

*Treball de Recerca*

*Jalal Kasmi Chourak*

*El bosó de Higgs: l'origen de la massa de les partícules elementals*



**Joan Ram3rez Serrano**  
**Àmbit F3sic**  
**15 de Gener del 2015**

**Voldria tenir unes paraules en agraïment al Dr. Aurelio Juste de l'IFAE (Institut de Física d'Altes Energies) per la seva dedicació en el meu treball i ajudar-me a comprendre aspectes complexos del meu treball. Cal dir que he tingut un tracte molt bo amb ell.**

**El seu treball ha tingut gran importància en aquesta recerca sobretot en el marc experimental on el grau de dificultat era elevat. A més, m'ha proporcionat informació important en aquest aspecte i ha tingut gran rellevància en l'explicació i estructura del treball.**

**També voldria agrair el treball que ha realitzat el meu tutor, Joan Ramírez, pel la dedicació i l'esforç que ha fet en el moment d'elaboració d'aquesta recerca. El seu treball ha estat molt important ja que aquest treball requereix de molt de seguiment.**

# Índex

Introducció .....	3
-------------------	---

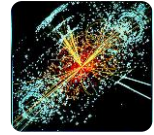
## Capítol I: Marc teòric

1. La massa .....	4
2. Constitució de l'univers .....	5
2.1 L'estructura de la matèria .....	6
2.2 Model Estàndard de les partícules elementals .....	7
2.3 Antimatèria .....	11
3. Les interaccions fonamentals .....	12
3.1 Interacció gravitacional .....	12
3.2 Interacció electromagnètica .....	13
3.3 Interacció nuclear forta .....	15
3.4 Interacció nuclear feble .....	15
4. Unificació de les interaccions .....	16
5. Intercanvi de partícules .....	17
6. Mecanisme de Higgs .....	18

## Capítol II: Marc pràctic

1. CERN .....	20
2. Accelerador de partícules .....	21
3. El LHC ( <i>The Large Hadron Collider</i> ) .....	21
3.1 Detector ATLAS ( <i>A Toroidal LHC ApparatuS</i> ) .....	23
3.2 El detector CMS ( <i>Compact Muon Solenoid</i> ) .....	23
3.3 El detector LHCb ( <i>Large Hadron Collider Beauty experiment</i> ) .....	24
3.4 El detector ALICE ( <i>A Large Ion Collider Experiment</i> ) .....	24
4. Investigació .....	25
4.1 Bosó Z .....	25
4.2 Bosó de Higgs .....	26
5. Identificació de les partícules .....	27

5.1 Estudi del bosó Z.....	29
5.1.1 <i>Desintegració del bosó Z en dos muons</i> .....	30
5.1.2 <i>Desintegració del bosó Z en dos electrons</i> .....	31
5.2 Estudi del bosó de Higgs .....	32
5.2.1 <i>Desintegració del bosó de Higgs en dos fotons</i> .....	33
5.2.2 <i>Desintegració del bosó de Higgs en quatre leptons</i> .....	36
5.2.3 <i>Conclusions</i> .....	37
6. El descobriment .....	38
7. Més enllà del descobriment .....	39
8. Futur en el CERN.....	40
 <b>Capítol III: Experiència personal</b>	
Conclusions .....	41
Bibliografia .....	42
 <b>Annexos</b>	
A1: Funcionament del simulador Hypatia .....	44
A2: Com s'utilitza Hypatia?.....	49



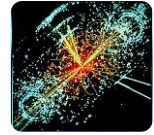
### Introducció

L'hivern passat el tutor, Joan Ramírez, em va proporcionar uns vídeos sobre física quàntica i quan els vaig veure em va picar la curiositat sobre aquest àmbit de la física. Aquest ha estat el motiu d'elecció del treball de recerca. A més és un treball que mai s'ha fet a l'institut i això per a mi significa una motivació extra. He de dir que, en tenir un alt grau de complexitat, m'he hagut de concentrar al màxim per realitzar la recerca. Crec que el més important a l'hora de fer l'elecció és triar un treball en el qual tinguis una motivació per a fer-lo, d'aquesta manera és molt més fàcil treballar!

El treball, principalment, es basa a donar a entendre quin és l'origen de la massa de les partícules elementals i, posteriorment, fer la investigació sobre la causa d'aquesta massa donada a aquestes partícules, ja que són aquestes les que ens la fa adquirir a nosaltres i a la matèria en general.

Però abans d'arribar a aquest punt s'ha elaborat un marc teòric on, inicialment, s'ha explicat la constitució de la matèria i després ens hem centrat en la matèria ordinària. En aquest apartat s'ha intentat seguir una estructura de grandària (massa macroscòpica, àtom, hadrons, partícules elementals). Després s'ha explicat la funcionalitat d'aquestes partícules elementals en la matèria i, finalment, s'ha parlat sobre la teoria que justifica la qüestió que ens hem plantejat inicialment.

Per elaborar el marc pràctic he tingut l'ajuda del Dr. Aurelio Juste de l'IFAE (Institut de Física d'Altes Energies) de la UAB que m'ha proporcionat material i explicacions per donar a entendre millor la recerca. En el marc pràctic s'ha intentat fer la recerca de la mateixa manera que es fa al CERN, on treballa el Dr. Juste, que és el centre d'investigació europeu de la física de partícules. La finalitat ha estat intentar donar validesa a la teoria que explica l'origen de la massa de les partícules elementals fent el descobriment de la causa d'aquestes.



# Capítol I: Marc teòric

## 1. La massa

Curiosament, la massa és una propietat molt familiar de la matèria, encara que és un dels assumptes més investigats a la física de partícules, perquè els físics volen saber per què les partícules tenen aquesta propietat. Aquesta propietat es relaciona amb el bosó de Higgs, que serà l'objectiu d'aquest treball de recerca.

El concepte de massa en la física clàssica s'explica mitjançant dues lleis: la Llei de la Gravitació Universal de Newton i la Segona Llei de Newton. La primera llei esmentada explica l'atracció mútua que experimenten dos cossos pel fet de tenir una massa determinada. Segons la fórmula  $\mathbf{F} = \frac{G m_1 m_2}{r^2} \mathbf{u}$ . La segona llei explica que la força necessària per accelerar un cos és proporcional a la seva massa i que sobre aquest cos hi actua una força resultant, segons la fórmula  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ .

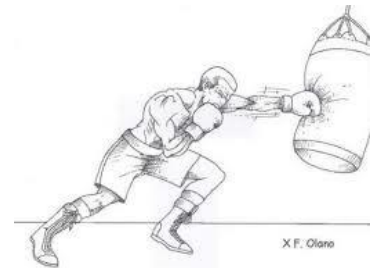
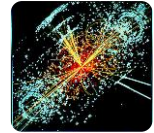


Figura 1. Segona Llei de Newton.

Més endavant, va sorgir una nova llei ideada per Einstein que posava en equivalència la massa i l'energia ( $E = mc^2$ ). Aquesta llei és un apartat de la Teoria de la Relativitat Especial que va introduir ell mateix.

En aquest principi no és possible assegurar la constància de la massa d'una partícula quan és accelerada. La fórmula  $E = mc^2$  explica l'energia total d'una partícula en repòs emmagatzemada en la seva pròpia massa.

1 Marquem en negreta les magnituds vectorials.



## 2. Constitució de l'univers

Durant l'última dècada els estudis cosmològics han revelat que la matèria ordinària que coneixem només constitueix el 5% de la densitat de l'energia de l'univers. La resta està compost per matèria fosca (27%) i energia fosca (68%) que són formes exòtiques de matèria i energia, respectivament, que no estan descrites per les teories físiques vigents.

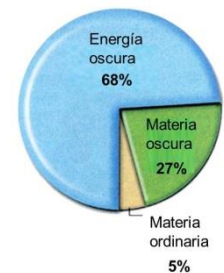


Figura 2. Representació de la constitució de l'univers.

La matèria fosca, a diferència de la matèria ordinària, no interactua amb la força electromagnètica i, com a conseqüència, no absorbeix ni emet llum i això fa que difícilment la puguem detectar. De fet, l'existència de la matèria fosca ha estat detectada gràcies a l'efecte gravitacional que sembla tenir sobre la matèria visible. Una idea que es té sobre la matèria fosca és que podria estar constituïda per partícules supersimètriques<sup>2</sup>.

La matèria fosca és responsable dels halos<sup>3</sup> galàctics i sense ella les galàxies no es mourien de la forma com veiem que ho fan.



Figura 3. Representació d'un halo.

L'energia fosca és una forma exòtica d'energia que impregna l'univers i sembla que està associada amb el buit de l'espai. Es distribueix de manera uniforme en espai i en temps en tot l'univers. Això significa que no té efectes gravitatoris, sinó que té un efecte global sobre el conjunt de l'univers que condueix a forces de repulsió que tendeixen a l'acceleració en l'expansió de

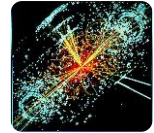
l'univers.

L'expansió de l'univers es pot mesurar mitjançant observacions i aplicant la llei de Hubble. Les dades obtingudes a partir d'aquestes investigacions han sigut una confirmació de l'existència de l'energia fosca.

El meu estudi se centrarà en la matèria ordinària ja que és la matèria que observem i amb la qual vivim. A més, el seu estudi presenta més simplicitat encara que és molt ampli com ja veurem.

<sup>2</sup> Supersimetria: és una teoria que es basa en l'explicació de partícules hipotètiques simètriques a les ja conegudes del Model Estàndard de les partícules elementals.

<sup>3</sup> Halo: cercles lluminosos que s'observen al voltant dels astres i les galàxies.



## 2.1 L'estructura de la matèria

Les partícules elementals són els constituents fonamentals de la matèria. Des de l'antiguitat s'ha intentat revelar la constitució de la matèria; iniciant-se amb els primers filòsofs i fins a l'actualitat s'han anat postulant moltes teories.

Tales de Milet (624-547 aC) deia que l'origen de totes les coses era l'aigua, de la qual tot procedeix i a la qual tot torna.

Empèdocles (484-424 aC) afirmava que tots els objectes estan constituïts per quatre elements primordials: terra, aigua, aire i foc.

Segons Demòcrit (460-370 aC), tota la matèria està composta per partícules diminutes, invisibles i indestructibles de matèria pura que va denominar àtom. Aquests àtoms es mouen eternament en un infinit espai buit.

No va ser fins al segle XIX que es va formular la teoria atòmica de Dalton (1803) en la qual postulà que la matèria està composta per àtoms, partícules indivisibles, explicant que un element consta d'un mateix tipus d'àtom, els quals posseeixen les mateixes característiques. Més tard, Thomson va descobrir l'electró (1898) i va postular un model atòmic (1903) en què els electrons estaven distribuïts uniformement en un àtom amb càrrega positiva. Rutherford (1911) postulà un model en el qual hi havia un nucli de càrrega positiva (protons) amb electrons girant al voltant. Va ser Bòhr, al 1913, qui va establir els nivells permesos per l'electró en l'àtom, explicant els espectres atòmics d'emissió d'alguns elements. Els espectres atòmics d'emissió, la radiació tèrmica del cos negre i l'efecte fotoelèctric van donar lloc al desenvolupament d'una nova teoria, la mecànica quàntica. També s'hi van introduir el principi de dualitat ona-partícula establert per De Broglie i el principi d'incertesa de Heisenberg. A mitjans dels anys vint del s.XX van sorgir dues teories aparentment diferents: la mecànica quàntica matricial i la mecànica quàntica ondulatoria. Dirac va demostrar que totes dues teories utilitzen

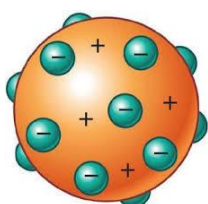


Figura 4. Model atòmic de Dalton.

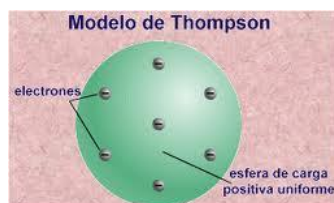


Figura 5. Model atòmic de Thomson.

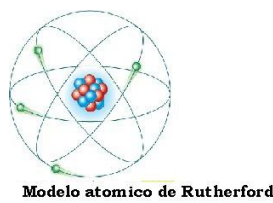


Figura 6. Model atòmic de Rutherford.

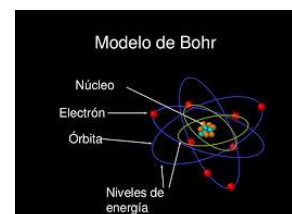
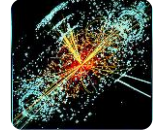


Figura 7. Model atòmic de Bohr.





mètodes matemàtics diferents per descriure els mateixos fenòmens. E. Shrödinger, a l'any 1926, va desenvolupar l'equació d'ona que permet descriure la posició dels electrons en funció del temps i relacionar-la amb l'energia associada a les partícules en el seu estat quàntic. A l'any 1932 Chadwick va descobrir el neutró i va explicar la composició dels nuclis (neutrons i protons). Finalment, abans de donar pas al Model Estàndard de les partícules elementals, Gell-Mann i Zweig (1964) per separat, van veure que els protons i neutrons estan formats per tres quarks de dos tipus diferents. Altres partícules estan formades pels mateixos quarks i les seves partícules de càrrega oposada, els antiquarks.

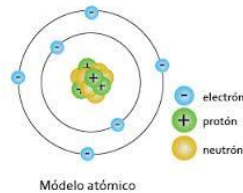


Figura 8. Model de Chadwick.



Figura 9. Model de Gell-Mann i Zweig.

## 2.2 Model Estàndard de les partícules elementals

El Model Estàndard recull tot el coneixement actual en física de partícules i totes les seves característiques que apareixen a partir de la unió dels estudis de la mecànica quàntica i la Teoria de la Relativitat Especial d'Einstein. Així, el Model Estàndard engloba tot el que passa al nostre món, excepte els efectes de la gravetat.

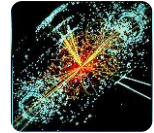
Per dividir les partícules fonamentals s'utilitzen dos criteris, segons el valor del seu spin<sup>4</sup> o la seva estructura.

- Segons el valor del seu spin, les partícules es poden classificar en bosons o fermions.

Els bosons són les partícules amb valor d'spin enter ( $s = 0, 1, 2, \dots$ ), a les quals no es pot aplicar el principi d'exclusió de Pauli<sup>5</sup>. Com a conseqüència d'això, poden existir molts bosons que es trobin en el mateix estat quàntic. Són bosons: el fotó ( $\gamma$ ) amb spin zero, els bosons vectorials  $W^+$ ,  $W^-$  i el bosó  $Z^0$  amb spin 1.

<sup>4</sup> Spin: gir d'una partícula sobre el seu eix.

<sup>5</sup> Principi de Paulí: explica que en un orbital no pot haver més de dos electrons amb els quatre nombres quàntics iguals.



Partícula	Símbol	Massa ( $\text{GeV}/c^2$ )	Càrrega elèctrica	Spin
Fotó	$\gamma$	0	0	1
Bosó W	$W^+/W^-$	80,4	+1/-1	1
Bosó Z	$Z^0$	91,187	0	1
Gluó	g	0	0	1

Taula 1. Taula de bosons

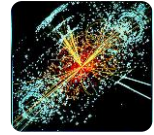
Els fermions són les partícules amb spin semienter ( $s = 1/2, 3/2\dots$ ). A aquests, en canvi, sí que se'ls pot aplicar el principi d'exclusió de Pauli. Per tant, no poden existir dos fermions en el mateix estat quàntic. Els fermions principalment són partícules amb massa. L'electró, el protó i el neutró són exemples de fermions, encara que les dues darreres partícules no són elementals sinó, que estan formades per d'altres anomenades hadrons.

- Els fermions es divideixen segons la seva estructura: poden ser elementals (quarks i leptons), i hadrons (barions i mesons).

Les partícules elementals són les que no tenen estructura interna, és a dir, les que no estan formades per altres partícules. Considerem amb aquesta característica els quarks i els leptons.

Els leptons, com s'ha comentat, són partícules sense estructura interna que no tenen càrrega color<sup>6</sup>. A més, tenen un valor d'spin semienter, per tant, formen part dels fermions. Hi ha sis tipus de leptons: electró, muó, tauó, neutrí electrònic, neutrí muònic i neutrí tauònic. Cada leptó té el seu antileptó. Tenim, per tant, un total de 12 leptons. D'aquestes partícules l'electró i els neutrins són estables, i el muó i el tauó són inestables.

<sup>6</sup> Color: es refereix a la força que manté units els nucleons (interacció forta). Hi ha tres varietats de colors en els quarks que són: el vermell, verd i blau. L'estat estable d'un àtom correspon a una càrrega elèctrica nul·la. Són estables quan el seu color és blanc, que es forma quan entren en combinació els tres colors o bé un color i el seu anticolor.



Partícula	Símbol	Massa	Càrrega elèctrica	Antipartícula
Electró	$e^-$	$0,511\text{MeV}/c^2$	-1	$e^+$
Muó	$\mu^-$	$105,6\text{ MeV}/c^2$	-1	$\mu^+$
Tauó	$\tau^-$	$1,784\text{ GeV}/c^2$	-1	$\tau^+$
Neutrí electrònic	$\nu_e$	$<50\text{ eV}/c^2$	0	$\bar{\nu}_e$
Neutrí muònic	$\nu_\mu$	$<0,5\text{ MeV}/c^2$	0	$\bar{\nu}_\mu$
Neutrí tauònic	$\nu_\tau$	$<70\text{ MeV}/c^2$	0	$\bar{\nu}_\tau$

Taula 2. Taula de fermions (Leptons).

Els quarks també són partícules sense estructura interna, però a diferència dels leptons tenen càrrega color i la seva càrrega elèctrica és fraccionària. També pertanyen al grup de fermions i n'hi ha de sis tipus: *up* (a dalt), *down* (a baix), *charm* (encant), *strange* (estrany), *top* (cima) i *bottom* (fons). La principal característica dels quarks és que mai han estat detectats lliures, sempre s'han trobat formant part de l'estructura dels hadrons. Cada quark té la seva antipartícula que són els antiquarks.

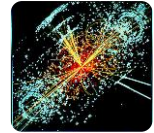
Partícula	Símbol	Massa	Càrrega elèctrica	Antipartícula
<i>up</i>	u	$\sim 5\text{ MeV}/c^2$	$+2/3$	$\bar{u}$
<i>Charm</i>	c	$\sim 1,5\text{ GeV}/c^2$	$+2/3$	$\bar{c}$
<i>top</i>	t	$>30\text{ GeV}/c^2$	$+2/3$	$\bar{t}$
<i>down</i>	d	$\sim 10\text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$\bar{d}$
<i>strange</i>	s	$\sim 100\text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$\bar{s}$
<i>bottom</i>	b	$\sim 4,7\text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$\bar{b}$

Taula 3. Taula de fermions (Quarks).

Amb la combinació de les partícules elementals es forma la matèria ordinària constituïda (matèria de primera generació) per quatre partícules: dos leptons (l'electró i un neutrí electrònic) i dos quarks (*up* i *down*). Les altres partícules elementals només s'observen en la radiació còsmica o en laboratoris d'alta energia.

La teoria dels quarks, proposada per Murray Gell-Mann i Georges Zweig (1964), explica la constitució interna dels hadrons. En aquesta teoria dona a entendre, com hem explicat, que els hadrons estan formats per partícules elementals, els quarks. Inicialment, la combinació dels quarks o dels antiquarks era de tres tipus: *up*, *down* i *strange*.

Posteriorment es va ampliar als sis quarks anteriorment esmentats, cadascun amb el seu antiquark corresponent. Amb la determinació dels colors que poden adquirir els quarks,



trobem que tenim 36 quarks: els sis esmentats, més 18 (cada quark pot presentar els tres colors) més 18 dels antiquarks.

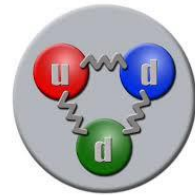


Figura 10. Estructura interna del protó, format per quarks (u,d,d).

Els hadrons experimenten les interaccions electromagnètiques fortes i febles. Es divideixen en dues categories: els barions i els mesons. Els hadrons fins ara coneguts no estan formats per més de tres quarks, però recentment s'han donat evidències d'una nova partícula amb cinc quarks (més concretament, quatre quarks i un antiquark), és a dir, un "pentaquark" al qual han anomenat *teta mas*.

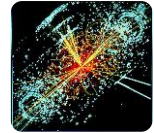
Els barions contenen tres quarks i gluons<sup>7</sup> que fan de "pega" entre els quarks. El seu valor d'spin és semienter (1/2), cosa que sembla molt lògica ja que estan formats per quarks que són fermions. Excepte els nucleons (protó i neutró) tots els altres barions tenen una semivida molt curta (són inestables) i se'ls anomena hiperons.

Partícula	Símbol	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Càrrega elèctrica	Valor d'spin	Quarks	Antipartícula
Protó	p	938,28	+1	1/2	uud	$\bar{p}$
Neutró	n	939,57	0	1/2	uud	$\bar{n}$
Partícula lambda	$\Lambda^0$	1.115,6	0	1/2	uds	$\bar{\Lambda}^0$
Partícula sigma +	$\Sigma^+$	1.189,4	+1	1/2	uus	$\Sigma^-$
Partícula sigma 0	$\Sigma^0$	1.192,5	0	1/2	uds	$\Sigma^0$
Partícula sigma -	$\Sigma^-$	1.197,3	-1	1/2	dds	$\Sigma^+$
Partícula xi 0	$\Xi^0$	1.314,7	0	1/2	uss	$\Xi^0$
Partícula xi -	$\Xi^-$	1.321,3	-1	1/2	dss	$\Xi^+$
Partícula omega -	$\Omega^-$	1.672,2	-1	3/2	sss	$\Omega^+$

Taula 4. Taula d'hadrons (barions).

Els mesons estan formats per un quark, un antiquark i gluons. Els seus valors d'spin són enters, per tant, són bosons. Els mesons són inestables, però s'han pogut aïllar.

<sup>7</sup> Gluó: partícula intermediària de la interacció nuclear forta.



Partícula	Símbol	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Càrrega elèctrica	Valor d'spin	Quarks	Antipartícula
Rho	$\rho$	770	0	1	$u\bar{d}$	$\rho$
Pi0 neutre	$\pi^0$	135	0	0	$u\bar{u} + d\bar{d}$	$\pi^0$
Pi0 positiu	$\pi^+$	140	+1	0	$u\bar{d}$	$\pi^-$
D	$D^+$	1.869	+1	0	$c\bar{d}$	$D^-$
Kaó negatiu	$K^-$	494	-1	0	$s\bar{u}$	$K^+$
Kaó neutre	$K^0$	498	0	0	$d\bar{s}$	$K^0$

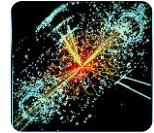
Taula 5. Taula d'hadrons (Mesons).

Hem vist que les partícules elementals són els leptons i els quarks, i les seves antipartícules corresponents (i els colors en el cas dels quarks), però per explicar la unió d'aquestes partícules elementals necessitem saber-ne més. És aquí on entren en joc les partícules de força o mediadores: fotons, gluons, bosons  $W^\pm, Z^0$  i gravitons.

Els fotons, per exemple, són les partícules mediadores de la interacció electromagnètica. En aquesta mateixa línia, hi hauria d'haver partícules mediadores en les altres interaccions fonamentals. D'aquesta manera els bosons  $W^\pm$  i  $Z$  són les partícules mediadores de les interaccions febles; els gluons, de les interaccions fortes i els gravitons serien els hipotètics bosons que explicarien la interacció gravitatòria. En el cas del gravitó, diem que és hipotètic perquè encara no ha estat detectat i s'especula que seria una partícula sense massa amb spin 2. Per altra banda, tindriem el bosó de Higgs que ens permetria explicar la diferència de masses entre els bosons  $W$  i  $Z$ , i el fotó. Totes aquestes partícules i interaccions seran tractades al llarg del treball.

## 2.3 Antimatèria

Cada partícula té una antipartícula amb la mateixa massa i el mateix spin, però de càrrega oposada. Així la antimatèria estaria formada per partícules com ara els antiquarks, positrons o antineutrons, entre d'altres. Les partícules neutres com els fotons i alguns hadrons són iguals a les seves antipartícules. La pregunta que es fan molts científics és l'existència d'aquesta antimatèria a la naturalesa. A l'univers hi ha una asimetria entre la matèria i l'antimatèria; hi ha més matèria que antimatèria (tot i que es van crear en quantitats iguals). Aquesta situació és afortunada per al món on vivim, perquè quan la matèria i l'antimatèria entren en contacte es produeix una aniquilació mútua i s'allibera una quantitat d'energia equivalent al total de la massa.



## 3. Les interaccions fonamentals

Els objectes, els cossos... exerceixen influència uns sobre els altres produint camps de força al voltant, és a dir, produeixen interaccions entre ells. Així, el camp d'un cos exerceix una força sobre un altre cos i a la inversa.

A la naturalesa hi ha quatre interaccions que es consideren fonamentals que es produeixen entre les partícules. Gràcies a aquestes interaccions, tenen lloc tots els fenòmens de l'univers. Aquestes interaccions són: la gravitatòria, la nuclear dèbil, la nuclear forta i l'electromagnètica.

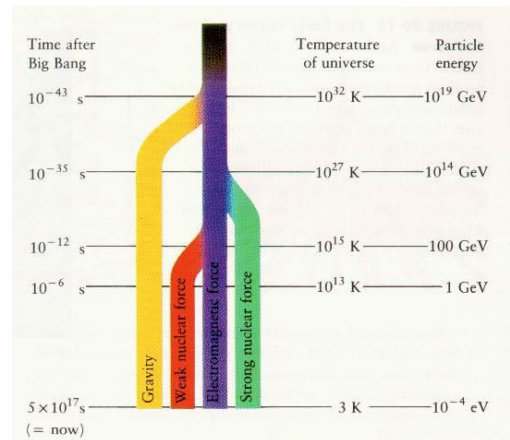


Figura 11. Bifurcació de les quatre interaccions fonamentals.

### 3.1 Interacció gravitacional

Aquesta força és la que actua entre dos cossos pel fet de tenir massa i és responsable de la configuració i estabilitat de l'univers a escala macroscòpica.

L'actuació d'aquesta força atractiva que s'estableix entre dos cossos amb massa es troba recollida a la Llei de la Gravitació Universal formulada i publicada l'any 1686 per Isaac Newton. Aquesta llei explica que tot objecte de l'univers que tingui massa exerceix una atracció gravitatòria sobre un altre objecte amb massa a qualsevol distància. Cal dir que quanta més massa posseeixin els objectes, més força d'atracció hi haurà, cosa que també passa a mesura que la distància sigui més petita.

Aquesta llei s'explica mitjançant una equació on la força que exerceix la massa  $m_1$  sobre la massa  $m_2$  és directament proporcional al producte de les seves masses i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa:

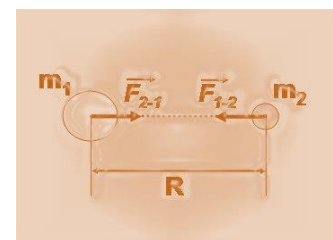
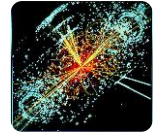


Figura 12. Representació de la força gravitatòria.

$$\mathbf{F} = \frac{-G m_1 m_2}{r^2} \mathbf{u}$$
 on  $G$  és la constant de la gravitació universal de valor  $= 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ .

Einstein, l'any 1915, publica la seva Teoria de la Relativitat General, en la qual presenta la idea que el temps és una dimensió igual que l'espai i el seu conjunt és l'espai-temps.



Aquesta dimensió presenta la característica que és flexible. La gravetat en aquesta teoria no es presenta com una força, sinó com una manifestació de la curvatura de l'espai-temps de manera que, per exemple, la Lluna no orbita al voltant de la Terra a causa d'una força invisible, sinó que ho fa perquè els objectes massius, en aquest cas la Terra, corben l'espai-temps en el qual els objectes menys massius com la Lluna es mouen. A més, Einstein postula que no només és la massa la que genera la curvatura sinó que és la distribució de l'energia i massa que estan relacionades mitjançant la seva equació  $E = mc^2$ .

Aquesta teoria sembla funcionar ja que s'ha comprovat experimentalment. S'ha observat que la llum transmesa mitjançant fotons sense massa, es desvia en presència d'objectes massius.

### 3.2 Interacció electromagnètica

Aquesta força es produeix entre partícules que tenen càrrega elèctrica, en la qual dues partícules amb el mateix signe es repel·leixen i amb diferent signe s'atreuen. Aquesta força es produeix quan les càrregues es troben en repòs i es denomina força *electrostàtica*. Aquest fet és descrit per la llei de Coulomb. Segons la fórmula  $\mathbf{F} = \frac{K Q_1 Q_2}{r^2} \mathbf{u}$  on  $Q_1$  i  $Q_2$  són càrregues elèctriques, la  $K$  és la constant de proporcionalitat de Coulomb igual a  $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$  al buit i  $r$  la distància, entre les càrregues. Aquesta llei explica que la força d'atracció o repulsió entre càrregues elèctriques és directament proporcional al producte de les càrregues i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa.

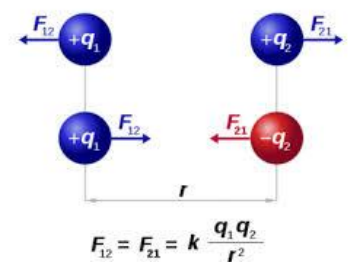
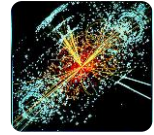


Figura 13. Representació de la llei de Coulomb.

Aquesta força també es manifesta a través de la força magnètica quan aquestes partícules es troben en moviment ja que tota càrrega en moviment crea un camp magnètic al seu voltant. Aquesta mateixa força magnètica també es produeix quan hi ha un camp magnètic que afecta a una càrrega i ve expressada per la llei de Lorentz  $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})\mathbf{u}$  on  $q$  és la càrrega, la  $v$  és la velocitat de la partícula i  $B$  és el camp magnètic creat. La direcció de la força depèn del producte vectorial  $v \times B$  i és directament proporcional al valor de la càrrega.



Aquest fenomen implica que les forces magnètiques i elèctriques estan relacionades entre si.

Llavors, cap a l'any 1860, James Clerk Maxwell va unificar aquestes dues forces en la teoria electromagnètica que explica que l'electricitat i magnetisme són dos aspectes d'un mateix origen. Al 1873 J.C. Maxwell va aconseguir formular les equacions que regeixen aquestes forces resumint-les en quatre a partir de les investigacions de Oersted, Ampère i Faraday.

Aquestes equacions són:

- Primera equació de Maxwell. És el teorema de Gauss per al camp elèctric en què el flux del camp elèctric a través de qualsevol superfície tancada és proporcional a la càrrega elèctrica interior. Segons la fórmula  $\int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$ .
- Segona equació de Maxwell. El flux magnètic a través de qualsevol superfície tancada és 0 (el nombre de línies d'inducció que entren és igual al nombre de línies que en surten). Expressada per  $\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$ .
- Tercera equació de Maxwell. És la llei de Faraday de la inducció electromagnètica en què explica que un camp magnètic variable genera un camp elèctric al seu voltant. Segons la fórmula  $\int_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ .
- Quarta equació de Maxwell. És el teorema d'Ampère generalitzat per Maxwell en el qual expressa que un camp magnètic pot ser produït per un corrent elèctric o per un camp elèctric variable. Segons la fórmula  $\int_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ .

Aquesta força electromagnètica manté units els àtoms i les molècules, i permet que es donin els enllaços de la matèria. Aquesta interacció és de llarg abast i 100 vegades més dèbil que la força nuclear forta. La seva partícula medidora és el fotó.

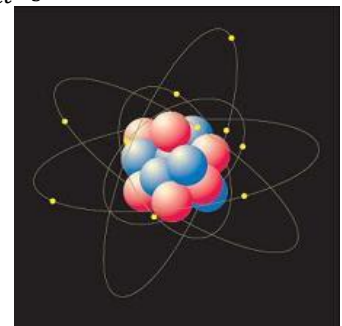
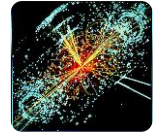


Figura 14. Intervenció de la interacció electromagnètica.

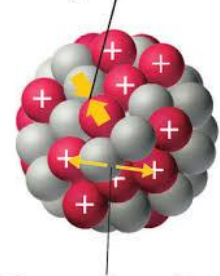




### 3.3 Interacció nuclear forta

Aquesta interacció afecta a partícules subatòmiques perquè es produeix entre quarks, i fa que els protons i els neutrons es mantinguin units dins del nucli atòmic, és a dir, és responsable de l'estabilitat de l'àtom. En molts casos, ha de combatre la força repulsiva entre càrregues elèctriques del mateix signe com pot ser la del protó-protó. És la interacció més intensa, però de molt curt abast ( $10^{-15}$ metres, equivalent al radi dels nuclis atòmics). A l'ordre d'aquesta distància la força es comporta de manera atractiva, però quan la distància és menor esdevé una força repulsiva per impedir que el nucli atòmic es col·lapsi.

Strong nuclear force



Electrostatic repulsion

Figura 15. Interacció nuclear forta.

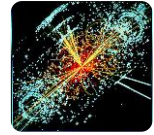
Les interaccions que es produeixen entre quarks és mitjançant l'intercanvi de partícules mediadores, que en aquest cas són els gluons que, com s'ha esmentat, fan de "pega" entre aquests. N'hi ha vuit tipus, de gluons.

No podem descriure el comportament d'aquesta interacció mitjançant lleis com hem fet amb la interacció electromagnètica i gravitacional, però sí que presenta una sèrie de característiques que explicarem a continuació.

És una interacció que uneix els quarks intensament de manera que no s'ha pogut obtenir un gluó separat d'un quark. Aquest fenomen s'anomena *confinament*. Una altra característica és que quan els quarks estan molt pròxims entre si la interacció entre ells és nul·la, però si s'intenta separar-los no es pot. Aquest comportament s'anomena *llibertat asimptòtica*.

### 3.4 Interacció nuclear feble

Aquesta força va ser postulada per Enrico Fermi l'any 1934. Aquesta interacció es produeix entre leptons o quarks. És responsable de la radioactivitat de tipus  $\beta$  en la qual un neutró del nucleó (nucli atòmic) es desintegra i dóna lloc a un protó i a una emissió d'una partícula  $\beta$ , és a dir, en un electró i un antineutrí.



La seva intensitat és més gran que la interacció gravitatòria, però més petita que la interacció electromagnètica. Té un abast molt curt, de  $10^{-18}$  metres a causa del fet que les seves partícules mediadores són els bosons  $W^-$  i  $W^+$  que són partícules carregades elèctricament i molt pesades. Hi ha una tercera partícula mediadora que és el bosó  $Z^0$  que és responsable que els neutrins puguin col·lidir amb altres partícules sense perdre la seva identitat.

Cap a l'any 1967, Sheldon Glashow, Abdus Salam i Steven Weinberg van unificar la interacció nuclear feble i la interacció electromagnètica i van donar lloc a la teoria electrofeble. A més, s'ha aconseguit experimentalment unificar aquestes dues forces. Aquesta nova teoria estableix que a energies inferiors a 100 GeV les interaccions electromagnètiques i febles es comporten de manera molt diferent, en canvi quan les energies són suficientment elevades ambdues s'unifiquen en una sola interacció.



Figura 16.  
Interacció nuclear feble.

## 4. Unificació de les interaccions

Una de les grans observacions, com hem esmentat, va ser veure com a una determinada energia, la interacció electromagnètica i la interacció nuclear feble, es podien descriure com a una única interacció, l'anomenada *interacció electrofeble*. S'ha de dir que a energies encara més elevades s'ha observat que la interacció nuclear forta es comporta de manera més feble. Això és un indicatiu que a energies elevades, la interacció electromagnètica, la nuclear feble i la nuclear forta, probablement siguin la mateixa força. S'anomena Teoria de la Gran Unificació (TGU o UGT, *Grand Unification Theory*). Per aquesta raó els físics teòrics contempen la possibilitat que augmentant més l'energia es podria incloure la interacció gravitatòria a les altres i donaria lloc a una força unificada. Es pensa que aquesta unificació de les interaccions fonamentals hauria governat durant els primers instants de l'univers i que aquestes es van anar separant a mesura que l'univers

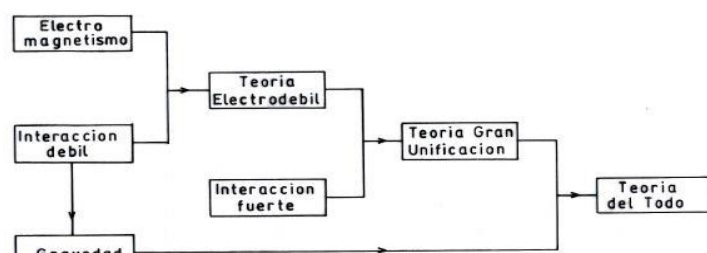
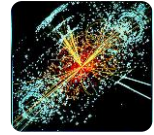


Figura 17. Unificació de les interaccions.



s'anava refredant.

Aquestes idees només són de caràcter especulatiu ja que a l'actualitat no es poden recrear situacions amb energia suficientment elevada per a observar aquests fenòmens, però sí que es poden veure les conseqüències d'aquesta gran unificació a baixes energies.

## 5. Intercanvi de partícules

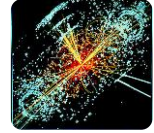
L'any 1934 Hideki Yukawa postulà la idea que la interacció dins dels nuclis atòmics es produeix intercanviant partícules mediadores com a portadores de la força nuclear intensa.

D'aquesta manera es va generar la teoria quàntica on es postula que tota interacció es deu a l'intercanvi de partícules mediadores anomenades bosons *gauge* que són partícules de camp de cada força corresponent. D'acord amb aquesta teoria, cada partícula elemental (bosons) és un tipus d'excitació del camp que transmeten una interacció que és intercanviada entre les partícules que exerceixen força. Les partícules transfereixen petites quantitats d'energia mitjançant aquest intercanvi de bosons.

Així, per a cada interacció tenim una partícula que fa d'intermediària. Resulten les següents:

- El fotó ( $\gamma$ ) és la partícula medidora de les interaccions electromagnètiques. El fotó és una partícula sense càrrega i sense massa, per aquesta raó l'abast de la interacció electromagnètica és infinita i el fotó viatja a la velocitat de la llum.
- Els gluons ( $g$ ) són les partícules responsables de les interaccions nuclears fortes. Els gluons generen el canvi de color que experimenten els quarks.
- Els bosons  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$  són les partícules responsables de la interacció nuclear feble.
- El gravitó és el bosó hipotètic per la interacció gravitacional. Aquest bosó, com ja sabem, encara no ha estat detectat. Per això aquesta interacció no encaixa bé en el Model Estàndard de les partícules elementals.

Per representar l'acció de les partícules intermediàries, Richard Feynman va crear uns diagrames que són imatges figuratives de les interaccions entre partícules. Gràcies a



aquests diagrames es poden il·lustrar processos complexos i calcular de manera més fàcil la probabilitat que tenen de produir-se. A la figura 18 es descriu el funcionament dels diagrames de Feynman i a la figura 19 podem veure la seva aplicació sobre les interaccions fonamentals de la naturalesa.

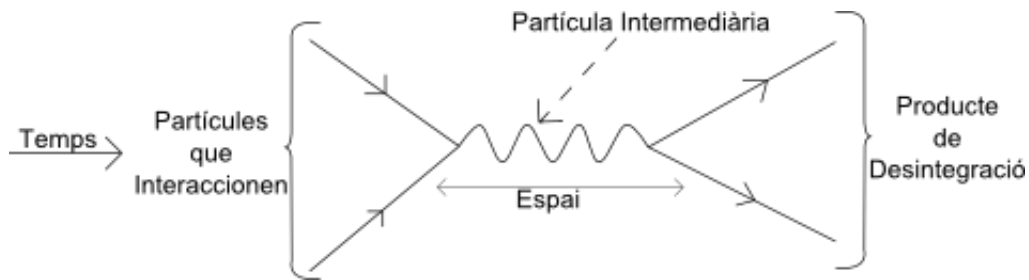


Figura 18. Funcionament dels diagrames de Feynman.

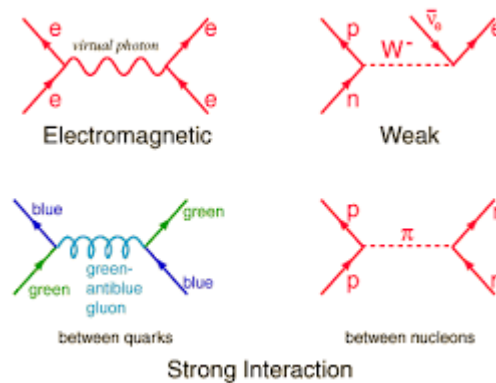
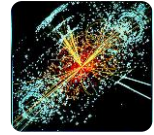


Figura 19. Representació de les diagrames de Feynman per a la interacció electromagnètica, la interacció nuclear feble i la interacció nuclear forta.

## 6. Mecanisme de Higgs

Com hem vist, el Model Estàndard consisteix en una teoria ben raonada que engloba tot el que veiem, però presenta un problema. La interacció nuclear feble, com s'ha esmentat, té com a partícules intermediàries el bosó  $Z^0$  i els bosons  $W^+$  i  $W^-$  que són partícules que tenen massa, però la matemàtica del Model Estàndard prediu que aquests bosons haurien de tenir una massa nul·la. Aquesta contradicció requereix d'una explicació del perquè aquestes partícules tenen massa.

L'any 1964 es postulà una teoria elaborada per Rober Brout, Francois Englert, Peter W. Higgs, Gerald S. Guralnik, Carl R. Hagen i T.W.B Kibble, segons la qual les masses



d'aquestes partícules serien aparents, és a dir, que les seves masses vindrien donades per una altra partícula.

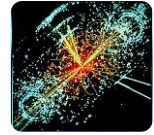
Llavors es van imaginar que, moments després del Big Bang, quan l'univers s'estava refredant, aquest es va impregnar d'un camp que es va materialitzar, de la mateixa manera que quan l'aigua es refreda i es converteix en gel. Aquest seria el camp de Higgs.

Aquest fet seria molt important perquè fins aquell moment les partícules es movien a la velocitat de la llum. Algunes partícules travessaven sense cap problema el camp de Higgs, però d'altres veien afectades les seves velocitats perquè es reduïen. Com més afectava el camp Higgs a la velocitat de les partícules, més es condensava l'energia cinètica fins a convertir-se en massa ( $E = mc^2$ ).

El camp de Higgs té associat a ell el bosó de Higgs que és una excitació del camp. Aquest camp reparteix les dues propietats (massa i energia) en diferents proporcions en les quatre partícules elementals que existien fins al moment (electró, muó, bosó W i quark top) ja que el camp no és estàtic, sinó que presenta fluctuacions. L'electró és principalment energia cinètica perquè quan entra al camp de Higgs llisca sense problema. El muó té una mica més de massa ja que fracciona una mica amb el camp. El bosó W encara té més massa perquè quan entra en contacte amb el camp crea turbulències i el quark top és gairebé tot massa perquè es veu pràcticament frenat pels bosons i, en conseqüència, transforma tota la seva energia en massa.

Per verificar el Model Estàndard, s'hauria de trobar el bosó de Higgs ja que és essencial per entendre la matèria i, a més, és responsable de les masses de les partícules elementals.

Per trobar aquesta partícula de Higgs s'hauria de recrear les condicions que l'univers presentava en aquell moment. Aquest és el propòsit que té el CERN el qual tractarem a continuació.



## Capítol II: Marc pràctic

### 1. CERN

El CERN és l'Organització Europea per a la Investigació Nuclear on s'investiguen els components bàsics de la matèria, les partícules elementals, amb la intenció d'esbrinar les lleis més fonamentals de la naturalesa. Moltes d'aquestes partícules només van existir durant una petita fracció de segon després pel Big Bang (naixement de l'univers).

Per intentar recrear les condicions que s'hi van donar poc després del Big Bang s'han construït grans instruments; els acceleradors de partícules que permeten estudiar les col·lisions que es produeixen a altes energies. Mitjançant els sofisticats detectors que conté s'observen i se'n registren els resultats, de les col·lisions. Aquests estudis intenten proporcionar informació als físics sobre els aspectes fonamentals de la física de partícules com ara: quin és l'origen de la massa de les partícules elementals? per què s'ha imposat la matèria sobre la antimatèria? hi ha altres dimensions espacials més enllà de les que coneixem?

El laboratori del CERN va ser fundat l'any 1954 a la frontera francosuïssa a prop de Ginebra. El nom del CERN prové de l'expressió en francès Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire que vol dir Consell Europeu per a la Investigació Nuclear. En el moment de la seva fundació la recerca es centrava en la part interna de l'àtom.

Actualment el nostre coneixement sobre la matèria és molt més profund que la part interna de l'àtom i en aquests moments el CERN es basa, com hem esmentat, en l'estudi dels components fonamentals de la matèria.

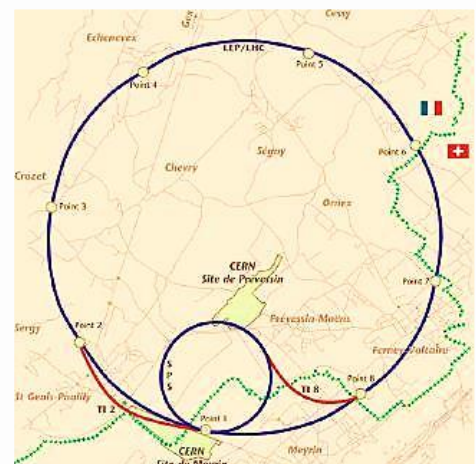


Figura 1. Lloc on se situa el CERN.



## 2. Accelerador de partícules

Un accelerador de partícules és un instrument que utilitza grans camps electromagnètics per accelerar partícules carregades fins arribar a grans velocitats i, per tant, a elevades energies. Aquestes partícules que giren en sentits contraris es fan col·lidir en determinats punts. Les col·lisions més eficients són aquelles on una partícula elemental s'aniquila amb la seva antipartícula ja que es pot produir una nova partícula amb una massa igual a l'energia total de les dues partícules, tal i com estableix l'expressió d'Einstein  $E = mc^2$  on s'explica la relació entre massa i energia a altes velocitats.

Hi ha dos tipus bàsics d'acceleradors: el lineal i el circular. En un de lineal, un feix de partícules va d'un extrem a un altre i en circular el feix es desplaça a gran velocitat en un anell de col·lisió. L'avantatge de l'accelerador circular és que es pot tornar a utilitzar les partícules que no col·lideixen. L'inconvenient és que les partícules carregades perden energia per la radiació del sincrotró quan no viatgen en línia recta i, en conseqüència, fa falta més energia per accelerar-les. A més, es necessiten grans camps magnètics per mantenir les partícules en una òrbita circular.

## 3. El LHC (*The Large Hadron Collider*)

El LHC és l'accelerador de partícules més poderós i complex del món. Està situat al CERN en el mateix túnel que l'antic col·lisionador LEP amb una circumferència de 27 km i a 100 m sota terra. Es tracta d'un disseny pel qual giren dos feixos de protons a alta energia (fins a 7 TeV<sup>8</sup>) que es desplacen en sentit oposat amb trajectòries separades al 99,9999% de la velocitat de la llum. Cada un d'aquests feixos conté aproximadament cent mil milions de protons que són

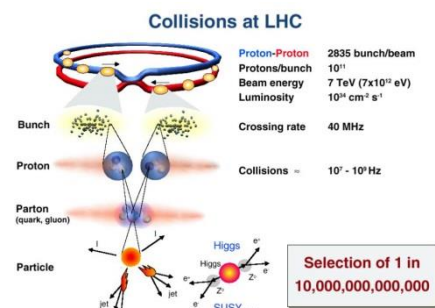
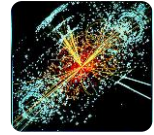


Figura 2. Col·lisió al LHC.

guiats per forts camps electromagnètics. Per aquesta raó l'LHC està constituït per més de

<sup>8</sup> Electrò-Volt (eV): unitat d'energia igual a l'energia cinètica total adquirida per un electró quan es mou per una diferència de potencial d'un volt.



9.000 electroimants. Aquests feixos es fan col·lidir a una freqüència d'aproximadament 1.000 milions de col·lisions per segon en punts determinats on s'han instal·lat els detectors. Al centre de cada detector és on es produeix el xoc de dos protons ( $p^+$ ). Donada la gran energia a la qual es produeix la col·lisió, la interacció d'interès es produeix entre els partons constituents d'ambdós protons (gluons i quarks), tal i com es mostra a la

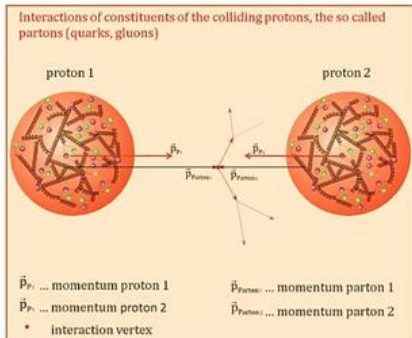


figura 3. Com hem dit anteriorment, aquesta interacció pot donar lloc a la creació de partícules molt pesades amb una existència que es prolongarà durant un període molt curt de temps, que es desintegrarà en partícules més lleugeres que són registrades pels detectors.

Figura 3. Exemple de col·lisió protó-protó on dos partons dels protons interaccionen.

Els resultats del LHC s'analitzen en quatre detectors: ATLAS, CMS, LHCb i ALICE que recullen pistes sobre les partícules (velocitat, massa i càrrega).

Els detectors estan constituïts per capes de subdetectors especialitzats a mesurar determinades propietats de les partícules. En general consisteixen, de dins a fora, en detectors de traça, calorímetres i detectors de muons com es veu a la figura 5.

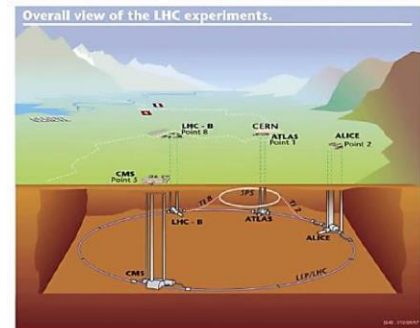


Figura 4. Situació dels detectors en el LHC.

Els detectors de traça registren petits senyals elèctrics de les partícules carregades mentre es mouen pel dispositiu i després amb un programa es reconstrueix la traça. Aquests detectors estan immersos en un camp magnètic en el qual la trajectòria de les partícules carregades es corba. A partir d'aquesta curvatura els físics poden calcular el moment lineal ( $p = m \cdot v$ ) de la partícula generada que serà un indicatiu per identificar de quina partícula es tracta.

El calorímetre mesura la quantitat d'energia que perd una partícula a mesura que el va travessant ja que la

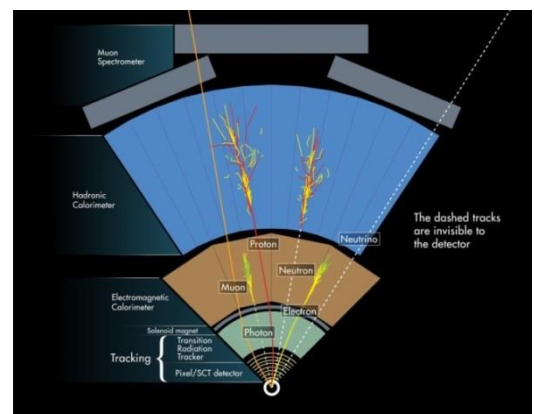
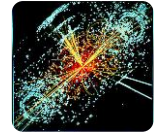


Figura 5. Els subdetectors que formen un detector.





col·lisió impacta amb el material, i això permet mesurar una petita fracció d'energia a partir de la qual podem trobar una proporció de l'energia inicial de la partícula en qüestió. El calorímetre electromagnètic mesura l'energia dels electrons i els fotons, i el calorímetre hadrònic mostra l'energia d'hadrons, que són les partícules que contenen quarks com els protons o neutrons. Els muons travessen interaccionant amb el material del detector i es registren en un detector de traça a la capa més externa coneguda com a detector de muons.

## 3.1 Detector ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)

ATLAS és un dels dos detectors amb propòsit general ja que permet la recerca en molts aspectes de la física de partícules com la recerca del bosó de Higgs, de les dimensions addicionals (més de les tres conegudes) o de les partícules que podrien formar la matèria fosca. Les dimensions d'ATLAS són: 44 m de llargada, 25 m d'altura i pesa 7.000 tones.

A ATLAS es fan col·lidir els feixos de les partícules en el centre del detector i es registren els camins, l'impuls ( $I = F\Delta t = \Delta p$ ) i l'energia de les partícules. Això permet que siguin identificats individualment. D'aquesta manera al detector ATLAS s'obtenen moltes dades. Per dirigir aquestes dades, ATLAS utilitza un sistema que permet saber als detectors quins successos ha de guardar i quins ha de ignorar.

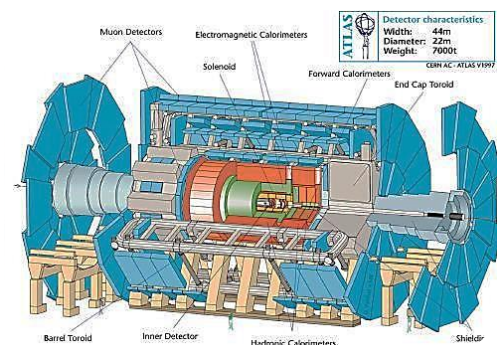


Figura 6. Estructura interna d'ATLAS.

## 3.2 El detector CMS (Compact Muon Solenoid)

El detector CMS, juntament amb l'ATLAS, és un detector amb propòsit general. Aquest experiment té els mateixos objectius que l'ATLAS. La diferència radica en les solucions tècniques i en el fet que CMS té un sistema d'imant diferent. El CMS és un cilindre multicapa que fa 21 m de llarg, 15 m d'altura i pesa 12.500 tones.

El detector CMS està construït al voltant d'un imant solenoide, en forma de bobina cilíndrica

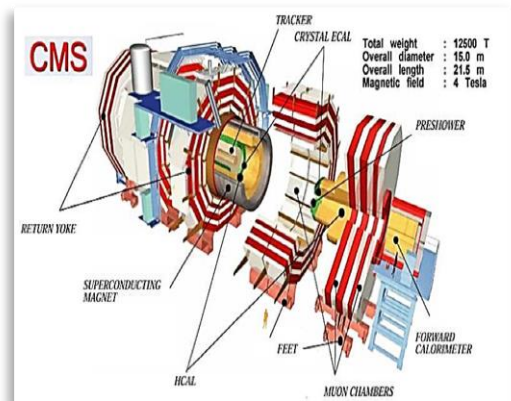
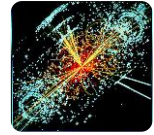


Figura 7. Estructura interna del detector CMS.



superconductora que genera un camp magnètic de 4 tesla (100.000 vegades el camp magnètic de la Terra) que permet mesurar el moment lineal d'algunes partícules carregades.

### 3.3 El detector LHCb (*Large Hadron Collider Beauty experiment*)

El LHCb és un detector dedicat a la investigació de l'origen de l'asimetria entre la matèria i l'antimatèria a l'univers mitjançant l'estudi de la partícula quark tipus b (*quark beauty/boottom*). El LHCb pesa 5.600 tones, fa 21 m de llargada, 10m d'altura i 13 m d'amplada.

El quark b apareix amb més probabilitat en la direcció dels feixos de protons. Per aquesta raó, el detector LHCb té un disseny que consisteix en diferents subdetectors distribuïts de manera longitudinal al voltant del feix de protons. El primer subdetector està situat a prop d'on es produeix la col·lisió i, al voltant d'aquest subdetector, estan els altres un darrere un altre, fins a formar una longitud de 20 m.

Amb molta freqüència es produeixen diferents tipus de quarks al LHC; per això el LHCb està desenvolupat amb la finalitat "d'agafar" el quark b abans de desintegrar-se. Té dues parts importants que cal ressaltar: el vèrtex detector amb la funció de mesurar les traces carregades i el RICH (*Ring-imaging Cherenkov*) que ha d'identificar les diferents classes de partícules produïdes .

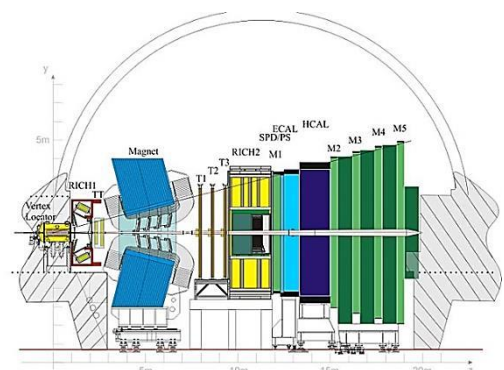


Figura 8. Estructura del detector LHCb.

### 3.4 El detector ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*)

ALICE és, com l'LHCb, un detector amb propòsit específic que s'encarrega d'estudiar col·lisions entre ions pesats a altes energies. L'objectiu d'aquest experiment és la física de la interacció forta a elevades densitats i temperatures, que són

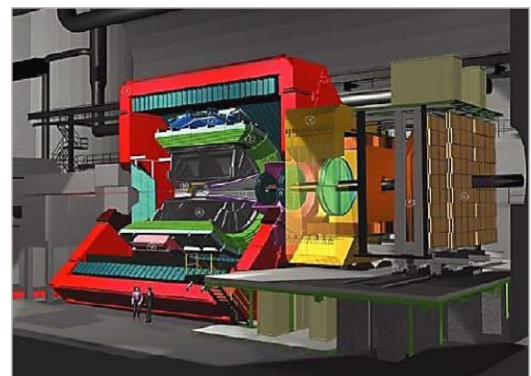
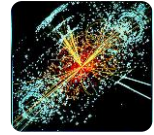


Figura 9. Representació virtual del detector.



condicions que permeten la formació de la fase de la matèria coneguda com a “plasma quark-gluó”. ALICE pesa al voltant de 10.000 tones, fa 26 m de llargada, 16 d'altura i 16 m d'amplada.

El detector ALICE està constituït per dos components principals: la part central formada per subdetectors amb la finalitat de captar els senyals d'hadrons i d'electrons, i l'espectròmetre de muons que estudia el comportament dels mesons formats per la parella quark-antiquark en la matèria d'alta densitat. En la part interior del detector es troba el TPC (*Time Projecting Chamber*) que proporciona informació del moment lineal de les partícules, identificació i determinació del resultat de les col·lisions.

Els protons i els neutrons estan compostos de quarks i gluons que es troben enllaçats a l'interior d'aquells hadrons i en estat de confinament. En el LHC es produeixen col·lisions 100.000 vegades més calentes que el Sol. Quan els ions de plom es troben a alta densitat i temperatura es produeix l'estat de desconfinament<sup>9</sup> dóna lloc a un plasma quark-gluó. D'aquesta manera, s'estaria recreant els instants posteriors al Big Bang.

## 4. Investigació

En la nostra particular investigació, mitjançant el programa de simulació HYPATIA<sup>10</sup>, hem intentat simular una investigació al LHC. Per fer això, hem analitzat les col·lisions protó-protó i, posteriorment, hem identificat les partícules elementals que apareixen al detector ATLAS. Finalment, hem fet una mesura física al detector ATLAS on hem intentat identificar el bosó Z i altres partícules i acabarem amb la possible existència del bosó de Higgs.

### 4.1 Bosó Z

Com s'ha esmentat prèviament, el bosó Z, juntament amb els bosons carregats  $W^\pm$ , és el responsable de la interacció dèbil.

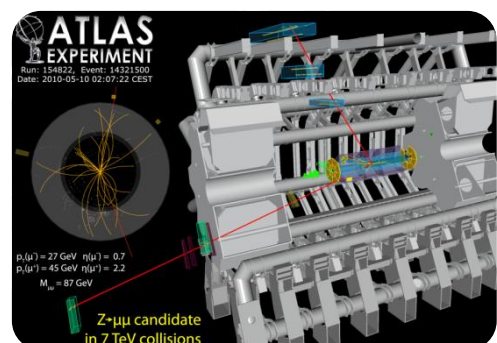
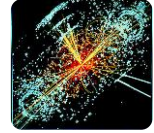


Figura 10. Vista virtual de la traça d'un bosó  $Z(\mu^+\mu^-)$  al detector ATLAS.

<sup>9</sup> Estat de desconfinament: és el “trencament” de l'enllaç entre el gluó i el quark.

<sup>10</sup> Hypatia: és un programa que es pot descarregar a la pàgina [http://atlas.physicsmasterclasses.org/es/zpath\\_lhcphysics1.htm](http://atlas.physicsmasterclasses.org/es/zpath_lhcphysics1.htm).



El bosó Z és una partícula amb molta massa (aproximadament 91 vegades la massa del protó) i amb un temps de vida molt curt. Això fa que recorri una distància molt curta i aquesta és la causa per la qual no es pot observar una "llum" com la que veiem diàriament constituïda per fotons.

El bosó Z, el podem reproduir a altes energies; d'aquí la importància del LHC. El bosó Z es pot desintegrar en dos leptons, com per exemple: electró-positró ( $e^-e^+$ ) i muó-anti-muó ( $\mu^- \mu^+$ ) o també en una parella de quark-antiquark ( $q\bar{q}$ ).

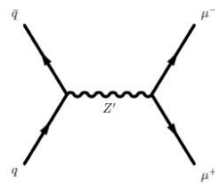


Diagrama de Feynman 1. Bosó Z desintegrat en un parell de muons.

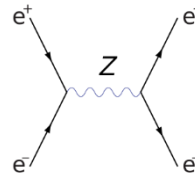


Diagrama de Feynman 2. Bosó Z desintegrat en un parell d'electrons.

## 4.2 Bosó de Higgs

El bosó de Higgs té un paper molt important en el Model Estàndard ja que és responsable de la ruptura espontània de la simetria electrofeble, la qual cosa concedeix massa als bosons Z i W. També es creu que és responsable de la massa dels fermions. Després de 50 anys de recerca, en els experiments ATLAS i CMS, l'any 2012, es va descobrir un nou bosó amb una massa de 125 GeV amb les característiques que s'esperaven del bosó de Higgs.

El Model Estàndard no pot dir quina és la massa del bosó de Higgs, però per una massa donada pot predir amb quina freqüència pot ser produït en les col·lisions i en quines partícules es desintegra, tal i com s'observa a la figura 11.

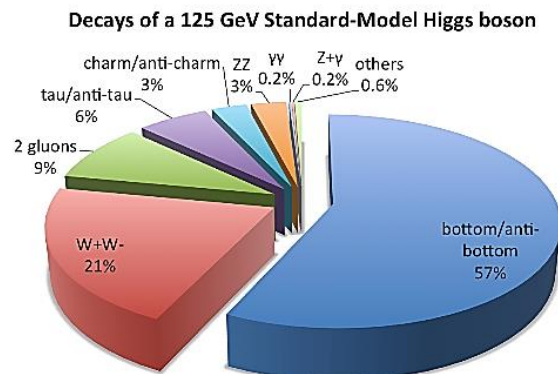
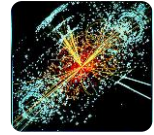


Figura 11. Probabilitat de desintegració del bosó de Higgs per una massa de 125 GeV.



El bosó de Higgs es desintegra ràpidament en dues partícules pel fet que té una gran massa i un temps de vida molt curt.

Sorprenentment, s'observen desintegracions de  $H \rightarrow \gamma\gamma$  (bosó de Higgs desintegrat en dos fotons) de 0,2% de probabilitat o  $H \rightarrow ZZ$  (bosó de Higgs desintegrat en dos bosons Z) de quatre leptons amb més freqüència que les desintegracions teòricament més freqüents com  $H \rightarrow bb$  (bosó de Higgs desintegrat en dos quarks bottom) que té 57% de probabilitat de succeir. Això és a causa que les mesures de  $H \rightarrow \gamma\gamma$  i  $H \rightarrow ZZ$  de quatre leptons es fan en el calorímetre electromagnètic o en el "tracker" on es mesura amb més precisió.

Cal afegir que aquestes desintegracions menys probables també són les més clares ja que no hi ha tants processos del Mode Estàndard (soroll de "fons") que es puguin confondre amb el bosó de Higgs. A més, aquestes desintegracions es mesuren a alta precisió, i això permet reconstruir la massa invariant<sup>11</sup> del bosó de Higgs que es mostraria com un pic estret en la distribució de massa invariant. Això també és una eina molt poderosa per distingir els successos de Higgs dels fons del Model Estàndard.

## 5. Identificació de les partícules

Quan una partícula passa pel detector deixa senyals i nosaltres hem d'identificar de quin tipus de partícula es tracta. Per fer això necessitem un simulador d'ATLAS que reculli la informació dels senyals quan dos protons col·lideixen.

Per identificar les partícules hem de saber diferenciar el recorregut de cada tipus de partícula pel detector.

A la imatge 12 tenim la traça que deixa l'electró a 15 GeV. El podem observar en el "tracker" o enregistrador (zona groga de la figura) i en el calorímetre electromagnètic (zona verda de la figura).

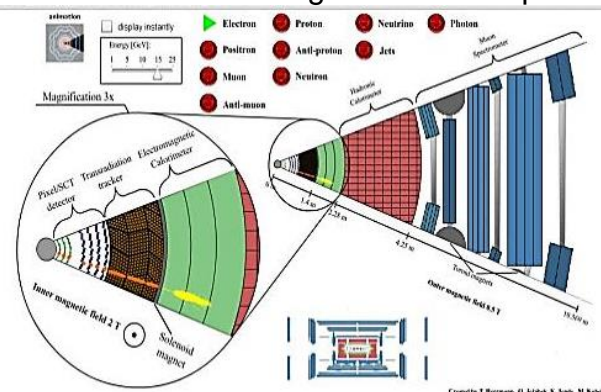
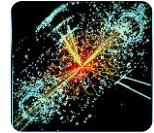


Figura 12. Traça que deixa l'electró al detector.

<sup>11</sup> Massa invariant: massa de la partícula inicial en repòs.

# El bosó de Higgs: l'origen de la massa de les partícules elementals



A la figura 13 tenim la traça d'un muó que es pot veure que travessa el calorímetre quasi sense dipositar energia i la seva senyal es dóna al detector de muons, que és la zona blava de la figura.

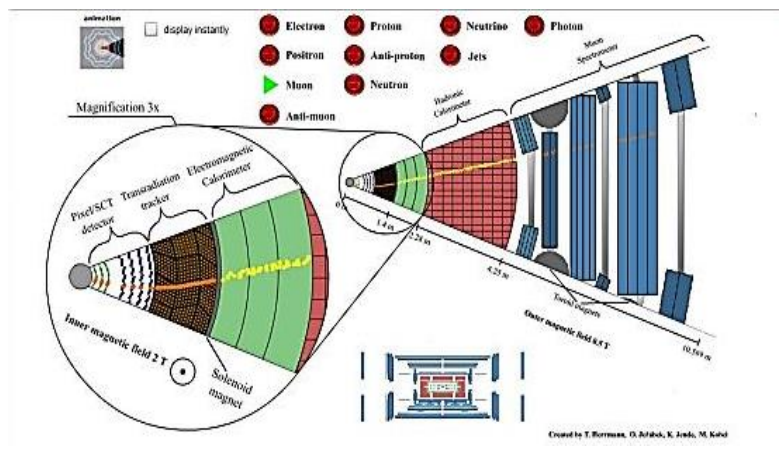


Figura 13. Senyal del muó.

En aquesta figura 14 es veu la traça del senyal del protó que es pot observar al calorímetre (una fracció en el calorímetre electromagnètic i la major part en el calorímetre hadrònic). Això es deu al fet que el protó interacciona amb el material del calorímetre i diposita tota la seva energia com podem veure a la zona vermella de la imatge.

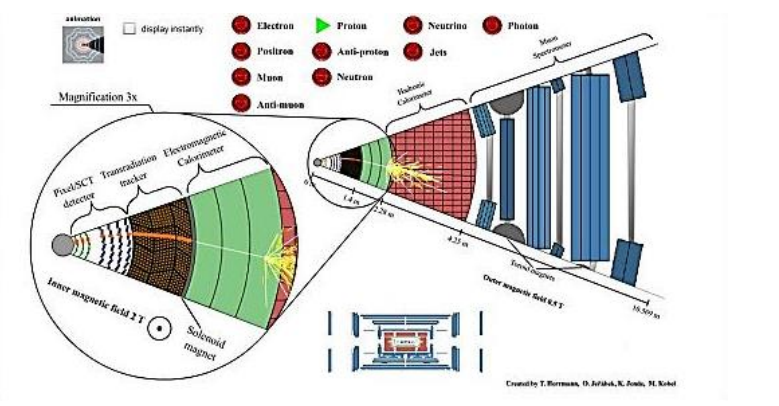


Figura 14. Senyal que deixa el protó al calorímetre.

La figura 15 mostra un neutró que només deixa senyal al calorímetre (normalment a l'hadrònic) en forma de cascada. A diferència del protó, el neutró no deixa senyal a l'enregistrator.

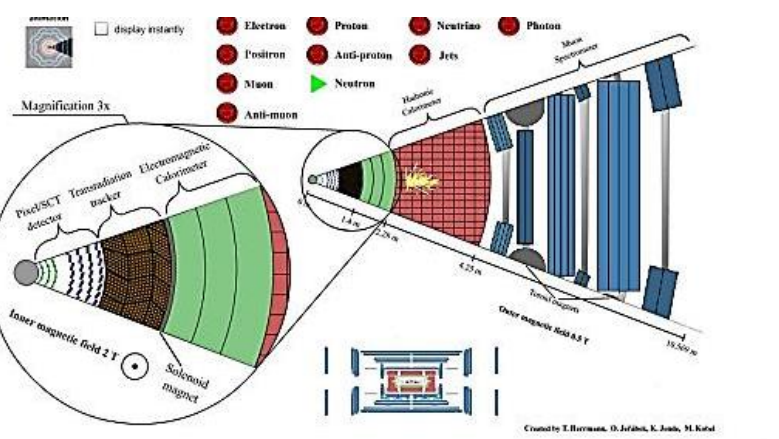
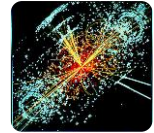


Figura 15. Traça que deixa el neutró.



El fotó és una partícula que només deixa senyal al calorímetre electromagnètic, com veiem a la figura 16.

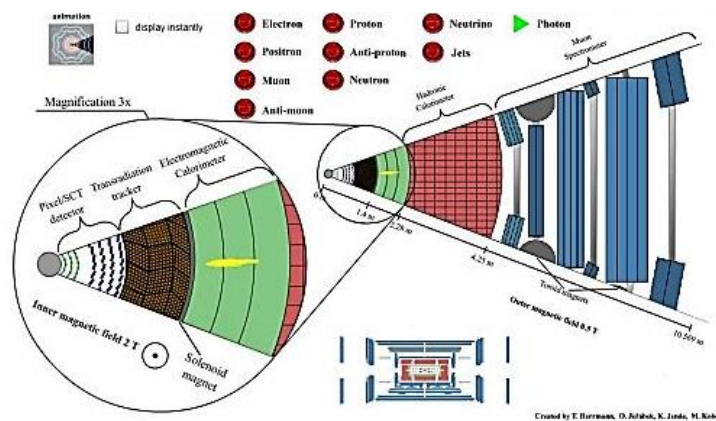


Figura 16: senyal que deixa un fotó al calorímetre electromagnètic.

El neutrí és una partícula que no té càrrega i interacciona molt dèbilment amb la matèria (només a través dels bosons W i Z que són molt pesats). Això fa que sigui molt difícil de detectar ja que no deixa traça al detector. Per això no s'observa cap senyal.

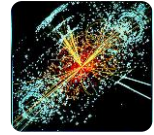
Els quarks i els gluons no es detecten directament. Atesa la propietat de confinament de la interacció forta, els quarks i els gluons es “fragmenten” en un gran número de quarks i gluons cada cop de més baixa energia, que eventualment es combinen en hadrons. Per tant el senyal d'un quark o d'un gluó és una cascada d'hadrons conegut com a *jet*. Un *jet* conté normalment un 30% d'energia en fotons ( $\gamma$ ) com a resultat de les desintegracions de pions neutres ( $\pi^0$ ), un 60% d'energia en pions carregats ( $\pi^\pm$ ) (i protons) i un 10% d'energia en hadrons neutres (incloent-hi els neutrons).

## 5.1 Estudi del bosó Z

Un cop sabem identificar les partícules que es generen, utilitzem el simulador Hyatia per a fer la investigació. Vegeu annex 1.

Estudiarem primer la desintegració del bosó Z que hem explicat anteriorment. Sabem que el bosó Z és neutre, és a dir, la seva càrrega és 0. Per això el producte de desintegració ha de ser igual a 0, la qual cosa vol dir que es desintegrarà en dues partícules i sempre hauran de ser una partícula i la seva antipartícula.

Els parells de partícules de desintegració més fàcils de detectar són:  $e^+e^-$  i  $\mu^+\mu^-$  on hem aplicat talls d'unitats d'energia a 15 GeV per a l'electró i 10 GeV per al muó per després poder elaborar un gràfic de massa invariant aplicant la fórmula  $E^2 = m^2 + p^2$  on  $E$  és l'energia,  $m$  és la massa i  $p$ , el moment lineal. Si aïllem la massa ens queda  $m =$



$\sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (px_1 + px_2)^2 - (py_1 + py_2)^2 - (pz_1 + pz_2)^2}$  on es representa l'energia de la partícula u més la de la partícula dos restant-li el moment total de les dues partícules en les tres dimensions.

Nosaltres el que hem fet és el següent: a partir dels successos<sup>12</sup> que hem rebut del CERN, hem identificat el resultat de les desintegracions que ens han semblat convenients, establint uns paràmetres d'unitats d'energia i seleccionant els productes de desintegració dins d'aquests paràmetres per elaborar un histograma<sup>13</sup>. En aquest cas, hem analitzat les desintegracions  $e^+e^-$  i  $\mu^+\mu^-$ .

## 5.1.1 Desintegració del bosó Z en dos muons

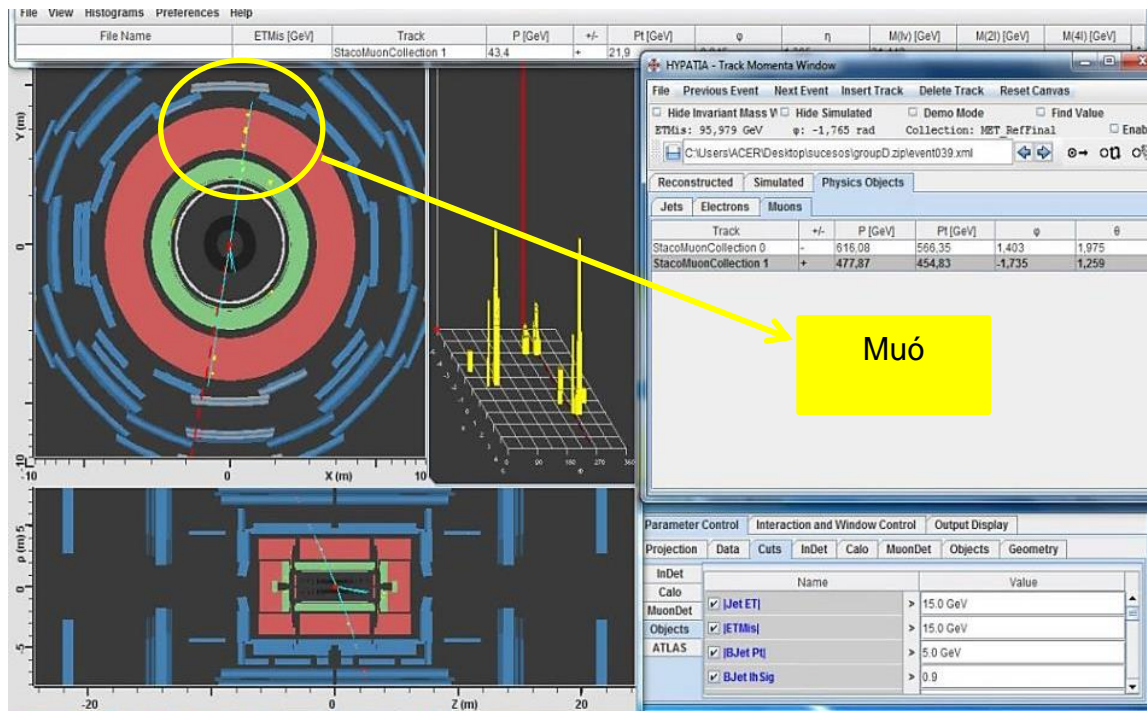


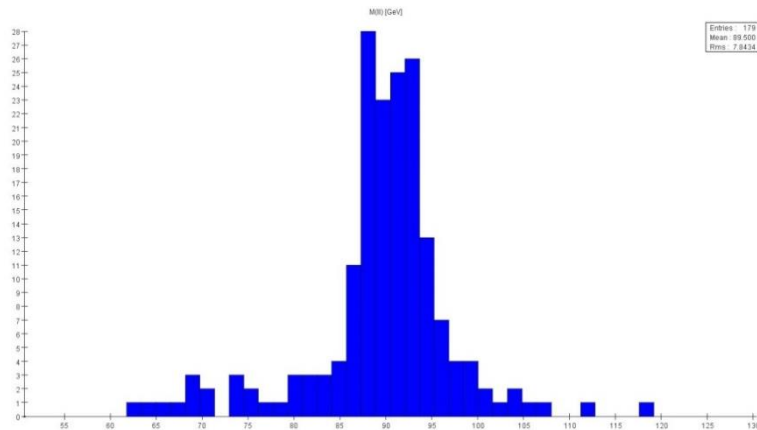
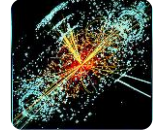
Figura 17. Vista al simulador Hypatia de la desintegració Z en un parell de muons ( $\mu^+\mu^-$ ).

En el pla transversal de la figura 17, el moment de les partícules s'ha de conservar. Si l'angle entre els muons és major que  $180^\circ$  vol dir que alguna partícula (normalment jets) s'ha produït en associació amb el bosó Z. En el pla x-y es veu el desequilibri d'energia entre el quark i l'antiquark: normalment al bosó Z es mou en la direcció d'un dels feixos i això fa que el muó i l'antimuó estiguin en la regió "forward".

<sup>12</sup> Successos: informació dels detectors sobre resultats de les col·lisions.

<sup>13</sup> Histograma: és un gràfic que mostra quantes vegades ha succeït un valor concret d'una certa variable. Cada massa calculada s'ha posat a l'histograma.





Histograma 1: historigrama de massa invariant del bosó Z desintegrat en un parell de muons ( $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ).

Per elaborar aquest historigrama hem utilitzat 179 successos i ha donant una mitjana de massa de 89,5 GeV, encara que hauria de ser al voltant de 91 GeV.

## 5.1.2 Desintegració del bosó Z en dos electrons

La mateixa metodologia hem seguit per estudiar la desintegració  $Z \rightarrow e^+ e^-$ .

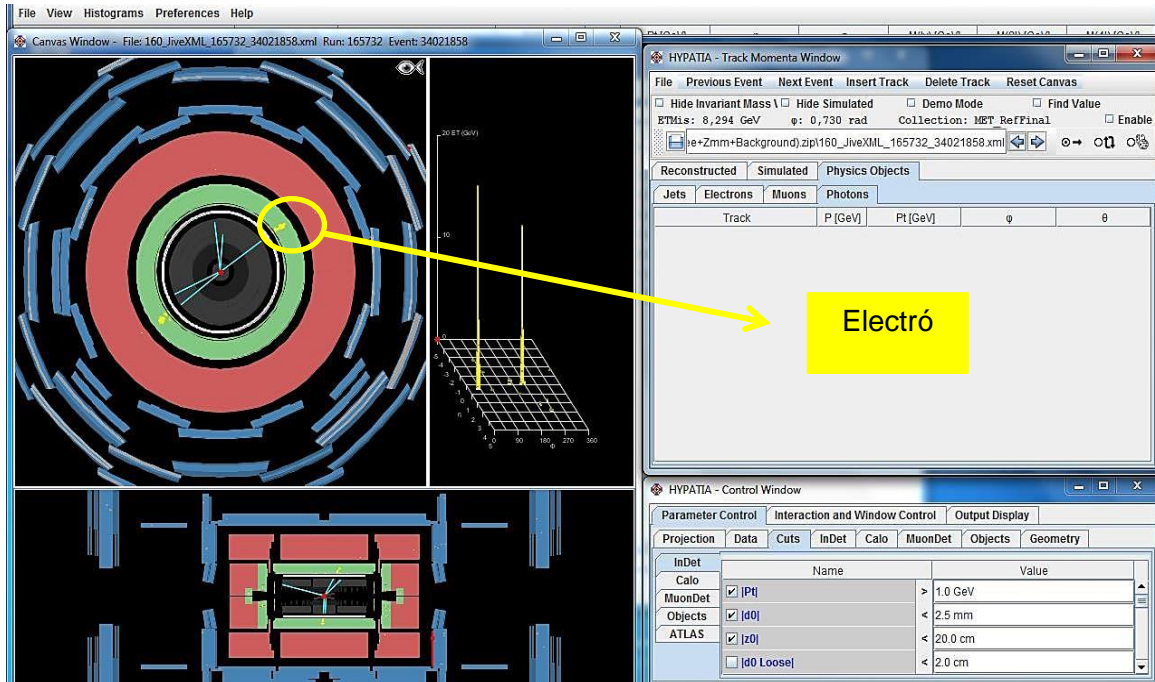
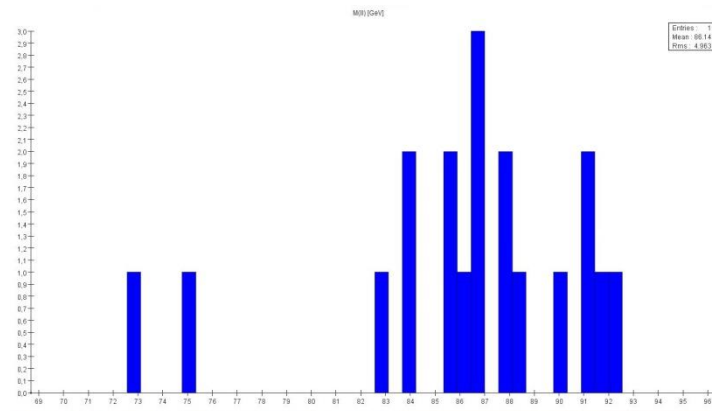
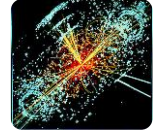


Figura 18. Vista al simulador HYPATIA de la desintegració Z en un parell d'electrons ( $e^+, e^-$ ).

Podem observar a la vista transversal, de la mateixa manera que ho hem fet amb  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , que s'han produït dues traces: de l'electró i la seva antipartícula (la senyal arriba al calorímetre electromagnètic).



Histograma 2. Histograma de massa invariant del bosó Z desintegrat en un parell d'electrons ( $e^+, e^-$ ).

Aquest histograma 2 ha estat elaborat a partir de 19 successos i ha donat una mitjana de massa 86,144 GeV, quan hauria de ser d'uns de 91 GeV. Segurament, ha donat una mitjana més baixa de 91 GeV ja que l'energia dels electrons no ha estat corregida per la pèrdua d'energia produïda abans d'arribar al calorímetre.

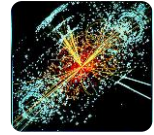
L'estudi amb el bosó Z permet familiaritzar-se amb les tècniques i eines que s'utilitzen quan es realitzen experiments reals. Redescobrir ressonàncies ja conegudes és fonamental per estar en condicions de descobrir aquelles que es desconeixen. De fet, aquest mètode és el que se segueix en els experiments de física de partícules abans de realitzar recerca sobre nova física.

## 5.2 Estudi del bosó de Higgs

El bosó de Higgs es va establir per a un massa de 125 GeV que, com podem veure, és una partícula d'una gran massa.

Els productes de desintegració més "fàcils" de detectar són:  $H \rightarrow ZZ$  de quatre leptons ( $e^+e^-e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^-\mu^+\mu^-$ ) i el  $H \rightarrow \gamma\gamma$ . És per això que l'estudi que hem realitzat ha estat per a aquestes desintegracions.

Naturalment, per a fer aquest estudi hem utilitzat els successos per identificar aquestes formes de desintegració. Però, desafortunadament només hem pogut realitzar les formes  $H \rightarrow \mu^-\mu^+\mu^-\mu^+$  (quatre leptons) i  $H \rightarrow \gamma\gamma$  ja que les altres no ens han sigut proporcionades pel simulador.



## 5.2.1 Desintegració del bosó de Higgs en dos fotons

Per la  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , la idea és seleccionar successos amb dos fotons (com mostra la figura 19) on hem tornat a fer talls d'unitats d'energia en 25 GeV.

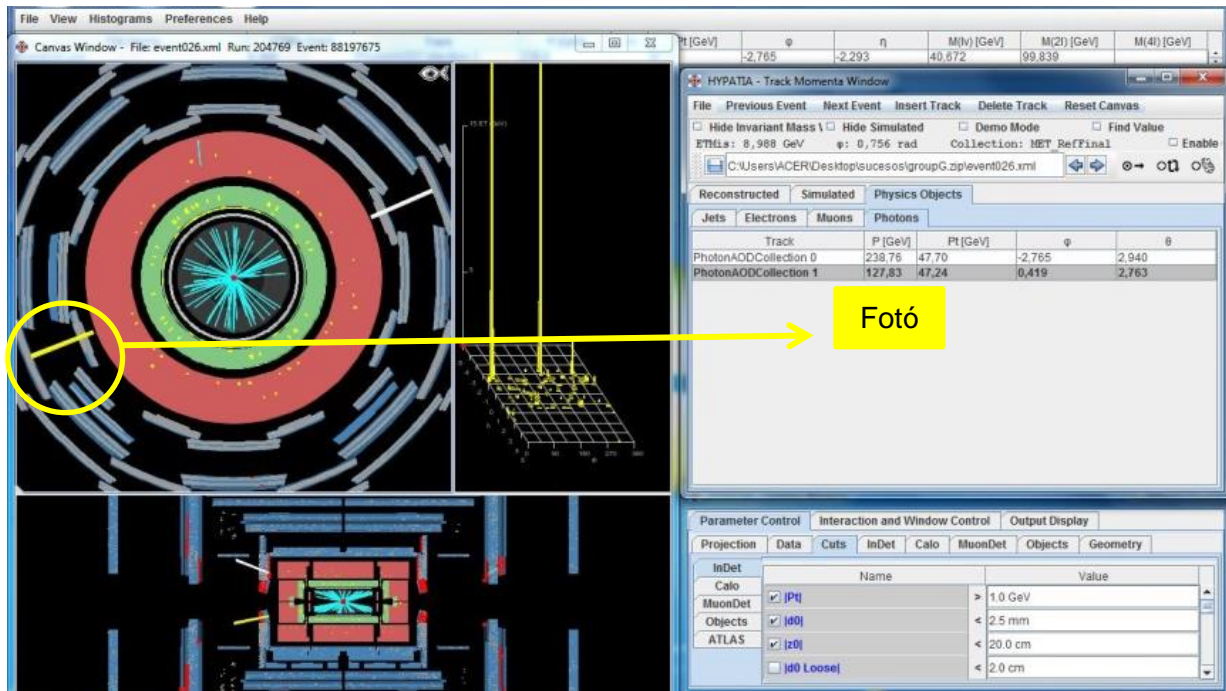


Figura 19. Il·lustració al visualitzador HYPATIA de la desintegració en un parell de fotons.

La desintegració en dos fotons es pot produir amb tres tipus de fons<sup>14</sup> (*background*) principals que són: dos fotons no ressonants, és a dir, una desintegració directa en fotons; un fotó més un *jet* que s'identifica com a fotó que s'haurà creat a partir de la desintegració de pions neutres ( $\pi^0$ ) o un fons de dos *jets* que s'identifiquen en dos fotons.

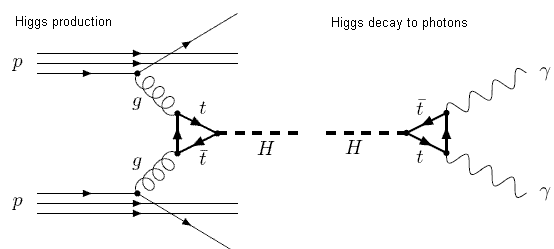
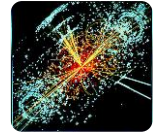


Diagrama de Feynman 3. Bosó de Higgs desintegrat en un parell de fotons.

Al diagrama 3 podem veure la producció del bosó de Higgs en dos fotons.

<sup>14</sup> Fons: vol dir que hi ha hagut una desintegració de moltes partícules.



Per fer la nostra investigació hem seguit dues tècniques: “*loose*” que vol dir que es produeix amb més eficàcia i amb més fons (*background*) i “*tight*” que és tot el contrari, és a dir, amb menys eficàcia i menys fons.

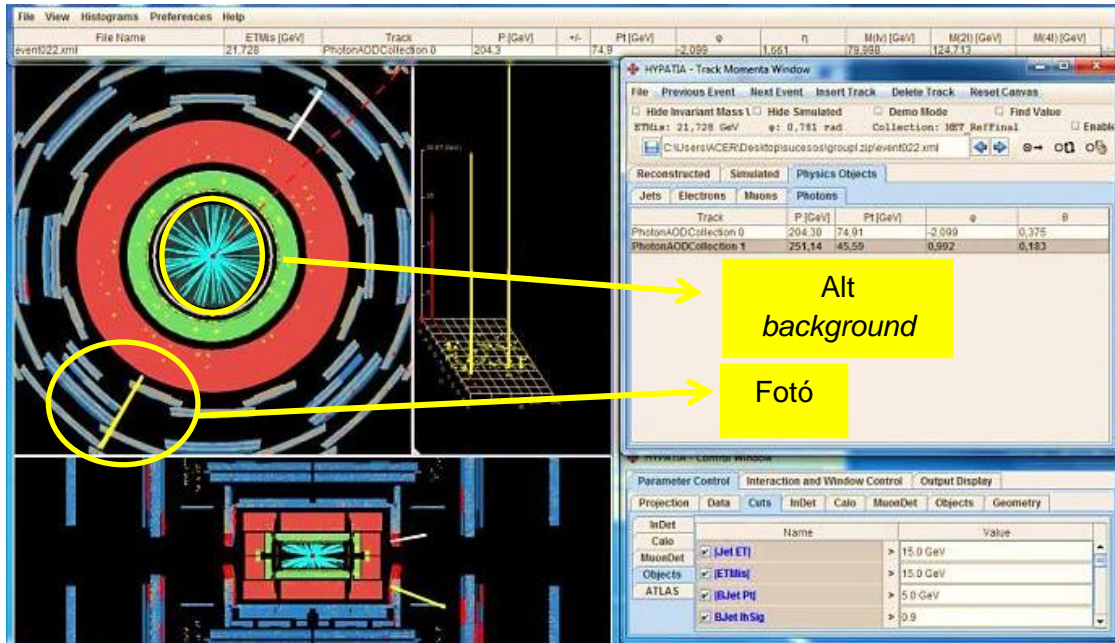
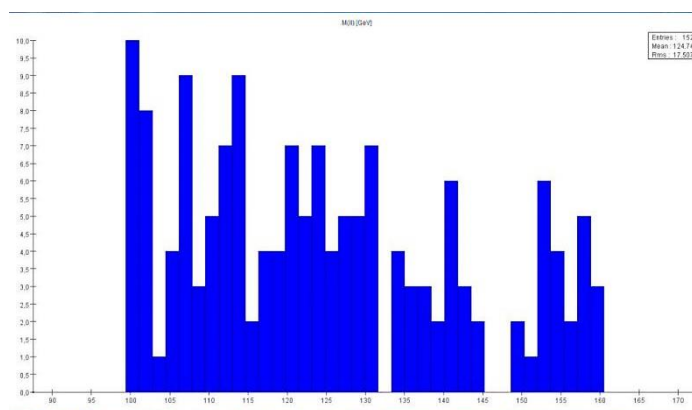


Figura 20. Visualització de la desintegració d'un parell de fotons amb la tècnica *loose*.

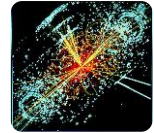
La figura 20 mostra la imatge d'una desintegració  $H \rightarrow \gamma\gamma$  *loose* (les dues traces grogues que surten per fora del calorímetre hadrònic de color vermell) ja que veiem moltes traces (blaves) a l'enregistrador (gris).



Histograma 3. Histograma de massa invariant  $H \rightarrow \gamma\gamma$  *loose*.

Aquest histograma 3 s'ha elaborat a partir de 152 successos i ens ha donat una massa mitjana de 124,74 GeV, quan hauria de ser d'uns 125 GeV.

# El bosó de Higgs: l'origen de la massa de les partícules elementals



Cal dir que en aquest tipus d'histograma hi ha molt de *background* (altura del gràfic): el senyal gairebé no es nota. Per veure bé el pic es necessitaria molta estadística, per tal que es detectés més per sobre de les fluctuacions de *background*.

La figura 21 mostra la imatge d'una forma de desintegració  $H \rightarrow \gamma\gamma$  *tight* (traces grogues), ja que podem observar una petita disminució de traces en el *tracker*.

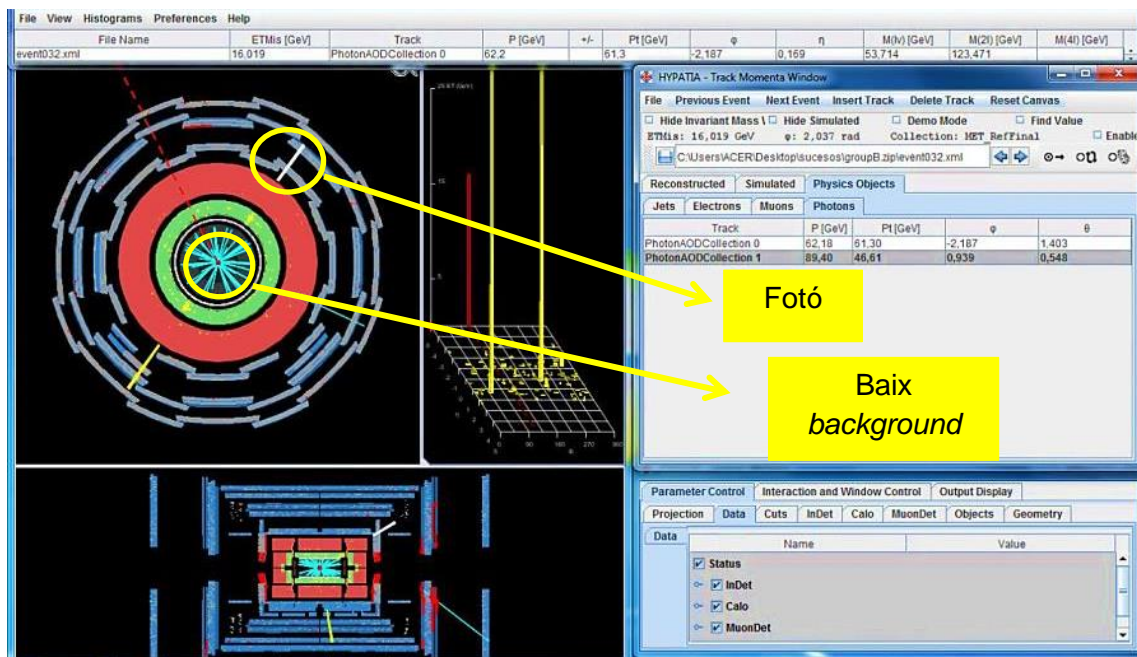
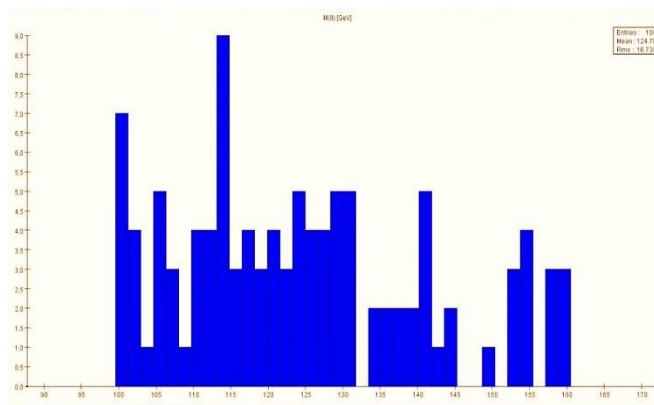
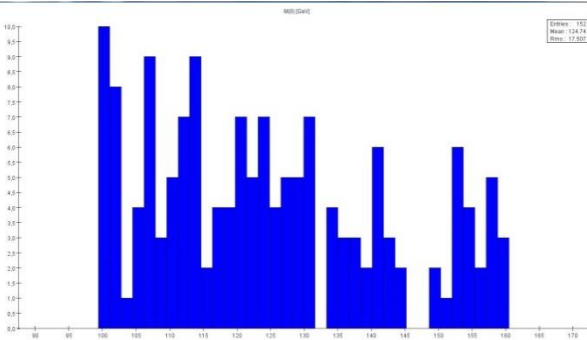
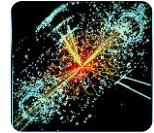


Figura 21. Visualització de la desintegració en un parell de fotons amb la tècnica *tight*.

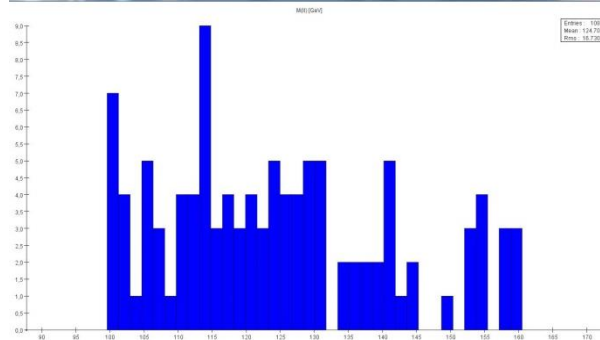


Histograma 4. Histograma de massa invariant  $H \rightarrow \gamma\gamma$  *tight*.

Aquest histograma 4 l'hem elaborat a partir de 108 successos i la massa ens ha donat una mitjana de 124,7 GeV, quan hauria d'estar al voltant d'uns 125GeV.



Histograma 5. Histograma de massa invariant  $H \rightarrow \gamma\gamma$  *loose*.



Histograma 6. Histograma de massa invariant  $H \rightarrow \gamma\gamma$  *tight*.

Si comparem els dos histogrames podem observar una lleugera disminució en l'altura de la gràfica  $H \rightarrow \gamma\gamma$  *tight*. Això es deu a l'eliminació de *background* que es produeix en aquesta tècnica.

## 5.2.2 Desintegració del bosó de Higgs en quatre leptons

L'estudi de  $H \rightarrow ZZ$  de quatre leptons ( $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ ) és un altra de les possibilitats de forma de desintegració del bosó de Higgs a la qual vam fer tall d'energia de 10 GeV.

El fons principal d'una desintegració ZZ en quatre leptons pot ser per una desintegració en dos bosons Z on cada un es desintegra en dos leptons i seria per una

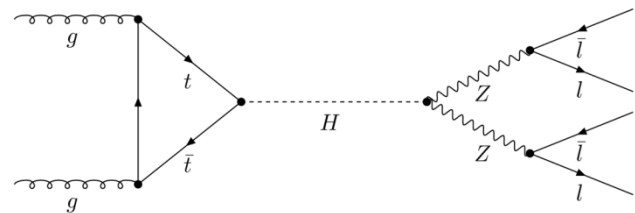


Diagrama de Feynman 4. Bosó de Higgs desintegrat en quatre leptons.

massa de 180 GeV (dues vegades la massa d'un bosó Z) o també podria ser una desintegració en un bosó Z que es desintegrés en dos leptons, i un d'aquests leptons radiés un fotó que es convertís en dos leptons. Aquesta desintegració seria per una massa baixa de només un Z (al voltant de 90 GeV).

Podem observar les quatre traces dels muons i antimuons en la figura 22 quan arriben al detector de muons.

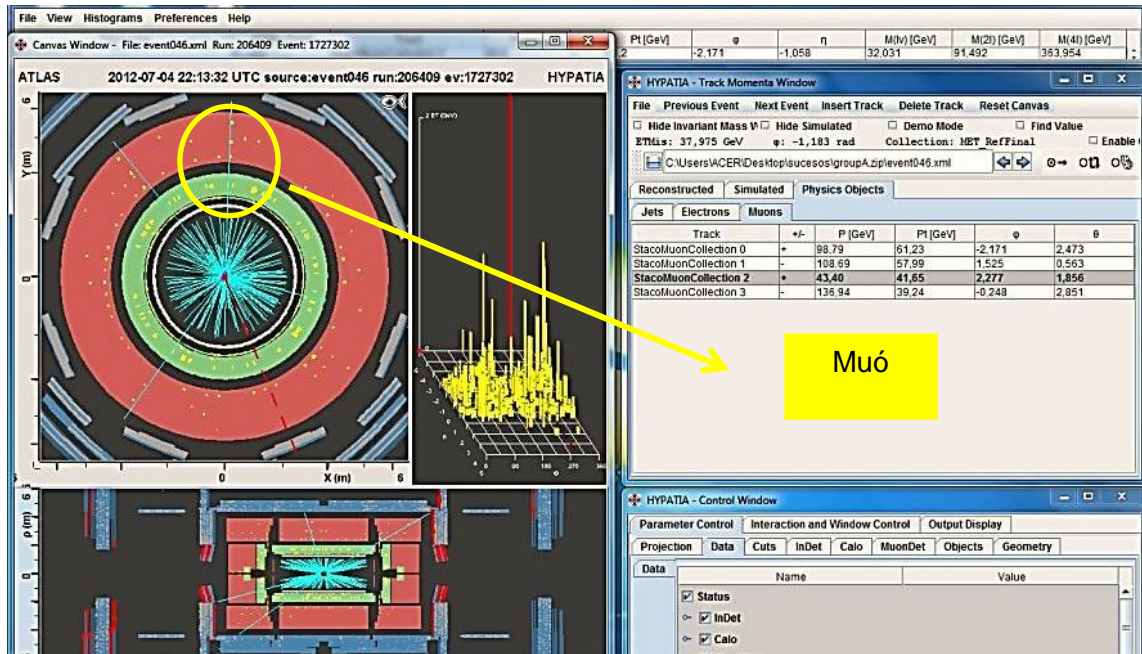
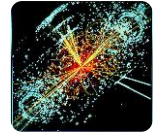
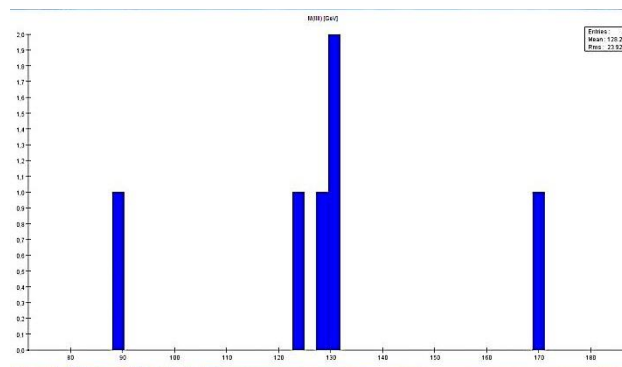


Figura 22. Il·lustració de la desintegració en quatre muons.

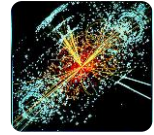


Histograma 7. Histograma de massa invariant per a una desintegració en quatre leptons ( $\mu^+, \mu^-, \mu^+, \mu^-$ )

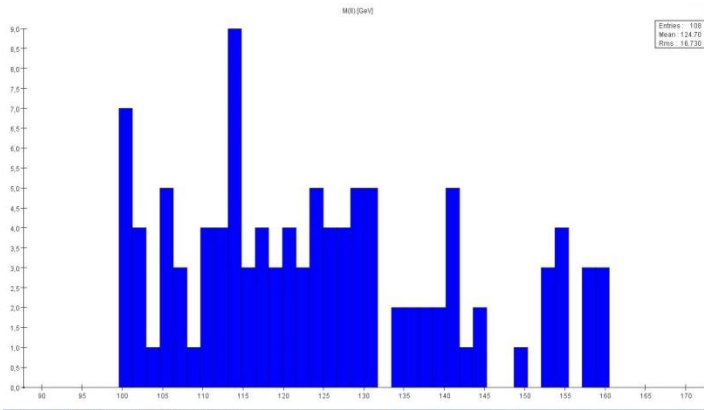
A l'histograma 7 hi ha poc *background* i es veu un pic més fàcilment; el problema que trobem és que hi ha molts pocs successos de Higgs amb les dades acumulades fins ara. I podem observar que aquest histograma només conté 6 successos.

### 5.2.3 Conclusions

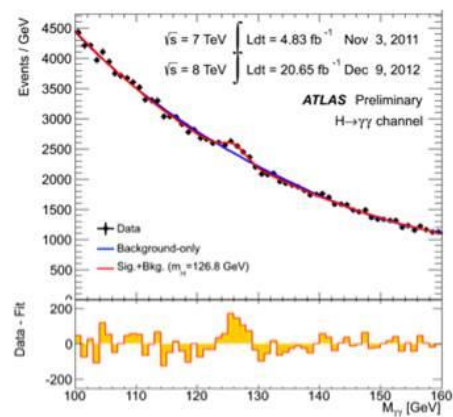
Amb aquest estudi sobre el bosó de Higgs no podem parlar de descobriment ja que, necessitem de molta més estadística. S'estableix que hi ha un descobriment quan per cada 1.000.000 vegades que es repeteixi una investigació en concret amb milers de successos s'obtinguessin els mateixos resultats en totes les investigacions i només es pogués cometre un error, és a dir, només es podria tenir una vegada un resultat diferent.



Si ara comparem el plot d'ATLAS amb el que he fet jo podem veure clarament les diferències que s'hi presenten. En primer lloc, en el seu plot s'han utilitzat més de 3.500 successos front la meua estadística que és més pobre, de 108. A més, es veu clarament el pic a 126,5 GeV i com destaca per sobre del *background*, en canvi, en el meu difícilment es pot observar gràficament a causa que no es diferencia del *background*. També s'ha de dir que la meua distribució de la massa ja està donada pel simulador d'entre 100 GeV i 160 GeV. En el seu cas sí que es podria declarar com a descobriment per les raons esmentades anteriorment.



Histograma 8. Plot elaborat amb el simulador  $H \rightarrow \gamma\gamma$ .



Plot 1. Plot elaborat per ATLAS d'una desintegració  $H \rightarrow \gamma\gamma$ .

## 6. El descobriment

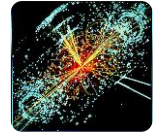
Abans del descobriment del bosó de Higgs, els experiments anteriors dels antics acceleradors van registrar dues franges dins de les quals podria estar la massa del bosó de Higgs ( $m_H$ ): entre 90 GeV i 109 GeV, o entre 149 GeV i 182 GeV. A més hi havia gran quantitat de dades on s'observava que la  $m_H$  podria estar entre 115 GeV i 140 GeV amb tres desviacions sobre 125 GeV.



Figura 23. Gran descobriment del bosó de Higgs.

L'any 2010 es va posar en funcionament el CERN en el qual s'havia augmentat la intensitat de les col·lisions respecte als antics col·lisionadors. Això permetria buscar el bosó de Higgs





de forma més ràpida.

L'any 2012 ATLAS i CMS van anunciar el descobriment d'una nova partícula: el bosó de Higgs del Model Estàndard. Un any després es va donar el premi Nobel de Física a Higgs i Englert.

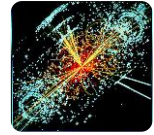
## 7. Més enllà del descobriment

Després del descobriment, ATLAS i CMS han anat acumulant més estadística amb la finalitat de mesurar amb precisió la massa del bosó de Higgs. Aquests experiments han combinat les seves mesures per a les desintegracions  $H \rightarrow \gamma\gamma$  i  $H \rightarrow ZZ$  en les quals s'ha observat una gran significança d'excés<sup>15</sup>. Es va veure que ATLAS tenia una significança d'excés de  $3,8\sigma$ <sup>16</sup> i CMS de  $4\sigma$ . També s'ha intentat trobar el valor del seu spin mitjançant els estudis en  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow ZZ$  i  $H \rightarrow W^+W^-$  en els quals s'han donat indicis que l'spin pugui ser de 0 (escalar) i s'han exclòs altres hipòtesis com spin = 1 o spin = 2 amb un alt grau de fiabilitat.

ATLAS i CMS han refinat la seva recerca del bosó de Higgs en altres mètodes de producció i de desintegració com  $H \rightarrow W^+W^-$  i  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  en què s'ha donat una resolució pobra per la presència de neutrins. S'han intentat altres mètodes segons el qual el bosó de Higgs es desintegra en quarks, com per exemple  $H \rightarrow b\bar{b}$ , i s'ha obtingut una bona significança d'excés. Per tant, es pot parlar d'evidència en l'existència d'aquest procés a l'accelerador Tevatron (que es troba als Estats Units). Els físics han intentat veure desintegracions que estan fora del normal com poden ser  $H \rightarrow Z\gamma$  o desintegracions fora del Model Estàndard difícils de detectar ja que aquestes partícules no interactuen amb el detector. Això s'ha fet amb la finalitat de determinar amb més precisió si es tracta d'un tipus de bosó de Higgs predit pel Model Estàndard o un bosó de Higgs més exòtic, tal i com han predit altres models de nova física que engloben el Model Estàndard, com pot ser la Supersimetria.

<sup>15</sup> Significança d'excés: té relació amb la probabilitat que es pot observar el fenomen de l'aparició del bosó de Higgs quan realment no hi és a causa de les fluctuacions del fons.

<sup>16</sup> Desviació estàndard ( $\sigma$ ): representa la desviació de les dades respecte al valor de la mitjana aritmètica. A partir de  $3\sigma$  es denomina com a evidència i a partir de  $5\sigma$  es pot parlar de descobriment.

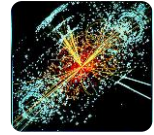


Un dels temes més actius de la investigació en física de partícules és comprovar la interacció del bosó de Higgs amb els fermions per veure si aquest és la causa de la generació de la massa dels quarks i dels leptons.

## 8. Futur en el CERN

Per ara, les mesures del bosó de Higgs segueixen sent compatibles amb el predits pel Model Estàndard, tot i que permeten desviacions amb models de nova física. Fa falta més dades que es començaran a prendre el maig del 2015 amb un centre d'energia de masses de 13 TeV. Es començarà un projecte de tres anys (2015-2018) en el qual l'estadística haurà augmentat 10 vegades a causa d'aquest augment d'energia.

Ara, a més de refinar al nostre coneixement sobre el bosó de Higgs, es podrà produir noves partícules molt massives que eren impensables fins ara i, això, pot donar peu a nous descobriments durant els pròxims anys.



## Capítol III: Experiència personal

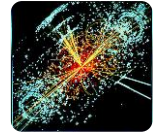
---

### Conclusions

Des del meu punt de vista, la conclusió més important del treball ha estat l'aprenentatge del mètodes científics que s'utilitzen quan es vol realitzar una investigació real i la metodologia que cal seguir. També he pogut veure la importància de realitzar un marc teòric raonat i coherent amb el tema que es vol investigar, i com se li pot donar validesa.

El fet d'haver estat treballant des de l'estiu amb el Dr. Aurelio Juste a l'IFAE m'ha fet canviar la meva manera de veure els científics i la manera com s'ha de fer ciència. He pogut veure en primera persona com es porten a terme els estudis d'investigació reals del CERN i això m'ha fet comprendre el treball que s'ha de realitzar per fer grans descobriments com ha estat el bosó de Higgs.

De cara al futur, penso que es podria millorar aquest treball obtenint més estadística per aproximar-se al màxim a les investigacions reals que es donen avui dia. A més, les investigacions en què es basa aquest treball encara s'estan realitzant i el seu progrés pot donar molt de què parlar. Estaria bé que es pogués continuar amb aquesta recerca ja que és un tema molt actiu avui dia i es podrien augmentar els coneixements que aquest treball presenta.



## Bibliografía

*Física II BAXILLERAT*. Barcelona; Edebé, 2009.

Casas, Albert; Rodrigo, Teresa. *¿Qué sabemos de? El bosón de Higgs*. Barcelona; Catarata. [consulta 12/07/2014]

Universitat de Barcelona. *El CERN i la Física de Partícules*. [CD – ROM]. Barcelona; Universitat de Barcelona. Conté nou vídeos de diferents durades. [consulta 28/06/2014]

*Física I BAXILLERAT*. Barcelona; Edebé. 2009.

*Gravitació*. [en línia]. <<http://www.fisica-relatividad.com.ar>> [consulta 17/07/2014].

*Física de partícules y las interacciones fundamentales*. [en línia] <<http://juntadeandalucia.es>> [consulta 16/08/2014].

*LHC España* [en línia] <<http://www.i-cpan.es>> [consulta 18/06/2014].

*Física*. [en línia] <<http://www.csic.es>> [consulta 30/06/2014].

*Large Hadron Collider*. [en línia] <<http://stfc.ac.uk>> [consulta 8/08/2014].

*Física i Física Cuántica* [en línia] <<http://www.science.portalhispanos.com>> [consulta 3/10/2014].

*Acercándonos al LHC* [en línia] <<http://www.lhc-closer.es>> [consulta 9/09/2014].

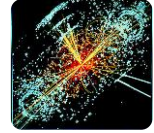
*Z-Path* [en línia] <<http://atlas.physicsmasterclasses.org>> [consulta 13/08/2014].

*Multimedia* [en línia] <<http://www.atlas.ch>> [18/12/2014].

*About CERN* [en línia] <<http://www.home.web.cern.ch>> [consulta 20/08/2014].

*Electromagnetismo* [en línia] <<http://www.conexioncausal.wordpress.com>> [consulta 7/12/2014].

*Las Interacciones en la Naturaleza* [en línia] <<http://www.servicios2.abc.gov.ar>> [consulta 10/12/2014].



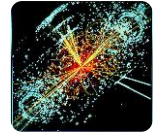
---

*La física y los diagramas de Feynman* [en línia] <<http://www.web.mit.edu>> [consulta 19/12/2014].

*Partícula mediadora* [en línia] <<http://fundamentosfisicamoderna.blogspot.com.es>> [consulta 20/12/2014].

Olive, K.A. "Status of Higgs Boson Physics", dins *2014 Review of Particle Physics*, K.A Olive et al (Particle Data Group), *Chin. Phys. C*,38, 09001 (2014). [consulta 4/01/2015].

## Annex: Funcionament del simulador



## A1 Funcionament del simulador Hypatia

Com ja sabem els senyals que són recollits pels detectors poden ser visualitzats en successos. Nosaltres utilitzarem el programa HYPATIA per mostrar aquests successos.

La seva funcionalitat es basa a llegir fitxers externs en els quals podem fer talls d'energia als objectes reconstruïts. A partir d'aquestes reconstruccions es forma la visualització d'aquests successos al detector virtual. Nosaltres podem seleccionar els successos d'interès i el programa elabora gràfics de variables cinemàtiques, com per exemple, de massa invariant.

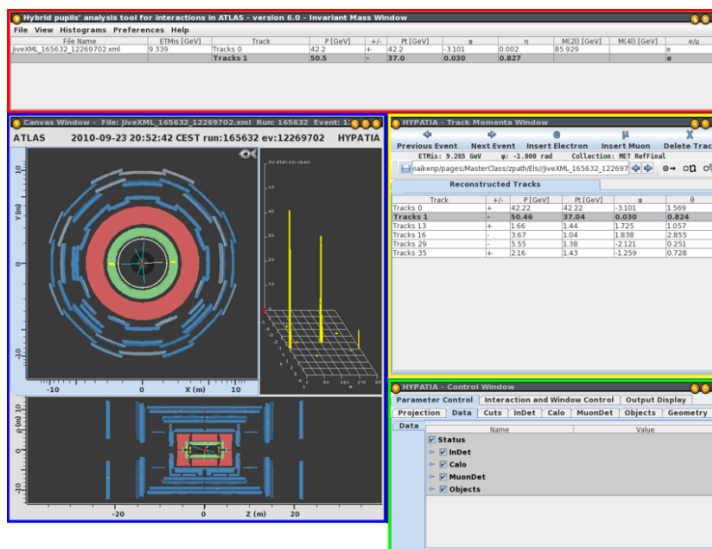


Figura 1. Vista inicial del simulador Hypatia.

La figura 1 mostra la vista d'entrada del programa que consta de quatre finestres: la finestra de massa invariant (marcada en vermell), la finestra Canvas (marcada en blau), la finestra de control (marcada en verd) i la finestra de control de traces (marcada en groc). La finestra de massa invariant mostra les masses seleccionades a partir de la qual podem elaborar un histograma; la finestra Canvas dóna diferents vistes dels successos en el detector; la finestra de control de traces mostra tota la informació necessària sobre les traces i, finalment, la finestra de control permet ajustar el visualitzador dels successos i fer els talls d'energia als successos reconstruïts.

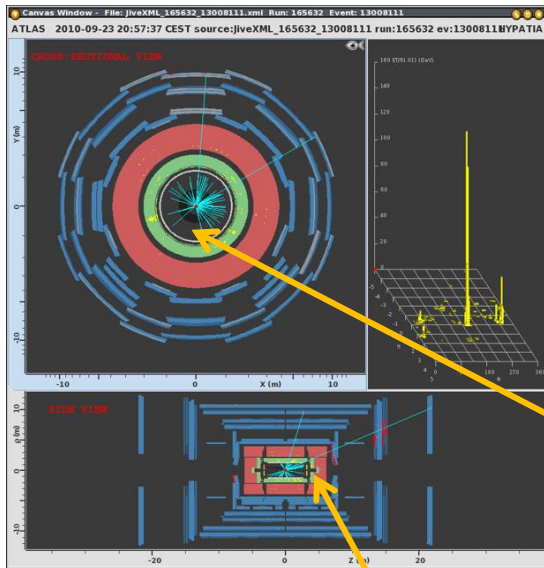
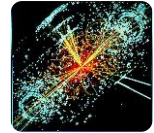


Figura 2. Finestra Canvas.

Vista transversal

Vista de costat

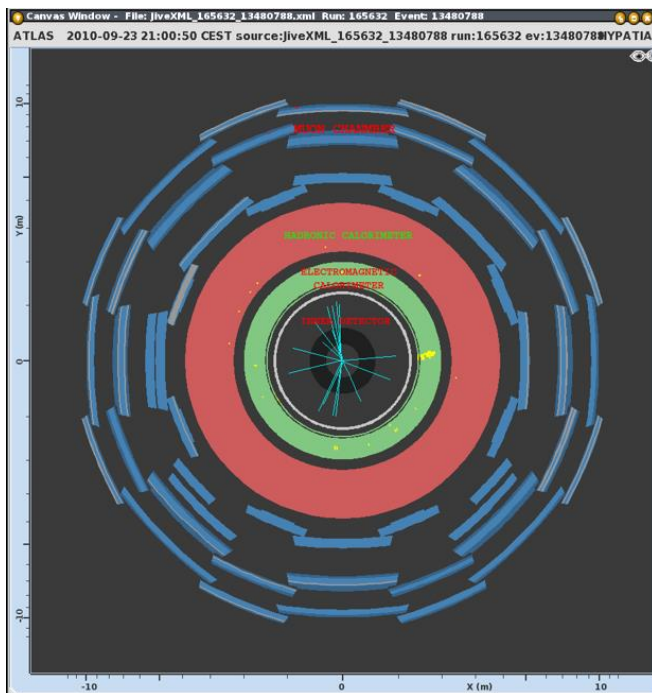
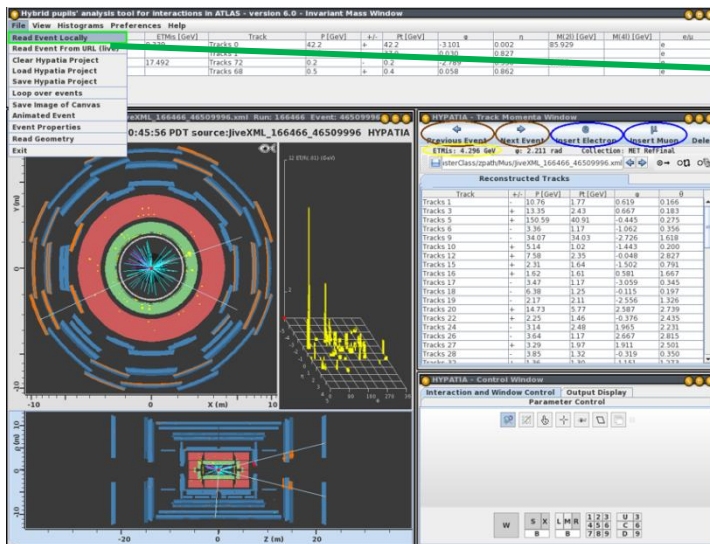
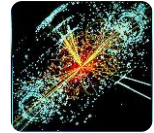


Figura 3. Detector virtual.

A la figura 3 il·lustrem els subdetectors que conté el detector que ja hem comentat al llarg del treball.

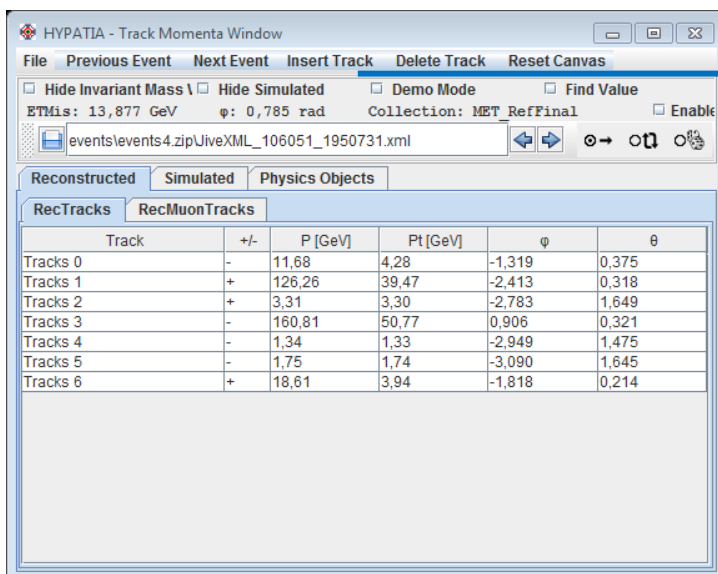


# El bosó de Higgs: l'origen de la massa de les partícules elementals



Clicant a aquest apartat on posa *Read Event Locally* podem llegir "fitxers de successions externs".

Figura 4. Visualització per poder afegir fitxers.



Clicant a *Insert Track* podem seleccionar els successos dels quals volem elaborar un gràfic de massa invariant.

Figura 5. Visualització de les propietats de les traces reconstruïdes a la finestra de control de traces.

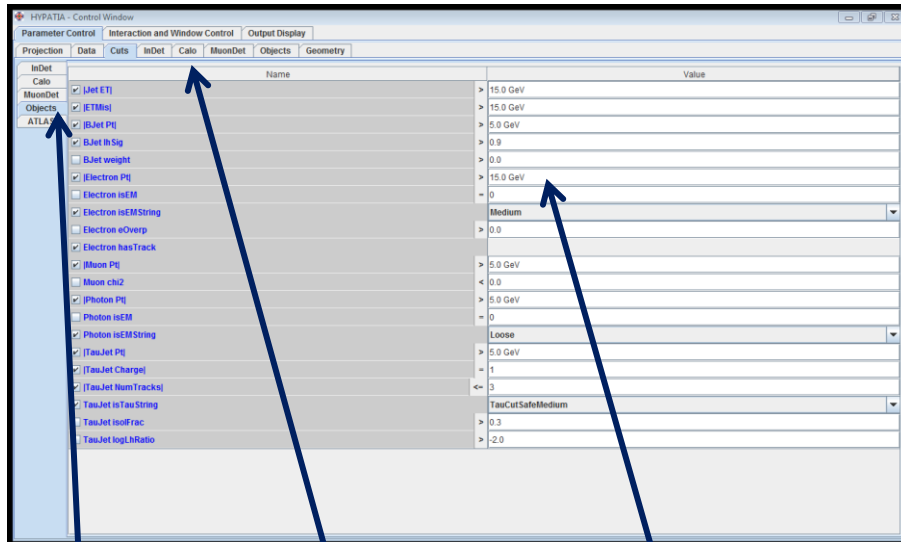
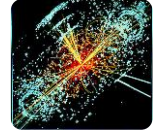


Figura 6. Vista de la finestra de control.

Objectes reconstruïts

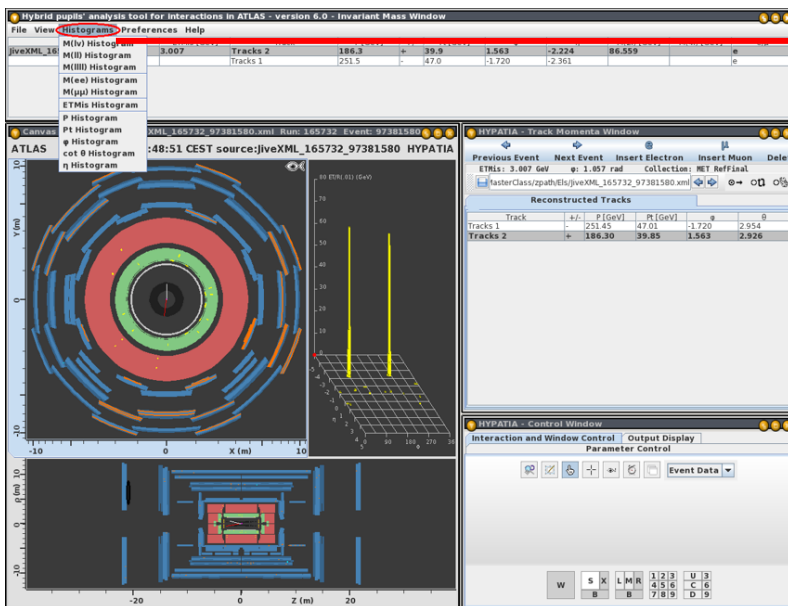
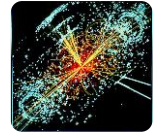
Talls

Paràmetre d'energia que marca el tall

En aquesta finestra podem seleccionar els talls de selecció de les partícules que es creu que són convenientes per fer l'estudi. En aquest cas, hem seleccionat un tall de 15 GeV per a l'electró. Serveix per què en alguns successos hi ha molta activitat de partícules (fons), però no totes són interessants. Així, si seleccionem un tall a una determinada energia, les partícules que tenen baix moment (poca energia) se suprimeixen.

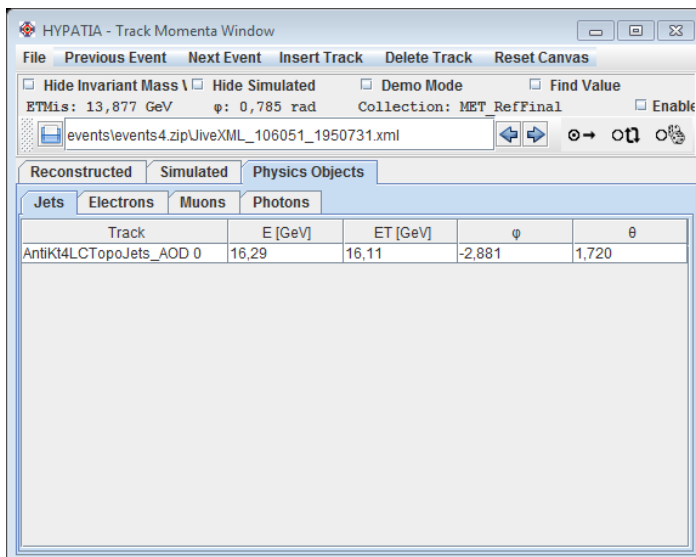
A la finestra d'Interacció i Control (*Interaction and Window Control*), podem fer zoom als successos.

Si cliquem a la visualització de sortida (*Output Display*) ens pot proporcionar informació més detallada sobre els objectes seleccionats.



→ Clicant a l'apartat d'Histograma podem elaborar-ne un, seleccionant el número de leptons (dos o quatre) pel qual s'ha desintegrat la partícula en qüestió.

Figura 7. Imatge del simulador Hypatia.



Seleccionem l'apartat d'Objectes Reconstruïts (*Physics Objects*) i a partir d'aquí seleccionem les partícules que estem estudiant: muons, electrons, fotons o jets.

Figura 8. Vista de la finestra de control de traces.



## A2 Com s'utilitza Hypatia?

El que nosaltres hem fet ha estat agafar fitxers externs i anem observant tots el successos. Per veure únicament els successos més interessants hem aplicat els talls d'energia que pensàvem que serien més adequats. Un cop realitzat aquest pas, observem els successos al detector virtual i seleccionem els que creiem adequats agafant de referència la massa invariant.

Finalment, quan ja tenim tots el successos seleccionats per a una determinada desintegració, per exemple  $Z \rightarrow e^+e^-$ , elaborem el gràfic de massa invariant.

Aquest mètode és el que hem utilitzat per fer el nostre estudi, primer el bosó Z i, per últim amb l'objectiu del treball que ha estat l'estudi del bosó de Higgs.



***El bosó de Higgs: l'origen de les partícules  
elementals***