

# ESTUDI DELS ACCELERADORS DE PARTÍCULES

LHC, ALBA

Construcció d'una maqueta



**Clàudia Giner Ferrer**

Ana Burrel

2n de Batxillerat C

2017/18

INS Jaume I

Salou

*D'on sorgeix tot aquest ordre  
i tota la bellesa que veiem al món?*

**Isaac Newton**

# ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ .....	5
1.1.	Justificació de l'elecció del tema .....	5
1.2.	Objectius .....	7
1.3.	Metodologia.....	7
2.	L'UNIVERS.....	9
2.1.	Origen de l'Univers: El Big Bang .....	9
2.2.	Evolució de l'univers.....	10
3.	COMPOSICIÓ DE LA MATÈRIA.....	11
3.1.	Partícules Fonamentals.....	12
3.2.	Forces Fonamentals.....	15
3.2.1.	La força electromagnètica: .....	15
4.	ACCELERADORS DE PARTÍCULES .....	21
4.1.	Acceleradors lineals .....	22
4.2.	Acceleradors Circulars .....	24
4.2.1.	Ciclotró .....	27
4.2.2.	Sincrotró .....	30
5.	LHC .....	34
5.1.	CERN.....	37
6.	ALBA .....	38
7.	PART EXPERIMENTAL .....	45
7.1.	Objectius .....	45
7.2.	Material .....	45
7.3.	Disseny .....	47

7.4.	Procediment .....	48
7.4.1.	Construcció de l'estructura .....	48
7.4.2.	Creació del programa .....	49
7.4.3.	Instal·lació dels circuits .....	51
7.5.	Avaluació del procés de construcció .....	53
8.	EXPERIMENTACIÓ .....	54
8.1.	Material .....	54
8.2.	Procediment .....	55
8.3.	Dades, càlculs i resultats.....	56
8.3.1.	Taula de resultats .....	57
8.4.	Anàlisi de dades i conclusions .....	57
9.	COMPARACIÓ .....	59
10.	CONCLUSIONS .....	60
11.	AGRAÏMENTS.....	62
12.	FONTS D'INFORMACIÓ .....	63
12.1.	Bibliografia .....	63
12.2.	Webgrafia.....	63
12.3.	Índex de gràfics.....	66
12.4.	Índex d'imatges .....	67

## 1. INTRODUCCIÓ

### 1.1. Justificació de l'elecció del tema

Fer el treball de recerca ha suposat moltes hores de dedicació buscant i seleccionant informació sobre el que volia tractar. D'aquesta manera he après nous coneixements, i he superat els problemes que s'han presentat durant el projecte.

Sobre el treball de recerca, un dels aspectes més complicats ha estat triar el tema. En primer lloc, vaig escollir l'assignatura amb la qual el treball tindria relació, i després de pensar temes amb la Física com a punt en comú, molts van quedar descartats per la seva inviabilitat.

Finalment, la idea va sorgir durant la recerca de projectes relacionats amb el magnetisme, qüestió que em va semblar interessant des del primer instant. Es tractava d'un diari on s'informava d'uns assaigs que es volien fer a Suïssa, que pretenien anar més enllà dels límits de la física a partir de l'accelerador de partícules més gran del món. Era un projecte molt intrigant i, per manca de coneixements sobre ell, em va semblar el candidat perfecte com a tema de treball de recerca.

El cas és que després de buscar informació i documentar-me, vaig decidir fer el treball sobre l'accelerador de partícules. D'entrada semblava un tema molt extens i difícil de tractar, però després de diverses reunions amb la tutora, i de començar a tractar el tema amb més profunditat i a la vegada amb més coneixement, vam aconseguir fixar uns límits i centrar-nos en un tema determinat, que seria l'estudi dels acceleradors de partícules, tant el LHC (Ginebra), a escala mundial, com l'ALBA (Barcelona), en l'àmbit estatal.

El principal objectiu seria tractar d'explicar l'origen i el funcionament dels acceleradors i, un cop definits, estudiar i comparar aquests grans invents. Em van semblar uns punts prou interessants a la vegada que difícils de tractar, a causa del nivell de comprensió. Va ser aleshores que, per motius de proximitat i senzillesa, vam decidir que el treball es regiria per un tipus d'accelerador en concret. Així doncs, el meu treball de recerca tractaria sobre l'estudi del sincrotró ALBA de Barcelona.

Un cop fixat sobre què tractaria la part escrita, amb la tutora vam veure adient poder fer una part experimental on es reflectissin tots els coneixements assolits durant el treball. És per això que vam decidir que construiríem una maqueta que simulés el funcionament d'un accelerador, per poder fer una pràctica.

El motiu principal de l'elecció ha estat poder unificar dues branques de la ciència, com són la física i la tecnologia, que m'atrauen molt, i combinar així el coneixement físic, que aniria aprenent, amb la tecnologia a l'hora de construir i programar.

També em va cridar l'atenció el desconeixement sobre aquest aparell en la societat. Un últim objectiu interessant era poder acostar a companys i professors aquest fascinant món, del qual es poden aprendre moltes coses.

Un cop havia cercat molta informació i amb les idees bastant clares, vaig poder aprofundir encara més en el meu treball, ja que vaig tenir el privilegi de visitar l'ALBA, formant part d'un curs de professors que es realitza anualment.

Allí vaig poder entendre el funcionament i veure totes les instal·lacions del sincrotró, de la mà dels científics més qualificats que hi treballen. Així vaig poder ampliar encara molt més el meu coneixement.

En acabar la visita, ens van ensenyar una maqueta LEGO que tenen a l'ALBA i vaig tenir la sort de poder parlar amb la dissenyadora, que em va aconsellar i ajudar a enfocar la part pràctica. Em va donar la idea definitiva de treballar la relació entre la massa i la velocitat de les partícules accelerades quan són en els acceleradors, extrapolant-lo a la maqueta que havia de construir basada en l'ALBA. També em va advertir que aquesta opció seria bastant més complexa i que a més a més els resultats no serien gaire exactes, però per una altra banda seria un gran repte. La idea em va atraure des del començament.

## 1.2. Objectius

Establert el tema i els conceptes principals ben definits, el següent pas va ser plantejar els objectius del treball que són els següents:

- Explicar l'origen dels acceleradors.
- Conèixer els fonaments bàsics de l'electromagnetisme i relacionar-los amb els acceleradors.
- Estudiar els elements magnètics més importants centrant-me en la funció dels imants.
- Construir una maqueta que simuli el funcionament del sincrotró ALBA.
- Experimentar amb esferes de diferents masses en la maqueta i analitzar els resultats.
- Comparar la maqueta amb els acceleradors LHC i ALBA.

Els ítems que he triat són temes clau per a l'estudi dels acceleradors i, per tant imprescindibles per desenvolupar el treball. Però n'hi ha d'altres que han estat descartats perquè, tot i ser importants, no són útils per al treball.

## 1.3. Metodologia

Per tal de dur a terme un bon Treball de Recerca, ha calgut seguir una pauta per tenir clar tot el necessari per a desenvolupar-lo.

- Estudiar els conceptes clau de l'acceleració de partícules.
- Recopilar informació de la història dels acceleradors.
- Conèixer els factors físics que afecten en l'acceleració de partícules.
- Veure la influència electromagnètica en els acceleradors.
- Visitar les instal·lacions de l'accelerador ALBA.
- Elaborar l'índex i l'estructura del treball.
- Començar a redactar el treball.
- Dissenyar i construir una maqueta d'un accelerador de partícules.
- Utilitzar la maqueta per a estudiar la velocitat de les partícules en els acceleradors.

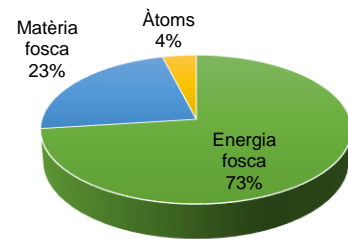
- Extreure conclusions.
- Acabar la redacció del treball.
- Preparar l'exposició oral.

El cos del treball ha estat redactat de forma senzilla, dintre de la complexitat del tema, per fer-lo més entenedor. L'ordre que he seguit ha estat la relació de conceptes, és a dir, des de l'inici del treball fins a l'última pàgina, les idees estan íntimament relacionades unes amb les altres, fent així de la lectura del treball, una lectura contínua i molt entenedora.

## 2. L'UNIVERS

L'Univers és el conjunt de matèria, energia, espai i temps que ho forma tot i es troba en expansió. Es considera que aquest està constituït per una part observable i una no observable. La part observable representa el 4% de l'univers i són àtoms, la part no visible està formada en un 73% d'energia fosca i un 23% de matèria fosca, l'existència d'aquesta s'ha deduït perquè la massa total de l'univers no es correspon únicament amb la part visible.

**Composició de l'Univers**



Gràfic 1 - gràfic de sectors sobre la composició de l'univers

### 2.1. Origen de l'Univers: El Big Bang

La teoria de la gran explosió (Big Bang) explica com es va formar l'univers fa aproximadament uns 13.700 milions d'anys.

Segons aquesta teoria, l'univers es va originar a partir d'una gran explosió on inicialment tota la matèria estava concentrada en un petit espai, un nucli inicial. Aquest instant s'anomena singularitat inicial, ja que té lloc quan les quatre forces fonamentals estaven unides en una de sola, cosa que les lleis de la física no poden explicar. Per aquest motiu només coneixem el que va passar a partir de  $10^{-43}$  segons després del Big Bang.

Però la física de partícules<sup>1</sup> investiga a partir dels acceleradors de partícules que recreen aquelles condicions que no es donen a la natura, el que va passar entre l'instant de temps zero i el que coneixem, anomenat l'època de Planck.

<sup>1</sup> física de partícules: branca de la física que estudia les propietats de les components fonamentals que formen el Univers i les seves forces d'interacció.

## 2.2. Evolució de l'univers

Després d'aquesta gran explosió també coneguda com a Big Bang, comença una era dominada per la radiació.

Al cap de  $10^{-43}$ s, a una temperatura de  $10^{23}$ K, l'Univers, que partia d'un nucli inicial nan, va començar a expandir-se a velocitats superiors a la de la llum, augmentant així la seva massa. En aquest instant la força gravitatòria es separa de les altres tres forces fonamentals.

Al cap de  $10^{-32}$ s, la temperatura descendeix fins als  $10^{25}$ K. La força nuclear forta es separa i les partícules elementals de l'àtom, els quarks i leptons, es formen. És quan es defineix un univers pla.

Al cap de  $10^{-12}$ s, la temperatura continua descendint fins a  $10^{15}$ K. La força electromagnètica es separa de la força nuclear feble i els quarks s'uneixen formant els protons i neutrons.

Després d'aquest instant comença una era dominada per la matèria.

Al cap de 3 minuts, l'univers continua refredant-se. La matèria i la radiació continuen unides i l'univers és fosc perquè els fotons estan units a les partícules. D'altres partícules com els protons i neutrons s'uneixen i originen els primers nuclis d'heli.

Al cap de  $10^{13}$  segons, l'Univers arriba als 3000K. Es formen els primers àtoms d'hidrogen i d'heli. La matèria i la radiació es separen, i aleshores, els fotons deixen d'estar units a la matèria i apareix la llum, fent visible l'Univers. Aquesta segregació, té com a conseqüència que els fotons es dispersin i constitueixin la radiació còsmica de fons<sup>2</sup>.

Al cap de 200 milions d'anys, l'Univers es continua refredant fins a la temperatura d'avui dia, 2,65K. Durant aquest període es formen les galàxies, més tard les estrelles i la resta d'estructures que formen l'Univers, com forats negres, supernoves i sistemes solars. Fins formar l'univers tal com el coneixem.

---

<sup>2</sup> Radiació còsmica de fons: és un tipus de radiació electromagnètica

### **3. COMPOSICIÓ DE LA MATÈRIA**

La matèria és tot allò que existeix a l'univers observable i que té massa, volum i que, per tant ocupa un lloc a l'espai i en el temps. Està constituïda per partícules indivisibles, els àtoms. Aquests, a partir d'enllaços, s'uneixen de formes diferents i donen lloc a molècules, els processos d'unió i separació dels àtoms són les reaccions químiques, però aquests ni es creen ni es destrueixen.

Les partícules estan sempre en constant moviment, i la temperatura està directament relacionada amb la velocitat i l'energia d'aquestes, fent així que els àtoms es moguin a major velocitat i tinguin més energia com més alta sigui la temperatura i per tant, com més baixa és la temperatura menor és la velocitat dels àtoms i menys energia tenen.

Així doncs, les reaccions químiques entre els àtoms depenen de dos factors:

- De la força d'atracció entre ells. "Els àtoms s'atreuen quan es troben a poca distància però es repelen en apropar-se més encara" <sup>3</sup>.
- De la temperatura i energia que aquests tenen. Com més alts siguin aquests valors, més fàcil serà la seva separació.

És per aquests factors que la matèria pot estar en estat sòlid, líquid o gasós.

Els àtoms que formen les molècules i, per tant, la matèria, estan formats per partícules subatòmiques que són els electrons, els protons i els neutrons.

Els electrons, de càrrega negativa, van ser descoberts per J. J. Thomson l'any 1897, qui va afirmar que aquests es trobaven en l'àtom repartits aleatòriament sobre una massa homogènia positiva. Més tard, Rutherford, a partir de bombardejar una làmina d'or amb partícules  $\alpha$ , va demostrar que els àtoms tenien un nucli format per protons al voltant del qual orbitaven els electrons.

Els protons van ser descoberts pel mateix Rutherford el 1919, els quals tenen les mateixes característiques que els electrons, però la seva càrrega és positiva. Més tard, l'any 1932, Chadwick va observar que si els nuclis atòmics estaven formats només per protons, les masses dels elements químics segons la taula

---

<sup>3</sup> Rojo, Juan, "La vida íntima de las partículas: De los átomos de Demócrito al bosón de Higgs", Barcelona, 2016, p.140.

periòdica no concordaven, descobrint així un nou tipus de partícules elementals equivalents als protons però sense càrrega, els neutrons.

Als anys 30, es descobreixen moltes altres partícules, i cap a l'any 1960 s'havien descobert centenars de noves partícules. Sense poder trobar-les a partir d'acceleradors de partícules com fem actualment, ho feien a partir d'un accelerador natural, els rajos còsmics. Aquests rajos còsmics, descoberts l'any 1912 per Víctor Hess, són partícules d'alta energia que, en ser accelerades a l'espai exterior per camps magnètics naturals, impacten sobre l'atmosfera terrestre proporcionant col·lisions d'alta energia. En estudiar aquestes col·lisions, es van observar moltes noves partícules, anomenades zoo de partícules, les quals no encaixaven amb les teories formulades fins aleshores.

Un cop descobertes totes aquestes partícules, els científics van voler aprofundir més en el món de les partícules subatòmiques i els rajos còsmics ho limitaven, no podien proporcionar tota la informació necessària. Va ser llavors quan es va fer necessària la construcció d'acceleradors de partícules, que van proporcionar el descobriment de moltes noves partícules. Un dels descobriments més importants es va realitzar a l'accelerador lineal de Stanford, on es va demostrar que tant els protons com els neutrons estan formats per altres partícules, els quarks, cosa que demostrava que no són partícules fonamentals.

### **3.1. Partícules Fonamentals**

De totes les partícules trobades entre els anys 30 i 70, es va veure que només algunes d'elles eren partícules fonamentals, ja que seguien un mateix patró. Les partícules fonamentals són aquelles que formen tota la matèria coneguda a l'Univers és a dir, són la part més petita en què la matèria es pot dividir.

El patró que diferenciava les partícules fonamentals de la resta va ser explicat a partir d'una estructura matemàtica per un grup de físics teòrics que va crear, així, el Model Estàndard de les partícules. Per tant, definim el Model Estàndard com una teoria que pretén descriure les partícules fonamentals i les interaccions entre elles, aquestes interaccions són les interaccions de les forces fonamentals (gravitatòria, electromagnètica, nuclear feble i nuclear forta). En ell es treballa des de mitjans del S. XX fins a l'actualitat, perquè encara no ha estat completat.

El Model Estàndard de Partícules divideix les partícules fonamentals en dos grups:

- Els fermions

Aquests fermions fonamentals són:

- Els quarks → Sempre es troben en partícules més grans i no són observables individualment, en trobem de diferents tipus:
  - Up(u): amb càrrega  $+2/3$ .
  - Down(d): amb càrrega  $-1/3$ .
  - Charm(c): més pesat que el down.
  - Strange(s): més pesat que l'up.
  - Top(t): encara més pesat que l'up.
  - Bottom(b): encara més pesat que el down.
- Els Leptons → Poden desplaçar-se lliurement.
  - Electrón(e<sup>-</sup>): de càrrega  $+1$
  - Neutrón Electrón( $\nu_e$ ): no té càrrega elèctrica
  - Muón( $\mu^-$ ): Més pesat que l'electrón
  - Neutrón Muón( $\nu_\mu$ ): característiques semblants a les del neutrón electrón
  - Tau( $\tau^-$ ): Més pesat encara que l'electrón
  - Neutrón Tau( $\nu_\tau$ ): característiques semblants a les del neutrón Muón

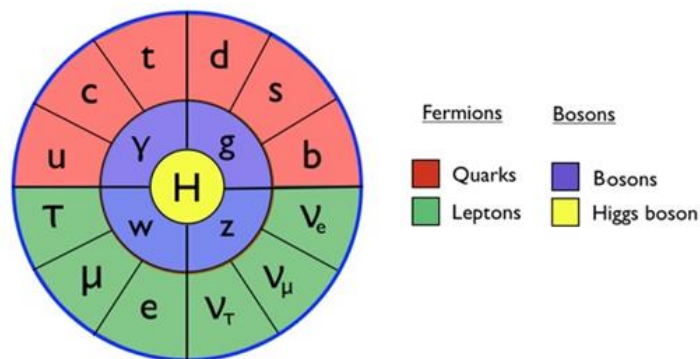
La matèria ordinària està formada pels leptons, electrón i neutrón electrón; i els quarks, down i up. La resta es troba actualment als rajos còsmics i als acceleradors.

- Els bosons, són les partícules fonamentals que transmeten les 4 forces de la natura.

Els bosons fonamentals són:

- Fotons( $\gamma$ ): és el portador de la força electromagnètica i la unitat fonamental de la llum.
- Gluons(g): portador de la força nuclear forta, manté el nucli atòmic unit.
- Bosons W i Z(W<sup>-</sup>,Z): són els portadors de la força nuclear feble i responsables de la desintegració radioactiva.

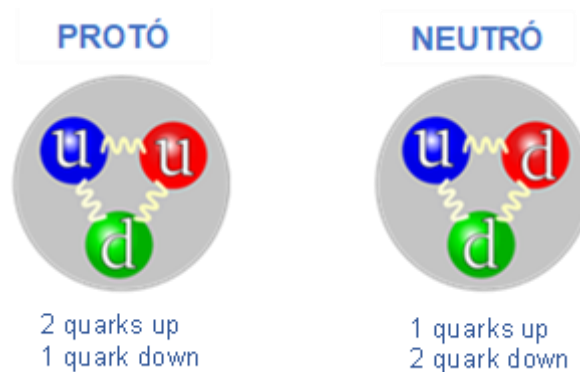
- Gravitons(G): es dedueix que són els portadors de la força de la gravetat tot i no haver estat observat encara.
- Bosó de Higgs(H<sub>0</sub>): va ser descobert el 2012, a l'accelerador de partícules LHC, Ginebra. És la partícula associada amb el procés mitjançant el qual es forma la massa de les partícules. Per tant, la responsable que l'Univers sigui tal com és, ja que sense massa seria molt diferent.



Imatge 1 - Partícules fonamentals del Model Estàndard

Aquest tipus de partícules tenen, a més a més, una partícula elemental associada anomenada antipartícula, que té la mateixa mida i massa però càrrega contrària.

A partir de la unió de diverses partícules fonamentals, es formen els hadrons. Quan s'uneixen fermions fonamentals, es formen els anomenats barions, els més coneguts són els protons i neutrons, formats per dos quarks up i un down, i un quark up i dos down respectivament com podem veure a la imatge 2. Finalment, quan es combinen bosons formen partícules compostes anomenades mesons.



Imatge 2 - Composició protó i neutró

## 3.2. Forces Fonamentals

Un dels principals objectius de la física de partícules és descriure les interaccions entre les partícules. Per tant, cal saber que totes les interaccions són resultat d'un conjunt forces. Es defineix força com, la interacció entre dos o més cossos capaç de produir canvis en el seu moviment o deformar-los. Segons la física clàssica, aquesta força entre dos cossos ha de ser transmesa mitjançant camps. Un camp és un lloc de l'espai on es posa de manifest una força. Segons la teoria de camps, s'ha d'intercanviar una partícula característica d'aquell camp perquè aquestes interaccions siguin possibles. Així doncs, la física diferencia quatre forces fonamentals, les quals expliquen de forma més senzilla les interaccions entre els cossos i partícules, cadascuna transmesa per un tipus de partícula fonamental. Les quatre forces són:

La gravitatòria: podem definir com a força de la gravetat la força d'atracció entre dos cossos o partícules pel fet de tenir una massa determinada, transmesa pel gravitó. Establerta per Isaac Newton al S. XVII.

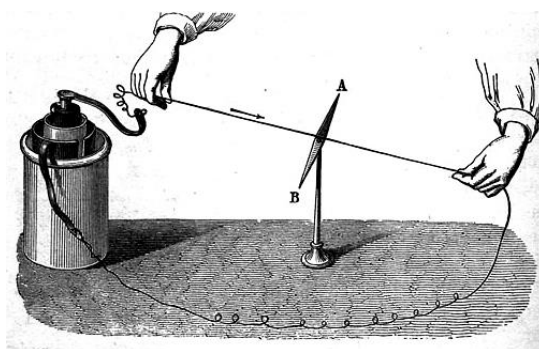
La força nuclear feble: com diu el seu nom, és la força més feble que existeix i el seu camp és de curt abast. Es relaciona amb la radioactivitat, ja que permet als leptons, als quarks i a les antipartícules, intercanviar energia, massa i càrrega; també és la responsable de la desintegració dels neutrons, convertint-los en un protó, un electró i un neutrí. Actua per mitjà del bosó W i Z.

La força nuclear forta: el bosó responsable de la interacció forta és el gluó. Aquesta força és de curt abast, de l'ordre de  $10^{-15}$  m aproximadament. Actua entre els hadrons i el que fa és mantenir els nuclis atòmics units.

### 3.2.1. La força electromagnètica:

A la física es diferencien dos grans camps d'estudi, el que explica la gravetat i totes les interaccions que deriven d'ella i el que estudia l'electromagnetisme. La interacció electromagnètica és la força que un camp electromagnètic exerceix sobre partícules carregades elèctricament. Aquesta força és el resultat de la transferència de fotons.

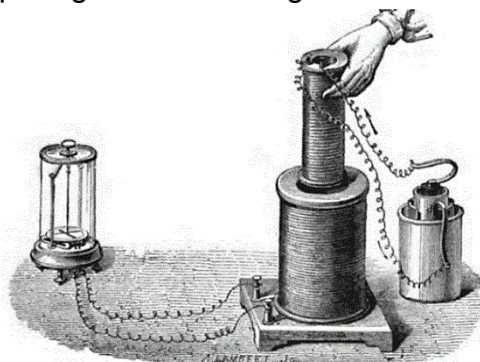
La interacció electromagnètica inclou l'electricitat i el magnetisme, considerades forces independents fins a l'any 1820, quan el físic d'origen danès Hans Christian Oersted descobreix que formen part d'un mateix fenomen a partir d'un experiment senzill, que consistia en un cable conductor i paral·lelament sota d'aquest situar una brúixola. Aquesta, no patia cap alteració si pel cable no circulava corrent. En canvi, si pel cable circulava corrent, la brúixola canviava d'orientació i es desviava en direcció perpendicular al fil. El que va fer que Oersted arribés a la conclusió que un corrent elèctric genera un camp magnètic.



Imatge 3 – Esquema experiment d'Oersted

Era qüestió de temps que es descobrís l'efecte contrari al plantejat a l'experiment d'Oersted. Va ser l'any 1831 que Michael Faraday, a partir d'un altre experiment, va demostrar que es podia generar corrent elèctric a partir d'un camp magnètic.

Es tractava d'una gran bobina conductora connectada a un galvanòmetre<sup>4</sup>, i d'un imant, format per una altra bobina més petita connectada a una bateria que li proporcionava corrent elèctric, que al seu torn generava un camp magnètic. Quan l'imant romania immòbil, no es detectava corrent. Però quan aquest es movia de forma harmònica dins i fora de la bobina gran, induïa corrent que el galvanòmetre detectava. Per tant, amb l'experiment de Faraday va quedar demostrat que un camp magnètic variable genera un corrent elèctric.



Imatge 4 – Esquema experiment de Faraday

<sup>4</sup> Galvanòmetre: instrument que detecta i mesura analògicament el corrent elèctric.

Aquests dos experiments van fer que la comunitat científica estudiés en profunditat l'electromagnetisme. Cal destacar un matemàtic i físic teòric del segle XIX: James Clark Maxwell.

El que pretenia Maxwell era justificar matemàticament els conceptes físics que havien estat descrits fins aleshores de forma pràctica. La seva major aportació va ser l'any 1863, quan publica el llibre *Tractat sobre Electricitat i Magnetisme*, en el qual exposa per primera vegada les lleis bàsiques de l'electricitat i el magnetisme de forma unificada, i per tant, demostrava que formaven part d'un mateix fenomen, l'electromagnetisme. A partir d'un conjunt d'equacions, conegudes com les 4 equacions de Maxwell. També va proposar la Teoria Electromagnètica, la qual s'utilitza en la física actual. Aquesta teoria comprèn la llum i altres fenòmens de radiació electromagnètica com un camp electromagnètic en el qual es propaguen ones lliurement i la seva visibilitat depèn de la longitud d'ona. A més a més de descobrir que aquestes són produïdes per fotons.

Així mateix, un altre físic i matemàtic que cal destacar és Hendrik Antoon Lorentz qui, basant-se en els descobriments anteriors, va observar experimentalment com és la força que un camp magnètic exerceix sobre una càrrega elèctrica si aquesta es troba sota l'acció d'un camp elèctric. Tot seguit, aquesta força va denominar-se Força de Lorentz. Lorentz va finalitzar el seu estudi establint que:

- La força magnètica sobre una càrrega és originada per la presència d'un camp magnètic extern que actua sobre una càrrega en moviment i es defineix amb l'expressió:

$$\vec{F} = Q (\vec{V} \times \vec{B})$$

$$F = |Q| v B \sin \alpha$$

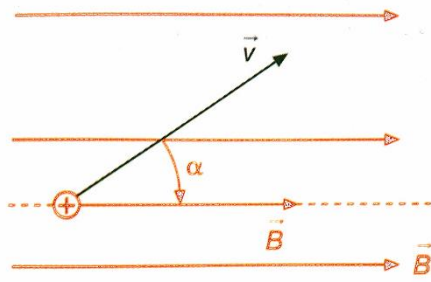
$F$ , és la Força de Lorentz

$Q$ , és la càrrega elèctrica

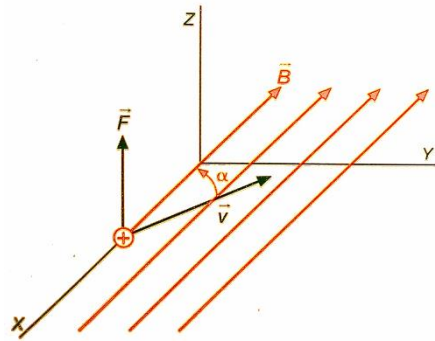
$v$ , és la velocitat amb què es mou la càrrega

$B$ , és el camp magnètic

$\alpha$ , és l'angle que formen els vectors  $B$  i  $v$ .

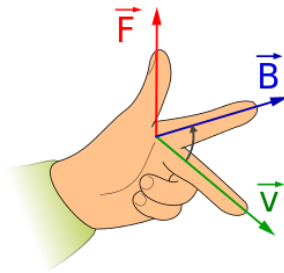


Imatge 5 - Angle format per una càrrega en moviment sota un camp magnètic



Imatge 6 - Força de Lorentz

- En un camp elèctric on hi ha una càrrega en repòs, sobre aquesta el camp magnètic no exerceix cap força.
- La direcció de la força és perpendicular al pla format per la velocitat i el camp magnètic, però el sentit està determinat per la regla de la mà dreta.



Imatge 7 - El polze de la mà dreta, determina el sentit i la direcció de la força.

- Si el camp magnètic i la velocitat de la càrrega són perpendiculars, la força és màxima:

$$\alpha = 90^\circ \quad \sin \alpha = 1$$

$$F_{max} = |Q| v B$$

I si aquestes són paral·leles, és nul·la:

$$\alpha = 180^\circ \text{ i } \alpha = 0^\circ \quad \sin \alpha = 0$$

$$F = |Q| v B \cdot 0$$

$$F = 0$$

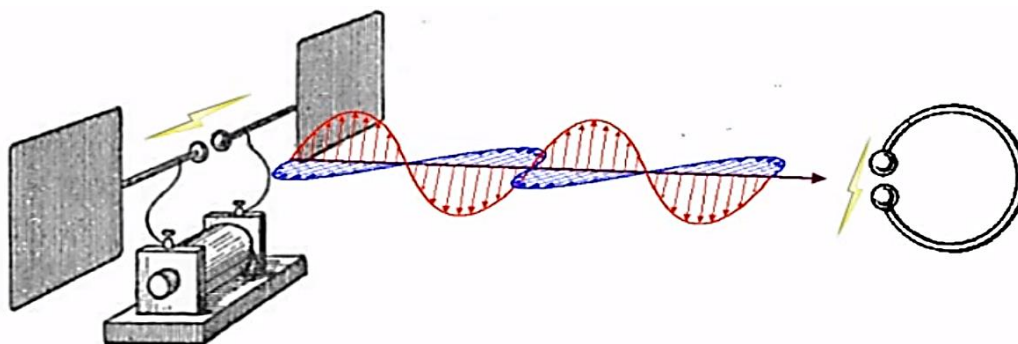
### 3.2.1.1. Radiació electromagnètica

La radiació electromagnètica, també coneguda com a ones electromagnètiques, és una combinació de camps elèctrics transversals als camps magnètics, que es propaguen a través de l'espai a la velocitat de la llum, sense necessitat de cap medi material per fer-ho, en forma d'ones de diferents longituds, responsables de la propagació d'energia. Són emeses per càrregues elèctriques accelerades.

Va ser el físic alemany Heinrich Rudolf Hertz qui va reformular i simplificar les equacions electromagnètiques de Maxwell i qui, l'any 1887, va demostrar experimentalment la teoria de Maxwell en generar i detectar ones electromagnètiques, que Maxwell havia suposat però mai no havien estat demostrades.

L'experiment d'Hertz consistia en una bobina que produïa un voltatge molt alt, connectada a dues varetes de coure que als seus extrems oposats tenien unes esferes emmagatzemadores de la càrrega elèctrica, i en els extrems contigus unes esferes més petites. En produir corrent elèctric altern, el voltatge a les esferes petites era molt elevat i produïa espurnes, cosa que demostrava que entre les esferes es generava radiació electromagnètica a causa de la càrrega elèctrica accelerada i aquesta era detectada per un detector que Hertz va dissenyar, format per un cable de forma circular obert per un punt, en el qual hi havia unes altres dues esferes petites en els extrems.

La funció d'aquest era rebre les ones electromagnètiques generades pel primer aparell, que en el detector produïrien corrent altern i aquest també faria saltar espurnes entre les esferes. Hertz va demostrar, a partir que saltessin espurnes en el detector, que aquest rebia un senyal que era conseqüència de la propagació d'ones electromagnètiques generades al primer aparell.



Imatge 8 - Esquema experiment d'Hertz

Més tard va demostrar que el comportament d'aquestes ones descobertes era com el de les ones de la llum i que ambdues viatgen a la velocitat de la llum ( $3 \cdot 10^8$  m/s) i que la diferència entre unes i les altres era la longitud d'ona i la freqüència.

La longitud d'ona és la distància que hi ha entre dos màxims d'una ona i la freqüència el nombre de cops que es repeteix una ona en un temps determinat, la qual es mesura en hertz (Hz) en honor a Heinrich Rudolf Hertz.

D'aquesta manera es va descobrir que es podien generar ones amb diferents freqüències, des de la més baixa fins a la més alta, i que les ones amb longitud d'ona més curtes, com els raigs gamma, posseeixen molta energia. A més que, com més gran és la longitud d'ona, més baixa és la freqüència, ja que freqüència i longitud d'ona són dos paràmetres relacionats, que depenen de la velocitat de l'ona. Aquesta relació queda demostrada amb la fórmula següent:

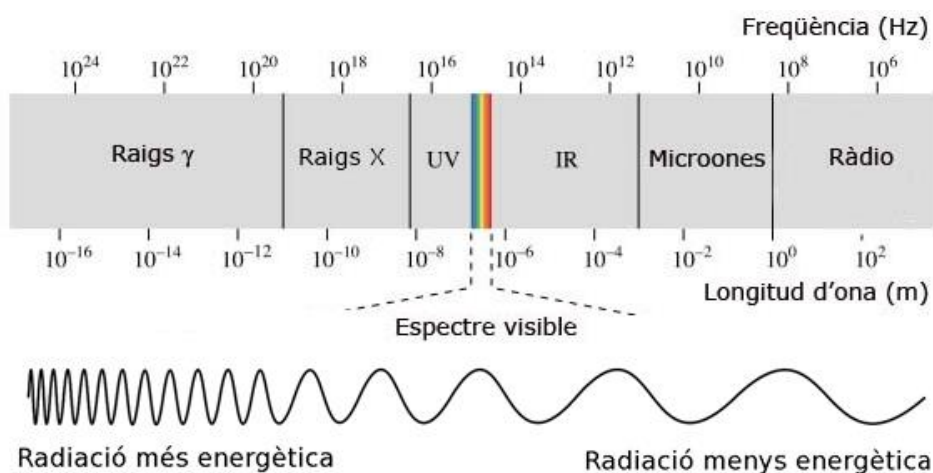
$$f = \frac{v}{\lambda}$$

$f$ , és la freqüència

$v$ , és la velocitat d'ona

$\lambda$ , és la longitud d'ona.

El conjunt de valors de freqüència i longitud d'ona possibles s'anomena espectre electromagnètic. A la imatge 9 es mostra un diagrama de l'espectre electromagnètic i els noms que reben cada tipus d'ona.



Imatge 9 - Diagrama d'espectre electromagnètic

#### 4. ACCELERADORS DE PARTÍCULES

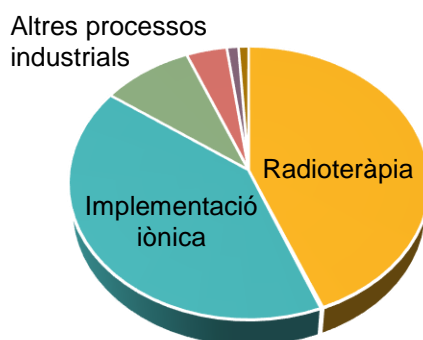
Els acceleradors de partícules són unes màquines que utilitzen els camps electromagnètics per accelerar partícules carregades a velocitats properes a les de la llum. D'aquesta manera funcionen com a microscopis que permeten observar en profunditat la matèria de forma molt precisa. La precisió dels acceleradors ve donada per l'energia que s'atorga a les partícules perquè la seva longitud d'ona sigui semblant a la grandària d'allò que es vol estudiar.

Els acceleradors duen a terme diferents experiments en funció d'allò que volen estudiar i investigar. Trobem dos tipus d'experiments:

- Col·lisions: en aquest tipus d'experiment, partícules de vida llarga són accelerades en sentits oposats i es fan col·lidir en un punt concret on es troben els detectors, per així poder estudiar i descobrir les noves partícules de vida curta resultants del xoc.
- Fonts de llum: aquestes acceleren partícules com electrons per produir llum de molt alta freqüència anomenada llum sincrotró, que és dirigida als detectors, on s'utilitza per estudiar i investigar la matèria.

Depenent del tipus d'experiment que es realitzi, trobem que els acceleradors poden estar destinats a l'estudi de qüestions físiques de partícules, com és el cas dels grans acceleradors, o com acceleradors més simples i petits poden estar destinats a altres camps de la ciència com la medicina i la tecnologia. Principalment podem distingir dos tipus d'acceleradors de partícules: els acceleradors lineals i els circulars.

Actualment existeixen més de 35.000 acceleradors a tot el món. En aquest gràfic circular es mostren classificats segons les seves aplicacions.



Gràfic 2 - gràfic de sectors sobre les aplicacions dels acceleradors

#### 4.1. Acceleradors lineals

Els acceleradors de partícules lineals estan compostos per tubs al buit disposats un darrere l'altre en línia i plaques a les quals se'ls aplica un camp elèctric altern. Així, les partícules carregades que viatgen pels tubs, en apropar-se a una placa i aplicar-li una polaritat oposada a la seva, fan que els feixos s'accelerïn fins a passar-la, tot seguit la polaritat de la placa s'inverteix per repel·lir les partícules i tornar-les a accelerar fins a la següent placa que repeteix el mateix procés. D'aquesta forma s'aconsegueix accelerar les partícules.

Fins ara hem observat com afectava el camp magnètic a una càrrega, però aquest tipus d'acceleradors treballen simultàniament amb camps elèctrics i magnètics. El resultat serà que la càrrega estarà sotmesa a una força electromagnètica. Per tant la càrrega rebrà dues forces:

$$\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E}$$

$$\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Tots dos camps influeixen sobre el valor de l'acceleració, i com que el feix té una massa, segons la segona llei de Newton, l'acceleració de les partícules serà:

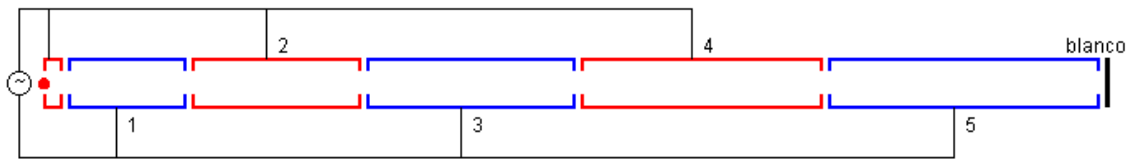
$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{F}_e + \vec{F}_m = m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_e + \vec{F}_m}{m}$$

Cal aclarir que el camp magnètic només influeix en la direcció i en el sentit del vector velocitat, però no en el seu mòdul. En canvi el camp elèctric sí perquè influeix sobre l'energia cinètica.

Per a mantenir les partícules carregades en una trajectòria recta, els acceleradors lineals utilitzen un sistema semblant al que utilitzen els selectors de velocitats, que combinen adequadament un camp elèctric i un camp magnètic. Utilitzen dues plaques paral·leles alimentades per un camp elèctric, amb variació de potencial variable, i un camp magnètic paral·lel a les plaques.



Imatge 10 - Esquema funcionament d'un accelerador lineal

En els detectors d'aquesta forma, si el camp magnètic i l'elèctric es mantenen constants, la velocitat de la partícula també. I la força total sobre les partícules és nul·la:

$$\vec{F}_e + \vec{F}_m = 0$$

$$\vec{F}_e = \vec{F}_m$$

$$Q \cdot \vec{E} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$v = \frac{E}{B}$$

En els acceleradors lineals, el camp magnètic es manté constant, però en canvi la variació de potencial augmenta proporcionalment a la longitud dels tubs, fent que les partícules augmentin de velocitat.

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

$\Delta V$ , és el variació de potencial elèctric

$d$ , és la longitud dels tubs

Finalment obtenim per a la velocitat obtinguda en cada tub, la relació:

$$v = \frac{\Delta V}{Bd}$$

Aquests tipus d'acceleradors es poden utilitzar com a:

- Primera etapa abans d'introduir les partícules en acceleradors circulars.
- En la medicina per a tractaments de radioteràpia, cirurgia radiodirigida i làser.
- En l'espal·lació <sup>5</sup> per generar neutrons.

L'accelerador lineal més llarg del món es troba a Stanford, EUA, i és el SLAC (Accelerador lineal de Stanford) amb 3km de llargària.



*Imatge 11 - Fotografia aèria del SLAC*

## **4.2. Acceleradors Circulars**

En aquests tipus d'acceleradors, les partícules segueixen trajectòries circulars i viatgen a velocitats properes a les de la llum mitjançant camps electromagnètics, per així obtenir energia. A diferència dels acceleradors lineals, proporcionen als feixos de partícules una major acceleració en menys espai. A més a més, poden mantenir una acceleració contínua i indefinida, però tenen l'inconvenient d'emetre radiació sincrotró, que provoca una pèrdua constant d'energia i d'altres tipus de problemes relacionats amb aquesta radiació.

Existeixen dos tipus d'acceleradors circulars: els ciclotrons i els sincrotrons. Tots dos segueixen els principis fonamentals de l'electromagnetisme basats en la llei de Lorentz, per a poder treballar amb partícules carregades.

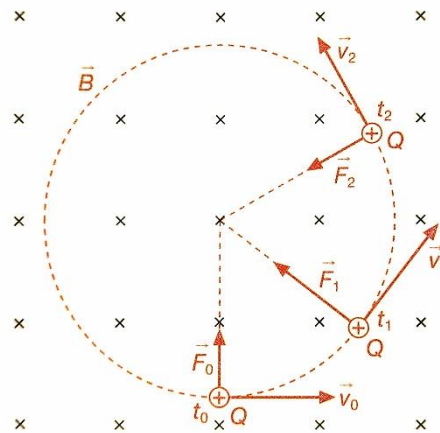
Fins ara hem vist com és la força magnètica sobre una càrrega a causa d'un camp magnètic. A continuació veurem com és el moviment resultant d'aquesta força i la trajectòria que fa que segueixin les càrregues.

Quan una càrrega entra en un camp magnètic uniforme amb una velocitat que no sigui paral·lela a aquest, la força que rep fa variar la direcció de la velocitat i consegüentment la trajectòria de la partícula. Actuant com una força centrípeta constant, fent que la partícula descriu un moviment circular uniforme. Aquest moviment és el que segueixen les partícules en els acceleradors circulars a partir d'imants molt potents.

---

<sup>5</sup> Espal·lació: física nuclear que estudia les propietats i els comportaments dels nuclis atòmics

Però el mòdul de la velocitat es manté constant i el mateix li passa al mòdul de la força, ja que la força sempre és perpendicular a la velocitat.



Imatge 12 - Trajectòria d'una càrrega en presència d'un camp magnètic

Com es mostra representat a la imatge, la força magnètica que rep la càrrega va sempre dirigida cap al centre de la circumferència descrita per la trajectòria. Aquest fenomen ens indica que el radi de la trajectòria és directament proporcional a la velocitat, i inversament proporcional a la càrrega i al camp magnètic extern. L'expressió del radi es dedueix aplicant la segona llei de Newton:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

$$|Q| v B \sin 90^\circ = m \cdot a_n$$

$$|Q| v B = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$r = \frac{m \cdot v}{|Q|B}$$

D'aquesta mateixa fórmula es pot determinar la velocitat constant que segueix la partícula, abans de ser accelerada:

$$v = \frac{r \cdot Q \cdot B}{m}$$

Cal recordar que el treball en aquest tipus de moviment és nul, ja que la velocitat es manté constant.

$$W = \Delta E_c$$

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} - \frac{m \cdot v_0^2}{2}$$

$$v_0 = v \text{ perquè } v \text{ és constant}$$

$$W = 0 \text{ i per tant } \Delta E_c = 0$$

$W$ , és el treball

$\Delta E_c$ , és la variació d'energia cinètica

És a dir, l'energia cinètica de les càrregues és constant. Per tant, si aïllem la velocitat de la fórmula de la segona llei de Newton i la substituïm en la de l'energia cinètica, podem expressar l'energia cinètica d'una partícula de la següent manera:

$$\begin{cases} |q| v B = m \cdot \frac{v^2}{r} \rightarrow v = \frac{r \cdot |Q| \cdot B}{m} \\ E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \end{cases}$$

$$E_c = \frac{m \cdot \left(\frac{r \cdot Q \cdot B}{m}\right)^2}{2}$$

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{QBr}{m}\right)^2$$

### 4.2.1. Ciclotró

Aquest tipus d'accelerador va ser inventat per Ernest Lawrence i el seu alumne M. Stanley Livingstone l'any 1934 a Califòrnia. Lawrence va plantejar la idea del ciclotró el 1929, i més tard Livingstone, basant-se en el seu plantejament, va construir exitosament un aparell capaç d'accelerar protons fins a  $13 \cdot 10^3 \text{ eV}^6$ , una energia molt petita. L'invent de Livingstone va ser el punt d'inflexió perquè Lawrence dissenyés un ciclotró que pogués proporcionar a les partícules  $12 \cdot 10^5 \text{ eV}$ , energia necessària perquè el seu nucli es desintegrés.

Amb aquest invent va aconseguir descobrir nous elements de forma artificial, fer nous avenços en la medicina, com per exemple les utilitats del ciclotró en el tractament de malalties cancerígenes, i consegüentment li va ser concedit el premi Nobel de Física.

Aquests tipus d'acceleradors estan formats per dues plaques semicirculars, conductores i buides, separades i enfrontades pels seus diàmetres, anomenades 'D' a causa de la seva forma. Estan connectades a un oscil·lador que canvia la polaritat de les plaques periòdicament, cosa que fa que es creï un camp elèctric oscil·lant just a la separació dels seus diàmetres. Aquest camp oscil·lant altern proporciona els impulsos necessaris a les partícules per a accelerar-les.

Tant damunt com sota de les plaques es troben els electroimants, amb càrrega negativa i positiva respectivament, que generen un camp magnètic uniforme en direcció perpendicular a les 'D' i per tant també el camp elèctric que aquestes generaven, aquest camp uniforme fa que les partícules descriguin trajectòries circulars.

El funcionament d'un ciclotró es basa en la injecció de ions<sup>7</sup> en el centre de l'accelerador, a l'espai entre les plaques. Sobre els ions actua un camp elèctric, que fa que s'accelerïn fins a una de les 'D'.

---

<sup>6</sup> eV: Energia acumulada per un electró en ser accelerat un volt. 1 eV equival a  $1,78 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

<sup>7</sup> Ions: partícules amb càrrega elèctrica. Un ió amb càrrega positiva és un catió i un ió amb càrrega negativa és un anió.

En arribar a la 'D' amb una velocitat determinada, proporcionada pel camp elèctric, les partícules reben una força magnètica que els fa descriure una trajectòria circular, perquè el vector velocitat és perpendicular al camp. A més a més, aquest camp magnètic fa que la velocitat sigui la mateixa en mòdul durant tot el recorregut, fins que surten de la 'D' i es produeix una inversió de polaritat del camp elèctric, que augmenta la velocitat de les partícules altra vegada i les introdueix en l'altra 'D'.

En entrar en aquesta, tornen a rebre una força magnètica que els fa descriure una trajectòria semicircular però amb un radi més gran que l'anterior, ja que la velocitat ha augmentat, però es mantindrà constant fins a sortir de la 'D'. Aquest procés es repetirà continuadament, la qual cosa farà que els ions incrementin la velocitat fins a assolir el radi màxim, limitat pel ciclotró.

La velocitat i el radi són directament proporcionals i es poden determinar segons l'expressió de la trajectòria anterior:

$$r = \frac{mv}{QB}$$

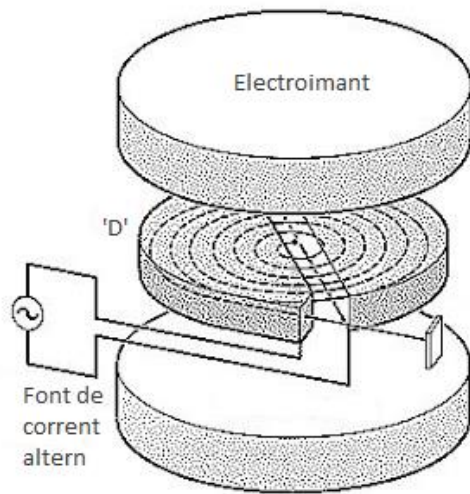
$$v = \frac{rQB}{m}$$

Aleshores, l'energia cinètica de la partícula quan surt de les 'D' és:

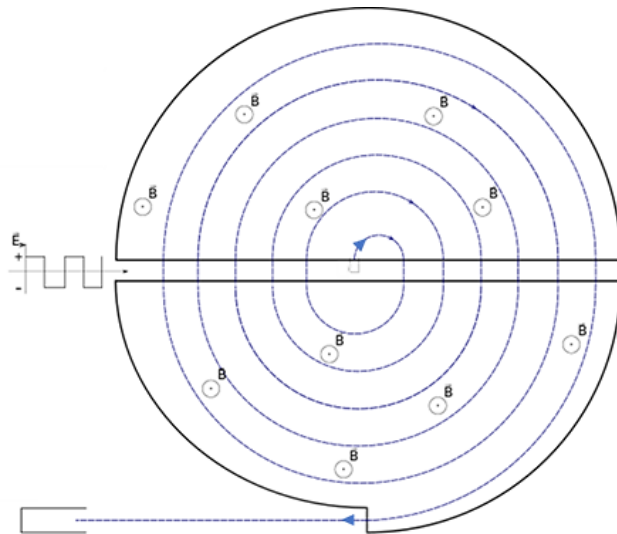
$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_c = \frac{(rQB)^2}{2m}$$

Per tant, el ciclotró és una espècie d'accelerador lineal en forma d'espiral i que, en comptes de tenir tubs, té dues plaques i camps magnètics que permeten a les partícules seguir una trajectòria corbada en comptes de recta. També té les seves limitacions, ja que els ciclotrons, en arribar a velocitats molt altes, deixen de funcionar, la qual cosa va fer necessària la construcció d'altres aparells més potents, així va acabar desenvolupant-se el sincrotró.



Imatge 13 - Esquema d'un ciclotró



Imatge 14 - Esquema del funcionament d'un ciclotró

El ciclotró té diverses aplicacions, ja que permet accelerar protons fins a aconseguir velocitats molt altes. Aquests s'utilitzen:

- En medicina, en la producció de matèria radioactiva com els radioisòtops artificials que permeten el diagnòstic de tumors cancerígens en la producció de materials radioactius. També permeten l'anàlisi del flux sanguini, del metabolisme de proteïnes, glucosa i l'estat dels neuro-receptors.
- Com a partícules prèviament accelerades que s'introdueixen en acceleradors més potents.

### 4.2.2. Sincrotró

L'any 1945, Edwin McMillan, químic nuclear als Estats Units i el físic Veksler a la Unió Soviètica van desenvolupar simultàniament un seguit d'idees per a la millora del ciclotró, que va acabar suposant el desenvolupament del sincrotró. Però va ser finalment McMillan qui va acabar construint el primer sincrotró.

Un sincrotró és un accelerador que no és realment circular, és a dir, alterna trams circulars amb altres de rectes fins a tancar-se, formant així un anell tiroïdal.

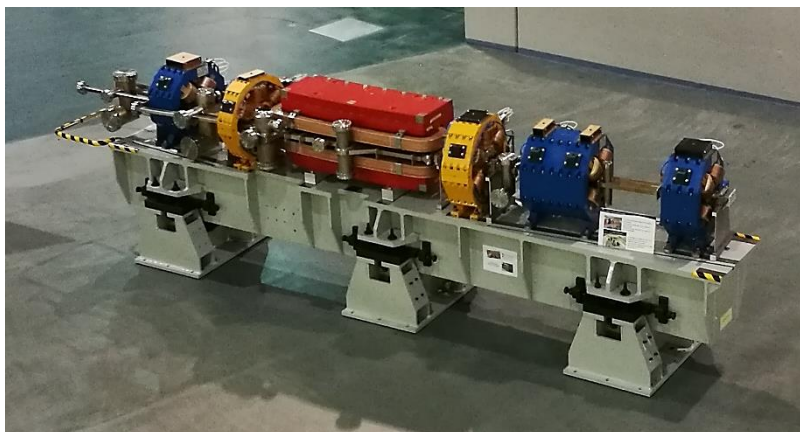
Tots els sincrotrons tenen un seguit de components comuns que són:

- Font de partícules, aquest element és l'encarregat de subministrar als acceleradors les partícules que seran accelerades posteriorment.
- Acceleradors auxiliars. Els sincrotrons funcionen amb altes energies i per això es requereixen acceleradors que accelerin les partícules prèviament abans de ser introduïdes. Els sincrotrons poden tenir prèviament diversos acceleradors auxiliars, els primers acostumen a ser lineals i després d'aquests podem trobar altres acceleradors circulars, anomenats boosters que, com hem mencionat anteriorment, són més potents i permeten tornar a accelerar les partícules per finalment ser introduïdes al sincrotró i poder operar amb elles.
- Cavitats de radiofreqüència. Una cavitat és una peça metàl·lica buida en la qual hi ha un camp elèctric de molta intensitat que canvia de polaritat. La funció principal és accelerar les partícules, ja que aquestes perden energia perquè en girar emeten llum i sense les cavitats s'anirien frenant i finalment perden. Perquè aquest procés sigui possible i l'energia que reben màxima, les partícules han de passar per la cavitat de radiofreqüència en paquets i de forma sincronitzada amb el canvi de polaritat. D'aquesta sincronització prové el nom de "sincrotró".



Imatge 15 - Cavitat de radiofreqüència ALBA

- Imants superconductors. Al llarg de tot el recorregut dels sincrotrons hi ha disposats diferents tipus d'imants molt potents que tenen dues funcions principals. La primera, produir un camp magnètic no uniforme, que permet que el feix de partícules es mantingui enfocat, en altres paraules, els manté agrupats. Aquests imants s'anomenen quadrupolars i sextupolars. I la segona consisteix a crear un camp magnètic uniforme i perpendicular a la trajectòria del feix, la qual modifica perquè pugui girar i descriure una trajectòria corba. Aquest tipus d'imants són bipolars i reben el nom d'imants corbadors.
- Sistema de buit, pretén extreure la matèria que hi ha en els tubs dels acceleradors, per deixar circular lliurement les partícules i evitar col·lisions amb molècules de gas. Els grans acceleradors requereixen un buit gairebé absolut per al seu correcte funcionament. El buit s'aconsegueix en diverses etapes, unes es realitzen a l'exterior de l'accelerador, i d'altres al mateix accelerador, ja que hi ha màquines de buit instal·lades al mateix accelerador.



Imatge 16 – Bugia ALBA que suporta els imants i la cambra de buit

- Sistema de refrigeració. Els acceleradors treballen amb altes energies, i com que cap màquina és perfecta, gran part es perd en forma de calor. Són les altes temperatures les que suposen un risc per a les instal·lacions. És per aquest motiu, que els sincrotrons disposen d'un sistema de canonades que permet refredar els dispositius, evitant així els problemes ocasionats per la calor.
- Detectores: són els dispositius capaços de percebre, a partir de sensors, partícules d'alta energia produïdes en les reaccions dels acceleradors. Segons el tipus d'experiment que es realitzi i segons el que es vulgui estudiar, es requereix un tipus de detector determinat.

- Xarxa de computació: està formada per un conjunt d'equips processadors de dades. Són imprescindibles per als científics perquè són els responsables d'emmagatzemar la informació que processen els detectors i també la font de la qual poden extreure tota la informació que necessiten. Aquesta xarxa funciona amb internet d'alta velocitat.



*Imatge 17 - Detector amb xarxa de computació de l'ALBA*

A més a més, s'ha de tenir en compte que, un cop accelerades les partícules i introduïdes al sincrotró, trobem altres aparells que les acceleren a partir d'impulsos elèctrics, tal com ho fan els acceleradors lineals. Cal recordar que l'acceleració de les partícules s'aconsegueix aplicant un camp elèctric altern a unes plaques. Primer atrauen les partícules, ja que se'ls aplica una polaritat oposada al feix, i un cop surten de la placa s'inverteix per repel·lir les partícules, i accelerar-les fins a la següent placa que repetirà el procés.

A diferència dels acceleradors lineals, com que el sincrotró es tracta d'un circuit tancat, el procés d'acceleració es repetirà indefinidament. Tot i això, existeixen pèrdues d'energia, que són contrarestades per les cavitats de radiofreqüència.

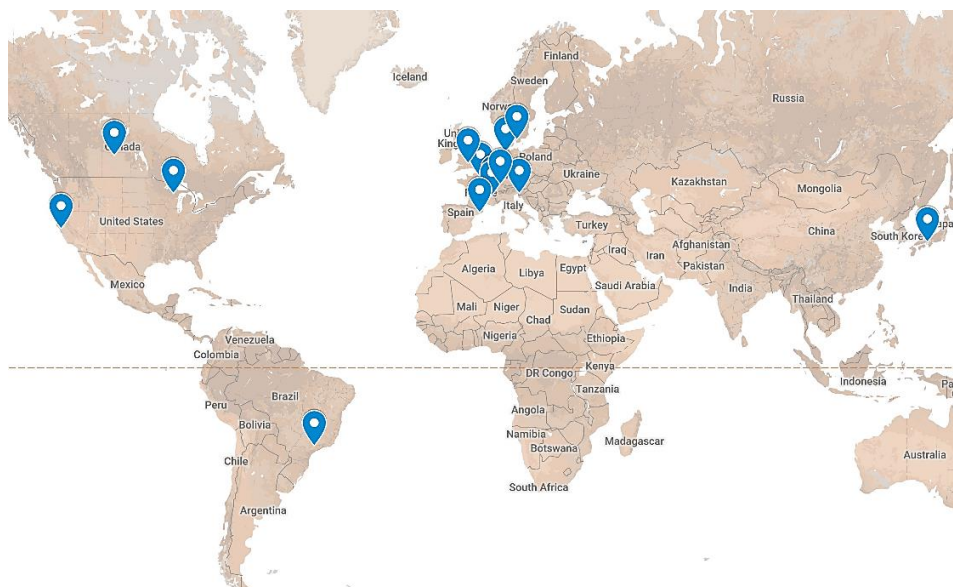
Així mateix, per al correcte funcionament del sincrotró, necessitem sincronitzar, agrupar i controlar la trajectòria dels feixos de partícules a partir de camps magnètics. Aquests hauran d'augmentar sincronitzadament amb l'acceleració de les partícules.

Un cop les partícules són introduïdes al sincrotró i accelerades, s'utilitzaran com a fonts de llum o col·lisionadors.

Actualment existeixen 14 instal·lacions d'acceleradors sincrotrons arreu del món. A la taula següent es mostren els acceleradors que hi ha avui dia i on es troben.

<b>Sincrotrons al món</b>	
<i>Laboratori</i>	<i>Localització</i>
LHC, Gran Col·lisionador d'Hadrons	CERN a Ginebra, Suïssa
DESY, Sincrotró Alemany d'Electrons	Hamburg, Alemanya
SOLEIL, Sincrotró Soleil	París, França
ESRF, Laboratori Europeu de Radiació Sincrotró	Grenoble, França
APS, Font Avançada de Fotons	Argonne, EE.UU
ALS, Font Avançada de Llum	Berkeley, EE.UU
ELETTRA, Font de Llum Sincrotró Elettra	Trieste, Itàlia
SPring8, Anell de Superfotons a 8GeV	Hyogo, Japó
SLS, Font de Llum Suïssa	Institut Paul Scherrer, Suïssa
CLS, Font de Llum Canadenc	Saskatchewan, Canadà
LNLS, Laboratori Nacional de Llum Sincrotró	Campinas, Brasil
MAX-Lab, Laboratori IV MAX	Universitat de Lund, Suïssa
DIAMOND, Font de Llum Diamond	Didcot, Regne Unit
ALBA	Barcelona, Espanya

Taula 1 - Acceleradors sincrotró al món



Imatge 18 - Mapamundi de sincrotrons al món.

Per últim, afegir que el Comitè Internacional per Futurs Acceleradors està treballant en un nou accelerador, previst per a l'any 2030. Es tractarà del sincrotró més gran i potent, que superarà al LHC de Ginebra. El projecte s'anomena FCC, Futur Col·lisionador Circular. Actualment es troba en fase de disseny, però se'n coneixen alguns detalls com per exemple la seva longitud, que serà d'entre 80 i 100 km de circumferència, que permetrà obtenir energies de 13 fins a 100 TeV. L'objectiu d'aquesta instal·lació colossal serà produir milers de milions de bosó de Higgs per estudiar-los amb més profunditat i entendre millor les seves propietats, així com trobar indicis de partícules de matèria fosca.

## 5. LHC

El CERN va aprovar la construcció del LHC el 16 de desembre de 1994, i ha estat finalment posat en funcionament el 10 de setembre de 2008. LHC són les sigles del Gran Col·lisionador d'Hadrons. Es troba a la frontera entre França i Suïssa, concretament a Ginebra, a 175 m sota terra.

Es tracta de l'accelerador de partícules més gran, potent i complex del món. La circumferència del seu anell és de 27 km de longitud i 3 m de diàmetre. Al Gran Col·lisionador d'Hadrons, els experiments que es duen a terme són col·lisions de protons. Aquest sincrotró utilitza la tecnologia més sofisticada disponible avui en dia, de la qual cal destacar:

- Una super xarxa de dades, que processa, analitza i emmagatzema 15 petabytes de dades en un any. Dotat, a més a més, d'un sistema que rep el nom de trigger, capaç de seleccionar els resultats importants dels detectors, i rebutjar els que no són d'interès per als científics.
- Més de 9.300 electroimants superconductors, que acceleren, dirigeixen i mantenen units els feixos de protons. Aquests imants són refrigerats per un sistema de 10T d'heli líquid, l'element més fred que existeix, que refreda els imants fins a 1,9 K.
- Un sistema ultra-alt de buit, que aconsegueix una pressió interna dels anells de  $10^{-13}$  atm, pròxima a la pressió de l'espai exterior.

- 4 dels majors detectors mai construïts:
    - ATLAS, Aparell Tiroidal de l'LHC, és el més gran i està format per set pisos.
    - CMS, Solenoide Compacte per a Muons, és el més pesat de tots.Ambdós detectors s'encarreguen d'investigar les forces fonamentals de l'univers i la naturalesa bàsica de la matèria.
  - ALICE, aquest analitza les col·lisions dels nuclis per estudiar els quarks i gluons, partícules i bosons que van existir immediatament després del Big Bang.
  - LHCb, pretén explicar per què existeix un univers amb més matèria que antimatèria.
- 4 acceleradors auxiliars principals. Com que es tracta d'un accelerador tan potent, les partícules amb les quals treballa han de ser introduïdes a altíssimes velocitats. Per a aconseguir-ho, s'utilitzen un seguit d'acceleradors previs. Aquests són:
    - Linac2. És un accelerador lineal i el punt de partida dels protons que s'utilitzen en els experiments del LHC. La font dels protons és una ampolla de gas d'hidrogen. Aquest proporciona als feixos 50MeV.
    - PSB, El Sincrotró de Protons Booster. És el segon accelerador pel qual viatgen les partícules. Està format per quatre anells de sincrotró superposats uns sobre els altres, que augmenten l'energia de cada protó fins a 1,4 GeV.
    - PS, Sincrotró de Protons. Format per un anell de 628 m de circumferència. Rep els feixos de protons del sincrotró PSB i els proporciona fins a 25GeV.
    - SPS, Super Sincrotró de Protons. Es tracta de la segona màquina més gran del CERN amb un anell de 7 km de longitud i de la quarta i última fase de l'acceleració. Ha estat dissenyat per augmentar l'energia a 450 GeV, energia necessària per poder finalment introduir els protons a l'enorme LHC.

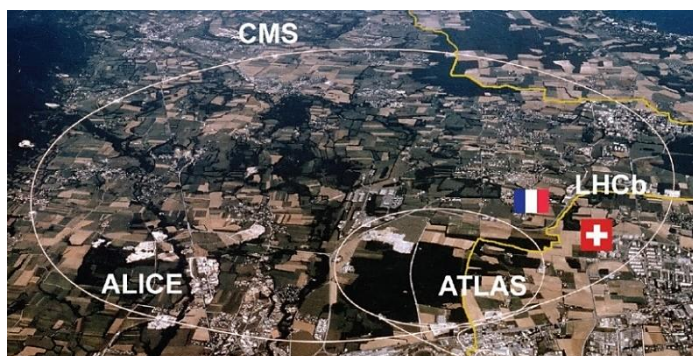
El LHC no està format realment per un sol anell circular sinó per dos, disposats paral·lelament un al costat de l'altre, pels quals es fan circular feixos de protons en sentits oposats.

Les partícules, que han estat prèviament accelerades en els acceleradors auxiliars, són introduïdes als dos tubs que formen el sincrotró. En aquests viatgen feixos de bilions de protons a velocitats gairebé iguals a les de la llum. Als protons se'ls apliquen energies de l'ordre de 7 TeV, les quals permeten als protons donar 11.000 voltes per segon.

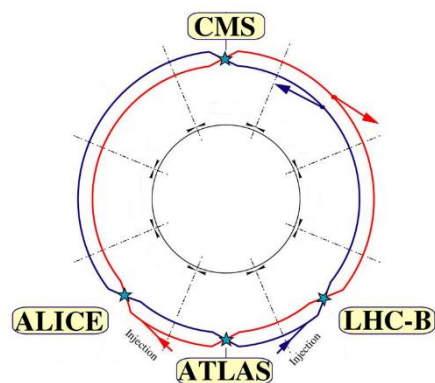


Imatge 19 - Interior accelerador LHC

Els feixos convergeixen en quatre punts del recorregut i col·lideixen 40 milions de vegades per segon. Les col·lisions transformen les partícules en paquets d'energia que es tornaran a agrupar per donar lloc a altres tipus de partícules. En aquests quatre punts estan distribuïts els detectors que s'encarregaran d'analitzar els resultats de les col·lisions. Algunes d'aquestes partícules resultants mai han estat observades abans i només han estat presents durant els primers instants de l'Univers.



Imatge 21 – Fotografia aèria LHC



Imatge 20 - Esquema LHC

Un dels principals objectius al LHC és intentar arribar al fons de moltes qüestions fonamentals, a partir de recrear les condicions del Big Bang, com per exemple estudiar com es va formar l'Univers descobrint el que va passar en el primer nano segon després del Big Bang i quines són les partícules fonamentals responsables d'aquesta explosió. També volen trobar la partícula relacionada amb la matèria fosca per així tractar de comprendre-la, ja que forma la major part de la massa de l'univers i encara la desconeixem.

## 5.1. CERN

Les sigles CERN fan referència a l'Organització Europea d'Investigació Nuclear. Es tracta del laboratori de física de partícules més gran i important que existeix. Aquest laboratori internacional es va fundar l'any 1954 a Ginebra i actualment hi treballen més de 25.000 científics de tot el món. Més de 40 països en són membres o formen part d'aquest gran centre de cooperació internacional.

Aquest complex està format per centenars d'edificis incloent: laboratoris, tallers, oficines, i el LHC i les instal·lacions que complementen al sincrotró. Amb l'objectiu de buscar respostes a qüestions de la física fonamental sense resposta, com l'origen de l'Univers i els components bàsics de la matèria.



Imatge 22 - Logotip CERN



Imatge 23 - Localització del CERN a Europa

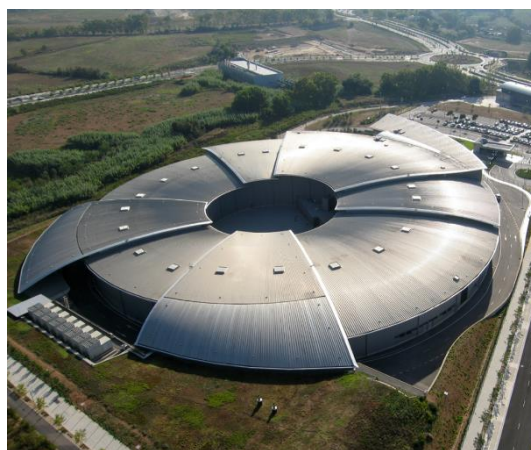
## 6. ALBA

L'ALBA és el centre científic més important, modern i avançat d'Espanya i l'únic sincrotró del país. Aquest té un diàmetre de 268 m d'anell, situat dins un búnquer de formigó. Es troba ubicat a Cerdanyola del Vallès, Barcelona.

És gestionat pel CELLS, Consorci per la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum Sincrotró i finançat per la Generalitat de Catalunya i el Govern d'Espanya. Amb un cost inicial de 200M€, van aprovar el projecte de l'ALBA l'any 2003. La seva construcció es va iniciar el 2006, però no va ser fins al 2012 que finalment es va posar en funcionament, i es va dur a terme el primer experiment. Des d'aleshores que ha estat produint llum sincrotró i unes despeses anuals que ronden els 20 milions d'euros.



Imatge 24 - Vista aèria del complex ALBA



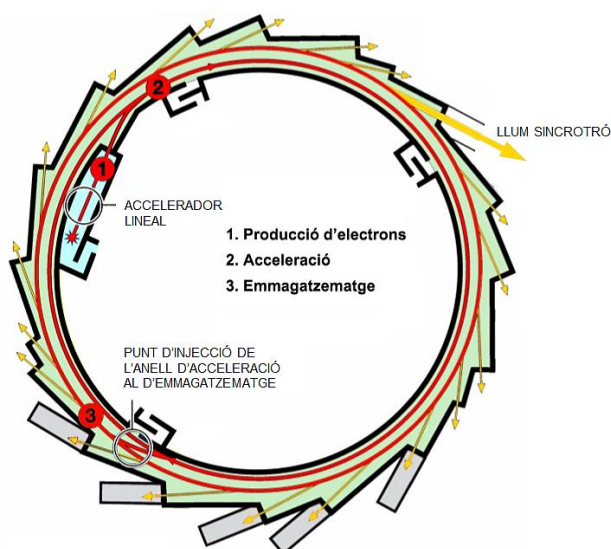
Imatge 25 - Vista aèria de l'ALBA

Actualment l'ALBA disposa de 200 treballadors i més de 1.300 investigadors a l'any, que hi acudeixen per realitzar les seves investigacions. Els investigadors a l'ALBA són públics i privats. Aleshores en els projectes públics, els investigadors podran accedir a les instal·lacions a partir de convocatòries o excel·lències, obtingudes a partir de l'elecció de les seves investigacions en funció de la qualitat científica de les seves propostes, i consegüentment les investigacions que realitzin seran de domini públic. Però també hi poden accedir de forma privada, on empreses o indústries privades paguen i hi accedeixen segons la demanda. A més els resultats que aquests obtenen són confidencials.

Cal ressaltar la implicació en l'àmbit social de l'ALBA, que obre les portes del seu centre dos cops l'any a 2.130 visitants per a donar-los a conèixer el món dels acceleradors de partícules, el qual es desconeix i que aprenguin més sobre l'ALBA. A partir d'experiments, demostracions i jocs organitzats per més de 100 voluntaris.

L'accelerador ALBA és un sincrotró accelerador d'electrons on es genera llum sincrotró. La llum sincrotró és el nom que rep la radiació electromagnètica que conté un seguit de longituds d'ona determinades. És a dir llum que a l'espectre electromagnètic va des dels infrarojos fins als raigs X, passant per la llum visible. La seva característica principal és la gran brillantor que posseeix, la qual s'utilitza per analitzar l'estructura atòmica i molecular de la matèria i entendre les seves propietats, funcionant com una mena de microscopi gegant molt potent.

Per produir llum sincrotró els electrons han de viatjar a velocitats properes a les de la llum. El procés comença a l'accelerador lineal LINAC, que és on es crea el feix, i s'accelera fins a 100 MeV. El feix es crea extraient els electrons d'un metall que s'escalfa fins a 1.000 °C i sota 90KeV. Després són injectats al segon accelerador, l'Anell Propulsor, que és un accelerador circular amb una circumferència de 250 m, que, en 160 ms, torna a accelerar els electrons fins a una energia de 3.000MeV. En aquest instant els electrons s'injecten en un tercer accelerador, l'Anell d'Emmagatzematge. Aquest té un anell de 268 m i es tracta de l'accelerador principal de l'ALBA, on els feixos viatgen a velocitats properes a les de la llum, i poden arribar a donar 1.000.000 voltes per segon.

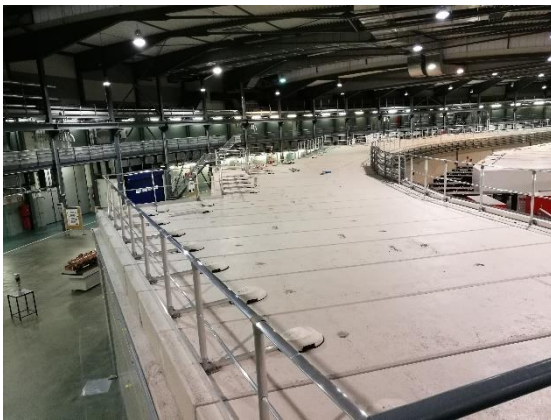


Imatge 26 - Esquema funcionament ALBA

Per poder accelerar els electrons a aquestes velocitats, les instal·lacions exigeixen un sofisticat sistema de control i de buit. Format per: 664 imants que proporcionen un camp magnètic de fins a 1,4 T, i un sistema de buit que fa que els anells estiguin a pressions de  $10^{-10}$  mbar, igualant la pressió de l'espai exterior com al LHC.



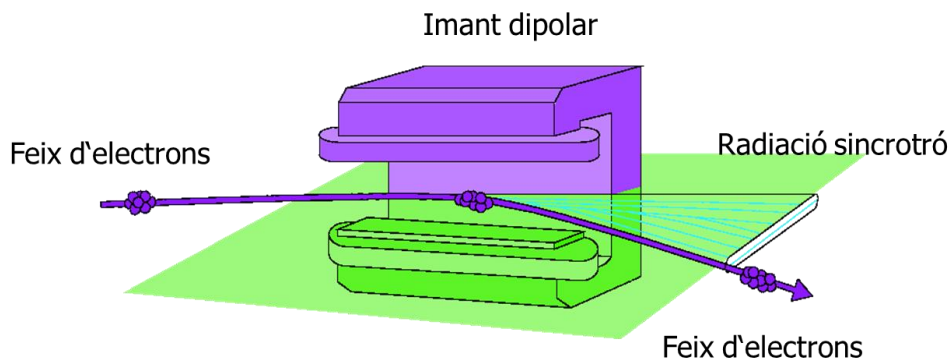
*Imatge 27 – Interior accelerador ALBA*



*Imatge 28 – Estructura de formigó que cobreix sincrotró ALBA*

Quan els electrons circulen a velocitats pròximes a les de la llum, amb energies tan altes i seguint trajectòries circulars, emeten energia en forma de llum, aquesta rep el nom de llum sincrotró.

Quan els electrons emeten llum sincrotró, els camps magnètics mantenen la trajectòria circular dels feixos gràcies a la força de Lorentz, però no tenen el mateix efecte sobre la llum, que es desvia perpendicularment a la trajectòria dels electrons a les corbes, perquè no té càrrega i per tant la força de Lorentz no té cap efecte sobre aquesta.



Imatge 29 - Producció llum sincrotró

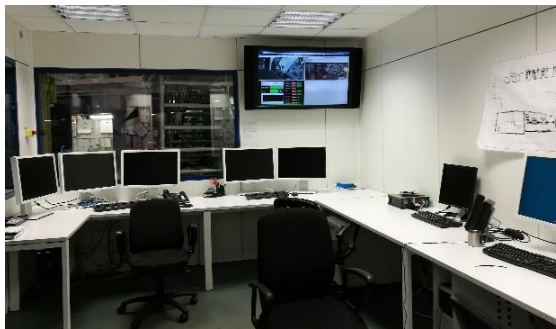
La llum emesa pels feixos d'electrons és polsada, i és desviada fins a les línies de llum experimentals, col·locades fora del búnquer de formigó, tangencialment a l'accelerador.

A les línies de llum es troba el conjunt d'elements òptics que permeten enfocar la llum a partir de miralls i monocromadors que separen l'ampli conjunt de longituds d'ona que formen la llum sincrotró, i selecciona l'adiant per a cada experiment. S'utilitzen 3 tècniques segons la finalitat de l'experiment que es realitzi:

- Tècniques de difracció: en aquest les ones es desvien de la seva direcció de propagació en trobar obstacles. D'aquesta forma s'obtenen patrons que determinen l'estructura dels materials, ja que l'ona difractada dóna informació sobre l'obstacle que l'ha difractat.
- Tècniques de microscòpia: obté imatges dels materials i molècules. Per poder conèixer la seva estructura i propietats.
- Tècniques de espectroscòpia: s'analitza la llum sincrotró que incideix a la mostra i la que surt, per determinar les propietats a escala microscòpica dels materials.



Imatge 30 – Línia de llum ALBA



Imatge 31 - Interior cabana de control ALBA



Imatge 32 – Interior línia de llum ALBA

Tot seguit, la llum és recollida pel detector on es troba la mostra a analitzar. El detector analitza la interacció de la mostra amb la llum sincrotró. Hi ha molts tipus de detectors, i cadascun especialitzat per a cada tipus d'experiment. Actualment l'ALBA consta de 8 línies de llum i tres en fase de construcció. Les línies de llum operatives són:

- BL01-MIRAS: És de les més potents i s'utilitza per analitzar la composició química dels materials, a partir d'experiments de microscòpia.
- BL04-MSPD: Treballa entre 8 i 50 keV. S'utilitza per determinar l'estructura de materials, a partir de les dades obtingudes mitjançant la difracció d'ona. Amb aplicacions en la ciència de materials, la geologia i la farmacologia.
- BL09-MISTRAL: Destinada a obtenir imatges tridimensionals per conèixer l'estructura de molècules, normalment virus. Té aplicacions en microbiologia i en biologia cel·lular.
- BL11-NCD: S'encarrega de la difracció en estructures a gran escala com teixits i fibres. Aplicable en biologia i en química orgànica.

- BL13-XALOC: Aquesta línia utilitza la difracció en molècules perfectes, repetides i ordenades, per a obtenir la seva estructura geomètrica. Les seves aplicacions principals són en la biologia molecular i en la bioquímica.
- BL22-CLAESS: Utilitza l'espectroscòpia per proporcionar energia suficient als àtoms i calcular l'energia que no absorbeixen i així estudiar els canvis en la seva estructura. Té aplicacions en la física i en la química analítica.
- BL24-CIRCE: Es divideix en dues estacions independents, dedicades a la microscòpia i a l'espectroscòpia. Aquesta varietat d'experiments permet obtenir imatges de l'estructura a escala atòmica i determinar les propietats dels materials, respectivament. Amb aplicacions en física, en química i en nanotecnologia<sup>8</sup>.
- BL29-BOREAS: També amb dues estacions, dedicades totes dues a experiments de difracció, per estudiar les propietats magnètiques dels materials. Té aplicacions en magnetisme i en nanotecnologia.

Les línies de llum en fase de construcció són:

- BL20-LOREA: Utilitzarà l'espectroscòpia per a determinar l'estructura electrònica dels sòlids metàl·lics. Amb aplicacions en la física i en la química.
- BL06-XAIRA: S'encarregarà de la difracció de raig X, per l'estudi i anàlisi de l'estructura de cristalls petits. Amb aplicacions en la química, en la geologia, en la física i en la ciència de materials.
- BL16-NOTOS: Aquesta línia utilitzarà tècniques de difracció i espectroscòpia de raigs X. Amb aplicacions futures en ciència de materials, en química i en enginyeria.

---

<sup>8</sup> Noanotecnologia: ciència que treballa amb materials i estructures de magnituds mesurables en nanòmetres.



Imatge 34 - Detector ALBA



Imatge 33 - Detectores ALBA

Per últim, hi ha una cabana de control, on els ordinadors controlen tot el procés i recullen les dades obtingudes pels detectors. Aquestes són processades i analitzades pels científics de cada experiment.

Com hem vist anteriorment, els diferents experiments que es realitzen a l'ALBA, tenen moltes i diverses aplicacions, aquestes acostumen a estar associades amb projectes de I+D<sup>9</sup> que requereixen la llum sincrotró, com per exemple en l'àmbit de la:

- Ciència de materials
- Nanotecnologia
- Biologia
- Química
- Física
- Medicina

---

<sup>9</sup> Projectes d'investigació en ciència, utilitzats per al desenvolupament en ingenieria. Per adquirir més coneixements.

## 7. PART EXPERIMENTAL

### 7.1. Objectius

A partir de la teoria explicada sobre els processos físics que es donen en els acceleradors i la visita, es va decidir construir una maqueta d'un accelerador de partícules que simulés el funcionament del sincrotró ALBA, amb l'objectiu de:

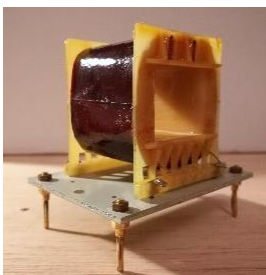
- Aconseguir construir una maqueta que acceleri una esfera a partir d'un camp magnètic de forma sincronitzada.
- Observar com, depenent de la massa de l'esfera accelerada i del camp magnètic amb què treballem, la velocitat de l'esfera seria una o una altra.

### 7.2. Material

La taula següent mostra el material necessari per a la construcció del projecte:

Material	Dimensions (cm)	Quantitat	Cost
Tauler de fusta	60x80x20	1	15,20 €
Mànega transparent	1,2 Ø x120	1	1 €
Bobines de coure	5x6	2	0 €
Tub PVC	1,8 Ø x5,5	1	0,10 €
Esferes metàl·liques	1 / 0,7 / 0,4 Ø	3	0 €
TOTAL			16,30 €

Taula 2 - Material per a la construcció



Imatge 35 - Bobina



Imatge 37 - Esferes



Imatge 36 - Secció tub de PVC i mànega de plàstic

Material necessari en la creació del programa :

Material	Quantitat	Cost
Placa Arduino UNO	1	7,49 €
Fotodíode	1	3,30 €
LEDs infraroig	2	2 €
LEDs	3	1,46 €
Cables	80	2,34€
Protoboard	1	0 €
Relé	2	3,40 €
Font d'alimentació	2	0 €
<b>TOTAL</b>		<b>19,99 €</b>

Taula 3 - Material per a la programació del projecte



Imatge 40 – Protoboard, cables,  
Placa Arudino i LEDs



Imatge 39 - Relé





Imatge 38 - Font d'alimentació

A continuació es mostren les eines utilitzades en la construcció:

Eina	Fotografia
Llapis	A yellow pencil.
Tornavís	A screwdriver with a red handle.
Cargols	A box of SPIAX 3x16 screws.
Pistola de silicona	A black and red hot glue gun.
Serra d'arquet	A hand saw with a red handle.
Cinta aïllant	A roll of black electrical tape.
Regle	A wooden ruler with a scale from 0 to 15 cm.

Taula 4 - Eines utilitzades en l'elaboració del projecte

A la taula següent es mostren les eines utilitzades en la programació:

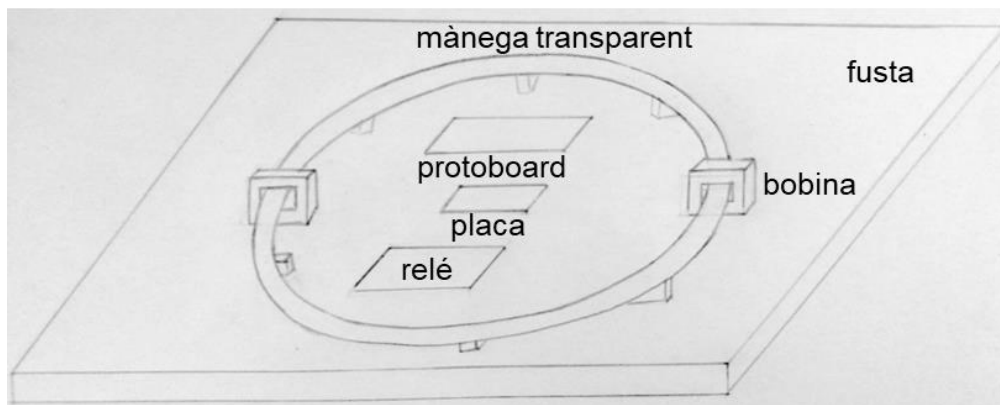
Eina	Fotografia
Ordenador	
Arduino (Programa)	

Taula 5 - Eines de programació

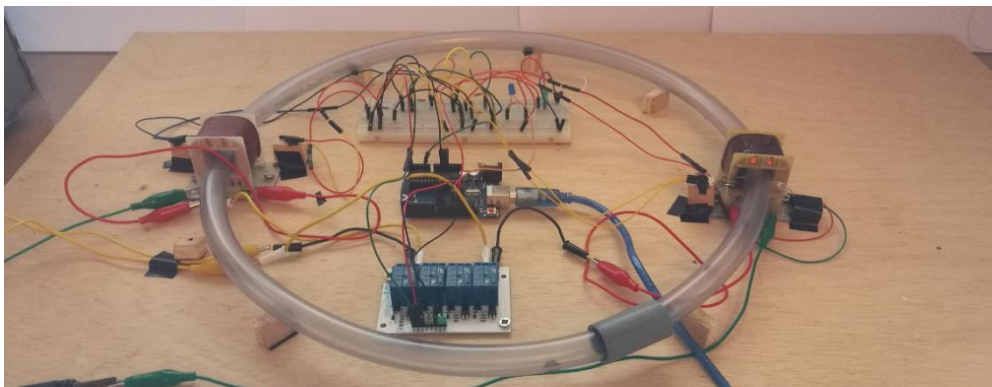
El cost total de les eines ha estat nul, ja que disposava de la majoria i el centre em va deixar aquelles que no tenia.

### 7.3. Disseny

El disseny del prototip està basat en els acceleradors de partícules circulars, concretament en els sincrotrons que treballen amb llum sincrotró i especificant encara més, en l'ALBA, ja que és la part principal del treball i perquè els altres models eren inviables. També m'he inspirat en diversos dissenys construïts per diferents persones, fins finalment arribar a un disseny propi.



Imatge 41 – Croquis a mà alçada de la maqueta



Imatge 42 - Imatge de la maqueta

## 7.4. Procediment

La idea d'aquest projecte està basada en els experiments de l'ALBA, que acceleren en els anells, a partir d'imants molt potents, partícules a la velocitat de la llum.

Així doncs, la maqueta l'he construït sobre una làmina de fusta, i els materials principals que he utilitzat han estat: una mànega transparent per a l'estructura principal, per on es faran circular esferes de diferents mesures, i dues bobines situades a extrems oposats de la circumferència que, gràcies a un circuit electrònic que he hagut de dissenyar, impulsaran les esferes.

Per tant, el procés de construcció l'he dividit en tres parts:

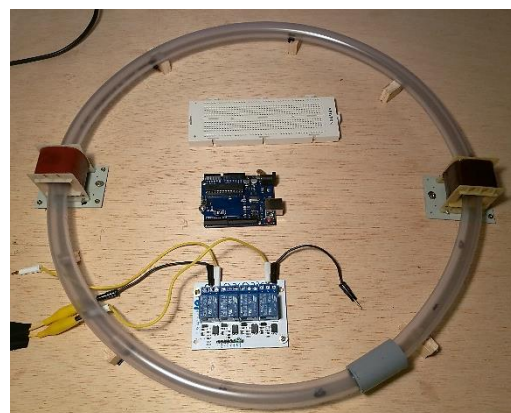
- Construcció de l'estructura
- Creació del programa
- Instal·lació dels circuits

### 7.4.1. Construcció de l'estructura

La construcció la vaig dur a terme al centre, ja que allà podia disposar de totes les eines necessàries, a més del consell dels professors.

Primerament, vaig dibuixar sobre la fusta el lloc on havien d'anar les peces segons el croquis que havia fet i vaig fer els forats corresponents per a poder-les-hi fixar.

Tot seguit vaig col·locar la placa arduino, la protoboard i el relé. Només faltava la bobina i la mànega, i abans de caragolar-les, vaig haver de tallar uns taquets petits de fusta per a elevar el tub a l'alçada de la bobina. Vaig enganxar els taquets amb la pistola de silicona i, un cop passat el tub per la bobina, vaig col·locar-lo a sobre.



Imatge 43 - Estructura accelerador

La idea inicial era fer funcionar la maqueta amb una sola bobina, però el principal problema va ser que no donava el suficient impuls i, per tant, vaig decidir afegir-ne una altra, cosa que va suposar tornar a repetir el procediment de construcció tenint en compte les dues bobines. Un cop solucionat, vaig tancar el tub unint els dos extrems, utilitzant un tub de PVC.

#### 7.4.2. Creació del programa

Un cop l'estructura de l'accelerador ja estava muntada, faltava crear el programa perquè funcionés. Per a crear el programa, l'aplicació que vaig utilitzar va ser Arduino, ja que havia treballat amb ella anteriorment i tenia clar els principis bàsics per a utilitzar-lo. Però, tot i saber utilitzar el programa, vaig haver de documentar-me i aprendre més per a poder desenvolupar el codi que volia fer, que anava més enllà dels conceptes que havia après a l'ESO.

El programa calia que s'encarregués de controlar la desactivació de les bobines cada vegada que detectessin una de les esferes, que permetria l'acceleració, i activaria un LED cada cop. A més, actuaria de cronòmetre calculant el temps en què l'esfera dóna una volta.

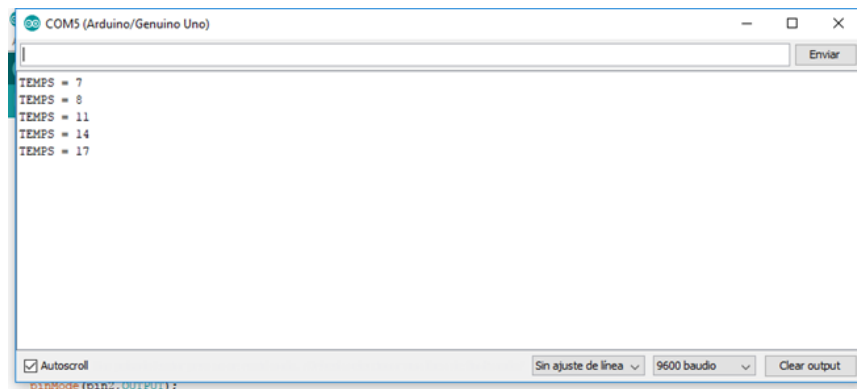
La creació del codi va ser una mica complicada, perquè requeria detectar les esferes i calcular el temps simultàniament, per tant vaig dividir el procés en dues parts.

La primera part va consistir a crear un programa senzill, en el qual uns fototransistors detectessin la llum infraroja que els enviaven uns díodes LED. Després vaig decidir que, cada cop que aquest senyal es tallés, s'havia d'activar una llum i desactivar una entrada. Aquesta entrada estava connectada als relés que activarien i desactivarien les bobines.

La segona part va ser la més complicada, vaig voler treballar sobre el primer programa i afegir els codis que s'encarregarien de controlar el temps, utilitzant la funció "millis()"<sup>10</sup>, que mostraria a la pantalla de l'ordinador el temps exacte en què l'esfera tallés la llum infraroja en una de les bobines, la qual cosa em permetria calcular el període posteriorment.

---

<sup>10</sup> Millis: funció del programa arduino que compta el nombre de mil·lisegons d'ençà que el programa s'ha iniciat.



Imatge 44 - Pantalla que mostra el temps

Finalment el codi del programa va ser:

```
const int analogInPin = A1; // Pin per la lectura del Fototransistor1
const int OutPin = 13;      // Pin per el led indicador1
const int pin = 9;
int sensorValue = 0;       // valor del sensor
//
const int analogInPin2 = A5; // Pin per la lectura del Fototransistor2
const int OutPin2 = 12;     // Pin per el led indicador2
const int pin2 = 8;
int sensorValue2 = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(OutPin, OUTPUT); //definir pins com sortida
  pinMode(pin, OUTPUT);
  pinMode(OutPin2, OUTPUT);
  pinMode(pin2, OUTPUT);
}

void loop() {

  // llegim el pin i assignem un valor a la variable.

  sensorValue = analogRead(analogInPin);
  sensorValue2 = analogRead(analogInPin2);

  // Si el valor1 és major a 900 s'activa el LED

  if(sensorValue > 900)
  {
    digitalWrite(pin, LOW); // Pin en LOW
    digitalWrite(OutPin, HIGH); //sortida activada
    delay(100); //esperar
  }

  else
  {
    digitalWrite(pin, HIGH); // posar el Pin en HIGH
    digitalWrite(OutPin, LOW); //sortida desactivada
    unsigned long time;
  }

  // Es repeteix el codi per a les sortides de la segona bobina
```

```

if (sensorValue2 > 900)
{
    digitalWrite(pin2, LOW); // posar el Pin en HIGH
    digitalWrite(OutPin2, HIGH); // sortida activada

    // Imprimim el valor al monitor.

    Serial.print("TEMPS = " ); // text escrit
    Serial.println(millis()/1000); // mostrar els segons
    delay(100); //esperar
}

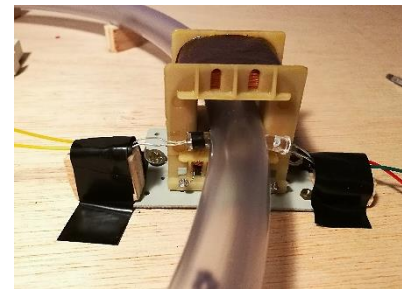
else
{
    digitalWrite(pin2, HIGH); // posar el Pin en HIGH
    digitalWrite(OutPin2, LOW); // sortida desactivada
}
}

```

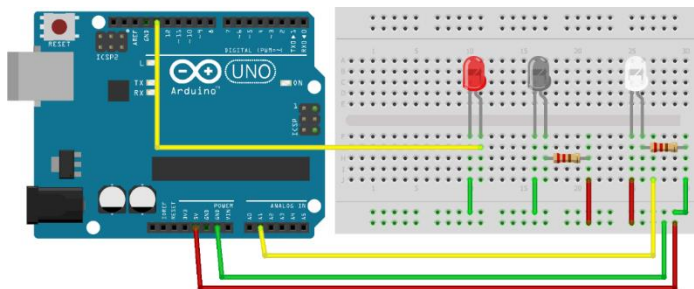
### 7.4.3. Instal·lació dels circuits

Muntar el circuit no va ser gaire complicat, però sí entretingut, ja que vaig seguir el mateix procediment que en la programació, cosa que va facilitar el procés.

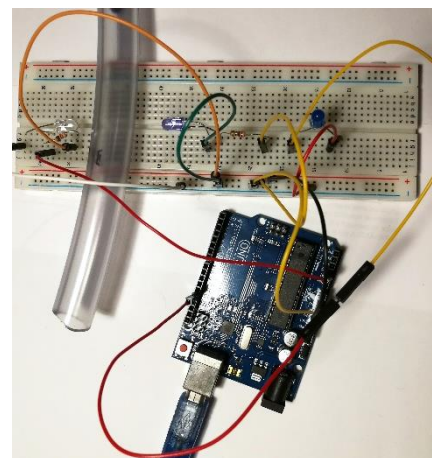
Primer vaig connectar els emissors, els detectors i els LEDs de cada bobina a les entrades de la placa que els corresponien. Basant-me en el circuit de la imatge 39 per a cada una de les bobines. La diferència és que vaig haver d'afegir cables a les sortides dels LEDs per a poder-los d'allargar i instal·lar a les sortides de les bobines sobre uns taquets.



Imatge 47 - Bobina amb circuit infraroig instal·lat

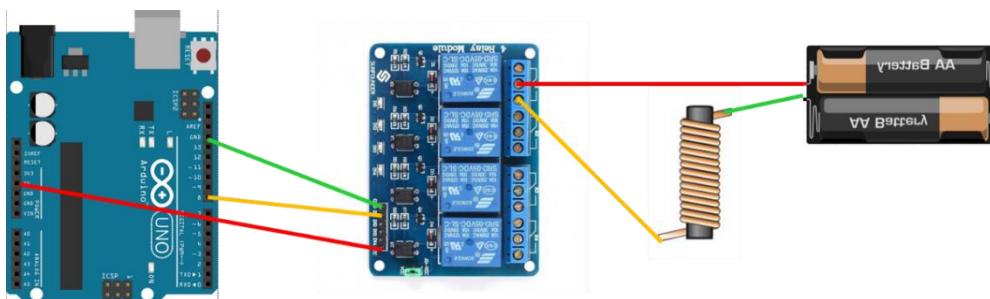


Imatge 460 - Esquema del circuit infraroig

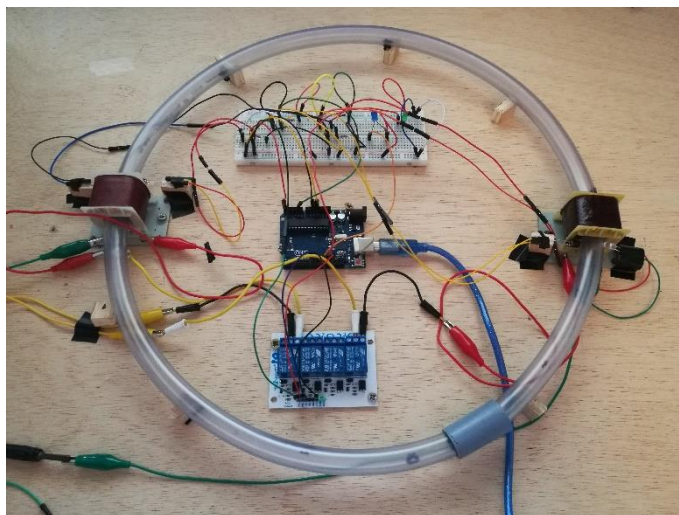


Imatge 45 - Circuit infraroig

Per últim, havia de connectar el relé a les sortides de la placa, a les bobines i a les fonts d'energia. Com que era la primera vegada que utilitzava un relé vaig necessitar ajuda del professor de tecnologia, que finalment em va ajudar a fer-lo funcionar. Vaig haver de connectar la sortida comú a la font de 5V de la placa, la sortida que activava el relé i una altra a terra de la placa. Per altra banda vaig haver de connectar el circuit NT<sup>11</sup> a la bobina i a la font d'alimentació de 30V de corrent altern i, per últim, l'altra sortida de la bobina a terra de la font. Per a connectar la segona bobina vaig seguir el mateix procediment en una altra sortida del relé. L'esquema del relé en una de les bobines és el següent:



Imatge 48 - Esquema relé



Imatge 49 - Circuit instal·lat

<sup>11</sup> circuit NT: circuit normalment tancat.

## 7.5. Avaluació del procés de construcció

La construcció de la maqueta del sincrotró ALBA ha estat complicada i ha requerit moltes hores de dedicació, buscant informació, fent proves i solucionant els problemes que s'han presentat al llarg del procediment perquè finalment funcionés idòniament.

No va costar gaire saber el material amb què construir la maqueta, només va caler fixar-me en prototips semblants i consultar algunes pàgines web. El complicat va ser trobar el material adequat per a la part elèctrica. Després de consultar a professors i veure com funcionaven els acceleradors casolans, vaig aconseguir deduir el material necessari.

El que més va costar va ser crear el codi i fer-lo funcionar un cop els circuits estiguessin instal·lats, fer-ho per parts va ajudar però no va ser feina fàcil, ja que per a cada component vaig haver de fer diverses proves. Una de les complicacions ha sorgit amb els díodes infrarojos, que requerien una alineació mil·limètrica per a detectar la bola, el que suposava que qualsevol modificació afectava directament a la seva posició fent que deixessin de funcionar, i per tant s'havia de revisar contínuament el seu estat.

El procés de construcció va ser llarg i va allargar-se encara més quan vaig adonar-me que una bobina no proporcionaria la força suficient per a impulsar l'esfera, i vaig decidir afegir una altra perquè pogués donar la volta completa al tub, el que va suposar refer el programa, tornar a instal·lar el circuit i afegir la bobina a la base.

Un cop amb gairebé tot el circuit muntat, va costar trobar una font d'energia prou potent per proporcionar corrent altern a les bobines perquè actuessin com a electroimants. Després de buscar altra vegada projectes a la xarxa i adequar-los a les meves possibilitats, vaig trobar que la millor opció era una font d'alimentació. No va suposar cap problema aconseguir-ne una, ja que el centre en tenia, i em va permetre subministrar a les bobines 30 V de corrent altern. Però va suposar un altre problema, perquè no podia fer que el circuit d'Arduino que treballa amb corrent continu de molt baix voltatge, controlés el circuit de corrent altern. La solució va ser afegir un relé, un repte en què vaig necessitar l'ajut de professors, però que em va permetre combinar els dos circuits.

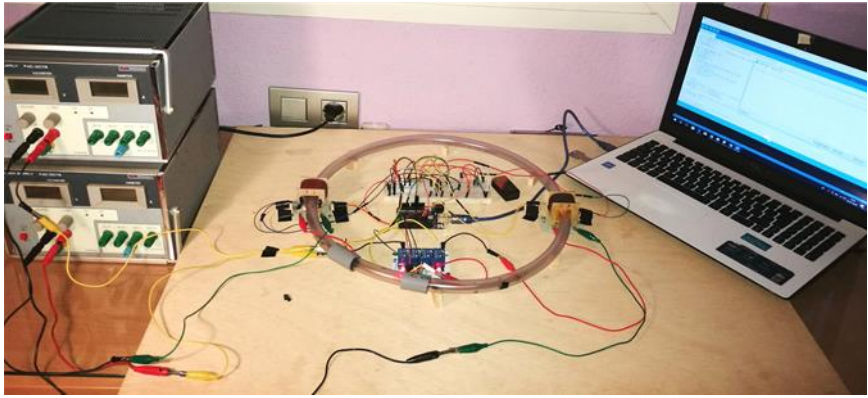


Finalment he pogut construir i fer que funcioni la maqueta del ALBA en condicions òptimes per poder realitzar les proves pertinents.

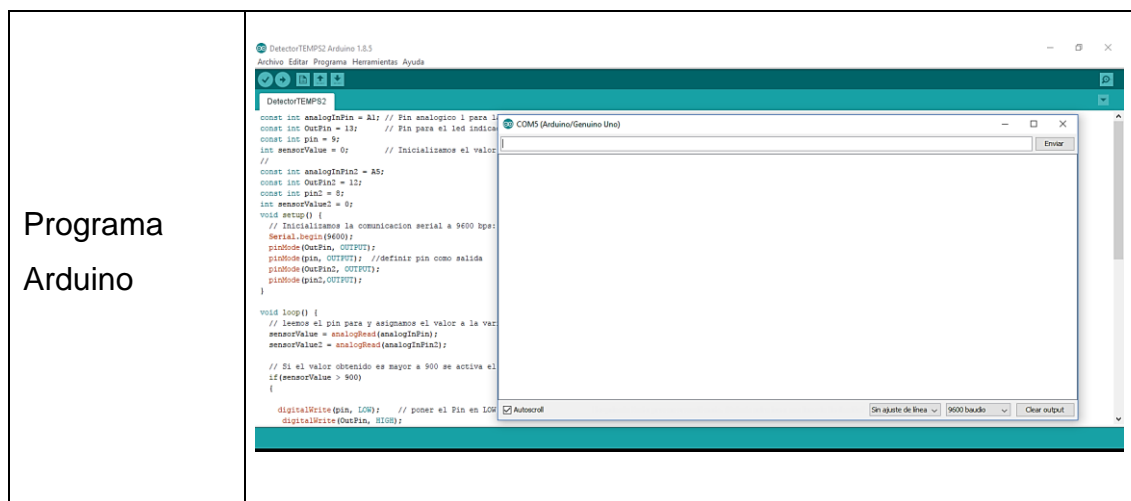
## 8. EXPERIMENTACIÓ

En tenir tres tipus d'esferes amb masses diferents, l'estudi consistirà a observar com influeix la massa de les esferes en la seva velocitat. En tots els casos mantenint la potència del camp magnètic a partir de subministrar sempre 30 V de corrent altern a les bobines.

### 8.1. Material

Material necessari per a fer l'experiment:

Material	Fotografia
Maqueta sincrotró	
Esferes	
Bàscula	



Taula 4 - Material per a l'experimentació

## 8.2. Procediment

En primer lloc, vaig introduir l'esfera a la mànega, la vaig tancar amb cinta aïllant i a sobre vaig posar el tub de PVC per fixar-ho. A continuació vaig fer girar l'esfera sense connectar les bobines per a comprovar si funcionava el circuit. Un cop supervisat que tot estigues a punt, vaig engegar les dues fonts d'alimentació, i vaig decidir el punt des del qual impulsaria la bola, que seria el mateix per a tots els casos. Aleshores, a l'ordinador vaig obrir el programa i vaig activar l'opció de monitor serial que enregistraria el temps cada cop que la bola passés per una de les bobines.

En donar a l'esfera l'impuls inicial vaig deixar que s'accelerés, quan havia donat tres o més voltes vaig desactivar tota la part electrònica i vaig guardar les dades del temps obtingudes.

Vaig repetir aquest procediment per cada una de les esferes. Un cop tenia totes les dades, és a dir tres temps per cada bola, vaig fer els càlculs pertinents per obtenir les velocitats de cadascuna.

### 8.3. Dades, càlculs i resultats

Longitud mànega:  $S = 1,2 \text{ m}$

Velocitat mitja:  $v_m = \frac{S}{t}$

Energia cinètica:  $E_C = \frac{1}{2}mv^2$

1 eV =  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

#### Esfera 1

$t_3 = 2 \text{ s}$

$$v_m = \frac{1,2}{2} = 0,6 \text{ m/s}$$

$m = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Kg}$

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,6^2 = 4,68 \cdot 10^{-5} \text{ J} = 2,92 \cdot 10^{14} \text{ eV}$$

Calculo l'energia cinètica d'aquesta esfera perquè ha estat l'única que s'ha accelerat.

#### Esfera 2

$t_1 = 3 \text{ s}$

$$v_m = \frac{1,2}{3} = 0,4 \text{ m/s}$$

#### Esfera 3

$t_1 = 7 \text{ s}$

$$v_m = \frac{1,2}{7} = 0,17 \text{ m/s}$$

Només he indicat els càlculs de les velocitats màximes de cada esfera.

### 8.3.1. Taula de resultats

Esfera		1	2	3
Longitud mànega (m)		1,2		
Massa (g)		0,26	1,05	5,56
Diàmetre (cm)		0,4	0,7	1
Temps (s)	Volta 1	3	3	7
	Volta 2	2	3	9
	Volta 3	2	3	-
Velocitat mitja (m/s)	Volta 1	0,4	0,4	0,17
	Volta 2	0,6	0,4	0,12
	Volta 3	0,6	0,4	-

Taula 5 – Resultats

### 8.4. Anàlisi de dades i conclusions

Tenint en compte els resultats obtinguts a la taula 5 es pot observar com:

- La primera esfera amb menys massa (0,26 g), s'aconsegueix accelerar.
- La segona amb més massa que la primera (1,05 g), manté una velocitat constant, per tant no s'accelera.
- La tercera esfera amb més massa (5,56 g), no augmenta la seva velocitat sinó que disminueix fins aturar-se a la tercera volta.

Així doncs, he pogut observar que la massa influeix en la velocitat de l'esfera i en la seva acceleració, ja que, com menys massa té l'esfera, major és la seva velocitat. Per tant, d'acord amb la segona llei de Newton, si el valor del camp magnètic es manté constant, la força magnètica també:

$$F_{Total} = m \cdot a$$

$$a = \frac{F_{Total}}{m}$$

Tot i que les característiques principals de la maqueta i el disseny estètic són molt semblants a l'esperat, el seu funcionament és el correcte per a realitzar la part experimental, però no és perfecte, conseqüència de fenòmens que en un primer moment no pensava que influïrien en el resultat i que han estat els següents :

- La intensitat del camp magnètic, que pensava que seria més alta i que en conseqüència impulsaria amb més força l'esfera ha resultat no ser l'esperada.
- La força de fricció que s'oposava al moviment de les esferes i les frenava quan major era la seva massa, ha provocat que no s'acceleressin com en el cas de la segona i la tercera, aquests casos són explicats aplicant les lleis de Newton:

$$\sum F = F_m - F_f = m \cdot a$$

$$F_f = \mu N = \mu m g$$

$$F_m = \text{constant}$$

En el cas de la segona esfera:

$$F_f = F \rightarrow a = 0$$

Si la massa és molt gran, com la tercera esfera, pot ser que:

$$F_f > F \rightarrow a < 0$$

$F_f$ , és la força de fricció

$\mu$ , és el coeficient de fregament

$g$ , és l'acceleració de gravetat, 9,8 m/s<sup>2</sup>

$N$ , és la força normal

En el cas dels acceleradors LHC i ALBA, aquest inconvenient no existeix perquè utilitzen un sistema d'ultra buit, a més a més s'ha de tenir en compte que acceleren partícules de massa molt petita, en el cas de LHC protons de massa  $1.67 \times 10^{-27}$  kg i en l'ALBA electrons de  $9,1 \times 10^{-31}$  kg, el que fa que la força de fricció sigui menyspreable.

## 9. COMPARACIÓ

Per últim, he vist adient comparar la maqueta amb casos reals com els sincrotrons ALBA i LHC.

	Maqueta ALBA	ALBA	LHC
Què acceleren?	1 Esfera metàl·lica	1 feix d'electrons	2 feixos de protons o de ions
Produeixen	-	Llum sincrotró	Col·lisions de partícules
Resultats científics	Calcular el període de l'esfera i obtenir la velocitat	Analitzar la matèria i les seves propietats	Investigar a escala subatòmica els components de la matèria
Dimensions de l'anell	1,2 m	268 m	26,7 km
Detectors	1 punt de detecció	8 línies de llum	4 punts de col·lisió
Imants en el túnel	2	664	9.600
Pressió de buit	No s'aplica el buit	$10^{-10}$ mbar	$10^{-10}$ mbar
Velocitat màxima	0,6 m/s	$99,9999986\% c$ <sup>12</sup>	$99,9999991\% c$
Energia del feix i l'esfera	$2,92 \cdot 10^5$ GeV	3 GeV	6.500 GeV
Cost	36,29 €	200 M€	3.500M€

Taula 6 - Comparació maqueta, ALBA i LHC

<sup>12</sup> Lletra amb la qual es representa la velocitat de la llum en el buit. El seu valor és 299.792.458m/s.

## 10. CONCLUSIONS

Amb aquest treball finalment, he pogut obtenir moltes conclusions assolint la sèrie d'objectius plantejats a l'inici.

He descobert quin és l'origen de tot aquest fascinant món, al mateix temps que el seu objectiu principal, comprenent millor tot el relacionat amb els acceleradors, inspirats per la recerca de noves partícules per així avançar en la ciència i fer nous descobriments, que alhora ajudin a entendre millor tot el que desconeixem.

Respecte al funcionament dels acceleradors, he après els conceptes bàsics que qualsevol científic que treballi amb aquest tipus de màquines ha de dominar, com són l'electromagnetisme i la física de partícules. A més a més, he conegut la part mecànica que propicia que aquestes proeses de l'enginyeria funcionin, les quals vaig poder veure en la visita que vaig fer a l'ALBA, on em va sorprendre observar en persona aparells com detectors, línies de llum, imants i d'altres components.

Tota aquesta part teòrica m'ha proporcionat els coneixements per a poder entendre com realment funcionen els acceleradors, i com són accelerades les partícules, que de forma senzilla i resumida, es basen en els imants molt potents que a partir de canvis de polaritat aconseguen impulsar i mantenir units els feixos.

Un altre objectiu, que va ser un dels motius principals per dur a terme aquest projecte, ha estat la construcció de la maqueta i que aquesta simulés el funcionament d'un sincrotró, l'ALBA. Quan em vaig plantejar aquest treball i amb la desinformació evident a l'inici d'un estudi, vaig pressuposar que podria accelerar sense gaires dificultats les esferes. Un cop dominat el marc teòric i havent aprofundit en els aspectes més tècnics, he pogut concloure que hi ha múltiples factors que jo no vaig contemplar i que realment han influït a l'hora de construir i posar en pràctica el funcionament d'aquest sincrotró casolà, factors que he esmentat a l'apartat final de la valoració de la part experimental. Tot i així, he aconseguit sobreposar-me aquests obstacles, afavorint els resultats que finalment han estat els desitjats ja que, el projecte ha aconseguit accelerar les esferes.

Respecte a la part experimental, he après a posar en practica els fenòmens físics explicats al llarg del treball, a l'hora de fer els càlculs i d'entendre els resultats obtinguts. Així doncs, he pogut confirmar el plantejament inicial d'observar com la velocitat depèn de la massa.

Com a últim punt del treball, la comparació de la meva maqueta amb els casos reals de l'ALBA i LHC m'ha demostrat com els fenòmens més complexos poden ser reproduïts a diferents escales i a la vegada observar les principals diferències entre els acceleradors.

Tot i haver complert amb tots els objectius proposats, hi ha aspectes del treball que podrien ser millorables però a causa del temps limitat de què disposem i de la falta de recursos, en un futur podria reprendre i millorar el treball. En el cas de la maqueta, m'hauria agradat poder afegir una altra bobina, que aquestes fossin més potents i que les esferes utilitzades fossin imantades, d'aquesta forma hauria aconseguit un impuls més gran i el circuit hauria funcionat durant més temps, i m'hauria permès accelerar boles més pesades.

Abans de fer el treball desconeixia per complet el món dels acceleradors i tota la part científica que l'engloba. Així doncs, com a conclusió personal, fer aquest treball m'ha descobert un nou vessant de la ciència i he aconseguit ampliar moltíssim el meu coneixement sobre aquest tema, tanmateix, ha estat un gran repte i ha suposat un gran esforç, encara més en els moments de dificultats, als quals he sabut sobreposar-me.

## 11. **AGRAÏMENTS**

En primer lloc, donar les gràcies a la tutora del Treball de Recerca, Ana Burrel, per la seva orientació durant tot el projecte i per brindar-me l'oportunitat d'anar més enllà i tenir ocasió de visitar el centre científic ALBA.

Als professors Carme Alemany i David Ribes del departament de tecnologia per la seva col·laboració i consells en l'apartat pràctic de la maqueta. De la mateixa manera que al Ferran Conill, del departament de ciències per proporcionar-me les fonts d'informació necessàries.

També, agrair a la Montserrat Vidiella i a la Maria Rofes, la seva ajuda a l'hora de revisar els aspectes més formals del treball.

Per acabar, vull donar les gràcies a totes les persones que m'han recolzat durant el treball, en especial a Rafael Ferrer, pel seu interès constant i ajuda, en la part tècnica.

## 12. FONTS D'INFORMACIÓ

### 12.1. Bibliografia

Armengol, M., Serra, S., Mercadé, J., "*Electromagnetisme I*", a Física 2 Batxillerat, Madrid, 2009, p. 141-176.

Fornells, M. et al., "*L'origen de l'Univers i de la vida*", a Ciències per al món contemporani, Barcelona, 2008, p.4-32.

Rojo, Juan, "La vida íntima de las partículas: *de los átomos de Demócrito al bosón de Higgs*", Madrid, 2016, p.140.

Klein, Etienne, "Las partículas elementales", a col·lecció Debate Dominós, Madrid, 1994, p.127.

Ferrer, Salvador i Martínez, Ana, "*ALBA activity report*", Barcelona, 2016, p. 89.

Alcalde, Sergi, "*En busca de la partícula de Dios*", a National Geographic España, 1/3 (2008), pp.72-87.

### 12.2. Webgrafia

#### **L'univers:**

*Astronomía Educativa: Tierra, Sistema Solar y Universo* [en línia], 2010. <<http://www.astromia.com>> [Consultat: 15 octubre 2017]

Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada. *Física de las partículas elementales* [en línia], 2017. <<http://fciencias.ugr.es>> [Consultat: 17 octubre 2017]

#### **Composició de la matèria:**

Ministeri d'Educació, Cultura y Esport. *Ciencias de la naturaleza: La materia* [en línia], 2011. <<http://recursostic.educacion.es/secundaria.htm>> [Consultat: 29 octubre 2017]

Endesa educa. *Electromagnetismo* [en línia], 2014. <[www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/iv.-electromagnetismo#Oersted](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/iv.-electromagnetismo#Oersted)> [Consultat: 11 novembre 2017].

*Física y química: Imanes y corriente eléctrica* [en línia], Data desconeguda. <[http://www.librosvivos.net/smtc/files/experimento\\_faraday\\_nuevo.pdf](http://www.librosvivos.net/smtc/files/experimento_faraday_nuevo.pdf)>

[Consultat: 11 novembre 2017].

Alvarez, Julieth et al. *Teoría electromagnética de Maxwell* [en línia], 2015. <<https://prezi.com/grokp9a0tcan/teoria-electromagnetica-de-maxwell/>>

[Consultat: 13 novembre 2017].

Escobar Morales, Jaime. *Radiaciones electromagnéticas: Ondas de radio* [en línia], Data desconeguda. <<https://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html>> [Consultat: 13 novembre 2017].

*Ona electromagnètica : historia i descripció* [en línia], Data desconeguda. <[https://www.univers.gq/descobrir/ca/Ona\\_electromagnètica](https://www.univers.gq/descobrir/ca/Ona_electromagnètica)> [Consultat: 13 novembre 2017].

Serrat, Francesc. *La força electromagnètica* [en línia], 2010. <<https://francescserrat.wordpress.com/2010/05/13/la-forca-electromagnetica/>>

[Consultat: 13 novembre 2017].

The History Channel. *Descubrieron ondas electromagnéticas* [en línia], Data desconeguda. <<https://mx.tuhistory.com/hoy-en-la-historia/descubrieron-ondas-electromagneticas>> [Consultat: 30 novembre 2017].

### **Acceleradors de partícules:**

Youtube. *Locos por las particulas Documental* [en línia], 2017. <<https://www.youtube.com/watch?v=XMQNU8Vme1s>> [Consultat: 1 desembre 2017].

Bordàs, Joan, Faus-Golfe, Àngels i Pascual, Ramón. *Aceleradores de partículas: los supermicroscopios* [en línia], 2013. <<https://metode.es/revistas-metode/monograficos/aceleradores-de-particulas-los-supermicroscopios.html>>

[Consultat: 1 desembre 2017].

Wikipedia, la enciclopèdia lliure. *Acelerador de partícules* [en línia], 2016. <[https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador\\_de\\_part%C3%ADculas](https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas)> [Consultat: 1 desembre 2017].

Olmo, M. i Nave, R. *El Síncrotrón* [en línia], 2000. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Particles/synch.html#c1>> [Consultat: 3 desembre 2017].

Cid, Ramón. Síncrotrón [en línia], 2015. <<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Electromagnetismo/Electromagnetismo09.htm>>

[Consultat: 3 desembre 2017].

El Confidente. *El futuro colisionador circular ya se está debatiendo* [en línia], 2017. <[https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2017-02-15/comite-internacional-futuros-aceleradores-colisionador-particulas\\_1331736/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2017-02-15/comite-internacional-futuros-aceleradores-colisionador-particulas_1331736/)> [Consultat: 10 desembre 2017].

### **LHC:**

CPAN. *Acelerador de Partículas: Acercándonos al LHC* [en línia], 2015. <[https://www.lhc-closer.es/taking\\_a\\_closer\\_look\\_at\\_lhc/0.particles\\_accelerator/i Idioma/es\\_ES](https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.particles_accelerator/i Idioma/es_ES)> [Consultat: 10 desembre 2017].

CERN. *Accelerators* [en línia], 2017. <<https://home.cern/about/accelerators-topics>> [Consultat: 13 desembre 2017].

CERN. *About CERN* [en línia], 2017. <<https://home.cern/about>> [Consultat: 13 desembre 2017].

Fundación Wikimedia. *Gran colisionador de hadrones* [en línia], 2015. <[https://www.luna.ovh/planeta/es/Gran\\_colisionador\\_de\\_hadrones](https://www.luna.ovh/planeta/es/Gran_colisionador_de_hadrones)> [Consultat: 13 desembre 2017].

CPAN. *Algunos datos sobre el LHC* [en línia], 2016. <<https://www.i-cpan.es/lhc-datos.php>> [Consultat: 13 desembre 2017].

Wikipedia, la enciclopèdia lliure. *Gran colisionador de hadrones* [en línia], 2016. <[https://es.wikipedia.org/wiki/Gran\\_colisionador\\_de\\_hadrones](https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_colisionador_de_hadrones)> [Consultat: 13 desembre 2017].

Pena, Carlos. *Aceleradores de Partículas; El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)* [en línia], Data desconeguda. <<http://members.ift.uam-csic.es/cpena/docs/cern-lhc-2015.pdf>> [Consultat: 14 desembre 2017].

**ALBA:**

CELLS Espanya. *Qué es ALBA* [en línia], 2014. <<https://www.cells.es/es/que-es-alba/bienvenida>> [Consultat: 16 desembre 2017].

CELLS Espanya. *La luz de sincrotrón ALBA* [en línia], 2014. <[https://www.cells.es/en/outreach/dosier\\_visitaalba\\_esp.pdf](https://www.cells.es/en/outreach/dosier_visitaalba_esp.pdf)> [Consultat: 16 desembre 2017].

Wikipedia, la enciclopèdia llibre. *ALBA (sincrotrón)* [en línia], 2012. <[https://es.wikipedia.org/wiki/ALBA\\_\(sincrotrón\)](https://es.wikipedia.org/wiki/ALBA_(sincrotrón))> [Consultat: 16 desembre 2017].

**Maqueta:**

Pujol, A. I Capell, C. *Acelerador de partícules: "Maqueta educativa"* [en línia], 2012. <[www.xtec.cat/~ccapell/acelerador\\_particulas\\_web/index.html](http://www.xtec.cat/~ccapell/acelerador_particulas_web/index.html)> [Consultat: 10 octubre 2017].

Youtube. *Acelerador de partícules, maqueta educativa* [en línia], 2012. <<https://www.youtube.com/watch?v=qOsgRPhIVB8>> [Consultat: 10 octubre 2017].

Youtube. *PM Acelerador de partícules* [en línia], 2017. <<https://www.youtube.com/watch?v=s2AIEpUZpFs>> [Consultat: 10 octubre 2017].

**12.3. Índex de gràfics**

Gràfic 1 - Fornells, M. et al., "*L'origen de l'Univers i de la vida*", a *Ciències per al món contemporani*, Barcelona, 2008, p.5.

Gràfic 2 – font pròpia

## 12.4. Índex d'imatges

Imatge 1 - [https://3.bp.blogspot.com/-oZpqtjFRrKU/U0Pp1M\\_QQT/AAAAAAAAAeE/pTJXtZTVdvU/s1600/Standard-ModelSymmetricTable.jpg](https://3.bp.blogspot.com/-oZpqtjFRrKU/U0Pp1M_QQT/AAAAAAAAAeE/pTJXtZTVdvU/s1600/Standard-ModelSymmetricTable.jpg)

Imatge 2 - <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/77/dd/24/77dd24117ead3ad61a13e08d1de5b09e.jpg>

Imatge 3 – <https://physicsgg.files.wordpress.com/2013/02/oersted150.jpg?w=350&h=200&crop=1>

Imatge 4 – [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Induction\\_experiment.png/635px-Induction\\_experiment.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Induction_experiment.png/635px-Induction_experiment.png)

Imatges 5 i 6 – Armengol, M., Serra, S., Mercadé, J., “*Electromagnetisme I*”, a Física 2 Batxillerat, Madrid, 2009, p. 141-176.

Imatge 7 – <https://emc2andallthat.files.wordpress.com/2016/06/wp-1465923348835.png>

Imatge 8 – <https://youtu.be/2vYzBZtsKJI>

Imatge 9 – [http://www.rcg.cat/images/37\\_art1\\_1.jpg](http://www.rcg.cat/images/37_art1_1.jpg)

Imatge 10 – <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/movimiento/lineal/lineal1.gif>

Imatge 11 – <http://www-hep2.fzu.cz/adventure/keyhole/accelerators/slac.jpg>

Imatge 12 – Armengol, M., Serra, S., Mercadé, J., “*Electromagnetisme I*”, a Física 2 Batxillerat, Madrid, 2009, p. 141-176.

Imatge 13 – [http://3.bp.blogspot.com/\\_KEyp4Ss2REw/SJwnyz5BenI/AAAAAAAAAAs/dNDheEDJY88/s320/Cyclotron\\_Diagram.jpg](http://3.bp.blogspot.com/_KEyp4Ss2REw/SJwnyz5BenI/AAAAAAAAAAs/dNDheEDJY88/s320/Cyclotron_Diagram.jpg)

Imatge 14 – <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c7/Cyclotron.svg/632px-Cyclotron.svg.png>

Imatge 15-18 – Imatges pròpies

Imatge 19 - <https://www.eiroforum.org/wp-content/uploads/pg-cern-02.jpg>

Imatge 20 – <https://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/images/lhc-schematic.jpg>

Imatge 21 – <http://scienceplx.com/wp-content/uploads/2015/07/Large-Hadron-Collider-on-a-map.jpg>

Imatge 22 – <http://directory.web.cern.ch/directory/img/cern-logo-blue.png>

Imatge 23 – Imatge pròpia

Imatge 24 – [https://img-images.imgix.net/mechanical/Synchrotron\\_Light\\_Facility-539E3472.jpg?q=60&fit=max&w=800](https://img-images.imgix.net/mechanical/Synchrotron_Light_Facility-539E3472.jpg?q=60&fit=max&w=800)

Imatge 25 – [http://pemb.cat/imgs/t\\_projectes/225\\_je\\_op81\\_sincrotro\\_01/2012\\_sincrotro\\_01.jpg](http://pemb.cat/imgs/t_projectes/225_je_op81_sincrotro_01/2012_sincrotro_01.jpg)

Imatge 26 - <http://www.directe.cat/imatges/noticies/sincroto.jpg>

Imatge 27 – [https://www.cells.es/ca/divulgacio/recursos-educatius/posters/1-com-es-genera-la-llum-de-sincrotro.jpg/@\\_@images/cba3ef08-ed08-4346-bdaf-9fa3cd50736d.jpeg](https://www.cells.es/ca/divulgacio/recursos-educatius/posters/1-com-es-genera-la-llum-de-sincrotro.jpg/@_@images/cba3ef08-ed08-4346-bdaf-9fa3cd50736d.jpeg)

Imatges 28-49 – Imatges pròpies