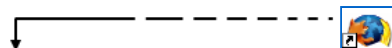




## LA FÍSICA DEL LHC

Hèctor Garcia

*El Large Hadron Collider (LHC) o Gran Col·lisionador d'Hadrons és un accelerador de partícules de 27 km de circumferència situat a Ginebra, Suïssa, que fa col·lisionar protons o ions pesats en quatre punts concrets. En aquests punts es troben instal·lats detectors enormes que, com si d'una càmera fotogràfica es tractés, enregistren totes les reaccions que tenen lloc al punt d'interacció. Per dur a terme d'una manera efectiva les col·lisions la intervenció i coordinació de molts i diversos àmbits han de convergir en un únic punt. Entre aquests camps es troben des de la dinàmica de les partícules que circulen per l'accelerador fins a la superconductivitat necessària per mantenir l'alt camp magnètic dels imants. En aquest recurs es vol introduir l'alumnat en tot un seguit de conceptes, tots independents però al final interrelacionats, que envolten al món dels acceleradors. Pot servir com a eina pràctica per veure algunes de les aplicacions dels conceptes que de vegades romanen dins d'un àmbit potser abstracte i, a la vegada, apropar l'alumnat a la física de més alt nivell com ara la física de partícules.*



## Orientacions per al professorat

### Temporització

- Tot i que cada secció es pot resoldre independentment, la total comprensió d'alguns conceptes pot requerir haver estudiat els anteriors, de manera que el recurs es presenta de manera seqüencial.

### Alumnes als quals s'adreça l'experiència

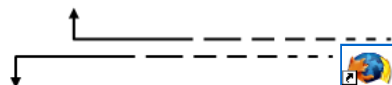
- El conjunt dels conceptes està orientat a alumnes de segon de batxillerat pel sol fet que ja han vist molts dels conceptes o poden entendre els nous més ràpidament. A causa de la varietat de problemes, alguns es poden dirigir a alumnat de primer de batxillerat, d'acord amb el criteri del professor.

### Metodologia

- La metodologia que cal seguir ha d'estar orientada a una primera introducció teòrica dels conceptes, seguida d'alguna aplicació a tall d'exemple i, finalment, a la resolució, per part de l'alumnat, dels problemes que es plantegen. És interessant comparar els resultats numèrics dels exemples i problemes amb d'altres que estan més a l'abast de la ment humana, de manera que la visualització sigui més completa.

### Orientacions tècniques

- La física d'acceleradors així com la física de partícules, s'entenen molt millor amb recursos animats, que són recomanables d'alternar amb les explicacions purament teòriques. En tot moment l'alumne ha de veure que al darrere de tots aquests conceptes hi ha un grup de persones, com ells, que hi treballen cada dia.



## Full de l'alumnat

### Objectiu

Estudiar i comprendre alguns dels conceptes relacionats amb els grans acceleradors de partícules. Al final, l'alumne ha de ser capaç de relacionar tots aquells conceptes que ha estudiat a classe amb la complexitat d'un accelerador.

### Introducció

El Large Hadron Collider (LHC) o Gran Col·lisionador d'Hadrons és un accelerador de partícules de **27 km** de circumferència situat a Ginebra, Suïssa, que fa col·lisionar protons o ions pesants en quatre punts concrets. En aquests punts es troben instal·lats detectors enormes que, com si d'una càmera fotogràfica es tractés, enregistren totes les reaccions que tenen lloc al punt d'interacció. Per dur a terme d'una manera efectiva les col·lisions, la intervenció i coordinació de molts i diversos àmbits han de convergir en un únic punt. Entre aquests camps es troben des de la dinàmica de les partícules que circulen per l'accelerador fins a la superconductivitat necessària per mantenir l'alt camp magnètic dels imants. Tot i que la física que es troba al darrere pot ser d'un nivell alt, mitjançant conceptes senzills i algunes simplificacions es pot arribar a comprendre el funcionament bàsic dels acceleradors mitjançant els exemples i problemes que aquí proposem.

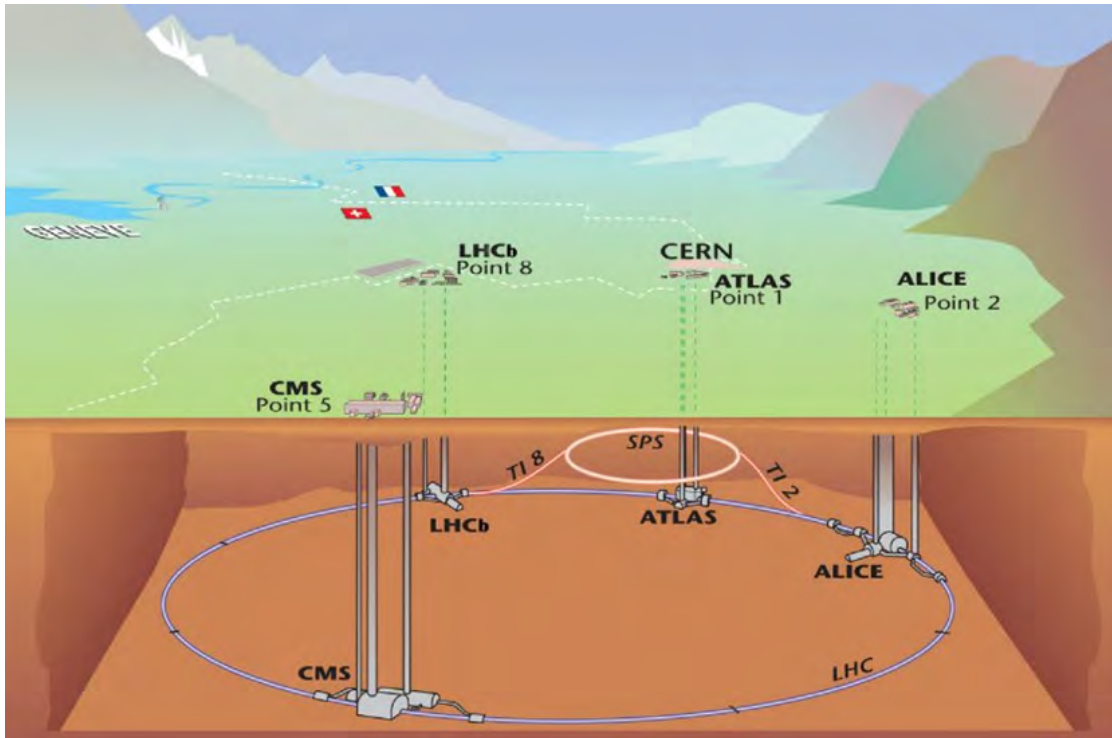


Fig. 1: Esquema de l'LHC i els quatre detectors

L'estructura bàsica del LHC consisteix en el que es coneix com 8 octants, 8 seccions clarament diferenciades en què podem dividir els 27 km. A la figura 2 es pot observar a què està dedicat cada octant.

Per exemple, els octants 1, 2, 5 i 8 estan dedicats als experiments ATLAS, ALICE, CMS i LHCb, respectivament, on els feixos de protons col·lisionen. A l'octant número 4 es troben les cavitats de radiofreqüència (RF), que proporcionen el camp elèctric necessari per accelerar les partícules fins a l'energia òptima de col·lisió. Els octants 3 i 7 allotgen els anomenats *col·limadors*, instruments que permeten "netejar" el núvol de partícules que envolta el feix principal. Finalment, l'octant número 6 és l'anomenat *dump*, el lloc on van a parar els feixos de partícules que han vist reduïda la seva càrrega de manera que ja no són efectius. Per fer la forma d'anell que s'observa, són necessaris imants que guïen els protons o nuclis pesants al llarg dels 27 km.

## Material

### Cinemàtica i dinàmica

A manera d'escalfament, podem començar amb uns càlculs senzills relacionats amb la cinemàtica dels acceleradors.

Considerem que la velocitat a què circulen els protons per l'accelerador és igual a la velocitat de la llum (més endavant veurem per què podem fer aquesta aproximació).

- P1.1) Calculeu el nombre de voltes que fa cada protó per segon a l'LHC i quant triga en fer una volta.

Sabem que es triguen uns 20 minuts a assolir l'energia necessària per realitzar les col·lisions i assumim que la velocitat no varia (més endavant veurem també què vol dir accelerar però mantenir la velocitat constant).

- P1.2) Calculeu la distància total recorreguda i doneu una escala comparable per visualitzar millor el resultat.

Els protons estan sotmesos constantment a la força centrípeta, la causa del seu recorregut circular.

- P1.3) Calculeu l'acceleració centrípeta que experimenten els protons i compareu-la amb l'acceleració de la gravetat. Cal tenir en compte l'efecte de la força de la gravetat, o en altres termes, els protons cauen verticalment? Quantifiquem aquest efecte.

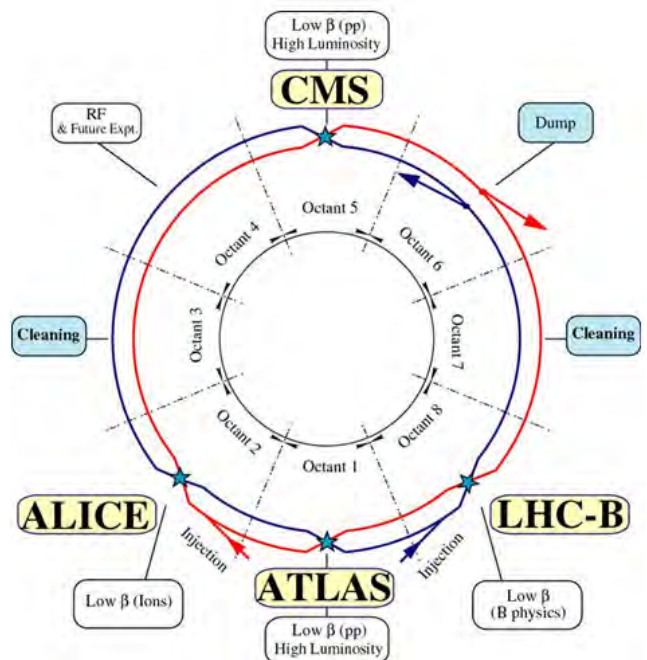


Fig. 2: Els octants del LHC

## Moment i energia

El moment d'una partícula és una magnitud vectorial donada pel producte de la seva massa i la velocitat que porta.

$$\begin{aligned}\vec{p} &= m(v_x, v_y, v_z) \\ \vec{p} &= m\vec{v}\end{aligned}\quad (1)$$

Per conveniència, moltes vegades fem un canvi de coordenades i expressem el moment en el que anomenem *coordenades esfèriques* en tres dimensions o *polars* en dues dimensions. D'aquesta manera podem escriure el moment centrat en el punt on té lloc la col·lisió com:

$$p_t = p \sin\theta \quad (2)$$

Com l'energia, el moment és una magnitud que es conserva i, considerant que les col·lisions tenen lloc a causa del xoc de dos feixos en direccions oposades, el moment total de les partícules resultants ha de ser zero.

**P 2.1)** Hi ha partícules que no deixen rastre al detector, com per exemple els neutrins, de manera que no s'en pot mesurar el moment directament. Com creieu que s'en pot mesurar llavors el moment/energia?

**P 2.2)** Calculeu a partir de l'expressió de l'energia cinètica no relativista i sabent que els protons són a  $7 \text{ TeV}$  (unitat d'energia  $\text{eV}$  = electró-volt,  $1 \text{ eV} = 1.602176462 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ) la velocitat que haurien de tenir els protons. Us sembla estrany el resultat?

## Relativitat

Quan la velocitat de les partícules, els protons en el cas de l'LHC, s'aproxima a la velocitat de la llum ( $v \approx 300000 \text{ km/s}$ ), comencen a aparèixer efectes que no es troben presents a velocitats més baixes o no relativistes. D'aquesta manera, conceptes com el d'energia cinètica són alterats i prenen una expressió diferent a la coneguda. Aquesta és:

$$E = \gamma mc^2 \quad (3)$$

on  $\gamma$  és el factor relativista, s'expressa de la manera següent:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

**P3.1)** Calculeu el factor relativista  $\gamma$  i la velocitat per a un protó de l'LHC amb una energia de  $7 \text{ TeV}$ .

**P3.2)** Dibuixeu una gràfica de la velocitat en funció de l'energia dels protons i determineu el valor al qual tendeix asimptòticament la velocitat.

## Buit i equació dels gasos ideals.

El buit en un accelerador és fonamental per evitar col·lisions paràsites de les partícules que componen el feix amb les partícules que romanen a l'accelerador i fan que d'aquesta manera el feix es degradi ràpidament i a la vegada generi radiacions de fons que poden arribar a apantallar les pròpies col·lisions. A la canonada per on passa el feix, la pressió és d'aproximadament  $10^{-7} \text{ Pa}$  a una temperatura d'uns  $5 \text{ K}$  i a prop de  $10^{-9} \text{ Pa}$  a prop dels punts de col·lisió. Aquesta pressió és al voltant de 100 vegades més petita que a la superfície de la Lluna.

**P4.1)** Calculeu el volum que ocupa el tub per on passa el feix assumint que té un radi d'uns  $3 \text{ cm}$  i que es pot considerar igual arreu de tota la circumferència. Aquest volum, amb què es comparable en termes quotidians?

La densitat del gas residual pot variar pel fet que les fonts de gas, principalment els electrons i els que són induïts pels fotons, depèn de les propietats de la superfície i de com funcioni la màquina.

Per exemple, la desorció induïda pels ions és el resultat de la col·lisió dels protons amb molècules residuals, que genera partícules carregades amb una relació càrrega/massa que no els permet portar la trajectòria correcta i per això col·lionen amb les parets del tub i alliberen gasos. Els electrons creats en aquestes col·lisions protó-molècula i els fotons emesos per radiació de sincrotró també produeixen desorció gasosa. Els principals gasos emesos són  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i gasos nobles. Per adonar-nos de la importància de la necessitat d'un buit tan gran podem estimar el nombre de molècules per metre cúbic a dins del tub.

**P4.2)** Utilitzant l'equació dels gasos ideals ( $pV = nRT$ ), estimeu el nombre de molècules de gas que hi ha al tub de l'LHC a temperatura ambient i amb una pressió d' $1 \text{ atm}$  (atm= atmosfera) i un cop s'ha refredat a una temperatura de  $3 \text{ K}$  i s'hi ha fet el buit.

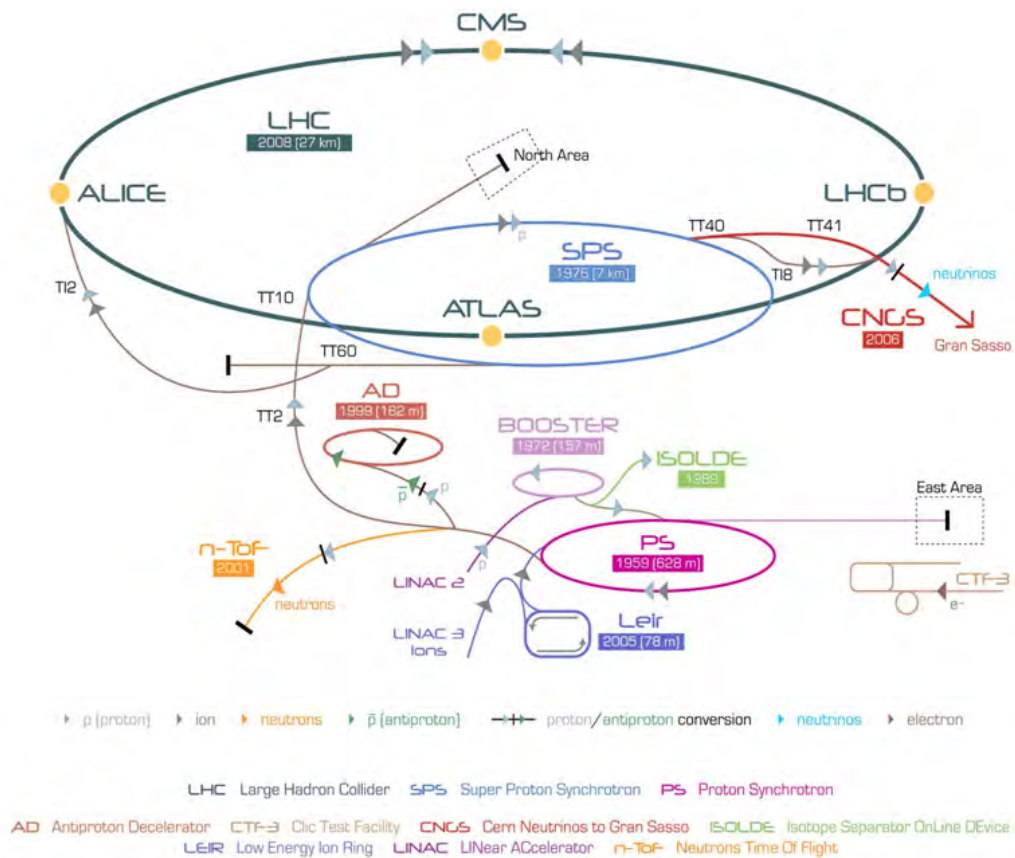


Fig. 3: Esquema del conjunt d'acceleradors intercomunicats del CERN

## Electricitat

A l'LHC i la seva cadena d'injecció els protons són accelerats des de l'estat de quasi repòs fins a la seva energia final ( $14 \text{ TeV}$ ). Aquesta acceleració es duu a terme mitjançant camps elèctrics que volta rere volta van imprimint una mica més d'energia a les partícules que hi passen. Els dispositius encarregats de generar aquest camp elèctric són les anomenades *cavitats de radiofreqüència*. Les cavitats de radiofreqüència generen una ona de camp elèctric sincronitzada amb el pas del feix de protons (d'aquí que anomenem *sincrotró* a aquest tipus d'acceleradors) de manera que a cada volta experimenten un increment de l'energia.

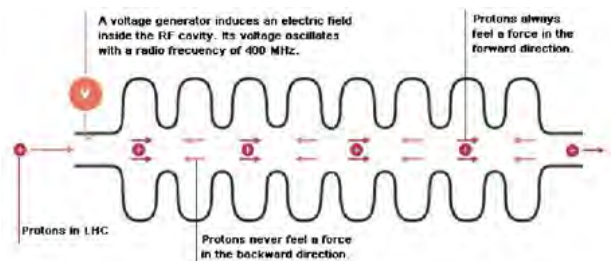


Fig. 4: Esquema del funcionament d'una cavitat de radiofreqüència

**P5.1)** L'energia a què s'injecten protons a l'LHC és  $450 \text{ GeV}$ . Calculeu quantes voltes necessiten els

protons per assolir la seva energia nominal ( $7 \text{ TeV}$ ) si les cavitats de radiofreqüència generen un potencial elèctric de  $2 \text{ MV}$  i hi ha un total de 8 cavitats instal·lades a l'LHC. Quant de temps es requereix per dur a terme l'acceleració completa?

**P5.2)** El temps total en la vida real és d'uns 20 minuts. Per què creieu que hi ha tanta diferència entre el temps calculat i el temps real?

## Magnetisme

Els protons han de seguir una trajectòria circular marcada per l'anell de  $27 \text{ km}$  de llargada. Per això s'utilitza un camp magnètic extremadament potent que guia les partícules al llarg de l'anell i permet que les col·lisions tinguin lloc de manera controlada. Seguint l'equació de Lorentz, una partícula amb càrrega  $q$  i velocitat  $\vec{v}$  quan entra en un camp magnètic  $\vec{B}$  experimenta una força expressada de la manera següent:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Es pot veure que la força és el producte vectorial del vector velocitat i del vector camp magnètic. D'aquesta manera s'obté la força, també una magnitud vectorial. Seguint la regla de la mà dreta, podem esbrinar quina direcció ha de tenir el camp magnètic per tal de corbar les partícules radialment. Aquesta direcció, tal com es veu a la figura 6, ha de ser vertical, positiva o negativa depenent del sentit de gir dels protons.



Fig. 5: Cavitat de radiofreqüència.

**P6.1)** Sabe que la força que ha de fer l'ímar sobre els proto ha de ser la

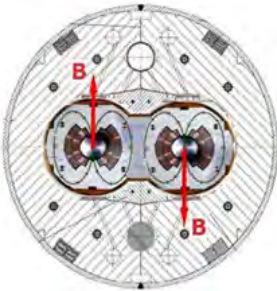


Fig. 6:

la força per mantenir-los units en la trajectòria circular (centrípeta), calculeu el camp magnètic dels imants superconductors de l'LHC. Compareu aquest resultat amb els camps magnètics de la Terra i de l'imant d'un dispositiu de ressonància magnètica.

**P6.2)** El camp magnètic necessari es crea mitjançant inducció magnètica, fent passar un corrent molt intens per uns cables, el qual, d'acord amb la llei de Biot-Savart, crea un camp magnètic a l'espai per on circulen els protons. Quin és el corrent necessari per generar el camp magnètic calculat a l'apartat anterior?

Com haureu pogut observar, els camps magnètics necessaris són extremadament alts, impossibles d'aconseguir amb imants permanents o amb electroimants convencionals.

**P7.1)** Busqueu què vol dir el concepte de *superconductivitat* i expliqueu per què és necessària que l'LHC estigui refrigerat a uns **3 K** constantment. Quines aplicacions de la superconductivitat en un futur trobeu que poden ser interessants?

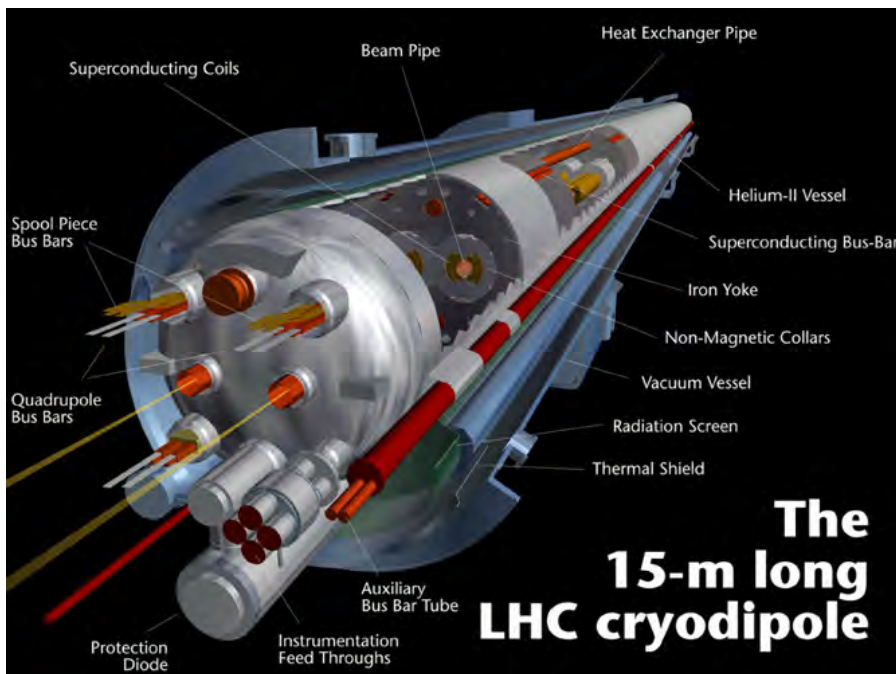


Fig. 7: L'element clau, 1232 dipòls condueixen el feix al voltant dels 27 km de circumferència

### Lluminositat i secció eficaç

La lluminositat és un dels paràmetres més importants d'un col·lisionador ja que dona una idea del nombre de col·lisions que s'hi produeixen cada

segon. És per això que, a priori, volem que aquest nombre sigui el més gran possible. Per entendre millor el concepte de lluminositat necessitem introduir el concepte de *secció eficaç*. La secció eficaç d'un procés qualsevol ens indica la probabilitat que aquest es produeixi en una col·lisió a una energia determinada. Successos molt estranys, com poden ser l'aparició d'un bosó de Higgs o de noves partícules encara no descobertes, tindran una secció eficaç de producció molt petita. Podem llavors relacionar ambdues quantitats i definir-ne una de nova:

$$R = L \sigma \quad (6)$$

on  $R$  ens indica el nombre de successos amb secció eficaç  $\sigma$  que hem tingut amb una lluminositat  $L$ . Si anem enregistrant la lluminositat que tenim en cada moment i l'anem sumant al llarg del temps, tenim el que coneixem com a *lluminositat integrada*. En la figura 8 es mostra la lluminositat integrada enregistrada per l'experiment CMS durant els primers anys de funcionament de l'LHC.

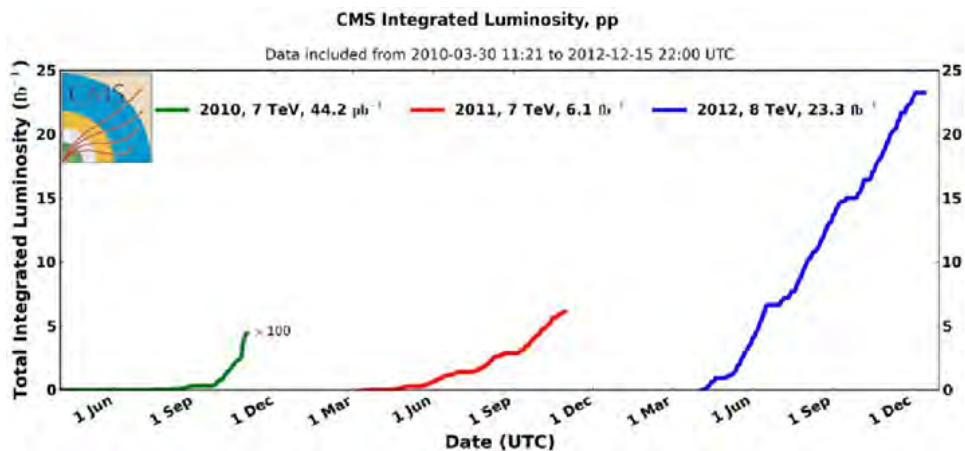


Fig. 8: Lluminositat integrada enregistrada pel CMS

P8.1) Expliqueu amb les vostres paraules les conclusions que podeu treure d'aquesta gràfica.

P8.2) Quina era la lluminositat integrada al CMS el dia del descobriment del bosó de Higgs?

### Temps de vida del feix

Malgrat la gran població de protons que hi ha al feix ( $10^{11}$  protons) i que només una vintena d'aquests es perden cada vegada que aquests feixos es creuen, a causa de la gran freqüència de revolució, el nombre de baixes pot ser considerable de tal manera que al cap d'una estona la lluminositat pot ser tan baixa que els feixos esdevinguin inservibles. Quan això passa, s'extreu el feix "gastat" i se n'injecta un de nou. El temps que passa entre la injecció i l'extracció del feix és el que anomenem *temps de vida*.

P9.1) Si considereu que el feix de protons està compost per aproximadament  $10^{11}$  partícules i que per cada xoc de feixos es perden 20 protons i que tenim 4 punts d'interacció, calculeu el nombre de voltes en què la intensitat del feix es redueix un factor 10 i estimeu el temps de vida del feix en aquest cas.

P9.2) Quines altres fonts creieu vosaltres que existeixen que fan reduir el nombre de protons als feixos?

### Radiació de sincrotró

Un efecte notable d'accelerar partícules carregades és que aquestes emeten un tipus concret de radiació que anomenem *radiació de sincrotró*. Aquesta radiació fa que les partícules perdin certa energia en cada volta, de manera que aquesta requereix una acceleració constant; en cada volta s'ha de tornar a donar l'energia perduda per mantenir l'energia als punts de col·lisió constant. L'expressió que dóna la potència perduda per volta és:

$$P = \frac{2e^2 c \gamma^4}{12\pi\epsilon\rho^2} \quad (7)$$

on  $e$  és la càrrega de l'electró,  $c$  la velocitat de la llum,  $\gamma$  el factor relativista,  $\epsilon$  la constant dielèctrica i  $\rho$  el radi de curvatura.

P10.1) Calculeu l'energia perduda en cada volta al Gran Col·lisionador Electrò-Positró (LEP, Large Electron-Positron Collider) i a l'LHC. Quina conclusió en podeu treure? Quin efecte pot tenir aquest resultat en

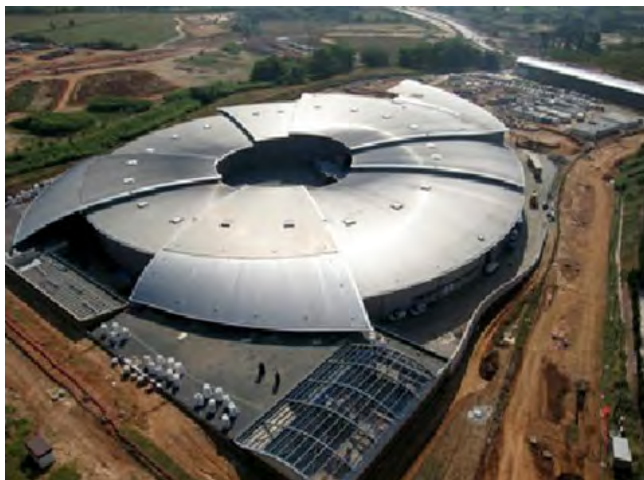


Fig. 9: Sincrotró Alba.

disseny i construcció dels futurs col·lisionadors que haurien de funcionar amb una energia més alta?

Però no sempre aquesta radiació és perjudicial per al propòsit de l'accelerador. De fet, existeixen el que es coneix com a *fonts de llum de sincrotró* com ara la construïda i posada en funcionament fa molt poc a Cerdanyola del Vallès: el sincrotró Alba. Aquest tipus d'instal·lacions utilitzen la radiació emesa pels electrons que hi circulen com a microscopi molt potent. Emprant aquesta tècnica, es poden observar amb molt de detall l'estructura de les proteïnes i la composició de certs materials.

**Extra: Produïm el Higgs**

El bosó de Higgs és una de les principals motivacions de l'LHC i dels seus experiments. És una partícula difícil de produir, és a dir, la probabilitat de generar un bosó de Higgs a l'LHC és molt petita. A la gràfica següent es mostren les diferents maneres

en què es pot produir un Higgs, sempre acompanyat per alguna altra partícula. Les diferents línies puntejades representen les diferents reaccions que donen lloc a un bosó de Higgs. Per exemple, la línia de color cian, representa la probabilitat de produir el Higgs a partir de dos quarks i que aquest vagi acompanyat de dos quarks més, en funció de la massa del bosó de Higgs, que avui ja sabem que és d'uns **125 GeV**. La línia vermella representa la suma total de les probabilitats que dos gluons (portadors de la força nuclear forta i que es troben a dins del protó) donin lloc a un Higgs en qualsevol dels modes que es mostren. Aquesta probabilitat s'anomena *secció eficaç* i s'expressa en picobarns (**pb**), que equivalen a  $10^{-12}$  b, (el barn (**b**) és una unitat de superfície:  $1 \text{ b} = 10^{-12} \text{ cm}^2$ ).

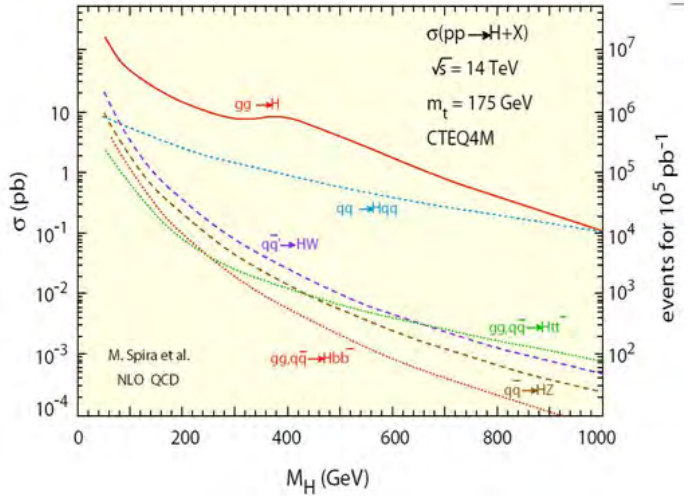


Fig. 10

**P11.1)** Busqueu la definició de la unitat de secció eficaç, barn, i relacioneu el concepte de secció eficaç amb el concepte de *lluminositat*.

**P11.2)** Per què penseu que la probabilitat baixa a mesura que la massa del bosó de Higgs augmenta?

**P11.3)** Suposant que el bosó de Higgs té una massa d'uns **200 GeV**, estimeu la quantitat de bosons de Higgs que es produirien després de d'1 any produint col·lisions a **14 TeV** amb una lluminositat instantània de  $2,5 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

En realitat, el bosó de Higgs no es detecta directament sinó que el que es detecta són les partícules en què es desintegra. Hi ha diferents maneres en què els bosons de Higgs es poden desintegrar a partir de la col·lisió entre protons. Cadascuna d'aquestes maneres s'anomena *canal*. Però no tots els canals són igual de probables, hi ha canals que són més probables que d'altres. Per exemple, és més probable que el bosó de Higgs es desintegri en dos bosons **W** (portadors de la força electrofeble) que en dos fotons (portadors de la força electromagnètica). En la següent figura es mostren les diferents probabilitats (*branching ratios*, **BR**) del bosó de Higgs en funció de la seva massa.

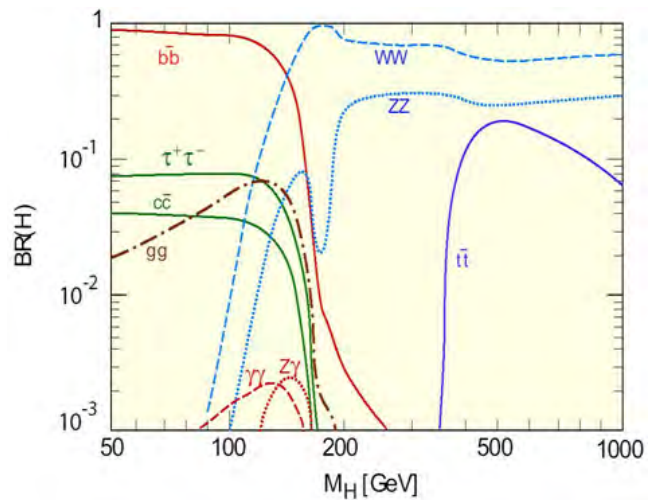
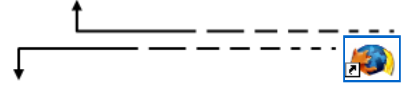


Fig. 11

**P11.4)** Suposant que la massa del bosó de Higgs fos superior a **500 GeV**, quins són els canals en què es pot desintegrar? Vol dir això que és impossible que es desintegri en qualsevol altre canal?

**P11.5)** Estimeu a partir de la figura 9 i del resultat de la pregunta **P11.4** el nombre de parells **ZZ** que es van produir durant aquest període. Creieu que és un nombre suficientment alt com per treure una bona estadística?



## Solucions

- P1.1) Calculeu el nombre de voltes que fa a l'LHC cada protó per segon i quant triga a fer una volta.

$$v \approx c \approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$L_{LHC} = vt \Rightarrow t = \frac{L_{LHC}}{v} = \frac{27,0 \cdot 10^3}{3,0 \cdot 10^8} = 9 \cdot 10^{-7} \text{ s} = 90 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\frac{1}{t} = 110000 \text{ voltes/s}$$

- P1.2) Calculeu la distància total recorreguda i doneu una escala comparable per visualitzar millor el resultat.

$$t = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$$

$$x = vt \approx 3,6 \cdot 10^8 \text{ km}$$

Els protons viatgen una distància equivalent a anar de la Terra al Sol i tornar i tornar a anar-hi mig camí.

- P1.3) Calculeu l'acceleració centrípeta que experimenten els protons i compareu-la amb l'acceleració de la gravetat. Cal tenir en compte l'efecte de la força de la gravetat, o, en altres termes, els protons cauen verticalment? Quantifiquem aquest efecte.

$$F_c = \frac{v^2}{R} m_p$$

$$m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} ; R = \frac{L_{LHC}}{2\pi} = 4,3 \text{ km} ; v \approx c$$

$$\Rightarrow F_c = 3,49 \cdot 10^{-14} \text{ N}$$

Mentre que la força de la gravetat és 12 ordres de magnitud més petita.

$$F_g = m_p g = 1,64 \cdot 10^{-26} \text{ N}$$

Atenció, el càlcul de la força centrípeta és erroni, ja que no s'han considerat correccions relativistes. Aquest resultat pot portar a càlculs posteriorment. És convida l'alumne a refer el càlcul quan s'hi han introduït els conceptes de *relativitat especial* i *factor relativista*. Fem aquí un resum (per al professorat) del raonament per trobar la força centrípeta relativista. Suposem que el moviment és circular uniforme i té un radi  $R$ . Tindrem

$$\vec{v} = v \hat{v} ; \frac{d\vec{v}}{dt} = 0$$

$$\hat{v}^2 = 1 \Rightarrow \hat{v} \cdot \frac{d\hat{v}}{dt} = 0 \Rightarrow \hat{n} = \frac{d\hat{v}}{dt} \left| \frac{d\hat{v}}{dt} \right|^{-1} = \frac{R}{v} \frac{d\hat{v}}{dt}$$

$$F_c \hat{n} = \frac{d}{dt} (m\gamma \vec{v}) = (m\gamma v \hat{v}) = m\gamma v \frac{d}{dt} \hat{v} = m\gamma \frac{v^2}{R} \hat{n}$$

$$\Rightarrow F_c = m\gamma \frac{v^2}{R}$$

El resultat numèric en aquest cas seria:

$$F_c = m\gamma \frac{v^2}{R} = 2,61 \cdot 10^{-10} \text{ N}$$



on  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$  és el factor relativista introduït en la propera secció. Aquest és el resultat que s'ha d'utilitzar per calcular el camp magnètic dels imans.

Una altra aproximació que hem utilitzat ha estat pensar que e l'LHC és un anell perfecte, però en realitat està compost per 8 seccions corbes i 8 de rectes que fan que el radi efectiu de la màquina sigui més gran del que en realitat representen la curvatura dels imans. La força centrípeta que experimenten els protons és més correctament d'uns  $4 \cdot 10^{-10}$  N. Es recomana que els alumnes facin la comparativa entre aquests resultats.

**P 2.1)** Hi ha partícules que no deixen rastre al detector, com per exemple els neutrins, de manera que no s'en pot mesurar el moment directament. Com creieu que s'en pot mesurar llavors el moment/energia?

Mitjançant la llei de la conservació de l'energia. Sabem quina energia imprimim a la col·lisió ( $7 \text{ TeV}$ ) i podem mesurar tota l'energia dels productes amb el nostre detector. Quan fem la diferència de les energies, si hi ha un defecte d'energia en els productes significa que és l'energia dels neutrins o altres partícules que no han interaccionat amb el detector. La llei de conservació del moment, a més, ens permet trobar les direccions en les quals han sortit aquestes partícules "fantasma".

**P 2.2)** Calculeu a partir de l'expressió de l'energia cinètica no relativista i sabent qu els protons són a  $7 \text{ TeV}$ , (unitat d'energia  $\text{eV}$  =electró-volt ,  $1 \text{ eV} = 1.602176462 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ) la velocitat que haurien de tenir els protons. Us sembla estrany el resultat?

$$E_c = \frac{1}{2} m_p v^2$$

$$7 \text{ TeV} = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

$$\Rightarrow v = 3,66 \cdot 10^{-10} \text{ m/s} \gg c!$$

**P3.1)** Calculeu el factor relativista  $\gamma$  i la velocitat per a un protó de l'LHC amb una energia de  $7 \text{ TeV}$ .

$$\gamma = \frac{E}{m_p c^2} = 7462$$

$$\Rightarrow v = 0,999999982044 c = 299999999,46132 \text{ m/s}$$

(amb  $c = 300000000 \text{ m/s}$ )

**P3.2)** Dibuixeu una gràfica de la velocitat en funció de l'energia dels protons i determineu el valor al qual tendeix asimptòticament la velocitat.

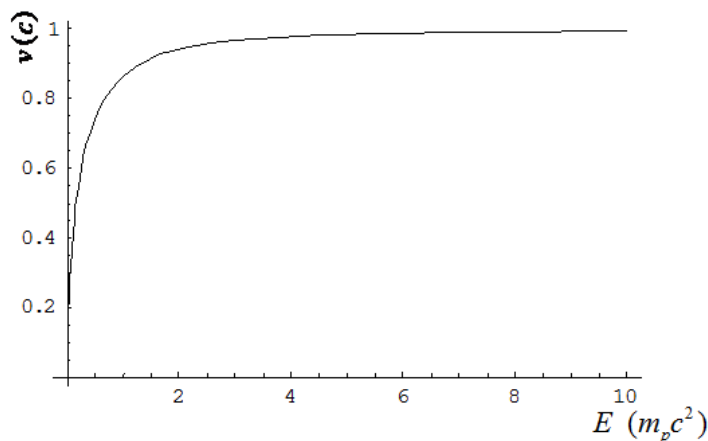


Fig. 12: Com es pot apreciar a la figura, l'energia creix asimptòticament quan la velocitat s'apropa a la velocitat de la llum. El que estableix aquesta gràfica és el fet de que les partícules no poden superar la velocitat de la llum o que es requereix una energia infinita per arribar-hi.

El buit en un accelerador és fonamental per evitar col·lisions paràsites de les partícules que componen el feix amb les partícules que romanen a l'accelerador i fan que d'aquesta manera el feix es degradi ràpidament i a la vegada generi radiacions de fons que poden arribar a apantallar les col·lisions. A la canonada per on passa el feix, la pressió és d'aproximadament  $10^{-7}$  Pa a una temperatura d'uns 5 K i a prop de  $10^{-9}$  Pa a prop dels punts de col·lisió. Aquesta pressió és al voltant de 100 vegades més petita que a la superfície de la Lluna.

- P 4.1)** Calculeu el volum que ocupa el tub per on passa el feix assumint que té un radi d'uns 3 cm i que es pot considerar igual arreu de tota la circumferència. Aquest volum, amb què es comparable en termes quotidians?

Aproximació, cilindre: es pot considerar que el tub del LHC és un cilindre ja que el radi de curvatura és molt gran. En aquest cas,

$$V = L_{LHC} \pi r^2 = 76,30 \text{ m}^3$$

Aquest volum és comparable a una habitació d'uns  $25 \text{ m}^3$ , com l'aula on són asseguts. Llavors, buidar l'LHC és com buidar tota la classe fins que gairabé no quedi cap molècula d'aire.

La densitat del gas residual, que pot variar per les fonts de gas, principalment els electrons i els que són induïts pels fotons, depèn de les propietats de la superfície i de com funciona la màquina.

Per exemple, la desorció induïda pels ions és el resultat de la col·lisió dels protons amb molècules residuals, que genera partícules carregades amb una relació càrrega/massa que no els permet portar la trajectòria correcta i per això col·lionen amb les parets del tub i alliberen gasos. Els electrons creats en aquestes col·lisions protó-molècula i els fotons emesos per radiació de sincrotró també produeixen desorció gasosa. Els principals gasos emesos són  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  i gasos nobles. Per adonar-nos de la importància de la necessitat d'un buit tan gran podem estimar el nombre de molècules per metre cúbic a dins del tub.

- P 4.2)** Utilitzant l'equació dels gasos ideals ( $pV = nRT$ ), estimeu el nombre de molècules de gas que hi ha al tub de l'LHC a temperatura ambient i amb una pressió d'1 atm (atm= atmosfera) i un cop s'ha refredat a una temperatura de 3 K s'hi ha fet el buit.

Prenem una temperatura ambient de 298 K i un buit de  $10^{-3}$  atm. Obtenim

$$n = \frac{pV}{RT} \Rightarrow$$

$$n_1 = \frac{1 \cdot 76,30}{8,31 \cdot 298} = 0,031$$

$$n_2 = \frac{10^{-3} \cdot 76,30}{8,31 \cdot 3} = 0,0031$$

- P 5.1)** L'energia a què s'injecten protons a l'LHC és 450 GeV. Calculeu quantes voltes necessiten els protons per assolir la seva energia nominal (7 TeV) si les cavitats de radiofreqüència generen un potencial elèctric de 2 MV i hi ha un total de 8 cavitats instal·lades a l'LHC. Quant de temps es requereix per dur a terme l'acceleració completa?

$$E_0 = 450 \text{ GeV} ; E_f = 7000 \text{ GeV}$$

$$\Delta E = 6550 \text{ GeV}$$

$$\Delta E_{cav} = 8 \cdot 2 \text{ MV} = 16 \text{ MeV}$$

$$n_v = \frac{6550 \text{ GeV}}{16 \text{ MeV}} = 409375 \text{ voltes}$$

$$t = \frac{n_v}{11000} = 36,84 \text{ s}$$

Recordem que un protó dona 11000 voltes/s.

- P 5.2)** El temps total en la vida real és d'uns 20 minuts. Per què creieu que hi ha tanta diferència entre el temps calculat i el temps real?

En el món real, hi ha un factor d'eficiència que redueix l'energia que es transmet al feix en cada volta i que depèn de diversos factors. Aquest factor d'eficiència és al voltant d'un 4%.

- P 6.1)** Sabent que la força que ha de fer l'imant sobre els protons ha de ser la força per mantenir-los units en la trajectòria circular (centrípeta), calculeu el camp magnètic dels imants superconductors de l'LHC. Compareu aquest resultat amb els camps magnètics de la Terra i de l'imant d'un dispositiu de ressonància magnètica.

$$F_c = qvB$$

$$B = \frac{F_c}{qc} = 8,3 \text{ T}$$

El camp magnètic a la superfície de la Terra pot variar entre 25 i 65  $\mu\text{T}$ , unes 200000 vegades més dèbil que el camp magnètic dels dipòls de l'LHC. La majoria d'imants utilitzats en les ressonàncies magnètiques són d'aproximadament 1,5 T.

P6.2) El camp magnètic necessari es crea mitjançant inducció magnètica, fent passar un corrent molt intens per uns cables, el qual, d'acord amb la llei de Biot-Savart, crea un camp magnètic a l'espai per on circulen els protons. Quin és el corrent necessari per generar el camp magnètic calculat a l'apartat anterior?

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \Rightarrow I \approx 27000 \text{ A}$$

P7.1) Busqueu què vol dir el concepte de *superconductivitat* i expliqueu per què es necessita que l'LHC estigui refrigerat a uns 3 K constantment. Quines aplicacions de la superconductivitat en un futur trebeu que poden ser interessants?

- Llei d'Ohm.
- Baixes temperatures.
- Resistivitat.
- Transport d'energia.

P8.1) Expliqueu amb les vostres paraules les conclusions que podeu treure d'aquesta gràfica.

- El LHC funciona molt bé.
- El segon any es va aconseguir una luminositat més de 100 vegades més gran que el primer any i el darrer any es va aconseguir multiplicar per 4 la luminositat integrada de l'any anterior.
- Hi ha períodes en què no s'acumula luminositat. Aquests períodes són els de manteniment de la màquina.
- El darrer any l'energia es va incrementar de 7 a 8 TeV.

P8.2) Quina era la luminositat integrada al CMS el dia del descobriment del bosó de Higgs?

La luminositat del 4 de Juliol de 2012 era d'aproximadament 7 femtobarns inversos a 8 TeV i uns 6 a 7 TeV de l'any anterior.

P9.1) Si considereu que el feix de protons està compost per aproximadament  $10^{11}$  partícules i que per cada xoc de feixos es perden 20 protons i que tenim 4 punts d'interacció, calculeu el nombre de voltes en què la intensitat del feix es redueix un factor 10 i estimeu el temps de vida del feix en aquest cas.

$$0,90 = \frac{(10^{11} - 20 \cdot 4 \cdot n_{\text{voltes}})}{1 \cdot 10^{11}} \Rightarrow n_{\text{voltes}} \approx 1,2 \cdot 10^8$$

$$t_{0,90} = t_{\text{volta}} \cdot n_{\text{voltes}} \approx 90 \cdot 1,2 \cdot 10^8 = 3 \text{ h}$$

P9.2) Quines altres fonts creieu vosaltres que existeixen que fan reduir el nombre de protons als feixos?

A part de les pèrdues en les col·lisions també es produeixen pèrdues al llarg dels 27 kilòmetres a causa dels sistemes de col·limació, que "netegen" el feix de partícules que s'apropen massa al tub i el poden fer malbé. També hi ha pèrdues incontrolades per diferents motius, com ara col·lisions amb molècules que romanen a la canonada per on passa el feix. Algunes partícules, tot i no col·lisionar, són deflèctides pels camps magnètics que provoca el feix circulant en sentit oposat.

P10.1) Calculeu l'energia perduda per cada volta al Gran Col·lisionador Electrò-Positró (LEP, Large Electron-Positron Collider) i a l'LHC. Quina conclusió en podeu treure? Quin efecte pot tenir aquest resultat en el disseny i construcció dels futurs col·lisionadors que haurien de funcionar amb una energia més alta?

$$P_{LEP} = 3 \text{ GeV/volta}$$

$$P_{LHC} = 2,2 \cdot 10^7 \text{ J/volta} = 10 \text{ keV/volta}$$

A causa de la baixa massa dels electrons, aquests irradien molta més energia, com es pot veure als càlculs, tot i que els protons a l'LHC són molt més energètics. Això fa que el futur dels acceleradors comporti haver de considerar col·lisionadors lineals, que redueixen la radiació de sincrotró gairebé a zero, o considerar acceleradors circulars molts grans. Actualment, es consideren acceleradors lineals d'entre 30 i 50 km i acceleradors circulars de 100 km.

**P11.1)** Busqueu la definició de la unitat de secció eficaç, *barn*, i relacioneu el concepte de *secció eficaç* amb el concepte de *lluminositat*.

**P11.2)** Per què penseu que la probabilitat baixa a mesura que la massa del bosó de Higgs augmenta?

Si produïm col·lisions amb una energia fixada a mesura que la massa del Higgs és més gran, cada cop és menys probable produir-la, ja que l'energia de la que disposem cada cop és relativament més baixa.

**P11.3)** Suposant que el bosó de Higgs té una massa d'uns  $200 \text{ GeV}$ , estimeu la quantitat de bosons de Higgs que es produïrien després d'1 any produint col·lisions a  $14 \text{ TeV}$  amb una lluminositat instantània de  $2,5 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

$$\mathcal{L} = 2,5 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 = 7,9 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}$$

$$\sigma_{gg \rightarrow h} = 20 \text{ pb} ; \text{pb} = 20 \cdot 10^{-36}$$

$$n_{gg \rightarrow h} = \mathcal{L} \sigma_{gg \rightarrow h} \approx 1,5 \cdot 10^6$$

**P11.4)** Suposant que la massa del bosó de Higgs fos superior a  $500 \text{ GeV}$ , quins són els canals en què es pot desintegrar? Vol dir això que és impossible que es desintegri en qualsevol altre canal?

$WW, ZZ, \bar{\nu}\nu$

Vol dir que la probabilitat de desintegra-se en els altres canals és molt baixa però no exactament zero.

**P11.5)** Estimeu a partir de la figura 9 i del resultat de la pregunta **P11.4** el nombre de parells  $ZZ$  que es van produir durant aquest període. Creieu que és un nombre suficientment alt per treure una bona estadística?

$$BR(H \rightarrow ZZ) \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$$

$$n_{ZZ} = BR(H \rightarrow ZZ) n_{gg \rightarrow h} = 23000$$



## Sumari

6/8

[Inici](#)

[Com podeu col·laborar?](#)

[Subscripció](#)

ISSN: 1988-7930 DL: B-31773-2012 Adreça a la xarxa: [www.RRFisica.cat](http://www.RRFisica.cat) Adreça electrònica: [redaccio@rrfisica.cat](mailto:redaccio@rrfisica.cat) [difusio@rrfisica.cat](mailto:difusio@rrfisica.cat)

Comitè de redacció: Josep Ametlla, Octavi Casellas, Xavier Jaén, Gemma Montanyà, Octavi Plana, Jaume Pont.

Treballam conjuntament: Societat Catalana de Física, Associació de Professores i Professors de Física i Química de Catalunya, XTEC, Universitat Politècnica de Catalunya, Universitat de Barcelona



Aquesta obra està subjecta a una [Llicència de Creative Commons](#)



Programació web: Xavier Jaén i Daniel Zaragoza.

Correcció lingüística: Serveis Lingüístics de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Recursos de Física col·labora amb [la baldufa](#) i també amb [ciències](#) Revista del Professorat de Ciències de Primària i Secundària (Edita: CRECIM-UAB)