

ATLAS: UNA EINA PER DESCOBRIR LA FÍSICA FONAMENTAL DE L'UNIVERS MITJANÇANT EL GRAN COLLISIONADOR D'HADRONS (LHC)

M. Pilar Casado

Institut de Física d'Altes Energies. Universitat Autònoma de Barcelona

Introducció

El descobriment de l'electró en 1897 per Joseph John Thomson va iniciar una revolució en el progressiu enteniment de les propietats de la matèria. Després d'aquesta fita, nombrosos experiments, cada vegada més complexos, han permès esbrinar d'una manera més precisa molts components fonamentals de la matèria i algunes regles que en regulen el comportament. En aquesta aventura del coneixement han estat fonamentals nombrosos laboratoris de física de partícules, tant a Europa com als Estats Units i a la resta del món.

La teoria actual no és completa i la investigació continua. El projecte del gran collisionador d'hadrons (LHC)¹ permetrà estudiar la teoria bàsica de tot l'Univers, mitjançant la recreació d'etapes molt primitives de la seva història, fent col·lidir feixos de protons en determinats punts de la màquina, a una energia set vegades més elevada que la de les màquines actuals, per tal d'explorar distàncies deu ordres de magnitud més petites que un àtom.

Les primeres proves amb l'LHC es van iniciar el setembre del 2008. S'ha aconseguit fer circular protons de 900 GeV en els dos sentits de l'anell. En la figura 1 es pot veure el primer esdeveniment pres amb un feix de l'LHC amb ATLAS, un dels detectors de l'LHC. Durant el 2009 s'ha intentat incrementar l'energia de les partícules i s'han produït les primeres col·lisions en els punts d'interacció.

L'experiment ATLAS² està situat en un dels punts de col·lisió i mesurarà les propietats dels estats finals dels xocs que s'hi produiran. Es tracta d'un detector de propòsit general fruit d'una col·laboració en la qual participen uns dos mil científics.

Algunes de les preguntes que es voldran respondre són: quins són els constituents bàsics de la matèria?,

1. *LHC Design Report* <<http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html>>.

2. G. Aad et al., «The ATLAS experiment at the CERN Large Hadron Collider», *JINST*, 3, S088003 (2008); «ATLAS collaboration, detector and physics performance», *Technical Design Report*, CERN-LHCC-99-14 (1999); «ATLAS collaboration, detector and physics performance», *Technical Design Report*, CERN-LHCC-99-15 (1999).

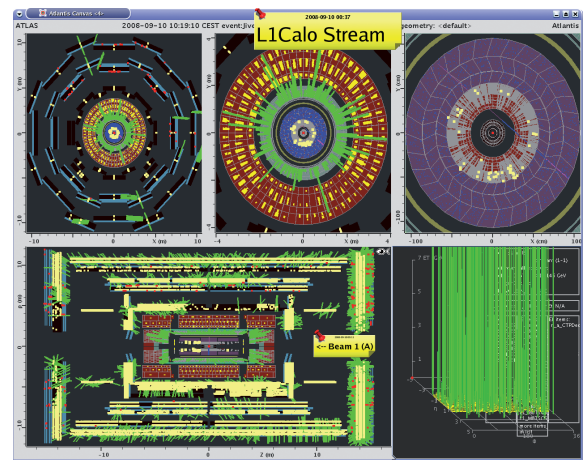


FIGURA 1. Primer esdeveniment d'ATLAS, pres el 10 de setembre del 2008 a partir d'un feix de l'LHC. L'esdeveniment va ser seleccionat pel sistema d'adquisició de dades en línia d'ATLAS.

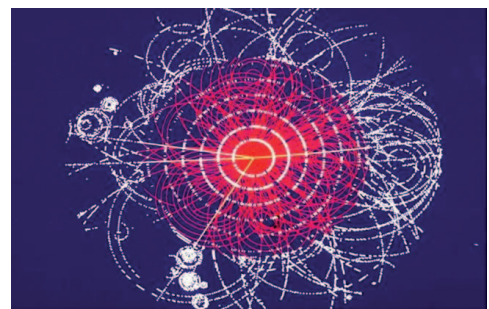


FIGURA 2. Entorn de producció de partícules a l'LHC. Les línies rectes constitueixen les partícules que es volen seleccionar entre tot el soroll de fons, que està constituït per col·lisions de baixa energia (vint-i-tres en cada interacció).

quines són les forces que en regeixen el comportament?, d'on procedeix la massa de les partícules?

Una teoria que actualment engloba la majoria de les interaccions conegudes en física de partícules i que ha tingut molts èxits experimentals és el model estàndard de la física de partícules. En aquest model hi ha unes partícules que constitueixen la matèria (quarks i leptons) i unes altres que són les mediadores entre les diferents forces (el fotó, γ , el gluó, g , i les partícules W i Z). Hi ha, tanmateix, una partícula que prediu aquesta teoria i que no s'ha observat encara: el bosó de Higgs (H). Aquesta partícula explicaria l'origen de la massa dels

altres components. La cerca del bosó de Higgs serà, precisament, un dels objectius més importants de l'LHC. No serà fàcil aquest estudi, perquè en l'estat final hi haurà moltes partícules de soroll superposades al senyal que es busca (figura 2). A més, és un estudi que s'haurà de fer per a diferents estats finals possibles.

A l'LHC es buscaran més partícules, perquè el model estàndard té problemes per a les interaccions a energies molt elevades. Una teoria amb un comportament millor és la supersimetria o SUSY, en la qual es duplica el nombre de partícules bàsiques que hi ha al model estàndard. A causa de les bones propietats d'aquesta última teoria, l'LHC farà una cerca extensiva de SUSY, intentant determinar estats amb noves partícules supersimètriques.

La teoria supersimètrica està també relacionada amb la matèria fosca, perquè hi ha algunes partícules d'aquesta teoria que són molt bones candidates a components d'aquest tipus de matèria.

Contribució de Catalunya

A l'LHC contribueixen uns cent investigadors experimentals i teòrics de la Universitat de Barcelona, la Universitat Autònoma de Barcelona i l'Institut de Física d'Altes Energies (IFAE). Aquest últim es troba al campus de la Universitat Autònoma de Barcelona.

A l'IFAE es desenvolupen actualment projectes de dos tipus (relacionats amb l'LHC i amb altres àmbits). Un primer bloc està integrat per projectes de física fonamental, com la multitud de línies d'investigació teòrica, els experiments ATLAS i MAGIC (un detector d'astrofísica situat a les illes Canàries) i diferents experiments de neutrins (partícules que interaccionen molt feblement amb la matèria). El segon bloc està constituït per projectes amb aplicació directa de la tecnologia que es desenvolupa en aquesta branca de la ciència. En aquest àmbit hi ha un projecte de detectors de raigs X que es desenvolupa en col·laboració amb hospitals i un projecte de computació que fa servir tècniques amb ús directe en l'empresa i en altres àrees científiques.

El gran col·lisionador d'hadrons

El gran col·lisionador d'hadrons (LHC) és un projecte del Centre Europeu per a la Recerca Nuclear (CERN), que es troba a la frontera franco-suïssa, a prop de Ginebra. El CERN es va crear el 1954 i està format per vint estats membres europeus, entre els quals es troba Espanya. Hi ha també altres estats que hi col·laboren puntualment. En total, té uns nou mil usuaris, incloent-hi enginyers i físics.

L'LHC és una gran màquina circular (27 km de circumferència), que es troba a uns 120 m sota terra de mitjana (figura 3). Farà col·lisionar protons contra protons a una energia de 14 TeV, un factor 7 més elevada que en màquines anteriors, i amb un flux del feix de protons cent vegades més alt que en projectes anteriors. Amb aquestes

característiques, se cercaran noves partícules més massives (perquè l'energia d'interacció és superior a la de màquines anteriors) i processos poc probables (per l'elevat flux de protons en el feix).

El nivell de radiació serà molt elevat en alguns punts de la màquina (superior a 10 kGy/any en les condicions de funcionament nominals). Per això, molts materials usats en aquest projecte (tant en detectors com en l'electrònica usada) han de ser resistents a la radiació i hi haurà punts d'accés restringit quan la màquina estigui en funcionament.

Hi haurà quatre punts d'interacció on se situaran els experiments: ATLAS, CMS, LHCb i ALICE (figura 3). ATLAS i CMS són experiments de propòsit general, amb objectius molt similars. Cercaran, sobretot, el bosó de Higgs i qualsevol tipus de física nova a l'energia de l'LHC. En canvi, LHCb i ALICE faran estudis més específics: LHCb farà estudis de matèria-antimatèria, mentre que ALICE estudiarà propietats nuclears i necessitarà col·lisions de ions pesants, que també estudiaran ATLAS i CMS.

En els punts d'interacció hi haurà col·lisions cada 25 ns en l'etapa nominal de funcionament i es tindrà una superposició d'uns vint-i-tres successos de baixa energia en cada col·lisió. Els successos interessants s'hauran de cercar amb un elevat soroll de fons, com es pot veure en la figura 2.

La cadena d'acceleració de l'LHC es pot veure de manera esquemàtica en la figura 4. S'hi fan servir màquines prèviament desenvolupades al CERN, com el LINAC (LINear

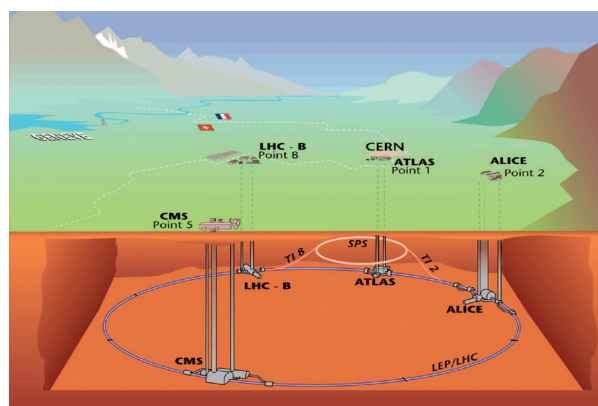


FIGURA 3. Esquema de l'accelerador LHC, amb els quatre detectors principals: ATLAS, CMS, LHCb i ALICE. El complex experimental està situat a la frontera entre França i Suïssa.

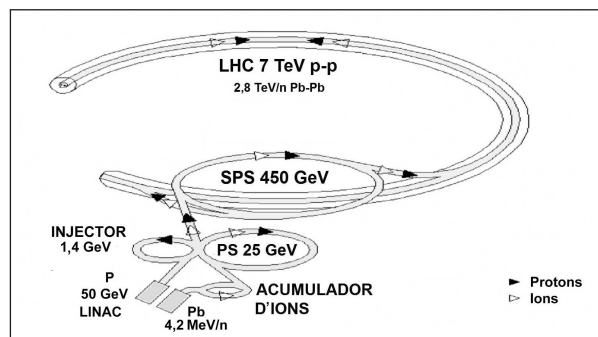


FIGURA 4. Cadena d'acceleració de l'LHC. Les partícules s'injecten des d'altres acceleradors prèviament utilitzats al CERN.

TAULA 1
Paràmetres importants de l'LHC en les diferents fases de funcionament

Paràmetre	Fase A	Fase B	Nominal
Nombre de paquets	936	2.808	2.808
Espai entre paquets (ns)	75	25	25
Nombre de protons per paquet (10^{11} protons)	0,4-0,9	0,5	1,15
Angle d'encreuament (μ rad)	250	280	280
Mida transversal (μ m)	22	16	16
Lluminositat ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	10^{32} - 10^{33}	$(1-2) \times 10^{33}$	10^{34}
Any	2009	2009-2010	2010

ACcelerator), on s'arriba a una energia de 50 MeV; el PS (Proton Synchrotron), amb 25 GeV d'energia dels feixos, i l'SPS (Super Proton Synchrotron), amb 450 GeV d'energia dels protons. La construcció de l'LHC ha aprofitat el túnel d'una màquina anterior que feia col·lidir electrons i positrons (LEP, Large Electron-Positron Collider).

Una part fonamental de l'LHC són els dipòls magnètics que corben la trajectòria dels protons i els confinen en una circumferència de 27 km, on hi ha seccions rectes i corbades. La tecnologia desenvolupada és molt capdavantera i els components tenen propietats molt singulars, com, per exemple, la baixa temperatura de funcionament, 1,9 K (l'LHC serà el lloc més fred de tot l'Univers), que s'aconsegueix amb heli líquid. L'elevat camp magnètic és també molt notable: 8,4 tesla ($\sim 10^5$ més elevat que el camp magnètic de la Terra). Finalment, el pes és de 34 tones i hi ha 7.600 km de cable de niobi-titani superconductor.

No només hi ha dipòls, també hi ha quadrupòls, sextupòls i altres components amb correccions d'ordre superior per a la trajectòria del feix. En total, hi ha uns nou mil imants a tot l'LHC.

En la taula 1 es resumeixen els paràmetres més importants de l'LHC en les diferents fases de funcionament, amb evolucions que van incrementant la mitjana de col·lisions en els punts d'interacció. Són importants les següents quantitats:

— El nombre de paquets que formen el feix es va incrementant de prop d'un miler a tres milers en la fase nominal. La segmentació en paquets o polsos facilita l'operació amb el feix.

— L'espai entre paquets es va reduint (un factor 3 des del començament). D'aquesta manera, passen més partícules per unitat de temps pels punts d'interacció.

— El nombre de protons per paquet es va incrementant fins a arribar a $\sim 10^{11}$ protons per paquet.

— L'angle d'encreuament es va incrementant perquè així hi ha menys inestabilitats coulombianes abans i després de la col·lisió.

— La mida del feix es va reduint fins a ~ 16 mm, tan sols quatre vegades més petit que un cabell humà.

— La lluminositat (que és el nombre de partícules per unitat de temps i d'àrea) es va incrementant progressivament.

L'experiment ATLAS

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) és un dels experiments que faran una cerca extensiva de física nova a l'LHC. Tal com s'ha mencionat, hi participen uns dos mil autors científics de trenta-set països de tot el món (figura 5). Espanya hi contribueix amb uns setanta-cinc científics.

L'experiment és ubicat a la localitat suïssa de Meyrin, a uns 100 m de profunditat. Té una longitud d'uns 44 m i una amplada de 22 m (figures 6 i 7).



FIGURA 5. Participants en la col·laboració ATLAS.

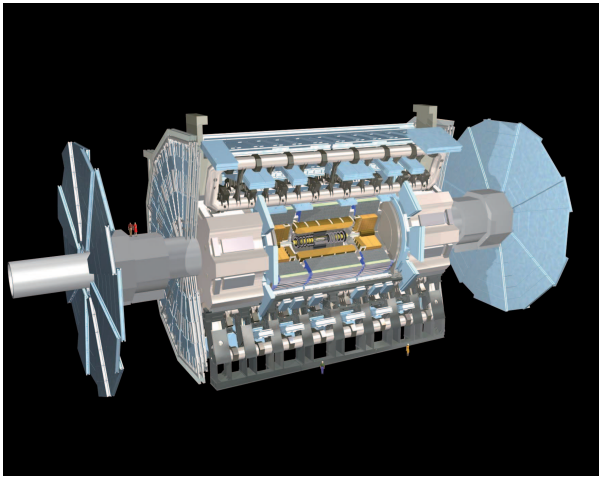


FIGURA 6. Detector ATLAS.

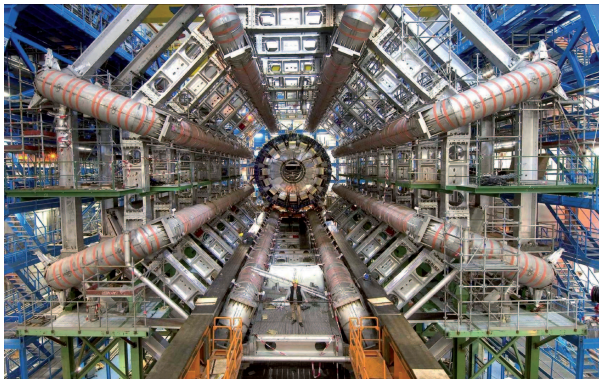


FIGURA 7. Imatge obtinguda durant el muntatge d'ATLAS. Aquesta estructura proporciona el camp magnètic extern que corba la trajectòria de les partícules carregades que hi arriben, i dóna una bona idea de les dimensions globals del detector. La part central conté actualment diferents subdetectors.

Tant ATLAS com altres experiments de propòsit general estan formats per cilindres concèntrics amb diferents zones especialitzades en la detecció de diferents tipus de partícules. Els subdetectors que el constitueixen són els següents, de fora cap a dins:

- L'espectròmetre de muons és a la part externa, ja que únicament els muons poden arribar a aquesta part del detector. El sistema s'intercala amb els imants de la figura 7, que corben la trajectòria dels muons, i d'aquesta manera se'n pot determinar el moment.

- Els calorímetres (que mesuren l'energia de les partícules) es poden veure en la figura 8. Hi ha dos tipus de calorímetres: calorímetres electromagnètics, que mesuren l'energia de fotons i electrons, i calorímetres hadrònics, que mesuren l'energia de protons, pions i neutrons.

- Els detectors de traces són a la part més interna. Serveixen per identificar traces carregades i s'hi fan servir diferents tecnologies, com detectors de silici. En aquest cas també hi ha un camp magnètic que corba la trajectòria de partícules carregades per tal de determinar-ne el moment.

L'IFAE participa en el calorímetre hadrònic d'ATLAS. Els calorímetres tenen un molt bon comportament per a energies elevades, propietat que els fa imprescindibles en els detectors de l'LHC.

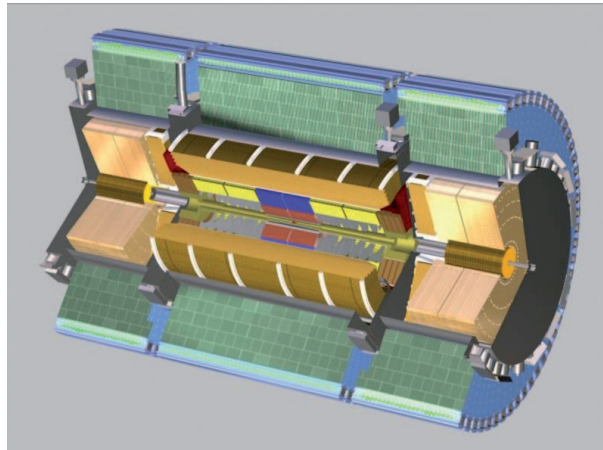


FIGURA 8. Calorímetre hadrònic (en verd) i calorímetre electromagnètic (en groc).

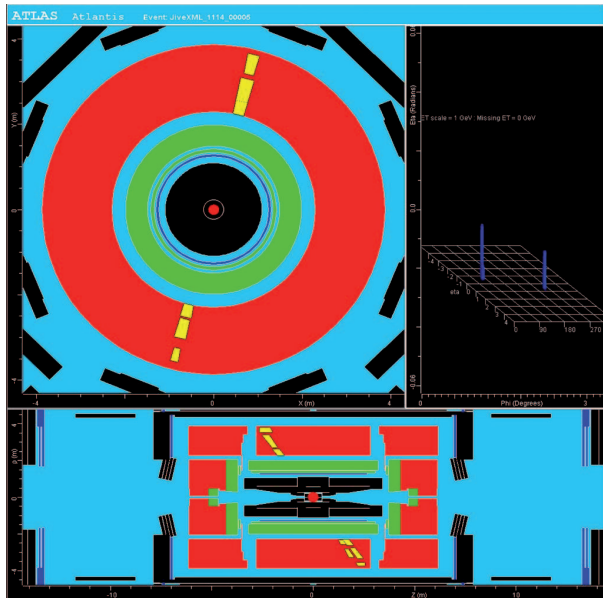


FIGURA 9. Raigs còsmics vistos amb el calorímetre hadrònic (roig) en una vista transversal (a dalt) i longitudinal (a sota) d'ATLAS.

Un exemple d'observació d'esdeveniments de raigs còsmics, seleccionats amb els calorímetres, es pot veure en la figura 9. Es tracta de successos reals que s'han pres per entendre i calibrar parts del detector i que s'han seguit agafant abans de les col·lisions reals, el 2009. (En la figura 9 es pot veure una partícula que travessa el detector seguint una trajectòria obliqua.)

Una partícula que es produeix al centre d'ATLAS (punt d'interacció) viatja radialment cap a l'exterior. La detecció que es va fent en les diferents parts (diferents subdetectors) depèn del tipus de partícula (figura 10): les partícules neutres (fotons, neutrons...) es detecten en els calorímetres, mentre que les partícules carregades (electrons, muons, protons...) es detecten principalment en els detectors de traces, i algunes també apareixen en els calorímetres. Per exemple, els electrons es detecten en el detector de traces intern i en el calorímetre electromagnètic i els pions es veuen en el detector intern i en el calorímetre hadrònic.

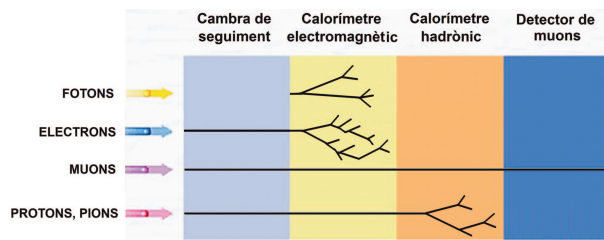


FIGURA 10. Detecció de diferents tipus de partícules en les diferents parts del detector.

Per la seva banda, els muons són les úniques partícules capaces de travessar tot el detector, ja que dipositen molt poca energia en les diferents parts i arriben a les parts més externes (figura 10).

Mecanisme de selecció de successos en ATLAS

La selecció de successos en línia es fa amb un sofisticat sistema de filtratge anomenat *trigger*. És fonamental fer una selecció ràpida i adequada perquè els successos descartats no es podran recuperar mai. Aquest procés de selecció està dividit en tres nivells: primer nivell (L1), segon nivell (L2) i tercer nivell o *event filter* (EF).

El primer nivell és molt ràpid. Està implementat en el maquinari i pren la decisió en un temps típic de 2,5 μ s. En aquesta fase no s'utilitza tot el detector, sinó únicament els calorímetres i els detectors de muons, i el sistema de lectura és independent dels canals finals utilitzats per enregistrar les dades que s'analitzaran fora de línia. Mentre es pren la decisió de l'L1, les dades resten emmagatzemades en l'electrònica del detector (els anomenats *read out drivers*, ROD) i són descartades si la decisió és negativa.

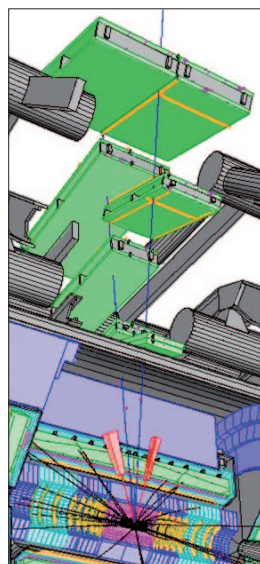


FIGURA 11. Funcionament de la selecció de successos en línia en regions d'interès (ROI).

El segon i el tercer nivell s'implementen sobre programari estàndard, amb un temps de decisió de ~ 10 ms per a l'L2 i uns pocs segons per a l'EF. Aquests dos sistemes són part de la lectura final dels successos, amb la granularitat més fina del detector. S'hi analitza la informació de tots els subdetectors d'ATLAS: detector intern, calorímetres i sistema de muons.

Mentre arriba la decisió de l'L2 i de l'EF, les dades estan en registres especials (*read out buffers*, ROB) i en disc.

Els següents nombres poden ajudar a captar la magnitud del sistema: 1) la reducció aplicada pels tres nivells és de cinc ordres de magnitud, de manera que d'una entrada de quaranta milions de successos per segon (40 MHz) es passa a 200 Hz; 2) la mida d'un esdeveniment és d'1,5 Mbytes, i 3) la quantitat de dades emmagatzemades en disc és de 9 Pbytes (9×10^{15} Pbytes) a l'any o 1 CD cada dos segons.

Una característica important de la selecció de successos en línia és el funcionament per regions d'interès (ROI), il·lustrat a la figura 11. El primer nivell troba una regió del detector amb activitat destacable (en els calorímetres o l'espectròmetre de muons) i determina el que s'anomena *regió d'interès*. La posició d'aquesta regió és utilitzada pel nivell següent i únicament s'analitza aquesta part (un petit percentatge del total). El tercer nivell també pot funcionar fent servir les regions que li passa el segon nivell.

La selecció en el segon i el tercer nivell (anomenats tots dos conjuntament *high level trigger*, HLT) es fa per passos i simultàniament. Si, per exemple, hi ha un possible esdeveniment que comprèn dues regions amb activitat en el nivell 1, no s'analitzarà cada regió separatament, sinó que es farà simultàniament, i en cada pas es veurà si se satisfan certes hipòtesis per determinar si l'esdeveniment s'ha de conservar i propagar a les següents fases, o bé s'ha de refusar.

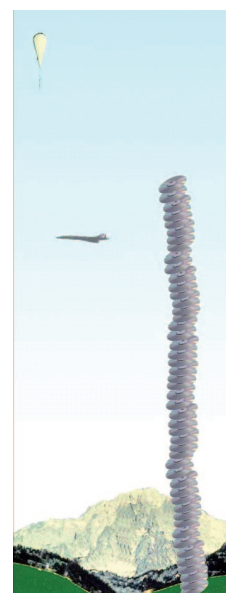


FIGURA 12. Volum de dades anuals de l'LHC.

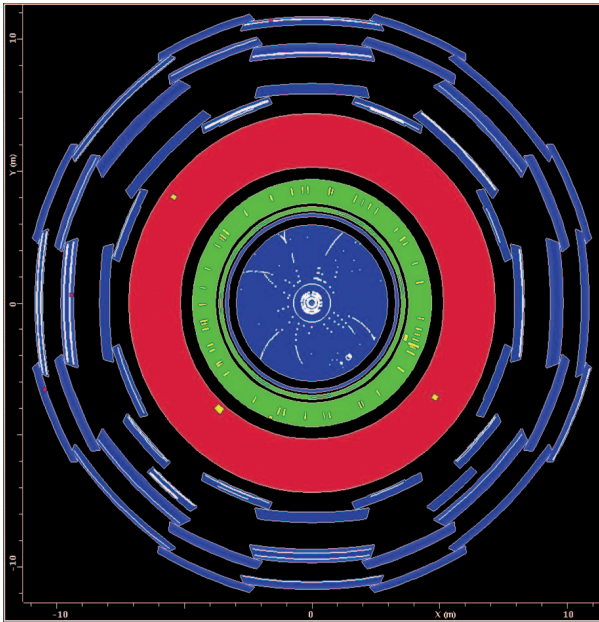


FIGURA 13. Col·lisió descartable amb baixa transferència d'energia.

Durant aquest procés d'anàlisi es va reconstruir el sucès. A partir de lectures de canals es van formar objectes cada vegada més complexos (com agrupacions de canals, associacions entre diferents parts del detector, partícules, agrupacions de partícules...). La tasca de reconstrucció no acaba en els procediments en línia, sinó que continua fora de línia després que les dades potencialment interessants s'hagin acceptat i emmagatzemat a l'exterior del detector (en discos i cintes). Els objectes finals serveixen per validar o eliminar teories que descriuen la interacció entre els components fonamentals de la matèria.

Xarxa de computació en ATLAS

La xarxa de computació desenvolupada per als experiments de l'LHC és el resultat de l'esforç d'una col·laboració internacional, amb unes dimensions d'emmagatzematge de dades, ús de processador i capacitat del programari utilitzat sense precedents.

Les tècniques informàtiques de graella de càlcul s'han desenvolupat notablement amb l'ús extensiu que se n'ha fet a l'LHC, i l'experiència obtinguda d'aquest gran banc de proves s'ha incorporat al món de la indústria.

Tal com s'ha comentat anteriorment, el volum de dades generades a l'any serà de 10-15 Pbytes. Tenint en compte la capacitat d'un CD-ROM, això equival a uns 20 km de discos compactes a l'any (figura 12).

El sistema global de processament de dades a l'LHC està organitzat, a escala mundial, en els següents nivells (*tiers*): Tier-0 (CERN), Tier-1 (onze centres) i Tier-2 (més de dos-cents centres). El Tier-0 emmagatzema les dades tal com arriben del detector i en fa la primera reconstrucció i la distribució als centres que formen el Tier-1. Els Tier-1

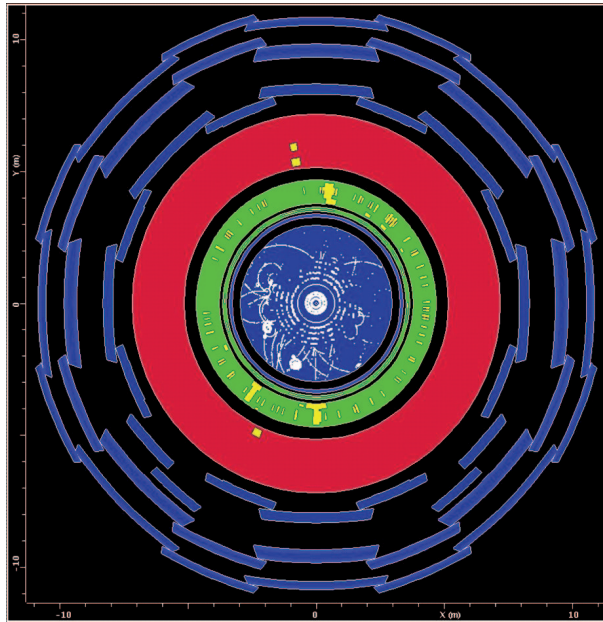


FIGURA 14. Col·lisió amb la producció de $Z \rightarrow ee$. Calibratge i verificació del detector.

tenen una còpia de part de les dades i les reprocessen (fan la reconstrucció d'esdeveniments en més detall) i les analitzen. Finalment, els Tier-2 desenvolupen processos de simulació de teories que expliquin les dades obtingudes i proporcionen el suport d'estudi als físics.

Exemples de successos que esperem a ATLAS

A continuació, veurem alguns esdeveniments obtinguts amb simulació que esperem observar amb ATLAS:

— En la figura 13 tenim un exemple de successos que s'han estudiat molt en experiments anteriors: col·lisions amb poca transferència d'energia entre l'estat inicial i el final. Tindrem uns vint-i-tres successos d'aquest tipus en cada col·lisió del detector, i s'eliminaran perquè no proporcionen informació nova. De tota manera, a l'inici de l'LHC, aquests esdeveniments ben coneguts són útils per verificar els detectors i els seus paràmetres de funcionament.

— En la figura 14 tenim un esdeveniment amb una Z (un mediador entre les interaccions conegudes), que decau en dos electrons. Aquest succés és interessant perquè permet calibrar el detector. Serà el punt d'inici d'estudis més avançats amb les primeres dades que es prenguin.

— En la figura 15 tenim un esdeveniment amb manca d'energia en el pla que es mostra (les dues partícules que arriben als espectròmetres de muons no formen un angle de 180°). Els successos de supersimetria són d'aquesta forma i una observació d'aquest tipus podria indicar física nova més enllà del model estàndard.

— En la figura 16 tenim un esdeveniment amb molta activitat en tot el detector. Es podria tractar d'un microforat

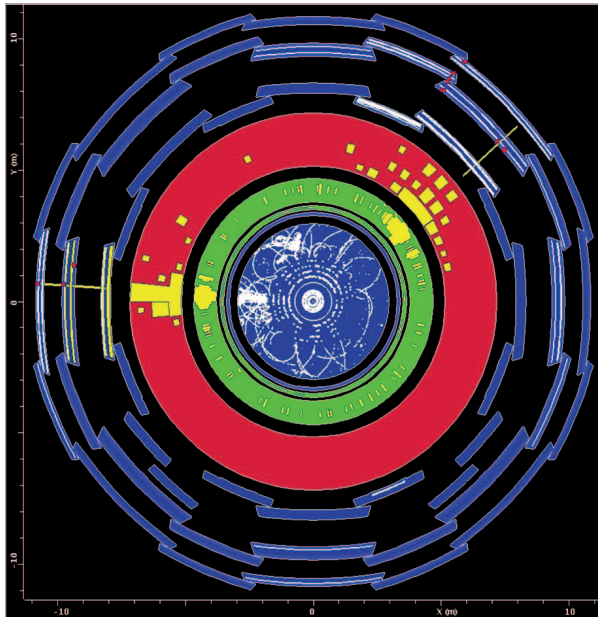


FIGURA 15. Esdeveniment amb manca d'energia en el pla observat (compatible amb supersimetria).

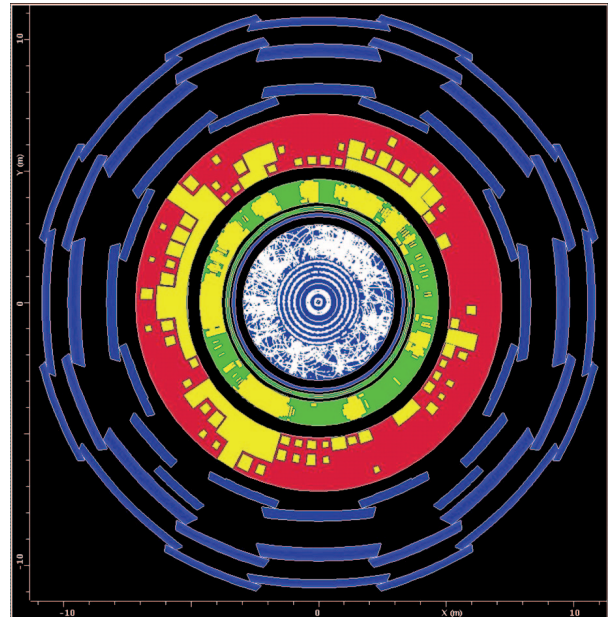


FIGURA 16. Esdeveniment amb molta activitat en els detectors de traces i els calorímetres (compatible amb un microforat negre).

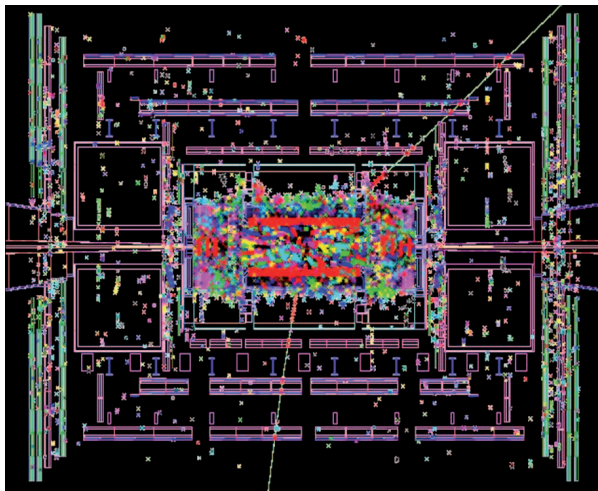


FIGURA 17. Vista longitudinal d'un esdeveniment amb bosó de Higgs que produeix dos electrons i dos muons a l'estat final (superposat al soroll de col·lisions de baixa energia).

negre, que, en cas de produir-se, s'evaporaria molt ràpidament sense perill per a l'experiment, però també seria un clar indicador de física nova.

Finalment, en la figura 17 tenim un dels esdeveniments que més se cercaran a l'LHC: un succés (o esdeveniment) amb bosó de Higgs amb electrons i muons a l'estat final. El succés es mostra superposat al soroll de fons que l'acompanyarà. Els altres esdeveniments tindran un nivell de soroll de fons similar.

En la figura 18 es mostra una visió possible de les oportunitats de descobriments que l'LHC pot oferir. En general, s'espera tenir accés a partícules de massa més elevada i a teories que apareixen a escales d'energia més altes que les d'acceleradors anteriors.

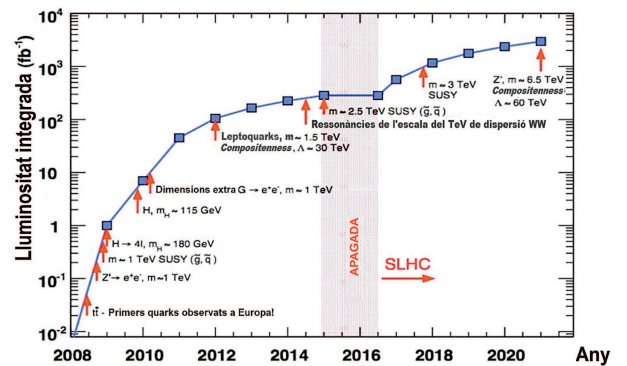


FIGURA 18. Visió de les oportunitats de l'LHC al llarg dels anys de funcionament.

A partir del 2016, es preveu una segona fase de l'LHC, el Super LHC, amb un increment de lluminositat d'un ordre de magnitud respecte de l'LHC. Amb aquesta millora (no gaire complicada) es disposarà de més esdeveniments per estudiar la física de partícules.

Aplicacions de la tecnologia desenvolupada

Un projecte que s'està duent a terme a l'IFAE actualment és la construcció d'un detector per a mamografies (figura 19) que funciona amb una dosi molt més baixa que la dels actuals aparells i que, a més, permet obtenir imatges per irradiacions amb diferents energies. Aquest projecte està actualment en fase de comercialització i ja hi ha empreses interessades en el seu ús.

La tecnologia desenvolupada en els acceleradors també s'aplica en teràpies oncològiques. El CERN participa en



FIGURA 19. Prototipus d'aparell de mamografia amb baixa dosi per a la pacient i selecció d'energia de radiació.

aplicacions d'aquest tipus i hi ha nombrosos països que estan duent a terme estudis relacionats amb aquest camp. Els teixits malignes presenten diferents propietats quan s'irradien amb feixos de protons i és possible fer decreïxer l'extensió dels tumors cancerosos.

Les eines informàtiques utilitzades en la física d'altres energies han tingut un notable impacte en tota la societat. Un dels exemples més notables és la navegació mitjançant enllaços per Internet (la WWW), que es va desenvolupar al CERN per resoldre les necessitats de comunicació entre els científics de tot el món.

Actualment, les tecnologies *grid* s'han desenvolupat moltíssim, per la necessitat de processar una quantitat ingent de dades, amb un processador molt potent i fent servir un programari molt complex.

Conclusions

Els projectes ATLAS i LHC són esforços internacionals en què participen científics de tot el món. A ATLAS hi col·laboren uns vuitanta físics espanyols (l'IFAE contribueix al calorímetre, a la selecció de successos en línia, a la reconstrucció i a l'anàlisi, a més de participar en múltiples línies d'investigació teòriques).

Amb l'LHC es tindrà accés a una nova regió d'energia, amb possibilitats d'importantíssims descobriments en la física de partícules.

La tecnologia desenvolupada per a aquests experiments té una notable aplicació en la societat actual; per exemple, en detectors de baixa radiació, teràpies contra el càncer i aplicacions de computadors. ■