

Vitaliano Ciulli

Prospettive per il Run 2 ad LHC

Prospects for Run 2 at the LHC

Università di Firenze e INFN

Il Colle di
Galileo

Sommario. All'avvicinarsi della ripresa delle attività del Large Hadron Collider al CERN, prevista per la primavera del 2015, i fisici delle collaborazioni ATLAS e CMS si interrogano sulle prospettive che si aprono grazie all'aumento di energia nel centro di massa da 8 a 13 TeV, dopo la scoperta del bosone di Higgs. Comunque vada i risultati del Run 2 marcheranno un nuovo importante capitolo nella fisica delle interazioni fondamentali, permettendo di esplorare la regione fino a circa 1 TeV di massa, alla ricerca di nuove particelle che possano spiegare la materia oscura e gli altri quesiti irrisolti del Modello Standard.

Parole chiave. LHC, CMS, ATLAS, Higgs, supersimmetria, materia oscura

Quando il 17 Dicembre 2012 il Large Hadron Collider (LHC) ha chiuso i primi tre anni di presa dati, i risultati ottenuti avevano decisamente superato le aspettative. Nell'estate era stata annunciata dalle collaborazioni ATLAS e CMS la scoperta di una nuova particella con caratteristiche compatibili con il bosone di Higgs (H) e una massa di circa 125 GeV. Un anno dopo, a fine 2013, l'importanza della scoperta è stata sancita dal Nobel per la Fisica conferito ai fisici teorici Peter Higgs e François Englert. Questi avevano previsto l'esistenza di un bosone come conseguenza del meccanismo di rottura spontanea della simmetria di Brout-Englert-

Abstract. With the approach of resumption of the activity of the Large Hadron Collider at the CERN, scheduled for the spring of 2015, the physicists of the ATLAS and CMS experiments are pondering the prospects that will be opened up by the increase of centre-of-mass energy from 8 to 13 TeV, after the discovery of the Higgs boson. However the results from Run 2 go, they will mark an important new chapter in the physics of fundamental interactions, making it possible to explore the region up to around 1 TeV of mass in the search for new particles that can explain dark matter and the other unresolved questions of the Standard Model.

Keywords. LHC, CMS, ATLAS, Higgs, supersymmetry, dark matter

When, on 17 December 2012, the Large Hadron Collider (LHC) completed its first three years of data taking the results obtained were decidedly superior to expectations. In the summer the ATLAS and CMS collaborations had announced the discovery of a new particle with charac-

Higgs, che permette di dare una massa alle particelle subatomiche nel Modello Standard delle interazioni fondamentali.

Eppure gli auspici erano stati tutt'altro che favorevoli. L'inizio delle operazioni di LHC era stato caratterizzato nel Settembre 2008 da un incidente ad una interconnessione tra i magneti superconduttori, che aveva messo in serio dubbio tutto il progetto. Il problema riscontrato era subito apparso molto grave e sistemare le interconnessioni tra tutti i 1200 magneti avrebbe richiesto molto tempo. Si decise allora di proseguire con il programma diminuendo l'energia nel centro di massa delle collisioni protone-protone: dai 14 TeV di progetto, a 7 TeV. A questa energia l'acceleratore ha funzionato nel 2010 e nel 2011, quindi, incoraggiati dagli ottimi risultati ottenuti e dai primi indizi dell'esistenza della nuova particella, nel 2012 si è deciso di aumentare l'energia a 8 TeV. Fatta eccezione per la minore energia, l'acceleratore ha funzionato in modo eccellente, raggiungendo nell'ultimo periodo una luminosità istantanea, ovvero un numero di interazioni al secondo per unità di sezione d'urto, pari a $7.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, molto vicina a $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ che era la massima luminosità prevista. La quantità che però è più rilevante per i fisici che hanno analizzato i dati è la luminosità integrata. Questa è misurata in *femto-barn* inversi ($1 \text{ fb}^{-1} = 10^{39} \text{ cm}^{-2}$) e nel corso dei tre anni di presa dati l'acceleratore ha fornito ad entrambe gli esperimenti 25 fb^{-1} . Considerando che la sezione d'urto di produzione di un bosone H è 20 pb, si ricava che sono stati prodotti in ciascun esperimento 500'000 H. Solo una piccolissima frazione di questi decade in uno dei canali che possono essere distinti dal fondo enorme, ma questo è stato sufficiente per scoprire la nuova particella.

teristics compatible with the Higgs boson (H) and a mass of around 125 GeV. A year later, at the end of 2013, the importance of the discovery was endorsed by the Nobel Prize in Physics awarded to the theoretical physicists Peter Higgs and François Englert. They had predicted the existence of a boson as the consequence of the Brout-Englert-Higgs mechanism of spontaneous symmetry breaking, which makes it possible to give a mass to the subatomic particles in the Standard Model of fundamental interactions.

And yet the auspices had been far from favourable. The start of operation of the LHC had been marked in September 2008 by an accident involving the interconnection between the superconducting magnets which had seriously jeopardised the entire project. The problem detected appeared immediately to be very serious, and fixing the interconnections between all 1,200 magnets would have taken a great deal of time. Consequently it was decided to proceed with the programme, diminishing the centre-of-mass energy of the proton-proton collisions from the design energy of 14 TeV to 7 TeV. The accelerator operated at this energy in 2010 and in 2011; then – encouraged by the excellent results obtained and by the first clues of the existence of the new particle – in 2012 it was decided to increase the energy to 8 TeV. Leaving aside the lower energy level, the accelerator functioned excellently, achieving in the final phase an instantaneous luminosity, that is, a number of interactions per second per unit of reaction cross section, amounting to $7.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, very close to the $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ which was the expected maximum luminosity. The quantity that is, however, most relevant for the physicists who analysed the data is the

Dopo l'annuncio della scoperta e la fine della presa dati, l'attività di analisi non si è interrotta. I membri delle collaborazioni ATLAS e CMS hanno lavorato per migliorare la precisione delle misure e poter così determinare se le sue proprietà sono effettivamente quelle previste nel Modello Standard. I risultati finali di questo lavoro sono stati presentati soltanto l'estate scorsa e in qualche caso sono ancora preliminari. Finora non si sono trovate deviazioni significative da quanto atteso dalla teoria. La natura scalare della particella sembra confermata con un livello di confidenza superiore al 99%. Anche il numero di eventi osservato nei vari decadimenti è compatibile con quanto aspettato. Tuttavia se la scala di nuova fisica è sufficientemente elevata, gli effetti sugli accoppiamenti del bosone H possono essere molto piccoli e dunque non rilevabili con la precisione attualmente raggiunta.

Intanto, mentre nelle collaborazioni si continuava ad analizzare i dati, nel tunnel di LHC si lavorava alacremente per rimediare al problema delle interconnessioni difettose (Figura 1). Gli stessi esperimenti hanno fatto in questo periodo le manutenzioni necessarie per garantire il miglior funzionamento possibile alla ripresa delle operazioni. Ad esempio, in CMS si è posta molta cura nel risigillare la parte più interna dell'esperimento, il tracciatore al silicio. Questo enorme strumento, alla costruzione del quale hanno contribuito i ricercatori del Dipartimento di Fisica dell'Università di Firenze e della sezione locale dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, è costituito da 200 m² di rivelatori al silicio capaci di misurare con una precisione di ~10 μm il passaggio di una particella. Per evitare che le sue prestazioni si degradino a causa degli enormi livelli di radiazione ai quali

integrated luminosity. This is measured in inverse femtobarns ($1\text{fb}^{-1} = 10^{39} \text{cm}^{-2}$) and in the course of the three years' data taking the accelerator provided 25 fb^{-1} to both the experiments. Considering that the production cross section for a H boson is 20 pb, it follows that 500,000 H were produced in each experiment. Only a tiny fraction of these decay in one of the channels that can be distinguished from the enormous background, but it was sufficient to discover the new particle.

The analysis activity continued after the announcement of the discovery and the end of the data collection. The members of the ATLAS and CMS collaborations worked to improve the precision of the measurements, in order to establish whether the properties are effectively those envisaged in Standard Model. The final results of this work were presented only last summer, and in some cases they are still preliminary. To date no significant deviations from what was to be expected from the theory have been found. The scalar nature of the particle appears to be confirmed with a level of confidence of over 99%. The number of events observed in the various decays is also compatible with what was expected. Nevertheless, if the scale of new physics is sufficiently high, the effects on the coupling of the H boson can be very small and therefore not detectable with the precision currently achieved.

In the interim, as the collaborations continued to analyse the data, in the tunnel of the LHC work was being speedily carried out to repair the problem of the faulty interconnections (Figure 1). In this period the same experiments carried out the maintenance necessary to guarantee the best possible functioning when operations are resumed. For example, in CMS great care

sarà esposto in futuro è però necessario raffreddarlo a -10°C e a questa temperatura la minima presenza di umidità può provocare la formazione di ghiaccio con danni irreparabili.

Come previsto dal programma dei lavori, LHC riprenderà a funzionare nella primavera del 2015, con due importanti novità. La prima è l'incremento dell'energia nel centro di massa a 13 TeV, in conseguenza del quale la sezione d'urto di produzione per una particella dell'ordine di 100 GeV (come W, Z e H) raddoppia; ma ben più importante è l'effetto per ipotetiche particelle con una massa di 2 TeV, per le quali la sezione d'urto di produzione cresce addirittura di un fattore 10. Oltre all'energia, anche la luminosità aumenterà di circa un fattore due, raggiungendo $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nel 2019, dopo uno stop di un anno circa per il secondo *long shutdown* (LS2). Alla fine del Run 2, nel 2017, si prevede che avremo raccolto 100 fb^{-1} che poi diventeranno 300 fb^{-1} nel 2021 alla fine del Run 3. Dopo l'acceleratore subirà nuovamente dei lavori importanti, questa volta per aumentare significativamente la luminosità. Infatti la fase successiva è nota come *High Luminosity LHC* (HL-LHC). La speranza è di poter raccogliere in un futuro non troppo remoto (intorno al 2030-35) un

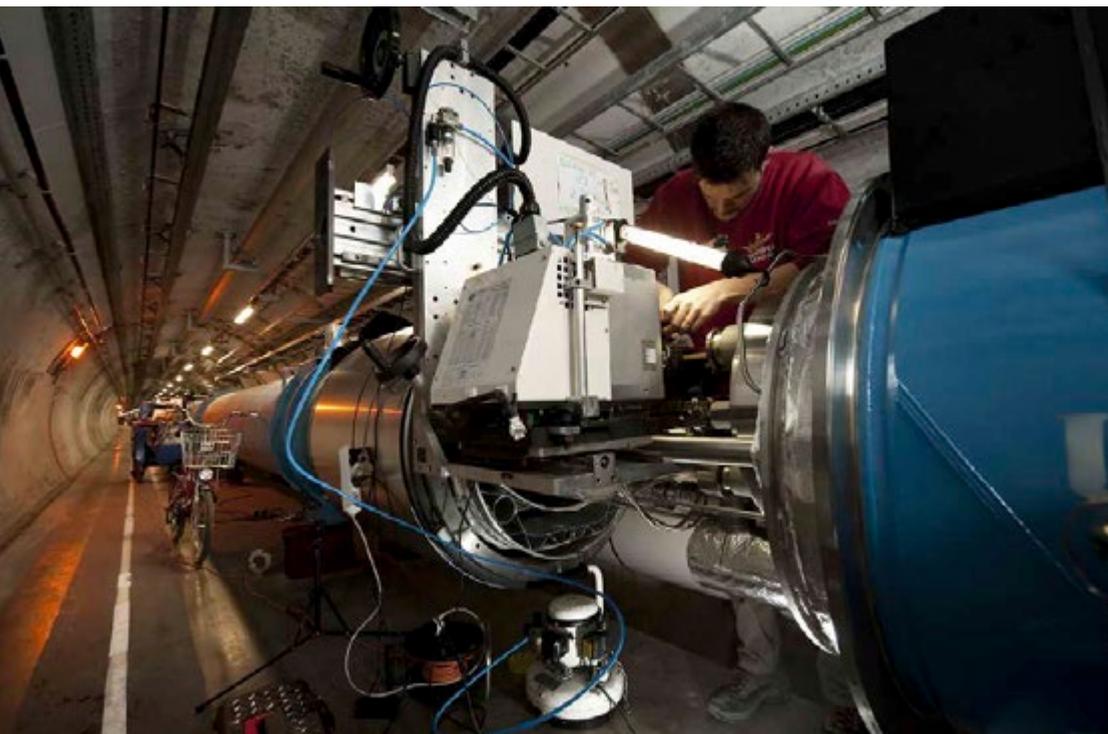


Figura 1. Saldatura dell'interconnessione tra due magneti di LHC (Maximilien Brice, @CERN).

Figure 1. Welding of the interconnection between two magnets of the LHC (Maximilien Brice, @CERN)

fattore 10 in luminosità integrata, ovvero 3000 fb^{-1} , e anche i rivelatori avranno bisogno di modifiche importanti per sostenere l'intensità necessaria a raggiungere questo obiettivo.

Tuttavia già nel Run 2 gli esperimenti avranno di fronte delle sfide estremamente importanti. Prima fra tutte il problema del *pile-up*, ovvero della sovrapposizione di più collisioni di protoni in ogni singolo "evento" registrato dal rivelatore. Ci si aspetta che il pile-up medio raggiunga valori intorno a 50, anche tenendo conto che la frequenza di collisione tra i fasci sarà raddoppiata, passando da 20 a 40 MHz. Come conseguenza, il tempo impiegato dagli algoritmi che ricostruiscono le tracce lasciate da migliaia di particelle potrebbe esplodere se non si mettono in atto le necessarie contromisure. Inoltre distinguere le particelle generate nella collisione interessante da tutte le altre diventerà estremamente difficile e richiederà la messa a punto di nuove tecniche, sempre più elaborate, in una rinnovata sfida tra le collaborazioni ATLAS e CMS.

D'altra parte la posta in gioco è molto alta. La scoperta del bosone di Higgs ha modificato lo scenario sia per le misure di precisione che per la ricerca diretta di nuova fisica. La fisica di precisione si concentra adesso sulla misura delle proprietà di questa nuova particella e dei suoi accoppiamenti con le altre particelle del Modello Standard. Come dicevamo pocanzi una piccola deviazione dalle previsioni ci può dare indicazioni sulla scala alla quale dovrebbero manifestarsi nuovi fenomeni. Allo stesso tempo lo spazio dei parametri per la ricerca diretta di nuova fisica si è decisamente ristretto. Ma analizziamo più in dettaglio la situazione in entrambi gli ambiti di ricerca.

was taken to reseal the internal part of the detector, the silicon tracker. This enormous instrument, which was constructed with the contributions of the researchers from the Department of Physics of the University of Florence and the local section of the National Institute of Nuclear Physics, is made up of 200 m^2 of silicon detectors capable of measuring the passage of a particle with a precision of $\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$. However, to prevent its performance deteriorating as a result of the enormous levels of radiation to which it will be exposed in future, it has to be cooled to -10°C , and at this temperature even the minimal presence of humidity can cause the formation of ice and consequent irreparable damage.

As scheduled in the works programme, the LHC will start operation again in the spring of 2015, with two important novelties. The first is the increase of the centre-of-mass energy to 13 TeV, as a result of which the production cross section for a particle of the order of 100 GeV (such as W, Z and H) is doubled. However, the effect for hypothetical particles with a mass of 2 TeV is much more significant, since for these the production cross section increases by no less than a factor of 10. As well as the energy, the luminosity will also increase by around a factor of 2, reaching $2 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ in 2019, after a stop of about a year for the second long shutdown (LS2). At the end of Run 2 in 2017, it is predicted that 100 fb^{-1} of collision data will have been collected, arriving at 300 fb^{-1} in 2021 at the end of Run 3. After this the accelerator will again be subject to important works, this time to significantly increase the luminosity. The next phase is in fact known as High Luminosity LHC (HL-LHC). The hope is that in the not-too-distant future (around 2030-35) it will be possible to reach a factor 10 of integrated luminos-

Per quanto riguarda la fisica di precisione sono parecchie le misure che potranno essere migliorate significativamente. La massa dell'Higgs sarà determinata con una precisione migliore di 100 MeV, invece degli attuali 300 MeV, e combinata alle misure sempre più precise della massa del W e del top, permetterà una verifica molto stringente della teoria. Gli accoppiamenti con i fermioni e con i bosoni vettori potranno essere misurati con precisione migliore del 10% (limitata dall'incertezza teorica sulla sezione d'urto). Questi accoppiamenti sono particolarmente sensibili a fenomeni di nuova fisica, specialmente quando sono generati da *loop quantistici*, come nel caso della produzione tramite gluon-gluon fusion oppure nel decadimento in due fotoni. Un altro parametro importante è la larghezza invisibile dell'Higgs, che in parecchi modelli è legata direttamente alla materia oscura (Figura 2): con 300 fb^{-1} dovrebbe essere possibile mettere un limite intorno al 25% della larghezza totale. Per la misura del potenziale di Higgs dall'autoaccoppiamento, invece si dovrà quasi sicuramente attendere HL-LHC, a meno di clamorose sorprese: alcuni modelli supersimmetrici prevedono infatti una produzione molto più abbondante di coppie di bosoni di Higgs.

Proprio le teorie supersimmetriche continueranno ad essere il campo principale delle ricerche dirette di nuova fisica. Dopo la scoperta del bosone di Higgs, il problema delle enormi correzioni quantistiche alla massa, è più pressante che mai. Una soluzione naturale è la cancellazione di queste correzioni grazie all'esistenza delle particelle supersimmetriche, che hanno gli stessi numeri quantici delle particelle del Modello Standard, ad eccezione dello spin. Tuttavia la *naturalità* di questa soluzione viene meno se la terza generazione di *squark*, lo *stop*

ity, in other words $3,000 \text{ fb}^{-1}$; the detectors too will require significant modifications to sustain the intensity necessary to reach this objective.

However, even in Run 2 the experiments will already be addressing important challenges. Foremost among these is the problem of pile-up, that is, additional proton-proton collisions occurring in each individual "event" recorded by the detector. It is expected that the average pile-up will reach values of around 50, even considering that the frequency of collision between the beams will be doubled, increasing from 20 to 40 MHz. In consequence, the time employed by the algorithms that reconstruct the tracks of the thousands of particles could explode, unless the necessary countermeasures are implemented. Moreover, distinguishing the particles generated in the collision of interest from all the others will become extremely difficult and will call for the definition of new and increasingly elaborate techniques in a new challenge between the ATLAS and CMS experiments.

On the other hand the stakes are very high. The discovery of the Higgs boson has altered the entire scenario, in terms both of precision measurements and the direct search for new physics. Precision physics will now concentrate on the measurement of the properties of this new particle and its couplings with the other particles of the Standard Model. As we mentioned above, a small deviation from the forecasts can provide indications about the scale on which new phenomena ought to appear. At the same time, the space of the parameters for the direct search for new physics has been decisively narrowed. Let us now analyse the situation in both fields of research in greater detail.

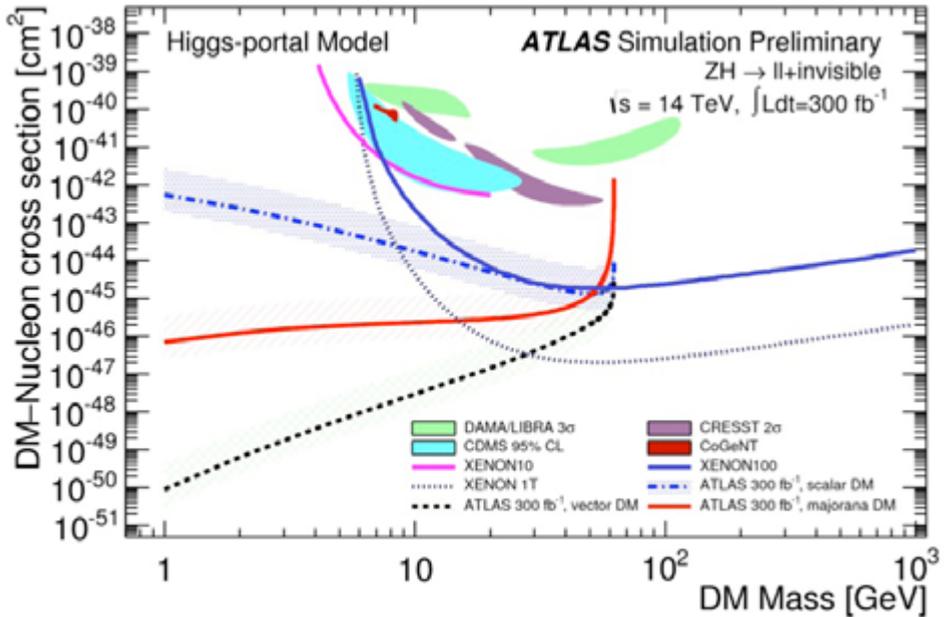


Figura 2. Limite superiore alla sezione d'urto tra materia oscura e nucleone dagli esperimenti di ricerca diretta e dal limite aspettato dalla larghezza invisibile del bosone di Higgs con l'esperimento ATLAS [1]. Tre diversi scenari sono mostrati per lo spin della materia oscura: scalare, vettore o fermione di majorana. Le aree tratteggiate corrispondono all'incertezza sul fattore di forma del nucleone.

Figure 2. Upper limits of the dark matter-nucleon cross section from the direct search experiments and from the limit expected from the invisible width of the Higgs boson with the ATLAS experiment [1]. Three different scenarios are shown for the spin of the dark matter: scalar, vector or Majorana fermion. The hatched areas correspond to the uncertainty regarding the nucleon form factor.

As regards precision physics, there are many measurements that could be significantly improved. The mass of the Higgs will be determined with a precision of more than 100 MeV, as opposed to the current 300 MeV and, combined with increasingly more precise measurements of the W boson and the top quark, will enable a very stringent verification of the theory. It will be possible to measure the couplings with the fermions and with the vector bosons with a precision enhanced by 10% (restricted by the theoretical uncertainty of the cross section). These couplings are particularly sensitive to the phenomena of new physics, especially when they are generated by quantum loops, as in the case of production via gluon-gluon fusion or in the decay into two photons. Another important parameter is the invisible width of the Higgs, which in many models is directly linked to dark matter (Figure 2): with 300 fb⁻¹ it ought to be possible to set a limit of about 25% of the total width. Instead for the measuring of the Higgs' self-coupling potential, barring sensational surprises, we will almost certainly have to wait for the HL-LHC: in fact, some supersymmetrical models predict a much more abundant production of pairs of Higgs bosons.

It is precisely the supersymmetry theories that continue to be the primary field of the direct searches for new physics. Following the discovery of the Higgs boson, the problem of enormous quantum corrections to the mass is more pressing than ever. A natural solution is the cancellation of these corrections resulting from the existence of supersymmetric particles, which have the same quantum numbers as the particles of the Standard Model, excepting spin. However this solution then loses its natural character if the third generation of squarks, the stop and the

e lo *sbottom*, sono troppo pesanti. L'estrapolazione delle analisi fatte a 8 TeV mostra che anche nelle ipotesi più pessimiste sulla stima dei fondi dovremmo essere in grado di osservare uno *stop* fino a valori della massa di 700 GeV (Figura 3). Dunque si può immaginare che con il Run 2 le teorie supersimmetriche arriveranno ad un bivio. Certo non saranno completamente abbandonate nell'ipotesi che non si osservino particelle supersimmetriche, ma una delle loro principali attrattive, la *naturalness*, verrà meno.

L'altra principale motivazione della supersimmetria è la spiegazione che fornisce per la materia oscura, che sarebbe dovuta alla particella supersimmetrica neutra più leggera. Indipendentemente dall'esatta natura della materia oscura, c'è un ampio consenso che il candidato debba essere una *weakly interacting massive particle* (WIMP). Ad LHC è possibile rivelare coppie di WIMPs anche se la particella che media l'interazione con quark e gluoni del protone incidente non è nota (in questo caso l'interazione viene descritta tramite una teoria effettiva caratterizzata dalla massa M^* del mediatore). Infatti anche se le WIMPs sono invisibili al rivelatore, è possibile identificarle come *energia mancante* nell'evento, grazie alla presenza di un jet, un fotone o un'altra particella del Modello Standard che rincula nella direzione opposta. Estrapolando i risultati ottenuti con una energia di 8 TeV nel centro di massa, è ragionevole supporre che a 13 TeV sarà possibile rivelare la materia oscura fino a valori della massa di circa 1 TeV.

Concludendo, dopo la scoperta del bosone di Higgs, la ripresa delle operazioni di LHC nel 2015 apre un nuovo interessante capitolo nel quale ci aspettiamo di avere risposte quasi definitive riguardo all'esistenza di nuove particelle fino

sbottom, are too heavy. Extrapolation of the analysis made at 8 TeV demonstrates that, even in the most pessimistic analyses about the estimate of the backgrounds, we ought to be able to observe a stop up to mass values of 700 GeV (Figure 3). Therefore it is reasonable to suppose that Run 2 will bring the supersymmetry theories to a crossroads. Certainly, they will not be completely abandoned in the event that supersymmetric particles are not observed, but one of their principal attractions – their *naturalness* – will be lost.

The other principal motivation for supersymmetry is the explanation that it provides for dark matter, namely that this is due to the lighter neutral supersymmetric particle. Irrespective of the precise nature of dark matter, there is broad consensus about the fact that the candidate has to be a weakly interacting massive particle (WIMP). At the LHC it is possible to detect pairs of WIMPs even though the particle that mediates the interaction with the quarks and gluons of the incident proton is not known (in this case the interaction is described through an effective theory characterised by the mass M^* of the mediator). Indeed, even though the WIMPs are invisible to the detector, it is possible to identify them as *missing energy* in the event, through the presence of a jet, a photon or another particle of the Standard Model that recoils in the opposite direction. Extrapolating the results obtained with an energy of 8 TeV in the centre-of-mass, it is reasonable to assume that at 13 TeV it will be possible to detect the dark matter up to mass values of around 1 TeV.

In conclusion, following the discovery of the Higgs boson, the resumption of operation of the LHC in 2015 will launch a fascinating new chapter in which we expect to obtain almost

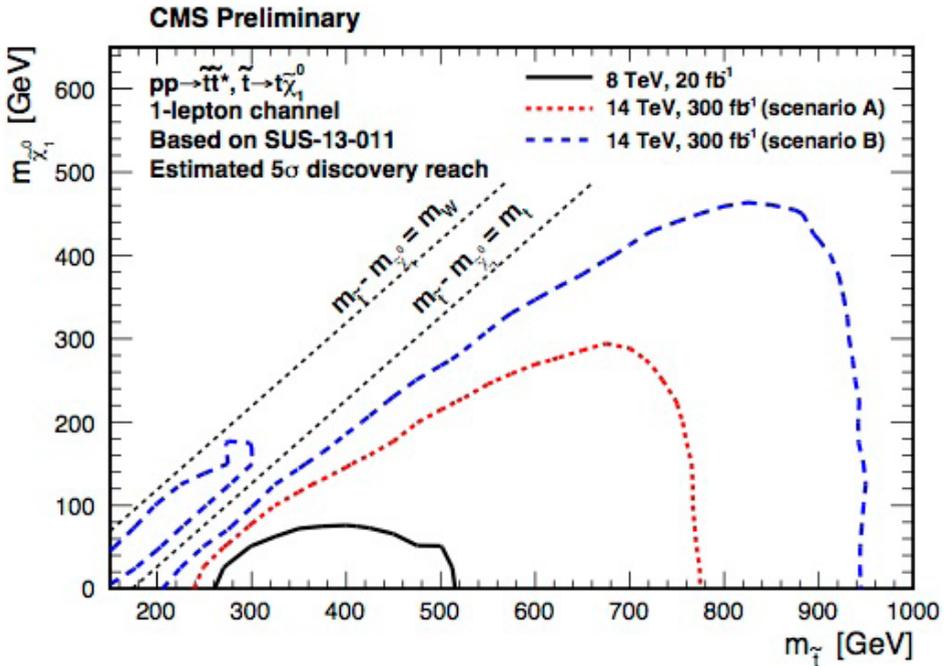


Figura 3. Proiezione per la scoperta a 5σ dello stop, nel caso di produzione diretta seguita dal decadimento in top e neutralino, con l'esperimento CMS [2]. Nello scenario A segnale, fondo e incertezza sul fondo scalano con la statistica. Nello scenario B, meno conservativo, l'incertezza relativa sul fondo si riduce.

Figure 3. Projection for the 5σ stop discovery, in the case of direct production followed by decay into a top and a neutralino, with the CMS experiment [2]. In scenario A signal, background and uncertainty on the background scale with statistics. In the less conservative scenario B, the uncertainty relating to the background is reduced.

definitive answers regarding the existence of new particles up to the energy scale of TeV. With or without supersymmetry, this region of energy is crucial in order to respond to the fundamental question about the *naturalness* of the theory, given that in the absence of new physics at the TeV scale, the correction to the mass of the Higgs boson ought to be cancelled with an accuracy of $\epsilon \approx (125\text{GeV}/1\text{TeV})^2 \approx 1\%$. The physicists of the experiments at the LHC have been preparing for this exciting new challenge for some time, in the awareness that the road ahead is still long and strewn with obstacles.

References

- [1] ATLAS Collaboration, *Projections for measurements of Higgs boson cross sections, branching ratios and coupling parameters with the ATLAS detector at a HL-LHC*, ATL-PHYS-PUB-2013-014, <http://cds.cern.ch/record/1611186>
- [2] CMS Collaboration, *Projected Performance of an Upgraded CMS Detector at the LHC and HL-LHC: Contribution to the Snowmass Process*, CMS-NOTE-13-002, arXiv:1307.7135 [hep-ex], <http://arxiv.org/abs/1307.7135>

Vitaliano Ciulli. After graduating from the Scuola Normale at Pisa, he went on to take his PhD at the University of Pisa. Following a period spent at the CERN, he then became a researcher

alla scala di energia del TeV. Con o senza la supersimmetria questa regione di energia è cruciale per rispondere alla domanda fondamentale sulla *naturalità* della teoria, dato che in assenza di nuova fisica alla scala del TeV, le correzioni alla massa del bosone di Higgs dovrebbero cancellarsi con un'accuratezza $\epsilon \approx (125\text{GeV}/1\text{TeV})^2 \approx 1\%$. I fisici dell'acceleratore e degli esperimenti ad LHC si preparano già da tempo a questa nuova sfida entusiasmante, con la consapevolezza che la strada da percorrere è ancora lunga e piena di difficoltà.

Bibliografia

- [1] ATLAS Collaboration, *Projections for measurements of Higgs boson cross sections, branching ratios and coupling parameters with the ATLAS detector at a HL-LHC*, ATL-PHYS-PUB-2013-014, <http://cds.cern.ch/record/1611186>
- [2] CMS Collaboration, *Projected Performance of an Upgraded CMS Detector at the LHC and HL-LHC: Contribution to the Snowmass Process*, CMS-NOTE-13-002, arXiv:1307.7135 [hep-ex], <http://arxiv.org/abs/1307.7135>

Vitaliano Ciulli. Laureato alla Scuola Normale di Pisa, ha conseguito il PhD all'Università di Pisa e dopo un periodo trascorso al CERN è diventato Ricercatore all'Università di Firenze. Ha svolto la sua attività di ricerca prima al collisore LEP nell'esperimento ALEPH e in seguito al collisore LHC nell'esperimento CMS. Si è occupato di misure di fisica elettrodebole ed ha partecipato al disegno e alla costruzione del tracciatore al silicio di CMS.

at the University of Florence. He performed his research activity first at the LEP collider as part of the ALEPH experiment and later at the LHC collider as part of the CMS experiment. He has dealt with electroweak physics measurements and taken part in the design and construction of the silicon tracker of CMS.