

[la materia oscura]

anno 2 numero **4** / 6.07

asimmetrie

rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Asimmetrie cambia formato e impostazione. Gli articoli vengono sviluppati intorno a un tema centrale e presentano sia lo stato di comprensione teorica dell'argomento che il panorama della ricerca sperimentale.

Il formato è più adatto a essere conservato e in futuro i singoli temi potranno essere ripresi e aggiornati in altri numeri, per costituire un insieme di informazioni collegate e coerenti. Da questo numero la rivista raggiungerà tutti i dipendenti dell'Infn e il mondo dei giovani delle scuole superiori, in un intento vasto di formazione scientifica.

Mi auguro che la curiosità che essa susciterà possa far percepire quella sete di conoscenza che motiva noi ricercatori nel nostro lavoro quotidiano.

Roberto Petronzio
presidente Infn

La materia oscura guardiamola assieme attraverso gli occhi dei ricercatori che con teorie ed esperimenti lavorano a far luce su questo aspetto ancora misterioso della Natura. Gli astronomi hanno dimostrato che le galassie nell'universo sono tenute assieme da una forma di materia che non è quella di cui siamo fatti e che non produce luce, la materia oscura. Scovarla e capirla è una sfida attuale e appassionante: nelle pagine che seguono raccontiamo la storia sorprendente di questa esplorazione. Si percorrono diverse strade di studio e ricerca in un ambiente dinamico e competitivo, i risultati raggiunti diventano oggetto di discussioni animate tra

i ricercatori stessi e sono presentati con entusiasmo ed estremo rigore alla comunità internazionale. La novità di *Asimmetrie* è che ogni numero della rivista approfondisce un argomento e diventa una monografia.

Nella prima parte scopriremo da quali osservazioni appare inevitabile che la materia oscura esista. In seguito vedremo come con esperimenti nello spazio, in laboratori sotterranei, nei grandi acceleratori di particelle, o sfruttando il mare ed i ghiacci, i ricercatori di tutto il mondo danno la caccia alla materia oscura. Seguiamo questo racconto e lasciamoci avvincere: ne saremo incuriositi e fieri.

In alcune rubriche, che ritroverete anche nei numeri successivi, sono presentate le tecnologie create per questi esperimenti utilizzate poi in altre discipline, incontrerete i giovani ricercatori in una pagina in cui raccontano la loro esperienza, nella sezione dedicata alle news leggerete degli eventi più attuali; chi dall'esterno ci guarda, o lavora con noi, ha uno spazio per le sue riflessioni sulla ricerca. **[Andrea Vacchi]**

Il lato oscuro dell'Universo

di Antonio Masiero e Massimo Pietroni

Lampi dal passato

di Paolo de Bernardis e Silvia Masi

Indizi nello Spazio

di Piergiorgio Picozza

La forma del vuoto

di Giovanni Cantatore

E allora la fabbrichiamo...

di Giacomo Polesello

Specchi a caccia di luce dalla materia oscura

di Alessandro De Angelis

La sfida nel freddo

di Claudio Montanari

La luce di Dama

di Rita Bernabei

Dagli abissi uno sguardo verso l'Universo misterioso

di Teresa Montaruli

4

[as] radici

La singolare storia
di una lente particolare

di Giulio Peruzzi

44

14

[as] incontri

Ricercatori per un giorno

di Catia Peduto

47

18

22

[as] lavori in corso

Il punto su Lhc

di Walter Scandale

48

25

[as] tecnologia e ricerca

Intervista a Guido Roveta

di Antonella Varaschin

52

30

[as] benvenuti a bordo

Intervista a Giorgio Riccobene

di Antonella Varaschin

54

34

37

[as] news

56

40

Il lato oscuro dell'Universo

di Antonio Masiero e Massimo Pietroni

Segnali dall'oscurità

Se, avvicinandosi alla Terra di notte, un astronauta alieno pensasse che la superficie del nostro pianeta fosse tutta ricoperta dagli oceani tranne che nelle poche zone in cui si vedono le luci delle metropoli, commetterebbe un grave errore. Allo stesso modo, se noi pensassimo che l'Universo contenesse solo le cose che possiamo vedere, cioè le stelle, sbagliaremmo di grosso. Una quantità crescente di osservazioni astronomiche porta a concludere che la parte visibile del nostro Universo rappresenta solo una porzione minima del totale, quasi insignificante in termini di massa complessiva. La maggior parte della materia contenuta nel Cosmo non forma stelle o nubi di gas interstellare. Non emette e non assorbe luce, raggi X, raggi gamma o onde radio, che sono diverse forme di radiazione elettromagnetica tutte potenzialmente “visibili” dai nostri telescopi. Interagisce pochissimo con gli atomi della materia ordinaria ed è così esotica da non trovare posto sulla tavola periodica degli elementi. I fisici le hanno dato il nome di *materia oscura*. Ma se è così insolita ed evanescente come facciamo a sapere che questa materia oscura esiste, e che ce n'è così tanta?

La risposta sta nella massa e nella forza di gravità. Tutti i corpi dotati di massa, per quanto oscuri e silenziosi, risentono della forza di gravità dovuta ai corpi circostanti, e a loro volta esercitano una forza su tutti gli altri secondo leggi ben conosciute, scoperte da Galileo, Newton e Einstein. Così, studiando il moto dei corpi celesti, che è governato dalla forza di gravità, è possibile sapere quanta massa c'è nei dintorni di quei corpi. Per fare un esempio, se un giorno si scoprisse un sistema solare lontano, in cui un pianeta orbitasse attorno alla stella centrale alla stessa distanza che c'è tra il nostro Sole e la Terra ma a una velocità doppia, potremmo immediatamente concludere, in base a queste leggi, che quella stella è quattro volte più pesante del nostro Sole. Un ragionamento di questo tipo fu usato dall'astronomo Fritz Zwicky nel 1933 per stimare la quantità totale di materia contenuta nell'ammasso della Chioma, un gruppo di più di mille galassie distante trecento milioni di anni luce dalla Terra. Zwicky notò che le galassie viaggiano a una velocità così elevata che l'ammasso si disgregherebbe rapidamente se l'unica massa in gioco fosse quella visibile, delle stelle che formano le galassie. Deve esserci invece moltissima materia in più, distribuita nello spazio apparentemente vuoto tra una galassia e l'altra, in grado di tenere insieme l'ammasso con la sua forza di gravità. Una materia che però non emette alcun tipo di radiazione elettromagnetica visibile con i più sofisticati telescopi.

Era nato il problema della “massa mancante”, che oggi si preferisce chiamare materia oscura. Quaranta anni più tardi Vera Rubin, studiando la rotazione delle stelle e delle nubi di gas attorno alle galassie, mostrò che la materia oscura esiste non solo nello spazio intergalattico all'interno degli ammassi, ma che anche le stesse galassie, prese individualmente, sono composte in gran parte di materia oscura. Questo tipo di osservazioni sono state ripetute per un numero molto elevato

di galassie, tra cui la nostra Via Lattea, trovando sempre lo stesso risultato. Oggi pensiamo che ogni galassia come la nostra sia immersa in un alone di materia oscura di dimensioni molto maggiori della parte visibile della galassia stessa. Il Sole, la Terra e tutti gli altri pianeti, spostandosi nel cielo fendono questo alone, solo che non ce ne accorgiamo perché le particelle che lo compongono non interagiscono con la materia ordinaria in modo apprezzabile.

Una lente per la materia oscura

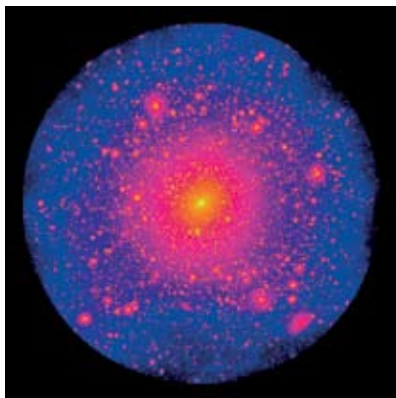
Oltre che dall'effetto sui moti di stelle e galassie, più recentemente la materia oscura è stata smascherata attraverso lo spettacolare fenomeno delle *lenti gravitazionali*.

Dato che i fotoni, le particelle che compongono la luce, portano un'energia, anch'essi risentono dell'attrazione gravitazionale dovuta alle altre forme di energia. Così, nelle vicinanze di concentrazioni di materia la luce non viaggia in linea retta ma curva, come in una lente. Il fenomeno non è nuovo ma fu osservato già nel 1919 da Sir Arthur Eddington, che riuscì a misurare la deflessione dei raggi di luce provenienti da stelle lontane a opera del Sole, fornendo così la prima prova della validità della teoria della gravitazione di Einstein.

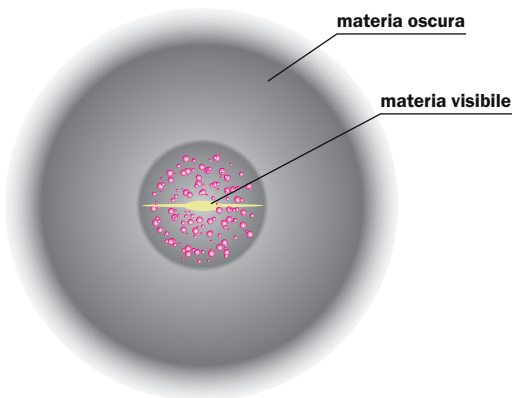
a.
Simulazione di un alone di materia oscura.

b.
Ogni galassia è circondata da un alone di materia oscura che si estende molto al di là della parte visibile, formata da una galassia (in giallo) e da "ammassi globulari" (in rosa), ossia densi raggruppamenti di stelle al di sopra e di sotto della galassia.

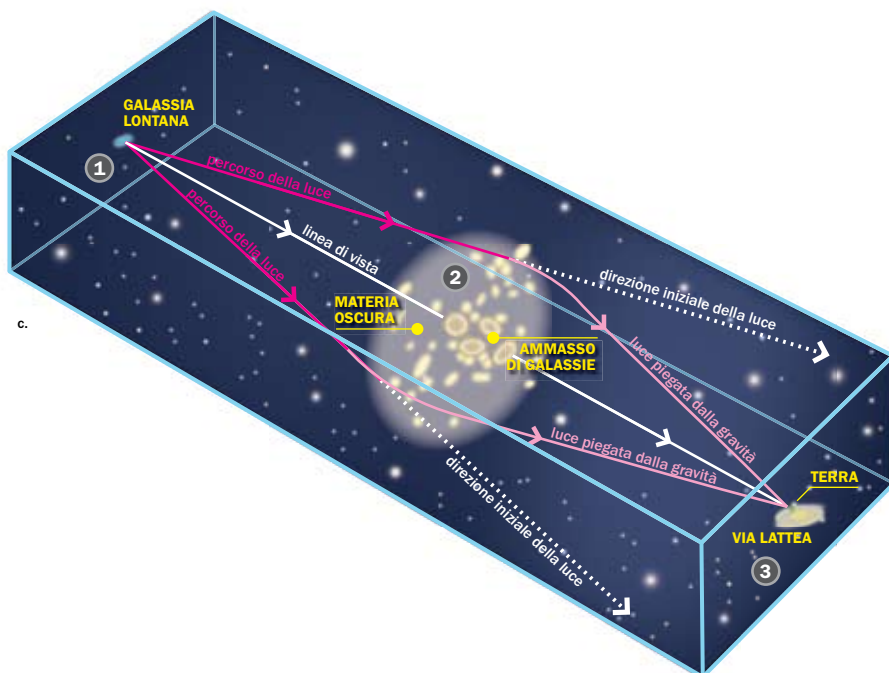
c.
Il fenomeno della lente gravitazionale. La luce proveniente da una galassia lontana viene deviata dalla materia che incontra lungo il percorso. Come risultato, dalla Terra si vedono diverse immagini della stessa galassia.



a.



b.



c.

1.
Una sorgente lontana.
La luce viene emessa da una galassia lontana ai confini dell'universo visibile.

2.
Una "lente" di materia oscura.
Parte della luce attraversa un grande ammasso di galassie circondato da materia oscura posto fra la Terra e la galassia lontana. La gravità della materia oscura agisce come una lente, piegando le traiettorie della luce.

3.
Punto focale: la Terra.
Una parte della luce viene focalizzata e diretta verso la Terra, da cui si osservano più immagini distorte della stessa galassia lontana.

2.

[as] La tecnica delle lenti gravitazionali

1.

Le lenti gravitazionali possono essere usate per determinare la quantità totale di materia, sia visibile che oscura, presente all'interno di un ammasso di galassie. Nella figura 1 si vede un esempio chiarissimo di questo effetto, osservato col telescopio spaziale Hubble.

Le numerose "lunette" sono immagini multiple di galassie lontane che si trovano al di là dell'ammasso. Se l'unica materia dell'ammasso fosse quella visibile, contenuta nelle galassie e nelle nubi di gas intergalattico, l'attrazione gravitazionale risultante non sarebbe assolutamente sufficiente a provocare una simile distorsione delle immagini delle galassie nello sfondo. Ci vuole una gran quantità di materia supplementare, che però non si vede, per spiegare foto come queste.

Un altro esempio dell'uso della tecnica delle lenti gravitazionali per rivelare la presenza di materia oscura è fornito dall'ammasso di galassie in figura 2,

che per la sua forma particolare è stato chiamato *ammasso del proiettile* (*Bullet Cluster*). Un ammasso di galassie è costituito da materia oscura e materia ordinaria, tipicamente nel rapporto di 5 a 1. A sua volta, la materia ordinaria è composta per il 90% da gas caldo, che possiamo vedere perché emette raggi X in grande quantità, mentre le stelle rappresentano il restante 10%.

In questo caso abbiamo a che fare in realtà con due ammassi distinti che si sono "scontrati" alla velocità di 16 milioni di chilometri all'ora, trapassandosi completamente e lasciandosi dietro nubi di gas caldissimo. La figura è stata ottenuta osservando i due ammassi sia con telescopi (tradizionali e a raggi X) sensibili alla sola materia ordinaria, sia attraverso la tecnica delle lenti gravitazionali, che, dalla distorsione delle immagini delle galassie nello sfondo, permette di individuare tutta la materia, ordinaria e oscura, contenuta nell'ammasso. Per agevolare la lettura della

foto, la regione che emette raggi X (il gas) è stata colorata artificialmente in rosso mentre quella in cui è presente la massa rilevata attraverso l'effetto lente è colorata in blu. Anche in questo caso, la massa contenuta nelle stelle non è assolutamente in grado di rendere conto dell'effetto lente osservato. Ma c'è di più. L'urto tra i due ammassi fornisce la rarissima opportunità di "vedere" la materia oscura separata da quella ordinaria. Infatti, si nota benissimo che la parte in rosso è più schiacciata nella regione della collisione rispetto a quella in blu. Questo può essere spiegato col fatto che nello scontro tra i due ammassi le rispettive nubi di gas caldo interagiscono tra loro e quindi si rallentano reciprocamente, mentre le nubi di materia oscura, non avendo interazioni se non quella gravitazionale, si attraversano senza influenzarsi apprezzabilmente. Una dimostrazione spettacolare della presenza di due componenti diverse, una ordinaria e l'altra oscura, all'interno degli ammassi!

Studiando gli ammassi di galassie con la tecnica delle lenti gravitazionali e con altre ancora, è possibile stimare quanta della massa complessiva sia presente sotto forma di materia oscura e quanta invece sia contenuta nel gas o nelle stelle. Il rapporto che si ottiene da questo tipo di analisi è grosso modo di cinque a uno, a favore della materia oscura.

La tecnica delle lenti gravitazionali è così promettente che si sta lavorando per applicarla non solo agli ammassi di galassie ma a porzioni sempre più estese di Universo, con l'obiettivo di ricostruire una mappa tridimensionale dell'intero Universo oscuro.

Dalla crema primordiale alle galassie

Se la materia oscura è così abbondante, senza dubbio deve aver giocato un ruolo decisivo anche in epoche remote, quelle che dall'Universo caldo e denso seguito al Big Bang hanno portato fino alla formazione delle galassie e delle strutture più complesse, come gli ammassi e i super-ammassi.

Facciamo un salto indietro di tredici miliardi di anni, impresa resa possibile dai dati sulla *radiazione cosmologica di fondo* o CMB (acronimo tratto dall'inglese *Cosmic Microwave Background*), che fornisce la "fotografia" più antica dell'Universo.

Si tratta di una mappa della volta celeste, ottenuta dal satellite Wmap (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), in cui sono

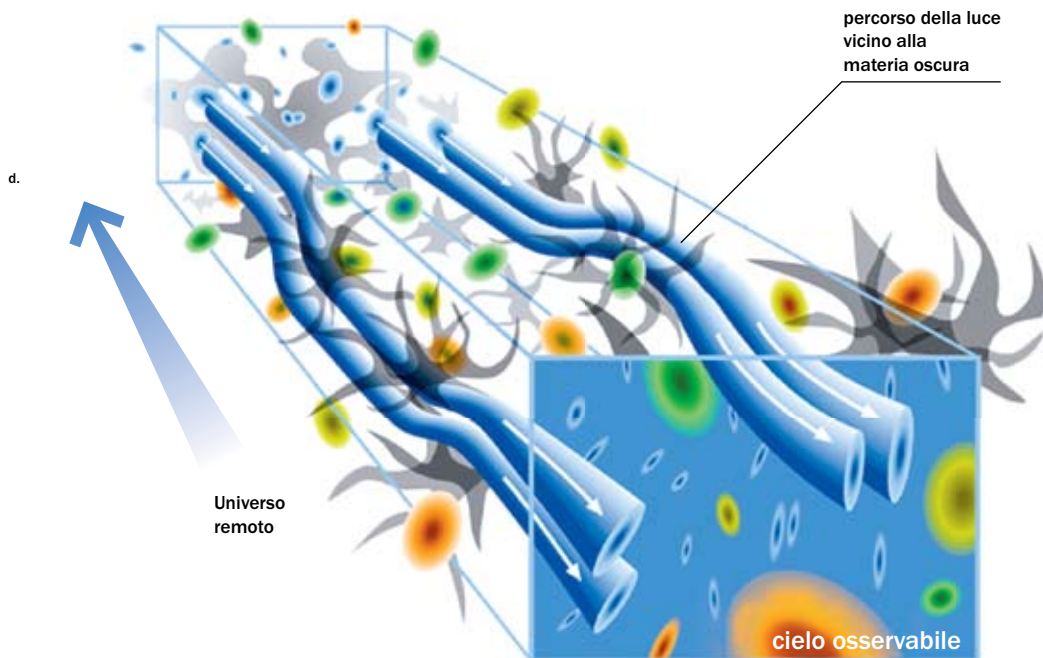
indicate le temperature delle varie zone del cielo, misurate usando i fotoni della radiazione di fondo che raggiungono la Terra da tutte le direzioni.

Questi fotoni sono stati emessi quando l'Universo aveva circa 380.000 anni ed era mille volte più caldo di oggi. In seguito hanno viaggiato fino a noi praticamente indisturbati, semplicemente raffreddandosi a causa dell'espansione dell'Universo, ma conservando l'informazione sulla struttura del Cosmo a quella data. I diversi colori corrispondono a temperature leggermente più alte o più basse del valore medio di 2,73 gradi kelvin, la temperatura attuale media dell'Universo. La differenza fra la tonalità delle macchie ci dà una misura di quanto l'Universo a quell'epoca fosse disomogeneo. Come si vede dalla scala riportata in basso, la differenza di temperatura tra i punti più caldi e quelli più freddi è molto piccola, appena lo 0,001% della temperatura media. Questo significa che l'Universo a quell'epoca era una crema calda di densità quasi perfettamente uniforme. Una situazione completamente diversa da quella attuale, in cui osserviamo invece grandi zone vuote alternate a "isole" ad altissima densità di materia. Per dare un'idea, la densità all'interno della Via Lattea è circa 100.000 volte più grande della media nell'Universo.

Che cosa ha provocato un cambiamento così drastico dalla crema omogenea degli albori all'Universo disomogeneo di oggi?

d.

Un'immagine suggestiva dell'utilizzo della tecnica delle lenti gravitazionali a porzioni estese di Universo. Le ellissi colorate rappresentano le galassie, le zone grigie sono le regioni occupate dalla materia oscura e i quattro "tubi" azzurri mostrano come si propagano, deformandosi, le immagini di quattro galassie lontane. Come si vede, in un Universo dominato dalla materia oscura la luce viaggia su traiettorie tutt'altro che rettilinee! Dalla distorsione delle immagini delle galassie lontane si cerca di risalire alla quantità e alla distribuzione della materia oscura nelle regioni che hanno attraversato per giungere fino a noi.

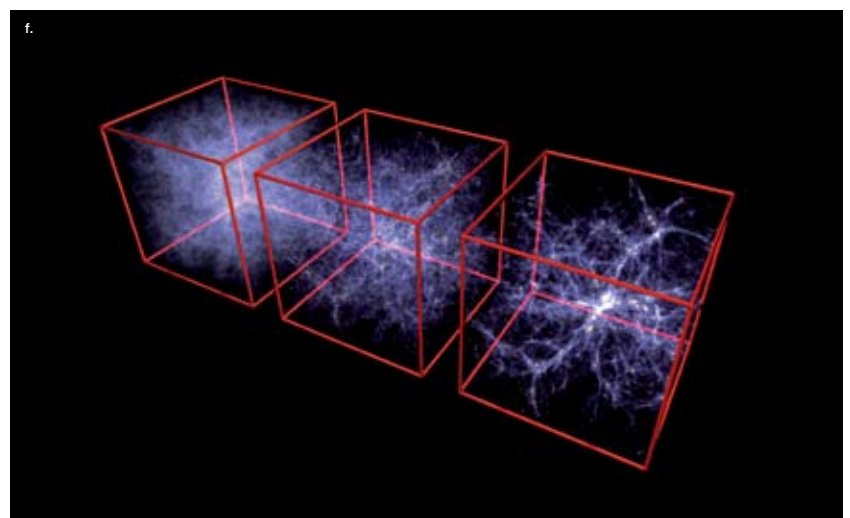
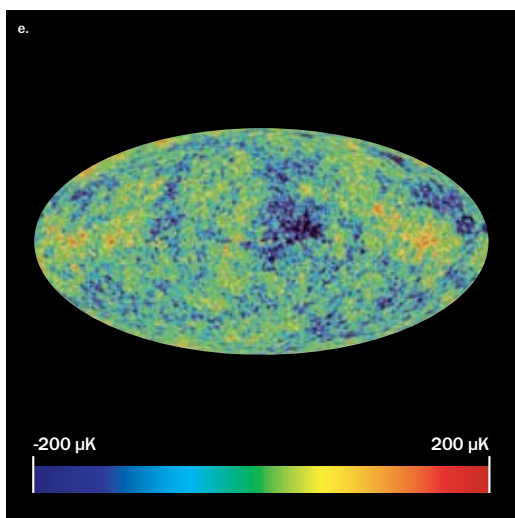


Ancora una volta la risposta è la forza di gravità. Le zone che inizialmente erano un po' più dense della media, anche se di pochissimo, esercitavano una forza di gravità maggiore rispetto a quelle un po' meno dense e cominciarono così ad attrarre materia, in tutte le sue forme, dalle zone circostanti. Il processo continuò e acquisì sempre più forza via via che questi grumi primordiali diventavano più concentrati. Nelle zone in cui la densità raggiunse i valori più elevati si crearono le condizioni per formare prima le stelle e poi le galassie e gli ammassi di galassie. Perché questo processo possa portare alla formazione di un Universo simile a quello che osserviamo oggi è indispensabile che la maggior parte della materia contenuta nell'Universo non abbia interazioni significative con i fotoni, sia cioè elettricamente neutra. Se così non fosse, le piccole disomogeneità iniziali non avrebbero potuto crescere perché la "pressione" dei fotoni si sarebbe opposta alla forza attrattiva della gravità. Per esempio, nel caso in cui fosse stata presente solo materia ordinaria la crescita delle disomogeneità sarebbe rimasta bloccata fino al momento in cui, grazie all'abbassamento della temperatura, i nuclei (positivi) e gli elettroni (negativi) poterono agganciarsi e formare così atomi neutri. Solo da quel momento in poi la materia sarebbe diventata quasi insensibile ai fotoni e la gravità avrebbe potuto cominciare ad agire indisturbata. Ma quel ritardo lo

avremmo pagato caro, e oggi la maggior parte delle strutture che vediamo nel nostro cielo, tra cui probabilmente la stessa Via Lattea, non avrebbero ancora avuto il tempo di formarsi. Come abbiamo visto, chiedere alla materia oscura di non interagire coi fotoni vuol dire impedirle di essere fatta di protoni e elettroni. Questo significa che non è possibile sperare che la materia oscura che forma gran parte delle galassie e degli ammassi odierni sia semplicemente materia normale "spenta", cioè nubi di gas freddo o pianeti troppo piccoli per diventare stelle. Tutti questi oggetti, che pure esistono, sono composti da atomi e quindi, in ultima analisi, da protoni, neutroni ed elettroni. Per la materia oscura, invece, non c'è proprio posto all'interno della tavola periodica! Oggi si parla molto di *Cosmologia di precisione*. Con questa locuzione si intende lo studio dettagliato della radiazione di fondo e della distribuzione delle strutture nell'Universo, oltre che la misura delle quantità di idrogeno, elio e altri elementi leggeri presenti nel Cosmo più profondo. Mettendo insieme tutte queste misure indipendenti, e altre ancora, è possibile ricavare una stima sempre più precisa della sovrabbondanza della materia oscura rispetto a quella ordinaria su scale di distanze pari all'intero Universo. Il risultato è in accordo con quanto osservato negli ammassi di galassie: materia oscura batte materia ordinaria cinque a uno.

e. Immagine della temperatura della radiazione cosmologica di fondo ottenuta dal satellite Wmap (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Si tratta di una vera e propria mappa delle temperature della radiazione di fondo. Un μK (micro kelvin) è pari a un milionesimo di grado kelvin.

f. Tre fasi della formazione delle strutture nell'Universo, prima delle stelle, poi delle galassie e degli ammassi di galassie, riprodotte in simulazioni al computer. I cubi rappresentano la stessa porzione di Universo, il cui lato misura oggi 300 milioni di anni luce, rappresentato all'età di un miliardo di anni (cubo di sinistra), 3 miliardi di anni (centro) e oggi (destra), che l'Universo ha 13 miliardi e mezzo di anni. Le zone in giallo indicano le regioni in cui si sono formate le stelle.



A caccia di candidati alla nomina di particella di materia oscura

Abbiamo visto finora che la maggior parte della materia presente nell'Universo è oscura (cioè non emette radiazione elettromagnetica) e più dell'80% della materia presente nell'Universo non è costituito di "materia ordinaria", vale a dire di protoni, neutroni ed elettroni. Fermo restando l'interesse "astrofisico" della prima affermazione, ciò che veramente interessa il fisico delle particelle è la seconda. Il fascino sta nella sfida di trovare validi candidati particellari di materia oscura. Prima di imbarcarci in questa ricerca, vale la pena di stabilire bene le "regole del gioco", ovvero quali requisiti debba avere una particella per entrare nella lista delle candidature valide per render conto della materia oscura.

Il primo requisito è quello di essere *stabile* o comunque avere tempi di decadimento così lunghi da non essere ancora decaduta sino a oggi, più di 13,5 miliardi d'anni dopo il Big Bang. Calcolare poi il contributo alla materia presente nell'Universo di una tale particella risulta semplice: si tratta di moltiplicare la massa della particella per il numero di particelle sopravvissute. Quest'ultima cruciale informazione si acquisisce studiando la "vita" della candidata durante i primi momenti dell'Universo. Quando ancora non è intercorso un secondo dal Big Bang, l'Universo è ancora caldissimo e le diverse particelle presenti in questa sorta di "brodo primordiale" interagiscono molto velocemente le une con le altre. Le varie specie sono tutte egualmente abbondanti, poiché le interazioni favoriscono la trasformazione di particelle da una specie all'altra, mantenendo così un equilibrio fra le diverse popolazioni. In corrispondenza al progressivo raffreddamento dell'Universo, due diversi destini attendono le varie particelle. La maggior parte di queste decade e a un certo punto l'Universo diviene così freddo da non permettere più il processo inverso in cui le particelle possono essere ricreate. Queste particelle pesanti semplicemente scompaiono dal gioco e torneranno in vita per brevissimi istanti solo 13,5 miliardi di anni più tardi, prodotte negli urti ad altissima energia realizzati nei nostri laboratori!

Completamente diversa è la sorte che attende le particelle stabili. Per loro esiste un momento decisivo che fisserà una volta per tutte il loro numero: il *disaccoppiamento*. Come può accadere a un gruppo di persone che si allontanano e per le quali diventa sempre più raro riuscire a parlarsi finché si arriva al

disaccoppiamento e ognuno prosegue per la sua strada, così per la particella stabile in esame arriva il momento in cui essa non interagisce più con le altre. Da allora in poi l'Universo diventa "trasparente" per questo tipo di particelle e il loro numero non varierà più. Si tratta di particelle "fossili" dell'Universo primordiale. Non è solo una bella "teoria": i fotoni della radiazione di fondo che abbiamo visto in precedenza, sono un esempio di particelle fossili. Si sono disaccoppiati circa 380.000 anni dopo il Big Bang e da allora vagano nel cosmo. I fotoni però non possono costituire la materia oscura che osserviamo, se non altro perché non hanno massa e la loro energia attuale è piccolissima. Quale altra particella fossile possiamo invocare per la materia oscura?

La materia oscura sfida il Modello Standard delle forze e particelle elementari

È dalla fine degli anni '60 che ogni qualvolta abbiamo una domanda che riguarda le particelle elementari e le forze fondamentali (elettromagnetica, debole e nucleare forte) la risposta giusta ci viene fornita da una teoria che è stata chiamata *Modello Standard*. Ebbene, se anche questa volta ci rivolgiamo fiduciosi al Modello Standard, l'unica risposta che riceviamo è la seguente: in una estensione del modello in cui i neutrini possiedono una massa (modifica che si è resa necessaria da quando abbiamo visto i neutrini "oscillare", si veda il numero 3 di Asimmetrie), l'unico candidato possibile di materia oscura è il *neutrino*.

Il neutrino è una particella "simpatica" (a cominciare dal nome attribuitogli da Fermi): di massa estremamente piccola, almeno un miliardo di volte più piccola di quella di un protone o di un neutrone, con interazioni col mondo circostante molto deboli, riveste però un ruolo di primo piano nella storia dell'evoluzione dell'Universo (macrocosmo) come pure nella nostra comprensione del mondo particellare (microcosmo). Sarebbe magnifico se potesse anche essere la fonte della maggior parte della materia esistente nell'Universo! Purtroppo questo non funziona per almeno due buone ragioni.

La prima è che la massa è così piccola che, moltiplicata per il numero di neutrini fossili, non riesce assolutamente ad arrivare a un'abbondanza di materia oscura comparabile a quella necessaria.

La seconda ha a che fare con l'altissima velocità, quasi uguale a quella della luce, che il neutrino possiede quando si disaccoppia, circa un secondo dopo il Big Bang. In un Universo in cui

Modello standard

Leptoni

Quark

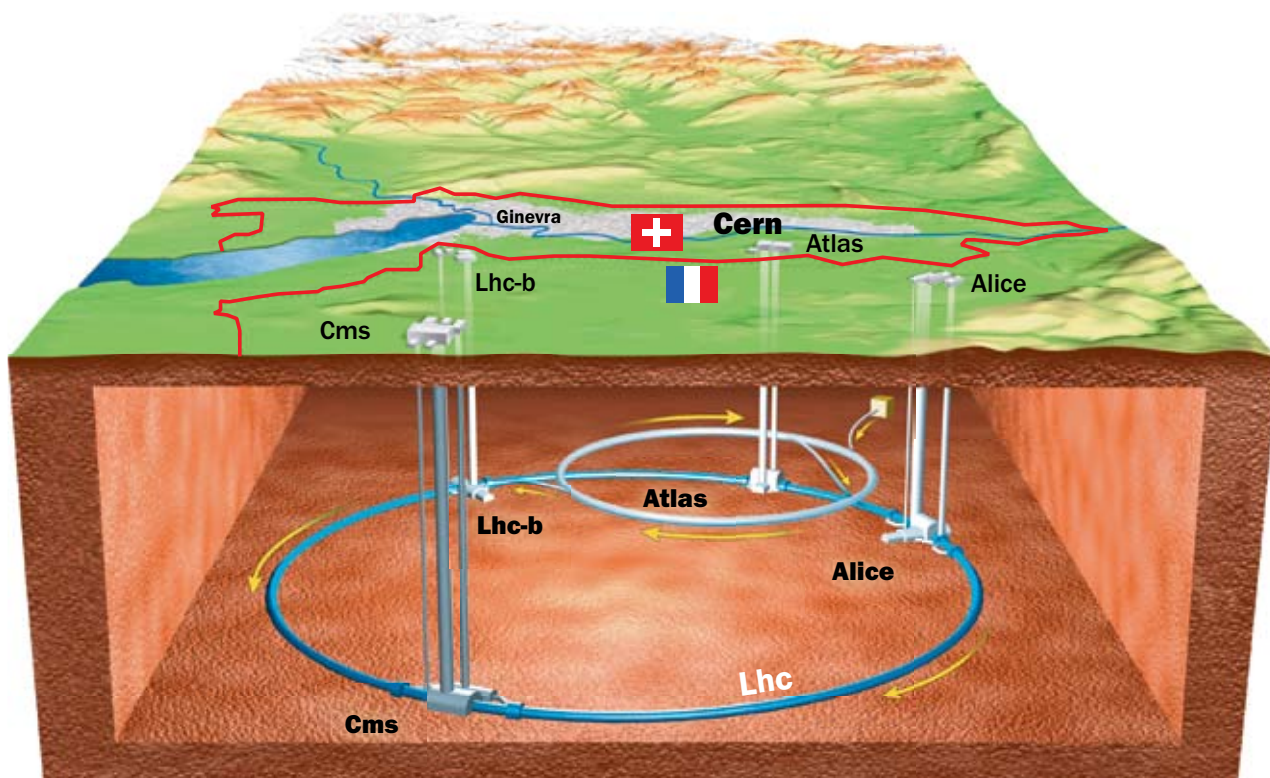
Tutta la materia ordinaria appartiene a questo gruppo	1 ^a famiglia	Neutrino elettronico  Interagisce raramente con il resto della materia. È prodotto in abbondanza nelle reazioni nucleari all'interno del Sole	Elettrone  È responsabile dell'elettricità e delle reazioni chimiche	Up  I protoni hanno 2 quark up I neutroni hanno 1 quark up	Down  I protoni hanno 1 quark down I neutroni hanno 2 quark down
	2 ^a famiglia	Neutrino muonico 	Muone 	Charm 	Strange 
	3 ^a famiglia	Neutrino del Tau 	Tau 	Top 	Bottom 
Antimateria Per ogni particella esiste una particella corrispondente, una sorta di immagine negativa					

gran parte della materia oscura fosse fatta di neutrini, la formazione delle galassie sarebbe ritardata dal rapido movimento di queste particelle. Le prime strutture a formarsi sarebbero grandi ammassi, mentre le singole galassie si formerebbero solo più tardi, per frammentazione. Ciò condurrebbe a una mappa delle strutture del nostro Universo molto diversa da quella che ci forniscono gli accurati cataloghi di galassie di cui disponiamo oggi.

Ma il neutrino non cessa di aiutarci nella nostra esplorazione: dietro al suo fallimento quale candidato di materia oscura troviamo l'importante suggerimento che potrebbe funzionare come materia oscura una particella che ha pure interazioni deboli, ma con una massa molto più alta di quella del neutrino in modo da rimanere quasi “seduta” nel momento in cui si disaccoppia. Ecco il primo ritratto di una *Wimp*.

L'importanza di essere una Wimp

Nello slang americano non è certo un complimento se dite a qualcuno che è un *wimp*, cioè un deboluccio che ha paura di tutto. Ma nel mondo delle particelle essere un wimp stabile è un grande privilegio. Infatti, Wimp è un acronimo inglese per “particella con massa che interagisce debolmente” (*Weakly Interacting Massive Particle*), e quindi siamo in presenza di una particella che ha caratteristiche simili a quelle del neutrino, ma con massa molto più alta, almeno 10 miliardi di volte più grande di quella di un normale neutrino. È proprio questa grande massa che fa sì



g.

che quando una Wimp si disaccoppia, nonostante la temperatura ancora elevatissima presente nell'Universo primordiale, esso abbia una velocità molto bassa, che è proprio quello che serve per ottenere una corretta formazione delle strutture. Ma non è tutto. Ciò che veramente ha reso la particella Wimp la star dei candidati di materia oscura è un'impressionante "coincidenza": nel calcolo del momento di disaccoppiamento e quindi del numero di Wimp oggi presenti entrano sia quantità di tipo cosmologico che caratteristiche tipiche della fisica delle particelle elementari. Ebbene, senza fare particolari assunzioni sui valori di queste varie quantità del tutto indipendenti tra loro, per un ampio intervallo di massa delle Wimp, diciamo tra 100 e 1000 volte la massa di protoni e neutroni, si ottengono valori per l'abbondanza di materia oscura in accordo con quelli necessari per rendere conto delle osservazioni astrofisiche e cosmologiche.

Wimp, materia oscura e Nuova Fisica al di là del Modello Standard

Il Modello Standard è stato soggetto ai più svariati test particellari, dalla tradizionale fisica di alta energia allo studio di processi rari e di alta precisione a energie più basse. Curiosamente, le due indicazioni più significative che abbiamo sull'esistenza di una Nuova Fisica al di là del Modello Standard non vengono dalle solite ricerche svolte negli acceleratori di particelle più potenti: si tratta infatti dell'evidenza di oscillazione - e quindi di massa - dei neutrini e della presenza di materia oscura nell'Universo. Data la molteplice e solida evidenza dell'esistenza di materia oscura e l'altresì solida evidenza che il Modello Standard delle particelle non possiede alcun valido candidato di materia oscura, consideriamo la materia oscura una forte indicazione di una Nuova Fisica al di là del Modello Standard.

È ovvia la domanda successiva: che tipo di Nuova Fisica può fornire validi candidati di materia oscura? Naturalmente, dato che l'altra evidenza di Nuova Fisica, cioè le masse dei neutrini, non ci dice quale sia questa Nuova Fisica, per andare al di là del Modello Standard non possiamo che affidarci alle motivazioni teoriche e alla incessante creatività dei fisici teorici particellari. Al momento l'estensione del Modello Standard che appare teoricamente più promettente è rappresentata dalla *supersimmetria* (Susy da *SUPER*SYmmetry), che è caratterizzata dall'importante predizione che ogni particella nota sia accompagnata da una particella *partner supersimmetrica*.

Nella maggior parte dei modelli supersimmetrici, per ragioni fenomenologiche, viene richiesto che la particella Susy più leggera sia assolutamente stabile. In gran parte dei modelli Susy tale particella

g.

Schema del laboratorio Cern, a Ginevra in Svizzera, dove in un tunnel con circonferenza di 27 km sotto alla periferia della città è in costruzione l'acceleratore di particelle Lhc. L'acceleratore Lhc ospiterà gli esperimenti Atlas, Cms, Alice e Lhc-b.

è il più leggero *neutralino* (anche il nome ci suggerisce che si tratti di una specie di neutrino, molto più pesante degli usuali neutrini).

Si potrà mai vedere una Wimp di materia oscura?

Sarebbe quasi paradossale se, dopo essere riusciti a esplorare la materia ordinaria che ci circonda fino a distanza di miliardesimi di miliardesimi di metro, poi sfuggisse alla nostra osservazione ciò che costituisce più dell'80% della materia dell'Universo. Eppure dare la caccia a una Wimp è un'impresa ardua. Sappiamo che è difficile "vedere" i neutrini. Ebbene, non solo una Wimp interagisce debolmente come fa il neutrino, ma le Wimp sono molto più rare dei neutrini.

Ci vuole grande abilità, astuzia e... un pizzico di fortuna per trovare una Wimp. La si può cercare *direttamente* quando interagisce con un rivelatore composto di materia ordinaria collocato nei nostri laboratori. Oppure si possono cercare le tracce *indirette* della presenza di particelle di materia oscura. Infatti, quando due Wimp nell'alone galattico entrano in collisione, si annichilano, e al loro posto compaiono fotoni e molte altre particelle che, in parte, possono raggiungere la Terra.

L'osservazione di queste particelle, tra le quali ci potrebbero essere neutrini e antimateria (antielettroni, antiprotoni), sarebbe una conferma dell'esistenza delle Wimp, ottenuta grazie alla loro autodistruzione. Ma vi è un ulteriore modo di "vedere" una Wimp che ci conduce al cuore del connubio tra fisica delle particelle, astrofisica e cosmologia. Si tratta della possibilità di andare oltre la ricerca delle Wimp fossili del primo Universo e di studiare le Wimp o le loro tracce tra le particelle prodotte nei nostri acceleratori. Un nuovo acceleratore, il più potente mai costruito, sta per cominciare le sue operazioni al laboratorio Cern di Ginevra: Lhc, *Large Hadron Collider*.

Oltre alla scoperta del fantomatico bosone di Higgs la cui esistenza è predetta nell'ambito del Modello Standard, lo scopo più eccitante di Lhc, diciamo pure la sua missione, è di fornirci quelle indicazioni dirette di una Nuova Fisica al di là del Modello Standard che da tanti anni cerchiamo (invano). Tra queste, primeggia proprio la Wimp della materia oscura. Sarebbe una delle più grandi conquiste della nostra sete di conoscenza se potessimo trovare la materia oscura sia con gli esperimenti a Lhc che nelle ricerche (dirette e indirette) di Wimp fossili del primo Universo.

Non solo sapremmo di cosa è fatto l'80% della materia esistente, ma saremmo riusciti a riprodurre all'interno dei nostri acceleratori di particelle un pezzetto dell'Universo di 13,5 miliardi di anni fa.

Biografie

Antonio Masiero è direttore della Sezione di Padova dell'Infn e professore ordinario dell'Università di Padova. La sua attività verte sulla ricerca di Nuova Fisica al di là del Modello Standard con particolare attenzione alle connessioni tra fisica delle particelle e cosmologia.

Massimo Pietroni è ricercatore dell'Infn della Sezione di Padova. In questi ultimi anni si è occupato principalmente del problema della materia e dell'energia oscura nell'Universo e delle sue possibili spiegazioni nell'ambito della fisica delle particelle.

Link sul web

Sulla materia oscura

www.vialattea.net/cosmo/

www.scienzagiovane.unibo.it/darkmatter.html

Un'animazione che ricostruisce lo scontro tra i due ammassi nel Bullet Cluster

<http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/media/bullet.mpg>

Un'animazione che ricostruisce l'effetto lente di una galassia lontana da parte di un ammasso di galassie

www.hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2003/32/video/d/

Varie animazioni sulla formazione e la distribuzione delle strutture cosmiche

www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/

<http://qso.lanl.gov/pictures/Pictures.html>

a.



Lampi dal passato

Una straordinaria geologia della luce per esplorare la storia dell'Universo.

di Paolo de Bernardis e Silvia Masi

Nel 1964 Arno Penzias e Robert Wilson iniziarono a modificare una grande antenna per comunicazioni satellitari, allo scopo di utilizzarla come radiotelescopio per captare microonde. Non erano mai state eseguite osservazioni del cielo nelle microonde, e i due volevano osservare l'emissione di questo tipo di fotoni nella nostra galassia. Ma, come spesso succede quando si applica una tecnologia nuova in un settore in cui non è stata mai utilizzata, Penzias e Wilson scoprirono qualcosa di importante e inaspettato. Dovunque puntassero la loro antenna, ricevevano dal cielo la stessa piccola quantità di microonde. Penzias e Wilson osservarono così per la prima volta i fotoni del *fondo cosmico a microonde*, che furono prodotti nei primi attimi dopo il Big Bang, circa 13,5 miliardi di anni fa. Quando l'Universo, 380.000 anni dopo, espandendosi, si raffreddò abbastanza da consentire la formazione dei primi atomi, questi fotoni riuscirono a "svincolarsi" dal plasma incandescente di cui era formato

l'Universo fino ad allora e a viaggiare fino al radiotelescopio dei due scienziati. Prima che si formassero gli atomi, infatti, l'Universo era un plasma di elettroni e protoni liberi. In queste condizioni i fotoni viaggiavano solo per brevi tratti, perché venivano continuamente deviati dalle interazioni con le particelle cariche. Esattamente la stessa cosa succede all'interno del Sole, dove i fotoni generati nella zona centrale potrebbero uscire dopo pochi secondi se viaggiassero indisturbati, ma impiegano decine di migliaia di anni per uscire in superficie, a causa delle continue interazioni con gli elettroni e i protoni all'interno del plasma incandescente che lo costituisce. Quando riescono a "svincolarsi", essi viaggiano nello Spazio fino ad arrivare alla Terra dopo soli otto minuti, trasportando a noi l'immagine della superficie del Sole e non del plasma incandescente al suo interno.

Allo stesso modo non possiamo osservare immagini provenienti dai primi 380.000 anni dopo il Big Bang, nei quali l'Universo era un gas incandescente. I fotoni, infatti, sono delle particelle che interagiscono molto meno con gli atomi che con gli elettroni e i protoni liberi. Dopo la formazione degli atomi, le interazioni dei fotoni con la materia divennero talmente rare che essi hanno potuto viaggiare praticamente indisturbati

fino ai nostri telescopi, attraversando, in 13,5 miliardi di anni, tutto l'Universo osservabile. E quindi trasportano una immagine fedele di come era l'Universo all'epoca della loro ultima interazione. È l'immagine dell'Universo più antica e remota che possiamo osservare. Talmente antica che l'Universo si è espanso circa mille volte nel frattempo, trasformando la luce abbagliante di allora in flebili microonde, quelle rivelate dal radiotelescopio di Penzias e Wilson. Successivamente, per studiare meglio questa immagine dei primi istanti dell'Universo è stato necessario sviluppare dei telescopi speciali e portarli al di fuori dell'atmosfera terrestre (la nostra atmosfera ostruisce infatti il passaggio delle microonde). Il primo è stato Cobe (*COsmic Background Explorer*) nel 1989, che è valso il premio Nobel a George F. Smoot e John C. Mather nel 2006. Però solo dopo l'anno 2000 esperimenti come Boomerang (*Balloon Observation Of Millimetric Extragalactic Radiation AND Geophysics*), Maxima (*Millimeter Anisotropy eXperiment Imaging Array*) e Wmap (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) hanno realizzato mappe dettagliate della radiazione del fondo cosmico a microonde. Ci sono voluti dunque 35 anni per sviluppare degli apparati sperimentali migliori di quello di Penzias e Wilson. Ma ne è valsa la pena.

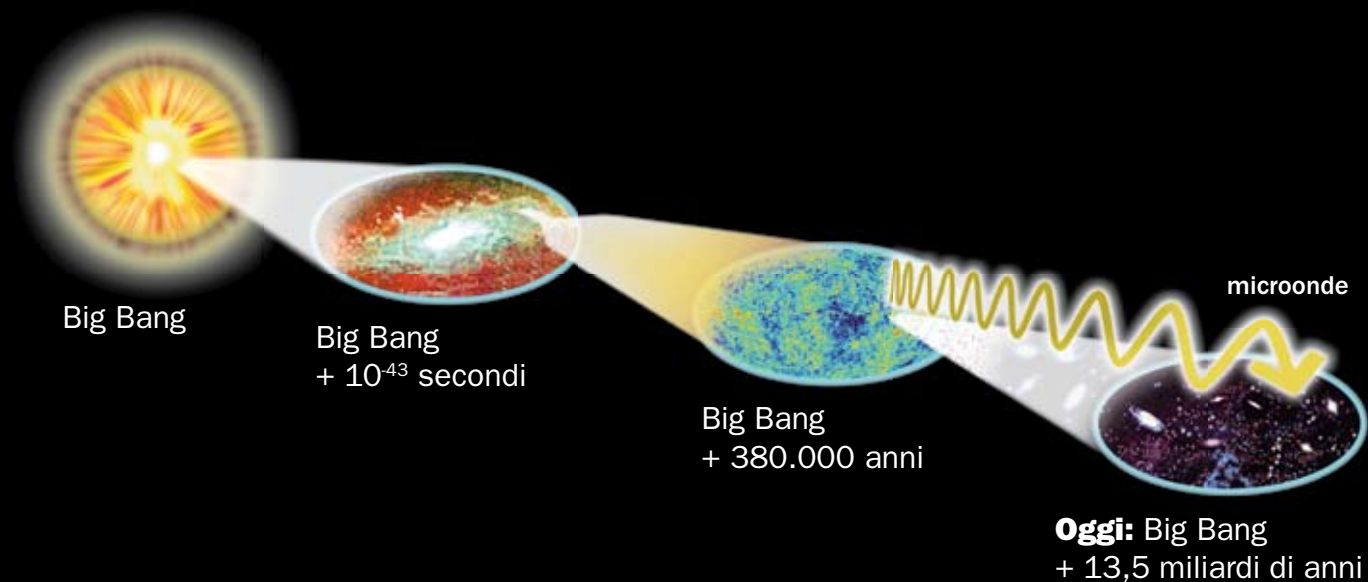
a.
Lancio della navicella Boomerang dall'Antartide nel 2003. Misurando il fondo cosmico a microonde nel 1997, 1998 e 2003 questo esperimento ha permesso di stabilire le percentuali di materia "normale" e materia oscura presenti nell'Universo.

Spettro della radiazione elettromagnetica

Radio Microonde Infrarosso Visibile Ultravioletti Raggi X Raggi gamma



La radiazione elettromagnetica consiste di onde che possono essere interpretate come particelle dotate di energia: i fotoni. All'aumentare della lunghezza d'onda dei fotoni, la loro energia decresce. La luce per noi visibile è solo una piccola parte dello spettro della radiazione elettromagnetica.



[as] Dal Big Bang alle microonde

La figura ricostruisce le principali tappe della formazione del fondo cosmico a microonde. A causa dell'espansione successiva al Big Bang, l'Universo iniziò a raffreddarsi fino a raggiungere, 380.000 anni dopo, una temperatura così bassa da consentire la combinazione di nuclei ed elettroni in atomi. A questo punto la lunghezza d'onda tipica dei fotoni si aggirava intorno al micron (millesimo di millimetro), si trattava dunque di fotoni "micrometrici" (mentre le microonde hanno lunghezze d'onda millimetriche). Da qui in poi

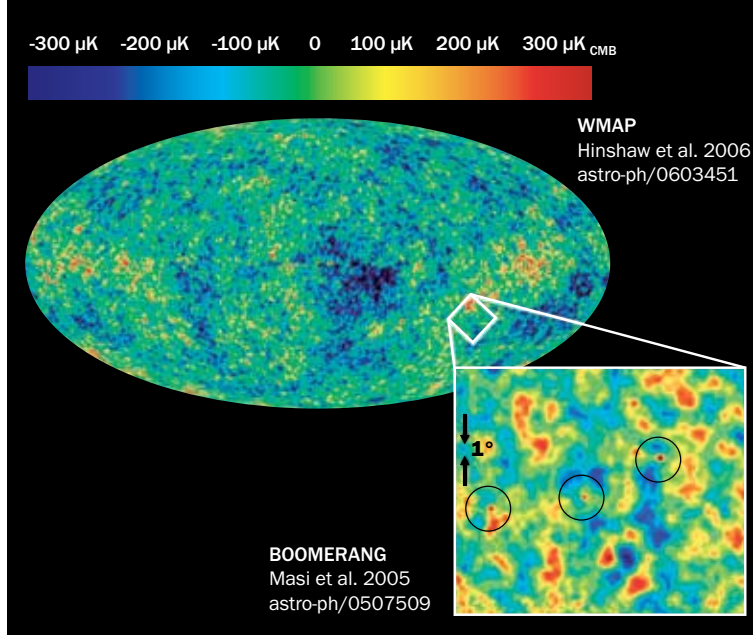
i fotoni presero a muoversi liberamente sotto l'azione della sola spinta espansiva dell'Universo, diminuendo la loro energia ovvero aumentando proporzionalmente la loro lunghezza d'onda. Oggi, dopo che l'Universo ha aumentato di un fattore 1000 le sue dimensioni, la lunghezza d'onda di questi fotoni risulta essere dell'ordine del millimetro e sono quindi rivelati dai nostri telescopi come flebili microonde, ma si tratta esattamente degli stessi fotoni presenti nel periodo di formazione degli atomi. [c. p.]

L'estrema omogeneità dei fotoni delle microonde, che si vede nell'immagine dell'Universo primordiale, ci fornisce una prima prova dell'esistenza della materia oscura. Nei primi 380.000 anni dopo il Big Bang, durante la fase incandescente dell'Universo, la materia "normale" (i protoni e gli elettroni liberi) non si sarebbe potuta aggregare per formare strutture come le galassie e gli ammassi di galassie: glielo avrebbero impedito gli urti con l'enorme numero di fotoni presente. Inoltre, partendo da una situazione di quasi completa omogeneità, come quella che si vede nell'immagine del fondo cosmico a microonde (che fotografa la situazione 380.000 anni dopo il Big Bang), il processo di aggregazione delle particelle sarebbe estremamente lento. Con calcoli quantitativi si conclude che, se l'Universo fosse formato solo da materia "normale", non ci sarebbe stato abbastanza tempo per formare le strutture che oggi vi si trovano. Gli ammassi di galassie, le galassie, le stelle oggi non esisterebbero. Noi non esisteremmo.

A meno che, già alla fine della fase incandescente, non ci fossero delle aggregazioni di materia che ha massa, ma non interagisce con i fotoni: la materia oscura. Non subendo l'effetto della pressione dei fotoni, questa ha potuto iniziare ad aggregarsi in strutture anche durante la fase incandescente. Alla fine di questa fase, materia "normale" e materia oscura si sono attratte gravitazionalmente e questo ha dato origine a grumi di massa che hanno poi fatto in modo che le strutture che oggi vediamo nell'Universo si potessero formare in tempo utile. Strutture di materia normale immerse in nubi di materia oscura, proprio come osservato a suo tempo da Fritz Zwicky e da Vera Rubin. In realtà, uno studio dettagliato dell'immagine del fondo cosmico ci fornisce anche informazioni sulla quantità di materia oscura presente nell'Universo. Studiando il livello di disomogeneità della luce (i fotoni) nell'Universo primordiale, osserviamo direttamente le condizioni iniziali del lento processo di formazione delle strutture cosmiche. E confrontando queste con la distribuzione attuale delle galassie a grande scala, capiamo che tipo di caratteristiche di aggregazione deve avere la materia



b.



c.

oscura. Le particelle di tipo “caldo”, leggere e veloci (come i neutrini), si aggregano diversamente da quelle di tipo “freddo”, lente e massive (come le Wimp). Il confronto favorisce le seconde. E permette di stabilire che la densità di materia oscura “fredda” nell'Universo è circa cinque volte più abbondante di tutta la materia “normale” che conosciamo. L'anno prossimo, le misure dell'esperimento Planck dell'Agenzia Spaziale Europea permetteranno di quantificare questa densità con grande accuratezza.

In futuro, altre osservazioni ancora più dettagliate del fondo cosmico a microonde forniranno l'entusiasmante opportunità di studiare altri aspetti della materia oscura. Si dovrà osservare il fondo a microonde nelle zone dove ce n'è di più, cioè negli ammassi di galassie. In strutture come il bullet cluster la materia oscura è separata da quella “normale”. Se fosse fatta di Wimp, come si suppone, le loro annichilazioni produrrebbero particelle cariche e queste interagirebbero con i fotoni del fondo cosmico che si trovano ad attraversare l'ammasso di galassie, cedendo loro un po' di energia. Con strumenti ad alta risoluzione, come il prossimo South Pole Telescope e il telescopio sul pallone Olimpo (il successore dell'esperimento Boomerang), sarà possibile osservare questo effetto, e da questo stabilire la massa delle particelle responsabili della materia oscura.

Oltre a fornire entusiasmanti risultati scientifici, le misure del fondo cosmico hanno fornito, per l'industria italiana, l'occasione di formare eccellenti competenze nel campo dell'ottica (p. es. telescopi fuori asse di grande diametro), della criogenia, ossia la tecnologia delle bassissime temperature (p. es. criostati spaziali per l'elio liquido) e dell'elettronica (p. es. elettronica di prossimità per sensori, sistemi di data processing di bordo), coinvolte sia nei grandi progetti spaziali (come Planck), sia negli esperimenti su pallone (come Boomerang e Olimpo). È questa una ulteriore valenza, comune a tutta la fisica sperimentale, che in una nazione moderna deve essere incentivata e valorizzata.

b.

I rivelatori dell'esperimento Hfi (*High Frequency Instrument*) sul satellite Planck dell'Agenzia Spaziale Europea. Con questo strumento sarà possibile stabilire con grande precisione la densità di materia oscura nell'Universo.

c.

Mappe del fondo cosmico a microonde “fotografate” da Boomerang e Wmap. È l'immagine più antica che possiamo ottenere dell'Universo primordiale. Il contrasto dell'immagine è stato aumentato decine di migliaia di volte per rendere visibili le tenui strutture. Nelle immagini si vede come la materia “normale” sta iniziando a concentrarsi su preesistenti strutture di materia oscura. Solo grazie a questo processo è stato possibile, nei successivi miliardi di anni, che si formassero le strutture visibili nell'Universo di oggi: galassie, ammassi di galassie, stelle e noi stessi.

Biografie

Paolo de Bernardis è professore di Astrofisica all'Università di Roma La Sapienza. La sua ricerca è focalizzata sul fondo cosmico a microonde: ha coordinato l'esperimento Boomerang e ha contribuito all'esperimento Hfi a bordo del satellite Planck, che sarà lanciato nel 2008.

Silvia Masi è ricercatrice presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma La Sapienza. Ha sviluppato diversi sistemi criogenici per esperimenti su palloni stratosferici (tra i quali Boomerang). È coordinatrice dell'esperimento Olimpo, che volerà nel 2008, e ha sviluppato un esperimento operante dalla base antartica di Dome-C.

Link sul web

<http://oberon.roma1.infn.it/boomerang/b2k/>
http://it.wikipedia.org/wiki/Materia_oscura

Indizi nello Spazio

Tre satelliti in orbita alla ricerca di tracce che rivelino la presenza di materia oscura.

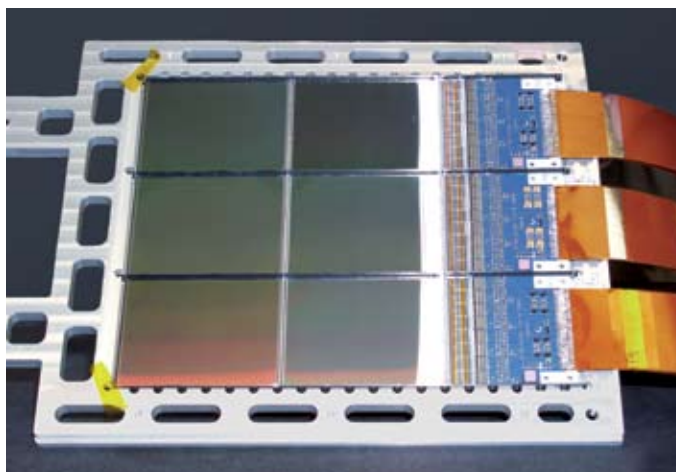
di Piergiorgio Picozza

I depositari del messaggio originario sulla nascita dell'Universo sono indizi molto lontani nello spazio e nel tempo e, tuttavia, buona parte dell'Universo sconosciuto è più vicina di quanto si pensi. La materia oscura, ad esempio, che compone la quasi totalità della materia esistente, partecipa all'ambiente in cui viviamo, portando con sé informazioni fondamentali che non è facile decifrare. Le particelle candidate a spiegare la materia oscura, infatti, sembrerebbero interagire molto debolmente con la materia cosiddetta ordinaria e non lascerebbero tracce chiaramente "visibili" del loro passaggio. Per questa ragione molti esperimenti cercano segnali in modo *indiretto*, rivelando particelle o radiazioni secondarie che devono la loro esistenza proprio alla materia oscura. Secondo le teorie supersimmetriche odierne, infatti, le particelle di materia oscura avrebbero la proprietà di annichilarsi fra loro dando origine a raggi gamma (fotoni di alta energia) e a sciame di particelle secondarie (quark, leptoni, bosoni di gauge e bosoni di Higgs). Queste ultime, poi, possono dar luogo a particelle stabili, in particolare positroni (o antielettroni) e antiprotoni, che è possibile rivelare e identificare all'interno dei raggi cosmici che colpiscono costantemente la Terra. L'osservazione dei raggi gamma e delle particelle prodotte nell'annichilazione offrono quindi un ottimo metodo di rivelazione indiretta della materia oscura. I più precisi esperimenti di questo tipo, limitati purtroppo dalle forti restrizioni di peso e di potenza elettrica, sono condotti nello Spazio per evitare le interazioni con l'atmosfera. Al

contatto con l'atmosfera, infatti, che è molto più densa della materia interstellare, gli antiprotoni e i positroni si annichilano velocemente, mentre i raggi gamma e le altre particelle cariche danno origine a sciame di nuove particelle, facendo perdere le informazioni dirette sulla loro natura. Anche nello Spazio, tuttavia, l'interpretazione di questi segnali non è sempre immediata. Antiprotoni, positroni e raggi gamma, infatti, sono generati in gran parte nell'interazione dei raggi cosmici di alta energia con il materiale interstellare. Il contributo di queste particelle dovuto all'annichilazione di materia oscura si sovrappone, quindi, a quello della normale radiazione cosmica ed è riconoscibile solo come variazione nella distribuzione in energia di quest'ultima. Se individuata e misurata tuttavia, questa variazione, che dipende dalle caratteristiche delle particelle che si annichilano e dalla loro densità nello spazio, può fornire importanti informazioni sulla materia oscura che le ha prodotte.

Tra i diversi "messaggeri", i raggi gamma offrono il vantaggio di muoversi nello spazio senza subire deviazioni da parte del materiale interstellare e, pertanto, possono contribuire a disegnare una mappa precisa degli aloni di materia oscura. I prodotti di annichilazione elettricamente carichi, invece, come elettroni, protoni, deutoni e relative antiparticelle, risentono della presenza dei campi magnetici, che ne deviano le traiettorie rendendo impossibile individuare la sorgente che li ha prodotti.

Tra i possibili, vi sono due eventi particolarmente fortunati per i ricercatori di materia oscura nello



a.

Spazio, entrambi però poco probabili. Il primo vede protagonisti due fotoni, o una particella e la corrispondente antiparticella, come unici prodotti dell'annichilazione di materia oscura. Nel caso questo si verificasse, si osserverebbe un picco nella distribuzione in energia dei raggi gamma e delle antiparticelle: un segnale molto chiaro dell'annichilazione di materia oscura che, tra l'altro, permetterebbe di determinarne con precisione la massa. Un secondo indizio distintivo sarebbe la presenza di antideutoni (antiparticella del nucleo di deuterio) che, se rivelati, sarebbero attribuiti all'interazione tra antiprotoni e antineutroni prodotti nel processo di annichilazione.

Gli esperimenti Pamela e Ams-02, dedicati alla rivelazione di particelle cariche nello Spazio, rappresentano con Agile e Glast, per i raggi gamma, la nuova sfida della comunità scientifica per lo studio indiretto della materia oscura.

Pamela

Installato a bordo del satellite russo Resurs Dk1, a un'altezza compresa tra 350 e 610 km sulla superficie terrestre, l'esperimento Pamela (*Payload for AntiMatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) è stato messo in orbita il 15 giugno 2006 da un razzo Soyuz-U, lanciato dalla base di Bajkonour in Kazakistan.

Il primo obiettivo di Pamela è rispondere ad alcune delle più affascinanti domande poste dall'astrofisica e dalla cosmologia: dalla natura della materia oscura che pervade l'Universo, all'apparente assenza di antimateria nel Cosmo, fino all'origine e l'evoluzione della

materia nella Galassia. Pamela, però, ha anche obiettivi molto più "vicini", legati all'attività del Sole e all'interazione dei raggi cosmici con la magnetosfera terrestre.

La caratteristica peculiare di questo rivelatore satellitare è la capacità di determinare con grande precisione la composizione e l'energia dei raggi cosmici, in particolare degli elettroni, positroni, antiprotoni e nuclei leggeri che vi contribuiscono, e di rivelare eventuali antinuclei, in un intervallo di energia tanto ampio da coprire ben cinque ordini di grandezza: da alcune decine di MeV (milioni di elettronvolt) ad alcune centinaia di GeV (miliardi di elettronvolt).

Per queste ragioni, Pamela è un apparato ideale per la ricerca di antimateria e di segnali di materia oscura.

Frutto di una collaborazione tra Infn, Asi (Agenzia Spaziale Italiana), l'agenzia spaziale e quattro istituti di ricerca russi, un'università tedesca e un istituto politecnico in Svezia, Pamela è attualmente la missione spaziale più avanzata per l'esplorazione della radiazione cosmica.

Il cuore di Pamela è costituito da uno spettrometro magnetico, uno strumento in grado di separare le cariche negative da quelle positive - e quindi la materia dall'antimateria - e di determinare il rapporto tra la quantità di moto (il prodotto della massa di un oggetto per la sua velocità) e la carica elettrica delle particelle e dei nuclei. Per separare gli elettroni dagli antiprotoni, che hanno entrambi carica elettrica negativa e quindi nello spettrometro sono indistinguibili, e i positroni dai protoni (che hanno invece carica positiva), Pamela è dotato

a.
Parte del tracciatore
dell'esperimento Pamela.

di alcuni rivelatori complementari. Tra questi, il calorimetro al silicio permette di riconoscere gli sciami di particelle prodotti dagli elettroni e dai positroni, che interagiscono con esso, da quelli prodotti dai protoni e dagli antiprotoni; mentre un secondo strumento è dedicato al conteggio dei neutroni, che essendo neutri sono invisibili allo spettrometro. Il segnale di un insieme di scintillatori, inoltre, funziona da “consenso” all’acquisizione dei dati da parte dell’intero apparato.

Questo sistema permette anche di determinare il valore della carica elettrica di particelle e nuclei e di separare, grazie a misure di tempo, le particelle che vengono dall’alto da quelle che entrano dal basso dello strumento. Un ulteriore insieme di scintillatori identifica poi le particelle che entrano nello strumento dai lati.

Le diverse parti di Pamela sono state integrate presso l’Infn in un unico apparato che ha una sezione di 70x70 cm², un’altezza di 130 cm e un peso di 470 kg. Lo strumento è stato quindi calibrato al Cern e, prima di essere installato sul satellite presso i laboratori della TsSKB-Progress a Samara in Russia, ha subito tutti i test di vibrazione previsti per gli strumenti spaziali.

Glast

Glast (*Gamma-ray Large Area Space Telescope*) è uno strumento per la rivelazione di raggi gamma. Fornirà un’immagine molto dettagliata del cielo nella regione ad alta frequenza, proseguendo le ricerche già iniziate da Egret (*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*), a bordo del *Compton*

Gamma Ray Observatory.

Nel corso della sua missione, Glast permetterà di scoprire migliaia di *nuclei galattici attivi* e centinaia di *gamma ray burst* e rivelerà i raggi gamma provenienti da numerose *pulsar*. Inoltre, potrà fornire preziose informazioni sui periodi di formazione delle stelle e delle galassie, sui meccanismi di accelerazione dei raggi cosmici e, non ultimo tra i suoi obiettivi, cercherà tracce di materia oscura, rivelando possibili decadimenti di particelle esotiche e processi di annichilazione delle Wimps nell’alone della Via Lattea.

In uno sforzo di sintesi e di interpretazione unitaria di tutte queste informazioni, Glast esplorerà le interconnessioni fra la gravità e la fisica quantistica osservando le emissioni originate da fenomeni violenti, come le esplosioni di supernova e i gamma ray burst, o da sorgenti esotiche come nuclei galattici e stelle di neutroni.

La missione Glast è il frutto di una collaborazione internazionale in cui convergono comunità di astrofisici e di fisici delle particelle elementari di Italia, Stati Uniti, Francia, Germania, Giappone e Svezia. La sua struttura, dal peso totale di circa tre tonnellate, posa su due elementi basilari: il Lat (*Large Array Telescope*), per la determinazione dell’energia e della direzione di arrivo dei raggi gamma nell’intervallo fra 20 milioni e oltre 300 miliardi di elettronvolt, e il Gbm (*Gamma ray Burst Monitor*) per l’osservazione di segnali con energie variabili, fra 5 mila e 30 milioni di elettronvolt, correlati con i raggi gamma rivelati dal Lat.

Il Lat ha una struttura a moduli basata su 16

b.

Immagine pittorica di Glast. Sullo sfondo la Terra ripresa dalla sonda Galileo nel 1992.

c.

Agile pronto al lancio, il 23 aprile scorso dalla base Sriharikota di Chennai-Madras, in India.

d.

Le 16 torri del Lat (*Large Array Telescope*) di Glast. Ogni torre contiene un tracciatore e un calorimetro per la determinazione, rispettivamente, della direzione di arrivo e dell’energia del raggio gamma incidente.

b.



c.



elementi identici, chiamati “torri”. Ogni torre è costituita da un tracciatore e un calorimetro elettromagnetico. Il tracciatore, formato da rivelatori al silicio alternati a piani di tungsteno, ha la funzione di trasformare i raggi gamma in coppie positrone-elettrone, la cui traiettoria viene registrata nel silicio al fine di determinare la direzione di arrivo del fotone. Il calorimetro invece misura l'energia della coppia e da essa è poi possibile risalire all'energia del raggio gamma incidente.

L'apparato è stato completato e testato e sarà messo in un'orbita circolare a 665 km di altezza nei primi mesi del 2008 con un razzo Delta 2 Heavy, dalla base americana Kennedy Space Flight Center di Cape Canaveral, in Florida.

Agile

Dal 23 aprile scorso, Agile (Astro-rivelatore Gamma a Immagini Leggero) orbita a un'altezza di 550 km sulla superficie terrestre, dopo essere stato portato sul satellite italiano Mita da un razzo indiano partito dalla base Sriharikota di Chennai-Madras, in India. Prima tra le piccole missioni scientifiche programmate alcuni anni fa dall'Asi e realizzata in stretta collaborazione con Infn, Inaf (Istituto Nazionale di Astrofisica) e alcune università italiane, Agile è destinato a esplorare campi importantissimi dell'astrofisica delle alte energie. Il vasto programma scientifico comprende la rivelazione di nuclei galattici attivi e di gamma-ray burst, lo studio dell'emissione gamma di pulsar, fino all'identificazione di nuove sorgenti galattiche. Di particolare importanza

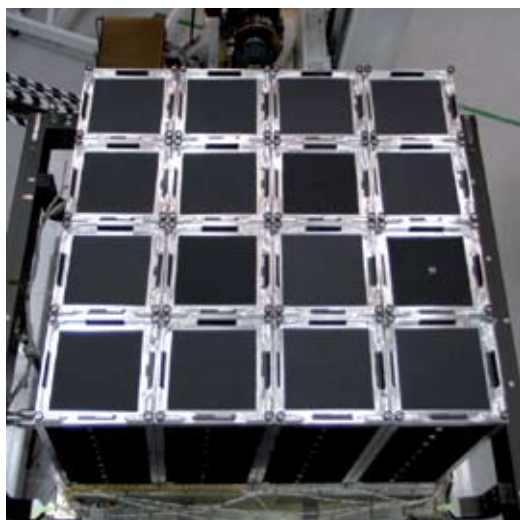
saranno anche gli studi sull'emissione diffusa di raggi gamma galattici ed extragalattici, che porteranno un fondamentale contributo alle nostre conoscenze sui raggi cosmici e le ricerche sulle emissioni violente del Sole, le *solar flares*. Il rivelatore, nel suo complesso, ha la caratteristica esclusiva e originale di combinare, in un unico strumento - un cubo di 40 cm di lato dal peso di 120 kg - rivelatori di raggi gamma di energie tra 30 milioni e 50 miliardi di elettronvolt e di raggi X fra 15 e 60 mila elettronvolt.

Questa particolarità gli consentirà di studiare sorgenti e fenomeni in evoluzione, che si manifestano contemporaneamente con l'emissione di radiazioni di energie molto diverse tra loro.

Un elemento centrale di Agile è il *silicon tracker*, il tracciatore al silicio. È dedicato in particolare alla rivelazione dei raggi gamma ed è composto da 28 piani a microstrip di silicio intervallati da uno strato di tungsteno. Qui i fotoni gamma incidenti si possono trasformare in una coppia elettrone-positrone e sono rivelati grazie al segnale emesso dal passaggio nel silicio di queste particelle; la traiettoria di queste ultime, poi, permette di capire da quale direzione è arrivato il fotone. Per misurare l'energia delle coppie prodotte, sotto il tracciatore è posizionato un piccolo calorimetro formato da sedici barre di cristallo, che ha anche la capacità di rivelare rapidamente eventuali gamma ray burst.

Sopra al tracciatore è posto lo strumento Super-Agile, dotato di un rivelatore al silicio per i raggi X e di un sistema per determinare la loro direzione di arrivo.

d.



Biografia

Piergiorgio Picozza è professore ordinario di Istituzioni di Fisica Nucleare e Subnucleare e direttore della sezione Infn dell'Università di Roma Tor Vergata.

È responsabile internazionale dell'esperimento Pamela, membro del consiglio scientifico della missione Agile e collabora alla missione Glashow.

La forma del vuoto

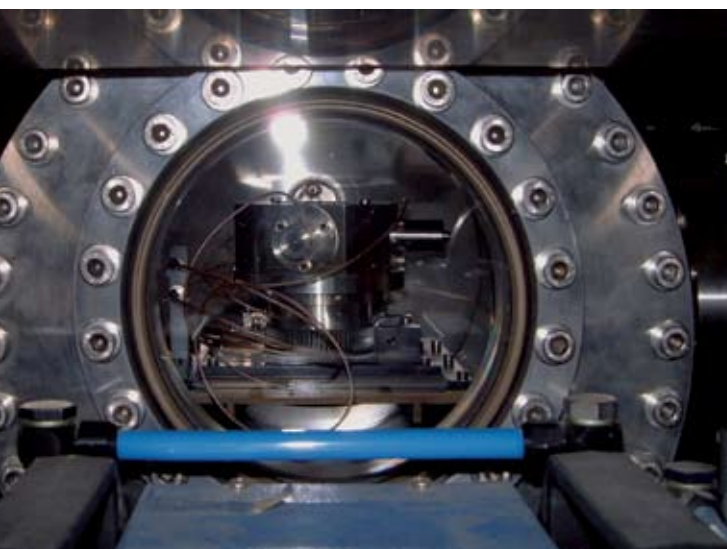
Una luce laser, un campo magnetico e il vuoto: ecco gli ingredienti che potrebbero essere utili per svelare la composizione della “massa mancante” dell’Universo.

di Giovanni Cantatore

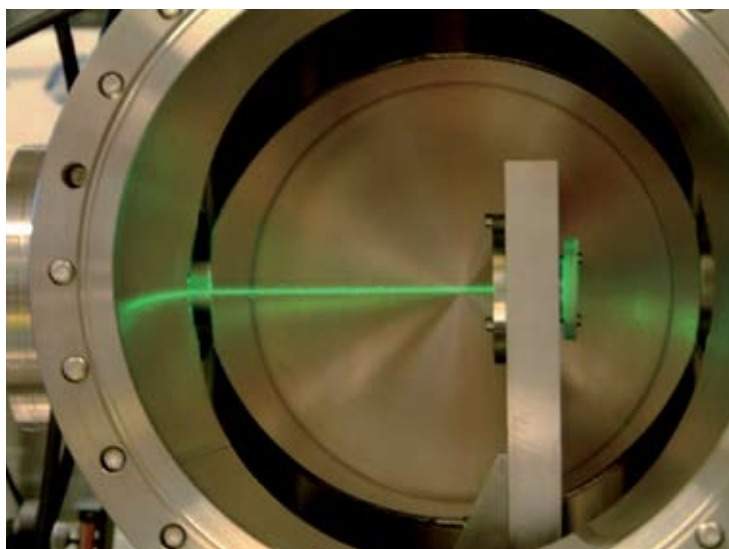
Potrebbe essere lo studio del vuoto, l’elemento più abbondante dell’Universo, a far luce sulla materia oscura. Dal punto di vista della meccanica quantistica, il vuoto non è semplicemente quello che rimane dopo aver tolto tutto, bensì lo stato di energia minima possibile. Secondo il principio di indeterminazione, nel vuoto quantistico, per brevissimi intervalli di tempo, vengono continuamente create e poi annichilate coppie particella-antiparticella. Questo “ribollire” del vuoto non è in media rivelabile, così come è difficile vedere l’acqua di un laghetto alpino calmo e cristallino. Se però si lancia un sasso nel laghetto, le onde permettono di accorgersi della presenza dell’acqua. Nel caso del vuoto, gli ingredienti sono un campo magnetico, il sasso, e una luce laser polarizzata, per vedere le “onde”. La luce polarizzata è fatta di perturbazioni elettromagnetiche che vibrano sempre parallelamente a se stesse, come cavalli che saltano senza scartare.

Le minutissime variazioni della polarizzazione di questa luce ci danno informazioni dirette sulla struttura del vuoto (si tratta di misurare angoli dell’ordine di 10^{-11} radianti: per avere un’idea provate a pensare all’angolo sotteso, guardando dalla Terra, da una moneta da un euro posta sulla Luna).

a.



b.



Che cosa ha a che fare tutto ciò con la materia oscura? Quando i fotoni del fascio laser interagiscono con il campo magnetico è possibile che si generino delle particelle neutre leggere dello stesso tipo di quelle che si pensa si siano create all'inizio dell'Universo e abbiano contribuito, con la loro gravità, a formare la struttura granulare su scala galattica che vediamo nel cosmo attuale. Queste ipotetiche particelle sono stabili e interagiscono rarissimamente con la materia ordinaria. Ne dovrebbe perciò ancora esistere una gran quantità, "reliatto" dei primi istanti del cosmo, la cui massa totale potrebbe essere proprio la misteriosa "massa mancante". La produzione e la rivelazione di queste particelle mai viste prima, direttamente in un laboratorio terrestre, costituirebbero una scoperta di grandissima importanza.

Il vuoto quantistico perturbato da un campo esterno è studiato da un gruppo di ricercatori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare nei Laboratori Nazionali di Legnaro con un sofisticato apparato in grado di rivelare le flebili interazioni tra un campo magnetico e i fotoni di un fascio laser polarizzato (l'esperimento si chiama Pvlas, che sta per Polarizzazione del Vuoto con LASer).

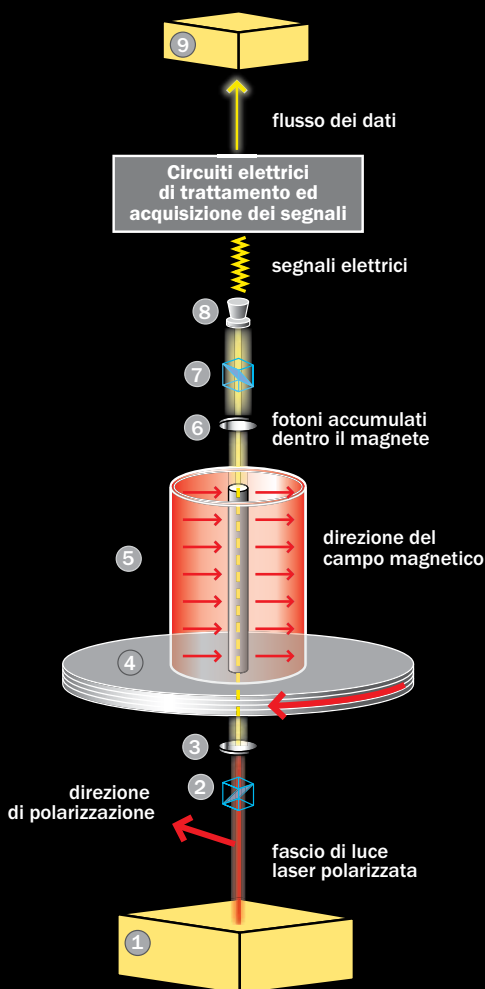
Il principio della misura è molto semplice e consiste nel far passare della luce polarizzata attraverso due prismi polarizzatori incrociati. Se lungo il suo percorso, che include anche una zona di campo magnetico, la polarizzazione della luce non subisce modifiche allora, all'uscita del secondo polarizzatore, ci sarà buio, altrimenti filterà una piccola quantità di luce contenente le informazioni sui processi fisici che hanno causato la variazione della polarizzazione stessa.

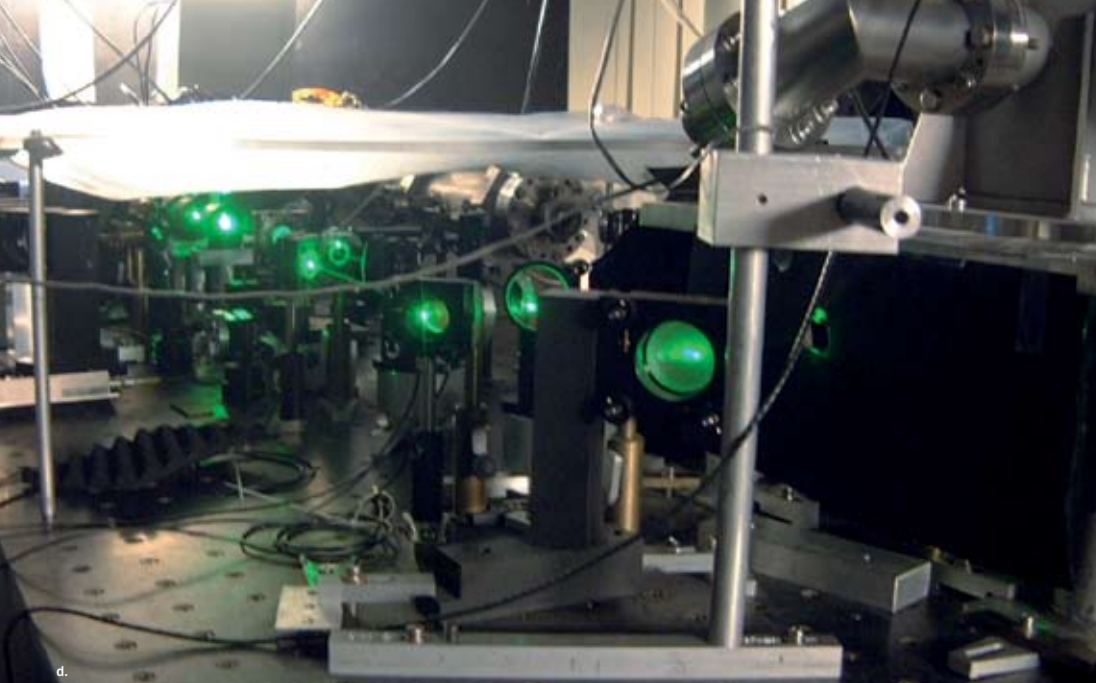
- a. Strumentazione ottica in vuoto.
- b. Laser verde che si riflette da uno specchio ottico multistrato ad altissima riflettività.
- c. Schema dell'esperimento Pvlas.

c.

Pvlas

1. Laser infrarosso (sintonizzato con il Fabry-Pérot).
2. Prisma polarizzatore di ingresso.
3. Specchio del Fabry-Pérot.
4. Tavola rotante ("giriadischi").
5. Magnete Superconduttore.
6. Specchio del Fabry-Pérot.
7. Prisma polarizzatore di uscita.
8. Fotodiode di rivelazione della luce trasmessa.
9. Calcolatore.





d.

La realizzazione pratica ha però comportato il superamento di sfide scientifiche e tecnologiche di non poco conto per l'estrema piccolezza degli effetti da rivelare. Si utilizza un magnete superconduttore lungo un metro immerso in un bagno di elio liquido in grado di generare un campo magnetico 100.000 volte più intenso di quello terrestre. E ci si avvale anche di un particolare dispositivo, detto "risonatore ottico di Fabry-Pérot", in grado di accumulare i fotoni all'interno del magnete anche per circa un millesimo di secondo (si pensi che un fotone libero impiegherebbe tre miliardesimi di secondo per attraversarlo).

Ma ciò ancora non basta. Si immagini per esempio di osservare di notte le luci di una città e di voler individuare la fioca luce di una particolare piccola finestra accesa. Non c'è speranza di riuscirci a meno che il proprietario della finestra, da noi preventivamente istruito, non accenda e spenga la luce a una certa frequenza concordata. Nel caso del nostro esperimento questa condizione si realizza ruotando fisicamente, con l'equivalente di un grosso giradischi, tutte e cinque le tonnellate

di peso del magnete e del criostato che lo tiene nel suo bagno di elio liquido.

La polarizzazione della luce potrebbe quindi squarciare il velo su uno dei misteri più fitti della scienza moderna. I ricercatori di PVLAS non si sono però accontentati di una sola finestra su queste elusive particelle, ma stanno organizzando la caccia con tutti i mezzi a disposizione. Se, infatti, le particelle vengono prodotte a partire dai fotoni che viaggiano all'interno del magnete principale, allora un fascio di queste, grazie alla loro debole interazione con la materia ordinaria, esce e si propaga dove i fotoni sarebbero bloccati dalle pareti opache dell'apparato.

Un secondo magnete può allora essere usato per intercettare il fascio di particelle e far sì che un certo numero di loro si riconverta in fotoni "rigenerati", del tutto identici agli originali. Questo tipo di esperimento, ora in corso di montaggio ai Laboratori Nazionali di Legnaro, viene poeticamente definito *light shining through a wall* o "luce che brilla attraverso i muri". Un risultato positivo farebbe certamente molta luce sul mistero della materia oscura.

d.

Vista del banco ottico inferiore di PVLAS con i componenti ottici attraversati da un fascio laser verde.

Biografia

Giovanni Cantatore, dopo la laurea in fisica, si è subito occupato di esperimenti sulla struttura del vuoto con tecniche ottiche, allora in fase iniziale al Cern di Ginevra sotto la guida di Emilio Zavattini. Trasferitosi negli USA, ha lavorato, come membro della collaborazione Brookhaven-Fermilab-

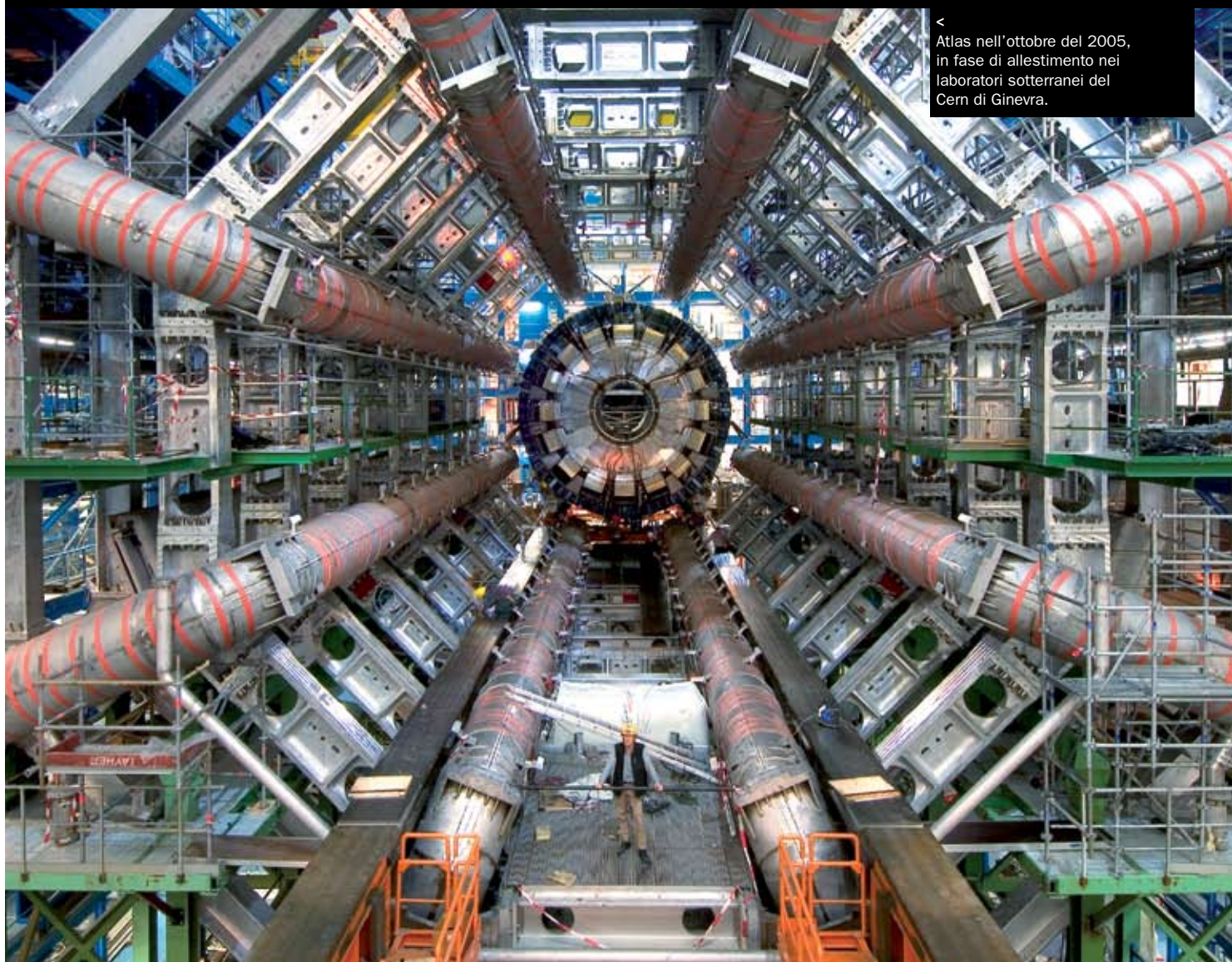
Rochester-Trieste, al primo esperimento per lo studio dell'interazione tra un fascio laser e un campo magnetico in vuoto.

È attualmente professore associato all'Università di Trieste e dal 2000 riveste il ruolo di responsabile nazionale dell'esperimento PVLAS.

E allora la fabbrichiamo...

Protoni fatti scontrare a velocità vicine a quella della luce per riprodurre le condizioni iniziali dell'Universo: così si crea la materia oscura in laboratorio.

di Giacomo Polesello



< Atlas nell'ottobre del 2005, in fase di allestimento nei laboratori sotterranei del Cern di Ginevra.

Della materia oscura conosciamo l'età e la quantità relativa. Esiste da quando è nato l'Universo ed è cinque volte più abbondante della materia "normale", quella di cui siamo fatti. Queste certezze offrono agli scienziati un'opportunità di indagine alternativa e complementare alla ricerca della materia oscura già presente in natura: produrla *artificialmente* in laboratorio, ricreando per tempi brevissimi le condizioni che hanno caratterizzato i primi istanti dell'Universo. Per quanto strano possa sembrare un simile *laboratorio cosmico*, i fisici sfruttano già da tempo strumenti in grado di produrre a livello microscopico condizioni ed energie estreme: sono i collisori, i grandi acceleratori di particelle la cui storia nasce nei laboratori di Frascati negli anni '60 e '70 del ventesimo secolo, e prosegue in tutto il mondo sino a giungere a dimensioni e caratteristiche sempre più avanzate. Il collisore elettrone-positrone Lep del Cern di Ginevra, ad esempio, costruito nel tunnel che sarà ora utilizzato dal nuovo acceleratore Lhc, aveva una circonferenza di ben 27 km.

In un collisore le particelle viaggiano in direzioni opposte e, dopo essere state accelerate a velocità prossime a quella della luce all'interno di un tubo a vuoto, sono fatte scontrare frontalmente con l'obiettivo di generare, a partire dall'energia resa disponibile nell'urto, nuove particelle. Un qualsiasi oggetto in movimento, infatti, è dotato di una forma di energia, detta *cinetica*, tanto più alta quanto più alte sono la sua velocità e la sua massa. Secondo la teoria della relatività di Einstein, inoltre, anche un corpo in quiete, se ha massa, ha un'energia detta *di riposo* e le due forme di energia, cinetica e di riposo, possono trasformarsi l'una nell'altra. Quando due particelle si scontrano a velocità vicine alla velocità della luce, quindi, l'energia disponibile può trasformarsi in massa, dando luogo alla formazione di particelle pesanti che prima dell'urto non esistevano. Se questo avviene, nei prodotti dell'urto si possono trovare particelle già note ed eventualmente altre ancora sconosciute: proprio tra queste ultime i fisici si aspettano di identificare e studiare anche le particelle di materia oscura.

Ricerche di questo tipo sono in corso al Fermilab di Chicago, nel collisore Tevatron, e sono condotte accelerando protoni e antiprotoni per realizzare urti a un'energia

di duemila miliardi di elettronvolt. Per avere un'idea delle quantità in gioco, questo valore è paragonabile all'energia cinetica di un moscerino di un milligrammo, in volo a 3 km/h. La natura, certo, offre quotidianamente manifestazioni di energie ben superiori e il valore dell'energia, infatti, non è in sé particolarmente significativo. L'aspetto davvero rilevante, invece, è che nel collisore l'energia prodotta è tutta concentrata nel volume di un protone, un miliardo di miliardi di miliardi di miliardi di volte più piccolo del volume occupato dal moscerino. Un grande acceleratore, quindi, può essere visto come un concentratore che realizza in uno spazio piccolissimo una eccezionale densità di energia. Il valore dell'energia, poi, diventa più significativo se si considera che, data la sua piccolissima massa, per avere molta energia cinetica il protone deve essere accelerato a velocità vicine alla velocità della luce, cioè la massima possibile. Gli urti tra particelle, inoltre, sono molto rari e per aumentarne la probabilità si è costretti a far scontrare "nuvole" di protoni e antiprotoni, composte da un numero enorme di particelle: sommando le energie di tutte le particelle accelerate nel collisore, si passa così dall'energia del moscerino a quella di un autotreno lanciato a 100 km/h!

Per quanto elevati, anche questi valori di energia possono non essere sufficienti a produrre particelle di massa relativamente grande, come le particelle candidate a spiegare la materia oscura. Inoltre, non tutta l'energia cinetica fornita dall'acceleratore è spesa per produrre nuove particelle. I protagonisti degli "incontri ravvicinati" al Fermilab ad esempio, i protoni e gli antiprotoni, sono particelle composite, i cui costituenti fondamentali sono quark e gluoni.

La produzione di nuove particelle avviene proprio grazie all'interazione tra queste particelle fondamentali ossia più precisamente, un costituente del protone e uno dell'antiprotone.

Essendo coinvolti nell'urto solo alcuni dei costituenti fondamentali, soltanto una frazione dell'energia viene utilizzata per la produzione di nuove particelle e la restante parte viene portata via da quei costituenti che hanno avuto il ruolo di semplici "spettatori". Per questa ragione, l'energia resa disponibile al Tevatron permette di coprire solo una parte dell'intervallo in cui è

probabile produrre materia oscura e questo limite ha spinto gli scienziati a raggiungere energie ancora più elevate.

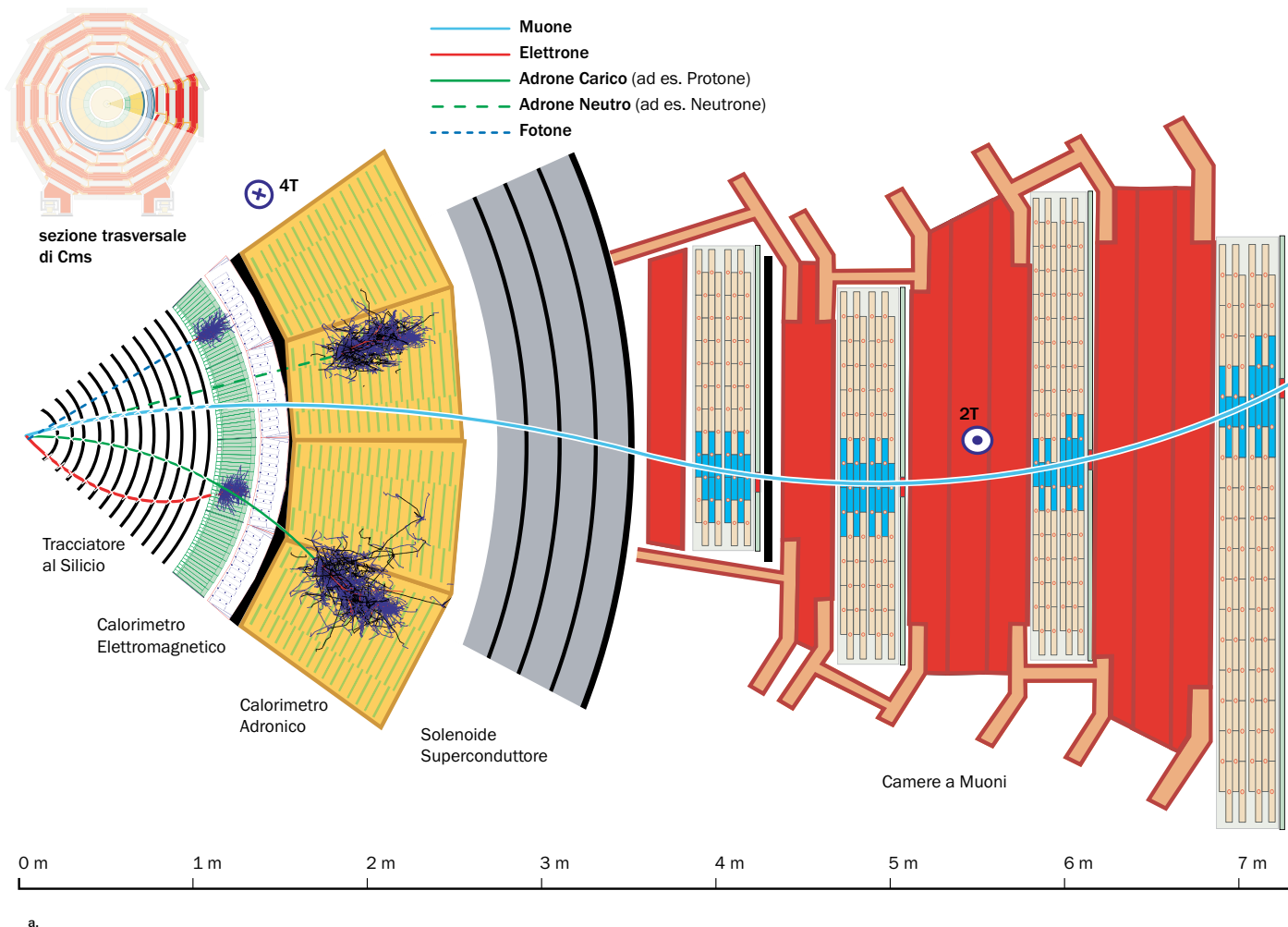
Il prossimo passo in questa direzione sarà Lhc (*Large Hadron Collider*), il collisore protone-protone in via di completamento al Cern di Ginevra, che comincerà a produrre collisioni entro un anno. Qui opereranno due grandi esperimenti, Atlas e Cms, la cui costruzione ha richiesto circa quindici anni di lavoro da parte di circa 2000 fisici per ognuno dei due esperimenti, con una determinante presenza italiana.

Se Lhc dovesse osservare un candidato di materia oscura, diverrebbe fondamentale misurarne con precisione le proprietà per confermarne la natura. Gli esperimenti a Lhc saranno in grado di misurare solo una parte di queste proprietà e, presumibilmente, sarà necessario un apparato in grado di eseguire misure più precise prima di poter dire la parola finale su tale identificazione. Un acceleratore di questo tipo è già in via di progettazione: si tratta dell'Ilc (*International Linear Collider*), un collisore elettrone-positrone di mille miliardi di elettronvolt di energia, che potrebbe entrare in attività entro quindici-venti anni.

Ma cosa si cercherà esattamente con gli esperimenti che a Lhc si occuperanno di materia oscura?

Speculazioni teoriche basate su misure astronomiche e cosmologiche propongono come principali candidati per la materia oscura le Wimp (*Weakly Interacting Massive Particle*), particelle pesanti che interagiscono debolmente con la materia. Simili particelle avrebbero masse dell'ordine di un centinaio di volte della massa del protone. La Supersimmetria, una delle più accreditate tra le nuove teorie della fisica delle particelle elementari, offre un eccellente candidato per la materia oscura: il neutralino, una particella stabile, come richiesto dalle teorie cosmologiche, con una massa di qualche decina volte superiore a quella del protone, come suggerito dai precedenti esperimenti al Lep del Cern.

Indipendentemente dalla natura del candidato, le particelle protagoniste della materia oscura hanno caratteristiche peculiari che ne rendono la rivelazione particolarmente delicata. Il fatto che le Wimp siano debolmente interagenti, ad esempio, determina caratteristiche uniche



della strategia di rivelazione. La probabilità che una di queste particelle interagisca con la materia, e che sia quindi possibile rivelarla, è molto bassa; in caso contrario, i numerosi urti con la materia ordinaria, dall'epoca della loro formazione fino ad oggi, le avrebbero fatte certamente scomparire. Per osservarle in modo *diretto*, per rivelare cioè proprio le particelle di materia oscura e non altri segnali indiretti della loro presenza, è quindi necessario disporre di un numero molto elevato di tali particelle, oppure di un rivelatore di altissima massa. Per gli esperimenti di rivelazione diretta di materia oscura naturale, quelli cioè che captano i segnali della sua presenza nel Cosmo, il numero di particelle non sarà un problema: la materia oscura è cinque volte più abbondante della materia di origine nota! Nel caso della materia oscura prodotta in laboratorio, invece, si tratta, nel migliore dei casi, di identificare qualche decina di migliaia di particelle in tutto. Negli esperimenti sulla materia oscura che utilizzano gli acceleratori, potendo disporre di poche particelle "oscure" e di rivelatori di massa limitata, si deve ricorrere a una tecnica di rivelazione di tipo *indiretto*. Nelle interazioni ad alta energia, infatti, non si produrrà direttamente la materia oscura, ma particelle più pesanti. Le nuove particelle sono instabili e si disintegrano in un tempo infinitesimo, trasformandosi in altre particelle note e nella particella candidata a essere la materia oscura. Se le particelle che costituiscono la materia oscura naturale, quella già presente nel Cosmo, sono *sopravvissute* dalla creazione dell'Universo - il Big Bang - fino ad oggi, dobbiamo concludere che esse sono stabili e non possono disintegrarsi. E anche se sfuggono dal rivelatore senza lasciare traccia se ne può comunque dedurre l'esistenza indirettamente. Il lavoro dei fisici, in questo caso, è proprio quello di rivelare e misurare i prodotti della disintegrazione delle particelle pesanti prodotte in ciascuna collisione e, da qui, risalire alla loro proprietà e all'identificazione della eventuale particella di materia oscura che sfugge dal rivelatore. I rivelatori sono progettati con una struttura a strati concentrici attorno al punto in cui avviene l'urto all'interno di un tubo di qualche centimetro di diametro, e ogni strato è concepito per rivelare le caratteristiche delle particelle che lo attraversano (ad esempio carica, velocità, energia, quantità di moto), fino a ricostruire nel modo più dettagliato possibile la realtà che si è venuta a creare

a.

Schema rivelatore

Lo schema di principio dei grandi rivelatori: vari strati concentrici misurano diverse particelle e le loro proprietà per ricostruire al meglio ciò che si è prodotto nell'urto protone-protone. Atlas e Cms, ad esempio, hanno scelto tecnologie diverse e complementari per realizzare i vari strati.

Per visualizzare il comportamento delle diverse particelle in un rivelatore si veda:

http://cmsdoc.cern.ch/cms/outreach/html/CMSdocuments/DetectorDrawings/Slice/CMS_Slice.mov

dopo l'urto. Nella loro struttura complessiva, tutti i rivelatori rispettano la caratteristica basilare dell'*ermeticità*: per quanto possibile, ogni particella prodotta nell'interazione ad alta energia deve attraversare una zona sensibile del rivelatore (anche se può non essere rivelata, come nel caso delle particelle "oscure"), in modo che nessuna informazione vada persa e che i principi di conservazione non possano apparire violati per dei limiti strumentali. In realtà ciò è possibile solo in modo approssimato, perché alcune particelle prodotte nell'interazione restano nel tubo in cui sono accelerati i protoni e non possono quindi essere rivelate. La conservazione delle caratteristiche globali dell'interazione, pertanto, è approssimativamente valida solo nel piano perpendicolare alla direzione in cui si muove il fascio.

La possibilità di eseguire una misura indiretta di materia oscura è garantita da due tra i più fecondi principi della fisica: il principio di conservazione dell'energia e il principio di conservazione della quantità di moto (che si ottiene moltiplicando la massa di un oggetto, o di una particella, per la sua velocità). In ogni interazione, come ad esempio una collisione, l'energia totale e la quantità di moto complessiva delle particelle si *conservano*: dopo l'urto, cioè, ciascuna quantità rimane invariata, anche se le particelle possono essere diverse da quelle iniziali. L'energia delle particelle che interagiscono è nota ed è determinata dai parametri dell'acceleratore, l'energia delle particelle prodotte, invece, è calcolabile a partire dai segnali che esse rilasciano nel rivelatore.

In base ai principi di conservazione, quindi, la somma delle energie e delle quantità di moto delle particelle che collidono devono avere il medesimo valore anche per le particelle finali rivelate. Se le due somme sono differenti, se si osservano cioè energia e quantità di moto *manca*nti, è possibile dedurre che il rivelatore è stato attraversato da nuove particelle che non hanno interagito, e quindi risultano invisibili, come atteso per la materia oscura. La rivelazione, cioè, avviene in modo apparentemente paradossale: le particelle oscure vengono notate per la loro assenza tra i prodotti finali rivelabili, e non per la loro presenza, e sono quindi viste "in negativo". In questo modo, è possibile dedurre l'esistenza, ma anche misurare le proprietà, come la massa o la tendenza a interagire con altre particelle, attraverso uno studio dettagliato degli altri prodotti della disintegrazione. Grazie a tali misure si può calcolare anche con quale probabilità due particelle di materia oscura si annichilano vicendevolmente producendo particelle note e, in base a questo calcolo, risalire alla quantità di materia oscura ancora presente nell'Universo. Questo è utile, tra l'altro, per prevedere se il segnale dell'annichilazione di materia oscura può essere rivelabile con esperimenti già dedicati allo studio di fotoni cosmici ad alta energia. I risultati ottenuti con gli acceleratori, inoltre, permettono di calcolare la probabilità con cui una particella di materia oscura interagisce con un blocco di materia e influire, in questo modo, sui risultati degli esperimenti che rivelano la materia oscura cosmica in modo diretto.

I diversi approcci sperimentali forniscono indizi complementari per la risoluzione del mistero.

Gli esperimenti con gli acceleratori, da soli, non possono infatti affermare la scoperta della materia oscura, possono solo produrre particelle che manifestano proprietà con essa compatibili. D'altra parte, un segnale positivo da uno o più degli esperimenti dedicati alla materia oscura naturale confermerebbe che questa è composta di particelle elementari e, tuttavia, non ci darebbe informazione sufficiente per collocare le particelle scoperte in un quadro d'insieme che ci permetta di aumentare la nostra comprensione delle fasi iniziali dell'Universo. Solo dalla coincidenza tra le predizioni, rese possibili dalle misure con acceleratori, e i risultati degli altri esperimenti si potrà giungere all'affermazione che l'enigma della materia oscura è definitivamente risolto. Tale risultato sarebbe un trionfo straordinario per la fisica contemporanea, in quanto permetterebbe di unificare i due campi di frontiera della fisica fondamentale, quello dell'infinitamente piccolo e quello dell'infinitamente grande, in un'unica visione dell'universo che ci circonda.

Biografia

Giacomo Polesello si è laureato in Fisica a Milano nel 1985. È ricercatore presso la sezione Infn di Pavia. Lavora in Atlas fin dall'inizio dell'esperimento con diversi incarichi di rilievo tra cui, dal 2003 al 2006, quello di coordinatore della fisica.

Link sul web

<http://atlas.ch>
<http://cms.cern.ch>
<http://public.web.cern.ch/public>
<http://www-cdf.fnal.gov/public/index.html>
<http://www-d0.fnal.gov/public/index.html>

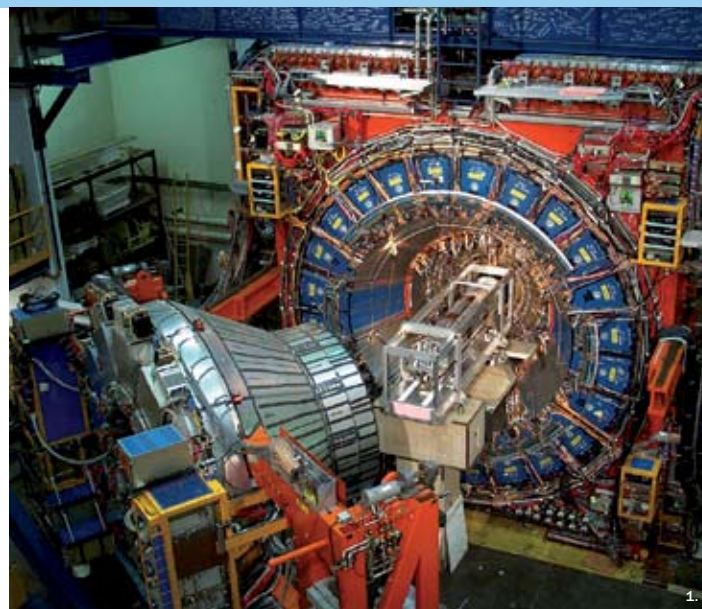
[as] Al di là dell'Atlantico

1.

Il rivelatore Cdf aperto, nel corso del lavoro di aggiornamento nel 2001: si può vedere l'inserimento del tracciatore ad alta precisione nel rivelatore centrale.

L'acceleratore Tevatron ai laboratori Fermilab negli Stati Uniti è il più potente acceleratore in attività, con energia di collisione di 2 teraelettronvolt (2000 miliardi di elettronvolt). L'acceleratore è completato da due rivelatori, chiamati Cdf (*Collider Detector at Fermilab*), con una forte partecipazione di fisici dell'Infn, e D0.

Gli esperimenti al Tevatron vantano una storia gloriosa culminata negli anni '90 nella scoperta di un nuovo quark, il quark top, e in misure ad altissima precisione che hanno dato un contributo fondamentale alla nostra comprensione della natura. Conclusa una fase di aggiornamento che aveva lo scopo di potenziare le capacità del rivelatore, attualmente Cdf e D0 stanno raccogliendo nuovi dati, con l'obiettivo, tra l'altro, di scoprire la particella di Higgs e osservare i primi segnali di un'estensione della fisica conosciuta, che potrebbe gettare luce sul problema della materia oscura.



[as] In Europa

2.

Il rivelatore Cms è stato assemblato principalmente in superficie e ogni strato, ciascuna con peso dell'ordine del migliaio di tonnellate, è stato poi calato nella caverna sotterranea.

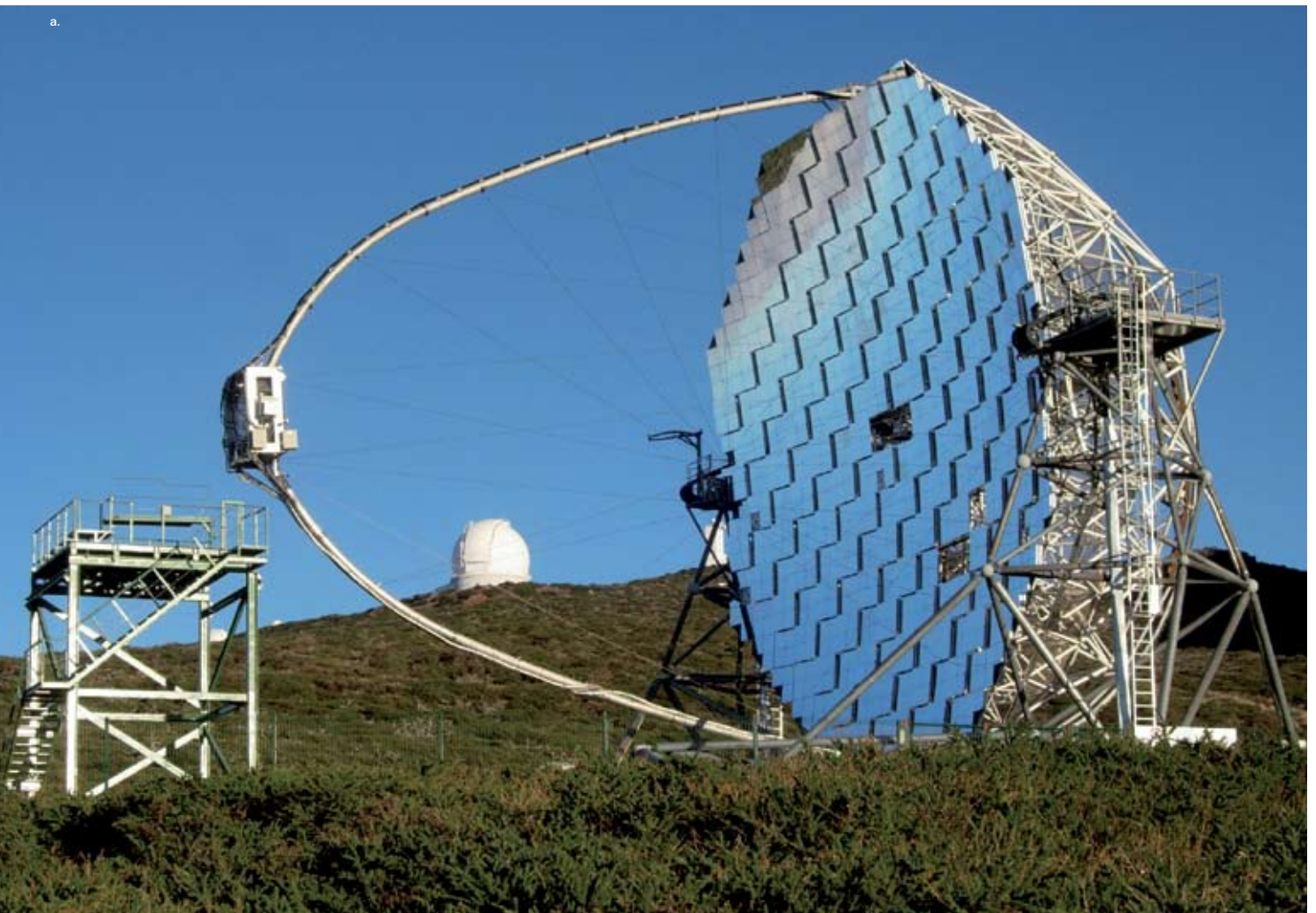
Per misurare le particelle prodotte negli urti ad altissima energia nell'acceleratore Lhc del Cern di Ginevra, sono stati costruiti due rivelatori estremamente complessi e di grandi dimensioni, Atlas e Cms. La realizzazione degli apparati e del software di controllo e analisi dati per questi esperimenti hanno visto una determinante presenza dell'Infn, con importanti contributi dell'industria italiana nella costruzione di magneti superconduttori con caratteristiche da record. Il rivelatore Cms (*Compact Muon Solenoid*) è lungo 21,5 m, alto 16 m e pesa 12.500 t. La sua struttura è basata su un magnete solenoidale, costituito da una bobina superconduttrice lunga 13 m con un diametro di 6 m, che genera un campo magnetico di 4 tesla centomila volte più intenso del campo magnetico terrestre: è il più grande superconduttore al mondo. All'interno della regione di campo magnetico sono situati un *tracciatore di silicio*, in grado di registrare le tracce delle particelle con grande precisione, e il sistema calorimetrico, per misurarne l'energia. Un elemento chiave è il calorimetro elettromagnetico ad alta risoluzione

costituito da circa 80.000 cristalli di tungstenato di piombo. Attorno al solenoide è disposta una struttura di ferro ad anelli, all'interno della quale sono situati i rivelatori per la misura della traiettoria dei muoni, le particelle più penetranti e quindi in grado di attraversare indisturbate tutto il rivelatore. Il rivelatore Atlas (*A Toroidal Lhc Apparatus*) ha dimensioni colossali: è lungo 44 m e alto 22 ed è situato in una caverna posta a circa 100 m sottoterra. Allontanandosi dalla regione in cui avviene l'interazione tra i fasci di particelle, si attraversa in successione il tracciatore, il sistema calorimetrico e il rivelatore per muoni. La forma esterna di Atlas è determinata dal sistema di rivelazione di muoni, basato su un innovativo magnete, alla cui costruzione l'Infn ha contribuito in modo fondamentale. Esso è costituito da otto bobine superconduttrici alte 25 metri e disposte in modo da creare un anello magnetico attorno al rivelatore. L'obiettivo di questo gigantesco magnete è di curvare la traiettoria dei muoni, uniche particelle cariche in grado di attraversare quasi indisturbate la parte centrale del rivelatore e raggiungere lo strato più esterno.

Specchi a caccia di luce dalla materia oscura

Magic, Hess, Veritas e Cangaroo: sono i quattro grandi telescopi che scrutano il cielo alla ricerca dei fotoni di altissima energia prodotti dalla materia oscura.

di Alessandro De Angelis



Sono dei giganti che stando sulla Terra vanno alla ricerca dei messaggeri della materia oscura provenienti dallo Spazio, e usano degli specchi come strumenti per catturarli: sono i telescopi gamma di tipo Cherenkov.

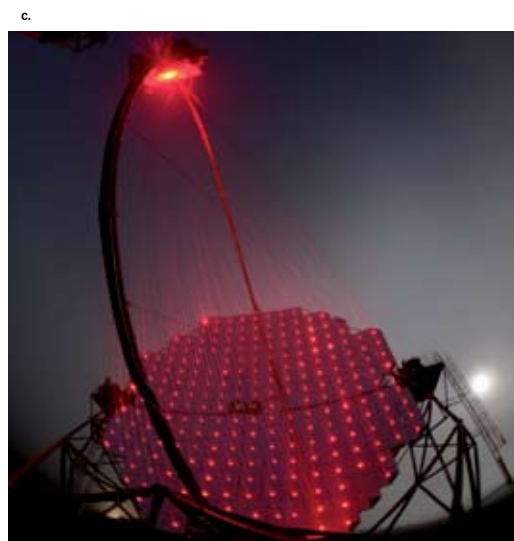
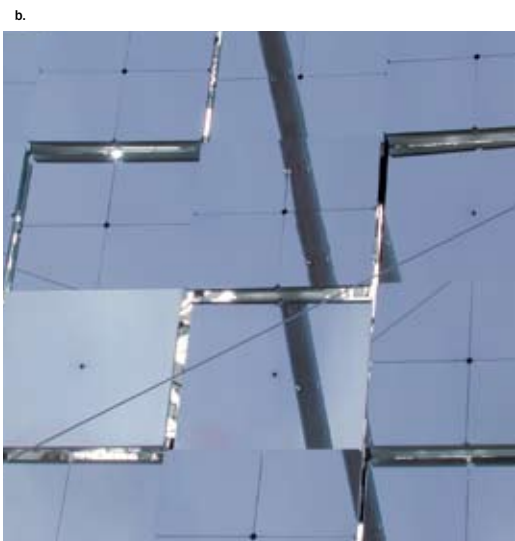
Uno dei candidati più accreditati a spiegare le osservazioni astrofisiche sulla materia oscura è la Wimp (*Weakly Interacting Massive Particle*). Quando due Wimp si incontrano, possono annichilarsi: questo processo di annichilazione è osservabile dai rivelatori di raggi gamma, perché gran parte dell'energia prodotta si presenta sotto forma di fotoni gamma dotati di energie corrispondenti alla massa delle Wimp in base alla nota relazione $E=mc^2$, e con caratteristiche che consentirebbero di distinguerli dal rumore di fondo generato dalle altre sorgenti astrofisiche. Il primo problema sperimentale è, quindi, rivelare questi fotoni gamma di altissima energia.

Quando essi interagiscono con l'atmosfera terrestre producono sciame di particelle, che emettono un tenue lampo di luce per il cosiddetto "effetto Cherenkov" (l'analogo ottico del "bang" sonoro degli aerei supersonici).

È solo da pochi anni che possiamo osservare fotoni gamma di energia superiore a 100 GeV (gigaelettronvolt), ossia di energia equivalente alla massa di un centinaio di protoni, e ci siamo riusciti proprio grazie ai nuovi rivelatori: i grandi telescopi gamma di tipo Cherenkov. Questi strumenti accoppiano una tecnica tipica dell'astronomia (lo specchio concentratore parabolico) e una tecnica tipica della fisica delle particelle (la rivelazione di un segnale

debolissimo mediante fotomoltiplicatori ed elettronica sofisticata). Ma dove puntare i telescopi alla ricerca dei fotoni gamma che vengono dall'annichilazione di materia oscura? Dobbiamo cercare quei luoghi nei quali possa esservi alta densità di Wimp, ad esempio in prossimità di buchi neri, dove la materia (sia luminosa sia oscura) viene convogliata dall'attrazione gravitazionale. È più conveniente, inoltre, cercare sorgenti vicine poiché il segnale si attenua in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza (come l'intensità della luce di una lampadina). Ecco perché le prime ricerche sono rivolte a galassie satelliti della Via Lattea e a sorgenti di raggi gamma non identificate nel vicino Universo, oltre che al centro della Via Lattea stessa, dove è presente, nella costellazione del Sagittario, un buco nero supermassiccio, dotato di una massa equivalente a qualche milione di masse solari. Recentemente le collaborazioni degli esperimenti Magic (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope*), a La Palma nelle Canarie, e Hess (*High Energy Stereoscopic System*), in Namibia, hanno rivelato l'emissione di fotoni gamma di altissima energia proprio dalle vicinanze del buco nero nel centro galattico. Non si può escludere che tale segnale sia la prima evidenza di annichilazione di materia oscura, anche se questa regione è ricca di sorgenti di raggi gamma di natura astrofisica, che potrebbero generare fotoni gamma con le stesse caratteristiche di quelli osservati. La massa della particella che sarebbe in grado di spiegare

- a. Il telescopio Magic sul cratere del vulcano Taburiente a La Palma a 2.250 metri sul livello del mare.
- b. Particolare degli specchi di Magic.
- c. Il telescopio Magic e il suo sistema di controllo attivo di puntamento degli specchi.



un segnale come quello rivelato è dell'ordine della decina di TeV (1 TeV corrisponde a 1000 GeV), cioè superiore a quella prevista dai modelli attuali. Sono state studiate da Magic anche altre galassie vicine, per le quali il moto delle stelle sembra incompatibile con la distribuzione della materia visibile: per fornire una spiegazione dei fenomeni osservati, viene così chiamata in causa l'ipotesi dell'esistenza della materia oscura. La misura è però difficile perché richiede di accumulare molti dati in quanto, come detto, il segnale si attenua con la distanza. I primi risultati sulla galassia Draco, satellite della Via Lattea, non rivelano i segnali attesi, mentre una lunga e accurata raccolta di dati è in corso sulla radiogalassia M87, che è un ottimo candidato perché vi sono state osservate delle anomalie gravitazionali. Le misure descritte in precedenza sono abbastanza "dirette", perché evidenziano i prodotti secondari dell'annichilazione delle particelle di materia oscura. I telescopi gamma consentono anche una misura indipendente seppure indiretta della quantità di materia oscura, e anche dell'ancora più misteriosa "energia oscura" che controlla l'evoluzione dell'Universo governandone l'espansione. Questa misura si basa sul fatto che fotoni gamma provenienti da regioni lontanissime, come quelli che arrivano dai collassi gravitazionali nei nuclei delle galassie, viaggiano per centinaia di milioni di anni in uno spazio che si deforma. Questa deformazione, che si può misurare grazie alle caratteristiche

della diffusione dei fotoni, è legata alla densità di materia e di energia dell'Universo. Quattro grandi rivelatori Cherenkov, dalla struttura molto simile, sono oggi al lavoro: oltre a Magic, nell'emisfero nord è operativo Veritas, che si trova in Arizona; mentre nell'emisfero sud, oltre a Hess, è attivo in Australia Cangaroo. Questi esperimenti sono condotti da collaborazioni internazionali composte da un centinaio di ricercatori ciascuna. L'Italia, con l'Infn in prima linea, partecipa al rivelatore Magic, contribuendovi per circa un terzo dell'impegno finanziario e di organico. L'Infn è responsabile della superficie riflettente (sviluppata in collaborazione con l'Università di Padova e con l'industria italiana, e che con i suoi 17 metri di diametro è la più grande del mondo), del *trigger* (cioè del criterio automatico di selezione dei dati significativi), e di una parte del sistema di acquisizione dei dati.

Negli ultimi anni le scoperte di Hess e Magic hanno portato il numero di sorgenti gamma di altissima energia conosciute da tre a una cinquantina, e le nuove scoperte continuano a un ritmo di una-due al mese! E non è finita qui: il prossimo anno verrà inaugurato un gemello del telescopio Magic a un'ottantina di metri dal primo, con specchi ancora più innovativi frutto della collaborazione tra l'industria e l'Università italiana, l'Istituto Nazionale di Astrofisica e ancora una volta l'Infn.

Con questo secondo telescopio la sensibilità dell'esperimento Magic raddoppierà.

d.





d.
I quattro telescopi di Veritas,
in Arizona.

e.
I due telescopi gemelli di Magic.
In primo piano il nuovo apparato
in allestimento.

Biografia

Alessandro De Angelis è il coordinatore scientifico del telescopio Magic e il responsabile di Magic per l'Infn. Insegna Fisica Sperimentale alle Università di Udine e di Lisbona. Ha compiuto i suoi studi a Padova e, dopo sei anni trascorsi al Cern di Ginevra lavorando

al collisore elettrone-antielettrone Lep, è approdato all'astrofisica delle particelle nel 1999 ed è stato fra i fondatori, con i gruppi di Udine-Trieste in Italia e di Goddard e Stanford negli Stati Uniti, dell'esperimento Glast per lo studio dei raggi gamma.

Link sul web

<http://magic.fisica.uniud.it>

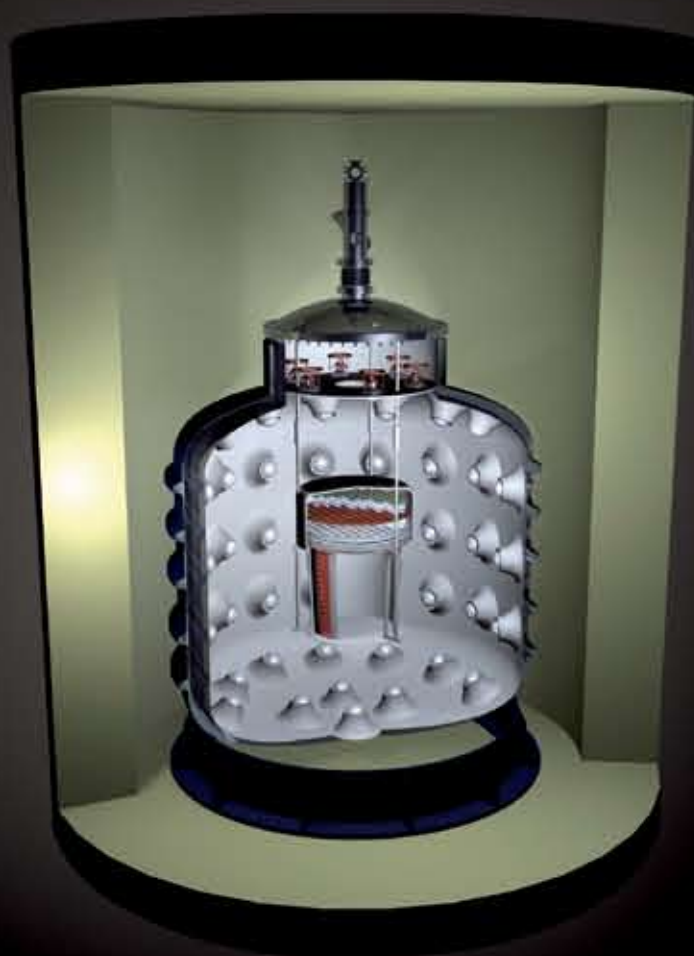
La sfida nel freddo

Grandi masse di argon liquido per osservare luci e forme dei segnali che potrebbero arrivare dalla materia oscura.

di Claudio Montanari

Studiare le particelle di materia oscura in modo diretto, guardando le tracce che esse lasciano all'interno del rivelatore: questo è il lavoro di Warp, *Wimp Argon Programme*, l'esperimento collocato sotto il massiccio del Gran Sasso, nei laboratori dell'Infn. Per raggiungere il proprio obiettivo, Warp punta sull'impiego di una tecnica innovativa che prevede l'utilizzo di un gas nobile, l'argon.

Fino a poco tempo fa le particelle Wimp erano ricercate in modo diretto prevalentemente per mezzo di rivelatori ultracriogenici, cioè a bassissima temperatura (per esempio Edelweiss e CdmS). Solo in seguito, grazie al progetto Icarus, è stata sviluppata una tecnologia alternativa che si basa sui gas nobili liquefatti (come lo xenon e l'argon), e che funziona a temperature più convenzionali (nel caso dell'argon liquido, circa 85°C sopra lo zero assoluto, cioè -187°C). L'utilizzo dei gas nobili offre, quindi, due grandi vantaggi: essi ci consentono non solo di lavorare a temperature più elevate, e perciò meno impegnative da raggiungere e da mantenere, ma anche di costruire rivelatori di grandi dimensioni che possono raggiungere svariate tonnellate di peso. Il lavoro pionieristico condotto nel corso degli anni '90, sia nei laboratori di Pavia sia al Cern di Ginevra, era basato sullo xenon liquido. I gruppi di ricercatori che erano coinvolti inizialmente



nel progetto hanno poi sostituito lo xenon con l'argon per una serie di ragioni, tra le quali il fatto che l'argon consente di distinguere tra i segnali dovuti agli elettroni o ai raggi gamma e i rinculi elastici generati dalle ipotetiche Wimp.

Il riconoscimento di una Wimp avviene in base all'analisi del segnale di rinculo del nucleo che viene usato come bersaglio. Le particelle Wimp possono produrre, attraverso l'interazione debole, rinculi di nuclei in un intervallo in cui l'energia va da 0 a 100 keV (un keV sono mille elettronVolt). All'interno di questa finestra energetica, la ricerca di eventi rari è molto difficile per la presenza del fondo prodotto dalla radioattività naturale.

Ad oggi, è stato ottenuto un buon grado di precisione, riuscendo a distinguere un evento di rinculo elastico fra 100 milioni di eventi indotti da elettroni o raggi gamma, e ci sono ottime possibilità di migliorare questo risultato!

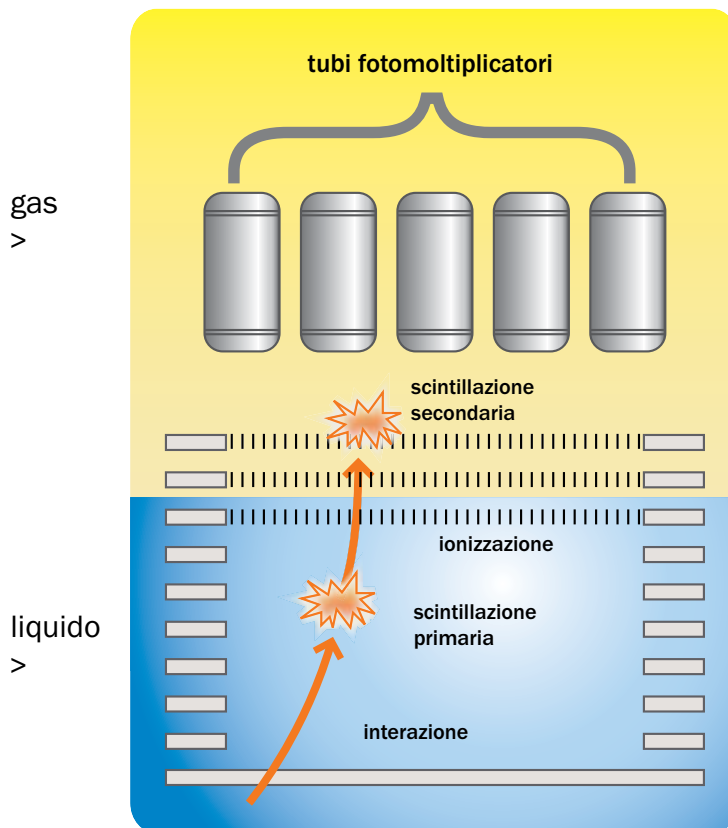
Ma qual è la struttura che consente a Warp di riconoscere i possibili rinculi dovuti alle Wimp dal fondo prodotto da elettroni o da raggi gamma? Una particella che interagisce nel liquido

produce sia eccitazione che ionizzazione: il segnale di scintillazione viene chiamato segnale primario, mentre quello di ionizzazione, segnale secondario. Il rapporto tra questi due segnali e la forma del segnale primario dipendono dal tipo di particella che produce l'interazione e dalla sua velocità. I tempi di formazione del segnale primario prodotto da un elettrone o da un raggio gamma rispetto a quelli dovuti a un rinculo nucleare sono molto diversi. Inoltre, è utile anche la ricostruzione della posizione dell'evento nel caso di eventi con interazioni multiple o per eventi che sono posizionati sulle superfici del rivelatore.

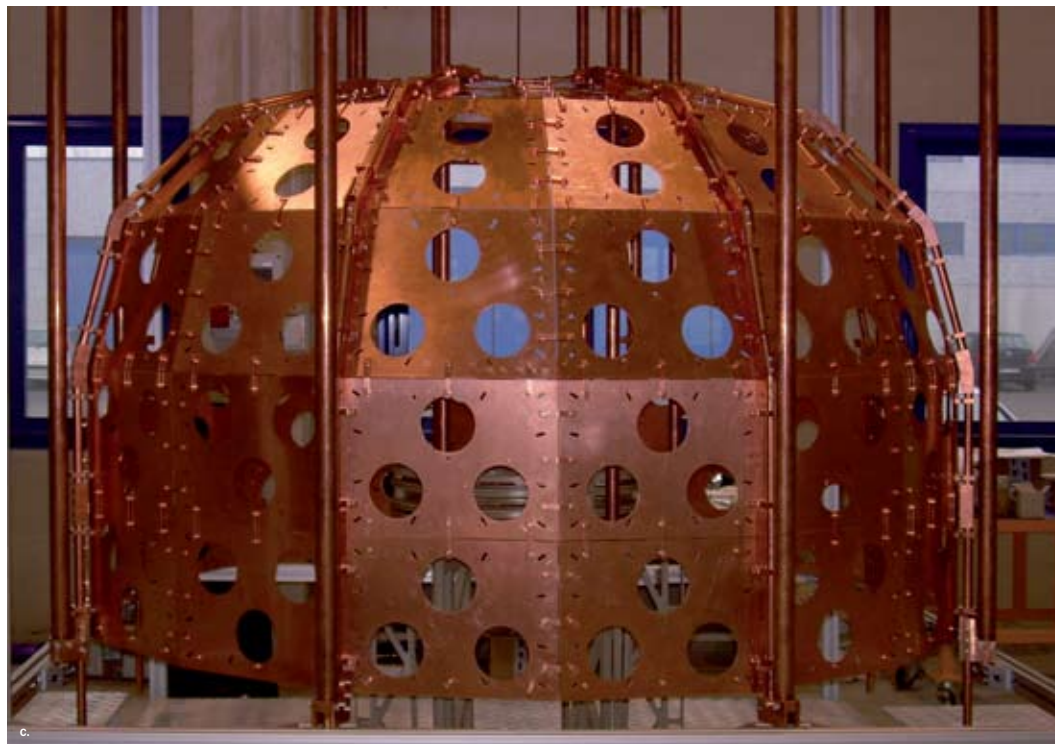
Il rivelatore consiste in un contenitore criogenico a doppia fase: esso cioè contiene uno strato di liquido sopra al quale è depositato del gas. In questo modo è possibile registrare contemporaneamente sia il segnale primario di scintillazione che il segnale secondario di ionizzazione, che viene anch'esso convertito in luce per mezzo di una griglia di accelerazione immersa nel gas. La luce viene quindi rivelata da fotomoltiplicatori anch'essi immersi nel gas.

a.
Disegno concettuale del rivelatore da 100 litri.

b.
Schema semplificato della struttura dell'esperimento Warp.



b.



Durante la prima fase dell'esperimento Warp, una piccola camera del volume di 2,3 litri è stata attiva in condizioni in cui la radioattività naturale produceva un fondo elevato in modo da esplorare, in tempi piuttosto brevi, le elevate capacità di selezione degli eventi. Così siamo riusciti a ottenere un primo limite sulla probabilità di interazione delle Wimp, che è risultato confrontabile con quello trovato da alcuni esperimenti ultra-criogenici (come Edelweiss e Cresst). La seconda fase prevede la messa in funzione entro breve di una nuova versione della camera da 2,3 litri: la camera sarà riempita con argon molto puro, così da ridurre il fondo di radioattività naturale di circa il 20%. In questo modo la sensibilità dovrebbe affinarsi, portandosi al migliore limite sperimentale attuale. Al momento è in fase di costruzione un rivelatore più grande, con una camera a doppia fase da ben 100 litri che dovrebbe contenere otto tonnellate di argon liquido. Il nuovo rivelatore sarà allestito ai laboratori del Gran Sasso verso la fine dell'anno: esso dovrebbe rappresentare un importante passo in avanti nella sensibilità della strumentazione per la ricerca delle Wimp.

L'argon liquido rappresenta una tecnologia ormai matura che permette di costruire rivelatori dotati di grande massa a costi relativamente modesti: si sta così esaminando la possibilità di costruire un rivelatore che abbia una massa sensibile che raggiunga le 10 tonnellate. Con questo progetto i ricercatori ambiscono a esplorare in modo sempre più approfondito le possibilità previste dalle teorie fisiche più accreditate perché per questa impresa sono appunto necessari rivelatori di grandi dimensioni. Al momento, i rivelatori a gas nobili liquefatti forniscono la migliore, e forse unica, soluzione per raggiungere queste grandi masse.

c.
Il rivelatore da 100 litri durante le fasi di pre-assemblaggio nei laboratori di Pavia.

Biografia

Claudio Montanari, ricercatore Infn dal 1998 presso la Sezione di Pavia, collabora all'esperimento Icarus dal 1992 e alle attività di Warp sin dal loro inizio, nel 1998. Attualmente ricopre l'incarico di coordinatore tecnico dell'esperimento Warp.

Link sul web

<http://warp.lngs.infn.it>

La luce di Dama

Nelle profondità del Gran Sasso per studiare segnali dall'Universo oscuro.

di Rita Bernabei

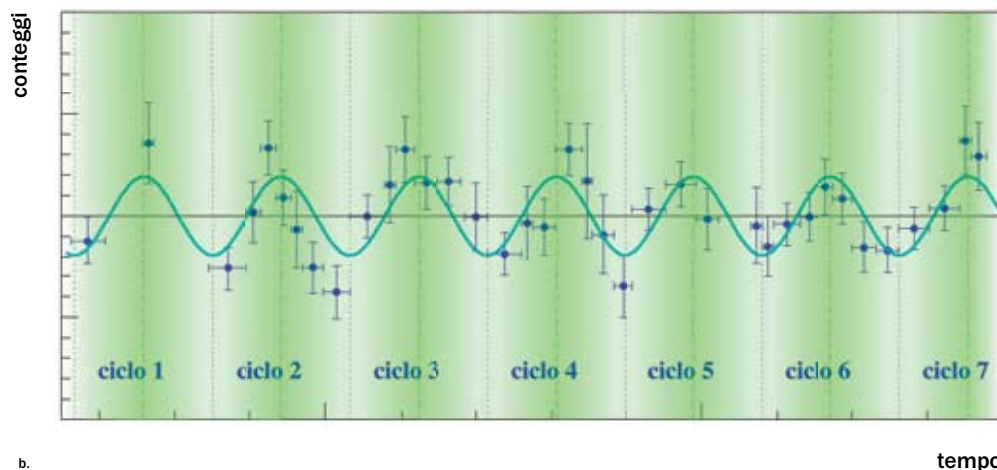
Lo studio delle particelle di materia oscura nell'Universo è uno degli argomenti più affascinanti della fisica attuale. Dama è, in particolare, un progetto dedicato a questo scopo, e alla ricerca di altri processi rari, con cristalli-rivelatori a scintillazione che hanno anche la particolare caratteristica di essere molto radiopuri, sono stati cioè realizzati rimuovendo la maggior parte dei materiali radioattivi, di cui vi poteva esser traccia, per ottimizzarne la sensibilità.

Per ricercare nell'alone galattico della Via Lattea la presenza di particelle di materia oscura, in modo efficace e affidabile, sono stati realizzati gli apparati Dama/Nal (Nal è il simbolo dello ioduro di sodio, di cui sono composti i cristalli dell'apparato), dotato di 9 cristalli di circa 100 chilogrammi di massa totale, che è stato operativo fino al luglio del 2002, e il suo successore, Dama/Libra, costituito da 25 cristalli per una massa totale di circa 250 chilogrammi, operativo dal 2003. I cristalli scintillatori, che costituiscono il cuore di Dama, sono particolarmente adatti per questo tipo di esperimenti: essi, infatti, sono sensibili a particelle di materia oscura di varia natura, sia di piccola che di grande massa, che interagiscono con la materia in diversi modi. Quando una tale particella interagisce con uno dei cristalli scintillatori, infatti, induce una serie di processi il cui risultato finale è l'emissione di luce caratteristica, che può essere osservata.

In Dama sono impiegate e potenziate tecniche avanzate per la ricerca di processi molto rari, e avviene un controllo accurato e continuo di tutte le condizioni di misura per

a.
Installazione dei 25 rivelatori di Dama/Libra dentro la pesante schermatura a molti componenti. Essa è stata eseguita in atmosfera di azoto iperpuro per evitare il contatto dei rivelatori con il gas radon presente in tracce nell'ambiente.





b.

poter evidenziare in modo efficace segnali indotti da particelle di materia oscura. In particolare, Dama è stato progettato e realizzato per essere in grado di dare una risposta sulla presenza di tali particelle nell'alone galattico in modo indipendente dai modelli teorici ipotizzati, grazie alla marcatura, cioè a una caratteristica identificazione detta "della modulazione annuale". Questa marcatura richiede che molti requisiti specifici siano soddisfatti contemporaneamente in modo da fornire un'evidenza inequivocabile. Infatti, poiché il Sole ruota attorno al nucleo galattico e la Terra ruota attorno al Sole, la Terra nel suo moto sperimenterà un "vento" di particelle di materia oscura, la cui intensità (misurata dagli apparati sperimentali nel sito sotterraneo dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn) varierà ciclicamente durante l'anno.

La variazione deve essere presente solo nella regione di bassa energia, dove le particelle di materia oscura possono indurre segnali, e solo in eventi in cui uno dei rivelatori scintilla, poiché è trascurabile, per questi processi rari, la probabilità di interazioni multiple. Questa marcatura, con lo ioduro di sodio, consente di evidenziare la presenza di particelle di materia oscura a prescindere in larga parte dalla loro composizione, dalla loro natura e dal tipo di interazione. Dama/Nal, su sette cicli annuali, ha registrato (con elevato livello di significatività) una periodicità annuale che soddisfa contemporaneamente tutti i requisiti richiesti dalla marcatura: non si conoscono altri effetti che potrebbero produrre un segnale come quello registrato. I risultati di Dama/Nal, quindi, si basano su un lungo periodo di raccolta dati e su un gran numero di osservazioni sperimentali, per i quali attualmente non esistono altri dati con caratteristiche confrontabili. Dama/Nal ha fornito la prima indicazione sperimentale che particelle di materia oscura sono presenti nell'alone galattico; i suoi risultati sono compatibili con le caratteristiche delle particelle che secondo varie teorie possono spiegare la materia oscura.

Il futuro di questo tipo di ricerche è ora affidato al successore di Dama/Nal, Dama/Libra, che sta raccogliendo dati per investigare ancora più a fondo tali particelle e la loro natura e anche per studiare proprietà dell'alone galattico stesso.

b.

Dati sperimentali, raccolti nella regione di più bassa energia per eventi in cui uno solo dei rivelatori misura un impulso di luce in funzione del tempo, nei 7 cicli annuali di misura di Dama/Nal. La curva sovrapposta mostra l'andamento atteso per un segnale di particelle di materia oscura con periodo di un anno e con valore massimo al 2 giugno.

c.

Schema semplificato (non in scala) della struttura dell'apparato contenente i 9 cristalli scintillatori molto radiopuri di Dama/Nal, utilizzati per investigare le particelle di materia oscura nell'alone galattico.

d.

Disegno schematico del moto della Terra nell'alone galattico.

Biografia

Rita Bernabei, laureata in Fisica nel 1973 e in Matematica nel 1977 all'Università di Roma La Sapienza, è stata assistente ordinario e poi professore di II fascia presso le Università di Roma La Sapienza e di Roma Tor Vergata. È attualmente professore di I fascia (Fisica Nucleare e Subnucleare) presso la Facoltà di Scienze dell'Università di Roma Tor Vergata. Ha lavorato

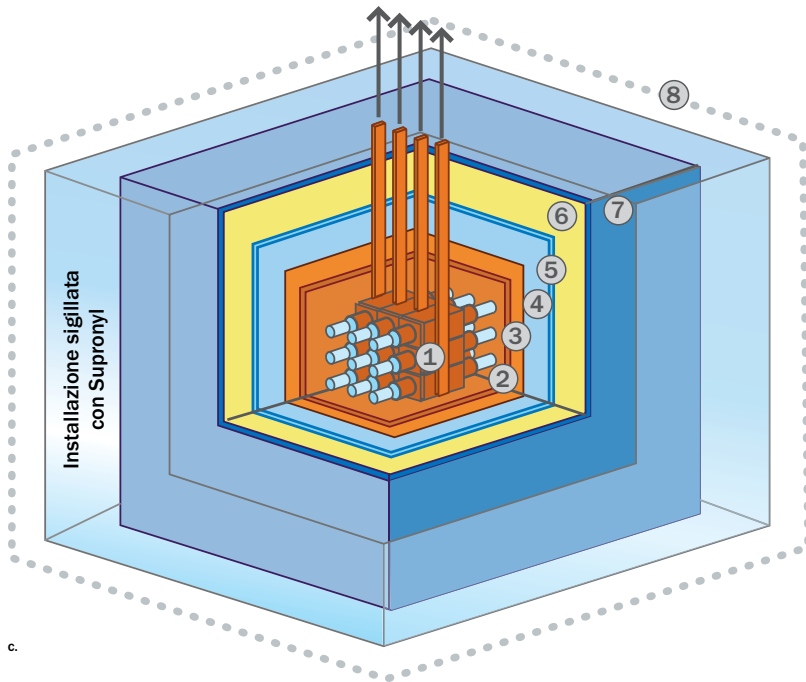
in molti laboratori italiani e stranieri, interessandosi di varie importanti tematiche fondamentali in Fisica nucleare e subnucleare.

In particolare, dal 1985 la sua attività di ricerca si concentra sulla Fisica dei processi rari ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn, svolgendo studi sul flusso dei neutrini solari, sulla materia oscura nell'Universo e su altri processi rari.

Link sul web

<http://people.roma2.infn.it/dama/>

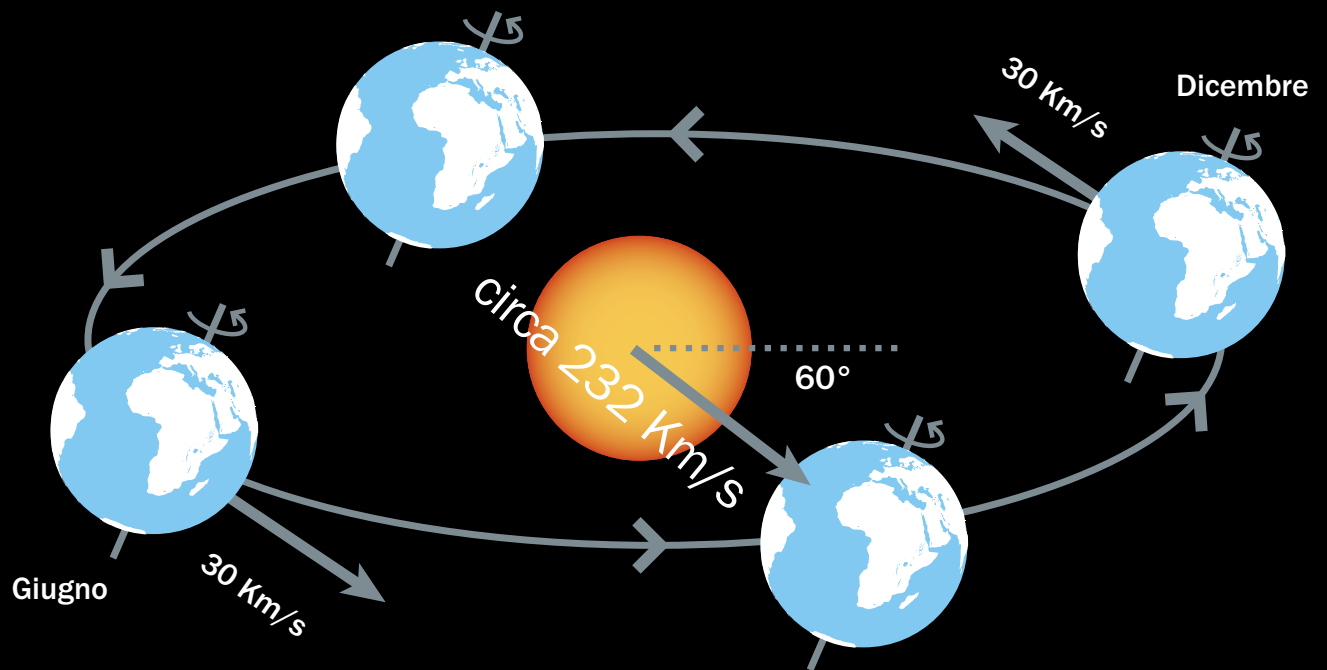
Camera a guanti mantenuta in atmosfera di azoto iperpuro per calibrare nelle stesse condizioni di misura



1. Cristalli NaI (ioduro di sodio)
2. Scatola a tenuta in rame mantenuta in atmosfera di azoto iperpuro.
3. Rame.
4. Piombo.
5. Lastra di cadmio da 1,5 mm.
6. Polietilene / paraffina.
7. Scatola in plexiglass mantenuta in atmosfera di azoto iperpuro.
8. Circa 1 metro di cemento.

c.

d.





Dagli abissi uno sguardo verso l'Universo misterioso

Arriva dalle profondità del Mar Mediterraneo e dei ghiacci antartici la sfida dei ricercatori ai segreti della materia oscura.

di Teresa Montaruli

Con l'idea di rivolgere il cannocchiale verso il cielo, Galileo inaugurò l'astronomia moderna che, grazie al progresso degli strumenti utilizzati per le osservazioni, ci ha insegnato come essi possono essere fonte di imprevedibili scoperte. Il concetto di telescopio si è enormemente evoluto nel corso del tempo e oggi non comprende più solamente gli apparati sensibili alla regione visibile dello spettro elettromagnetico, alle onde radio, o ai raggi X. Ma, al fine di aprire nuovi orizzonti osservativi, stiamo costruendo enormi infrastrutture (alcune delle quali sono già operative) per rivelare altri messaggeri dell'Universo, diversi dai fotoni: i neutrini.

I neutrini sono particelle neutre molto elusive perché risentono solamente della forza debole, al contrario dei fotoni che interagiscono elettromagneticamente con la materia. Questa loro caratteristica fa sì che essi non siano né assorbiti dalla materia, né deflessi dai campi magnetici, portando così precise informazioni per localizzare le sorgenti che li generano: essi si rivelano così i più interessanti messaggeri provenienti dalle regioni interne delle sorgenti più misteriose dell'Universo, come i buchi neri circondati da dischi di accrescimento nei nuclei galattici attivi.

A parte i neutrini emessi dal Sole e una manciata di neutrini dalla supernova SN1987A non sono stati mai osservati neutrini dal cosmo. I nuovi strumenti per rivelarli nella regione di energia maggiore di un centinaio di GeV ($1 \text{ GeV} = 1,6 \times 10^{10} \text{ Joule}$) sono detti telescopi di neutrini.

Se le sorgenti accelerassero non solo elettroni ma anche protoni, allora la produzione dei neutrini insieme ai fotoni sarebbe garantita. Tuttavia fino ad oggi ciò rimane ancora da dimostrare e si ritiene che la rivelazione dei primi neutrini di alta energia dal cosmo rivoluzionerà la nostra visione dei meccanismi di accelerazione e produzione di energia in sorgenti astrofisiche.

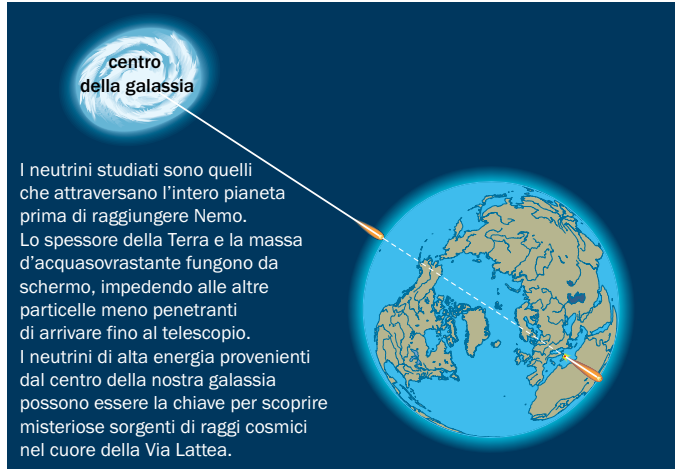
I neutrini potrebbero essere anche prodotti dall'annichilazione di materia oscura che si accumulerebbe per effetto della forza gravitazionale nel centro di corpi celesti come il Sole o la Terra stessa, o anche al centro della galassia. Questa materia oscura potrebbe essere costituita da nuove particelle, come le Wimp, previste dai modelli elaborati allo scopo di estendere il Modello Standard (cioè la teoria che oggi usiamo per descrivere i costituenti della materia e le loro interazioni) in modo da includere l'unificazione di tutte le forze: alcuni esempi di queste teorie sono la Supersimmetria o le teorie che prevedono dimensioni extra (oltre alle tre dimensioni spaziali e a quella temporale che oggi conosciamo). I telescopi per neutrini cercano un *surplus* di queste particelle, dovuto ai processi di annichilazione delle particelle Wimp, in direzione dei corpi celesti in cui si concentrerebbero, rispetto al fondo di neutrini prodotti nell'atmosfera dai raggi cosmici che la investono. Altre interessanti prospettive riguardano la rivelazione di neutrini dalla materia oscura che potrebbe accumularsi in corrispondenza di buchi neri dotati di una massa equivalente a circa 100.000 masse solari. La regione di energia che ci interessa è determinata dal valore della massa delle particelle di materia oscura, e va da circa 50 GeV a qualche TeV. Questa ricerca indiretta di materia oscura è complementare rispetto a quella diretta (che prevede l'osservazione dell'interazione delle particelle con la materia che costituisce il rivelatore) ed è, per il caso del Sole, promettente in alcune condizioni e se la loro massa è maggiore di circa 100 GeV. Ancora più incoraggianti sono le previsioni delle teorie extra-dimensionali, secondo le quali l'annichilazione di particelle di materia oscura nel Sole produrrebbe tra 0,5 e 10 eventi l'anno in rivelatori delle dimensioni di un chilometro cubo.

Poiché, come si è detto, i neutrini sono molto elusivi, è necessario dotare di strumenti idonei alla loro rivelazione spazi molto grandi, in modo da contrastare la loro bassa probabilità di interazione con la materia: per questa ragione le dimensioni dei telescopi di neutrini, già operativi o in fase di costruzione, variano da circa un decimo di chilometro cubo a un chilometro cubo. Di conseguenza è impossibile realizzarli in gallerie sotto le montagne come nel caso dei telescopi di neutrini di più bassa energia (per esempio, gli esperimenti Macro e Borexino collocati sotto il massiccio del Gran Sasso ai laboratori Nazionali dell'Infn, o l'esperimento Superkamiokande, in Giappone, che si trova all'interno di una ex miniera). La ricerca di eventi rari (come gli eventi indotti da neutrini) va effettuata usufruendo dello schermo di grossi strati di materia che riducono il flusso superficiale dei muoni di natura atmosferica (cioè i muoni prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre), che maschererebbero il segnale dei muoni prodotti da neutrini astrofisici (cioè provenienti da sorgenti astrofisiche). Alle profondità di 2,5-3,5 km sotto il mare o i ghiacci polari, l'intensità di questo fondo è attenuata di un fattore tra 100.000 e un milione di volte.

I neutrini, interagendo con la materia, producono muoni secondari che è possibile rivelare attraverso la luce Cherenkov che emettono (la produzione di luce per effetto Cherenkov è un fenomeno molto simile al tuono prodotto da un jet che supera la barriera del suono in aria). La natura ci offre dei mezzi trasparenti e allo stesso tempo bui adatti alla rivelazione di questo flebile segnale di luce:

<

Il cuore della galassia Whirlpool.



a.



b.

gli abissi e le profondità dei ghiacci polari. Queste condizioni fanno dei telescopi per neutrini i rivelatori localizzati nelle regioni più inesplorate e misteriose della Terra. Ad alta energia i muoni hanno la stessa direzione dei neutrini che li producono: grazie a ciò l'informazione sulla direzione di provenienza e quindi sulle sorgenti di neutrini è preservata. Se si guardano i muoni che viaggiano dal basso verso l'alto, è garantito che essi siano prodotti dai neutrini: da quella direzione, infatti, si è certi di identificare i neutrini perché lo spessore della Terra impedisce a qualunque altra particella di arrivare fino al rivelatore. Per osservare l'intero cielo sono perciò necessari due telescopi: uno nell'emisfero nord e uno nell'emisfero sud.

La tecnologia impiegata, pur essendo estremamente sofisticata, è in principio molto semplice: un reticolo tridimensionale di rivelatori di luce, detti fotomoltiplicatori, che misurano il tempo di arrivo dei fotoni Cherenkov. I fotomoltiplicatori, protetti da sfere di vetro resistenti alle alte pressioni degli abissi o che si sviluppano durante l'installazione nel ghiaccio, costituiscono gli "occhi" del telescopio, chiamati moduli ottici. Questi ultimi sono sostenuti da stringhe lungo le quali vengono trasmessi i dati e l'alta tensione che alimenta i moduli ottici. In pratica, la costruzione di questi giganteschi rivelatori, realizzati in siti estremamente ostili, rappresenta una notevole sfida tecnologica.

Il primo telescopio "abissale", chiamato NT200+, è stato collocato alla profondità di circa un chilometro nel lago Baikal, in Siberia. Frutto di una collaborazione russo-tedesca, l'esperimento, che prende dati con circa 200 moduli ottici, ha posto limiti stringenti nei parametri per la rivelazione di materia oscura.

L'esperimento che ha posto il limite più basso alla produzione di neutrini da materia oscura dal Sole e dalla Terra è Amanda, che oggi raccoglie dati al Polo Sud con 677 moduli ottici, installati tra 1,5 e 2 km di profondità nei ghiacci. La procedura per installare questi moduli, chiamata *drilling*, utilizza getti ad alta pressione di acqua bollente per scavare dei buchi lunghi chilometri e di circa mezzo metro di diametro. Amanda è il precursore di IceCube, il telescopio di neutrini attualmente più grande al mondo, la cui terza stagione di costruzione (terminata da poco perché al Polo Sud è possibile costruire il rivelatore tra novembre e febbraio, per via delle migliori condizioni climatiche durante la stagione estiva) ha portato il volume attuale pari a circa il 30% di quello finale, che sarà di un chilometro cubo. Altrettanto straordinaria è la sfida agli abissi intrapresa dalla comunità scientifica nel Mediterraneo, dove diverse collaborazioni internazionali sono impegnate nella progettazione e costruzione di rivelatori a profondità ancora più elevate: Antares e Nemo. Il primo è un telescopio delle dimensioni di un decimo di chilometro cubo, a cui l'Infn partecipa, che è in costruzione alla profondità di 2.500 metri di fronte alla costa di Marsiglia. Nemo, invece, è l'esperimento dell'Infn impegnato nella realizzazione degli elementi base per il rivelatore da un chilometro cubo nel Mediterraneo, che saranno installati in una stazione sottomarina a circa 3.500 metri sotto la superficie del mare a 80 km al largo di Capo Passero, in Sicilia. Il progetto finale del rivelatore Antares (che dovrebbe essere ultimato nel 2008) prevede la costruzione e l'installazione di dodici stringhe: attualmente ne sono operative cinque (la prima delle quali è stata installata nel marzo del 2005), che stanno raccogliendo dati e che hanno già misurato i primi neutrini, mentre due ulteriori

a.

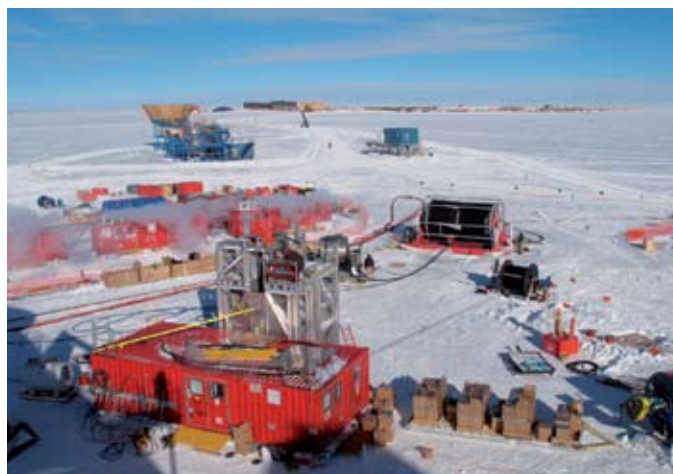
I neutrini che arrivano dal centro della nostra galassia attraversano tutta la Terra prima di essere rivelati dal telescopio Nemo, nel Mar Mediterraneo.

b.

La *junction-box* di Nemo viene calata in mare lo scorso dicembre durante la prima fase dell'esperimento. All'interno del contenitore giallo in vetroresina, riempito di olio, si trovano i contenitori a pressione, dentro i quali sono stati installati l'elettronica e i cavi elettro-ottici di interconnessione.



c.



d.

stringhe sono pronte sotto il mare per la connessione a terra, che avverrà in settembre. Nemo, invece, ha concluso con successo le operazioni di posa del prototipo di una delle unità base che comporranno l'apparato, nel sito prescelto per il test, alla profondità di oltre 2.000 metri al largo di Catania. Il prototipo è costituito da una torre alta circa 200 m su cui sono collocati i sensori ottici, e dalla cosiddetta *junction box* che ha lo scopo di contenere l'alimentazione del rivelatore e la strumentazione necessaria alla trasmissione dei dati dalla torre a terra e viceversa. Il progetto Nemo prevede, nella sua versione finale, l'installazione di 80 torri, distanti 140 metri l'una dall'altra, che occuperanno così un volume di circa un chilometro cubo.

Nei prossimi anni la comunità scientifica europea, che ora opera su tre esperimenti (oltre ad Antares e Nemo, è in corso anche il progetto Nestor che mira alla costruzione di un rivelatore vicino alle coste del Peloponneso e che nel 2003 ha rivelato, con un apparato test di 12 fotomoltiplicatori, alcune centinaia di muoni atmosferici), dovrebbe concentrare tutte le forze per costruire un rivelatore delle dimensioni di un chilometro cubo, controparte di IceCube nel nostro emisfero. La collaborazione Nemo propone, appunto, per l'installazione di questo rivelatore, il sito di Capo Passero, per le favorevoli caratteristiche dell'acqua e dell'ambiente marino. Qui presto sarà installata una torre prototipo, alta 750 metri, cioè delle stesse dimensioni del disegno proposto per il rivelatore finale, su cui saranno collocati 64 sensori ottici.

Grandi sono le aspettative della comunità scientifica impegnata nei progetti di costruzione di questi enormi osservatori per neutrini nei nostri mari, perché, al contrario di quelli al Polo Sud, i rivelatori nel Mediterraneo avranno l'opportunità di osservare il centro della nostra Galassia, una regione di grande interesse anche per la rivelazione di materia oscura.

c.
Costruzione di una stringa di IceCube: è visibile un modulo ottico mentre viene calato nell'abisso di ghiaccio.

d.
La stazione di Amundsen-Scott durante la stagione estiva 2006-2007. È visibile in primo piano la torre nella quale viene effettuato il *drilling* e il cavo di supporto per i moduli ottici. In fondo si intravede la nuova stazione dove ci sono gli alloggi.

Biografia

Teresa Montaruli, ricercatrice universitaria a Bari dal 2000, ha ricevuto nel 2001 il premio Shakti per i suoi contributi alla fisica dei raggi cosmici. Dalla fine degli anni '90, lavora all'esperimento Antares come

coordinatore del gruppo di studio sulla neutrino-astronomia e nel progetto Nemo. Ora è in congedo all'Università del Wisconsin-Madison, dove partecipa ad Amanda e Ice Cube.

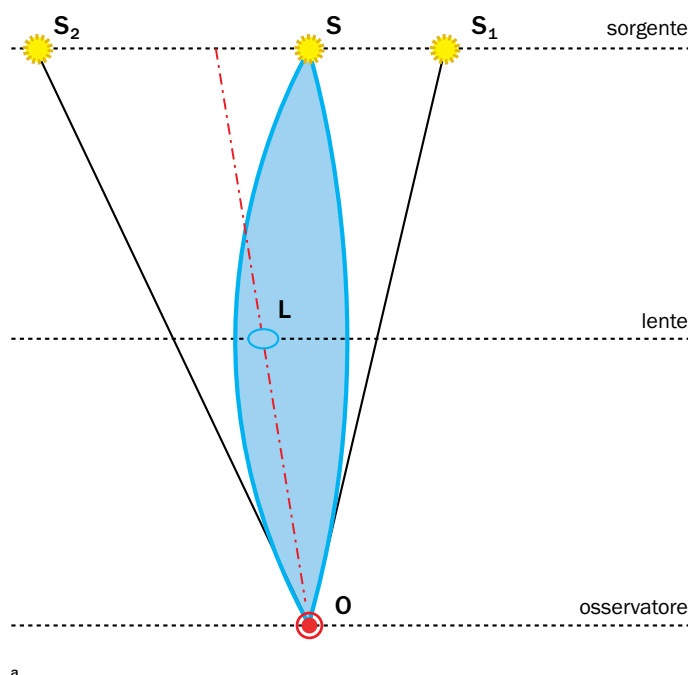
Link sul web

<http://icecube.wisc.edu>
<http://nemoweb.lns.infn.it>
<http://antares.in2p3.fr>

La singolare storia di una lente particolare.

di Giulio Peruzzi

*Docente di Storia della Fisica
al Dipartimento di Fisica
dell'Università degli Studi di Padova*

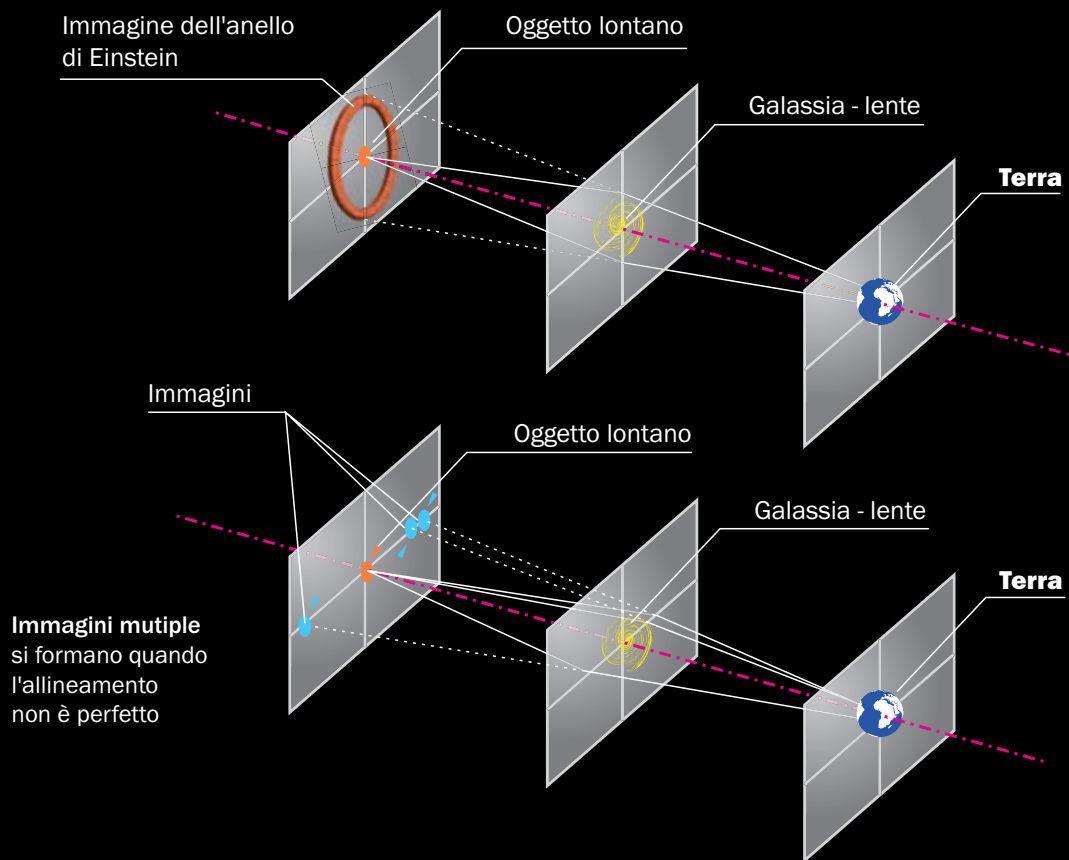


Guardando il cielo in una notte serena (e possibilmente lontano dalle luci delle nostre città) osserviamo miriadi di punti luminosi, più o meno intensi e più o meno vicini tra loro, alcuni così vicini da dare l'impressione di una caligine luminosa diffusa. Tutta la materia dell'Universo è contenuta lì, nelle stelle e nelle galassie? Sicuramente no, e il pianeta su cui abitiamo ne è un esempio, come ne è un esempio "la stella del mattino" e la "stella della sera" che altri non è che Venere così luminosa perché così vicina a noi e al Sole. Ma è possibile "vedere" la materia quando non emette luce o quando la emette in modo troppo flebile per essere osservata a grandi distanze? Sì, se la materia si comporta rispetto alla luce come una sorta di lente. Una lente assai singolare le cui proprietà potrebbero essere indagate partendo dalle distorsioni da questa prodotte nelle immagini delle stelle e delle galassie. Una lente sulla quale fisici e astronomi riflettono da più di trecento anni ma che solo da una trentina d'anni ha cominciato a essere sistematicamente utilizzata.

Se la materia agisce sulla luce curvando la sua traiettoria è possibile immaginare

che un osservatore terrestre veda prodursi nel cielo fenomeni simili a quelli prodotti da una lente. Infatti, se la luce emessa da una sorgente (di solito una stella) nel suo tragitto verso la Terra incontra un addensamento di materia che la deflette, l'immagine della stella dovrebbe risultare alterata: a seconda della posizione e delle distanze relative tra sorgente, lente (addensamento di materia) e ricevitore l'immagine originale della stella potrebbe essere moltiplicata in più immagini "virtuali" o dare luogo ad anelli luminosi. Dallo studio di queste immagini si potrebbe inferire una serie di proprietà – come la distanza, la dimensione e la massa – di eventuali ammassi di materia non visibile (la materia oscura) che funge da lente. Per quanto strano possa sembrare, l'idea della deflessione della luce da parte della materia venne proposta per la prima volta più di trecento anni fa da Isaac Newton. Newton aveva a lungo cercato di ottenere una teoria della luce che lo soddisfacesse quanto la sua trattazione della meccanica e della legge di gravitazione universale. Tuttavia i fenomeni luminosi sembravano di gran lunga più complessi ed evidenziavano sia aspetti corpuscolari (che Newton

padroneggiava egregiamente con i suoi principi della meccanica) sia aspetti ondulatori che sembravano richiedere l'intervento di un qualche etere che con le sue onde modulasse il moto dei corpuscoli costituenti la luce. La provvisorietà avvertita da Newton nella formulazione della teoria della luce è evidente in una serie di "Questioni" aperte che concludono la sua maggiore opera sul tema, l'*Opticks*, la cui prima edizione viene stampata nel 1704. Non è un caso che nelle edizioni successive le suddette "questioni" aperte vengano via via riviste e ampliate. Ebbene, nella Questione 1 dell'*Opticks* del 1704, Newton si chiede: "I corpi non agiscono a distanza sulla luce, e per effetto della loro azione non incurvano i raggi di essa? E questa azione non è (a parità delle altre cose) massimamente forte alla minima distanza?". Ancorché la domanda sembrasse retorica, né Newton né i suoi epigoni settecenteschi approfondirono il tema e la questione venne ripresa solo un secolo dopo dall'astronomo tedesco Johann Georg von Soldner. Il contributo di Soldner è contenuto nel suo articolo per l'*Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1804* (pubblicato nel 1805 ma da



b.

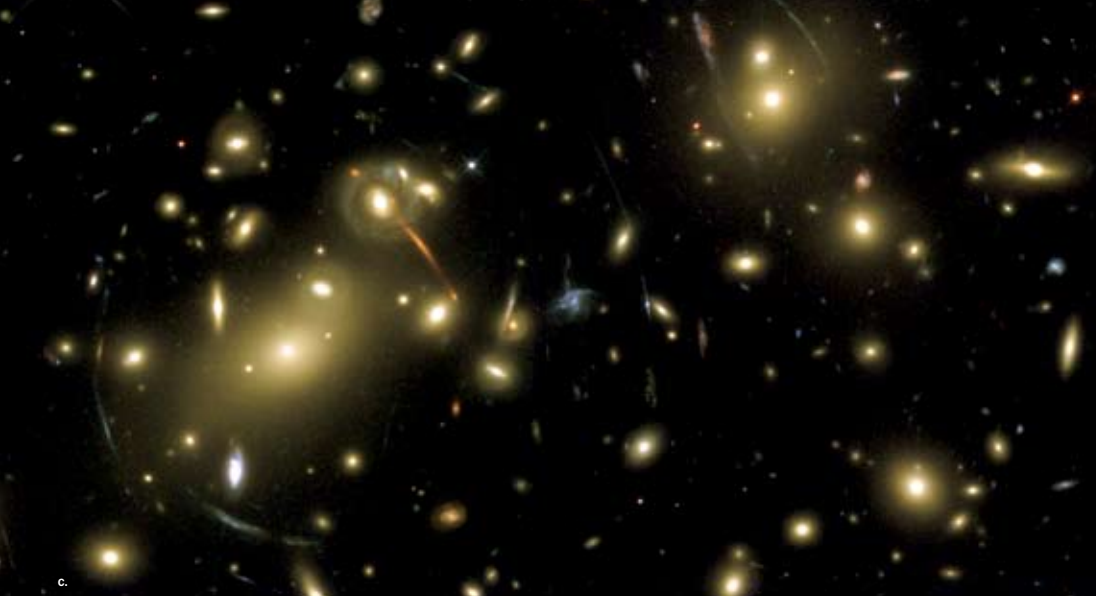
lui inviato nel 1801) dal titolo “Sulla deviazione di un raggio di luce dal suo moto in linea retta per l’attrazione di un corpo celeste al quale passa vicino”. Trattando la cinematica di un raggio di luce inteso come un “corpo materiale”, Soldner calcolava la deflessione di questo da parte del Sole giungendo al valore 0,84 secondi d’arco.

Passano ancora più di cento anni prima che la questione della deflessione della luce venga ripresa. È il 1907 e Einstein sta scrivendo un articolo di rassegna sulla relatività ristretta per lo *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, che verrà pubblicato nel 1908. Le sue riflessioni lo conducono inevitabilmente, come scrive lui stesso, a “tentare anche di modificare la teoria newtoniana della gravitazione in modo da rendere le sue leggi compatibili con la relatività ristretta”. E così, nell’ultima parte dell’articolo dal titolo “Principio di relatività e gravitazione”, Einstein affronta per la prima volta le questioni fondamentali che lo porteranno alla relatività generale, tra cui appunto la deflessione della luce da parte di un corpo materiale. Per circa tre anni Einstein non pubblica più nulla sull’argomento. Il periodo di silenzio viene interrotto nel 1911 con l’articolo dal titolo “Sull’influenza della gravitazione sulla propagazione della luce”, dove ricompaiono in forma più matura e generale le idee proposte nell’articolo del 1908, tra le quali una prima stima della deflessione della luce da parte del Sole pari a 0,83 secondi d’arco. La stima basata su una teoria ancora incompleta – solo in seguito Einstein avrebbe introdotto la “curvatura” dello spazio tempo – era errata, ma singolarmente simile a quella ottenuta su basi puramente classiche da Soldner. Proprio anche per verificare la previsione di Einstein della deflessione della luce, nel 1912 e nel 1914 vennero organizzate spedizioni per lo studio delle eclissi solari. Diversi ostacoli, tra cui l’inizio della prima guerra mondiale, evitarono un esperimento prematuro che avrebbe screditato la teoria. Dal 1911 Einstein si concentra sulla formulazione della nuova teoria. Tra l’altro nel 1912, come si legge in un quaderno di appunti recentemente scoperto, Einstein deriva le equazioni per le lenti gravitazionali dalle quali discende la possibilità di avere più immagini virtuali ingrandite dello stesso oggetto luminoso.

La relatività generale verrà presentata in forma compiuta nel novembre del 1915. Einstein è quindi in grado di correggere le stime precedenti: la deflessione della luce che passa radente al disco solare deve essere doppia rispetto a quella da lui stimata nel 1911 e pari a circa 1,75 secondi d’arco. Vale la pena notare che, a differenza della relatività ristretta che aveva a disposizione un ampio ventaglio di fatti sperimentali acquisiti nel corso di almeno due secoli di ricerche sull’elettricità,

a.
Funzionamento di una lente gravitazionale. La disposizione relativa della sorgente S, della lente L e dell’osservatore O fa sì che la luce proveniente da S passando sui lati opposti di L venga deviata producendo immagini S_1 e S_2 dello stesso oggetto.

b.
Lente gravitazionale. Disposizione relativa della sorgente, della lente e della Terra per cui la luce proveniente dalla sorgente passando sui lati opposti della lente viene deviata simulando in alto un anello luminoso e in basso due immagini dell’oggetto sorgente.



il magnetismo e l'ottica, la relatività generale viene concepita quando solo due sono le evidenze sperimentali disponibili: il principio di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale e l'anomalia nella precessione del perielio di Mercurio. In questo senso la deflessione della luce costituiva una nuova predizione, fondamentale per la conferma della validità della teoria. È quindi comprensibile l'entusiasmo col quale vennero accolti i risultati delle misure effettuate sull'eclisse del 1919 dalle spedizioni di Eddington all'Isola del Principe e di Sobral nel nord del Brasile, risultati che confermavano le previsioni della relatività generale. È l'inizio del “mito Einstein”.

La scoperta della deflessione della luce tuttavia non suscita immediatamente l'interesse che ci si potrebbe aspettare per le lenti gravitazionali. In una prima fase che va dal 1919 al 1936, in modo più o meno convinto e più o meno qualitativo il fenomeno viene menzionato in tre scritti, uno di O. Lodge (1919), uno di A. Eddington (1920) e uno di O. Chwolson (1924). Una nuova fase inizia nel 1936, quando Einstein, stimolato da uno scienziato dilettante ceco di nome Rudi W. Mandl, pubblica una breve nota nella quale, apparentemente dimentico dei suoi appunti del 1912, ricava nuovamente l'equazione delle lenti gravitazionali. Einstein per altro non manifesta grande convinzione sulla effettiva osservabilità del fenomeno. L'articolo però non passa inosservato, anche perché l'astronomia e la cosmologia in quegli anni avevano fatto importanti progressi rispetto al 1919: era ormai assodato che l'Universo fosse popolato da innumerevoli galassie e che, grazie alle scoperte di Hubble del 1929, risultasse in espansione. Ecco quindi che nel 1937 compaiono almeno quattro articoli che hanno come tema le lenti gravitazionali e le loro possibilità applicative: due a febbraio, uno di Fritz Zwicky e l'altro di Henry Norris Russell, ad aprile ancora uno di Zwicky, e uno a giugno di Gavriil A. Tikhov. Proprio negli articoli di Zwicky viene introdotto per la prima volta il termine attualmente in uso di “lente gravitazionale”. Ed è sempre Zwicky che sottolinea la correttezza delle perplessità di Einstein sulla osservabilità del fenomeno utilizzando solo le stelle, ma evidenzia che le galassie hanno maggiore probabilità (“praticamente la certezza”) di funzionare come lenti gravitazionali.

L'effetto di “lente gravitazionale” può quindi essere davvero usato come sorta di “telescopio naturale” fornendo: “una nuova verifica della relatività generale”; “la possibilità di osservare nebulae che non sono alla portata degli attuali telescopi”; “una più diretta determinazione della massa nebulare”. Tuttavia, nonostante l'ottimismo di Zwicky, solo nel 1979 verrà effettivamente osservato per la prima volta l'effetto di una lente gravitazionale per una coppia di quasar separate nel cielo di soli 6 secondi d'arco. Queste sono interpretate come due immagini dello stesso oggetto: mostrano identiche componenti dello spettro di emissione, e hanno lo stesso *redshift* (cioè si trovano alla stessa distanza). Inoltre eventuali fluttuazioni di luminosità di un'immagine si ripresentano nell'altra con un ritardo di alcuni mesi dovuti alla differenze di cammino ottico. Successivamente, tra il 1980 e il 1981, ricerche ottiche evidenzieranno la presenza di una galassia ellittica con debole luminosità, collegata ad un ammasso di galassie, alla distanza di un secondo d'arco da una delle immagini: è il corpo che funge da lente.

Da questo primo risultato osservativo le ricerche sulle lenti gravitazionali sono diventate sempre più intense, dando vita a numerose collaborazioni internazionali nel settore stimulate anche dalle nuove osservazioni e dalle nuove teorie in ambito astrofisico e cosmologico.

c.

Grandi concentrazioni di massa possono agire come lenti. Quasi tutti gli oggetti luminosi della fotografia sono galassie nell'ammasso noto come Abell 2218. Esso ha una massa così grande e compatta da provocare la deflessione della luce proveniente da galassie che si trovano al di là di questo, che quindi appaiono a noi distorte a forma d'arco. Nella fotografia, ripresa dal telescopio Hubble, sono visibili molti archi, allungati e di debole intensità.

[as] incontri

Ricercatori per un giorno.

di Catia Peduto



< Un momento dell'esercitazione delle Masterclasses alla Terza Università di Roma.

Per il terzo anno di seguito, grazie a un'iniziativa dell'Infn, un migliaio di studenti delle scuole medie superiori italiane hanno potuto giocare a fare il ricercatore per un giorno. Accompagnati da veri ricercatori a scoprire i segreti della fisica delle particelle, i ragazzi hanno analizzato i dati raccolti da un esperimento e poi confrontato il risultato raggiunto con i loro coetanei europei, come in una vera collaborazione internazionale.

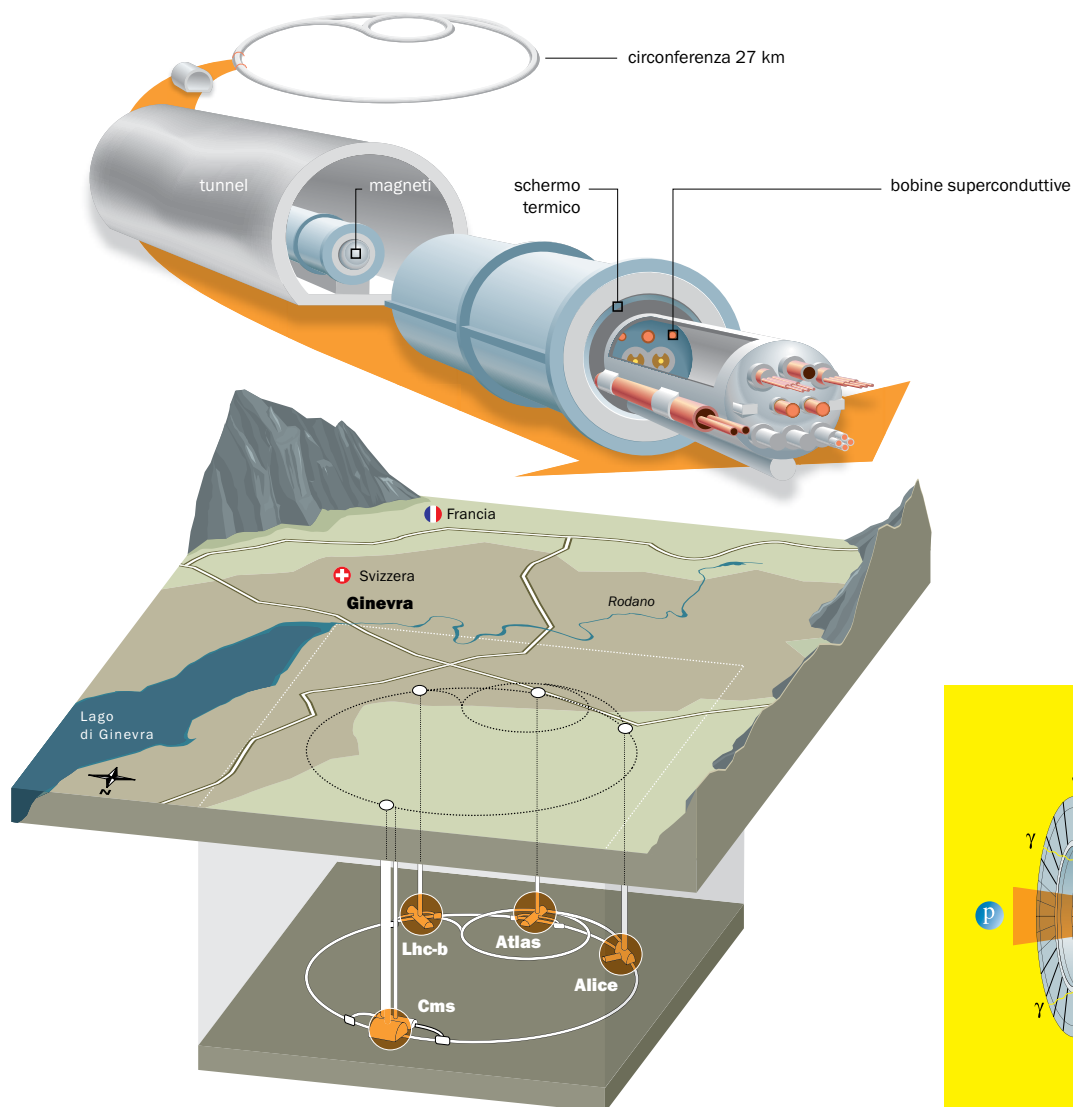
L'iniziativa è organizzata da Eppog (*European Particle-Physics Outreach Group*) e porta il nome di *Masterclass*. Ogni anno sono coinvolti settanta tra i più prestigiosi enti di ricerca e università d'Europa. Quest'anno si è svolta dal 15 al 30 marzo. Per l'Infn, che coordina le Masterclasses italiane, hanno partecipato la Terza Università di Roma, le sezioni di Pisa, Torino, Padova, Catania e Napoli, i Laboratori Nazionali di Frascati e il gruppo collegato di Udine.

Il 28 marzo scorso Asimmetrie è andato a vedere come si sono svolte le Masterclasses della Terza Università di Roma. I 36 studenti presenti provenivano prevalentemente da licei scientifici, ma non mancavano alcuni del liceo classico e dell'artistico.

Nella prima mattinata i ragazzi hanno appreso i primi rudimenti di meccanica quantistica, relatività e del Modello Standard delle particelle elementari. Si tratta di argomenti di Fisica che raramente i professori di liceo riescono a trattare in classe. Nell'ultima lezione della mattinata i ragazzi hanno scoperto il funzionamento dei grandi apparati, che hanno permesso ai ricercatori di scovare queste minuscole particelle: gli acceleratori

e i rivelatori. In particolare, è nel rivelatore che i fisici "vedono" le tracce lasciate dalle particelle, analizzano cioè ciò che si chiama un evento. Dopo la pausa del pranzo, per i ragazzi è cominciato il gioco vero e proprio: fingersi ricercatori per un paio di ore, analizzando ben 1000 eventi di uno degli esperimenti del Lep (*Large Electron Positron collider*), l'acceleratore di particelle che fino alla fine degli anni '90 è stato in funzione presso il Cern, in Svizzera. Sullo schermo del computer di ogni ragazzo si trovano gli eventi prodotti nell'esperimento Opal del Lep, che ha analizzato il decadimento della particella Z (un bosone). Gli studenti, che si sono rivelati estremamente attenti e motivati, imparano velocemente a riconoscere le particelle (muoni, quark, antiquark e così via) dal tipo di tracce visualizzate sul loro computer e svolgono l'esercitazione in maniera eccellente. Tant'è che quando, poco dopo, i loro risultati vengono confrontati con quelli degli altri studenti collegati in videoconferenza (tedeschi, slovacchi, svedesi, polacchi e norvegesi), con lo stupore generale questi coincidono! "Il messaggio fondamentale che volevamo arrivasse agli studenti," spiega Luca Spogli, dottorando dell'Infn che ha tenuto l'esercitazione, "è che parte integrante della vita del ricercatore è la condivisione dei propri risultati con gli altri laboratori, per poter garantire al meglio la riproducibilità delle informazioni e migliorare la qualità del dato scientifico. Il fatto che le misurazioni effettuate dai diversi gruppi europei fossero compatibili ci ha inoltre consentito di raccontare che la misura di una quantità fisica è un'operazione che tiene conto della precisione con la quale essa viene

effettuata e che la compatibilità deve essere vagliata proprio rispetto a questa incertezza." Il successo delle Masterclasses alla Terza Università di Roma si deve alla professoressa Fernanda Pastore, che per il terzo anno di seguito si è impegnata ad organizzarle. Nel corso di questi anni, il numero di studenti interessati è aumentato gradualmente e ci si auspica che prossimo anno si riesca a organizzare più di due giornate. "Dai commenti raccolti dagli studenti", ci racconta Fernanda Pastore, "direi che l'esperienza è loro servita a capire cosa significhi 'fare ricerca'. Forse, nel bene o nel male, la cosa potrebbe aiutarli a capire 'cosa fare da grandi' ". Ma è veramente servita a questo scopo? Lo abbiamo chiesto a Matteo, uno studente dell'ultimo anno del liceo scientifico romano "A. Righi". "Devo dire che, già prima della giornata all'università, pur indeciso tra fisica e ingegneria elettronica, propendevo già verso fisica. La Masterclass mi ha aiutato a capire meglio cosa voglia dire fare ricerca di base e cosa sia l'attività del ricercatore, che mi è apparsa molto più interessante ed entusiasmante di quella di un ingegnere, e quindi credo proprio che il prossimo anno mi iscriverò a fisica." Anche nelle altre università italiane le Masterclasses hanno avuto lo stesso riscontro positivo tra gli studenti. A Torino si è anche svolta una Masterclass per gli insegnanti, che prevedeva seminari di aggiornamento, tavole rotonde su problemi di didattica della fisica moderna e un collegamento in videoconferenza simile a quello effettuato con gli studenti. Alla fine delle giornate di Masterclass a tutti gli studenti e insegnanti sono stati distribuiti dei certificati di partecipazione.



[as] La scienza di LHC

Che cos'è il Large Hadron Collider

È la più potente macchina al mondo. È un acceleratore di particelle al cui interno sono accelerati protoni ad altissima velocità, che vengono poi fatti scontrare fra di loro. Dagli scontri nascono moltissime particelle che vengono registrate dai rivelatori e poi analizzate dai fisici.

Come è fatto

Gli esperimenti saranno condotti lungo il percorso di un tunnel circolare sotterraneo situato a 100 m di profondità.

Lhc è formato da circa 2.000 magneti superconduttivi mantenuti a una temperatura di circa -271°C .

Gli esperimenti

Lhc-b studierà come si sia creata la asimmetria tra materia e antimateria.

Atlas e *Cms* hanno come scopo principale la verifica dell'esistenza del bosone di Higgs e della Supersimmetria.

Alice: i fisici osserveranno un plasma di quark e gluoni, cioè uno stato della materia esistito subito dopo il Big Bang.

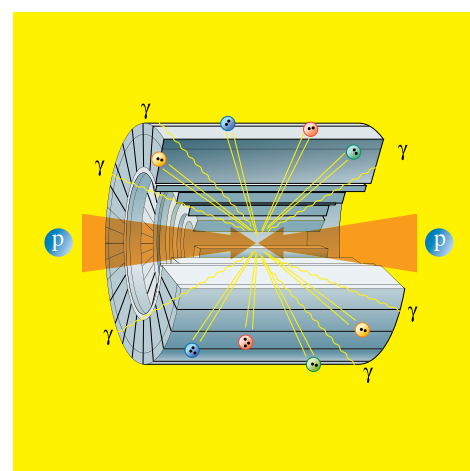
Gli obiettivi di Lhc

La massa

Con questi esperimenti i fisici cercheranno di capire qual'è l'origine della massa, una proprietà della materia che ci permette di esistere.

Il bosone di Higgs

La sfida di Lhc è quindi vedere per la prima volta, grazie all'enorme energia con cui fa scontrare fra loro gruppi di protoni, il bosone di Higgs, la particella in grado di spiegare come mai esiste la massa.



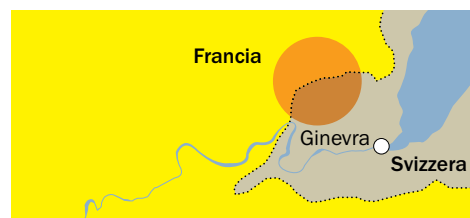
I fasci di protoni si incrociano 40 milioni di volte al secondo. A ogni incrocio, avvengono in media 20 collisioni protone-protone per un totale di 800 milioni di collisioni per secondo. Ci si aspetta di vedere il bosone di Higgs una volta ogni 10.000.000.000.000 di collisioni, quindi non più di una volta al giorno.

Il contributo di Infn

L'Infn coordina i circa 600 fisici italiani che lavorano a Lhc e ha contribuito in modo rilevante alla progettazione e realizzazione dell'acceleratore e degli esperimenti.

Dove si trova

Al Cern di Ginevra, al confine tra Francia e Svizzera.



[as] lavori in corso

Il punto su LHC

di Walter Scandale

*Cern, dipartimento di Tecnologie
per gli Acceleratori*

Lhc è ai blocchi di partenza! Il *Large Hadron Collider*, l'anello di collisione per adroni in costruzione al Cern di Ginevra, tra alcuni mesi prenderà il via.

Insieme all'acceleratore entreranno in funzione i quattro rivelatori di particelle degli esperimenti Atlas, Cms, Alice e Lhc-b, destinati allo studio delle reazioni che si produrranno lungo l'anello, in quattro punti distinti.

L'acceleratore è costituito da due anelli intrecciati ed è installato all'interno dello stesso tunnel circolare lungo 27 km già utilizzato per il Lep (*Large Electron Positron collider*), il precedente collisore del Cern, che ha smesso di funzionare nel novembre del 2000. Diversamente da quanto accadeva nel Lep, in cui venivano accelerati e fatti scontrare elettroni e antielettroni, le reazioni osservate in Lhc saranno il frutto di urti tra particelle molto più pesanti, gli adroni (particelle composte da quark come i protoni e i neutroni), accelerati a velocità vicine alla velocità della luce. L'enorme energia che si svilupperà nella collisione lascia prevedere la formazione di moltissime particelle, delle quali sarà possibile studiare le caratteristiche e i meccanismi di interazione: alcune di esse sono già note, mentre altre non sono mai state osservate direttamente.

Si prevede che in Lhc sarà sviluppata un'energia di collisione di 14 teraelettronvolt,

10.000 miliardi di volte superiore all'energia dei fotoni emessi da una comune lampadina, e che la luminosità, del fascio, legata alla densità delle particelle in esso presenti, sarà di 10^{34} per centimetro quadrato al secondo (10 milioni di miliardi di miliardi di miliardi).

Si tratta di valori largamente superiori a quanto mai realizzato finora: l'energia è sette volte superiore a quella del Tevatron del Fermilab di Chicago e la luminosità è venti volte superiore a quella del Isr, il collisore protone-protone costruito al Cern sul finire degli anni Sessanta. Richieste così eccezionali portano a concepire soluzioni tecnologiche spinte al limite delle attuali conoscenze.

Per fare in modo che i fasci di particelle non sfuggano dall'anello, ma rimangano confinati in esso, e ben focalizzati, sono disposti lungo Lhc circa 1.700 magneti, per una lunghezza totale di 24,5 km e una massa complessiva di oltre 40.000 tonnellate. Di questi, 1.232 sono magneti di *dipolo* e hanno il preciso compito di curvare il fascio lungo l'anello, mentre oltre 400 magneti di *quadrupolo* mantengono il fascio ben focalizzato. I dipoli seguono l'evoluzione del fascio generando campi magnetici che, per curvare la traiettoria di particelle sempre più veloci, devono essere sempre più elevati. Al momento delle collisioni, in particolare, quando i protoni hanno ormai velocità relativistiche,

il campo magnetico dei dipoli supera gli 8 tesla ed è quindi circa 200 mila volte più intenso del campo magnetico terrestre. Per ottenere simili prestazioni questi magneti superconduttori lavorano a temperature bassissime. Raffreddati con l'uso di elio superfluido a 1,9 gradi kelvin (circa -271° C), i dipoli e i quadrupoli di Lhc saranno gli oggetti più freddi dell'Universo! A pieno regime, inoltre, sulla struttura che contiene un dipolo lungo 15 metri agisce una forza elettromagnetica di circa 100.000 tonnellate, mentre l'energia accumulata è di 8 megajoule. In un ambiente così ostile per i materiali, i conduttori tendono a deformarsi e nel campo magnetico appaiono distorsioni che seguono un'evoluzione complessa. Anche la forza elettromagnetica tra i fasci e le correnti persistenti nel superconduttore producono forze il cui effetto è quello di rendere caotiche e instabili le traiettorie dei protoni. Allo scopo di prevedere questi fenomeni e mitigarne gli effetti, sono stati sviluppati sofisticati strumenti di analisi e di calcolo e sono stati messi in opera accurati sistemi di controllo di qualità delle parti più critiche dei magneti, come i cavi superconduttori, le bobine e le strutture di contenimento. Inoltre, tutta la circonferenza di Lhc prevede sistemi di correzione in grado

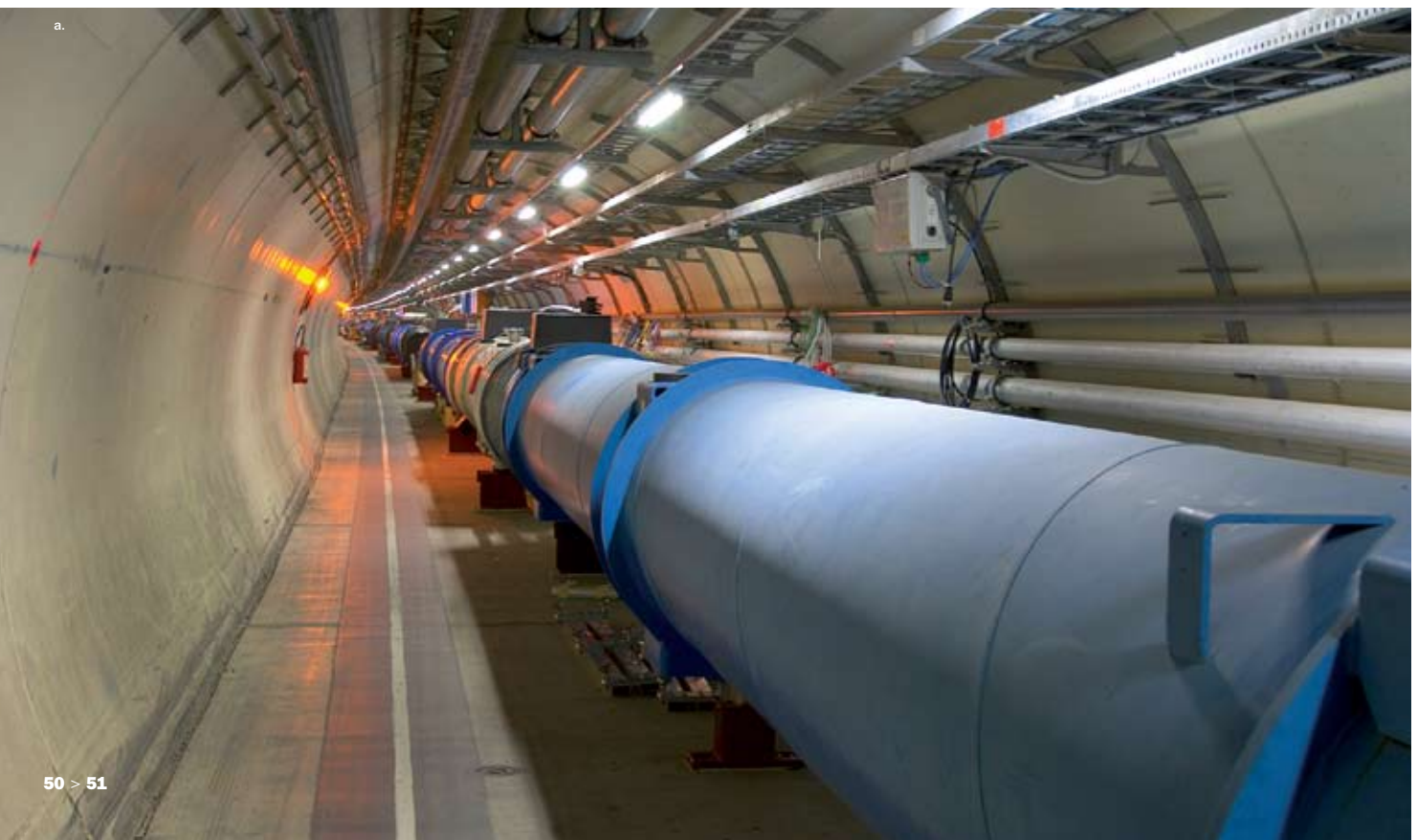
di bilanciare gli effetti negativi dei contributi destabilizzanti del campo magnetico.

La probabilità di dar luogo a un evento in un anello di collisione, di generare cioè determinati tipi particelle dallo scontro di due fasci, è tanto più bassa quanto più è alta la massa totale delle particelle originate nell'urto (la diminuzione è addirittura quadratica: raddoppiando la massa, cioè, la probabilità diventa un quarto). Per questa ragione, gli eventi ad altissima energia attesi in Lhc sono chiamati "eventi rari". Se si vogliono raccogliere in un tempo ragionevole un numero significativo di eventi rari, quanto più elevata è l'energia di collisione, e quindi la massa delle particelle previste, tanto più elevata deve essere la luminosità.

Questo fatto spinge a massimizzare il valore della luminosità del Lhc fino ai limiti imposti dalla fisica e dalla tecnologia.

Il principale limite fisico nasce proprio dall'interazione elettromagnetica tra i fasci, che si verifica quando due pacchetti di adroni, collidendo, si incuneano l'uno nell'altro. Questa interazione dipende in modo complesso dalle posizioni e dalle velocità di ciascuna particella. A causa di ciò, le traiettorie dei protoni assumono un carattere sempre più casuale e quando la densità di particelle nei

a.
L'installazione dei magneti di Lhc procede rapidamente. L'ultimo dei 1700 magneti previsti è stato calato nel tunnel del collisore lo scorso maggio.



pacchetti supera un valore critico le traiettorie perdono stabilità. L'altro limite fisico nasce dall'interazione elettromagnetica tra un intenso fascio di particelle e le pareti dell'anello.

Per contenere le interazioni dei fasci con le particelle dell'aria, i fasci viaggiano all'interno di una ciambella in cui viene fatto il vuoto.

Quando l'intensità di carica elettrica circolante supera un certo valore, però, l'interazione con le pareti metalliche della ciambella induce un effetto destabilizzante che può essere attenuato solo facendo ricorso ad un potente sistema di contro-reazione.

Limitazioni tecnologiche al valore della luminosità del fascio sorgono quando si definiscono le caratteristiche di alcuni sistemi che hanno un particolare ruolo strategico.

Accelerate e deviate continuamente all'interno dell'anello, ad esempio, le particelle del fascio sono soggette a rapide variazioni di moto a seguito delle quali irradiano energia e danno luogo alla cosiddetta radiazione di sincrotrone. Il sistema criogenico, quindi, oltre a raffreddare i magneti, deve essere concepito per assorbire la potenza di sincrotrone (che in Lhc è dell'ordine di 3.600 watt) irradiata continuamente lungo la traiettoria del fascio, nonché la radiazione depositata quando parte del fascio si disperde.

È previsto, inoltre, un sistema destinato ad assorbire i protoni ancora circolanti alla fine di una sessione sperimentale. Esso deve essere compatibile con situazioni di emergenza tali da richiedere che tutta l'energia immagazzinata, il cui valore massimo raggiunge i 360

mega-joule per fascio circolante, sia evacuata immediatamente. Di importanza cruciale è anche il sistema di collimazione, destinato ad assorbire l'inevitabile alone che circonda il fascio: deve avere un'efficienza senza precedenti, tale da far prevedere perdite di non più di 2 particelle su 10.000, e deve poter sostenere senza danno situazioni di emergenza che portino all'impatto istantaneo di una considerevole parte del fascio, fino al 10%. Non ultimo, il sistema per il vuoto, che non prevede l'uso di pompe ma sfrutta l'effetto di pompaggio criogenico diffuso tra superfici a temperature diverse, deve funzionare perfettamente nonostante l'esigua dimensione della camera a vuoto.

Solo quando Lhc entrerà in funzione, quindi entro alcuni mesi, sarà possibile studiare in dettaglio questi e altri aspetti tecnici, allo scopo di raggiungere nel più breve tempo possibile i parametri di funzionamento previsti.

Al termine di quel percorso Lhc sarà l'acceleratore più potente mai costruito.

b.

Uno dei 1.232 dipoli magnetici superconduttori che hanno la funzione di curvare il fascio di particelle accelerate all'interno dell'anello di Lhc.

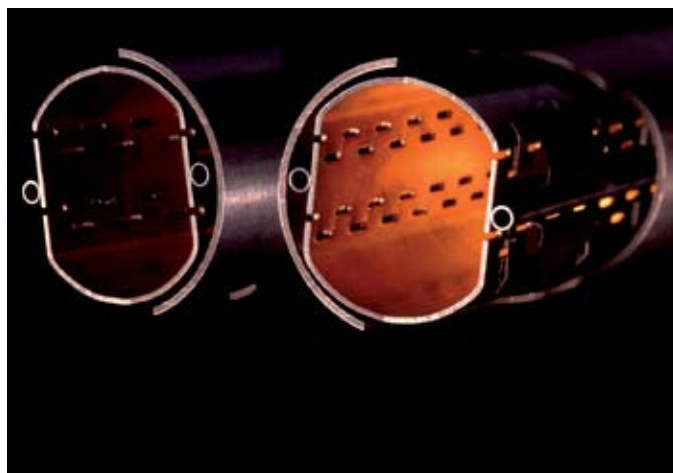
c.

Sezione trasversale del tubo nel quale il fascio di particelle di Lhc è accelerato a velocità prossime alla velocità della luce. Il tubo ha la funzione di proteggere i magneti dalle radiazioni emesse dal fascio. I magneti, infatti, che funzionano a temperature molto basse, al contatto con le radiazioni si scalderebbero. Le fessure visibili nell'immagine permettono alle molecole di gas residui di attraversare la schermatura ed essere "congelate" sulle pareti del tubo del fascio, mantenuto a sua volta a una temperatura molto bassa.

b.



c.



[as] tecnologia e ricerca

Intervista a Guido Roveta, presidente e amministratore delegato di Criotec

Intervista di Antonella Varaschin

[as] La Criotec è una piccola impresa che lavora a grandi progetti, in Italia e all'estero, sviluppando tecnologie d'avanguardia...

Siamo nati 18 anni fa. Ora siamo una trentina, all'inizio eravamo in sei, è stata durissima. Ho iniziato questo nuovo cammino a 44 anni, quando pensavo di aver raggiunto l'apice della mia esperienza.

Per carattere mi faccio trascinare da nuovi obiettivi e da nuove scommesse così, pur lavorando in una piccola realtà, sono cresciuto professionalmente in modo notevole, grazie anche al contributo dei clienti con cui abbiamo avuto che fare, che sono soprattutto enti di ricerca, ma anche grandi aziende impegnate nel campo dei gas dell'aria, che hanno diverse applicazioni tecnologiche e industriali.

[as] Quindi molte commesse della Criotec arrivano da enti di ricerca. La ricerca di base può spingere le imprese verso nuove sfide tecnologiche?

Sì, sono fermamente convinto di questo: nel nostro lavoro usufruiamo delle esperienze dei centri di ricerca. In Italia collaboriamo con l'Infn, con l'Enea e alcuni politecnici; all'estero con il Cern dove lavoriamo al progetto di Lhc. Ma abbiamo anche collaborazioni con enti di ricerca in Germania e in Francia, per esempio. Questo ci stimola verso traguardi sempre più avanzati perché nello sviluppo della maggior parte dei

progetti dobbiamo confrontarci con nuove esigenze. Durante lo sviluppo di un progetto, tecnici e ingegneri della Criotec lavorano in collaborazione con tecnici e ricercatori degli enti di ricerca. Partiamo da una specifica di base che descrive il prodotto finale e noi lo realizziamo unendo la nostra esperienza alle conoscenze di chi ci commissiona il progetto, lavoriamo in sinergia col nostro interlocutore che è sempre molto disponibile a dare il massimo apporto affinché il progetto cresca al meglio.

[as] Che progetti avete sviluppato con l'Infn?

Abbiamo iniziato con una piccola commissione per Laboratori Nazionali di Frascati, poi abbiamo lavorato con la sezione di Padova: è stato il primo progetto importante, grazie al quale abbiamo raccolto una buona esperienza su dispositivi per purificare l'argon, che poi abbiamo impiegato in un progetto con l'università di Granada, in Spagna e con l'Infn di Napoli.

Queste competenze saranno anche spese nel progetto Warp dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso: per Warp abbiamo già realizzato il criostato per argon liquido (30.000 litri) e ora stiamo costruendo una parte dell'impianto di purificazione.

[as] Si parla spesso di investire in ricerca e sviluppo, ma tra il dire e il fare...

In Italia, ma anche in Europa, dobbiamo puntare



a.



b.

molto sulla ricerca se vogliamo sopravvivere in futuro. Mi pare che ora si stia un po' cambiando tendenza rispetto al passato, anche se c'è da dire che in passato spesso i soldi sono stati spesi male: capitava che nelle grosse aziende certi progetti venissero condotti più per motivi di immagine che altro. È chiaro che tutti dovrebbero investire in ricerca, però è ovvio che le piccole aziende abbiano più difficoltà. Noi, per esempio, solo ora, dopo 18 anni che siamo sul mercato, possiamo contare su uno zoccolo duro che ci consente di farlo.

Ovviamente puntiamo di più sul progetto: abbiamo un ordine e dobbiamo far ricerca per raggiungere l'obiettivo.

Più difficile è far ricerca per il piacere di inventare qualcosa di nuovo, senza che ci sia stato commissionato, ma iniziamo a farlo perché crediamo che il mercato potrebbe aver bisogno anche di questo. Sebbene ora ci siano delle agevolazioni, a proprio carico rimane una buona percentuale dei costi, e un'azienda non può permettersi di non rientrare nel budget: a fine anno, il bilancio deve quadrare, questo vale soprattutto per chi è piccolo come noi.

[as] Che cosa può fare un governo per favorire il sostegno alla ricerca di base?

Lo stato in futuro dovrà farsi carico sempre di più di questo compito, se l'Italia vorrà stare al passo con gli altri Paesi o, comunque,

essere competitiva. Bisogna spingere sulla ricerca. Ormai ci sono Paesi emergenti dove il costo del lavoro è ridicolo rispetto al nostro, se non teniamo loro testa ci sommergeranno inevitabilmente. Lo stato dovrebbe credere un po' di più nel valore delle aziende italiane, anche perché fare impresa al giorno d'oggi non è per nulla facile.

Dal punto di vista psicologico, c'è sempre l'idea che l'impresa non sia altro che un'associazione a scopo di lucro, con tutta la connotazione negativa che il termine lucro si porta dietro. Bisogna crederci e l'aiuto da parte dello Stato è ancora poco, non parlo solo dell'aiuto tangibile ma anche dell'aiuto morale: lo Stato dovrebbe sostenere l'idea che l'impresa svolge una funzione importante per la società. Bisogna cambiare mentalità.

[as] Progetti futuri?

Cerco di guardare al mio orticello: il mio obiettivo è perseguire la stabilità dell'azienda grazie al livello qualitativo.

La qualità del prodotto produce riscontri notevoli da parte dei clienti e quindi porta solidità all'azienda. Io spingo particolarmente sulla crescita della tecnologia interna, non sull'aumentare i numeri: il fatturato e il numero dei dipendenti ritengo siano una conseguenza della stabilità. Insomma, non mi interessa crescere nei numeri ma nella qualità.

a.
Allestimento dell'apparato criogenico dell'esperimento Cms di Lhc, al Cern di Ginevra. Alcune delle componenti sono state prodotte dalla Criotec.

b.
Guido Roveta in occasione del ritiro del "Gold Award" al Cern. Criotec è una delle 5 aziende italiane che ha ricevuto questo riconoscimento internazionale.

[as] benvenuti a bordo

Intervista a Giorgio Riccobene, ricercatore dei Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn

Intervista di Antonella Varaschin

[as] Quando è iniziata la tua passione per la fisica?

Da piccolo mi regalarono dei libri che trattavano argomenti di fisica e leggendoli, non so bene perché, iniziai ad appassionarmi alla materia. Per fortuna non divenne mai una mania, ma il mio obiettivo era studiare fisica. Insomma, la fisica è entrata nella mia vita un po' per caso quando avevo una decina d'anni per non uscirne più!

[as] Lavori a Nemo, un progetto per studiare dal fondo del mare i neutrini di alta energia: immagino che tu abbia fatto delle campagne in nave per seguire l'esperimento. Com'è andata?

L'inizio dell'attività di Nemo, era il 1998, quasi non è stato altro che un continuo di uscite in mare: come si fa per un telescopio ottico quando si cerca la visibilità migliore, così noi cercavamo le condizioni ottimali in acqua. Le campagne in mare si sono susseguite con ritmi intensi per quasi sei anni e proseguono tuttora, anche se meno frequenti. In particolare io, che allora ero un dottorando e uno dei più giovani, mi sono dovuto occupare un po' di tutti gli aspetti organizzativi e logistici. Questo, per esempio, ha significato nel 1998 fare una campagna in mare di circa un mese: un mese senza mai toccare terra! Devo dire che si impara moltissimo, perché quando ti trovi fuori in mare, diversamente da quanto accade in un laboratorio di ricerca, non sei tu che decidi che cosa fare e quando, ma sei in balia delle condizioni ambientali. Ti può capitare di dover bloccare

la calata in mare dello strumento per fare misure perché le condizioni del tempo non te lo consentono: devi immediatamente recuperare la tua apparecchiatura perché la cosa diventa pericolosa per te e per gli altri. È allora che riduci quel tuo senso di controllo delle condizioni al contorno che probabilmente il fisico "per natura" possiede. Da fisico tendi a credere di poter fare il tuo lavoro organizzando tutto, invece ti rendi conto che le cose non sempre vanno così. Quando sei in mare è il mare che comanda. Talvolta è stata dura, ma stare un mese con le stesse quindici persone ha fatto sì che si creasse un certo affiatamento all'interno del gruppo.

[as] A poco più di trent'anni lavori come ricercatore con un contratto a tempo indeterminato: non è poi così comune in Italia...

Mi ritengo parecchio fortunato perché la mia esperienza si differenzia da quella di tanti colleghi che purtroppo non hanno ancora la possibilità di avere un posto fisso. La mia fortuna di prendere un posto stabile come ricercatore è dovuta anche al fatto che, in un certo senso, ho rischiato. Mi sono laureato in fisica nucleare facendo degli esperimenti ai Laboratori Nazionali del Sud e poi, diversamente dalla maggior parte dei miei colleghi, quando è iniziato il progetto Nemo, che all'epoca era più che altro una scommessa, ho deciso di abbandonare un campo consolidato, come quello della fisica nucleare, e rischiare. Sono andato a Roma dove si iniziavano gli studi in questo settore e poi



sono cresciuto con Nemo. Così quando c'è stata l'opportunità di un posto fisso di ricercatore per lavorare al progetto, mi sono trovato con pochissime altre persone in Italia che potevano concorrere per lo stesso impiego. Quindi il consiglio che do a tanti ragazzi che magari iniziano adesso a studiare fisica è di osare, di lanciarsi in una attività di ricerca nuova, se si presenta loro l'occasione. Incamminarsi su nuovi tracciati è anche nello spirito dell'attività di ricerca.

[as] Nel tuo lavoro avrai la possibilità di entrare in contatto con colleghi di altri Paesi. La situazione della ricerca italiana è effettivamente sui generis?

Per quanto riguarda le discussioni scientifiche non ci sono differenze, anzi, i ricercatori italiani sono molto competitivi. Più in generale, però, quello che ho notato nel nostro Paese è un certa difficoltà ad acquisire nuovi giovani ricercatori: è questa la differenza sostanziale con l'estero. Inoltre, l'altra situazione difficile che ho vissuto quando ancora non avevo un posto stabile, è che i precari italiani hanno delle retribuzioni inferiori rispetto a quelle dei colleghi europei. Insomma, il fatto è che il lavoro del ricercatore non viene valutato per quello che è: un lavoro certo appassionante ma anche di sacrificio.

[as] La tua giornata-tipo?

Mi sveglio verso le nove e vengo a lavoro. Adesso, con i nuovi sviluppi dell'acustica del

progetto Nemo ho parecchi interessi scientifici di cui occuparmi. Lavoro con il mio piccolo gruppetto di ricerca e poi seguo l'attività degli studenti: tutto ciò mi assorbe l'intera giornata. Solitamente esco dal lavoro verso le dieci di sera. Quando posso cerco di uscire a divertirmi con gli amici: vado al cinema, cucino e ho provato anche a ballare il tango. Ora che sono più sereno, perché ho un lavoro stabile, cerco di ritagliarmi un po' di tempo libero. Se penso allo stress che si ha quando a trent'anni non si può ancora contare sulla stabilità lavorativa... è un gran problema questo! In passato sono stato rappresentante dei dottorandi e ho ancora a cuore certe questioni, anche se ora l'attività di ricerca non mi consente di avere più queste occupazioni.

[as] Prospettive per il futuro?

Nemo ha una durata che si prevede non inferiore a un decina d'anni e non lo abbandonerò prima. La cosa divertente di questo esperimento è che si lavora su più campi: mi sono trovato al limite tra la fisica e la biologia, occupandomi così di aspetti interdisciplinari. Per fortuna, ho un lavoro che mi offre ampi spazi di manovra, posso scegliere. Nemo ci insegnerà tantissimo sul mare e sulla fisica del mare: secondo me, potrebbe essere una grandissima opportunità per iniziare nuove ricerche.

Mi piacerebbe fare biofisica, ma non lo so... staremo a vedere le possibilità che Nemo offrirà... chissà a che cosa mi appassionerò...

Il primo fotone “catturato” da Agile Il satellite Agile (Astro rivelatore Gamma a Immagini Leggero), costruito con il sostanziale contributo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn), è in orbita dal 23 aprile scorso e dopo sole tre settimane dal lancio ha “catturato” il suo primo fotone. La missione di Agile è quella di esplorare campi importanti dell'astrofisica delle alte energie. Il rivelatore ha la caratteristica esclusiva e originale di combinare, in un unico strumento, rivelatori di raggi gamma e di raggi X. Questa particolarità gli consente di studiare sorgenti e fenomeni in evoluzione, che si manifestano contemporaneamente con emissioni di radiazione anche molto diverse fra loro. Il fotone gamma, che Agile ha rivelato ancora nella fase iniziale di test della strumentazione lo scorso 8 maggio, proviene da una zona remota dell'Universo, probabilmente al di fuori della nostra Galassia, e porta con sé l'informazione di una immane e lontanissima esplosione cosmica. Da allora, Agile sta catturando migliaia di fotoni gamma, proprio come i ricercatori si aspettavano. [c.p.]



Fino all'ultimo magnete Grande soddisfazione per i fisici impegnati nella realizzazione di Lhc, il grande acceleratore di particelle in costruzione al Cern di Ginevra. L'ultimo dei 1.232 grandi magneti, necessari a guidare i fasci di protoni, è stato infatti calato nel tunnel di 27 km del collisore, ad oltre 100 metri sotto il livello del suolo. I dipoli magnetici superconduttivi sono forse tra le componenti più complesse della macchina Lhc. Le loro bobine a temperature bassissime, prossime allo zero assoluto, conducono altissime correnti elettriche senza alcuna dispersione di energia e producono così un campo magnetico sufficientemente potente (fino a 200.000 volte quello terrestre) da mantenere nella loro traiettoria circolare i protoni a velocità prossime a quelle della luce. Oltre 35.000 tonnellate di materiale sono state calate nel sottosuolo e trasportate per oltre 15 Km all'interno del tunnel e infine posizionate con una precisione millimetrica. Un'operazione analoga era stata portata a termine sotto la supervisione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn) lo scorso febbraio, quando alla stessa profondità è stato calato il solenoide di 2.000 tonnellate dal diametro 6 metri e lungo 13, che costituisce il cuore dell'esperimento Cms (*Compact Muon Solenoid*). Il sofisticato apparato tecnologico è completato dal sistema di raffreddamento all'elio liquido, che ne garantisce il funzionamento mantenendo i magneti a una temperatura vicina allo zero assoluto (-271°C). La costruzione dei potenti magneti superconduttori è stata una grande sfida tecnologica e industriale per il Cern e l'industria europea e in particolare il contributo italiano (Infn, Asg Superconductor, ex gruppo Ansaldo e Criotec) è stato decisivo. E le stesse tecnologie di superconduttori sono oggi impiegate nella diagnostica medica per la risonanza magnetica. [v.n.]



Virgo è in ascolto e parla con Ligo È finalmente in ascolto e pronto a captare le increspature dello spaziotempo provenienti da ogni direzione nell'Universo. Virgo, l'interferometro gravitazionale di Cascina, nato da una collaborazione italo-francese tra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn) e il Centre National de la Recherche Scientifique (Cnrs), ha infatti cominciato lo scorso 18 maggio la prima fase di raccolta dei dati scientifici. L'obiettivo è la misura diretta, fino ad oggi mai effettuata, delle onde gravitazionali prodotte da eventi cosmici, come l'esplosione di una supernova, la fusione di sistemi binari, la rotazione di pulsar, i sistemi di due buchi neri o le collisioni catastrofiche nella Via Lattea o nelle galassie esterne, fino all'ammasso della Vergine (Virgo). È però molto difficile prevedere quanti eventi potranno essere di fatto rivelati, poiché è incerta l'intensità delle onde gravitazionali emesse e il numero delle sorgenti effettivamente esistenti. Grazie all'intesa internazionale siglata con lo statunitense Ligo e il tedesco Geo600, Virgo comunque non sarà solo. I tre esperimenti lavoreranno in parallelo scambiandosi i dati in tempo reale: questo consentirà una conferma reciproca delle osservazioni rilevate, nonché la possibilità di localizzare le sorgenti in base alla differenza temporale con cui l'onda gravitazionale raggiunge i differenti punti del nostro pianeta. [v.n.]





**I laboratori dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.**

I laboratori organizzano, su richiesta
e previo appuntamento, visite gratuite
per scuole e vasto pubblico.

La visita, della durata di tre ore circa,
prevede un seminario introduttivo
delle attività dell'Infn e del laboratorio
e una visita alle attività sperimentali.

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

T + 39 049 8068547
schiavon@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

Ulteriori informazioni per visitare
i laboratori dell'Infn si trovano alla pagina
www.infn.it/educational

www.infn.it



www.infn.it

rivista on line
www.asimmetrie.it

[il centro di cultura scientifica ettore majorana]

di Antonino Zichichi



allegato al numero **4** / 6.07 di **asimmetrie**

rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

[+as]



Grazie alla pubblicazione occasionale di inserti allegati, Asimmetrie offrirà ai propri lettori l'opportunità di approfondire la conoscenza di ricerche, iniziative e istituzioni del mondo scientifico. In questa prima edizione, il professor Antonino Zichichi parlerà dello spirito che lo ha portato alla fondazione del Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana e ne racconterà la storia, che lo ha reso un punto di riferimento per l'incontro e il dialogo per gli scienziati di tutto il mondo.

la redazione di Asimmetrie

[+as]

allegato di **asimmetrie** numero **4** / 6.07

Il Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana

di Antonino Zichichi

8 maggio 1993.
Il Professore Zichichi rivolge
al Santo Padre, a nome dei
10.000 scienziati di Erice,
il discorso di benvenuto.



Il Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana

L'ansia del sapere, che ebbe in Sicilia, con Archimede (calcolò il numero dei granelli di sabbia che potevano stare in tutto l'Universo, per dimostrare che non poteva essere infinito, come pretendevano i Pitagorici), un esempio tra i più grandi, trova una continuità di pensiero a Erice, dove scienziati di tutto il mondo hanno dato vita a una Scienza senza barriere ideologiche, politiche e razziali. I granelli di sabbia sono oggi leptoni e quark ed Erice è il primo esempio di ciò che sarà l'Università nel terzo millennio. Quella a noi familiare è nata a Bologna, novecento anni fa.

La Scienza — con Galilei — ha però dato all'uomo innumerevoli scoperte: difficile ritrovarle tutte, specialmente le più recenti, nell'insegnamento universitario. I sapienti dell'era moderna non sono più tutti a Bologna, ma sparsi nel mondo. Nasce così a Ginevra l'idea del Centro di Cultura Scientifica "Ettore Majorana". Ogni anno, dal 1963 in poi, coloro che hanno al loro attivo invenzioni e scoperte, vengono a Erice. Le loro lezioni sono seguite da studenti di tutto il mondo, desiderosi di apprendere le novità del sapere dalla viva voce degli Autori, come avveniva a Bologna più di nove secoli fa. Nel corso di questi quarantaquattro anni di attività, ottantasettemila scienziati di centoquaranta nazioni hanno preso parte alle attività post-universitarie svoltesi all'insegna di una Scienza senza segreti

e senza frontiere. Una comunità scientifica che ha cercato di abbattere le barriere ideologiche, politiche, razziali, inventate non dalla Scienza, ma dai suoi peggiori nemici. L'esistenza di una comunità scientifica tanto vasta quanto quella di Erice è la dimostrazione concreta che il nuovo ruolo della Scienza è già una realtà.

Fare Scienza vuol dire scoprire la Logica Fondamentale della Natura. Le applicazioni delle grandi scoperte scientifiche sono sempre sfuggite al controllo della Scienza. Ecco perché lo sviluppo tecnologico si è quasi sempre orientato in contrasto con i valori cui la Scienza si ispira: amore verso il Creato e rispetto per la vita e la dignità umana. «Scienza e Fede sono entrambe doni di Dio» ha detto Giovanni Paolo II. Nessun Papa aveva mai avuto il coraggio di porre la Scienza e la Fede su un piedistallo di pari dignità. Il nuovo ruolo della Scienza nasce da questa verità. Ed è da questa stessa verità che nasce lo "Spirito di Erice", noto nella comunità scientifica internazionale come "The Erice Geist" un misto di italiano, inglese e tedesco. È da questo "Erice Geist" che sono nati i Seminari sulle Guerre Nucleari che hanno visto attorno allo stesso tavolo in Erice i massimi cervelli della difesa USA e URSS. Come detto prima, bisogna fare un salto di novecento anni, indietro nel

tempo, per capire che cosa è successo a Erice dal 1963 in poi. Quando più di novecento anni fa nacque a Bologna la prima Università, l'impulso venne da un'esigenza che ancora oggi non si è spenta. Anzi. Conoscere, dalla viva voce di chi inventa e scopre cose nuove, le basi di quelle invenzioni e scoperte. Fu ciò che spinse un gruppo di uomini colti a fondare la prima Università. A quei tempi erano l'astronomia, le scienze mediche e giuridiche al centro dell'attenzione. E per conoscere le ultime novità bisognava aspettare le stesure dei libri. Tempo necessario: dieci anni. Adesso i libri si stampano in una settimana. Perché allora insistere nel cercare la "viva voce" di chi scopre e inventa? Si sono ridotti i tempi per produrre un volume. Ma le conoscenze

si sono espanse a un ritmo travolgente. Quello che l'uomo ha appreso da Galilei a oggi è superiore a tutto ciò che aveva capito nel corso dei diecimila anni che ci separano dall'alba della civiltà. Cosa ne è stato di quella istituzione detta Università? Piano piano essa ha dovuto assorbire l'enorme crescita del sapere. In tutti i campi. Quindi, da centro propulsore di nuove conoscenze essa è diventata luogo di formazione propedeutica. Portare i giovani alle soglie delle nuove conoscenze, metterli in grado di capire cosa si fa nei settori più avanzati delle diverse discipline in cui si articola l'umano sapere: ecco il compito delle Università di oggi. E non è poco. Come la mettiamo con le invenzioni e le scoperte? Chi le fa? Come le fa? Come ci si arriva? Se uno studente apre

un libro universitario ha quasi sempre l'impressione che il settore trattato sia capitolo chiuso. Difficilmente troverà spazio per discutere e comprendere quali sono i problemi aperti in quel campo. Eppure di problemi da risolvere ce ne sono in tutti i settori. L'espansione del sapere umano ha portato l'insegnamento universitario su un terreno totalmente diverso da quello di partenza. Novecento anni fa, una persona colta poteva conoscere bene, a fondo, diverse discipline. Oggi dire fisica corrisponde a un mondo vastissimo di conoscenze. C'è la fisica molecolare, quella atomica, quella nucleare e quella subnucleare, per non citare che alcuni tra i capitoli più vasti delle scienze fisiche. Ma anche se prendiamo soltanto quella subnucleare,

ci accorgiamo che ci sono almeno dieci specialità. In matematica, esistono centinaia di settori, ciascuno di grande vastità e interesse. Le cose non cambiano se passiamo dalla Scienza cosiddetta pura a quella applicata. Dire medicina è come dare un solo nome a mille settori. Che cosa succede a un giovane studente desideroso di sapere che cosa c'è di nuovo nel settore che lo affascina? Una Università, quando va bene, di stelle di prima grandezza ne potrà avere un paio. Quel paio non può coprire tutti i settori dell'umano sapere. Gli specialisti che lavorano alle frontiere di un determinato settore si possono trovare un po' ovunque. Ascoltarli tutti sarebbe un'impresa impossibile. Bisognerebbe fare il giro del mondo,



Erice, 26 maggio 1963.
Apertura della prima Scuola
di Fisica Subnucleare.

Da sinistra Victor F. Weisskopf,
Antonino Zichichi e Sidney D. Drell.

Victor F. Weisskopf
e Antonino Zichichi (1962).



Il Manifesto di Erice

● È senza precedenti nella Storia del mondo il fatto che l'uomo sia arrivato ad accumulare tanta potenza militare da potere distruggere, in poche ore, tutti i centri propulsori di vita civile nel mondo, e da danneggiare al tempo stesso alcune proprietà vitali del pianeta.

Il pericolo di un olocausto nucleare non è la conseguenza inevitabile del grande sviluppo che ha avuto la Scienza pura.

Infatti Scienza vuol dire studio delle Leggi Fondamentali della Natura.

La Tecnologia è invece lo studio di come la potenza dell'uomo può essere aumentata. La tecnologia può avere scopi di pace e di guerra. La scelta tra tecnologia di pace e tecnologia di guerra non è di natura scientifica, ma culturale. La cultura dell'amore produce utensili di pace. La cultura dell'odio produce strumenti di guerra.

Odio e amore sono sempre esistiti. Nell'età del bronzo e del ferro, notoriamente pre-scientifiche, l'uomo ha inventato e costruito utensili di pace e ordigni di guerra. Nell'era cosiddetta "moderna" è di vitale importanza per la specie umana che vinca la cultura dell'amore.

Oggi nel mondo un numero enorme di scienziati si dedica in parte alla ricerca scientifica pura e in parte alle applicazioni militari. Sta qui una sorgente essenziale per la corsa agli armamenti.

È quindi necessario che, in seno alla stessa comunità scientifica e su basi internazionali, si sviluppi un nuovo consapevole orientamento.

È di vitale importanza identificare quali sono gli elementi fondamentali necessari affinché possa avere inizio un efficace processo che garantisca la protezione della vita e della cultura minacciate da una catastrofica terza guerra mondiale senza precedenti. Per arrivare a tanto è necessario che il movimento per la pace passi dalle sue azioni unilaterali ad iniziative internazionali basate su preposte concrete elaborate in uno spirito di reciproco accordo e mutua comprensione.

Ettore Majorana
Foundation and Centre
for Scientific Culture
Questo Manifesto è stato stilato
da Paul A. M. Dirac, Piotr
Kapitza e Antonino Zichichi
a Erice nell'agosto del 1982.

Nel corso dei tre anni successivi
(1982-1985) il Manifesto è stato
firmato da 10.000 scienziati
di tutto il mondo. Il Manifesto
di Erice ha suscitato l'interesse
di insigni Statisti quali Deng
Xiaoping (Cina), Mikhail

Gorbachev (URSS), Olof Palme
(Svezia), Sandro Pertini (Italia),
Ronald Reagan (USA), Pierre
Trudeau (Canada), che hanno
dato quindi vita a diverse
iniziative per una Scienza senza
Segreti e senza Frontiere.

● Ecco le nostre proposte:

1. Gli scienziati che scelgono di dedicare tutto il loro tempo, completamente, allo studio teorico e sperimentale delle Leggi Fondamentali della Natura, in nessun caso dovrebbero subire alcuna discriminazione, a causa di questa loro decisione di dedicarsi soltanto alla Scienza pura.
2. Tutti i Governi dovrebbero impegnarsi a fondo al fine di ridurre o eliminare le restrizioni alla libera circolazione di informazioni, idee e persone. Tali restrizioni non fanno che aumentare nel mondo sospetto e rancore.
3. Tutti i Governi dovrebbero compiere ogni possibile azione per ridurre la segretezza nelle tecnologie militari. I segreti militari generano odio e sfiducia. Iniziare una campagna contro i segreti militari creerà una stabilità maggiore di quella garantita dal potere deterrente delle armi.
4. Tutti i Governi dovrebbero continuare la loro opera per impedire che altri Paesi, o gruppi non nazionali, vengano in possesso di armi nucleari.
5. Tutti i Governi dovrebbero compiere ogni sforzo possibile per ridurre il numero delle armi nucleari ammassate nei loro arsenali.
6. Tutti i Governi dovrebbero fare in modo da ridurre le cause di insicurezza per le potenze non nucleari.
7. Tutti i Governi dovrebbero impegnarsi a fondo per proibire qualsiasi tipo di prove nucleari a fini bellici.

● Conclusione

Tutti gli scienziati — nell'Est e nell'Ovest — che sono d'accordo con questo «Manifesto di Erice», si impegnano moralmente a fare tutto il possibile affinché, ovunque nel mondo, si possa realizzare al più presto questo nuovo spirito di consapevole orientamento delineato nel presente documento.

avere il privilegio di essere ricevuti e assistere alle loro lezioni.

A Erice, coloro che vengono per seguire i corsi di una determinata Scuola — la più antica è quella di fisica subnucleare — sono detti "studenti". In realtà si tratta di giovani che hanno completato con successo i loro studi universitari e vengono a Erice per sapere quali sono i problemi nuovi. Questo vale per tutti i settori, che sarebbe troppo lungo elencare. Basterà dire che esistono centoventidue Scuole. Scuole delle quali ci limiteremo a citare i nomi e il Direttore. La lista è lunga (da pag. 16 a pag. 24) ma necessaria per avere un'idea di quella Istituzione che porta il nome di Ettore Majorana.

Ma quello che distingue Erice è lo spirito che anima tutti i partecipanti: studenti e docenti. L'obiettivo primo è imparare. Non si rilasciano diplomi né titoli di alcun tipo. Come novecento anni fa. Lo studente ascolta la lezione e dopo l'interruzione per la colazione si apre la parte più divertente. Lo studente può rivolgere al professore qualsiasi domanda. Anche la più banale. Non sarà punito. È interesse di tutti conoscere i pensieri dei giovani cervelli esposti alle novità scientifiche delle quali avevano, forse, immaginato tanti dettagli, ma difficilmente quelli che frullano nella testa del docente. Dato un problema, i modi di affrontarlo sono diversi. Ecco l'interesse delle sedute per discutere insieme.

Quando un gruppo di scienziati si trova riunito per trattare temi di grande attualità scientifica, può accadere veramente di tutto. Una volta venne a Scuola il Direttore Scientifico dell'IBM di Zurigo. Ritornato in sede, presentò le dimissioni dall'incarico di direzione per dedicarsi a un'idea che gli era venuta seguendo i corsi di Erice. Quell'idea lo

portò a scoprire la superconduttività ad alta temperatura: premiata con il Nobel. Stiamo parlando di Alex Müller. È un esempio di come possono nascere idee nuove a Erice.

L'esempio citato si riferisce alla ricerca scientifica pura, anche se le applicazioni della superconduttività ad alta temperatura saranno di vastissimo interesse per il trasporto dell'energia elettrica e mille altre attività. Un esperimento, realizzato usando materiale superconduttore a temperature vicine allo zero assoluto, ha permesso a un gruppo di fisici (Hill, Proust, Taillefer, Fournier e Greene) di scoprire che il trasporto del calore avviene grazie allo "spin" dell'elettrone; quindi alle sue proprietà magnetiche.

L'idea di maggiore valore nata a Erice, nel corso di lunghi anni trascorsi tra conflitti che hanno coinvolto tanti Paesi e che vengono spesso ignorati, è quella del Manifesto nel quale si sono riconosciuti più di diecimila scienziati di 115 Nazioni. L'obiettivo di quel Manifesto è la lotta ai Laboratori segreti.

Verrà il giorno in cui, coloro i quali fanno ricerche scientifico-tecnologiche in gran segreto dovranno essere accusati di crimine contro l'Umanità. Aprire le porte dei Laboratori scientifico-tecnologico-militari qualunque sia il tema della ricerca ivi portata avanti, non solo darebbe nuovo impulso alla ricerca scientifica in tutti i campi dello scibile, ma bloccherebbe di colpo la folle spirale della corsa agli armamenti, che oggi, dopo il crollo del Muro di Berlino, non ha più motivo di essere. Potrà sembrare utopistico che si possa arrivare a estirpare dai Laboratori scientifico-tecnologico-militari il segreto. Una cosa è però sicura. Se non riusciamo in questa impresa, prima o poi, il pianeta è destinato a saltare in aria.

Come detto in apertura, gli scienziati di Erice hanno dato vita a un nuovo modo di intendere la collaborazione scientifica internazionale: senza segreti e senza frontiere. È questo lo Spirito di Erice, The Erice Geist citato in apertura. Ed esso ha come condizione indispensabile il Volontariato Scientifico il cui obiettivo è lo sviluppo di tutti quei Paesi poveri (Sud) che sono oggi lontani dai livelli scientifici e tecnologici dei Paesi industrializzati (Nord). Il Volontariato Scientifico ha permesso di realizzare progetti che avrebbero avuto bisogno di somme enormi se non avessimo potuto contare sul lavoro offerto da migliaia di scienziati e specialisti, senza nulla chiedere in termini di onorari o compensi per il lavoro da essi svolto. Questo Volontariato tocca tutti i livelli, fino ai più alti. Ai nostri progetti contribuiscono infatti protagonisti della Scienza, della Tecnica, della Medicina, di prestigio mondiale. I risultati ottenuti grazie al Volontariato Scientifico nascono dallo Spirito di Erice e dimostrano quanto sia importante l'impegno di noi scienziati appartenenti ai Paesi industrializzati (Nord) per realizzare una solidarietà scientifica verso i Paesi bisognosi di tutto (Sud). Per superare il gap che ogni anno diventa più grande tra i Paesi poveri (Sud) e quelli ricchi (Nord) non basta offrire cibo e medicine. I Paesi poveri (Sud) hanno anche bisogno di imparare ad affrontare e risolvere – con le loro stesse energie intellettuali – i problemi che ne bloccano lo sviluppo. I Paesi ricchi (Nord) debbono aiutarli intellettualmente e materialmente, non con sprechi di energie economiche investite su progetti inutili, ma scegliendo progetti concreti, con obiettivi precisi, elaborati dalla comunità scientifica in stretta collaborazione con le migliori energie intellettuali degli stessi Paesi

bisognosi di tutto. Senza le basi che la comunità scientifica di Erice ha saputo metter su in quarant'anni di attività, il confronto Nord-Sud rischierebbe di entrare in rotta di collisione. Se ciò può essere evitato, è lo Spirito di Erice che permette di sperarlo. Il Centro di Cultura Scientifica «Ettore Majorana» non è una Accademia né una Università come quelle a tutti note. È una Istituzione nata nel cuore della Scienza di Frontiera per opera di Bell, Blackett, Rabi, Weisskopf e di chi scrive. Si tratta di esponenti della Scienza che saranno ricordati nella Storia della Fisica del XX secolo. Patrick M. S. Blackett, Premio Nobel, Lord e Grande Ammiraglio della Marina Britannica, scoprì il primo esempio di produzione simultanea "elettrone-antielettrone". Nel suo Laboratorio vennero scoperte le prime "particelle strane" così chiamate in quanto nessuno le aveva sapute prevedere. Quelle particelle avrebbero aperto una nuova frontiera nell'Universo Subnucleare. Isidor I. Rabi, scopritore dell'effetto che porta il suo nome, fu premiato col Nobel per questo; a lui si deve la creazione della prestigiosa Scuola di Fisica dell'Università di Columbia a New York e del Comitato Scientifico della NATO: impresa di formidabile originalità in quanto legava una struttura militare – avente come obiettivo la difesa dell'Europa dal pericolo di invasione da parte delle forze armate sovietiche – alla Scienza dei Paesi liberi e democratici. Fu il Laboratorio della Columbia University a New York che accolse Enrico Fermi, quando fu costretto a lasciare l'Italia a causa delle sciagurate leggi razziali. Victor F. Weisskopf è una figura mitica della Scienza Europea. Ero, con John Bell, all'inizio della mia attività scientifica



Il Ministro degli Affari Interni, Dr Enzo Bianco, scopre il bronzo che riproduce l'atto costitutivo della Fondazione e Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana (FCCSEM) firmato da J. S. Bell, P. M. S. Blackett, I. I. Rabi, V. F. Weisskopf e A. Zichichi al CERN l'8 maggio del 1962.

Il Ministro Enzo Bianco nel suo discorso inaugurale ha ricordato di essere stato nel 1964 vincitore del concorso indetto dalla FEMCCS per selezionare i 100 migliori studenti d'Italia.

Il brindisi che festeggia la fine delle
terribili ore passate
in attesa degli eventi
in corso a Mosca.



quando l'Europa faceva i primi passi per costruire una struttura in grado di competere con il gigante USA. Questa struttura venne denominata CERN (Centro Europeo Ricerche Nucleari) e insediata a Ginevra. Scopo di questa struttura voluta da Rabi, Blackett e Niels Bohr (uno dei padri fondatori della Fisica Quantistica) era evitare la fuga (quella vera) dei cervelli europei verso gli Stati Uniti d'America. Il CERN, dotato di macchine e tecnologie avanzatissime, era una condizione necessaria, ma non sufficiente, per creare un polo d'attrazione mondiale per le generazioni di fisici europei, che già erano in giro fuori dai loro Paesi. Oltre alle strutture tecnologiche c'era bisogno di una guida. Questa doveva essere un grande scienziato, un maestro eccezionale capace di generare interessi nuovi. Weisskopf fu il primo fisico al mondo a calcolare gli effetti "virtuali" detti a quei tempi "polarizzazione del vuoto". Effetti che sono oggi pane quotidiano nella Fisica di frontiera. Non potremmo dire di essere arrivati alle frontiere del Supermondo se non fossimo stati capaci di introdurre nello studio della realtà galileiana gli effetti "virtuali". Weisskopf portò il CERN al centro dell'attrazione scientifica mondiale. Il mio coetaneo John Bell è diventato famoso per avere scoperto come risolvere il "paradosso di Einstein-Podolsky e Rosen" grazie alla sua famosa "diseguaglianza". Questi giganti della Scienza Galileiana del secolo XX firmarono l'8 maggio 1962 a Ginevra l'atto costitutivo della Fondazione e Centro di Cultura Scientifica «Ettore Majorana». Nacque così quell'Istituzione che ha saputo dare un significato nuovo alla Scienza e alla sua Cultura. La Scienza, diceva Fermi, entra nella società attraverso le sue applicazioni,

non per merito dei suoi valori. Ecco perché è necessario distinguere la cultura scientifica dalla divulgazione. Il Centro di Erice ha dimostrato com'è possibile ai valori della Scienza entrare nella cultura del nostro tempo. Di questo c'è bisogno per superare il paradosso cui ci ha portato la divulgazione detta scientifica, che non distingue la Scienza dalla Tecnica e che non ha mai avuto il coraggio di denunciare la violenza politica e quella economica. Non denunciando le radici da cui nascono la corsa agli armamenti e l'industrializzazione selvaggia il grande pubblico è stato esposto alla tesi che è il progresso scientifico, con i suoi padri, il vero responsabile delle 63 Emergenze Planetarie e del pianeta imbottito di bombe.

Vennero così conati termini tipo "padre della bomba atomica" e "padre della bomba H", senza dire però che i padri di questi due ordigni erano, rispettivamente, Hitler e Stalin. Essendo stati loro a dar vita ai progetti segreti per quelle bombe. È col Manifesto di Erice che si è fatta giustizia su queste mistificazioni culturali. Giustizia coronata nel 1989 con il crollo del Muro di Berlino.

Ed è sempre il Centro di Erice che ha dato l'esempio del ruolo della Scienza per affrontare e risolvere i problemi che affliggono questa meravigliosa navicella spaziale in viaggio attorno al Sole. È stato possibile far nascere e promuovere uno spirito nuovo nella Scienza di frontiera in quanto gli scienziati provenienti da tutti i Laboratori del mondo e dai maggiori centri universitari hanno avuto modo di trovare nelle centoventidue Scuole del Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana la loro palestra intellettuale. Vorrei ricordare un episodio col quale si è chiusa l'era della Guerra Fredda nello scontro USA-URSS. Quando a Mosca

ebbe luogo il Colpo di Stato che distrusse il tentativo di Gorbachev di portare l'Unione Sovietica adiabaticamente verso la democrazia, gli scienziati sovietici presenti ad Erice ricevettero l'ordine perentorio di ritornare subito in patria. La maggior parte di loro aveva con sé dei familiari ed io ricordo il loro terrore circa la possibilità di vedere materializzarsi l'incubo col quale avevano vissuto per mezzo secolo: il ritorno nel loro Paese della dittatura di tipo stalinista. Inviai un telegramma a Mosca per chiedere la conferma dell'ordine ricevuto dai miei colleghi ad Erice. Secondo notizie ufficiali, il nuovo governo voleva mantenere la collaborazione internazionale. Un ordine di tornare in patria era in contraddizione con le affermazioni ufficiali fatte dal nuovo governo Sovietico e avrebbe prodotto serie conseguenze nella comunità scientifica internazionale. Questo telegramma permetteva agli scienziati URSS presenti a Erice con le loro famiglie di non obbedire immediatamente all'ordine perentorio ricevuto. Fortunatamente il Colpo di Stato terminò presto e la figura di pagina 10 mostra una fotografia scattata per celebrare la fine delle terribili ore in cui tutti eravamo convinti che il mondo avrebbe dovuto affrontare un altro lungo periodo di Guerra Fredda. Il Colpo di Stato fu davvero una sorpresa terribile. Infatti, prima del crollo del Muro di Berlino, la comunità scientifica che partecipava ai Seminari di Erice era abbastanza ottimista e cominciava a prendere in considerazione i problemi che il pianeta avrebbe dovuto affrontare una volta finito il conflitto Est-Ovest. Fu così che iniziarono al Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana i primi studi sulle Emergenze Planetarie, che vennero suddivise in 15 Classi per un totale

di 63 (tabella della pagina a fianco). La comunità scientifica che si riconosce nell'Erice Geist ha quindi dato prova di non volere restare isolata nelle torri d'avorio dei Laboratori scientifici, ma di essere disposta a impegnarsi nello studio di quei problemi su cui si misurano i livelli della nostra Civiltà e della nostra Cultura nella quale deve entrare la Scienza, non come componente marginale, ma come motore indispensabile del progresso civile e sociale. E adesso una nota di grande attualità. L'anno scorso ricorreva il centesimo anniversario della nascita di Ettore Majorana, il giovane allievo di Enrico Fermi, da lui definito "genio al pari di Galilei e Newton" quando scomparve misteriosamente nel suo viaggio in nave da Palermo a Napoli. Il Presidente del Governo Siciliano, d'intesa con il Sindaco di Erice, ha deciso di dar vita a una serie di iniziative intese a far conoscere non solo i contributi dati da Majorana al progresso della Fisica ma anche il tributo che la comunità scientifica internazionale ha voluto esprimere con costante determinazione nel corso dei decenni in cui, a partire dal 1963, la Scuola Internazionale di Fisica Subnucleare e le altre Scuole hanno operato, dando ai protagonisti più prestigiosi della Scienza galileiana, impegnati in studi e ricerche alle frontiere del sapere scientifico tecnologico e culturale, una platea qualificata di giovani talenti provenienti da tutte le Nazioni senza alcuna barriera ideologica, politica o razziale. Tra le diverse iniziative la più impegnativa per noi fisici è quella della pubblicazione di Dodici Volumi dedicati alla Celebrazione del Centenario. Il primo Volume inizia con ciò che sono riuscito a sapere su Ettore Majorana da coloro che ebbero modo di conoscerlo,



Le 63 emergenze planetarie, suddivise in 15 classi, prese in esame dagli scienziati di Erice

1 ^a	acqua	4
2 ^a	suolo	3
3 ^a	cibo	5
4 ^a	energia	5
5 ^a	inquinamento	6
6 ^a	limiti dello sviluppo	3
7 ^a	cambiamenti climatici	1
8 ^a	monitoraggio globale del pianeta	6
9 ^a	nuove minacce militari nel mondo multipolare	3
10 ^a	scienza e tecnologia per le nazioni in via di sviluppo: evitare l'olocausto ambientale nord-sud	1
11 ^a	il problema della sostituzione degli organi	5
12 ^a	aids e malattie infettive	7
13 ^a	inquinamento culturale	7
14 ^a	difesa comune contro oggetti cosmici	2
15 ^a	gli ingenti investimenti militari	5
totale delle emergenze planetarie		63

direttamente (Laura Fermi, Bruno Pontecorvo, Emilio Segré, Giancarlo Wick, Eugene Wigner, Paul Dirac, Werner Heisenberg) e indirettamente (Robert Oppenheimer, John Bell, Isidor Rabi, Patrick Blackett, Victor Weisskopf, Monsignor Francesco Ricceri e Leonardo Sciascia). Seguono i contributi di esponenti illustri della Fisica d'oggi che, nel loro lavoro, hanno trovato legami e radici che risalgono a Ettore Majorana: Sergio Ferrara, David Gross, Tsung Dao Lee, Yoichiro Nambu, Samuel C.C. Ting, Gerardus't Hooft e Frank A. Wilczek. A chiusura di questi contributi ho deciso di mettere una mia descrizione dello Standard Model and Beyond (SM&B) al fine di dare al lettore un'idea concreta di dove siamo arrivati dai tempi in cui lavorava Ettore Majorana. In questo primo Volume abbiamo voluto mettere in evidenza quello che pensano dei contributi scientifici di Ettore Majorana due "Best Student": il primo

Haim Harari (1963) e Serguey Petcov (1980). L'idea di avere ogni anno un segnale forte di natura esclusivamente scientifico-meritocratica è una iniziativa nata dall'esigenza di dare ai giovani talenti la possibilità di farsi conoscere nella comunità scientifica internazionale. Harari e Petcov hanno saputo conquistarsi una reputazione scientifica che conferma la validità della nostra iniziativa. Ed essi proiettano nel panorama delle problematiche di frontiera l'incredibile "foresight" di Ettore Majorana.

A queste due testimonianze abbiamo aggiunto quelle di alcuni giovani partecipanti al Concorso "New Talents": un contributo per onorare lo spirito di Ettore Majorana in occasione del suo Centenario.

Dieci Volumi – dal secondo all'undicesimo – hanno lo scopo di fornire a tutti – non solo a coloro che hanno avuto il privilegio di frequentare i Corsi della Scuola di

Erice, ma anche a quelli che sono rimasti nelle loro Università e nei loro Laboratori – il tracciato fedele delle dieci tappe che ci hanno portato alla più formidabile sintesi del pensiero scientifico di tutti i tempi, nota in gergo specialistico col termine di Modello Standard e oltre (Standard Model and Beyond). Il dodicesimo Volume, "The Glorious Days of Physics and Erice", è dedicato alle figure eminenti della Fisica del XX secolo, come Gilberto Bernardini, Patrick M. S. Blackett, Richard H. Dalitz, Paul A. M. Dirac, Enrico Fermi, Richard P. Feynman, Robert Hofstadter, Gunnar Källen, Giuseppe P. S. Occhialini, Wolfgang Paul, Bruno Pontecorvo, Isidor I. Rabi, Bruno Rossi, Julian S. Schwinger, Bruno Touschek, Victor F. Weisskopf, Eugene P. Wigner, che, con la loro partecipazione alle attività della Scuola di Fisica Subnucleare di Erice, hanno reso la nostra Scuola la più prestigiosa Istituzione post-universitaria al mondo

[parole di Isidor I. Rabi a Erice nel 1975 (vol XII, "New Phenomena in Subnuclear Physics", Plenum Press, New York-London, 1977)]. La nostra comunità scientifica aveva proposto in diverse occasioni di dedicare a questi eminenti fisici Aule, Strade e Istituti nella mitica Città di Venere. Queste dediche erano il segno di riconoscimento del loro legame con le attività della Scuola di Erice in Fisica Subnucleare. Il Presidente del Governo Regionale Siciliano e il Sindaco di Erice – in occasione del Centenario di Ettore Majorana – hanno deciso di dare il sigillo ufficiale alla nostra proposta di dedicare Aule, Strade e Istituti a questi scienziati che, con le loro invenzioni e scoperte, hanno dato alla Fisica moderna momenti di gloria scientifica. Il Dodicesimo Volume è dedicato a illustrare le conquiste scientifiche di questi esponenti della Fisica moderna che avevano grande stima e ammirazione per la genialità di Majorana.



Discutono sui possibili progetti di collaborazione scientifica Est-Ovest ai tempi in cui imperversava la Guerra Fredda, il padre del Teorema del Tempo, Eugene Wigner (a sinistra nella foto), Paul Dirac, padre dell'equazione che portò all'Antimateria (a destra nella foto) e Antonino Zichichi.

Le scuole della Fondazione e Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana

The Order of the Schools follows
the time sequence of their establishment

INTERNATIONAL SCHOOL OF SUBNUCLEAR PHYSICS
Antonino Zichichi

NATIONAL SCHOOL FOR PRE-UNIVERSITY ORIENTATION
Antonino Zichichi

ADVANCED SCHOOL OF ASTRONOMY
1st Director Daniel Chalonge

INTERNATIONAL SCHOOL OF COSMIC PHYSICS
1st Director Giuseppe P. S. Occhialini

INTERNATIONAL SCHOOL OF ELECTRON MICROSCOPY
Ugo Valdrè

INTERNATIONAL SCHOOL OF COSMIC RAY ASTROPHYSICS “BRUNO ROSSI”
1st Director Bruno Rossi, now Maurice M. Shapiro

INTERNATIONAL SCHOOL OF BIOPHYSICS “ANTONIO BORSELLINO”
1st Director Antonio Borsellino

INTERNATIONAL SCHOOL OF ATMOSPHERIC PHYSICS
Zhu Zhen Da

LABORATORY FOR SCIENCE TEACHERS REFRESHER COURSES
1st Director Protogene Veronesi, now Nella Grimellini-Tomasini

INTERNATIONAL SCHOOL OF WATER RESOURCES MANAGEMENT
Robert A. Clark

INTERNATIONAL SCHOOL OF ART AND SCIENCE “EMILIO GRECO”
1st Director Emilio Greco, now Antonino Zichichi (ad int.)

INTERNATIONAL SCHOOL OF QUANTUM ELECTRONICS
Arthur N. Chester and Sergio Martellucci

ADVANCED SCHOOL OF GENETICS
Giuseppe Sermonti

INTERNATIONAL SCHOOL OF EARTH SCIENCES
1st Director Marcello Carapezza

ADVANCED SCHOOL OF HISTORY OF PHYSICS
1st Director Giorgio Tabarroni, now William R. Shea

INTERNATIONAL SCHOOL OF COSMOLOGY AND GRAVITATION “PETER G. BERGMANN”
1st Director Nicolò Dallaporta, Peter G. Bergmann, now Venzo De Sabbata

INTERNATIONAL SCHOOL OF DEVELOPMENTAL BIOLOGY
1st Directors Alberto Monroy and Hans G. Zachau

INTERNATIONAL SCHOOL OF ASTROPHYSICS “DANIEL CHALONGE”
1st Director Giancarlo Setti, now Antonino Zichichi

INTERNATIONAL WORKSHOP ON DATA ANALYSIS IN ASTRONOMY “LIVIO SCARSI”
1st Directors Vito Di Gesù and Livio Scarsi, now Vito Di Gesù

INTERNATIONAL SCHOOL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE
1st Directors Antonio Borsellino, Edoardo Detti, Franco Graziosi and Antonino Zichichi

INTERNATIONAL SCHOOL OF THEORY AND APPLICATION OF COMPUTERS
Tom Massam

ADVANCED SCHOOL FOR THE STUDY OF THE AGRONOMICAL PROBLEMS OF THE MEDITERRANEAN REGION “GIAN PIETRO BALLATORE”

1st Director Gian Pietro Ballatore, now Giovanni Fierotti

INTERNATIONAL SCHOOL OF FUSION REACTOR TECHNOLOGY

1st Director Bruno Brunelli, now Donato Palumbo

ADVANCED SCHOOL OF GEOPHYSICS

Adam M. Dziewonski

INTERNATIONAL SCHOOL OF MEDICAL SCIENCES

1st Director Andrew W. Wilkinson

INTERNATIONAL SCHOOL OF MATHEMATICAL PHYSICS

1st Director Arthur S. Wightman, now Giorgio Velo and Arthur S. Wightman

INTERNATIONAL SCHOOL OF MEDICAL RADIOBIOLOGY

Antonio Farulla

INTERNATIONAL SCHOOL OF APPLIED CELLULAR BIOLOGY

Antonio Cimmino

INTERNATIONAL SCHOOL OF CRYSTALLOGRAPHY

1st Director Dorothy Hodgkin, now Sir Thomas L. Blundell

INTERNATIONAL SCHOOL OF RADIO-TELECOMMUNICATIONS

Antonino Zichichi (ad int.)

INTERNATIONAL SCHOOL OF ATOMIC AND MOLECULAR SPECTROSCOPY

Baldassare Di Bartolo

INTERNATIONAL SCHOOL OF GEODESY “ANTONIO MARUSSI”

1st Director Antonio Marussi, now Enzo Boschi

INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS

1st Director Sir Denys Wilkinson, now Amand Faessler

INTERNATIONAL SCHOOL OF SOCIAL AND NATURAL SYSTEM-ENGINEERING

Luigi Dadda

INTERNATIONAL SCHOOL OF MARINE BIOLOGY

Bruno Battaglia

INTERNATIONAL SCHOOL OF BREAST CANCER: DIAGNOSIS AND TREATMENT

Umberto Veronesi

INTERNATIONAL SCHOOL OF EPIDEMIOLOGY AND PREVENTIVE MEDICINE “GIUSEPPE D’ALESSANDRO”

1st Director Giuseppe D’Alessandro, now Gaetano Maria Fara, Giuseppe Giammanco and Moyses Szklo

ADVANCED SCHOOL OF AUDIOLOGY AND LOGOPEDY

Giovanni Motta

NATIONAL SCHOOL OF TOWN PLANNING “EDOARDO DETTI”

1st Director Edoardo Detti, now Antonino Zichichi (ad int.)

INTERNATIONAL SCHOOL OF DETECTOR TECHNOLOGY “TOM J. YPSILANTIS”

1st Director Robert Hofstadter, now Crispin Williams

INTERNATIONAL SCHOOL OF RADIATION DAMAGE AND PROTECTION

Hans-Georg Menzel, Helmut Schönbacher and Vaclav Vylet

ADVANCED SCHOOL OF CHEMICAL DYNAMICS

Enrico Rizzarelli

INTERNATIONAL SCHOOL OF MUSICAL SCIENCES

Marcello Abbado

INTERNATIONAL SCHOOL OF GENERAL GENETICS

Giuseppe Sermoni

INTERNATIONAL SCHOOL OF LOW-TEMPERATURE PHYSICS

1st Director Tullio Regge

INTERNATIONAL SCHOOL OF ARCHEOMETRY

Murray Gell-Mann

INTERNATIONAL SCHOOL OF HISTORY OF SCIENCE

1st Director Vincenzo Cappelletti, now Arthur I. Miller

INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR MEDICINE

Antonio Farulla

INTERDISCIPLINARY SEMINARS

1st Director Eugene P. Wigner

INTERNATIONAL SCHOOL OF NEUROPHYSIOLOGY AND NEUROLOGY “JOHN ECCLES”

1st Director Sir John Eccles

INTERNATIONAL SCHOOL OF ETHOLOGY

Dánilo Mainardi

INTERNATIONAL SCHOOL OF MATHEMATICS “GUIDO STAMPACCHIA”

1st Director Guido Stampacchia, now Franco Giannessi

INTERNATIONAL SCHOOL OF OCEANOGRAPHY

Owen M. Phillips

INTERNATIONAL SCHOOL OF COMPARATIVE AND HISTORICAL SOCIO-ECONOMICS

Romano Molesti and Zhou Guangzhao

INTERNATIONAL SCHOOL OF CYBERNETICS OF SOCIAL SYSTEMS

1st Director Antonio Borsellino

INTERNATIONAL SCHOOL OF TRANSPORTATION SYSTEMS ANALYSIS

Antonino Zichichi (ad int.)

INTERNATIONAL SCHOOL OF APPLIED GEOPHYSICS

Roberto Cassinis

INTERNATIONAL SCHOOL OF PHARMACOLOGY

Pietro Benigno, Luciano Rausa, Gian Paolo Velo and Derek A. Willoughby

INTERNATIONAL SCHOOL OF NEURAL SCIENCE

Leon N. Cooper

THINKSHOP ON PHYSICS

1st Directors John S. Bell and Bernard d’Espagnat

WORKSHOPS ON THEORETICAL PHYSICS

Nicola Cabibbo

INTERNATIONAL SCHOOL OF PHILOSOPHY OF SCIENCE

Vittorio Mathieu

INTERNATIONAL SCHOOL ON “PHYSICS AND INDUSTRY”

1st Director Enzo Iarocci, now Roberto Petronzio

INTERNATIONAL SCHOOL OF RELATIVISTIC ASTROPHYSICS “JOHN A. WHEELER”

1st Director John A. Wheeler, now Ignazio Ciufolini and Richard Matzner

SCHOOL OF SOCIOLOGY OF FREEDOMS

Gaspere Barbiellini-Amidei

WORKSHOPS ON EXPERIMENTAL HIGH ENERGY PHYSICS

James V. Allaby

ADVANCED SCHOOL OF ARCHEOLOGY
AND MEDIEVAL CIVILIZATION “FRANCESCO GIUNTA”

1st Director Francesco Giunta, now Pierre M.P. Toubert and Salvatore Fodale

INTERNATIONAL SCHOOL OF ENERGETICS

Ferdinando Amman and Richard Wilson

INTERNATIONAL SCHOOL OF PARTICLE ACCELERATORS

1st Director Kjell Johnsen, now Gustav-Adolf Voss and Edmund Wilson

INTERNATIONAL SCHOOL OF UROLOGY AND NEPHROLOGY

Michele Pavone-Macaluso

INTERNATIONAL SCHOOL OF PHYSICS OF EXOTIC ATOMS

Gabriele Torelli

INTERNATIONAL SCHOOL OF THORACIC MEDICINE

1st Directors Giovanni Bonsignore, Gordon Cumming
and Giuseppe Spina, now Gordon Cumming and Giuseppe Spina

HIGHLY SPECIALIZED SEMINARS

1st Director Eugene P. Wigner

INTERNATIONAL SCHOOL OF GERONTOLOGY AND GERIATRICS

1st Director Giuseppe Barbagallo-Sangiorgi

INTERNATIONAL SCHOOL OF METEOROLOGY OF THE MEDITERRANEAN

1st Director Abele Nania, now J. K. Daniel Söderman

INTERNATIONAL SCHOOL OF CARDIOLOGY

Angelo Branzi, Francesco Fedele and Bruno Magnani

INTERNATIONAL SCHOOL OF CLIMATOLOGY

Arnaldo Longhetto

INTERNATIONAL SCHOOL OF MOLECULAR NEUROBIOLOGY

Rita Levi-Montalcini

INTERNATIONAL SCHOOL OF LOW ENERGY ANTIPROTON PHYSICS

Robert Klapisch

INTERNATIONAL SCHOOL OF GEOPHYSICS

Enzo Boschi

INTERNATIONAL SCHOOL OF HEAVY IONS

Eugenio Nappi

INTERNATIONAL SCHOOL OF MATHEMATICS AND EXPERIMENTAL SCIENCE

Nikita N. Moiseyev

INTERNATIONAL SCHOOL OF MACROMOLECULAR BIOPHYSICS

Mark A. Mokulskii

INTERNATIONAL SCHOOL OF LANDSCAPE ARCHITECTURE

1st Director Edoardo Detti, now Antonino Zichichi (ad int.)

INTERNATIONAL SCHOOL OF MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY

Minko Balkanski

INTERNATIONAL SCHOOL OF ULTRASONOLOGY

Carlo Alvisi

INTERNATIONAL SCHOOL OF SOLID-STATE DEVICE RESEARCH

Leo Esaki

INTERNATIONAL SEMINARS ON NUCLEAR WAR

1st Directors Paul A.M. Dirac, Pëtr Kapitza and Antonino Zichichi

INTERNATIONAL SCHOOL OF ASTRO-PARTICLE PHYSICS

Alvaro De Rujula

INTERDISCIPLINARY WORKSHOP ON MEDIEVAL SOCIETIES

Jean-Claude Maire-Vigueur and Agostino Paravicini-Bagliani

INTERNATIONAL SEMINARS ON FREDERICK II

Pierre M. P. Toubert

INTERNATIONAL SCHOOL FOR THE STUDY OF WRITTEN RECORDS

Guglielmo Cavallo and Jan-Olof Tjäder

INTERNATIONAL SCHOOL OF IUS COMMUNE

1st Directors Stephan Kuttner and Manlio Bellomo,
now Manlio Bellomo, Orazio Condorelli and Kenneth Pennington

SEMINARS ON CRIMINAL JURISPRUDENCE AND PROCEDURE “GIOVANNI FALCONE”

Antonio Mormino and Severino Santiapichi

INTERNATIONAL SCHOOL OF NEUTRON STARS, AGN AND JETS

Wolfgang Kundt

INTERNATIONAL SCHOOL OF ASTROPARTICLE PHYSICS

Gerardus't Hooft and Gabriele Veneziano

INTERNATIONAL SCHOOL OF CEREBRAL BLOOD CIRCULATION

Carlo Alvisi and George Mchedlishvili

INTERNATIONAL SCHOOL OF SPACE CHEMISTRY

1st Director J. Mayo Greenberg

INTERNATIONAL SCHOOL OF SOLID-STATE PHYSICS

Giorgio Benedek

INTERNATIONAL SEMINARS ON PLANETARY EMERGENCIES

Tsung Dao Lee, Kai M. B. Siegbahn and Antonino Zichichi

INTERNATIONAL SCHOOL ON ARTIFICIAL ORGANS

Vittorio Bonomini

INTERNATIONAL SCHOOL OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES
TO CLEAN THE ENVIRONMENT

Richard C. Ragaini

INTERNATIONAL SCHOOL OF MARINE AGRICULTURE

1st Director Edward Teller

INTERNATIONAL SCHOOL OF QUANTUM PHYSICS “JOHN S. BELL”

1st Director John S. Bell, now Enrico Beltrametti

INTERNATIONAL SCHOOL OF BIOLOGICAL MAGNETIC RESONANCE

1st Directors Oleg Jardetzky and Jean-François Lefevre,
now Oleg Jardetzky and Joseph D. Puglisi

INTERNATIONAL SCHOOL ON THE HISTORY OF ORIGINAL IDEAS AND BASIC
DISCOVERIES IN PHYSICS “ABRAHAM PAIS”

1st Directors Abraham Pais and Tom Ypsilantis, now Harvey Newman

INTERNATIONAL SCHOOL OF MOLECULAR
AND PHYSICAL GASTRONOMY “NICHOLAS KURTI”

1st Director Nicholas Kurti, now Hervé This-Benckhard

INTERNATIONAL SCHOOL ON NUCLEON STRUCTURE “VERNON HUGHES”

1st Directors Bernard Frois and Vernon Hughes, now Bernard Frois

INTERNATIONAL SCHOOL OF BRAIN DISEASES

John Collinge

INTERNATIONAL SCHOOL OF NEURAL NETS “EDUARDO R. CAIANIELLO”

1st Director Eduardo R. Caianiello, now Michael I. Jordan and Maria Marinaro

INTERNATIONAL SCHOOL OF STUDIES ON BYZANTIUM “ALEXANDER KAZHDAN”

Jakov N. Liubarskij and Silvia Ronchey

INTERNATIONAL SCHOOL OF LIQUID CRYSTALS

Claudio Zannoni

INTERNATIONAL SCHOOL OF STRUCTURAL AND MOLECULAR
ARCHAEOLOGY “HUBERT CURIEN”

1st Director Hubert Curien, now Georges Tsoucaris

GIORNATE INTERNAZIONALI DI STUDI SULL'AREA ELIMA “GIUSEPPE NENCI”

1st Director Giuseppe Nenci, now Carmine Ampolo

INTERNATIONAL SCHOOL ON BIOELECTROMAGNETISM “ALESSANDRO CHIABRERA”

Ferdinando Bersani

INTERNATIONAL SCHOOL ON COMPLEXITY

Antonino Zichichi and Giorgio Benedek, Murray Gell-Mann,
Luciano Pietronero, Constantino Tsallis

INTERNATIONAL SCHOOL ON MAGNETIC RESONANCE AND BRAIN FUNCTION

Bruno Maraviglia and Antonino Zichichi

INTERNATIONAL SCHOOL ON MIND, BRAIN AND EDUCATION

Antonio M. Battro and Kurt W. Fischer

INTERNATIONAL SCHOOL OF CARDIAC SURGERY

Ugo Filippo Tesler

INTERNATIONAL SCHOOL OF DERMATOLOGY

Günter Burg and Benvenuto Giannotti

INTERNATIONAL SCHOOL “ENRICO FERMI” FOR THE PROMOTION OF SCIENCE TRUTHS

Tsung Dao Lee

INTERNATIONAL SCHOOL OF SCIENTIFIC JOURNALISM

Graham Farmelo

progetto grafico
e impaginazione

Marco Stulle / S lab

stampa

Graphart srl, Trieste



www.infn.it

rivista on line
www.asimmetrie.it