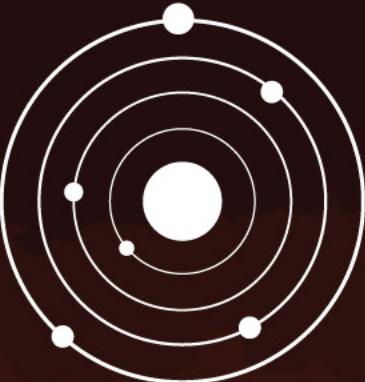


HELIOS



2 giugno 2018

volume 1



Alla scoperta del CERN e
dei suoi esperimenti NA62
e AMS-02

“La corrispondenza
olografica: un ponte tra
stringhe, campi e realtà”.
a pagina 6

Glossario

2 **Helios**

di Samuele Giuli

Alba di un periodico.

3 **CERN | Accelerating Science**

di Matteo Magherini

Il centro di ricerca in fisica delle particelle più grande al mondo e luogo di nascita del World Wide web, in pillole.

6 **La corrispondenza olografica: un ponte tra stringhe, campi e realtà**

di Lorenzo Papini

Teorie di stringa in Anti de-Sitter e teorie di campo conformi unificate nella corrispondenza olografica di Maldacena.

12 **Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02)**

di David Pelosi e Leonardo Salicari

Una straordinaria collaborazione internazionale e il suo immenso contributo per lo studio indiretto della materia oscura.

17 **NA62: Alla ricerca di indizi per scoprire la natura intima delle cose**

di Francesco Brizzioli

Una ricerca di tracce della Nuova Fisica nella falsificazione del Modello Standard, un viaggio tra le più profonde dinamiche che intercorrono nel mondo delle particelle.

23 **Evoluzione del Sistema Solare (Caffè Scientifico)**

di Alberto Paolini e Alessandro Pascolini

Sintesi dell'ultimo incontro del ciclo di eventi “Caffè Scientifico”.

Helios

Il Sole (Helios, Dio dell'astro solare in greco) è protagonista di alcune delle più importanti scoperte scientifiche dell'umanità. Copernico, ma già prima di lui Aristarco ed altri filosofi greci, lo mise al centro dell'universo, pilastro luminoso su cui posava la rivoluzione dei corpi celesti del nostro sistema. Keplero, studiando il moto dei pianeti attorno ad esso, formulò le leggi eponime e Newton formulò con queste la prima vera grande teoria della fisica moderna.

L'eclissi solare del 1919 permise ad Eddington di misurare la prima conferma della relatività generale e ancora oggi il Sole rappresenta una fonte inesauribile di fenomeni di grandissimo interesse e oggetto di studio della ricerca in fisica contemporanea, dallo studio dei neutrini prodotti dalla fusione nel nucleo stellare, ai fenomeni altamente energetici nella corona e sulla superficie stellare. Il Sole è stato quindi protagonista della ricerca in fisica fin dagli albori dell'era scientifica, illuminando il cammino della scoperta.

Lo scopo di questo periodico sarà portare alla luce le frontiere della conoscenza che vengono esplorate da chi, per studio o per ricerca, ha trascorso un periodo della propria carriera accademica presso il Dipartimento di Fisica e Geologia dell'Università degli Studi di Perugia. Helios nasce dalla volontà di alcuni studenti di mettere a contatto questi ricercatori con la realtà studentesca del Dipartimento e con la possibilità di condividere questo progetto con i possibili futuri studenti provenienti dalle scuole superiori della provincia.

Il linguaggio ed i contenuti di Helios, pur non potendo prescindere dall'essere scientificamente completi, renderanno i temi degli articoli accessibili ad un lettore preparato, senza la necessità di particolari conoscenze pregresse. All'interno della rivista troverete articoli di difficoltà diversa ma tutti mossi dai sentimenti che ci uniscono, la curiosità e l'amore per la scoperta.

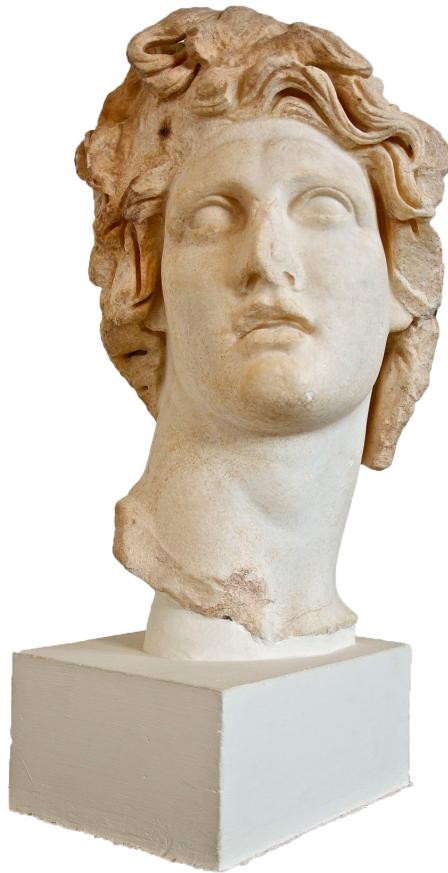


fig. 1: Testa di Helios, Museo archeologico di Rodi



Samuele Giuli, studente del secondo anno di fisica. Fallita la conquista del mondo nel 2015 si iscrive a fisica l'anno successivo. Adora leggere, suonare e correre ma non tutti contemporaneamente.

CERN

Accelerating Science

di Matteo Magherini

Probabilmente anche il vostro gatto sa dell'esistenza del CERN, quindi non vi ripeterò le solite cose sul Conseil européen pour la recherche nucléaire, probabilmente il vostro gatto, però, non sa a cosa diamine lavorino le sedicimila persone abbondanti impiegate lì, insieme a tutti gli altri associati in giro per il mondo. Ma procediamo con ordine.

Cosa si fa al CERN?

Il CERN è il più grande centro di ricerca per la fisica delle particelle, che è quella branca della fisica che studia le particelle elementari e le loro interazioni. E cosa sono le particelle elementari? Sono tutte quelle particelle che sono indivisibili ed insieme alle loro interazioni sono descritte da una teoria chiamata Modello Standard. Attualmente però, in quest'ambito, abbiamo dei problemi non indifferenti: il Modello Standard ci permette di predire con precisione invidiabile i risultati di tantissime misure, tuttavia ci sono alcune cose che non riesce a spiegare in nessun modo.

L'esempio più famoso è la materia oscura: andandosi a calcolare la velocità di rotazione delle galassie è stato scoperto che deve esserci della materia che però non siamo in grado di vedere in nessun modo, ma seguendo il Modello Standard non abbiamo spiegazioni plausibili su cosa possa formarla! Quindi, venendo ai fatti, al CERN si cerca qualcosa di nuovo, qualcosa che non abbiamo mai visto e che ci possa chiarire quali nuove teorie abbiano fondamento.

Cosa c'è di tanto speciale nel CERN per renderlo il centro di ricerca per la fisica delle particelle più importante attualmente esistente?

LHC, il Large Hadron Collider. Cos'è? L'acceleratore di particelle più grande esistente. E che me ne faccio? Ci accelero particelle, principalmente protoni, fino a velocità prossime a quelle della luce. E poi li faccio collidere l'uno contro l'altro, quasi come fossero palle da biliardo. E perché mai dovrei far urtare l'una contro l'altra delle palle da biliardo relativistiche? Qualsiasi fisico a cui è rimasto un poco di romanticismo vi dirà che serve a ricreare le condizioni presenti nei primi istanti di vita dell'universo. Nella pratica, ammesso che di pratica si possa parlare, quando vengono fatti scontrare protoni a velocità così alte parte dell'energia in gioco nell'urto viene trasformata in massa e dà vita a nuove particelle, infatti come ci ha rivelato un centinaio di anni fa il buon vecchio Einstein:

Quindi massa ed energia sono sostanzialmente la stessa cosa ed è possibile convertire l'una nell'altra. Ora, se trasformare la massa in energia è una cosa relativamente semplice, che viene fatta ogni giorno nelle centrali nucleari, fare l'opposto non è altrettanto facile: mettiamo che voi vogliate farvi apparire davanti un piatto di pasta, beh, se non avete molta fame, vi serviranno circa un milione di miliardi di Joule, l'energia che servirebbe ad un aereo di linea per percorrere dieci volte la distanza Terra-Luna. Ad LHC quindi, per produrre nuove particelle, l'energia messa in gioco deve essere altissima, e così è: c'è un'energia nel centro di massa di 13 TeV, che, vi assicuro, per un oggetto della massa di un protone (poco più di un miliardesimo di miliardesimo di chilogrammo) è veramente enorme.

$$E=mc^2$$

E come lo stiamo cercando?

Lungo l'acceleratore di particelle ci sono quattro punti in cui è possibile far collidere le particelle, lì sono stati sistemati i rivelatori relativi agli esperimenti principali del CERN:

CMS, ATLAS, LHCb e ALICE. Sono tutti diversi l'uno dall'altro e ognuno di loro permette di distinguere le particelle prodotte dall'urto di due protoni, calcolarne la loro traiettoria, la carica e l'energia, tuttavia ognuno di loro lo fa in maniera diversa, in modo che ogni volta che viene misurato qualcosa di insolito, sia possibile fare dei controlli totalmente indipendenti grazie alle misure degli altri rivelatori.

Ma nella vita di tutti i giorni io che me ne faccio?

Capisco la tua domanda, giovane abitante della Terra, giustamente a te di conoscere il reale funzionamento dell'universo non importa, tu vuoi cose utili per la tua vita. Bene, il World Wide Web fu inventato nel 1989 da Tim Berners-Lee proprio al CERN perché aveva bisogno di un metodo facile per connettere i pc ed ora ti permette di andare a vedere tutti i video di gattini che vuoi. Quando vai a farti una lastra, invece, dovresti ringraziare tutti coloro che lavorano agli acceleratori di particelle: ne viene usato uno, infatti, per produrre i raggi X che poi serviranno a far capire al radiologo se giocando a calcetto ti sei rotto la gamba oppure no. Al CERN la tecnologia viene portata al suo limite, per poi poterla inscatolare e rendere utile al grande pubblico.



Matteo Magherini, noto ad alcuni come Asciugamano, è un gatto professionista. Una volta completato l'obiettivo « laurea triennale in fisica » ha deciso di scegliere la classe « fisico delle particelle » e si aggira tra un esame e l'altro intento a livellare. Appassionato di fantascienza, arrampicata e chitarre è campione nazionale di fredture.

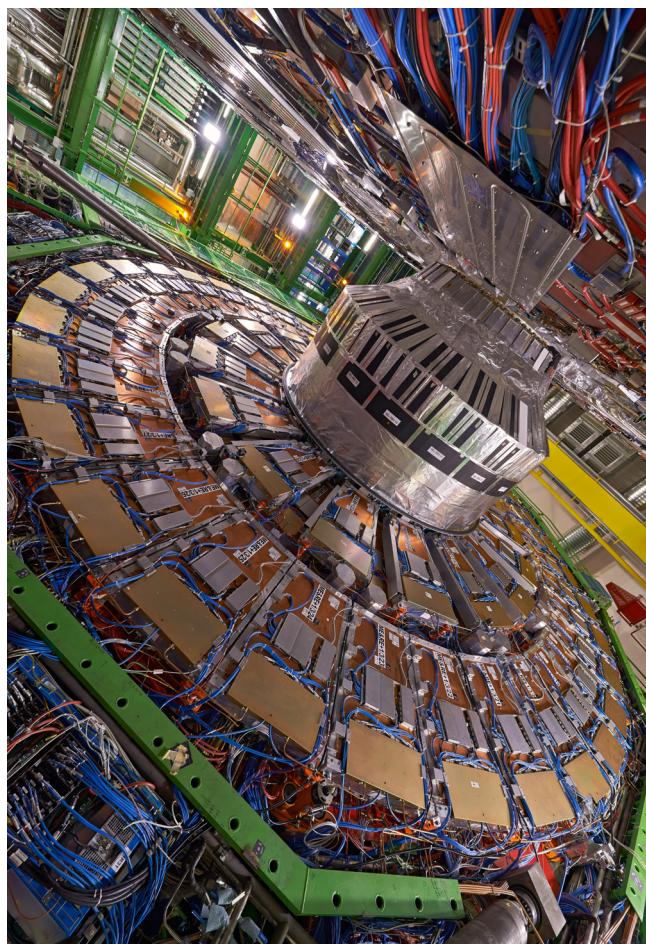


fig. 2: Sezione di LHC

C'è qualcos'altro che rende così speciale il CERN?

Sì. Essendo il più grande centro di ricerca al mondo per la fisica delle particelle, ci lavorano persone che vengono dalle nazioni più disparate, ci lavorano ragazzi appena usciti dall'università e grandi premi Nobel, e tutti fanno la fila nello stesso modo alla mensa e nei bar. Ah, ed è l'unico luogo nell'universo in cui tu possa vedere un italiano che mangia la pasta vicino ad un russo che sta grattando il parmigiano sulla sua pizza accompagnata da un cappuccino.

LA CORRISPONDENZA OLOGRAFICA:

Un ponte tra
stringhe,
campi e
realtà



di Lorenzo Papini

La più grande “equazione”

Una decina di anni fa la rivista Physics World promosse un sondaggio tra i suoi lettori con lo scopo di individuare quale fosse la più grande equazione mai scritta nella storia della scienza ed il risultato finale fu un pareggio tra l'equazione di Eulero:

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

e quelle di Maxwell, espresse nell'elegante forma dettata dalla relatività ristretta:⁽¹⁾

$$\begin{aligned}\partial_\mu F^{\mu\nu} &= J^\nu \\ \partial_\mu F_{\rho\sigma} + \partial_\rho F_{\sigma\mu} + \partial_\sigma F_{\mu\rho} &= 0\end{aligned}$$

I motivi profondi per la vittoria di queste due equazioni risiedono probabilmente nell'indubbio fascino dell'equazione di Eulero, che contiene i cinque numeri più importanti della matematica ($e, \pi, 1, i, 0$), e nell'estrema rilevanza fisica delle equazioni di Maxwell, capaci di descrivere da sole una vastità enorme di fenomeni elettromagnetici. Tuttavia, se avessi potuto partecipare anche io al sondaggio non avrei probabilmente scelto nessuna delle due equazioni vincitrici, ma quasi sicuramente avrei preso la stessa strada di Polchinski ed avrei votato l'uguaglianza simbolica dettata dalla corrispondenza olografica di Maldacena:

Teorie di stringa in Anti de-Sitter (AdS) =
Teorie di campo conformi (CFT)

perchè connette due delle più importanti teorie esistenti, la teoria delle stringhe e la teoria quantistica dei campi, stabilendo una precisa dualità tra le due e permettendo di utilizzare ognuna delle due per indagare gli aspetti oscuri dell'altra.

Come per una vera e propria equazione tra quantità fisiche, infatti, è possibile pensare il membro di destra, cioè determinati aspetti delle teorie conformi, come incognito ed andarlo ad indagare tramite il membro di sinistra, cioè le teorie di stringa, ed ovviamente è possibile fare anche il viceversa. In questo modo la corrispondenza olografica connette in maniera perfetta stringhe e campi, ma non solo. Moltissimi tra i fenomeni microscopici più rilevanti presenti in natura sono descritti tramite la teoria quantistica dei campi. Determinati materiali dalle caratteristiche eccezionali e potenzialmente protagonisti del futuro sviluppo tecnologico trovano una descrizione teorica accurata grazie alla medesima teoria. La corrispondenza olografica consente di indagare tutte queste descrizioni anche dal punto di vista della teoria delle stringhe, consentendo di gettare nuova luce su di esse.

¹Per rendere le equazioni di Maxwell invarianti sotto le trasformazioni di relatività ristretta, ovvero le trasformazioni di Lorentz, è necessario scriverle rispetto ad un oggetto $F^{\mu\nu}$ chiamato tensore dei campi che incorpora campi elettrici e magnetici.

²L'abbreviazione deriva dall'inglese “Conformal Field Theories”. Queste sono teorie di campo che descrivono interazioni di intensità costante al variare dell'energia. Sono teorie “speciali” in quanto tipicamente la forza dell'interazione è invece dipendente dall'energia.



fig. 3: Rappresentazione artistica di un universo microscopico dominato dalle stringhe

Origine e significato della corrispondenza

La corrispondenza olografica, meglio nota con il nome di *Corrispondenza AdS/CFT* è stata congetturata da Maldacena³ nel 1998 come una dualità tra una particolare teoria di stringa ed una particolare teoria conforme supersimmetrica di campo. Da quest'ultima deriva la parte CFT nel nome della corrispondenza. La parte AdS deriva invece dal fatto che la teoria di stringa in questione vive in uno spaziotempo che risulta essere il prodotto di un Anti de-Sitter cinque-dimensionale per una “sfera” cinque dimensionale. Sono proprio le particolari proprietà di simmetria dello spazio tempo Anti de-Sitter, che è uno dei tre spazi massimamente simmetrici della relatività generale, ed il segno negativo della sua costante cosmologica che rendono possibile la congettura.⁴ L'aggettivo olografico presente nel nome della corrispondenza deriva invece dal fatto che essa è una importante realizzazione del principio olografico. Quest'ultimo stabilisce che in una teoria gravitazionale il numero di gradi di libertà in un volume V scala come l'area ∂V della superficie che racchiude il medesimo volume. Fenomeni che portano alla congettura del principio olografico si possono trovare già in relatività generale. L'entropia di un buco nero calcolata nel contesto della GR, infatti, è una funzione dell'area del buco nero stesso, mentre in fisica classica l'entropia dipende tipicamente dal volume dell'oggetto in questione. Nella corrispondenza AdS/CFT è possibile immaginare che la CFT viva in uno spaziotempo corrispondente al bordo di quello più grande in cui vive la teoria di stringa. Dato che le due teorie sono duali, ne risulta che i gradi di libertà della teoria di stringa (che è pensabile anche come una teoria gravitazionale) che vive in tutto lo spazio-tempo devono essere descrivibili nei termini della CFT che vive al bordo. In questo senso la corrispondenza AdS/CFT è considerata una realizzazione del principio olografico.

Poichè un lato della corrispondenza vive sulla superficie dello spaziotempo in cui vive l'altro, ne segue che la teoria di stringa possiede una dimensione aggiuntiva rispetto alla teoria di campo. Tale dimensione aggiuntiva può essere in generale interpretata come la scala di energia a cui i processi fisici avvengono. Per dare una visione pittorica di come questo possa avvenire, possiamo immaginare che tale dimensione aggiuntiva sia parametrizzata da una coordinata r con valori compresi nell'intervallo $[0, \infty[$ e che ad $r = \infty$ corrisponda il bordo dello spaziotempo (cioè la regione in cui la CFT vive). A questo punto, muoversi da $r = 0$ a $r = \infty$ corrisponde a diminuire la scala di energia alla quale il processo fisico in esame sta avvenendo (oppure aumentarla a seconda dei casi). Poiché tipicamente l'intensità delle interazioni varia all'aumentare dell'energia (in modo crescente o decrescente a seconda dei casi), ne segue che uno dei lati della corrispondenza sarà caratterizzato da un'interazione di forte intensità e l'altro dalla stessa interazione a debole intensità. Come vedremo nei successivi paragrafi, questa caratteristica rende la AdS/CFT anche una *dualità forte/debole* e ne fa uno strumento utilissimo per indagare i regimi non perturbativi dei vari sistemi fisici in cui le interazioni sono di grande intensità.

³L'articolo *The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity* in cui J.Maldacena arriva alla congettura della corrispondenza AdS/CFT è l'articolo più citato nella storia della fisica teorica, con oltre 10000 citazioni.

⁴In effetti se si tenta di costruire un'analogia corrispondenza olografica con lo spazio tempo di de-Sitter, che è un altro degli spazi massimamente simmetrici della GR ma possiede costante cosmologica positiva, si incontrano numerosissime difficoltà. La realizzazione di una *dS/CFT* sarebbe utilissima per gli studi cosmologici, visto che l'universo è approssimativamente uno spazio-tempo de-Sitter.

Applicazioni nell'ambito delle interazioni fondamentali

L'utilizzo più frequente e vantaggioso della corrispondenza olografica risiede nell'indagare attraverso la teoria delle stringhe gli aspetti oscuri e lacunosi delle descrizioni sviluppate nell'ambito della teoria quantistica dei campi. Questa possibilità è da considerarsi di assoluto rilievo, visto che, come già accennato in precedenza, la teoria quantistica dei campi è alla base delle più moderne teorie fisiche e della più raffinata di essa, il modello standard, che descrive in un paradigma semplice ed elegante tre delle quattro interazioni fondamentali esistenti in natura⁵. Tuttavia la descrizione fornita dalla teoria quantistica dei campi si basa sulla teoria delle perturbazioni che richiede che la forza dell'interazione sia piccola. Essa è misurata da un determinato coefficiente, chiamato costante d'accoppiamento, che, nonostante il nome, varia al variare della scala di energia del processo. Se nel caso dell'interazione elettromagnetica e dell'interazione debole questa costante ha un valore modesto, che quindi rispetta il requisito imposto dalla teoria delle perturbazioni di "interazione piccola", lo stesso non può dirsi per l'interazione nucleare forte. Quest'ultima, come il nome può suggerire, è infatti un'interazione molto più intensa, che può essere considerata piccola solamente ad alte energie. A basse energie essa viola completamente le richieste della teoria delle perturbazioni ed in effetti la teoria di campo relativa all'interazione forte, ovvero la cromodinamica quantistica (QCD) ⁶, non riesce a fornire una descrizione puntuale del comportamento a basse energie. Per superare questo problema una possibilità allettante è quella di usare la corrispondenza olografica in maniera tale da esaminare se la teoria di stringa duale alla teoria di campo riesce a gettare luce sul comportamento a basse energie.

⁵Le interazioni fondamentali della natura sono: la forza gravitazionale, l'interazione forte nucleare, l'interazione debole e l'interazione elettromagnetica. Il modello standard descrive con successo le ultime tre, basandosi sul formalismo della teoria quantistica dei campi.

⁶L'abbreviazione deriva dall'inglese Quantum Chromodynamics. La QCD descrive l'interazione nucleare forte nell'ambito di interazioni tra quark e gluoni, i quali possiedono una carica particolare detta carica di colore.

Come già anticipato in precedenza, la corrispondenza olografica è una dualità di tipo forte/debole, pertanto la teoria di stringa corrispondente risulterà in un regime di debole intensità e per essa sarà possibile una descrizione tramite teoria delle perturbazioni. In questo modo è possibile in linea teorica superare i limiti della QCD riuscendo a descrivere tramite corrispondenza olografica il regime di basse energie inaccessibile alla teoria di campo. La ricerca in fisica teorica si è mossa per molto tempo lungo questo binario, che tuttavia nonostante le buone premesse è più denso di difficoltà di quanto sembrerebbe. Infatti la corrispondenza olografica è originariamente pensata per mettere in relazione teorie di stringa con teorie di campo conformi, ovvero che non dipendono dalla scala energetica. La QCD ovviamente non rispetta questo requisito, pertanto i fisici teorici si sono adoperati per molti anni alla costruzione di una cor-

rispondenza AdS/QCD che superi questo problema e produca una descrizione puntuale della QCD a bassa energia. Sono stati raggiunti notevoli successi in questo campo; primo fra tutti la corretta descrizione nell'ambito della corrispondenza olografica

del quark gluon plasma, fenomeno in cui i gluoni⁷, ovvero i mediatori dell'interazioni forti, sono in uno stato di plasma, in un regime altamente non perturbativo. In generale l'AdS/QCD è sostanzialmente una delle principali opzioni per ottenere una descrizione completa e valida a tutti i regimi energetici, assieme alla più famosa QCD su reticolo, che però ha il difetto di perdere in analiticità essendo una teoria che comprende calcoli e procedimenti di tipo numerico.

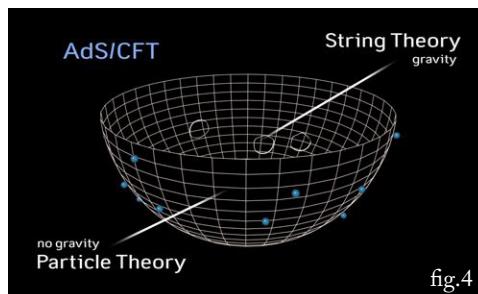


fig.4

Applicazioni in materia condensata

La maggior parte dei materiali comuni di interesse sia teorico che pratico possiede una descrizione teoria accurata già nell'ambito della meccanica quantistica e/o della sua naturale evoluzione data dalla teoria quantistica dei campi. Infatti nella maggioranza dei casi tali materiali sono dominati da interazioni elettromagnetiche tra ioni-elettroni o elettroni-elettroni di piccola intensità, senza effetti di tipo relativistico in gioco. In questo caso la teoria delle perturbazioni può essere applicata e la ben compresa e nota elettrodinamica quantistica⁸ perturbativa rende relativamente agevole la costruzione di un modello teorico raffinato. Esistono tuttavia materiali per i quali le interazioni tra i costituenti non sono soltanto interazioni deboli. Questo può accadere per esempio perché gli elettroni del materiale in questione assumono un comportamento di tipo relativistico, testimoniato da un andamento dell'energia rispetto al momento che è lineare invece che essere quadratico come nel caso non relativistico. Un esempio celeberrimo di materiale che si comporta in questa maniera è il grafene. Il grafene è un materiale bidimensionale costituito da un reticolo di atomi di carbonio e corrisponde in pratica ad un singolo foglio di grafite.⁽⁹⁾ Fu isolato dalla gra?te solamente nel 2004 da Geim e Novoselov e rappresenta uno dei materiali di più elevato interesse pratico e tecnologico in quanto possiede caratteristiche eccezionali, come elevata durezza e leggerezza e grandissima conduttività elettrica e termica. Il grafene è caratterizzato da un andamento dell'energia dei suoi elettroni di tipo relativistico, fatto che conduce alla presenza di interazioni elettromagnetiche di grande intensità tra i medesimi elettroni. Nonostante sia possibile riprodurre buona parte delle caratteristiche salienti del grafene trascurando queste interazioni, ce ne sono altre per le quali uno studio completo di tale materiale è necessario. Tale studio non può essere portato avanti con il solo strumento della teoria quantistica dei campi, visto che abbiamo a che fare con interazioni non perturbative.

Ancora una volta però la corrispondenza olografica ci viene in aiuto: i modelli di stringa associati alle teorie di campo descriventi il grafene possono essere studiati perturbativamente e da essi è possibile estrarre informazioni altrimenti inaccessibili (prime fra tutte le conduttività elettriche e termiche) e di grande rilevanza teoria ed applicativa. La ricerca in fisica teorica è riuscita ad applicare con successo la corrispondenza olografica per portare avanti questo tipo di studi per il grafene e per altri materiali con caratteristiche simili e quindi inattaccabili con tecniche più tradizionali, arrivando a risultati di rilievo.

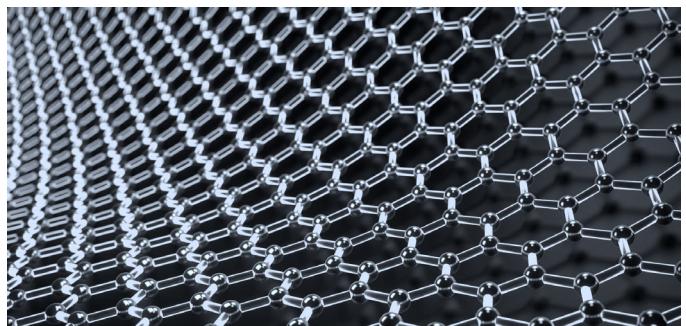


fig. 5: Rappresentazione artistica di una lamina di grafene

⁷Un gluone è da pensarsi in maniera ingenua come un “fotone delle interazioni forti”. Come i processi elettromagnetici sono visibili come scambi di fotoni, quelli forti sonosostanzialmente regolati da scambi di gluoni. Tuttavia la situazione per i gluoni è molto più complicata, perché al contrario dei fotoni non hanno carica nulla e possono quindi interagire tra loro, generando fenomeni che non hanno uguali nell’interazione elettromagnetica...

⁸L'elettrodinamica quantistica (o QED dall'inglese Quantum Electrodynamics) è la teoria di campo che descrive l'interazione elettromagnetica. Essa è la prima delle teorie che descrivono interazioni fondamentali ad esser stata sviluppata e la maggior parte dei suoi aspetti sono stati sviscerati a fondo e ben compresi.

⁹La grafite è composta da tanti strati bidimensionali di reticolati di atomi di carbonio tenuti insieme da legami deboli di Van Der Waals. Ognuno di questi strati è un foglio di grafene.

Un ponte tra stringhe e realtà

La fisica teorica moderna in generale e la teoria delle stringhe in particolare hanno fama di essere costruzioni spiccatamente di natura matematica con applicazioni non immediate alla realtà. La corrispondenza olografica si muove però in una direzione opposta in quanto consente di collegare modelli teorici di per sé lontani dalla realtà a interazioni fondamentali che caratterizzano la stessa realtà, a materiali reali, a fenomeni fisici osservati, fornendo predizioni precise su di essi che possono essere verificate o smentite. A causa di questo ultimo aspetto, essa assume anche un valore filosofico. Infatti ogni teoria fisica per essere considerata a pieno titolo tale deve poter essere falsificabile o verificabile tramite esperimenti e predizioni, ma la teoria delle stringhe, così come altre teorie del tutto, risulta di per sé invisibile dal punto di vista sperimentale, visto che i fenomeni peculiari che prescrive avvengono ad energie assolutamente inaccessibili con la tecnologia degli esperimenti attuali. Tuttavia grazie alla corrispondenza olografica che da essa nasce, la teoria delle stringhe è in grado di fornire predizioni osservabili sperimentalmente che possano in linea di principio darle vigore ulteriore oppure falsificarla e per tanto le fornisce “qualcosa in più” da questo punto di vista. Per tutte queste caratteristiche (e molte altre...) la corrispondenza olografica rappresenta uno strumento di assoluto rilievo nel panorama della fisica in generale e della fisica teorica in particolare, tanto che l’”equazione” di Maldacena a mio modesto parere può davvero esser considerata una delle più importanti mai scritte.

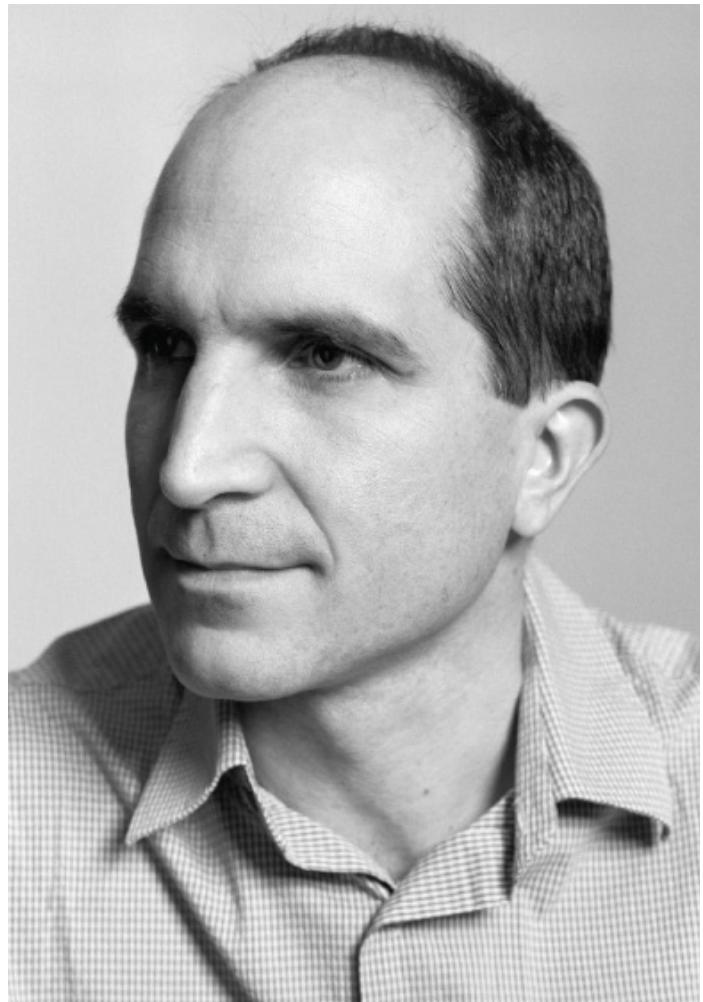


fig. 6: Juan Martín Maldacena, fotografia di Brigitte Lacombe



Lorenzo Papini è dottorando in Fisica Teorica presso l’Università di Padova, si occupa di Teoria delle Stringhe, da cui è affascinato fin dalle scuole superiori. Oltre alle stringhe, è perdutamente innamorato di tutto il mondo fantasy, orientale o occidentale che sia.

ALPHA MAGNETIC SPECTROMETER

di David Pelosi e Leonardo Salicari



“Molte delle nostre stelle, forse la maggior parte di queste, potrebbero essere corpi scuri”; così Lord Kelvin nel 1884 iniziava a portare nel panorama astrofisico un quesito che rimarrà un grande punto di domanda anche nella ricerca moderna: la materia oscura. Anche se con un approccio ingenuo, Kelvin iniziò una campagna di osservazioni, che passò per l'astrofisico svizzero Fritz Zwicky fino agli americani Vera Rubin e Kent Ford, dei moti delle galassie. Tutti notarono una rotazione fin troppo elevata ai bordi delle galassie che non poteva essere spiegata ipotizzando il solo contributo dell'attrazione gravitazionale dovuto alla quantità di materia osservata al loro interno; questo aprì l'ipotesi all'esistenza di un tipo di materia non interagente elettromagneticamente, quindi non visibile ai nostri telescopi, ma interagente gravitazionalmente. A questo tipo di materia, viste le sue proprietà, fu dato il nome di materia oscura Ad oggi, esistono numerose prove indirette della esistenza della materia oscura basate sugli effetti della loro interazione gravitazionale. Le teorie più accreditate ascrivono alla materia oscura una natura particellare. Tuttavia, nonostante gli evidenti effetti indiretti, particelle di materia oscura non sono, ad oggi, ancora state osservate direttamente e la ricerca della materia oscura rappresenta uno dei più importanti campi di ricerca della fisica odierna. Particolare attenzione ha la rilevazione indiretta di quest'ultima: essa si basa sullo studiare i risultati dell'auto-annichilazione delle particelle di materia oscura con sé stesse oppure di un loro decadimento. Il vantaggio di questo approccio sta nell'andare a cercare particelle di cui conosciamo molto bene la natura e le caratteristiche, tra cui, giocano un ruolo importante, le particelle di antimateria. Noi siamo costituiti, come le cose che ci circondano, da una combinazione di particelle che definiamo materia ordinaria. Esse vengono definite attraverso vari parametri come la massa; uno in particolare è la carica: negativa per l'elettrone, positiva per il protone etc.

L'antimateria presenta tutte le caratteristiche della materia ordinaria eccetto che per la carica: quindi avremo particelle come l'anti-protone che hanno carica negativa e l'anti-elettrone, o positrone, di carica positiva. L'antimateria può formare strutture composite, come nuclei pesanti, esattamente come la materia ordinaria ma a tutt'oggi questo tipo di strutture più complesse, anche se possibile realizzarle in laboratorio [2], non sono state osservate nello spazio. Quindi, in quanto componente rara dei raggi cosmici, l'antimateria prodotta da fenomeni correlati con la materia oscura è un buon candidato per la ricerca di quest'ultima. Molti modelli che cercano di spiegare la materia oscura prevedono un certo “eccesso” di flusso di particelle di antimateria

nei raggi cosmici che, se confermati con dati sperimentali, potrebbero darci più dettagli sulla struttura di queste particelle così ignote.

Tra i vari esperimenti sviluppati per a rilevare antimateria nei raggi cosmici, particolare rilevanza ha

l'esperimento AMS-02 un rivelatore di particelle progettato per operare come modulo esterno sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Il progetto è stato presentato nel 1995 dal fisico delle particelle e premio Nobel per la fisica Samuel J. Ting, ed è stato lanciato dal Kennedy Space Center e installato sulla ISS nel Maggio 2011. Il progetto attuale nasce dall'evoluzione di un iniziale prototipo (AMS-01) lanciato a bordo dello Space Shuttle nel giugno 1998. Perché è stato necessario installarlo sulla ISS? Come riesce a captare segnali di antimateria? Come già discusso, lo scopo principale di AMS è quello di individuare e misurare le proprietà dei rari raggi cosmici di antimateria in arrivo sulla Terra: poter effettuare misurazioni ad una altitudine di circa 380 km permette di evitare l'interazione tra raggi cosmici e atmosfera, il quale causerebbe una indesiderata variazione della composizione che falserebbe le misurazioni.

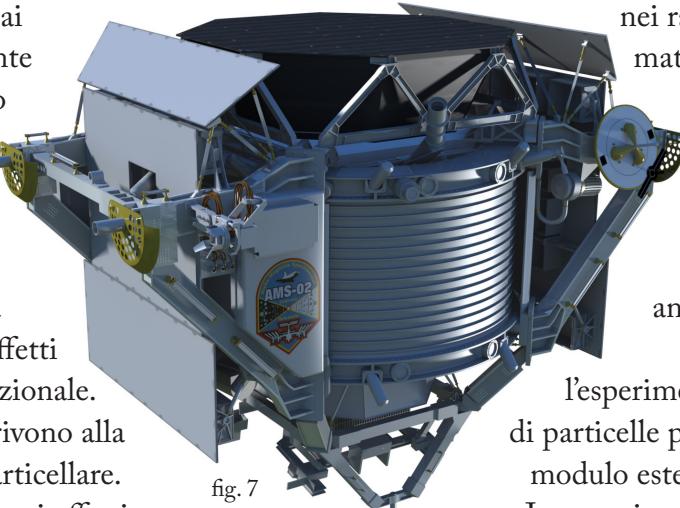


fig. 7

fig. 7: Design definitivo di AMS-02

La strumentazione

AMS riesce ad identificare particelle grazie ai cinque rilevatori principali che lo costituiscono.

Il primo a cui vanno incontro le particelle è il Transition Radiation Detector (TRD) che, insieme all'Electromagnetic CALorimeter (ECAL), distingue protoni da positroni ed elettroni da anti-protoni. Il primo è sensibile al fattore di Lorentz $\gamma=E/m$, ovvero all'energia sulla massa della particella, quindi è in grado di distinguere protoni da elettroni, come antiprotoni da positroni, che differiscono nella massa. Ciò grazie al fatto che gli elettroni, come i positroni, lasciano un segnale nell'apparecchio (radiazione X) che i protoni e gli anti protoni non emettono.

Il secondo invece ricostruisce lo sviluppo dello sciame di particelle secondarie generato delle interazioni del raggio cosmico con il materiale del rivelatore. Sciami generati da particelle elettromagnetiche (elettroni e positroni) hanno caratteristiche geometriche differenti da sciami generati da particelle adroniche (protoni, anti-protoni, nuclei): l'analisi della topologia dello sciame permette di identificare la natura elettromagnetica o adronica del raggio cosmico. Combinando le misure del TRD e del ECAL, solamente 1 positrone su 1 milione viene erroneamente identificato come un "protone".

Il Time Of Flight (ToF) è essenzialmente il cronometro di AMS: quando passa un raggio cosmico registra il tempo che impiega per attraversare la struttura cilindrica dell'esperimento. Grazie a questo, oltre a distinguere le particelle entranti dalla parte superiore da quelle che arrivano dalla parte inferiore, restituisce una misura di $\beta=v/c$, quindi della velocità.

Il tracciatore (TRK) rappresenta il cuore dell'apparato ed è lo strumento che ci permette di distinguere materia da antimateria. Questo è situato all'interno di un magnete permanente che genera un campo magnetico 3000 volte più intenso di quello terrestre che, come schematizzato nell'immagine [Fig. 1], sfrutta la forza di Lorentz per curvare le particelle cariche che vi entrano. Il tracciatore è formato da rilevatori al silicio i quali, con una precisione fino a $10 \mu\text{m}$ ($= 1/100 \text{ mm}$), individuano e localizzano i punti di passaggio del raggio cosmico all'interno del campo magnetico così da poterne ricostruire la traiettoria e quindi la curvatura. L'intensità della curvatura fornisce indicazioni sull'energia della particella, mentre la direzione di deflessione permette di determinare il segno della carica. Il campo magnetico è l'unico rivelatore che permette la distinzione tra particelle di materia e particelle di antimateria. I ricercatori dell'Università degli Studi di Perugia e della sezione dell'Istituto di Fisica Nucleare Italiano (INFN) di Perugia hanno ricoperto un ruolo fondamentale nella progettazione e nella realizzazione di questa parte dell'esperimento. Infine, il Ring Imaging Cherenkov detector (RICH) sfrutta l'emissione di radiazione Cherenkov per determinare la velocità (analizzando l'angolo di emissione della radiazione) e la carica della particella (analizzando l'intensità dell'emissione).

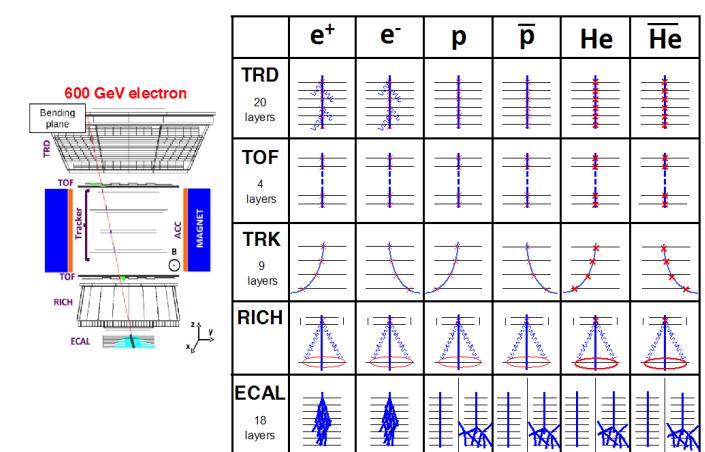


fig 8: Rappresentazione grafica dei segnali registrati dai vari rilevatori al passaggio delle diverse particelle

I risultati di AMS-02

Parte fondamentale di un esperimento sono i risultati che produce: si andrà ad approfondirne uno riguardante la rilevazione indiretta di materia oscura. La figura mostra l'andamento del rapporto tra positroni e la somma di positroni ed elettroni in funzione dell'energia, misurata in GeV ovvero il miliardo di elettron Volt, unità di misura per l'energia usata nella fisica delle particelle. Tale quantità rappresenta, quindi, una misura della abbondanza relativa di antimateria nella radiazione cosmica nel caso particolare di elettroni e positroni. Andiamo a vedere come è composto il grafico: la curva verde rappresenta l'andamento atteso dal modello teorico che cerca di quantificare il rapporto sopra citato nei raggi cosmici, tenendo conto delle sorgenti astrofisiche note e dell'interazione dei raggi con il mezzo interstellare (ISM). La curva bordeaux, invece, rappresenta il modello teorico che tiene conto del contributo della materia oscura e che meglio approssima i dati sperimentalini in rosso, misurati da AMS. Rispetto a ciò che ci si aspetta, si nota un eccesso di positroni a partire da circa 10 GeV con una crescita che appare graduale senza brusche variazioni e osserviamo perfino un picco massimo intorno ai 250 GeV.

La dipendenza dall'energia della curva e la presenza di un massimo potrebbero essere compatibili con l'ipotesi di produzione di positroni ed elettroni da materia oscura. Non si esclude del tutto che l'origine di questo flusso sia dovuta a pulsar o anche a fonti astrofisiche ancora non conosciute; entrambe sono infatti considerate possibili sorgenti di coppie elettrone/positrone. Un'eventuale misura di una direzione privilegiata di arrivo dei positroni favorirebbe l'ipotesi dell'origine astrofisica. La materia oscura, infatti, è ipotizzata essere distribuita omogeneamente a livello locale. Ad oggi, le direzioni di arrivo dei positroni sono misurati essere isotrope con una precisione del 3%. Nuovi dati, tuttavia, potrebbero rivelare un sensibile livello di anisotropia. Insieme a ciò si aggiunge anche un altro discriminante, l'andamento della curva dopo i 250 GeV: se l'origine dell'eccesso è dovuto alla materia oscura allora si dovrebbe riscontrare un andamento liscio e decrescente, altrimenti ci si aspetta un brusco calo. Perciò

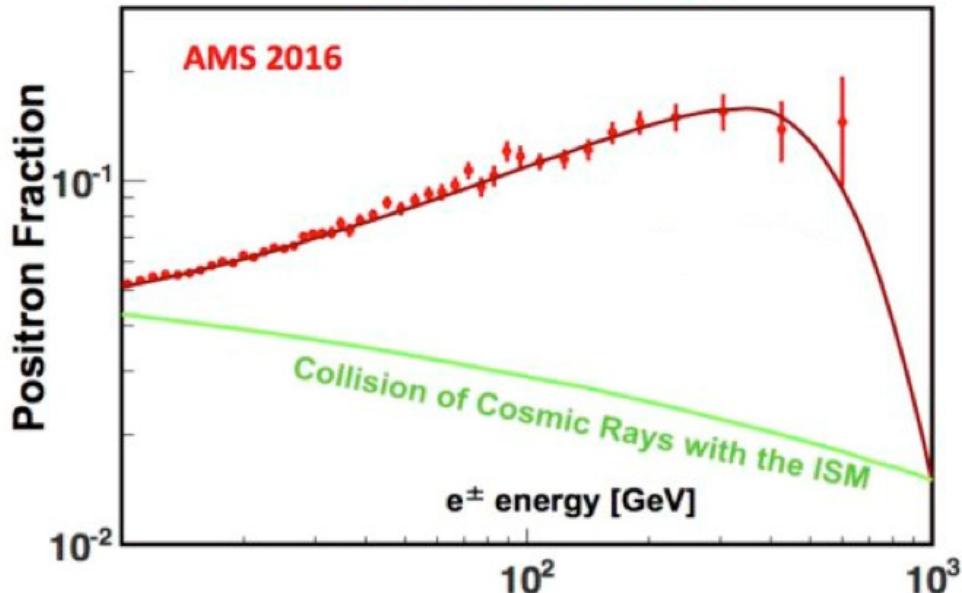


fig 9: Dati ottenuti da AMS-02 relativi alla frazione di positroni

La collaborazione

La gestione dell'intero rilevatore e della presa dati avvengono presso il POCC (Payload Operation Control Center) al CERN, dove 24 ore su 24 viene monitorata l'attività di AMS-02.



fig 10: Control Room al CERN.

È importante ricordare come l'intero progetto sia frutto di una straordinaria collaborazione internazionale di cui fanno parte: Turchia, Olanda, Spagna, Portogallo, Norvegia, Germania, Francia, Danimarca, Finlandia, Giappone, Taiwan, Cina, Corea del Sud, USA, Messico e Italia, oltre alle agenzie spaziali, ASI, ESA e NASA. Tra gli istituti italiani partecipanti, decisivo è stato il contributo della Sezione INFN e Dipartimento di Fisica di Perugia; i ricercatori impegnati nel progetto hanno avuto importanti responsabilità nella progettazione, costruzione e integrazione del tracciatore al silicio di AMS-02, in stretta collaborazione con l'Università di Ginevra.

Ricordiamo anche il contributo di altri istituti nella realizzazione dei rilevatori di AMS-02 tra cui: Univ. e INFN di Pisa per il ECAL, Univ. e INFN di Bologna per il TOF, Univ. di Milano Bicocca e relativa sede INFN per la gestione e trasferimento dei dati. È chiaro che un qualunque segnale di “scoperta” indiretta della materia oscura nei raggi cosmici avrà bisogno di una conferma sperimentale da altri esperimenti per poter essere confermato dalla comunità scientifica. Infatti, numerosi esperimenti sono attualmente in opera per rivelare tracce di materia oscura utilizzando tecniche sperimentali differenti e complementari fra di loro. Alcuni dei più importanti sono: ADMX (Axion Dark Matter Experiment) negli Stati Uniti, XENON Dark Matter Search Experiment e DarkSide-50 entrambi installati presso i laboratori nazionali del Gran Sasso. Si stanno raccogliendo dati molto dettagliati con sensibilità e intervalli di energia finora inesplorati che potrebbero contribuire un giorno, neanche troppo lontano, a capire la natura stessa della materia oscura, risolvendo quindi quello che ad oggi è uno dei più grandi misteri del cosmo.

[1] <https://arstechnica.com/science/2017/02/a-history-of-dark-matter/>,
<https://archive.org/stream/baltimorelecture00kelviala#page/n7/mode/2up>.

[2] <https://home.cern/topics/antimatter/antimatter-cern>, <https://arxiv.org/abs/1104.4982>

[3] <http://www.ams02.org/what-is-ams/technology/>

[4] [https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRev-](https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRev)

David Pelosi, studente al 3 anno di fisica nell'ateneo Perugino ma proveniente dalla provincia di Viterbo. Sognava la Serie A ma alla fine fare grafici con Root non è così male.



Leonardo Salicari, nato a Perugia, studia al terzo anno di Fisica nell'ateneo perugino. Prossimo alla laurea, vive la crisi del quarto d'età sul campo di ricerca della Fisica da perseguire. Uniche invarianti temporali: l'amore per la montagna e per la matematica.

NA62

A large green cylindrical particle detector component, likely the NA62 muon chamber, is shown in a laboratory setting. The detector is supported by a network of red and white structural beams. In the foreground, there are various electronic equipment, control panels, and a metal grating walkway. The background shows more of the detector's structure and some people working in the distance.

Alla ricerca di indizi
per scoprire la natura
intima delle cose

di Francesco Brizioli

Nell'evoluzione del sapere scientifico vi sono momenti considerati più prosperosi, cioè lassi di tempo relativamente brevi in cui si fanno passi da giganti, e periodi, anche lunghi, in cui invece, per diversi motivi sembra che la situazione sia in stallo e non si sa in quale direzione dover guardare per sperare di trovare una qualche illuminazione che indichi una possibile strada per andare avanti.

Ciò che determina nella maggior parte dei casi la transizione da periodo di progresso a periodo di stallo, è il convincimento, anche delle menti più brillanti, di essere giunti al capolinea, di non poter migliorare ulteriormente lo stato delle cose.

Ad esempio, da quando Aristotele ha formulato la sua concezione sulla struttura dell'universo, che oggi sappiamo essere profondamente sbagliata, ma in quel momento era ciò che serviva all'uomo per interpretare ciò che osservava e per rassicurarsi sul perché della propria esistenza in questo mondo, sono serviti secoli per ricominciare a fare ricerca, capendo che forse quanto già faceva parte della cultura non era del tutto soddisfacente, non essendo in grado di rispondere in maniera convincente a dubbi che emergevano dalle osservazioni della natura. E quindi il lungo periodo di stallo ha iniziato a portare qualche frutto, gettando le basi per la Rivoluzione Copernicana, che ha dato il via ad un periodo di grandi progressi: si pensi ad esempio al lavoro di Galilei e Newton, i quali hanno ribaltato il modo di osservare e descrivere il mondo circostante.

In altre situazioni la società umana è stata più fortunata, poiché ci è voluto meno tempo per iniziare a far fruttare momenti di apparente stallo, mettendo in dubbio ciò che già si conosceva per migliorare il livello di indagine andando sempre più nel dettaglio della natura.

Si pensi in tal senso alla sintesi che Maxwell opera durante la seconda metà dell'800 nell'ambito della fisica classica, in particolare nel campo dell'elettromagnetismo, scrivendo le sue quattro equazioni: sembrava quello il momento in cui la fisica fosse davvero arrivata al capolinea, perché si era in grado di modellizzare mediante il rigoroso linguaggio della matematica tutti i fenomeni macroscopici che si potevano osservare.

Ci si sarebbe allora potuti fermare con il porsi domande, ed invece, senza dover aspettare secoli (come fra Aristotele e Copernico), ma soltanto qualche anno, ci si è iniziati a chiedere come le teorie note potessero essere ampliate per spiegare anche fenomeni non relativi alle scale della vita di tutti i giorni, ma in limiti particolari, come i corpi che si muovono a grandissime velocità (ciò che poi è diventata la fisica relativistica) e il mondo microscopico (che adesso descriviamo tramite la meccanica quantistica), che sembravano dissentire dalle conoscenze attuali.



fig. 11: Busto di Aristotele conservato a Palazzo Altemps, Roma

Quello che adesso ci si potrebbe chiedere è: che tipo di momento sta attraversando la conoscenza della natura da parte del genere umano? Difficile rispondere a questo interrogativo, almeno per quanto riguarda la fisica delle interazioni fondamentali, anche detta fisica delle particelle elementari o delle alte energie. È questa la parte della scienza che attualmente cerca di modellizzare tramite leggi matematiche le interazioni più profonde che avvengono in natura, sia su scala macroscopica che su scala microscopica, sia al giorno d'oggi che pochissimi istanti dopo l'origine del nostro universo, il Big Bang.

La difficoltà di questo tipo di ricerca risiede nel fatto che il mondo come noi oggi lo vediamo, evidentemente non è lo stesso rispetto a qualche istante dopo l'alba dell'universo, per cui se ci limitassimo ad osservarlo nelle sue condizioni stabili di adesso, sicuramente non avremmo a disposizione gli stessi fenomeni che avvenivano in situazioni più esotiche, in momenti come quelli immediatamente dopo il Big Bang. È necessario quindi, se si vuole fare questo tipo di ricerca, realizzare un laboratorio in cui tali condizioni si riescano a riprodurre, e quindi, proprio come si farebbe con una macchina del tempo, si possano andare ad osservare gli stessi fenomeni che avvenivano in passato, e che poi hanno portato alla formazione degli oggetti che oggi ci sono più familiari (galassie, sistemi solari, buchi neri ...). Ciò significa, evidentemente, spingersi a densità di energie molto molto elevate (si pensi a quanta energia era concentrata in uno spazio piuttosto piccolo nel momento del Big Bang), da cui l'appellativo fisica delle alte energie, dove si formano ed interagiscono fra loro degli oggetti che sono i costituenti fondamentali del nostro universo (o, quantomeno, lo sono stati in una certa epoca cosmologica), quelle che oggi chiamiamo particelle elementari. Per ora abbiamo utilizzato essenzialmente due tipi di laboratori dove tali condizioni sono ricreate: uno messo a disposizione direttamente dalla natura, cioè i raggi cosmici, che vengono studiati sia da terra sia andando nello spazio, ed uno che invece è forse la più grande manifestazione del sapere ingegneristico di cui disponiamo, gli acceleratori, cioè delle macchine in grado di portare particelle che ancora oggi compongono la materia ordinaria che ci circonda (elettroni, protoni, ed eventualmente le rispettive antiparticelle), a velocità prossime a quelle della luce.

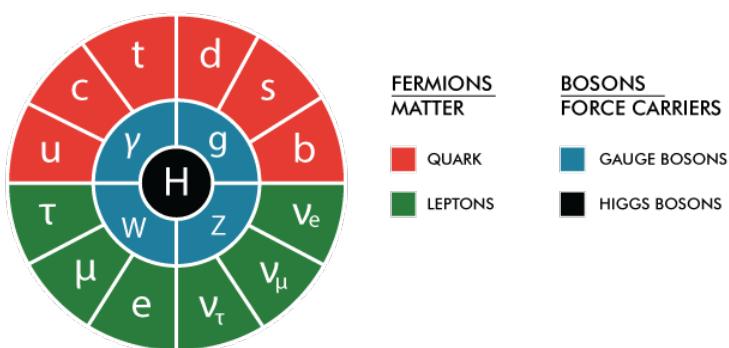


fig. 12: Schema delle particelle fondamentali descritte dal Modello Standard

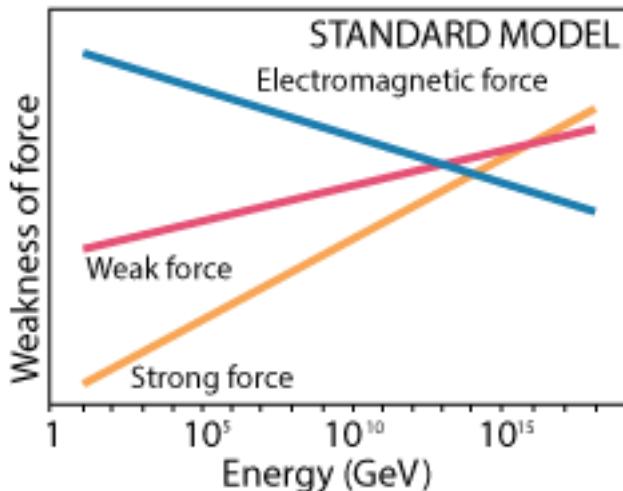
In questo modo si hanno a disposizione delle enormi quantità di energia concentrate in piccolissime porzioni di spazio, con cui si possono riprodurre le condizioni esotiche volute.

Tale filone di ricerca, che non ha nemmeno un secolo di vita, ci ha portato ad una conoscenza molto approfondita di quali siano i costituenti fondamentali del nostro universo e dei modi in cui essi interagiscono, permettendoci di raccogliere molti dati sperimentali e di elaborare una teoria che sia in grado di predire e spiegare tali risultati. La teoria che racchiude tutte le nostre conoscenze in questo campo di chiama Modello Standard delle interazioni fondamentali.

Da questo punto di vista l'ultimo secolo può essere considerato un periodo molto prolifico per il progresso scientifico e tecnologico, il cui culmine si è probabilmente raggiunto nel 2012 con l'annuncio dell'osservazione di una particella che era alla base della nostra teoria, il cosiddetto Bosone di Higgs.

Ma adesso, dopo il grande successo, a che punto ci troviamo? Questa scoperta rappresenta un punto di arrivo o un punto di partenza? Imparando dal passato, per la comunità scientifica esso vorrebbe essere solo un punto di partenza. Il problema è capire verso quale direzione puntare. Infatti da un lato il Modello Standard lascia aperte tante domande, come ad esempio, che cosa sia l'energia e la materia oscura, che sembrano costituire circa il 95% dell'universo, o perché in questo momento nell'universo vi sia una totale prevalenza della materia sull'antimateria, e numerose altre evidenze per cui la teoria non riesce a dare una spiegazione soddisfacente.

Questo fatto di per sé non rappresenterebbe un problema, almeno nell'ottica della visione della scienza dell'epistemologo Karl Popper, il quale sosteneva che la scienza deve procedere per falsificazioni, ed una teoria è scientifica quanto più è falsificabile, perché mediante il processo di falsificazione si riesce a correggere ed ampliare la teoria sempre di più, così da renderla sempre più adatta a descrivere i fenomeni della natura: avere dei buchi nella teoria, quindi delle possibili falsificazioni non è dunque altro che un aspetto positivo per poterla migliorare. Ma, dall'altro lato, qualsiasi altro modello, che per il momento sia venuto in mente a chi fa ricerca in questo ambito, che superi il Modello Standard e sappia dare risposta a qualcuna delle domande ancora aperte non trova alcun riscontro sperimentale. L'esempio più calzante è quello della teoria della Supersimmetria (SUSY), la quale prevedeva di estendere il Modello Standard "rad-doppiandolo", cioè aggiungendo ad ogni particella standard un suo partner supersimmetrico. Questa teoria sarebbe stata in grado, tra l'altro, di dare una possibile interpretazione della materia oscura.



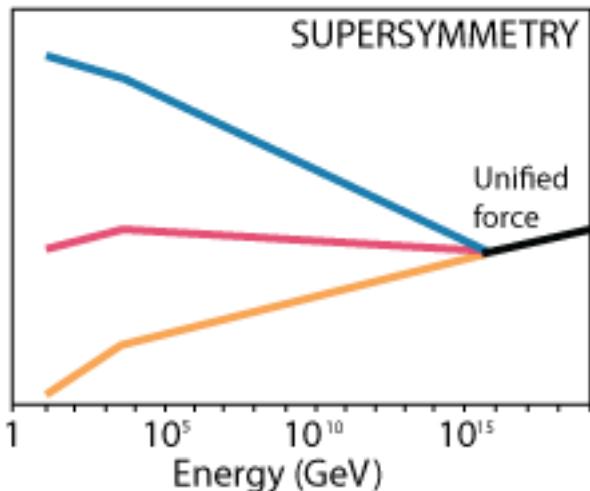
La rarità è essenziale perché, facendo una metafora, è intuitivo come sia più facile trovare una pallina nera (ciò che non si conosce, cioè eventi non previsti dal Modello Standard) in mezzo a dieci palline bianche (ciò che è previsto dal nostro attuale modello), rispetto al trovare la stessa pallina nera in mezzo a diecimila palline bianche. In altre parole è più facile che effetti non standard si manifestino quando non sono troppo mascherati da effetti standard.

Tuttavia ad oggi, le misure che continuano ad essere fatte nei laboratori di tutto il mondo (spazio compreso) non stanno trovando alcuna evidenza che dia riscontro a queste teorie, ma soltanto conferme al Modello Standard.

Siamo allora forse in una fase di stallo nel comprendere i misteri più profondi sull'essenza del nostro universo, non tanto perché soddisfatti di ciò che già abbiamo, ma perché non sappiamo dove guardare, perché la natura non ci sta offrendo degli indizi validi per approfondire la nostra conoscenza e rispondere a domande ora ignote.

Uno dei modi per cercare degli indizi che permettano di falsificare il Modello Standard è quello di osservare degli eventi che, almeno per quanto ne sappiamo ora, avvengono molto raramente e per cui la conoscenza teorica (che vorremmo smentire, per trovare un indizio di quella che chiamiamo Nuova Fisica) sia abbastanza buona.

fig. 12: Confronto tra l'unificazione delle forze nel Modello Standard e la teoria della Supersimmetria



È altrettanto importante poiché il confronto fra due risultati è tanto più efficace, e quindi potenzialmente utile a determinare una discrepanza fra misura e teoria, quindi una falsificazione della teoria stessa, quanto più le incertezze sui risultati siano piccole. Naturalmente con questo tipo di ricerca non si sa verso dove si sta andando, ma semplicemente si tenta di mettere alla prova la conoscenza di cui adesso disponiamo, sperando di trovare qualche indizio di novità che permetta di ampliarla.

Con questa idea sono nati numerosi esperimenti che analizzano processi profondamente legati alla teoria delle interazioni, molto rari, e di cui la teoria è in grado di fare predizioni molto accurate.

Uno dei tanti processi attualmente in fase di studio è il decadimento di una particella chiamata kaone carico in altre tre particelle, un pionne carico ed una coppia neutrino-antineutrino:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$$

Si tratta di un processo molto raro in quanto è previsto che ne avvenga uno ogni 10 miliardi di decadimenti del kaone, e la cui previsione sulla frazione di decadimento (branching ratio, cioè il numero di decadimenti di quel tipo che avvengono rispetto al numero di decadimenti totali della particella) ha un'incertezza di circa il 10%:

$$BR_{\text{Modello Standard}}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.84 \pm 0.10) \cdot 10^{-10}.$$

Un modo per poter quindi mettere alla prova il Modello Standard è quindi quello di identificare questi tipi di eventi, dovendoli distinguere da altri decadimenti, molto simili dal punto di vista della segnatura sperimentale (cioè i segnali che le particelle rilasciano nei rivelatori) ma molto più frequenti, ed effettuare una misura della frazione di decadimento con una buona precisione così da confrontarla con la previsione teorica ed eventualmente evidenziare effetti di nuova fisica.

Questo è ciò che sta tentando di fare l'esperimento NA62, installato al CERN lungo una linea di fascio di protoni estratta dall'acceleratore SPS. L'installazione dell'esperimento è terminata nel 2016, quando si è iniziato a raccogliere dati utili alle analisi di fisica. Successivamente si sono raccolti dati nel 2017, e da poco (lo scorso 9 aprile) è iniziato un nuovo anno di presa dati.

Per poter raggiungere il suo scopo, NA62 ha bisogno di rivelatori di particelle che permettano di identificare il decadimento di segnale e contemporaneamente di rigettare gli altri decadimenti (detti "di fondo", che hanno caratteristiche simili).

Il decadimento di segnale ha una segnatura sperimentale molto semplice: si ha un'unica particella carica, un pionne, che quindi rilascerà la sua energia nei vari rivelatori (in diversi modi, in base a qual è il processo fisico che viene sfruttato dal rivelatore per osservare la particella), e due neutrini, i quali hanno probabilità praticamente nulla di interagire con i rivelatori di NA62, per cui l'unica "segnatura" che essi hanno è l'energia mancante fra il kaone prima del decadimento e il pionne prodotto dal decadimento, che corrisponde all'energia presa dai due neutrini, che quindi viene persa dai rivelatori.

Tutti gli altri canali di decadimento avranno delle segnature diverse, in base alle particelle che compongono lo stato finale. I due canali che costituiscono il fondo principale per il segnale sono i seguenti:

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \pi^+ \pi^0 \quad (\text{detto K2pi}); \\ K^+ &\rightarrow \mu^+ \nu \quad (\text{detto Kmu2}); \end{aligned}$$

entrambi hanno probabilità di avvenire oltre un miliardo di volte superiore rispetto a quella del decadimento di segnale. Questi due decadimenti hanno in teoria una segnatura sperimentale diversa dal decadimento cercato: infatti nel K2pi oltre al pionne carico vi è il pionne neutro, che decade quasi sempre in due fotoni, i quali sono facilmente osservabili dai rivelatori di NA62; il Kmu2 ha come particella carica un muone anziché un pionne, e per fortuna queste due particelle cariche interagiscono in maniera molto diversa (i muoni riescono a penetrare la materia molto più profondamente rispetto ai pioni).



fig. 13: Il logo di NA62 è affiancato dal diagramma di Feynman del decadimento studiato, simile ad un pinguino stilizzato

Il problema è che, essendo molto più frequenti rispetto al decadimento di segnale, è sufficiente sbagliare anche poche volte nell'identificazione del decadimento per ottenere un numero di eventi di fondo che sovrasta gli eventi di segnale. Se ad esempio i due fotoni provenienti dal pionne neutro del decadimento K2pi vengono per un qualche motivo persi (ad esempio perché finiscono in una regione morta, cioè delle zone dei rivelatori che non sono in grado di raccogliere i segnali), allora esso può essere confuso con il decadimento di segnale. E, date le probabilità relative dei decadimenti, è sufficiente sbagliarsi anche soltanto una volta ogni miliardo nella reiezione dei canali di fondo per avere una presenza di essi maggiore di quella degli eventi di segnale (che corrisponderebbe ad effettuare la misura con errore superiore al 100%). È quindi necessario un livello di accuratezza estremamente elevato. Quello di cui ha dunque bisogno NA62 è un insieme di rivelatori che siano il più possibile ermetici, cioè che siano in grado di rivelare tutte le particelle prodotte nei decadimenti (ad eccezione dei neutrini), e che possano identificare sia i fotoni che la natura delle particelle cariche presenti (pioni, muoni, elettroni). Per poter riuscire nell'impresa si fa inoltre utilizzo della cosiddetta analisi cinematica, cioè l'applicazione di leggi di conservazione (energia ed impulso) fra stato iniziale e stato finale, che consente di migliorare ulteriormente la capacità di identificazione del segnale e di reiezione del fondo.

¹Per ulteriori dettagli sull'esperimento NA62 si rimanda all'articolo scientifico “*E. Cortina Gil et al 2017 JINST 12 P05025*”, consultabile al link <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/05/P05025>, nonché a tutta la documentazione presente nella pagina web dell'esperimento, <https://na62.web.cern.ch/na62/>.

Per poter effettuare questa analisi è necessario che i rivelatori di NA62 siano in grado di misurare con precisione energia, impulso e direzione di moto delle particelle sia prima (kaone) sia dopo il decadimento.⁽¹⁾ Gli unici dati che per ora sono stati completamente analizzati sono quelli del 2016, da cui è già emerso un risultato molto importante: è stato verificato che la tecnica sperimentale utilizzata da NA62 funziona, ed è stato osservato un evento candidato ad essere proprio il decadimento ultra-raro $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$.

La Collaborazione NA62, di cui una parte rilevante è costituita da gruppi italiani, fra cui il gruppo dell'Università e dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) di Perugia, ha annunciato tale risultato lo scorso marzo, ed è confidente che con i dati del 2017 e del 2018 si possa ottenere un significativo numero di eventi, così da poter effettuare una misura della frazione dei decadimenti abbastanza precisa da essere confrontata con la teoria per andare a caccia di qualche indizio sul dove guardare per scrutare la natura ancora più a fondo e, magari, andare verso la comprensione di aspetti che per ora risultano del tutto ignoti.

Un buon punto di partenza, che forse ci indicherà quale sia la strada giusta per mirare all'arrivo, se un arrivo effettivamente esiste, oppure semplicemente un nuovo punto di partenza!



fig. 14: Visuale dall'alto di NA62

Francesco Brizioli è un dottorando in fisica sperimentale delle alte energie presso l'Università degli Studi di Perugia. Nella sua attività di ricerca si occupa di fisica del sapore e di simmetrie del Modello Standard in tale ambito, facendo parte della collaborazione dell'esperimento NA62 al CERN, all'interno della quale svolge per lo più analisi dei dati. Appassionato di attualità e di politica, è da sempre impegnato nel mondo dell'associazionismo e della rappresentanza.



L'EVOLUZIONE DEL SISTEMA SOLARE

(Caffè scientifico)



Il Caffè Scientifico

Nell'era della comunicazione la scienza è alla portata di tutti: internet, biblioteche, migliaia di libri pubblicati ogni anno, dimenticando che in tempi non troppo remoti era relegata a pochi eletti. Possiamo affermare che la nostra società possieda tutti gli strumenti per poter essere definita una società scientifica. Tuttavia, così come non basta possedere una bicicletta per imparare a pedalare, non è sufficiente avere accesso alla cultura per poterla comprendere. Come ogni bambino sa, per imparare ad andare in bicicletta c'è bisogno dell'aiuto di chi già sa pedalare. Perché non chiedere allora di spiegare la scienza a chi la riscrive ogni giorno? Per questo motivo da ormai un anno, per volontà di alcuni studenti del dipartimento di fisica, stiamo organizzando dei cicli annuali di eventi chiamati "Caffè Scientifici" con l'obiettivo di dar voce alla scienza attraverso chi la studia: professori, ricercatori e dottorandi. La nuova stagione è stata inaugurata il 12 marzo con un evento in cui sono stati invitati a parlare i professori Maurizio Maria Busso (astrofisico) e Francesco Frondini (geochimico), entrambi docenti presso il dipartimento di Fisica e Geologia di Perugia. Quest'ultimo ha potuto presentare il lavoro svolto in alcuni rami della geochimica in collaborazione con ricercatori in fisica, un'approfondita indagine sulla storia del nostro sistema solare; questo è stato l'argomento principale dell'incontro.

L'evento è stato introdotto dal professor Busso con il tema della nascita del Sole e delle stelle in generale. Il Sole infatti, come ogni altra stella, è nato quando una nube interstellare, formata da polveri e gas, ha iniziato lentamente a contrarsi. Eventi simili sono particolarmente rari in quanto richiedono il raggiungimento della cosiddetta instabilità di Jeans, stato caratterizzato da una concentrazione di massa tale da collassare su sé stessa quando compresa in un raggio critico. Le prime fasi del processo di formazione stellare non sono visibili a causa dell'opacità dovuta alle nubi circostanti; nello spettro del visibile risultano come aree scure ai telescopi e vengono per questo denominate *globuli di Bok*. Per comprendere le dinamiche degli eventi che caratterizzano i primi attimi di una stella è utile studiare le linee di assorbimento e di emissione dei globuli di Bok nell'infrarosso. Dopo le prime fasi di contrazione la materia si addensa attorno ad un proto-nucleo e, a causa della rotazione della nube, forma un disco di accrescimento. L'instabilità di tale struttura porta alla formazione di anelli sempre più sottili dove le particelle si urtano, legandosi e dando origine a dei proto-pianeti. Per capire il modo in cui essi si formano si è soliti studiare le interazioni che avvengono all'interno degli anelli di Saturno, i quali, pur essendo molto diversi sia per origine che per composizione, sono in grado di dare informazioni riguardo alle dinamiche che caratterizzano situazioni simili. Si pensa che alcuni corpi celesti, compresi i pianeti durante la loro formazione, siano andati incontro ad un processo di differenziazione, procedimento secondo il quale il calore porterebbe gli elementi del corpo a stratificarsi in base alla loro temperatura di fusione; questa teoria è in grado di spiegare l'alta metallicità dei nuclei planetari. Purtroppo, tale processo è causa di una perdita di informazioni sulla struttura primordiale del sistema planetario.

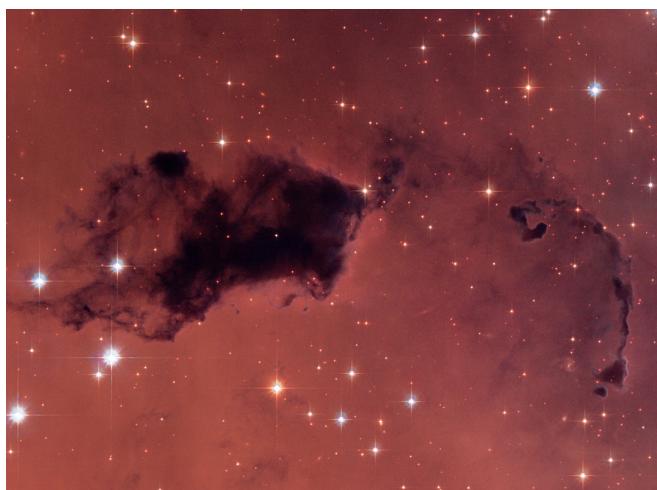


fig. 15: Globuli di Bok

Attraverso l'analisi di particolari tipi di meteoriti, detti condriti carbonacei, è possibile risalire alla composizione fisica e chimica del disco d'accrescimento e dei primi corpi formatisi al suo interno. Questi particolari meteoriti sono infatti composti da polveri che, a causa della gravità solare, sono sfuggite all'aggregazione planetaria e hanno mantenuto la loro struttura e composizione originaria. È seguito un approfondimento riguardante il fenomeno della differenziazione da parte del professor Frondini. Il processo è di particolare interesse per lo studio del Sistema Solare in quanto in grado di spiegare i fenomeni che hanno portato i pianeti a distinguersi fra terrestri e gassosi, fino a giungere allo stato attuale.

Nella zona più interna al sistema si trovano i pianeti terrestri, formati da un nucleo metallico avvolto da un mantello di silicati (la crosta non viene considerata poiché ha uno spessore irrilevante rispetto al raggio del pianeta). Questi hanno un'atmosfera più sottile e non sono in grado di trattenere elementi leggeri come l'elio. Nei pianeti terrestri si suppone che la differenziazione abbia portato i materiali più densi verso il nucleo formando via via strati di densità inferiore. Nonostante ciò si è rilevata la presenza in superficie di alcuni elementi più densi, presenza dovuta al loro mancato inserimento all'interno dei reticolati cristallini creatisi con il raffreddamento del pianeta, l'uranio ne è un esempio.

Lo studio della propagazione delle onde sismiche attraverso il mantello terrestre denota la presenza di un nucleo caldo e attivo, dimostrando che i pianeti del nostro sistema non hanno ancora terminato il loro processo di trasformazione.

I pianeti terrestri e quelli gassosi sono divisi da una fascia di asteroidi: detriti che non sono stati in grado di aggregarsi e formare un altro pianeta. Possiamo trovare asteroidi di dimensioni considerevoli nei luoghi dove sono avvenuti dei processi di amal-



fig. 16: Condrite carbonacea del diametro di pochi millimetri

Dallo studio dei meteoriti che provengono da questa zona si studiano le abbondanze di elementi nel sistema solare. Si è potuto notare, in conclusione all'evento, una curiosa particolarità: nei meteoriti, nel nostro pianeta e presumibilmente in tutti gli altri del sistema solare, gli elementi con numero atomico pari prevalgono in maniera considerevole rispetto a quelli con numero atomico dispari; risulta, inoltre, che con l'aumentare del numero atomico l'abbondanza diminuisce.

Vi aspettiamo al prossimo Caffè Scientifico!



Alberto Paolini, studente al secondo anno del dipartimento di fisica di Perugia. La sua passione non sono i gatti.

Alessandro Pascolini, studente del secondo anno della triennale in fisica. Cinefilo convinto, prima o poi aprirà la sua rubrica sulla filmografia di fantascienza.....forse.



È doveroso infine ringraziare tutti coloro che hanno contribuito alla creazione di questa prima uscita per il grande impegno profuso, per i suggerimenti che ci sono arrivati, per la stesura e la correzione degli articoli, per l'impaginazione e per la gestione dei social media.

In ordine sparso:

Lorenzo Papini,
Francesco Brizioli,
Matteo Magherini,
Leonardo Salicari,
David Pelosi,
Samuele Giuliani,
Alessandro Pascolini,
Alberto Paolini,
Lucio Moriconi,
Francesco Barberini,
Claudio Brugnoni.

Helios tramonta per ora ma, parafrasando Khalil Gibran, nulla impedirà al sole di sorgere ancora, perché oltre la nera cortina della notte c'è un'alba che ci aspetta e, nel nostro caso, un mondo di conoscenze ancora da scoprire.

Il lavoro per il prossimo numero è già iniziato e stiamo cercando nuove idee e soprattutto nuovi redattori!

Se sei interessato a partecipare scrivici ad uno dei contatti seguenti.

Al prossimo numero!

Contatti:

Facebook:

<https://www.facebook.com/aisfpg/>

Instagram:

https://www.instagram.com/aisf_perugia/

Email:

perugia@ai-sf.it



fig. 17: Statua rappresentante il dio Helios, Museo della storia naturale di Vienna.

Realizzato con la collaborazione di:



