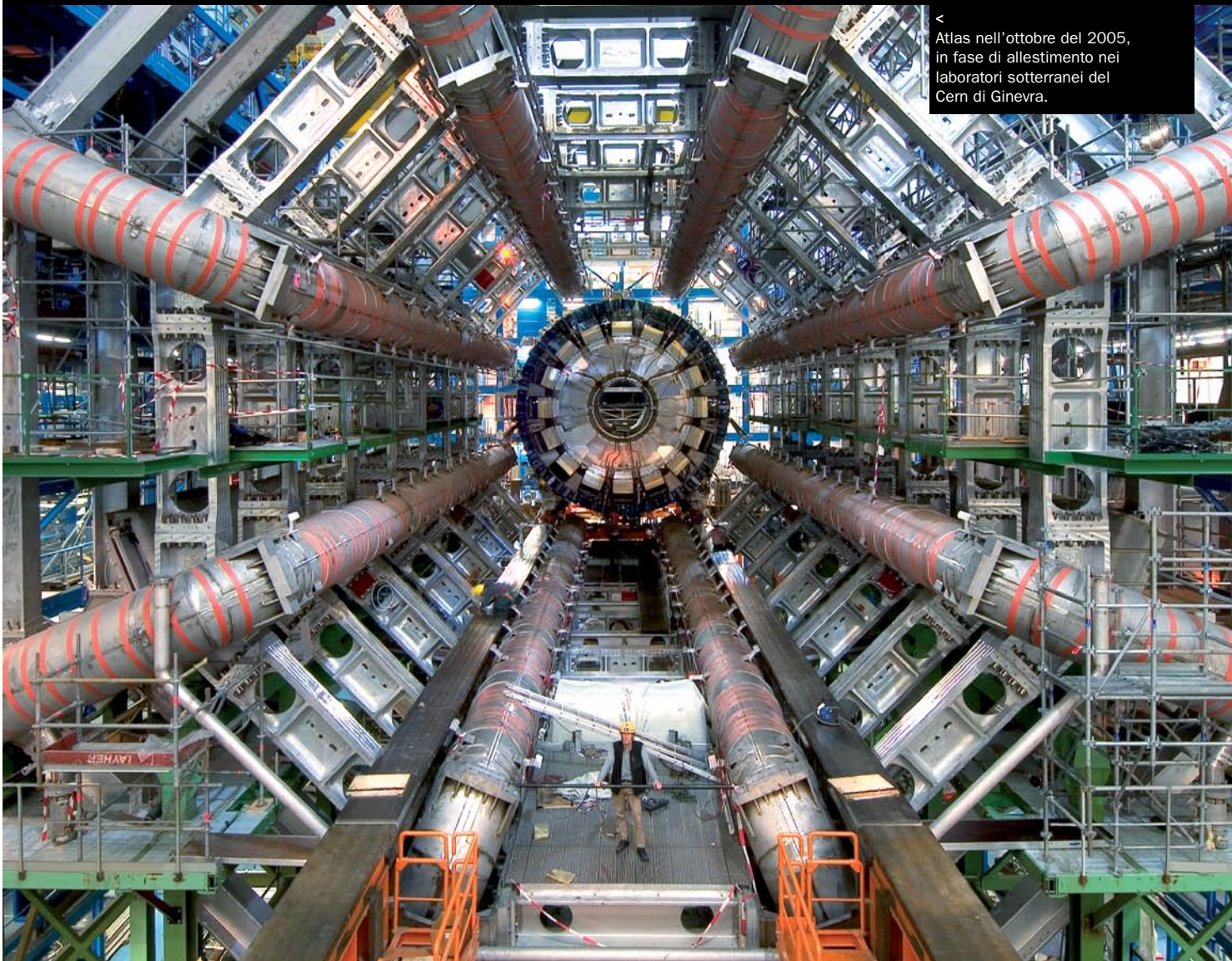


# E allora la fabbrichiamo...

Protoni fatti scontrare a velocità vicine a quella della luce per riprodurre le condizioni iniziali dell'Universo: così si crea la materia oscura in laboratorio.

di Giacomo Polesello



< Atlas nell'ottobre del 2005, in fase di allestimento nei laboratori sotterranei del Cern di Ginevra.

Della materia oscura conosciamo l'età e la quantità relativa. Esiste da quando è nato l'Universo ed è cinque volte più abbondante della materia "normale", quella di cui siamo fatti. Queste certezze offrono agli scienziati un'opportunità di indagine alternativa e complementare alla ricerca della materia oscura già presente in natura: produrla *artificialmente* in laboratorio, ricreando per tempi brevissimi le condizioni che hanno caratterizzato i primi istanti dell'Universo. Per quanto strano possa sembrare un simile *laboratorio cosmico*, i fisici sfruttano già da tempo strumenti in grado di produrre a livello microscopico condizioni ed energie estreme: sono i collisori, i grandi acceleratori di particelle la cui storia nasce nei laboratori di Frascati negli anni '60 e '70 del ventesimo secolo, e prosegue in tutto il mondo sino a giungere a dimensioni e caratteristiche sempre più avanzate. Il collisore elettrone-positrone Lep del Cern di Ginevra, ad esempio, costruito nel tunnel che sarà ora utilizzato dal nuovo acceleratore Lhc, aveva una circonferenza di ben 27 km.

In un collisore le particelle viaggiano in direzioni opposte e, dopo essere state accelerate a velocità prossime a quella della luce all'interno di un tubo a vuoto, sono fatte scontrare frontalmente con l'obiettivo di generare, a partire dall'energia resa disponibile nell'urto, nuove particelle. Un qualsiasi oggetto in movimento, infatti, è dotato di una forma di energia, detta *cinetica*, tanto più alta quanto più alte sono la sua velocità e la sua massa. Secondo la teoria della relatività di Einstein, inoltre, anche un corpo in quiete, se ha massa, ha un'energia detta *di riposo* e le due forme di energia, cinetica e di riposo, possono trasformarsi l'una nell'altra. Quando due particelle si scontrano a velocità vicine alla velocità della luce, quindi, l'energia disponibile può trasformarsi in massa, dando luogo alla formazione di particelle pesanti che prima dell'urto non esistevano. Se questo avviene, nei prodotti dell'urto si possono trovare particelle già note ed eventualmente altre ancora sconosciute: proprio tra queste ultime i fisici si aspettano di identificare e studiare anche le particelle di materia oscura.

Ricerche di questo tipo sono in corso al Fermilab di Chicago, nel collisore Tevatron, e sono condotte accelerando protoni e antiprotoni per realizzare urti a un'energia

di duemila miliardi di elettronvolt. Per avere un'idea delle quantità in gioco, questo valore è paragonabile all'energia cinetica di un moscerino di un milligrammo, in volo a 3 km/h. La natura, certo, offre quotidianamente manifestazioni di energie ben superiori e il valore dell'energia, infatti, non è in sé particolarmente significativo. L'aspetto davvero rilevante, invece, è che nel collisore l'energia prodotta è tutta concentrata nel volume di un protone, un miliardo di miliardi di miliardi di miliardi di volte più piccolo del volume occupato dal moscerino. Un grande acceleratore, quindi, può essere visto come un concentratore che realizza in uno spazio piccolissimo una eccezionale densità di energia. Il valore dell'energia, poi, diventa più significativo se si considera che, data la sua piccolissima massa, per avere molta energia cinetica il protone deve essere accelerato a velocità vicine alla velocità della luce, cioè la massima possibile. Gli urti tra particelle, inoltre, sono molto rari e per aumentarne la probabilità si è costretti a far scontrare "nuvole" di protoni e antiprotoni, composte da un numero enorme di particelle: sommando le energie di tutte le particelle accelerate nel collisore, si passa così dall'energia del moscerino a quella di un autotreno lanciato a 100 km/h!

Per quanto elevati, anche questi valori di energia possono non essere sufficienti a produrre particelle di massa relativamente grande, come le particelle candidate a spiegare la materia oscura. Inoltre, non tutta l'energia cinetica fornita dall'acceleratore è spesa per produrre nuove particelle. I protagonisti degli "incontri ravvicinati" al Fermilab ad esempio, i protoni e gli antiprotoni, sono particelle composite, i cui costituenti fondamentali sono quark e gluoni.

La produzione di nuove particelle avviene proprio grazie all'interazione tra queste particelle fondamentali ossia più precisamente, un costituente del protone e uno dell'antiprotone.

Essendo coinvolti nell'urto solo alcuni dei costituenti fondamentali, soltanto una frazione dell'energia viene utilizzata per la produzione di nuove particelle e la restante parte viene portata via da quei costituenti che hanno avuto il ruolo di semplici "spettatori". Per questa ragione, l'energia resa disponibile al Tevatron permette di coprire solo una parte dell'intervallo in cui è

probabile produrre materia oscura e questo limite ha spinto gli scienziati a raggiungere energie ancora più elevate.

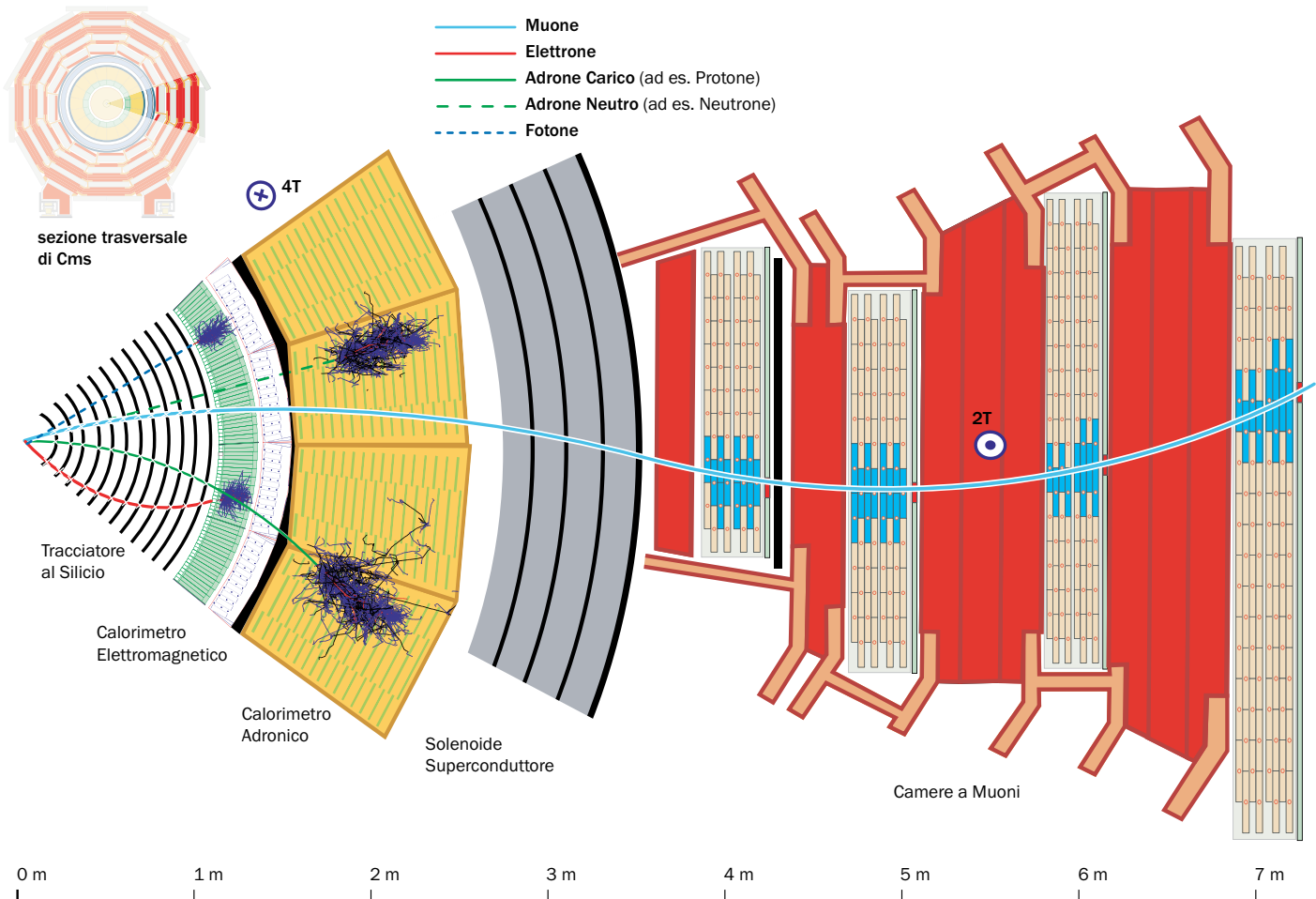
Il prossimo passo in questa direzione sarà Lhc (*Large Hadron Collider*), il collisore protone-protone in via di completamento al Cern di Ginevra, che comincerà a produrre collisioni entro un anno. Qui opereranno due grandi esperimenti, Atlas e Cms, la cui costruzione ha richiesto circa quindici anni di lavoro da parte di circa 2000 fisici per ognuno dei due esperimenti, con una determinante presenza italiana.

Se Lhc dovesse osservare un candidato di materia oscura, diverrebbe fondamentale misurarne con precisione le proprietà per confermarne la natura. Gli esperimenti a Lhc saranno in grado di misurare solo una parte di queste proprietà e, presumibilmente, sarà necessario un apparato in grado di eseguire misure più precise prima di poter dire la parola finale su tale identificazione. Un acceleratore di questo tipo è già in via di progettazione: si tratta dell'Ilc (*International Linear Collider*), un collisore elettrone-positrone di mille miliardi di elettronvolt di energia, che potrebbe entrare in attività entro quindici-venti anni.

Ma cosa si cercherà esattamente con gli esperimenti che a Lhc si occuperanno di materia oscura?

Speculazioni teoriche basate su misure astronomiche e cosmologiche propongono come principali candidati per la materia oscura le Wimp (*Weakly Interacting Massive Particle*), particelle pesanti che interagiscono debolmente con la materia. Simili particelle avrebbero masse dell'ordine di un centinaio di volte della massa del protone. La Supersimmetria, una delle più accreditate tra le nuove teorie della fisica delle particelle elementari, offre un eccellente candidato per la materia oscura: il neutralino, una particella stabile, come richiesto dalle teorie cosmologiche, con una massa di qualche decina volte superiore a quella del protone, come suggerito dai precedenti esperimenti al Lep del Cern.

Indipendentemente dalla natura del candidato, le particelle protagoniste della materia oscura hanno caratteristiche peculiari che ne rendono la rivelazione particolarmente delicata. Il fatto che le Wimp siano debolmente interagenti, ad esempio, determina caratteristiche uniche



a.

della strategia di rivelazione. La probabilità che una di queste particelle interagisca con la materia, e che sia quindi possibile rivelarla, è molto bassa; in caso contrario, i numerosi urti con la materia ordinaria, dall'epoca della loro formazione fino ad oggi, le avrebbero fatte certamente scomparire. Per osservarle in modo *diretto*, per rivelare cioè proprio le particelle di materia oscura e non altri segnali indiretti della loro presenza, è quindi necessario disporre di un numero molto elevato di tali particelle, oppure di un rivelatore di altissima massa. Per gli esperimenti di rivelazione diretta di materia oscura naturale, quelli cioè che captano i segnali della sua presenza nel Cosmo, il numero di particelle non sarà un problema: la materia oscura è cinque volte più abbondante della materia di origine nota! Nel caso della materia oscura prodotta in laboratorio, invece, si tratta, nel migliore dei casi, di identificare qualche decina di migliaia di particelle in tutto. Negli esperimenti sulla materia oscura che utilizzano gli acceleratori, potendo disporre di poche particelle "oscure" e di rivelatori di massa limitata, si deve ricorrere a una tecnica di rivelazione di tipo *indiretto*. Nelle interazioni ad alta energia, infatti, non si produrrà direttamente la materia oscura, ma particelle più pesanti. Le nuove particelle sono instabili e si disintegrano in un tempo infinitesimo, trasformandosi in altre particelle note e nella particella candidata a essere la materia oscura. Se le particelle che costituiscono la materia oscura naturale, quella già presente nel Cosmo, sono *sopravvissute* dalla creazione dell'Universo - il Big Bang - fino ad oggi, dobbiamo concludere che esse sono stabili e non possono disintegrarsi. E anche se sfuggono dal rivelatore senza lasciare traccia se ne può comunque dedurre l'esistenza indirettamente. Il lavoro dei fisici, in questo caso, è proprio quello di rivelare e misurare i prodotti della disintegrazione delle particelle pesanti prodotte in ciascuna collisione e, da qui, risalire alla loro proprietà e all'identificazione della eventuale particella di materia oscura che sfugge dal rivelatore. I rivelatori sono progettati con una struttura a strati concentrici attorno al punto in cui avviene l'urto all'interno di un tubo di qualche centimetro di diametro, e ogni strato è concepito per rivelare le caratteristiche delle particelle che lo attraversano (ad esempio carica, velocità, energia, quantità di moto), fino a ricostruire nel modo più dettagliato possibile la realtà che si è venuta a creare

a.

#### Schema rivelatore

Lo schema di principio dei grandi rivelatori: vari strati concentrici misurano diverse particelle e le loro proprietà per ricostruire al meglio ciò che si è prodotto nell'urto protone-protone. Atlas e Cms, ad esempio, hanno scelto tecnologie diverse e complementari per realizzare i vari strati.

Per visualizzare il comportamento delle diverse particelle in un rivelatore si veda:  
[http://cmsdoc.cern.ch/cms/outreach/html/CMSdocuments/DetectorDrawings/Slice/CMS\\_Slice.mov](http://cmsdoc.cern.ch/cms/outreach/html/CMSdocuments/DetectorDrawings/Slice/CMS_Slice.mov)

dopo l'urto. Nella loro struttura complessiva, tutti i rivelatori rispettano la caratteristica basilare dell'*ermeticità*: per quanto possibile, ogni particella prodotta nell'interazione ad alta energia deve attraversare una zona sensibile del rivelatore (anche se può non essere rivelata, come nel caso delle particelle "oscure"), in modo che nessuna informazione vada persa e che i principi di conservazione non possano apparire violati per dei limiti strumentali. In realtà ciò è possibile solo in modo approssimato, perché alcune particelle prodotte nell'interazione restano nel tubo in cui sono accelerati i protoni e non possono quindi essere rivelate. La conservazione delle caratteristiche globali dell'interazione, pertanto, è approssimativamente valida solo nel piano perpendicolare alla direzione in cui si muove il fascio.

La possibilità di eseguire una misura indiretta di materia oscura è garantita da due tra i più fecondi principi della fisica: il principio di conservazione dell'energia e il principio di conservazione della quantità di moto (che si ottiene moltiplicando la massa di un oggetto, o di una particella, per la sua velocità). In ogni interazione, come ad esempio una collisione, l'energia totale e la quantità di moto complessiva delle particelle si *conservano*: dopo l'urto, cioè, ciascuna quantità rimane invariata, anche se le particelle possono essere diverse da quelle iniziali. L'energia delle particelle che interagiscono è nota ed è determinata dai parametri dell'acceleratore, l'energia delle particelle prodotte, invece, è calcolabile a partire dai segnali che esse rilasciano nel rivelatore.

In base ai principi di conservazione, quindi, la somma delle energie e delle quantità di moto delle particelle che collidono devono avere il medesimo valore anche per le particelle finali rivelate. Se le due somme sono differenti, se si osservano cioè energia e quantità di moto *mancanti*, è possibile dedurre che il rivelatore è stato attraversato da nuove particelle che non hanno interagito, e quindi risultano invisibili, come atteso per la materia oscura. La rivelazione, cioè, avviene in modo apparentemente paradossale: le particelle oscure vengono notate per la loro assenza tra i prodotti finali rivelabili, e non per la loro presenza, e sono quindi viste "in negativo". In questo modo, è possibile dedurre l'esistenza, ma anche misurarne le proprietà, come la massa o la tendenza a interagire con altre particelle, attraverso uno studio dettagliato degli altri prodotti della disintegrazione. Grazie a tali misure si può calcolare anche con quale probabilità due particelle di materia oscura si annichilano vicendevolmente producendo particelle note e, in base a questo calcolo, risalire alla quantità di materia oscura ancora presente nell'Universo. Questo è utile, tra l'altro, per prevedere se il segnale dell'annichilazione di materia oscura può essere rivelabile con esperimenti già dedicati allo studio di fotoni cosmici ad alta energia. I risultati ottenuti con gli acceleratori, inoltre, permettono di calcolare la probabilità con cui una particella di materia oscura interagisce con un blocco di materia e influire, in questo modo, sui risultati degli esperimenti che rivelano la materia oscura cosmica in modo diretto.

I diversi approcci sperimentali forniscono indizi complementari per la risoluzione del mistero. Gli esperimenti con gli acceleratori, da soli, non possono infatti affermare la scoperta della materia oscura, possono solo produrre particelle che manifestano proprietà con essa compatibili. D'altra parte, un segnale positivo da uno o più degli esperimenti dedicati alla materia oscura naturale confermerebbe che questa è composta di particelle elementari e, tuttavia, non ci darebbe informazione sufficiente per collocare le particelle scoperte in un quadro d'insieme che ci permetta di aumentare la nostra comprensione delle fasi iniziali dell'Universo. Solo dalla coincidenza tra le predizioni, rese possibili dalle misure con acceleratori, e i risultati degli altri esperimenti si potrà giungere all'affermazione che l'enigma della materia oscura è definitivamente risolto. Tale risultato sarebbe un trionfo straordinario per la fisica contemporanea, in quanto permetterebbe di unificare i due campi di frontiera della fisica fondamentale, quello dell'infinitamente piccolo e quello dell'infinitamente grande, in un'unica visione dell'universo che ci circonda.

#### Biografia

**Giacomo Polesello** si è laureato in Fisica a Milano nel 1985. È ricercatore presso la sezione Infn di Pavia. Lavora in Atlas fin dall'inizio dell'esperimento con diversi incarichi di rilievo tra cui, dal 2003 al 2006, quello di coordinatore della fisica.

#### Link sul web

<http://atlas.ch>  
<http://cms.cern.ch>  
<http://public.web.cern.ch/public>  
<http://www-cdf.fnal.gov/public/index.html>  
<http://www-d0.fnal.gov/public/index.html>

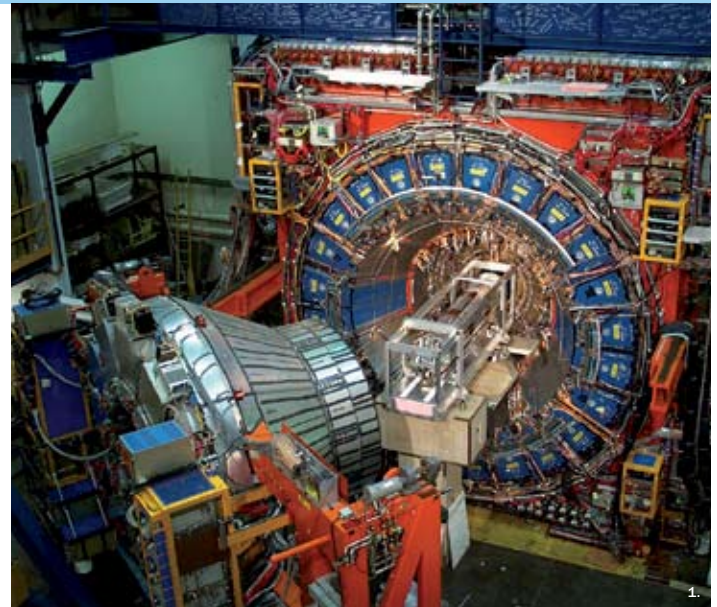
## [as] Al di là dell'Atlantico

1.

Il rivelatore Cdf aperto, nel corso del lavoro di aggiornamento nel 2001: si può vedere l'inserimento del tracciatore ad alta precisione nel rivelatore centrale.

L'acceleratore Tevatron ai laboratori Fermilab negli Stati Uniti è il più potente acceleratore in attività, con energia di collisione di 2 teraelettronvolt (2000 miliardi di elettronvolt). L'acceleratore è completato da due rivelatori, chiamati Cdf (*Collider Detector at Fermilab*), con una forte partecipazione di fisici dell'Infn, e D0.

Gli esperimenti al Tevatron vantano una storia gloriosa culminata negli anni '90 nella scoperta di un nuovo quark, il quark top, e in misure ad altissima precisione che hanno dato un contributo fondamentale alla nostra comprensione della natura. Conclusa una fase di aggiornamento che aveva lo scopo di potenziare le capacità del rivelatore, attualmente Cdf e D0 stanno raccogliendo nuovi dati, con l'obiettivo, tra l'altro, di scoprire la particella di Higgs e osservare i primi segnali di un'estensione della fisica conosciuta, che potrebbe gettare luce sul problema della materia oscura.



## [as] In Europa

2.

Il rivelatore Cms è stato assemblato principalmente in superficie e ogni strato, ciascuna con peso dell'ordine del migliaio di tonnellate, è stato poi calato nella caverna sotterranea.

Per misurare le particelle prodotte negli urti ad altissima energia nell'acceleratore Lhc del Cern di Ginevra, sono stati costruiti due rivelatori estremamente complessi e di grandi dimensioni, Atlas e Cms. La realizzazione degli apparati e del software di controllo e analisi dati per questi esperimenti hanno visto una determinante presenza dell'Infn, con importanti contributi dell'industria italiana nella costruzione di magneti superconduttori con caratteristiche da record. Il rivelatore Cms (*Compact Muon Solenoid*) è lungo 21,5 m, alto 16 m e pesa 12.500 t. La sua struttura è basata su un magnete solenoidale, costituito da una bobina superconduttrice lunga 13 m con un diametro di 6 m, che genera un campo magnetico di 4 tesla centomila volte più intenso del campo magnetico terrestre: è il più grande superconduttore al mondo. All'interno della regione di campo magnetico sono situati un *tracciatore di silicio*, in grado di registrare le tracce delle particelle con grande precisione, e il sistema calorimetrico, per misurarne l'energia. Un elemento chiave è il calorimetro elettromagnetico ad alta risoluzione

costituito da circa 80.000 cristalli di tungstenato di piombo. Attorno al solenoide è disposta una struttura di ferro ad anelli, all'interno della quale sono situati i rivelatori per la misura della traiettoria dei muoni, le particelle più penetranti e quindi in grado di attraversare indisturbate tutto il rivelatore. Il rivelatore Atlas (*A Toroidal Lhc Apparatus*) ha dimensioni colossali: è lungo 44 m e alto 22 ed è situato in una caverna posta a circa 100 m sottoterra. Allontanandosi dalla regione in cui avviene l'interazione tra i fasci di particelle, si attraversa in successione il tracciatore, il sistema calorimetrico e il rivelatore per muoni. La forma esterna di Atlas è determinata dal sistema di rivelazione di muoni, basato su un innovativo magnete, alla cui costruzione l'Infn ha contribuito in modo fondamentale. Esso è costituito da otto bobine superconduttrici alte 25 metri e disposte in modo da creare un anello magnetico attorno al rivelatore. L'obiettivo di questo gigantesco magnete è di curvare la traiettoria dei muoni, uniche particelle cariche in grado di attraversare quasi indisturbate la parte centrale del rivelatore e raggiungere lo strato più esterno.