

LA SCOPERTA DEL BOSONE DI HIGGS: LA VERSIONE DI ATLAS

Claudio Gatti

LNF - INFN, Via E. Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy

Abstract

La scoperta del bosone di Higgs è sicuramente uno dei più importanti eventi scientifici di tutti i tempi, che porta a compimento la base sperimentale su cui si fonda il Modello Standard della fisica delle particelle elementari.

Questa nota ripercorre brevemente gli eventi che si sono succeduti tra il 2010 e il 2013, descrivendo le misure eseguite dalla collaborazione ATLAS, uno dei due esperimenti del CERN che ha osservato il bosone di Higgs.

Si tenta di spiegare, inoltre, come, e attraverso a quali osservazioni, siamo in grado di dire con una certa sicurezza che quella osservata è proprio la particella predetta dal Modello Standard.

La scoperta di una nuova particella elementare è un evento sempre più raro e crea grande euforia nella comunità dei fisici. A partire dall'elettrone, scoperto nel 1896, nuove particelle sono state osservate in esperimenti sempre più complessi. Con l'avvento degli acceleratori sono stati osservati i quark, il leptone tau e i gluoni, in un susseguirsi di scoperte culminato nel 1983 con quella dei mediatori delle interazioni deboli: i bosoni W e Z. Poi si è dovuto aspettare 12 anni prima che l'ultimo dei quark, il top, fosse prodotto nelle collisioni tra protoni e antiprotoni nei laboratori di Chicago. Il bosone di Higgs invece, l'ultimo tassello del Modello Standard, la teoria che descrive il mondo subnucleare, ha eluso ogni tentativo dei fisici sperimentali fino a Luglio del 2012. A quasi 20 anni dalla scoperta del quark top, gli esperimenti del CERN, ATLAS e CMS, hanno annunciato di aver trovato il bosone di Higgs. Il Modello Standard è finalmente completo.

Nel Marzo del 2010 i due esperimenti cominciano a registrare i dati provenienti dalle collisioni tra i protoni che circolano all'interno dell'acceleratore di particelle LHC ad una energia mai raggiunta prima in nessun altro laboratorio. Quando due protoni si scontrano le particelle che li compongono, quarks e gluoni, interagiscono. A volte rimbalzano semplicemente le une sulle altre cambiando direzione, altre volte invece si producono nuove particelle. Ad esempio, si producono altri quark e gluoni, oppure, una volta su un milione, particelle Z e W. Raramente, una volta ogni 500 milioni, si producono coppie di quark top e anti-top e ancora più raramente, una volta ogni cinque miliardi di collisioni, si produce un bosone di Higgs. Il classico ago nel pagliaio.

Le collisioni tra protoni avvengono ogni 50 miliardesimi di secondo (50 nanosecondi) nel cuore dei rivelatori. Dal punto di interazione si diramano centinaia di particelle cariche e neutre prodotte negli scontri tra i costituenti dei protoni. I rivelatori hanno una struttura cilindrica a strati, ognuno dei quali raccoglie varie informazioni sulle particelle che lo attraversano. Ad esempio il punto ed il tempo di attraversamento e l'energia delle particelle. Da queste informazioni, elaborate nei computers di grandi centri di calcolo, si ottengono l'equivalente di fotografie 3D di quello che è avvenuto nella collisione. O meglio, si ottiene l'equivalente di veri e propri filmati in cui è possibile seguire le singole traiettorie e distinguere i differenti tipi di particelle tra di loro.

Alcune particelle però scompaiono un istante dopo essere state prodotte e non compaiono nella "fotografia" fatta dal rivelatore. Ci sono particelle infatti che sopravvivono per un tempo inferiore al millesimo di miliardesimo di secondo. In questo tempo, detto vita media, si trasformano in altre particelle. Saranno queste ultime ad attraversare il rivelatore e a comparire nella fotografia finale. Il bosone di Higgs è una di queste, con una vita media di circa un decimillesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo. I fisici sperimentali non devono solo cercare un ago in un pagliaio, ma addirittura cercare le tracce di un ago che si è dissolto.

Ogni particella elementare ha determinate proprietà che la caratterizzano e che la distinguono dalle altre. Tra queste, la massa ne è la vera "firma". Così, riuscendo a misurare il valore della massa di una particella, si può dire di che particella si tratta. Ma come misurare la massa di una particella che si è trasformata in altre?

"Rien ne se perd, rien ne se crée" scriveva il chimico francese Lavoisier enunciando la sua legge sulla conservazione della massa. Ci volle Einstein per correggere questo enunciato introducendo la famosissima formula $E=mc^2$. Infatti, una massa può anche scomparire ma al suo posto deve rimanere qualcosa con un equivalente contenuto energetico. Questo è quello che succede ad esempio quando il bosone di Higgs si trasforma in due fotoni. Il primo, sappiamo oggi, ha una massa pari a circa 130 protoni mentre i fotoni hanno massa nulla. Se però sommiamo l'energia trasportata dai due fotoni

otteniamo proprio il valore della massa del bosone di Higgs¹. Questo è proprio quello che fanno i fisici del CERN per cercare la traccia lasciata dal decadimento di questa evanescente particella.

A Dicembre 2011 al CERN hanno raccolto miliardi di "fotografie". Il bosone di Higgs potrebbe aver lasciato traccia in centomila di queste. La maggior parte delle volte, però, queste tracce sono così fievoli da non poter essere osservate. Bisogna concentrarsi su quei pochi casi in cui i prodotti del decadimento sono particelle ben distinguibili dalle altre e da cui sia facile misurare una massa. Sono due i processi preferiti: il decadimento dell'Higgs in due fotoni e quello in quattro leptoni (quattro elettroni, quattro muoni, o due elettroni e due muoni). Purtroppo in questo modo le centomila possibili "fotografie" si riducono a non più di un centinaio.

Un esempio di evento registrato dal rivelatore ATLAS in cui potrebbe essere stato prodotto un bosone di Higgs è mostrato nella figura 1. Nel riquadro in alto a sinistra si vedono, in una sezione trasversa del rivelatore, le particelle cariche (in azzurro) allontanarsi dal punto centrale dove è avvenuta la collisione tra protoni. Le due macchie gialle sul cerchio verde, rappresentano il segnale rilasciato dai due fotoni che potrebbero provenire dal decadimento dell'Higgs. Il condizionale è d'obbligo perchè di eventi, o fotografie, simili a questa ne esistono molte che sono dovute a processi che nulla hanno a che vedere con l'Higgs. Questi processi sono detti di "fondo". L'unico modo per capire se l'Higgs ci sia o meno è quello di raccogliere tanti eventi, per ognuno stimare una massa dalla somma delle energie e vedere se per un certo valore di quest'ultima si osserva un eccesso significativo. Più sono gli eventi di fondo e più dati bisogna raccogliere affinché il segnale cercato sia visibile (si veda ad esempio l'animazione al seguente link:

<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults/Hgg-FixedScale-Short2.gif>).

A Dicembre del 2011 i due esperimenti non potevano affermare nulla con certezza. Occorrà ancora qualche mese di presa dati.

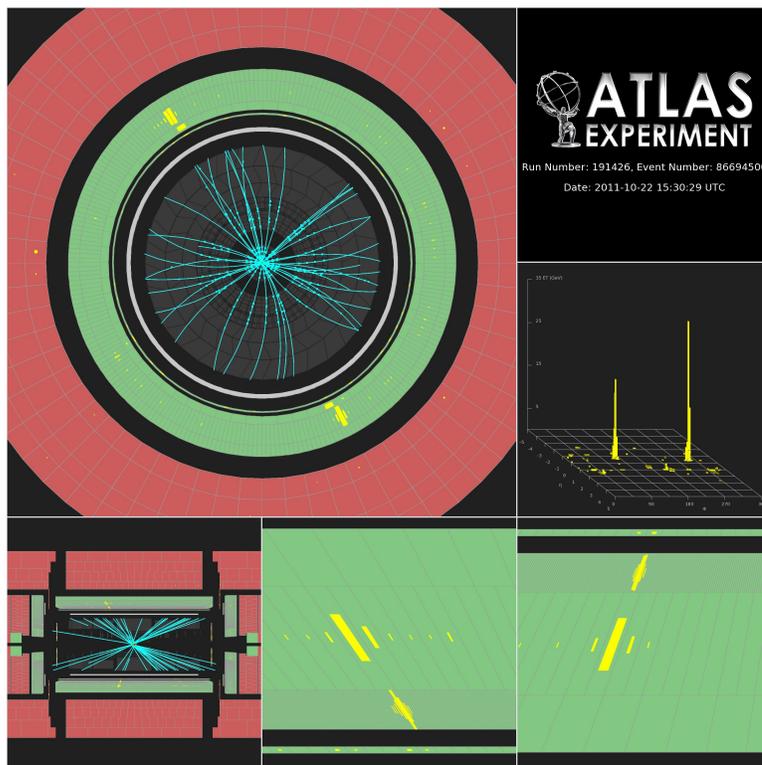


Illustration 1: Uno degli eventi registrati dal rivelatore ATLAS in cui potrebbe essere stato prodotto il bosone di Higgs con il successivo decadimento in due fotoni. Si vedono in azzurro le traiettorie delle particelle cariche mentre si allontanano dal punto centrale dove è avvenuta la collisione tra i protoni. In giallo sono mostrati i punti in cui i fotoni, provenienti forse dal decadimento dell'Higgs, si sono fermati rilasciando la loro energia.

¹ Questo è strettamente vero nel sistema a riposo della particella che decade.

Il 4 Luglio del 2012, raddoppiato il numero di eventi raccolti, arriva l'annuncio tanto atteso durante un seminario nella sala conferenze del CERN. Una nuova particella è stata trovata e sembra proprio essere il famoso bosone.

Cercando gli eventi con due fotoni e combinandone le energie per calcolare la massa del sistema, l'esperimento ATLAS ottiene la distribuzione mostrata nel riquadro in alto della figura 2. Qui ogni punto nero corrisponde al numero di eventi contati con un certo valore di massa $m_{\gamma\gamma}$. Sottraendo il numero di eventi aspettati dai processi di fondo, si ottiene la distribuzione mostrata nel riquadro in basso. Ad una massa pari a circa 125 Giga elettronvolt (GeV) compare un eccesso di eventi. Questo è il segnale che si cercava, la "firma" del bosone di Higgs.

Anche altri canali di decadimento contribuiscono alla scoperta. Nel canale in quattro leptoni ci si aspettava appena 6 eventi, ed effettivamente, combinando le energie delle quattro particelle si osserva un eccesso aspettato anche qui per una massa di circa 125 GeV (si veda la figura 3).

L'eccesso aspettato si osserva anche nel decadimento in un muone un elettrone e due neutrini, nonostante la presenza di questi ultimi non permetta di calcolare esattamente la massa del sistema.

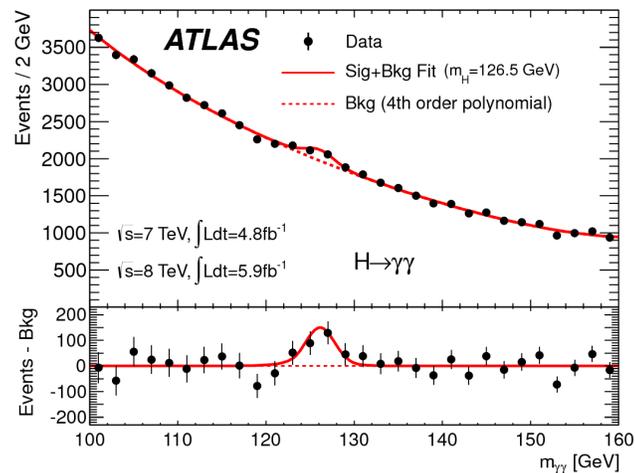
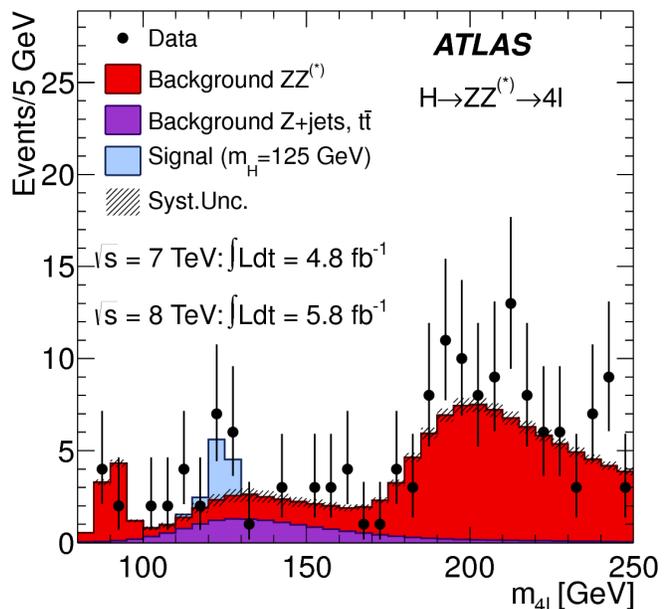


Illustration 2: Distribuzione della massa ottenuta combinando le energie dei due fotoni. Nel riquadro in alto, ad ogni punto nero corrisponde il numero di eventi contati corrispondenti a quel valore di massa. Nel riquadro in basso, i punti neri corrispondono al numero di eventi che rimangono quando si sottrae il numero di eventi di fondo aspettato. E' evidente l'eccesso di eventi intorno a masse pari a 125 Giga elettronvolt.

Illustration 3: Distribuzione della massa ottenuta combinando le energie dei quattro leptoni. Ogni punto nero indica il numero di eventi aspettato per quel valore di massa. Gli istogrammi colorati corrispondono invece al numero di eventi aspettato dai modelli teorici e dalle simulazioni. Il contributo aspettato dalla particella di Higgs con massa pari a 125 GeV è mostrato dall'istogramma celeste.



I risultati dei vari canali di decadimento vengono combinati dai fisici usando dei test di statistica. Si calcola la probabilità che l'eccesso di eventi osservato sia dovuto solo agli eventi di fondo. Questo valore è indicato con il simbolo "p0" ed è mostrato in figura 4 per diversi possibili valori della massa del bosone di Higgs. Se questa probabilità fosse grande, quanto osservato sarebbe presumibilmente dovuto solo ai processi di fondo. Al contrario se fosse piccola sarebbe difficile giustificare l'eccesso di segnale osservato con una fluttuazione degli eventi di fondo. I dati raccolti da ATLAS indicano che la probabilità che gli eventi di solo fondo possano giustificare l'eccesso osservato è estremamente piccola. Una eventualità che si potrebbe ripetere solo una volta su un miliardo. L'esperimento CMS ottiene risultati analoghi. La caccia al bosone di Higgs si è finalmente conclusa ... o no?

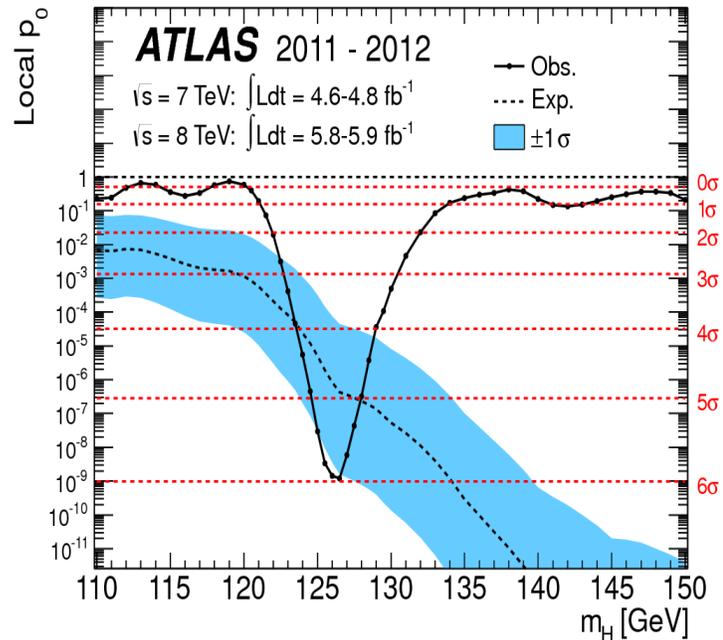


Illustration 4: Combinazione statistica dei risultati della ricerca del bosone di Higgs nei vari canali di decadimento. Il "Local p0" corrisponde alla probabilità che il segnale osservato sia dovuto solo a processi di fondo e non al decadimento di un bosone di Higgs. Come si vede questa probabilità, indicata dalla linea nera continua, raggiunge valori molto piccoli per valori della massa intorno a 125 GeV. Una fluttuazione degli eventi di fondo che giustificerebbe l'eccesso di eventi osservato si potrebbe avere solo una volta ripetendo l'esperimento un miliardo di volte.

Nelle sue conclusioni al seminario del 4 Luglio 2012 il Direttore Generale del CERN annuncia l'"Osservazione di una nuova particella **consistente** con il Bosone di Higgs (**ma quale ... ?**)". Che si sia scoperta una nuova particella infatti è certo. Ma rimane il dubbio di non aver veramente osservato il bosone di Higgs. Subito di parla infatti di "Higgs impostore", cioè di una particella sconosciuta che potrebbe mimare l'Higgs nelle fotografie dei rivelatori. Si parla di techno-particelle, di gravitoni in teorie con quinta dimensione arrotondata o di dilatoni. I fisici teorici a volte hanno una immaginazione incredibilmente vivida. Possibile che si tratti di una di queste particelle ad aver lasciato traccia nei rivelatori ATLAS e CMS? Se invece si fosse effettivamente osservata la particella che dà la massa alle altre, come essere certi che sia proprio quella descritta dal Modello Standard? Potrebbe non essere una particella elementare, ma composta, così come lo sono i protoni e i neutroni. Oppure potrebbe appartenere ad una teoria più estesa del Modello Standard come quella delle supersimmetrie. Come distinguere tra queste ipotesi?

La techno-particella, il gravitone, il dilatone, l'Higgs composto o supersimmetrico hanno tutte un modello teorico di riferimento che fa previsioni sulle loro proprietà e sui modi di decadimento. Il Modello Standard, ad esempio, prevede che si abbia circa un decadimento dell'Higgs in quattro leptoni ogni 20 decadimenti in due fotoni. Questo rapporto cambia negli altri modelli ed esistono altri rapporti che sono in grado di distinguere tra un modello e l'altro.

C'è anche un'altra proprietà che contraddistingue il bosone di Higgs del Modello Standard, lo spin. Le particelle elementari hanno una rotazione intrinseca, come delle trottole, con una velocità² che misurata in opportune unità assume, per i bosoni, valori interi (0, 1, 2 ...). L'Higgs del Modello Standard ha spin nullo, mentre il gravitone, ad esempio, ha spin 2. Le particelle provenienti dal decadimento di una particella con spin risentono di questa rotazione intrinseca e si distribuiscono di conseguenza. Nel caso invece del decadimento di una particella a spin nullo le particelle prodotte non hanno nessuna direzione privilegiata verso cui orientarsi e si distribuiscono in maniera isotropa nello spazio. Misurando come si distribuiscono angolarmente i prodotti del decadimento si determina lo spin della particella da cui provengono. Riassumendo, rapporti di decadimento e distribuzioni angolari sono gli strumenti a disposizione dei fisici sperimentali per distinguere tra i diversi modelli teorici, ma per misurarli occorre molto di più di una manciata di eventi.

Bisogna attendere la fine del 2012 quando i dati raccolti sono più che raddoppiati. Il segnale del bosone di Higgs è ormai evidente anche nel segnale a quattro leptoni (figura 5).

Illustration 5: Distribuzione della massa misurata nel canale in quattro leptoni con tutti i dati raccolti fino alla fine del 2012. I punti neri indicano il numero di eventi osservati per ogni valore di massa. Il segnale dovuto al bosone di Higgs adesso è un chiaro picco intorno a 125 GeV. L'istogramma rosso mostra la distribuzione attesa per l'Higgs, mentre gli istogrammi azzurro e viola mostrano quella per i processi di fondo.

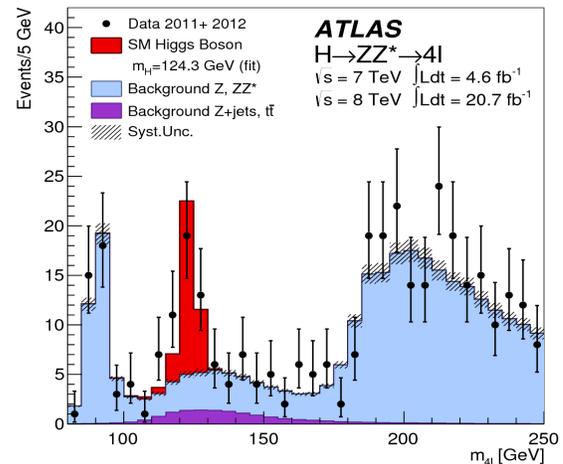
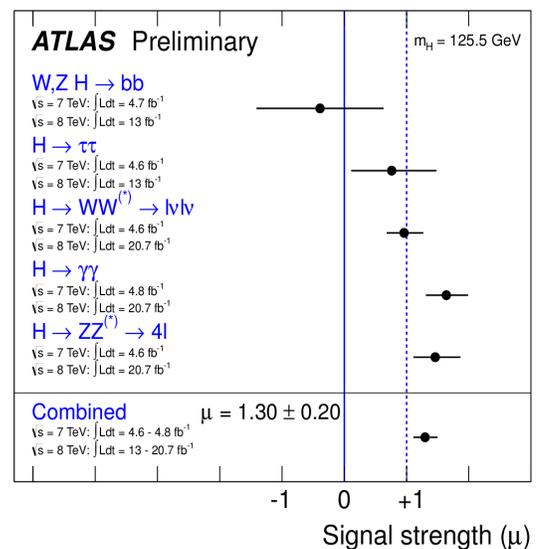


Illustration 6: Rapporto tra il numero di eventi osservato e quello atteso secondo le previsioni del Modello Standard (signal strength) per i vari canali di decadimento del bosone di Higgs.

A Marzo 2013 ad una conferenza a Moriond ATLAS presenta gli ultimi risultati sull'Higgs. Uno di questi è mostrato in figura 6 dove è mostrato il rapporto tra il numero di eventi osservato e quello atteso nel Modello Standard per vari canali di decadimento. Questo rapporto è chiamato signal strength. Deve valere uno entro gli errori se i dati sono in accordo con il Modello Standard. Nella figura i punti neri rappresentano i valori centrali della misura e la linea orizzontale l'errore associato. La riga verticale blu tratteggiata rappresenta il valore atteso nel Modello Standard (+1). Il punto più in basso rappresenta il risultato combinato. Il valore



2 In realtà si tratta del momento angolare.

osservato è 1.3 con un errore di 0.2. Leggermente superiore a +1 ma sostanzialmente in accordo, e comunque abbastanza da cominciare a scartare ipotesi come quella del gravitone, dell'Higgs composto o delle techno-particelle.

Anche l'analisi delle distribuzioni angolari porta ad escludere valori di spin diversi da zero. Insieme allo spin viene verificata un'altra proprietà detta parità che può assumere solo i valori +1 e -1. Nel caso del bosone di Higgs del Modello Standard questa deve essere positiva. In figura 7 sono riportati i risultati ottenuti per diverse ipotesi di spin e parità. Qui viene utilizzata la variabile di test statistico CL_S . Valori di questa variabile molto minori di uno indicano che l'ipotesi fatta è da scartare. I punti neri indicano il valore osservato mentre i triangoli blu indicano il valore atteso nel Modello Standard. La banda verde rappresenta l'errore di misura. Il valore osservato del CL_S è sempre molto piccolo per tutte le ipotesi fatte diverse da quella 0^+ . Si osserva invece un valore che entro gli errori è sempre in accordo con il Modello Standard. La particella osservata deve avere spin e parità 0^+ proprio come l'Higgs ordinario.

I risultati di ATLAS e CMS sono in accordo anche questa volta. A quanto pare non ci sono più dubbi sulla natura della particella osservata. Ma gli errori statistici sono ancora grandi e con i dati a venire nei prossimi anni si potranno fare test sempre più precisi e sofisticati. Sotto sotto, la speranza dei fisici è sempre quella di osservare una deviazione delle misure dalla teoria che apra una finestra su nuovi scenari e verso nuove scoperte.

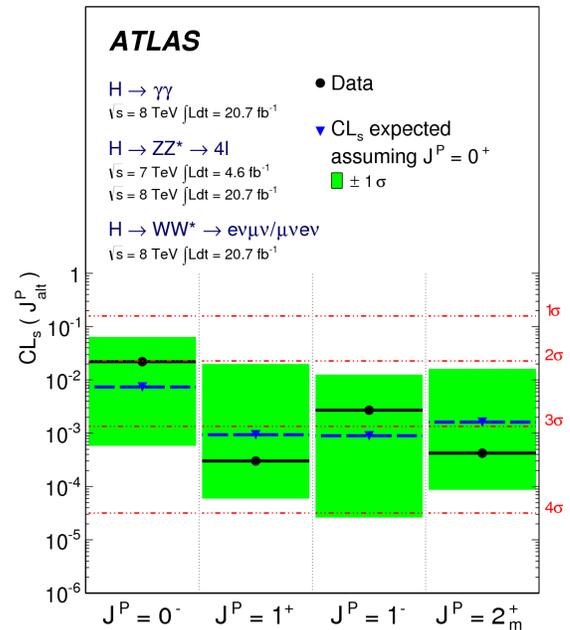


Illustration 7: In questa figura viene mostrata la variabile di test statistico CL_S per diverse ipotesi di spin e parità. Un valore del CL_S molto minore di uno indica che l'ipotesi è da scartare. Il risultato sperimentale per ogni ipotesi è indicato dal punto nero mentre il triangolo blu indica il valore atteso nel Modello Standard. La banda verde rappresenta l'errore associato.

Bibliografia

- The ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at LHC", Physics Letters B Volume 716, Issues 1, 17 September 2012, Pages 1-29.
- The ATLAS Collaboration, "A Particle Consistent with the Higgs Boson Observed with the ATLAS Detector at the large Hadron Collider", Science 21 December 2012, Volume 338 Number 6114, Pages 1576-1582.
- The ATLAS Collaboration, "Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data", Physics Letters B Volume 726, Issues 1-3, 7 October 2013, Pages 120-144.
- The ATLAS Collaboration, "Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at LHC", Physics Letters B Volume 726, Issues 1-3, 7 October 2013, Pages 88-119.