectes que tenen relació amb els acceleradors de partícules que poden semblar interessants. Per acabar donaré una conclusió en base a els resultats obtinguts respecte la hipòtesis proposada.

2. ACCELERADOR DE PARTÍCULES

Un accelerador de partícules és un dispositiu que utilitza camps electromagnètics per accelerar partícules carregades a altes velocitats, i així, col·lisionar-les amb unes altres partícules. D'aquesta manera, es generen multitud de noves partícules que, en general, són molt inestables i duren menys d'un segon. Això permet estudiar més a fons les partícules que han estat col·lisionades per mitjà de les que s'han generat.

2.1. Tipus d'acceleradors de partícules

No tots els acceleradors de partícules tenen la finalitat de col·lisionar dues partícules, hi ha alguns que utilitzen l'energia (en forma de llum) que produeixen les partícules per estudiar qualsevol tipus de material. A continuació explico els principals tipus d'acceleradors de partícules:

2.1.1. Acceleradors lineals

Són un tipus d'acceleradors de partícules que utilitzen un conjunt de plaques o tubs situats en línia als quals se'ls aplica un camp elèctric altern. Quan les partícules s'aproximen a una placa, s'acceleren cap a ella en aplicar una polaritat oposada a la seva. Just quan la traspassen la polaritat s'inverteix, de manera que en aquest moment la placa repel·leix la partícula, accelerant-la cap a la següent placa. Generalment no s'accelera una sola partícula, sinó un continu de feixos de partícules, de manera que s'aplica a cada placa un potencial altern acuradament controlat de manera que es repeteixi de forma contínua el procés per a cada feix.



(IMATGE 2): ACCELERADOR DE PARTÍCULES LINEAL

2.1.2. Acceleradors circulars

Aquests tipus d'acceleradors posseeixen un avantatge afegit als acceleradors lineals en usar camps magnètics en combinació amb els elèctrics, i pot aconseguir acceleracions majors en espais més reduïts. A més les partícules poden romandre emmagatzemades en determinades configuracions teòricament de forma indefinida.

No obstant això, posseeixen un límit a l'energia que pot aconseguir-se a causa de la radiació sincrotró que emeten les partícules carregades en ser accelerades.

L'emissió d'aquesta radiació suposa una pèrdua d'energia, que és més gran com més gran és l'acceleració



(IMATGE 3): LHC (LARGE HADRON COLLIDER), UN ACCELERADOR DE PARTÍCULES CIRCULAR PROPIETAT DEL CERN, SITUAT AL NORD-OEST DE LA CIUTAT DE GINEBRA.

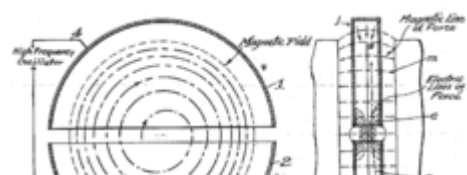
impartida a la partícula. En obligar la partícula a descriure una trajectòria circular realment el que es fa és accelerar la partícula, ja que la velocitat canvia el sentit, i d'aquesta manera és inevitable que perdi energia fins a igualar la que se li subministra, aconseguint una velocitat màxima.

Alguns acceleradors posseeixen instal·lacions especials que aprofiten aquesta radiació, anomenada llum sincrotró. Aquesta radiació s'utilitza com a fonts de raigs X d'alta energia, principalment en estudis de materials o de proteïnes per espectroscòpia de raigs X o per absorció de raigs X per l'estructura fina.

2.1.3. Ciclotró

El ciclotró s'utilitza per accelerar partícules carregades fins a altes energies cinètiques. Aquestes partícules d'alta energia cinètica es fan servir per bombardejar nuclis atòmics i produir reaccions nuclears que s'utilitzen per obtenir informació sobre els nuclis.

El ciclotró està format per dues peces de forma semicilíndrica, conductores i buides, lleugerament separades, i que estan sotmeses a un camp magnètic uniforme intens generat per un electroimant. Aquestes cavitats són també anomenades D per la seva forma. Al

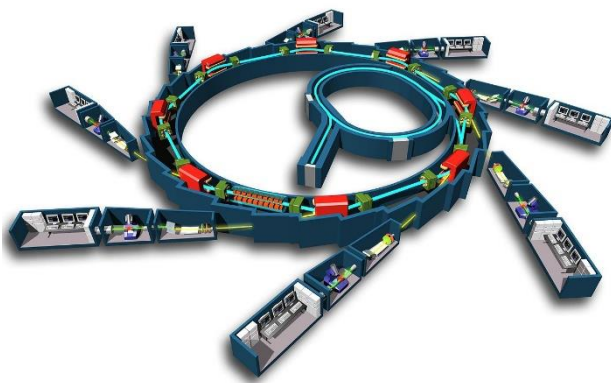


(IMATGE 4): PLA DE LA PATENT ORIGINAL D'UN CICLOTRÓ DE 1934

centre d'aquest aparell es situa una font de partícules que surten amb una velocitat determinada. Aquestes partícules es dirigeixen a una de les D i mitjançant un camp magnètic fa que descriu una trajectòria semicircular. Quan arriba la partícula al extrem de la D, pel costat on ha entrat, s'inverteix el camp elèctric per incrementar la velocitat de la partícula. Després es dirigeix cap a l'altre costat i torna a girar descrivint una trajectòria semicircular, però aquesta vegada amb un radi més gran degut a l'augment de la velocitat. Així es va repetint el procés fins que s'arriba al límit, que és el propi ciclotró.

2.1.4. Sincrotrons

Un sincrotró és un complex d'acceleradors d'electrons amb l'objectiu de produir llum, cobrint un ampli ventall de l'espectre electromagnètic. Aquesta llum emesa és el que anomenem llum de sincrotró.



(IMATGE 5): SINCROTRÓ

El feix d'electrons circula a través dels acceleradors del sincrotró utilitzant camps magnètics i elèctrics i és controlat amb precisió en tot moment.

L'anell propulsor i l'anell d'emmagatzematge tenen electroimants que serveixen per guiar i enfocar els feixos d'electrons. Finalment, els electrons són

desviats de la seva trajectòria mitjançant camps magnètics per fer llum de sincrotró.

A Catalunya es troba un d'aquests tipus d'acceleradors, el sincrotró ALBA. Degut a la seva proximitat enfocaré part del treball a explicar el seu funcionament demostrant-ho amb càlculs realitzats en base a les seves característiques.

3. SINCROTRÓ ALBA

El sincrotró de llum ALBA és una infraestructura científica de tercera generació situada a Cerdanyola del Vallès (Barcelona) i és la més important de la zona del Mediterrani.

Es tracta d'un complex



d'acceleradors (IMATGE 6): SINCROTRÓ ALBA

d'electrons per

produir llum de sincrotró, la qual permet visualitzar l'estructura atòmica dels materials i estudiar les seves propietats.

L'energia del feix d'electrons que es genera a l'ALBA és de 3 GeV i s'aconsegueix mitjançant la combinació d'un accelerador lineal (LINAC) i un propulsor de baixa emitància i màxima potència col·locat al mateix túnel que l'anell d'emmagatzematge. El Sincrotró ALBA té un perímetre de 270 metres i 17 trams rectes disponibles per a la instal·lació de dispositius d'inserció.

Actualment, l'ALBA disposa de set línies de llum operatives de la fase I, que comprenen tant els raigs X tous com els raigs X durs, i que es destinen principalment a les biociències, la matèria condensada (nanociència i propietats magnètiques i electròniques) i la ciència dels materials. Es troben en construcció dues línies de llum més de la fase II (micro-espectroscòpia infraroja i fotoemissió de baixa energia i alta resolució angular per a materials complexos), una de les línies de llum de la fase II recentment s'ha inaugurat, la línia de llum MIRAS, destinada a la micro-espectroscòpia d'infraroig.

Aquesta gran infraestructura científica genera 5.000 hores de llum anualment i està disponible per oferir servei a més de 1.000 investigadors de la comunitat acadèmica i del sector industrial cada any. Des de 2012 allotja usuaris oficials procedents d'institucions de l'Estat espanyol (75%) i també d'altres països (25%).

3.1. Visió

Ser un centre d'excel·lència en llum de sincrotró per a aplicacions científiques i industrials a Europa i aconseguir el reconeixement internacional com a gran infraestructura científica.

3.2. Missió

Investigar, aplicar i mantenir les metodologies i tècniques per dur a terme projectes d'R+D basats en llum de sincrotró, aportant coneixement i valor a les comunitats científica i industrial, principalment a l'Estat espanyol, amb l'objectiu final de contribuir a la millora del benestar i el progrés de la societat.

3.3. Línies de llum

Actualment, ALBA té 8 línies de llum en funcionament destinades a disciplines com les biociències, la nanociència, la ciència de materials, etc.

Línia de llum	Ús de la línia de llum	Camp d'activitat	Tipus d'imant
MSPD	Ciències dels materials i difracció de pols	Ciències dels materials	“Wiggler” superconductor
MISTRAL	Raigs X tous i línia de llum microscòpica	Ciències de la vida, ciències dels materials	Imant de desviació
NCD	Difracció no cristal·lina	Ciències de la vida, ciències dels materials	Onduladors al buit
XALOC	Cristal·lografia macromolecular	Ciències de la vida	Onduladors al buit
CL/ESS	Raigs X i espectroscòpia d'absorció	Ciències dels materials	“Wiggler”

CIRCE	Espectroscòpia i microscòpia de fotoelectrons	Estructura electrònica de les superfícies	Ondulador helicoïdal (Apple II type)
BOREAS	Raigs X tous i dicroisme circular magnètic	Propietats electròniques i magnètiques dels materials	Ondulador helicoïdal (Apple II type)
MIRAS	Micro-espectroscòpia infraroja	Ciències de la vida, ciències dels materials	–

3.4. Investigacions dutes a terme

Dins del Síncrotró ALBA s'han realitzat diversos experiments. A continuació explico algunes de les investigacions que m'han semblat més interessants:

- [Viabilitat de bateries recarregables de calci demostrat](#)

El calci, un element més abundant i barat que el liti, pot actuar com un elèctrode negatiu a les bateries recarregables. Això a quedat demostrat en l'estudi elaborat pels investigadors del Consell Superior d'Investigacions científiques (CSIC) a l'institut de ciència de materials de Barcelona (ICMAB) amb la col·laboració de Toyota Motor Europe (TME), i amb el suport dels resultats obtinguts al síncrotró ALBA.

- [Científics del CSIC i el síncrotró ALBA han aconseguit crear nanoestructures ultrafines i d'alta qualitat de ferrita de cobalt](#)

El material s'utilitza en els lectors d'informació de l'ordinador i el seu potencial és enorme en macroelectrònica i espintrònica.

La espintrònica és el camí per seguir desenvolupant els telèfons mòbils, ordinadors i tot tipus de component electrònic. L'objectiu és utilitzar cada com menys energia i tenir major velocitat.

S'ha aconseguit a l'utilitzar el microscopi d'electrons de baixa energia y de fotoelectrons del síncrotró ALBA, depositant els àtoms de cobalt i ferro sobre el substrat a alta temperatura a la vegada que s'exposava al oxigen. Les nanoestructures resultants consisteixen en cristalls bidimensionals ultrafins de fins a 10 micròmetres d'amplada i entre 1 i 10 nanòmetres de gruixut. Els resultats aconseguits pels científics del CSIC i el síncrotró ALBA podran traduir-

se en múltiples aplicacions per crear sistemes avançats de computació en espintrònica ja que la ferrita de cobalt s'utilitza principalment en la fabricació de vàlvules d'espí, un component clau en els lectors d'informació als ordinadors.

Actualment s'està investigant com utilitzar el moviment de les parets dels dominis magnètics per emmagatzemar informació però l'avanç aconseguit pot suposar anar més enllà. La ferrita de cobalt pertany a una família de materials amb propietats molt prometedores i el mètode utilitzat pels investigadors pot ser aplicable a una ampla varietat de materials que poden servir com a base per construir sistemes nanoelectrònics (que gasten menys energia per escriure i guardar informació, per tant, les seves bateries duren més).

També alguns dels descobriments que es realitzen allà són per millorar les instal·lacions del propi sincrotró:

- [Un detector de radiació que mesura la intensitat de la llum](#)

Un equip d'investigadors i enginyers del Sincrotró ALBA han desenvolupat, conjuntament amb l'empresa Alibava System i membres de l'Institut de Microelectrònica de Barcelona, un detector



(IMATGE 7): APARELL DETECTOR DE RADIACIÓ

de radiació que permet mesurar de manera precisa la intensitat del feix de llum del sincrotró quan s'està realitzant un experiment. Encara necessari, el seu funcionament no és senzill, es basa en fotodíodes transmissors molt més fins de l'habitual, 10 micres en comparació als 300 habituals. Absorbint una part molt petita d'intensitat, permeten detectar i caracteritzar

els raigs X. Això permet que es pugui diagnosticar la intensitat del feix durant l'experiment, el qual redunda en la validesa de les dades obtingudes, ja que, com consisteix en un diagnòstic continu del llamp, és possible detectar qualsevol anomalia d'intensitat de forma instantània.

- [Un sistema per corbar miralls de raig X](#)

La empresa d'enginyeria Sener i el sincrotró ALBA comercialitzaran un sistema per corbar miralls de raigs X, una solució tecnològica que s'ha desenvolupat a l'ALBA. L'Avantatge d'aquesta innovació ve de la mà de noves funcions que no incorporen altres tecnologies del

mercat, doncs pot reduir els errors de deformació dels miralls, de forma estable i controlada, amb valors que superen fins a 10 vegades les tecnologies existents.

3.5. Entrevista

Ja que tinc el sincrotró ALBA relativament a prop, vaig decidir fer una entrevista a alguna persona d'allà. Em van concertar una entrevista amb Pol Solans, a part de l'entrevista també em va explicar bastant bé com funciona tot l'ALBA, cosa que em va anar molt bé. A continuació redacto la petita entrevista que li vaig fer:

- Quins estudis et van portar a formar part avui del sincrotró ALBA?

Vaig estudiar física i enginyeria electrònica.

- Quina funció fas dins del sincrotró ALBA?

Jo estic al grup de radiofreqüència. Els electrons a mesura que donen voltes a l'accelerador perden energia perquè emeten llum. Aleshores el grup de radiofreqüència del que s'encarrega és de recuperar tota aquesta energia. Els fem passar per unes cavitats de radiofreqüència que generen un camp elèctric, i per tant aquesta és la força que accelera una altra vegada l'electró i fa que no perdi velocitat i fa que segueixi anant per la trajectòria. Per resumir una cavitat de radiofreqüència és una cosa que és capaç de confinar un camp elèctric en un espai determinat i donar aquesta energia a les partícules que passen a través.

- Què és per a tu un accelerador de partícules?

L'accelerador de partícules és una màquina que, com el seu propi nom indica, agafa partícules i les posa a unes energies x per que les persones pugin agafar allò i fer-ho servir per estudiar alguna cosa. Un accelerador de partícules és una cosa molt general. ALBA és un accelerador de partícules que és una font de llum de sincrotró, aquí es genera llum per estudiar alguna cosa. El que hi ha a Suïssa és un accelerador de partícules, però és un col·lisionador, que el que fa és accelerar partícules i fer-les xocar per estudiar-les. Els raigs X dels hospitals també són acceleradors de partícules.

- Què pot observar la llum de sincrotró?

La llum de sincrotró pot observar una cosa tan petita com permeti la longitud d'ona que emet l'electró.

- Saps d'alguna empresa/associacions que treballin amb el ALBA?

Que jo conegui que hagin vingut a fer experiments a l'ALBA són, per exemple, Henkel que és una empresa d'adhesius. Altres que treballen amb nosaltres en la part d'amplificadors, una és Btesa, que està a Madrid, i una altre de Santander que es diu TTI, que ens proporciona transmissors, amplificadors d'estat sòlid, i una que es diu Thales, que és francesa, que aquesta és proveïdor mundial de material d'acceleradors, de fet el nostre accelerador lineal està fet completament per Thales.

- Diferències entre un sincrotró i un col·lisionador de partícules?

Comparant-lo, per exemple, amb el CERN. La principal diferència és l'objectiu, un emet llum i l'altre les fa col·lisionar. De fet, pel CERN és dolent que les partícules produeixin llum, perquè cremen tots els tubs per on circulen els protons. Per això ells fan servir protons i nosaltres electrons, perquè els electrons són partícules que generen molta més llum. Una altra diferència és que ells tenen dos feixos de partícules i nosaltres solament un.

4. APLICACIONS EN LES DIFERENTS CIÈNCIES

La importància d'aquests instruments de física nuclear és similar al d'un telescopi en astronomia o al microscopi en biologia. Actualment l'ús dels acceleradors s'ha estès a altres àrees de investigació bàsica com la física atòmica i en les partícules elementals. Els acceleradors a medicina s'utilitzen tant per departaments de radiologia, per destruir tumors malignes, com per produir radioisòtops que s'utilitzen en el diagnòstic d'infermetats. L'ús dels acceleradors en aplicacions tecnològiques és molt variat i el més conegut és en les indústries semiconductor i de la nucleó-electrònica, les quals fan servir un tipus especial d'acceleradors coneguts com "implantadors" amb el que és possible produir els "chips electrònics", circuits integrats, etc.

5. FORMULES I LLEIS APLICABLES

Com que a Catalunya hi ha el Sincrotró ALBA realitzaré tots els càlculs basant-me en aquest tipus d'accelerador.

La millor manera d'entendre com funciona un sincrotró és desglossant cada part del procés, des que surt l'electró per l'accelerador lineal, fins que acaba donant voltes en l'anell d'emmagatzematge.

- El procés d'acceleració dels electrons comença en l'accelerador lineal LINAC, on prèviament els electrons han estat separats dels protons. Dins del LINAC són accelerats des de 0 fins a 110 MeV. A continuació intentarem calcular la velocitat a partir de la fórmula de l'energia cinètica:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

La massa d'un electró és: $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} = m$

L'energia són 110 MeV = $1,76 \times 10^{-11} \text{ J} = E$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}} \quad V = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,76 \times 10^{-11}}{9,1 \times 10^{-31}}} = 6,21 \times 10^9 \text{ m/s}$$

Si observem el resultat ens donarem compte que sobrepassa la velocitat de la llum ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) i no te sentit. Això és degut a que no és correcte utilitzar l'equació de l'energia cinètica perquè no te en compte la teoria de la relativitat especial la qual indica que la massa varia a velocitats molt altes. A més, mai podrem aconseguir arribar a la velocitat de la llum perquè aleshores la nostra massa tendria a l'infinit. Ningú disposa, evidentment, d'energia infinita per a moure una massa infinita. Més tard intentarem calcular alguna cosa tenint en compte la relativitat.

- Després, quan els electrons surten del LINAC a 110 MeV passen al Booster, que tracta d'un propulsor circular que els accelera de 110 MeV a 3 GeV. En aquest apartat veurem la dependència que tenen l'energia dels electrons i el camp magnètic mitjançant la força centrípeta i la força de Lorentz:

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad \vec{F} = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

Si fusionem aquestes dues fórmules observem que es pot treure una v i queda així:

$Q \cdot B = m \cdot \frac{v}{R}$ → Amb aquesta fórmula podem veure que el camp magnètic és proporcional a la velocitat i inversament proporcional al radi, és a dir, si augmenta la velocitat, per tant l'energia també, augmenta el camp magnètic i quan augmenta el radi disminueix el camp magnètic.

En poden trobar evidències d'això en molts dels acceleradors de partícules arreu del món. Sempre es busca construir un accelerador el més gran possible per reduir el camp magnètic, n'és un exemple el LHC (*Large Hadron Collider*), situat al nord-oest de la ciutat de Ginebra.

Aquesta fórmula es pot simplificar més, ja que la quantitat de moviment és: $p = m \cdot \vec{v}$, per tant queda: $Q \cdot B = \frac{p}{R}$

A continuació, calcularem el camp necessari per als electrons quan entren al Booster i quan surten després de ser accelerats. Sabem que:

$$p_0 = 5,89 \times 10^{-20} \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad p_1 = 1,609 \times 10^{-18} \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$R = 11,459 \text{ m}$ ← És cert que l'anell del Booster fa 249 m (cosa que ens donaria un radi de 39.63 m si fos una circumferència) el radi de curvatura és menor, ja que el Booster no és una circumferència; és un polígon de 32 costats i la major part d'aquest són línies rectes, on els electrons no es corben. Els electrons es corben només als imants dipolars i ho fan amb un radi de curvatura de 11.459 metres.

$$\text{Camp inicial: } B = \frac{5,89 \times 10^{-20}}{11,459 \cdot 1,6 \times 10^{-19}} = 3,2 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$\text{Camp final: } B = \frac{1,609 \times 10^{-18}}{11,459 \cdot 1,6 \times 10^{-19}} = 8,7 \times 10^{-1} \text{ T}$$

- Per últim, els electrons entren a l'anell d'emmagatzematge i es queden allà donant voltes emetent llum la qual serà utilitzada per les línies de investigació. Aquestes partícules no donen voltes eternament, van perdent energia per cada volta que donen. Per això constantment es van accelerant nous feixos d'electrons. Ara calcularem el radi de curvatura que descriuen els electrons quan passen per un imant dipolar a l'interior de l'anell d'emmagatzematge, però aquest cop no utilitzarem la fórmula de la energia cinètica, sinó que farem servir la física relativista. Sabem que:

$$B = 1,4 \text{ T} \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad E = 3 \text{ GeV} = 4,8 \times 10^{-10} \quad m_0 = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Sabent que l'energia d'una partícula relativista està relacionada amb la seva velocitat i la seva massa en repòs segons: $E = m_0 \cdot \gamma \cdot v^2$ on γ és el factor de Lorentz, m_0 la massa de la partícula en repòs i v la velocitat de la partícula, que en aquest cas serà c , la velocitat de la llum. Per tant:

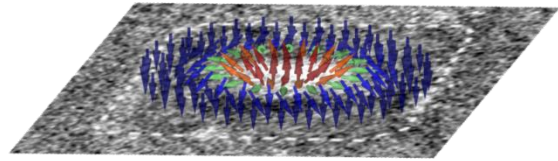
$$E = m_0 \cdot \gamma \cdot c^2 \rightarrow \gamma = \frac{E}{m_0 \cdot c^2} = \frac{4,8 \times 10^{-10}}{9,1 \times 10^{-31} \cdot (3 \times 10^8)^2} = 5860,80$$

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = m \cdot \vec{a} \quad \rightarrow \quad Q \cdot c \cdot B = \gamma m_0 \cdot \frac{c^2}{R} \quad \rightarrow \quad R = \frac{\gamma \cdot m_0 \cdot c^2}{Q \cdot c \cdot B} =$$

$$\frac{5860,80 \cdot 9,1 \times 10^{-31} \cdot 3 \times 10^8}{1,6 \times 10^{-19} \cdot 1,4} = 7,14 \text{ m}$$

6. ESTUDIS EN DESENVOLUPAMENT

- Els skyrmions magnètics són nanoestructures quirals amb forma de remolí, considerats com a unitats (o bits) als nous sistemes d'emmagatzematge de dades. Tot i que es va predir la seva existència als anys 80, no va ser fins el 2006 que es van poder observar. Però les condicions necessàries eren molt especials: a temperatures molt baixes, aplicant camps magnètics, en capes molt gruixudes, o preparats mitjançant epitàxia de feixos moleculars



(IMARGE 8): ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA MAGNÈTICA DE UN SKYRMION

Ara un grup d'investigadors liderats per Olivier Boulle d'SPINTEC (Grenoble, França) ha informat de la primera observació d'skyrmions magnètics aïllats en condicions compatibles amb la indústria. Funcionen a temperatura ambient, sense camp magnètic, en capes de platí, cobalt i magnesi preparades amb sputtering (polvorització catòdica). L'sputtering és un mètode ràpid i fàcilment escalable, estàndard a la indústria dels semiconductors i la microelectrònica.

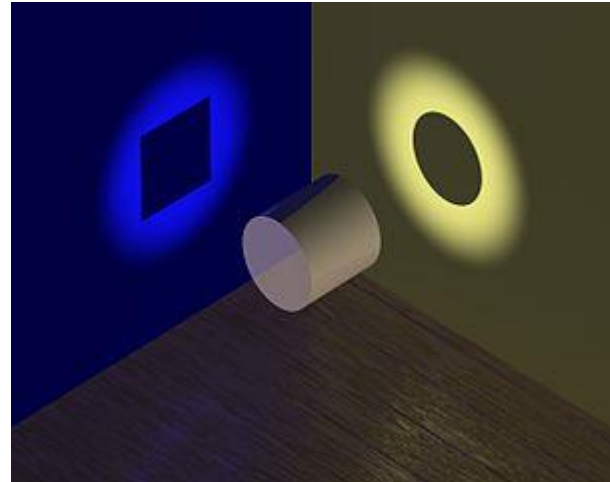
- Els catalitzadors són materials que acceleren les reaccions químiques. L'interès actual per l'or en aquest camp prové del descobriment, 25 anys enrere, que l'or podia ser un catalitzador eficaç a escala nanomètrica, especialment per la seva capacitat de conduir reaccions a temperatures baixes o ambient.

En aquest treball, liderat pel CSIC, també han participat investigadors de la Universitat de Texas (EUA), la Universitat de Sonora (Mèxic), la Universitat de Santiago de Compostel·la, la Universitat Politècnica de Catalunya, el Laboratori de Llum de Síncrotró ALBA de Barcelona i l'Institut de Nanociència d'Aragó de la Universitat de Saragossa.

7. CURIOSITATS RELACIONADES AMB ELS ACCELERADORS

- **Què és la llum? Una partícula o una ona?**

Durant la història sempre s'ha discutit que és la llum. Aristòtil i Newton van defensar que la llum esta formada per partícules, però no van aconseguir fer cap experiment que defenses la seva hipòtesis. En canvi Thomas Young el 1801 va realitzar el denominat experiment de la doble esclatxa, demostrant que la llum és una ona. Però Einstein, utilitzant la teoria de Planck la qual diu que la llum esta formada per quanta o paquets, explica el 1905 l'efecte fotoelèctric demostrant que la llum és una partícula, anomenada més tard com fotons. Aleshores què és? A



(IMATGE 9): IL·LUSTRA LA DUALITAT ONA-PARTÍCULA, EN EL QUAL ES POT VEURE COM UN MATEIX FENOMEN POT TENIR DUES PERCEPCIONS DIFERENTS

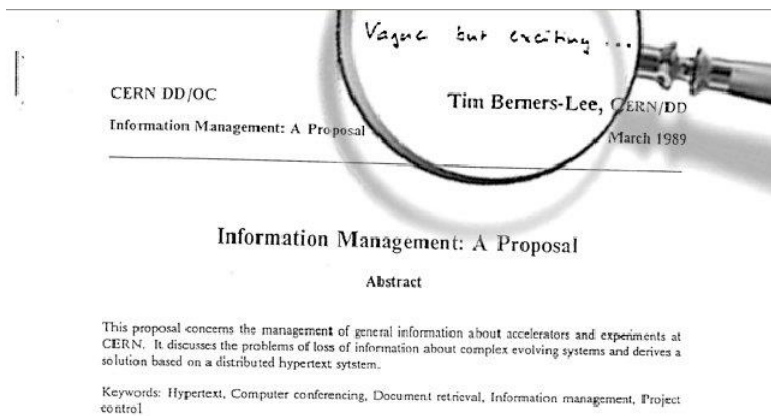
partir d'aquí s'estableix la dualitat ona-partícula⁽¹⁾, què explica que els objectes de l'univers presenten de manera simultània propietats de les ones i de les partícules.

- **Què passaria si ens travesses un feix de protons d'un sincrotró?**

Anatoli Petrovich Bugorski és un científic què realitzava la seva tesis doctoral al Sincrotró U-70, el més gran de Rússia. El 13 de juliol de 1978, quan realitzava una reparació en una peça de l'equip, els sistemes de seguretat van fallar i va patir un accident. El seu cap va entrar en contacte amb el feix de protons emergents. En les seves paraules, va observar un flaix «més brillant que un miler de sols», encara que no va sentir dolor. Bugorski no només va sobreviure, sinó que va completar el seu doctorat. La seva capacitat intel·lectual no es va veure afectada, però la fatiga davant el treball intel·lectual es va incrementar. Bugorski va perdre la facultat de sentir per l'oïda interna, si bé va mantenir un tinnitus la resta de la seva vida. El costat esquerre de la seva cara es va paraitzar a causa de la destrucció dels seus nervis. No obstant això, es desenvolupava bé, excepte perquè va desenvolupar crisi d'absència i epilèpsia.

- **El naixement de les pàgines web:**

Al 1989, Tim Berners Lee, un científic del CERN, va observar que es perdia molta de la informació de les investigacions de tots els científics què anaven al CERN i no hi havia cap manera precisa de guardar-les. Berners Lee va fer una proposta però no va ser ben acceptada i es va posar a treballar en ella més a fons. Finalment va entregar un document amb la proposta on després el seu superior li va respondre: “*Vague but exciting...*”. Degut a això la primera pàgina web va ser info.cern.ch.



(IMATGE 10): DOCUMENT ON TIM BERNERS LEE REDACTA LA SEVA PROPOSTA. A LA PART SUPERIOR PODEM OBSERVAR LA RESPOSTA DEL SEU SUPERIOR

8. CONCLUSIONS

En conclusió, responent a la hipòtesis “És possible demostrar el funcionament d’un accelerador de partícules amb els coneixements de batxillerat?”, amb la realització del treball he aconseguit demostrar com funciona un accelerador de partícules. Però crec què per demostrar-ho en la seva totalitat el seu funcionament són necessaris uns coneixements més avançats. Amb els meus coneixements actuals es pot demostrar de manera simplificada com les partícules són accelerades i com es mantenen en una orbita constant a l’anell d’emmagatzematge, però per explicar amb més detall perquè succeeixen alguns processos hauria d’ampliar el temari del batxillerat.

Per altra banda, respecte als altres objectius que volia assolir, he aconseguit entendre com funciona un accelerador de partícules, les forces que intervenen en ell i quina funció realitza cada part de la maquinària. També he avançat en quant al tema dels camps magnètics i tinc més facilitat per entendre i resoldre problemes d’aquest estil i fins hi tot he resolt un problema relativista. Per últim he descobert molts dels avenços que s’han realitzat gràcies als acceleradors

de partícules, com poden ser la possible creació de bateries recarregables de calci, i investigacions que s'estan portant a terme com poden ser l'estudi dels skyrmions.

A partir de l'estudi realitzat puc afirmar que els acceleradors de partícules poden suposar un gran avenç per a la física i altres ciències, perquè ens proporciona moltes maneres òptimes d'estudiar els materials, i també pot contribuir a la millora de les nostres vides i comoditats. Després amb els càlculs fets he pogut explicar el funcionament del sincrotró, i no han estat necessàries formules més avançades al batxillerat, per a la majoria dels càlculs únicament ha estat necessària la utilització de la força de Lorentz i d'altres formules apreses en primer de batxillerat. Per tant l'objectiu principal del treball de recerca s'ha assolit amb èxit, es pot demostrar el funcionament d'un accelerador de partícules amb coneixements de batxillerat.

Seguint la metodologia proposada en el pla de treball he aconseguit realitzar tot el que volia amb uns resultats òptims. Partia del desconeixement total del que era un accelerador de partícules, no més del que tothom s'imagina quan escolten el nom, que accelera partícules. Partint des de zero he aconseguit aprendre com funcionen la majoria dels acceleradors de partícules i per a què es fan servir.

El principal imprevist que va sorgir a l'hora de realitzar el treball va ser la manca de software adequat per a realitzar el treball, ja que les versions dels editors online, amb els que normalment treballa, no ofereixen la facilitat de crear formules.

Pensant en maneres de millorar el treball ara mateix no se m'acut cap. Actualment es tot el que puc fer, potser indagar en busca de més informació respecte a investigacions o explicar cada part dels acceleradors de partícules, però per a la hipòtesis proposada seria redundant. Pot ser d'aquí a més anys, quan tingui coneixements més avançats en física podria perfilar el treball i donar-ho per acabat.

9. FONTS UTILITZADES

- CERN [en línia] <<http://home.cern/>>
- Wikipedia [en línia]
<https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas>
- Wikipedia [en línia]
<https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_sincrotr%C3%B3n>
- Sincrotró ALBA [en línia] <<http://www.cells.es/es/>>

- Universitat autònoma de Barcelona [en línia]
<<http://www.uab.cat/web/investigar/itineraris/relacio-amb-el-territori/centres-i-instituts-de-recerca/institut-/-centre-de-recerca-1345467950506.html?param1=1345659477758>>
- Generalitat de Catalunya [en línia]
<http://www.gencat.cat/web/multimedia/cat/sincrotró/index_hm.htm>
- **GUERRERO, David:** *Un nanomaterial con aplicaciones prometedoras* [en línia] EL MUNDO <<http://www.elmundo.es/economia/2015/09/07/55edca36e2704eaf268b4595.html>>
- **L.M.:** *Un sistema para curvar espejos de rayos X* [en línia] EL MUNDO <<http://www.elmundo.es/economia/2015/06/03/556df660e2704e4a338b4584.html>>
- **L.M.:** *Un detector de radiación que mide la intensidad de la luz* [en línia] EL MUNDO <<http://www.elmundo.es/economia/2015/02/25/54ecc6b4ca4741c75d8b456e.html>>
- CERN [en línia] <<http://info.cern.ch/Proposal.html>>
- **SANTAOLALLA, Javier:** *¿La luz es una partícula o una onda?* [en línia] YouTube, Date un Voltio <<https://www.youtube.com/watch?v=U4-DmT12D9E>>
- **SANTAOLALLA, Javier:** *¿Qué es un colisionador de partículas?* [en línia] YouTube, Date un Voltio <<https://www.youtube.com/watch?v=XuVMPEb4iQs>>
- **SANTAOLALLA, Javier:** *10 cosas que no sabías sobre el CERN* [en línia] YouTube, Date un Voltio <<https://www.youtube.com/watch?v=WSYkctfaldM>>
- **SANTAOLALLA, Javier:** *¿Qué es el Bosón de Higgs?* [en línia] YouTube, Date un Voltio <<https://www.youtube.com/watch?v=jz-OHaWFHwA>>
- **PALACÍN, M. Rosa:** *Towards a calcium-based rechargeable battery* [en línia] Nature Materials <<http://www.nature.com/nmat/journal/v15/n2/full/nmat4462.html>>
- UAB [en línia] <<http://www.uab.cat/web/investigar/itineraris/relacio-amb-el-territori/centres-i-instituts-de-recerca/institut-/-centre-de-recerca-1345467950506.html?param1=1345659477758>>
- “*El Síncrotró inaugura MIRAS, la vuitena línia de llum de l'Alba*” [en línia] Cerdanyola INFO <<http://cerdanyola.info/societat/el-sincrotró-inaugura-miras-la-vuitena-linia-de-llum-de-lalba/>>

- “*Observan skyrmions magnéticos aislados en el sincrotrón ALBA*” [en línea] SINC
<<http://www.agenciasinc.es/Noticias/Observan-skyrmions-magneticos-aislados-en-el-sincrotron-ALBA>>
- “Las propiedades catalíticas del oro a escala *atómica*” [en línea] EL MUNDO
<<http://www.elmundo.es/elmundo/2013/08/06/nanotecnologia/1375777153.html>>