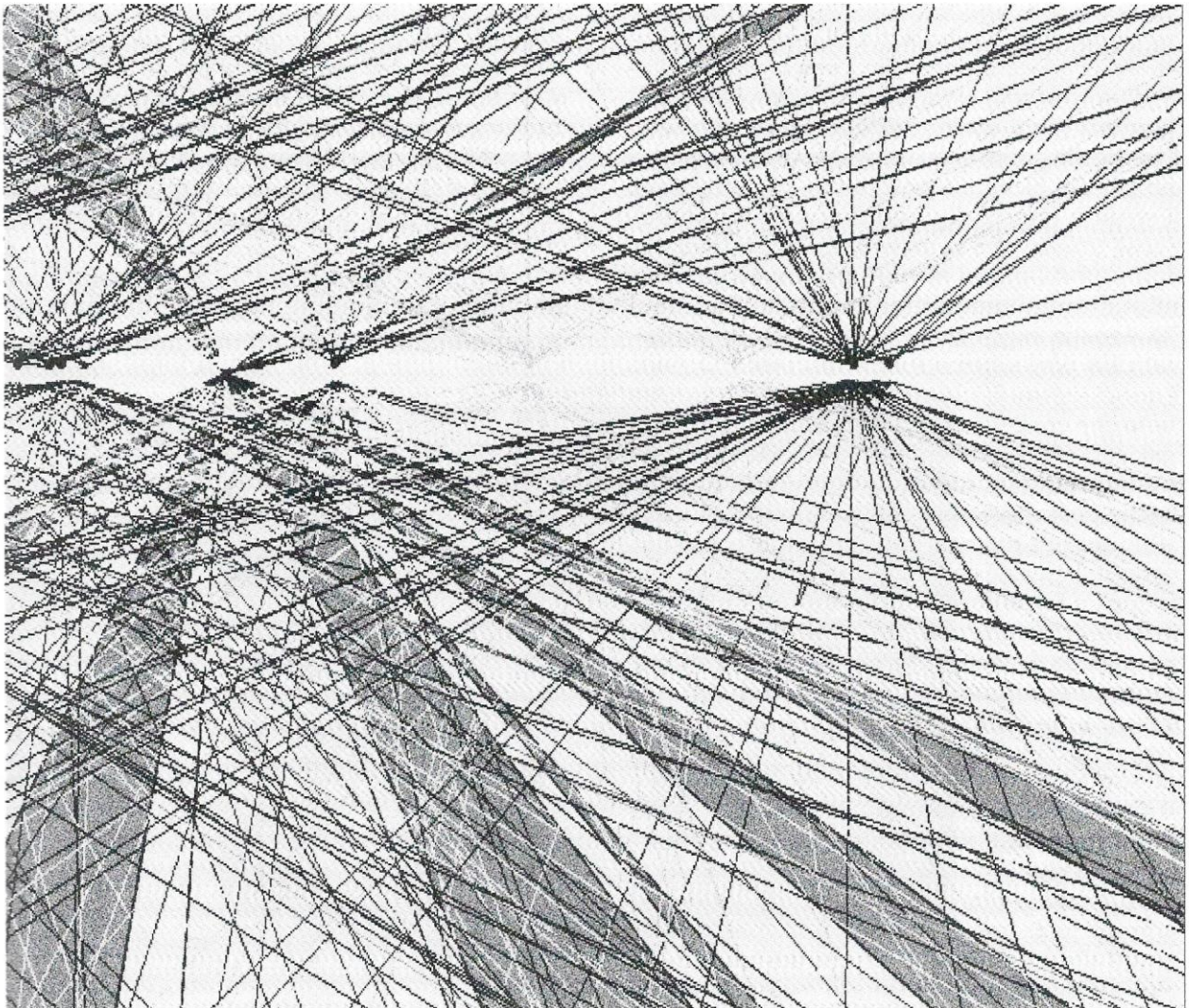
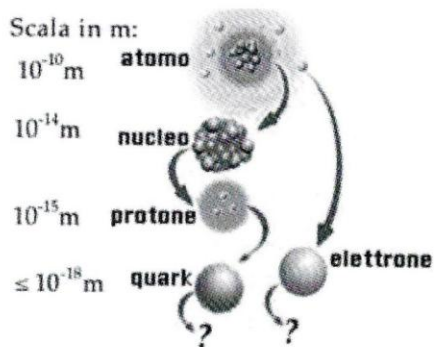


GIORGIO GIACOMELLI
Professore Emerito, Università di Bologna e INFN - Bologna

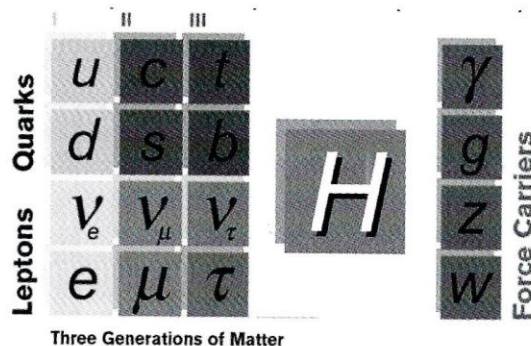
Ricerca del Bosone di Higgs* a LHC



*Il termine "Bosone di Higgs" è usato dai fisici; il termine "Particella di Dio" è usato dai giornalisti.



I costituenti della materia



I costituenti ultimi della materia, i mediatori delle forze fondamentali + Bosone di Higgs H, secondo il Modello Standard del microcosmo.

Fig. 1 – (a) I costituenti della materia. (b) I costituenti ultimi della materia e delle forze fondamentali più il bosone di Higgs secondo il Modello Standard del microcosmo.

Nel secolo scorso sono stati fatti molti passi avanti nella conoscenza del *microcosmo*, prima utilizzando microscopi ottici, poi microscopi elettronici, quindi raggi cosmici (RC) e soprattutto fasci di particelle provenienti da acceleratori di energia sempre più elevata: questi ultimi ci permettono di studiare oggetti di dimensioni piccolissime. Si è così trovato che la materia è composta di *molecole, atomi, nuclei atomici, neutroni e protoni e infine di "costituenti ultimi"*, come illustrato nella Fig. 1a, che indica anche le dimensioni approssimative di ogni sistema submicroscopico. Ognuno di questi sistemi fisici è sostanzialmente un sistema vuoto che contiene oggetti via via più piccoli. Nel cosiddetto *Modello Standard del Microcosmo (MS)* i costituenti ultimi sono *quarks e leptoni con spin 1/2* (che possono essere chiamati *particelle materia*) [lo spin è il momento angolare intrinseco di una particella]: queste particelle interagiscono fra loro tramite tre forze/interazioni fondamentali: l'interazione *elettromagnetica* (mediata da fotoni γ), *forte* (mediata da 8 gluoni g), *debole* (mediata da bosoni intermedi massivi W^\pm, W^Z), tutti con *spin 1* (le particelle mediatrici possono anche essere chiamate *particelle forza*). Solo i fotoni γ e i gluoni g hanno massa zero: tutti gli altri costituenti ultimi e gli altri mediatori delle forze fondamentali hanno masse non nulle e molto diverse tra loro, come illustrato in Fig. 2.

Con il Modello Standard si introduce un nuovo campo di forze, mediato da un nuovo bosone fondamentale, il *bosone di Higgs* che dovrebbe avere spin 0, e che darebbe luogo alla massa di tutte le particelle massive interagendo con ogni altra particella materia o mediatrice di qualche interazione, ad eccezione del fotone e dei gluoni [1][2].

Il Modello Standard prevede massa nulla per i neutrini; ma essi possono trasformarsi da un neutrino di un tipo a uno di tipo diverso (fenomeno delle *oscillazioni dei neutrini*) che è possibile solo se i neutrini hanno massa non nulla, anche se piccolissima. La spiegazione di questo fenomeno richiede forse qualcosa che non è contenuto nel Modello Standard.

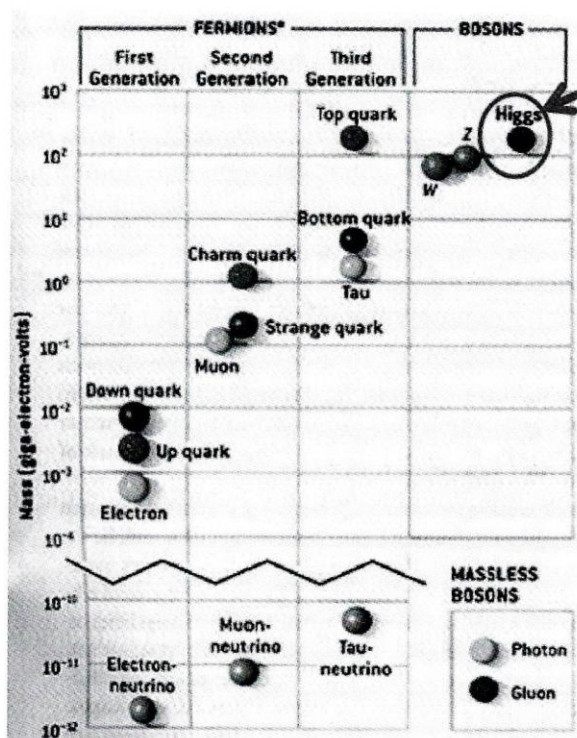


Fig. 2 – Massa dei costituenti ultimi. [Una illustrazione qualitativa della massa prodotta dal meccanismo di Higgs è in www.scienze.unibo.it/attualita-2011.html].

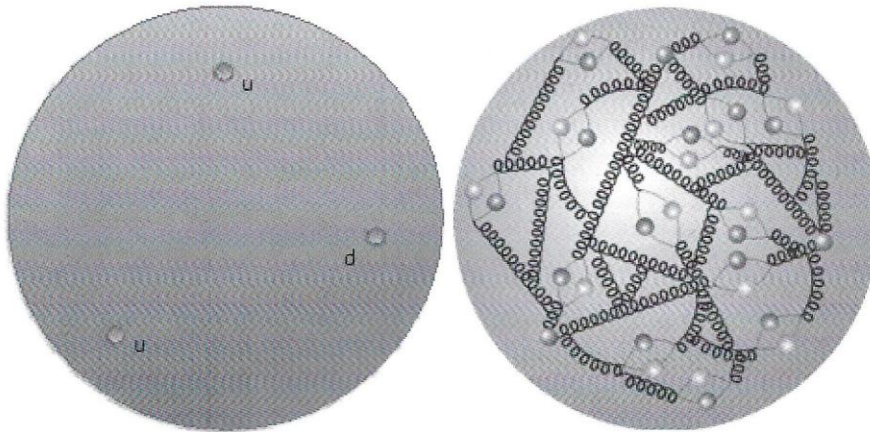


Fig 3 – a sinistra: Il protone, secondo il modello statico a quark, è composto dai tre quark quasi puntiformi, u, u, d, ed è un sistema praticamente vuoto. A destra: il protone, nel modello dinamico a quark è pieno di *particelle virtuali*, che emergono dal vuoto e restano in vita per tempi brevissimi. [<http://www.scienzagiovane.unibo.it/attualita-2011.html>].

Il MS ha anche altre mancanze come quella di non includere la forza gravitazionale. Ciò non provoca effetti apprezzabili nel campo della microfisica ad energie non troppo elevate, ma nel macrocosmo la forza gravitazionale è molto importante e vi domina. In futuro si dovrà forse procedere a introdurre una nuova parte di fisica al di là del Modello Standard. Notare, anche, che i quarks ed i leptoni compaiono in 3 famiglie, che sembrano essere una replica una dell'altra.

Secondo alcuni specialisti la presenza di 3 famiglie di leptoni e quarks potrebbe indicare che i costituenti ultimi potrebbero a loro volta essere composti da sub-costituenti e anche tale possibilità non è contenuta nel MS. Trascurando questa possibilità, la Fig. 1 mostra che gli oggetti più piccoli hanno dimensioni di circa 10^{-18} m, mentre la Fig. 2 indica che le loro masse variano da 10^{-12} a più di 10^2 giga-electron-volt (GeV), cioè sono molto diverse una dall'altra.

Si ritiene che la massa dei costituenti ultimi e dei mediatori delle interazioni

fondamentali sia legata alle loro interazioni con il campo di Higgs, un campo che permea tutto l'Universo. Le particelle con massa piccola interagiscono molto poco con il campo di Higgs, le particelle con massa intermedia interagiscono maggiormente con tale campo e le particelle con massa elevata hanno interazioni ancora maggiori con il campo di Higgs.

Dobbiamo anche valutare come sono formati e in che modo interagiscono i protoni accelerati ad alta energia nel Large Hadron Collider (LHC). Secondo il "modello statico" a quark, il protone è costituito da tre quarks, u, u, d, quasi puntiformi:

quindi il protone sembra essere un oggetto praticamente vuoto. Ma secondo il "modello dinamico" a quark, basato sulla *cromodinamica ed elettrodinamica quantistica*, il protone è pieno di particelle virtuali, per esempio gluoni, che danno luogo a coppie quark-anti-quark, fotoni che diventano coppie elettrone-positrone, ecc. Queste particelle emergono dal vuoto rapidamente e vi ritornano altrettanto rapidamen-

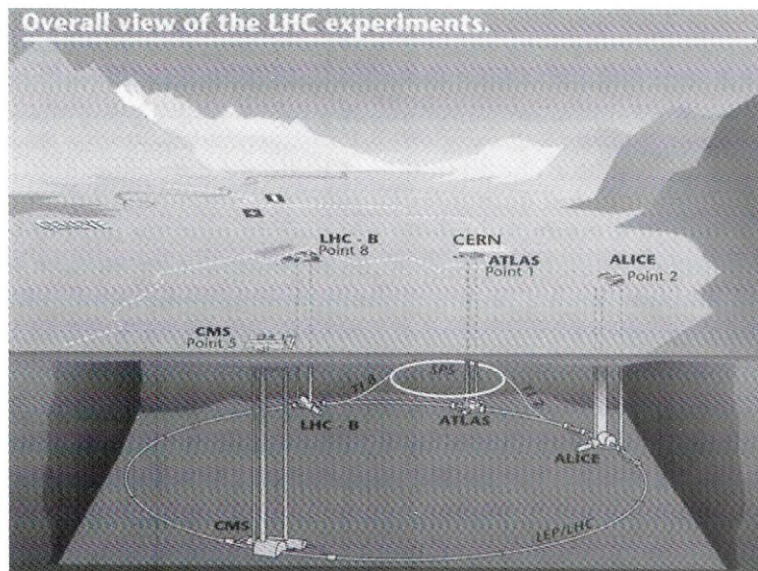


Fig. 4 – a sinistra: Schema di LHC: il grande circolo blu in basso indica il percorso del tunnel di 27 km di circonferenza fra Svizzera e Francia. Il tunnel è posto a una profondità media di 100 m; è anche indicato in giallo il tunnel dell'SPS da dove si iniettano i protoni in LHC, e i siti dei 4 esperimenti principali a LHC. Nel tunnel sotterraneo sono posti lunghi magneti superconduttori.

te. Il protone diventa così un sistema complesso e può quindi succedere che in una collisione protone-protone in LHC avvenga una collisione fra un quark del primo protone con un gluone oppure un antiquark del secondo protone, e, con minor probabilità, con un fotone o un positrone del secondo protone. LHC è il più grande acceleratore di particelle esistente [3], vedi

Fig. 4 (in precedenza vi era LEP [4]). Il tunnel nel quale si trova LHC ha una circonferenza di 27 km; non è un circonferenza perfetta perché è costituito di 8 archi intervallati da sezioni rettilinee. Per mantenere i protoni all'interno dell'acceleratore sono utilizzati 9600 magneti superconduttori di diverso tipo, che fanno curvare e focalizzare i protoni in modo appropriato. I due fasci di protoni circolano in tubi separati nei quali è mantenuto un vuoto molto spinto; in un tubo circolano i protoni in senso orario, nell'altro i protoni circolano in senso antiorario. I magneti dipolari che producono un campo magnetico di 8.3 Tesla (circa 200000 volte più intenso di quello terrestre) rappresentano una delle sfide tecnologiche più importanti. Il campo magnetico è prodotto da fili conduttori che diventano superconduttori a temperature di circa 271 gradi centigradi sotto lo zero. LHC è quindi uno dei luoghi più freddi dell'Universo, raffreddato da un complesso sistema ad elio liquido.

Un fascio di protoni circolanti ha una struttura a "pacchetti (bunches)" di protoni (fino a 2808 pacchetti) con dimensioni trasverse di circa 1 mm nelle zone lontane dai punti di collisione e di pochi micron nelle zone di collisione. In condizioni normali occorrono circa 10 minuti per iniettare i protoni in LHC e circa 20 minuti per accelerarli alla massima energia consentita. Prima di venire iniettati in LHC i fasci di protoni passano attraverso un complesso di pre-acceleratori per "spingere" i protoni ad energie sempre crescenti: ogni "preacceleratore" inietta il fascio di protoni in quello successivo fino ad arrivare all'ultimo elemento della catena. All'interno del collisionatore LHC i fasci di pro-

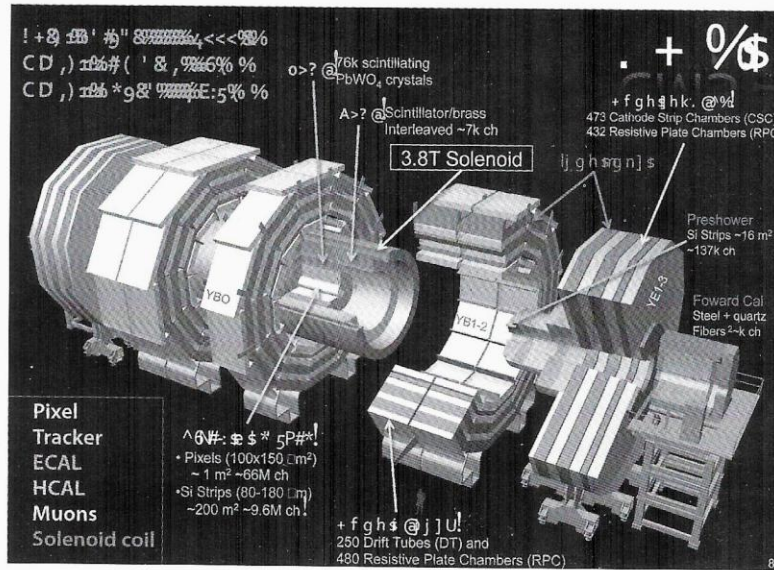


Fig. 5 – Il rivelatore CMS: vista longitudinale; in www.scienzagiovane.unibo.it/LHC/cms-page1.html è mostrata una vista trasversale interattiva: cliccando su μ , e, adrone neutro, adrone carico, γ , si osserva il passaggio delle particelle nei vari sottorivelatori.

toni sono mantenuti su orbite leggermente differenti e fatti collidere solo in corrispondenza di 4 zone situate lungo l'anello. In corrispondenza di queste zone di collisione sono stati installati 4 grandi e complessi apparati sperimentali (ATLAS, CMS, LHCb e ALICE) e altri 2 esperimenti minori (Totem, LHCf). In LHC le collisioni avvengono fra i protoni di 2

fasci circolanti in direzioni opposte: l'energia totale nel sistema del centro di massa è data dalla somma delle energie dei due fasci. Nel 2010 LHC ha raggiunto nel centro di massa l'energia di 7 TeV (3.5 TeV per fascio). Nel 2012 energie di 4 TeV per fascio e intensità (*Luminosità*) molto elevate. Nel 2014-15 l'energia raggiungerà 7 TeV per fascio (14 TeV di energia totale nel sistema del centro di massa).

Ogni grande esperimento in LHC è un complesso sistema a struttura cilindrica costituito di molti *sottorivelatori* posti in un "barrel (barile)" attorno all'asse dei fasci e di due "endcaps (tappi)" posti alle estremità dell'esperimento, vedi Fig. 5.

La sequenza dei sottorivelatori, a partire dal punto di collisione dei protoni è: (I) un *tracciatore* costituito di vari sistemi di rivelazione delle particelle cariche prodotte nella collisione e la traiettoria delle particelle cariche è determinata con una precisione fino a circa 10 μm ; (II) un *calorimetro elettromagnetico* per rivelare elettroni e fotoni e misurarne l'energia totale; questi rivelatori sono posti all'interno di un grande (III) *magnete superconduttore* che produce un forte campo magnetico diretto lungo l'asse dei fasci; poi (IV) un *calorimetro adronico* per rivelare protoni, neutroni ed altri adroni; e (V) un *rivelatore di muoni*, [5,6] Ogni sottorivelatore è segmentato finemente e le informazioni sono inviate ad un gran numero di canali elettronici. Il peso totale del rivelatore CMS è di circa 1200 ton, quello del rivelatore ATLAS è ancora maggiore.

Quando LHC funzionerà alla massima energia e ad alta intensità, in ogni rivelatore avverranno

circa un miliardo di interazioni ogni secondo, corrispondenti a 40 milioni di interazioni di ogni pacchetto al secondo e a una separazione temporale di 25 nanosecondi (cioè di 25 miliardesimi di secondo) fra due pacchetti interagenti, vedi Fig. 6. Non è possibile registrare tutti questi eventi e tutte le nuove particelle prodotte in questi eventi, che, comunque, sono

in gran parte di poca importanza. Occorre invece individuare gli eventi più interessanti e questo può essere fatto tramite molti “triggers (selezionatori)” elettronici e/o tramite programmi di calcolo che individuino possibili eventi interessanti, come per es. quelli che potrebbero indicare la presenza del bosone di Higgs. Occorre anche ridurre la frequenza di tali eventi in modo da poterli registrare in modo completo e corretto con gli attuali sistemi di presa dati.

In conclusione, occorre una grandissima potenza di calcolo per raccogliere e analizzare l'enorme quantità di dati. Questo avviene tramite un colossale sistema di piccoli calcolatori, che ha la base principale nel cosiddetto Tier-0 al CERN, e un insieme di sistemi più piccoli (Tier 1), localizzati in nazioni diverse (per l'Italia il Tier-1 è al Centro CNAF-INFN a Bologna), e di un gran numero di Tier-2 in diverse sedi universitarie. Questi calcolatori servono anche a simulare in dettaglio tutti i rivelatori, valutare le loro “performances (prestazioni)”, i metodi di analisi fisica e il confronto con diversi modelli teorici. È forse opportuno ricordare che il CERN ha avuto una grande esperienza con centri di calcolo via via più potenti e che al CERN è “nato” WWW che ora è più noto come INTERNET.

Occorre anche ricordare che ad ogni esperimento a LHC partecipano più di 3000 ricercatori fisici e ingegneri di oltre quaranta Nazioni e più di cento università ed enti di ricerca. Il CERN, nato come Laboratorio Europeo, ora, si configura come Laboratorio Mondiale. Oltre alle Nazioni europee, molte altre nazioni sono ora membri associati del

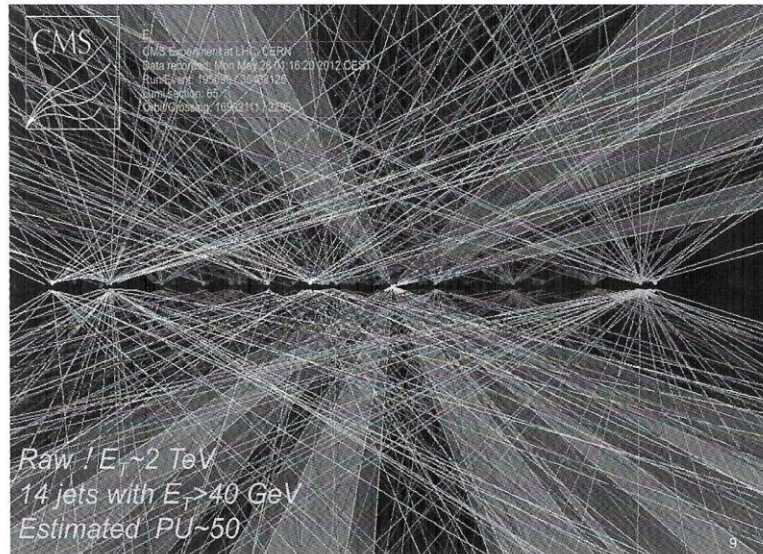


Fig. 6 – Nello stesso *bunch crossing* (incrocio di pacchetti di protoni) avvengono molte interazioni, che possono essere separate tramite l'uso appropriato dei diversi tipi di sottorivelatori.

CERN secondo accordi precisi, che stabiliscono contributi tecnici e/o finanziari e partecipazioni al CERN Council, il “parlamento” del CERN. Ogni esperimento ha un suo Council e uno Spokesperson (responsabile dell'esperimento) che viene eletto per alcuni anni. (Vi sono state alcune spokespersons donne e vi sono alcuni spokespersons non europei).

La Figura 7 mostra un evento candidato $p+p \rightarrow H^0 \rightarrow \gamma+\gamma$ (più altre particelle di fondo) nell'esperimento CMS. Le tracce cariche viste nei sottorivelatori centrali sono indicate in giallo. Queste tracce costituiscono un fondo che va ridotto e valutato con precisione.

Il Modello Standard predice l'esistenza del bosone di Higgs con breve vita media, ma non ne prevede la massa. Per ogni data massa e per ogni *modo (canale) di decadimento* predice con precisione le probabilità di produzione e di decadimento. Per masse non troppo elevate, il MS indica che le collisioni dominanti per la produzione di bosoni di Higgs sono le collisioni fra un gluone g del primo protone e un gluone g dell'altro protone, secondo il meccanismo illustrato nella Figura 9. È un meccanismo un po' complicato: procedendo da sinistra a destra i 2 gluoni interagenti diventano una coppia di quark $t + \text{anti } t$ (i costituenti ultimi con massa più elevata) che poi danno luogo direttamente al bosone di Higgs H^0 , che infine decade “democraticamente” in uno dei tanti stati finali. La probabilità di produzione del bosone di Higgs è prevista diminuire all'aumentare della massa m_{H^0} . Per masse non troppo grandi, il Modello Standard predice che il primo canale corrisponde al decadimento $H^0 \rightarrow \gamma+\gamma$, seguito dai canali $H^0 \rightarrow 2e+2\mu$, $H^0 \rightarrow 2e+2\mu+\nu+\text{anti } \nu$.

La Figura 8 mostra il numero di eventi candidati $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ in funzione di $m_{\gamma\gamma}$ trovati negli esperimenti ATLAS e CMS [7,8,9]. La massa $m_{\gamma\gamma}$ è calcolata per ogni combinazione tramite formule relativistiche sulla base delle masse e degli impulsi delle singole particelle. Notare in Figura 8 i punti e le

linee decrescenti all'aumentare di $m_{\gamma\gamma}$: essi costituiscono un fondo. Il segnale per $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ è rappresentato dai "picchetti" a $m_{\gamma\gamma} = 125-126$ GeV. Il canale $p+p \rightarrow H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ rappresenta solo uno dei canali di osservazione di un bosone di Higgs ed è il canale formalmente più semplice.

Come già detto, il canale $p+p \rightarrow H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ è solo uno dei modi di os-

servazione del bosone di Higgs. Un secondo canale importante, è il canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2(e, \mu) + 2(e, \nu) \rightarrow 4$ leptoni carichi. Un altro, un po' più complicato da analizzare, è il canale $H^0 \rightarrow WW \rightarrow 2e + 2\mu + \nu + \text{anti } \nu$. Questo dà luogo nello stato finale a più di 2 particelle e quindi non presenta un picchetto come nel canale $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $H^0 \rightarrow 4$ leptoni carichi ma una distribuzione più "sbrodolata".

L'analisi in funzione della massa dell'Higgs, come illustrato nelle Fig. 8a,b, non è quella più sensibile. Una migliore è in termini della probabilità dei canali. Per valutare questa, occorre un'ottima conoscenza tramite misure e simulazioni Monte Carlo delle efficienze e delle caratteristiche di ogni sottorivelatore e dei fondi attesi. Questo richiede ot-

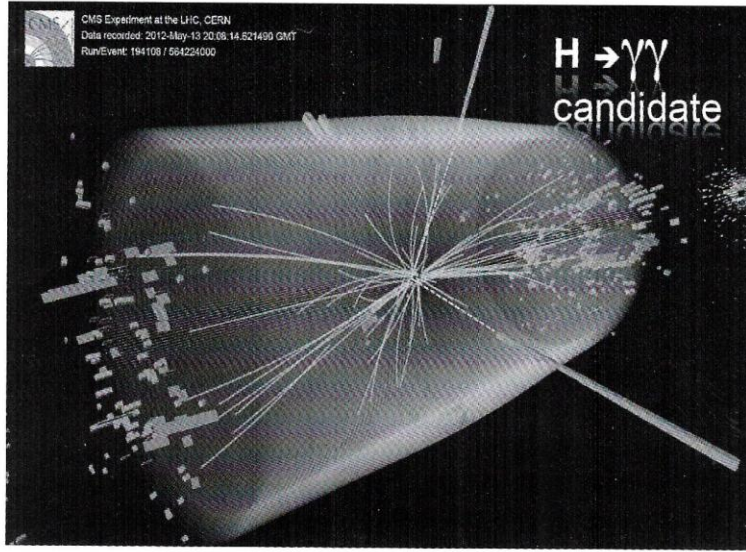


Fig. 7 – Un evento candidato $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ in CMS (i due segnali verdi). Notare il notevole numero di particelle cariche (fondo) viste nei rivelatori centrali (tracce in colore giallo).

time conoscenze di tutti i sottorivelatori e metodi raffinati di calcolo. Il risultato di tali analisi è mostrato nelle Figure 10a,b per i due esperimenti. Notare che il picchetto per $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ mostrato nelle Figure 8 a,b diventa la curva verde di Fig.10b con un avvallamento ben definito per CMS, e analogamente per ATLAS.

Si può concludere che alla massa

$m_H = (125.7 \pm 0.4)$ GeV esiste una struttura compatibile con quella prevista per il bosone di Higgs del Modello Standard. Il significato del risultato è rafforzato dall'osservazione in due esperimenti diversi. Entrambi stabiliscono che i decadimenti favoriti sono $\gamma\gamma, Z^0 Z^0$: ciò implica che la struttura vista è un bosone. Il periodo di "presa dati" nel 2012 è stato allungato, e alla fine del 2012 ATLAS e CMS avranno altri dati da analizzare.

Ed ora possiamo concludere che il MS è la teoria completa della materia e delle forze? Dal punto di vista sperimentale si deve ancora verificare con precisione se lo spin della particella H^0 è veramente zero, misurare con precisione la sua vita media, verificare se nell'intervallo di massa $100 < m_H < 1000$

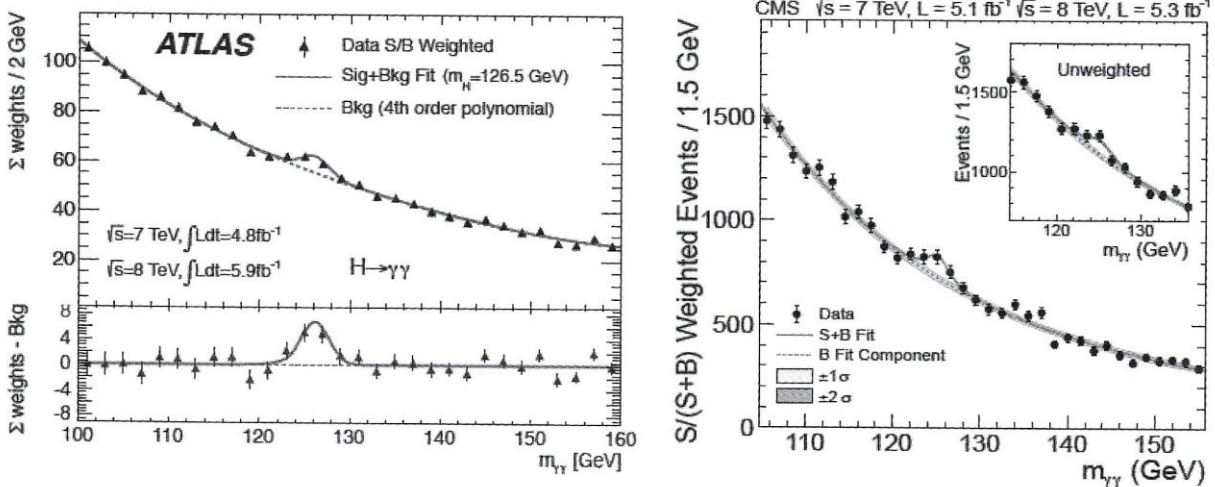


Fig. 8 – Numero di eventi candidati $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ in funzione di $m_{\gamma\gamma}$ negli esperimenti ATLAS e CMS. Notare i punti e le linee decrescenti all'aumentare di $m_{\gamma\gamma}$: essi costituiscono un fondo; il segnale per $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ corrisponde ai piccoli picchi a $m_{\gamma\gamma}$ 125-126 GeV.

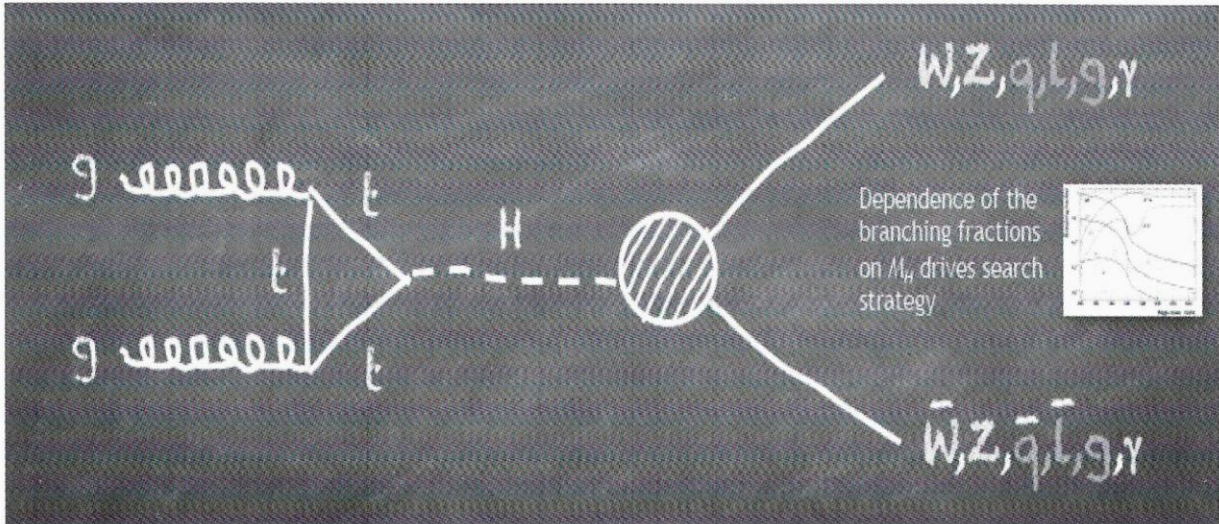


Fig. 9 – Probabilità di produzione e decadimento del bosone di Higgs secondo il Modello Standard. Siccome il bosone di Higgs si accoppia più fortemente con i costituenti di massa più elevata, la coppia g+g si converte in una coppia t+anti t che dà quindi luogo a H^0 , che poi decade in molti modi, in particolare anche in due fotoni, $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$.

GeV non vi siano altri picchi; e inoltre si deve verificare se le probabilità di produzione e dei decadimenti siano consistenti con le previsioni del MS. I risultati mostrati nella Fig. 11 per alcuni decadimenti osservati indicano che i dati ottenuti potrebbero essere consistenti con le previsioni, ma non sono ancora sufficientemente precisi, per cui sono necessarie altre misure.

Dal punto di vista teorico si può dire che il Modello Standard sembra essere quasi confermato, ma che non può essere la teoria completa della materia e delle forze perché:

I) esso non include la forza di gravità (che non gio-

ca un ruolo molto importante nel microcosmo, ma che invece è dominante nel macrocosmo); II) il MS predice massa nulla per i neutrini, ma il fenomeno delle oscillazioni dei neutrini, cioè la trasformazione di un neutrino di un tipo in un neutrino di altro tipo, può avvenire solo se i neutrini hanno massa non nulla e questo, molto probabilmente, non può essere contenuto nel MS; III) come indica la Fig. 2 lo spettro di massa dei costituenti della materia copre un amplissimo intervallo. Perché? Il MS non lo spiega; IV) la materia che interviene nel MS è la *materia ordinaria*, che nell'Universo rappresenta solo il 4% della materia e dell'energia totale; V) a

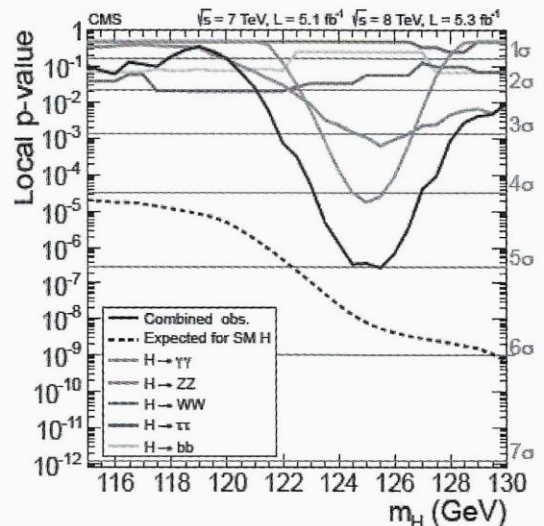
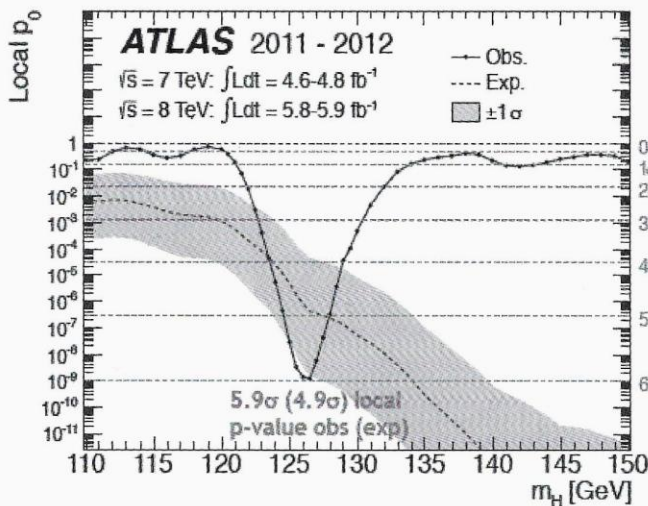


Fig. 10a – a sinistra. Analisi in probabilità globale sommando tutti i canali considerati per l'esperimento ATLAS. Fig 10b. a destra. Analisi in probabilità per vari modi di decadimento di H^0_{SM} nell'esperimento CMS per masse comprese fra 115 e 130 GeV: la curva verde si riferisce al canale $H \rightarrow \gamma\gamma$, la curva rossa al canale $H \rightarrow ZZ$. La curva nera si riferisce all'analisi globale sommando tutti i canali analizzati.

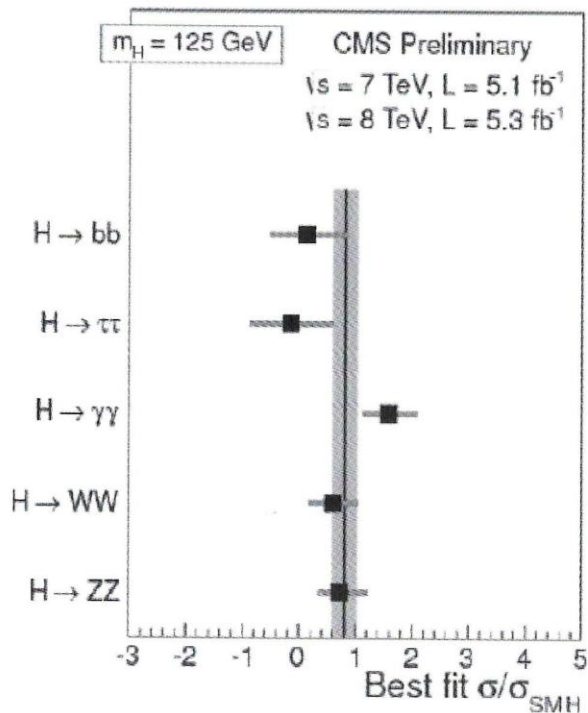


Fig. 11 – Rapporti dei decadimenti misurati in CMS: la precisione delle misure non è ancora sufficiente per giungere a una completa conclusione se siano in completo accordo con il MS.

livello macroscopico ci sono forti indicazioni per l'esistenza della *materia oscura* (al livello del 20% della materia e dell'energia), che molto probabilmente richiede materia non prevista dal MS; VI) sempre a livello macroscopico, vi sono forti indicazioni dell'esistenza dell'*energia oscura* (intorno all'80%) anch'essa non prevista dal MS; VII) mentre a livello microscopico c'è grande similarità fra materia e antimateria, a livello macroscopico la materia è dominante; VIII) vi sono, inoltre, varie considerazioni teoriche che indicano come il MS non possa essere una teoria completa.

Le recenti analisi di tutti i dati presi nel 2012 all'energia totale di 8 TeV rafforza l'ipotesi di aver trovato il bosone di Higgs, ma occorrono ancora altri dati per migliorare le misure dei prodotti di decadimento dell'Higgs indicati nella Fig. 11.

Abbiamo fatto un altro passo importante in avanti per la comprensione del microcosmo, ma resta ancora tanto da fare e da scoprire e si spera che ulteriori dati a LHC quando raggiungerà l'energia massima di 13-14 TeV (nel 2014-15) possa portare nuovi lumi, in particolare su una possibile "nuova fisica" che vada "oltre" il Modello Standard.

È anche opportuno ricordare che la comprensione del microcosmo a energie molto elevate fornisce ulteriori informazioni su quanto avvenne nell'Universo primordiale, subito dopo il Big Bang.

Desidero ringraziare i colleghi bolognesi che partecipano agli esperimenti a LHC per informazioni e consigli per la stesura di questa nota divulgativa.

Bibliografia

- [1] P. HIGGS, Phys. Lett. 12 (1964) 132.
- [2] F. ENGLERT and R. BROUT, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321.
- [3] L. EVANS et al., JINST 03 (2008) S08001.
- [4] ALEPH, DELPHI, L3, OPAL Collab. and LEP W.G., Phys. Lett. B565 (2003) 61.
- [5] <http://www.scienzagiovane.unibo.it/LHC/atlas-page1.html>
- [6] <http://www.scienzagiovane.unibo.it/LHC/cms-page1.html>
- [7] ATLAS Coll., Phys. Lett. B716 (2012) 1.
- [8] CMS Coll., Phys. Lett. B716 (2012) 30.
- [9] A. HOECKER, "Particle Phys.: The Higgs boson and beyond", SLAC 50, <http://slac50.slac.stanford.edu/scientific-symposium-agenda.asp>