

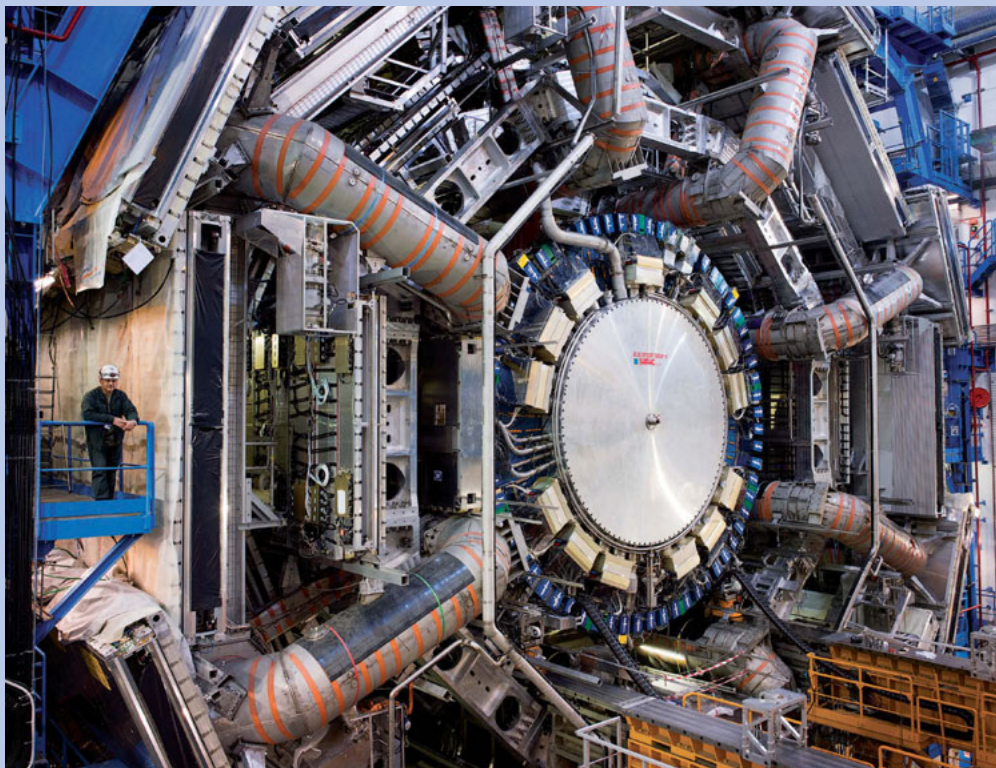
Lo zoo oscuro

Candidati per la massa mancante dell'universo

di Nicolao Fornengo

C'è un enigma che ci accompagna da lungo tempo, e nonostante facciamo di tutto per trovare una soluzione, questa continua a sfuggirci: è il problema della materia oscura. Sappiamo che circa un quarto del contenuto dell'universo è costituito da materia oscura, sappiamo come essa si distribuisce a formare galassie e ammassi di galassie e sappiamo anche che non si tratta di materia ordinaria (quella di cui anche noi siamo fatti): però non ne conosciamo la composizione. È un tema molto affascinante, la cui soluzione potrà condurci a una comprensione più profonda dell'universo.

Il modo considerato più naturale per spiegare la materia oscura consiste nell'ipotizzare la presenza di una nuova particella massiva dotata di interazioni deboli, simili a quelle del neutrino, la Wimp. Particelle con queste caratteristiche venivano prodotte facilmente nel plasma che componeva l'universo primordiale: con il raffreddarsi dell'universo a un certo punto si separano dal plasma e, se stabili, arrivano fino a noi. La richiesta di contribuire oggi a circa un quarto della densità di massa-energia totale dell'universo porta le Wimp ad avere un intervallo di massa compreso tra circa 1 GeV (la massa del protone) e qualche decina di TeV (decine di migliaia di volte la massa del protone). Queste sono proprio le scale di energia che Lhc sta ora esplorando al Cern, e una grande attenzione è infatti rivolta ai risultati che arriveranno da queste ricerche: la scoperta di una nuova particella con le caratteristiche delle Wimp rappresenterebbe uno straordinario successo sia per la fisica delle particelle (con la scoperta di fisica oltre il modello



standard) sia per la cosmologia, offrendo forse la chiave per comprendere uno dei misteri meglio custoditi dalla natura. Molti modelli di nuova fisica predicono al loro interno particelle che hanno le caratteristiche delle Wimp: un esempio molto studiato è il "neutralino", presente nei modelli supersimmetrici (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 13, ndr), ma sono state proposte varie alternative come delle repliche pesanti delle particelle del modello standard, che compaiono nei modelli con dimensioni spaziali aggiuntive (le cosiddette "particelle di Kaluza-Klein") oppure particelle simili al bosone di Higgs, che possono essere presenti se

il settore di Higgs del modello standard è più complesso del previsto. Oppure potrebbero esistere delle particelle "specchio" che duplicano quelle del modello standard ma che interagiscono poco con la materia standard (*mirror dark matter*) o, ancora, delle particelle simili al neutrino, ma molto più pesanti, che emergono in estensioni minimali del modello standard (*minimal dark matter* e sue varianti).

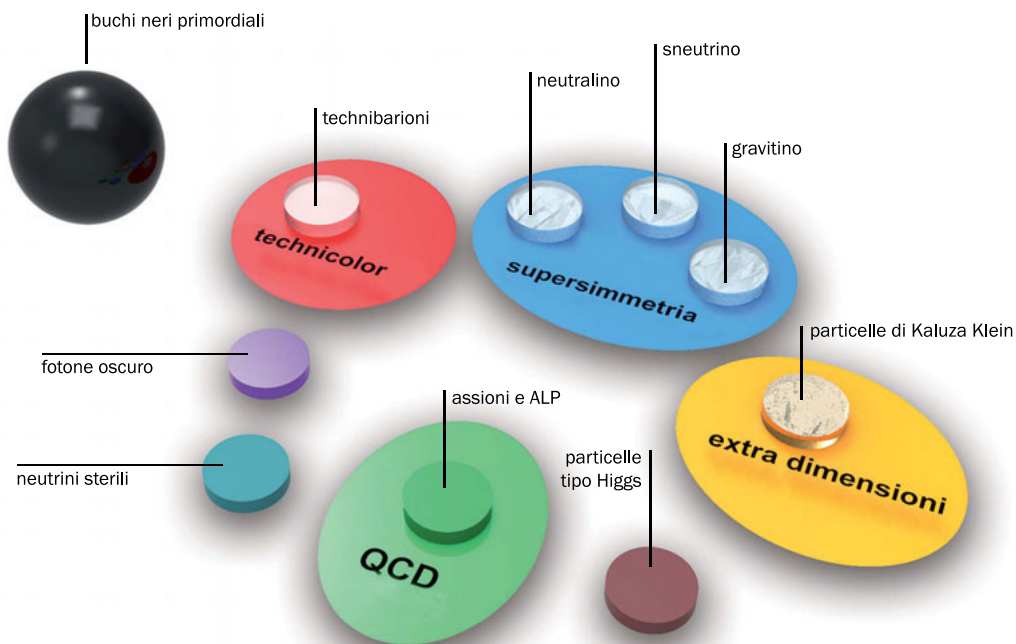
Tutte le evidenze osservative sull'esistenza della materia oscura sono di natura gravitazionale e non ci danno alcuna indicazione su quale possa essere la massa di questa nuova particella.

a.
Il rivelatore Atlas dell'acceleratore Lhc. Assieme a Cms, Atlas misura le particelle prodotte dalla collisione di protoni ad altissima energia dentro Lhc: tra questi prodotti si cercano informazioni sulle particelle responsabili della materia oscura, come ad esempio il neutralino.

L'unica cosa che ci dicono è che la materia oscura deve interagire molto poco con la materia ordinaria. La teoria della formazione delle strutture cosmologiche (galassie, ammassi di galassie) sembra preferire particelle pesanti, in quanto queste vengono naturalmente rilasciate dall'universo primordiale come particelle "lente" (o "fredde", come si dice in gergo). E la "materia oscura fredda" è proprio quella che sembra essere necessaria per formare la complessità della rete cosmica in cui si trovano le strutture cosmologiche così come le osserviamo. Le Wimp rappresentano il candidato naturale per la materia oscura fredda.

Il comportamento delle particelle nel plasma primordiale può però essere molto più complesso di quanto descritto sopra, e sono possibili alternative molto interessanti. Un caso peculiare è rappresentato dal cosiddetto "assione" (vd. p. 34, ndr) che, sebbene sia molto leggero, in virtù della propria dinamica può agire su scala cosmologica come materia oscura fredda e rappresenta quindi un ottimo candidato. L'assione della teoria originale ha proprietà molto semplici e possiede una forza di interazione con la materia che dipende strettamente dalla sua massa. A seconda del modello, esso può interagire con i fotoni, oppure con gli elettroni o con i quark. L'idea dell'assione può però essere estesa, e ciò conduce alle cosiddette Alp, ovvero *axion-like-particle*: particelle simili all'assione, ma senza un diretto legame massa-interazione. Le Alp sono uno dei candidati di materia oscura più studiati negli ultimi anni, e rappresentano anch'esse una finestra di nuova fisica molto interessante. Una soluzione al problema della materia oscura potrebbe arrivare anche dal settore dei neutrini. Mentre i neutrini del modello standard sono troppo leggeri per poter dare un contributo corretto alla materia oscura, neutrini aggiuntivi

potrebbero avere le giuste proprietà. Non possiamo aggiungere neutrini "normali" (o "attivi") al modello standard, perché le misure di precisione effettuate agli acceleratori ci dicono che questo non è possibile, a meno che il neutrino non sia molto pesante, ma allora ricadrebbe nella categoria delle Wimp, e ricerche dirette di materia oscura nella nostra galassia hanno escluso questa possibilità. Però neutrini "sterili", che praticamente non interagiscono con la materia, potrebbero venir prodotti nel plasma primordiale per effetto dell'oscillazione attivi/sterili, nella giusta abbondanza per spiegare la materia oscura. Si parla di particelle con masse tra l'eV e qualche migliaio di eV. Sempre restando al di fuori del paradigma delle Wimp, ma continuando a salire nella scala di massa, sono state ipotizzate anche particelle pesanti più o meno come le Wimp, ma dotate di interazioni ancora più deboli, così da rendere il meccanismo della loro produzione nell'universo primordiale molto difficile: è il caso delle Fimp (*Febly Interacting Massive Particle*, ovvero particelle massive che interagiscono flebilmente). Mentre le Wimp vengono prodotte in abbondanza e poi con il raffreddamento dell'universo se ne perde una gran quantità per via della loro annichilazione, di Fimp ne vengono prodotte poche, giusto quanto basta per spiegare la materia oscura presente nell'universo. Anche se possono apparire simili alle Wimp, le loro interazioni estremamente deboli collocano le Fimp in una categoria a parte, specialmente per la possibilità di rivelarle sia agli acceleratori sia in contesto astrofisico. Alternative al paradigma Wimp possono essere ricercate anche nel settore delle interazioni forti, come nelle teorie cosiddette di "technicolor", in cui la materia oscura sarebbe composta da particelle più fondamentali, un po' come il protone è composto da quark. Oppure nel settore della interazione elettromagnetica,



b. Alcune delle particelle candidate per la materia oscura e le teorie che le prevedono. Una possibilità alternativa è che la massa mancante dell'universo sia costituita da buchi neri primordiali.



in cui la materia oscura pur essendo dotata di carica elettrica interagirebbe poco con i fotoni, perché “costretta” a farlo solo attraverso un “fotone oscuro” (*dark photon*), simile al fotone ma dotato di massa e debolmente interagente con il fotone normale, così da apparire come se avesse una carica elettrica molto piccola (materia oscura “millicarica”): questo la renderebbe di fatto poco “visibile” e quindi oscura. In tutti questi casi è comunque necessario tenere sotto controllo, con opportuni accorgimenti, le interazioni della materia oscura con la materia ordinaria, per evitare che la sua principale caratteristica (quella di essere “oscura”, ovvero debolmente interagente) non venga persa. Numerose altre alternative sono state proposte, ma un’ipotesi forse sorprendente, rafforzata dopo la recente scoperta delle onde gravitazionali, è

che la materia oscura potrebbe essere formata da oggetti inattesi, come i buchi neri primordiali. I buchi neri prodotti nell’universo molto antico e dotati di una massa tra 10 e 100 volte la massa del Sole potrebbero benissimo spiegare l’intero ammontare di materia oscura dell’universo. Ligo e Virgo, quindi, potrebbero forse aver osservato la materia oscura sotto forma di oggetti che erano stati ipotizzati già da Bernard Carr e Stephen Hawking negli anni ’70, ma a cui non si era prestata troppa attenzione.

La soluzione del mistero della materia oscura rimane comunque sfuggente. Abbiamo però a disposizione molte idee e moltissimi strumenti, sia teorici sia sperimentali, che ci fanno prevedere che nei prossimi anni saremo in grado di dare una risposta a uno dei più affascinanti enigmi della scienza moderna.

c. Recentemente l’Infn ha dato luce verde all’esperimento Padme (Positron Annihilation into Dark Matter Experiment), che andrà alla ricerca del fotone oscuro. L’esperimento entrerà in funzione nei Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf) dell’Infn (nella foto) in una nuova sala sperimentale della struttura di test dell’acceleratore lineare, la Beam Test Facility (Btf).

Biografia

Nicolao Fornengo è docente di relatività generale e di fisica astroparticellare all’Università di Torino. Si occupa dello studio della materia oscura particellare, di fisica del neutrino e del ruolo della fisica delle particelle in cosmologia.