

[i raggi cosmici]

anno 5 numero **10** / 9.10

asimmetrie

rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

Nelle regioni dello spazio in cui le stelle si formano o dove le supernove generano straordinarie vampate i raggi cosmici hanno origine e vengono accelerati fino alle energie più elevate. Alcuni raggiungono la Terra ed entrano nell'atmosfera producendo grandi sciame di particelle, a livello del mare ne arrivano circa 100 per m² al secondo. Da un secolo i fisici ne osservano le interazioni con la materia e ricostruiscono la storia del loro lunghissimo viaggio.

Nel 1932 Anderson osservando con una camera a nebbia in campo magnetico il flusso di raggi cosmici vide l'impronta dell'antimateria, scoprì l'anti-elettrone che il teorico Dirac aveva prospettato un paio di anni prima. Ancora lui, nel 1937, assieme ad un suo dottorando individuò due diverse componenti dei raggi cosmici nell'atmosfera, una non penetrante e una penetrante. La prima è costituita da fotoni o elettroni, la parte penetrante invece da particelle con una massa intermedia tra quelle degli elettroni e dei protoni. Queste particelle vennero chiamate mesotroni (particelle di massa intermedia) e poi inserite, con il nome di muoni, nella famiglia dei mesoni. In seguito, si osservò che i muoni sono particelle instabili

che decadono in elettroni e neutrini. Nel 1942 Rasetti determinò la vita media del muone, misurando il ritardo tra il passaggio di un muone e l'emissione dell'elettrone: 2,2 milionesimi di secondo. Nel 1946 Conversi, Pancini e Piccioni analizzando l'interazione dei muoni con la materia conclusero che il muone non è soggetto a interazioni nucleari, il muone fa parte della famiglia dei leptoni, non dei mesoni. L'anno successivo Lattes, Occhialini e Powell raccogliendo dati ad alta quota sul Pic du Midi osservarono il pione, la particella dell'interazione nucleare prevista da Yukawa in un lavoro teorico nel 1935. Sono solo alcuni dei tanti nomi familiari che costellano con Enrico Fermi ed altri la storia dei raggi cosmici. In un rincorrersi di previsioni teoriche e di verifiche sperimentali, i raggi cosmici sono impiegati come strumento per studiare le particelle e le loro interazioni con la materia ma sono anche reperti che provenendo dagli spazi profondi e dalla Via Lattea ci aiutano a capirne le sconcertanti dimensioni e le affascinanti manifestazioni. Nelle prossime pagine i nomi di oggi, ricercatori ed esperimenti che affrontano sfide, discutono risultati, aggiungono tasselli di luce al grande mosaico della conoscenza.

Andrea Vacchi



asimmetrie
Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Trimestrale, anno 5,
numero 10 settembre 2010

direttore responsabile
Roberto Petronzio, *presidente Infn*

direttore editoriale
Andrea Vacchi

comitato scientifico
Danilo Babusci
Piera Sapienza
Crisostomo Sciacca
Amedeo Staiano
Andrea Vacchi

redazione
Vincenzo Napolano
Catia Peduto
Francesca Scianitti
Antonella Varaschin

Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato
Roberto Battiston, Germano Bonomi,
Benedetto D'Ettorre Piazzoli, Giuseppe
Di Sciascio, Francesco Fidecaro, Lucilla
Giagnoni, Anna Gregorio, Paolo Lipari,
Francesco Longo, Giorgio Matthiae,
Mauro Messerotti, Piero Spillantini,
Alba Zanini, Gianni Zumerle

redazione
Infn Ufficio Comunicazione
piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
F +39 06 68307944
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

**art direction
e impaginazione**
Marco Stulle / S lab

**coordinamento
redazione grafica**
Sara Stulle / S lab

sviluppo webzine
S lab con Massimo Angelini

stampa
Graphart srl, Trieste

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m²
Registrazione del Tribunale di Roma numero
435/2005 dell'8 novembre 2005. Rivista
pubblicata da Infn.
Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della
rivista può essere riprodotta, rielaborata o
diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn,
proprietario della pubblicazione.
Finita di stampare nel mese
di settembre 2010. Tiratura 15.000 copie.

come abbonarsi
L'abbonamento è gratuito.
Tre modi per abbonarsi:

Compilare l'apposito form sul sito
www.asimmetrie.it

Inviare una mail di richiesta a
comunicazione@presid.infn.it

Contattare la redazione

webzine
Asimmetrie 10 e tutti i numeri precedenti
della rivista sono disponibili anche
on line su www.asimmetrie.it

crediti iconografici
Copertina ©Marco Stulle // p. 4 ©Marco Stulle;
p. 5 ©The Centurian Yearbook 1841-1941,
Fordham University Archives, Bronx NY; p. 6 ©Infn
(Francesca Cuicchio/S lab); fig. c p. 7 ©Nasa,
Esa, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); fig.
d p. 7 ©Archival Research Catalog of the National
Archives and Records Administration; p. 8 ©Infn
(F. Cuicchio/S lab); p. 9 ©Don Dixon for Scientific
American, 2004; p. 10 ©Infn (F. Cuicchio/S lab);
p. 12 alto ©Aspera/schema ©Infn (F. Cuicchio/
S lab); p. 13 schema ©Infn (F. Cuicchio/S lab) //
p. 14 fig. a ©Nasa; p. 15 ©Infn (F. Cuicchio/
S lab); p. 16 fig. c ©Fermi Collaboration; fig. d
©Infn/foto di Simone Schiavon; p. 17 ©Infn/foto
di Simone Schiavon // p. 18 ©Infn (F. Cuicchio/
S lab) // p. 20 ©Stefano Mastroianni; p. 21 figg.
b, c ©Argo Collaboration/Rielaborazione Infn
(F. Cuicchio/S lab); p. 22 ©Argo Collaboration/
Infn (F. Cuicchio/S lab) // p. 23 ©Observatoire
Midi-Pyrénées, France; p. 24 fig.b ©Paul Scherrer
Institute, Switzerland; fig. c ©Atmospheric
Physics Laboratory-UMSA, Bolivia; p. 25 fig. d
©Centro Brasileiro de Pesquisas Fisicas, Brasil;
fig. e ©California Institute of Technology, US;
p. 26 schema ©Slab // p. 27 fig. a ©Auger
Collaboration/Rielaborazione Infn (F. Cuicchio/
S lab); fig. b ©Auger Collaboration; p. 28 fig. c
©Auger Collaboration; fig. d ©Slab; p. 29 fig. e
©Auger Collaboration; schema box ©Infn
(F. Cuicchio/S lab); p. 30 fig. f ©Infn (F. Cuicchio/
S lab); fig. g ©Aspera/Arnaud Marsollier; p. 31
fig. h, l ©Auger Collaboration/Rielaborazione Infn
(F. Cuicchio/S lab); fig. i ©Nasa/Jpl-Caltech/Eso/
Univ. of Michigan/L.Calçada // p. 32 ©Technòlegs
de l'les Bisbal; p. 33 ©Infn (F. Cuicchio/S lab);
p. 34 fig. b ©Slab; fig. c ©International Satellite
Cloud Climatology Project/Rielaborazione Infn
(F. Cuicchio) // p. 35 fig. a ©Courtesy John
Bahcall; fig. b ©E.J. Schreier (STScI)/Nasa;
p. 36 figg. c, d ©Infn (F. Cuicchio/S lab) // p. 38
©Infn // p. 39 fig. a ©Nasa; p. 40 fig. b ©Infn
(F. Cuicchio); p.41 ©Robert Wagner, Max-Planck-
Institut für Physik, München // p. 43 fig. a ©Esa;
p. 43 fig. b ©Inaf; p.44 fig. c ©Asi/Esa // p. 45
©Infn/foto di Simone Schiavon; p. 46 ©Infn/
Elaborazione Ibimel/Federica Grigoletto; p. 47
fig. c ©Infn/foto di Simone Schiavon; fig. d
©Nasa, Esa, The Hubble Heritage Team (STScI/
Aura) // p. 48 ©Asimmetrie/Infn (F. Cuicchio)
// p. 49 ©Nuovo Cimento della Società Italiana
di Fisica // p. 51 fig. a ©Robert Wagner, Max-
Planck-Institut für Physik, München; fig. b ©Heidi
Hostettler // p. 52 ©Stefano Mastroianni // p. 54
©Elisa Zanino // p. 55 ©Infn/foto Giorgia Mila
// p. 56 Opera ©Infn/foto Simone Schiavon/ Lhc
©Cern/ Tevatron ©Fermilab.

as

[i raggi cosmici]

Voci dell'Universo 4 **Spaziotempo in movimento** 45
di Paolo Lipari
di Francesco Fidecaro
approfondimenti di
Gianni Zumerle e Germano Bonomi

Grandi occhi puntati sul cosmo 14
di Roberto Battiston
[as] radici 49
Le prime tracce.
di Piero Spillantini

Sospetti di materia oscura? 19
di Antonella Varaschin
[as] tecnologia e ricerca 51
Specchi magici.
di Antonella Varaschin

Sul tetto del mondo 20
di Benedetto D'Ettorre Piazzoli
e Giuseppe Di Sciascio
[as] benvenuti a bordo 52
Messaggeri d'oriente. Intervista
a Stefano Mastroianni, ricercatore
dell'esperimento Argo.
di Francesca Scianitti

Fisici con gli scarponi chiodati 23
di Alba Zanini
A caccia di raggi cosmici 27
nella Pampa
di Giorgio Matthiae e Francesca Scianitti

Cosmici e nuvole 32
di Mauro Messerotti
[as] con altri occhi 54
Stasera è di scena l'Universo.
di Lucilla Giagnoni

L'inafferrabile neutrino 35
di Piera Sapienza
approfondimenti di Marco Circella
[as] incontri 55
Scoprire la passione
per la scienza, facendola.
di Vincenzo Napolano

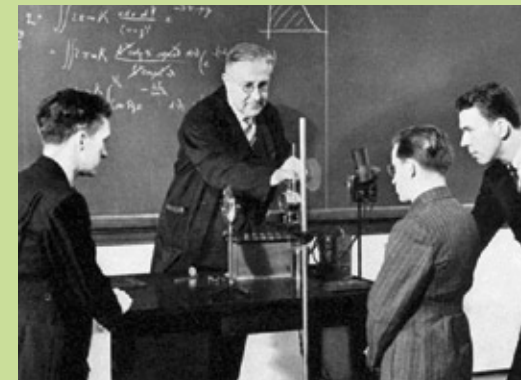
Il cielo inquieto 39
di Francesco Longo
[as] news 56

Archeologia cosmica 42
di Anna Gregorio



Voci dell'Universo

di Paolo Lipari

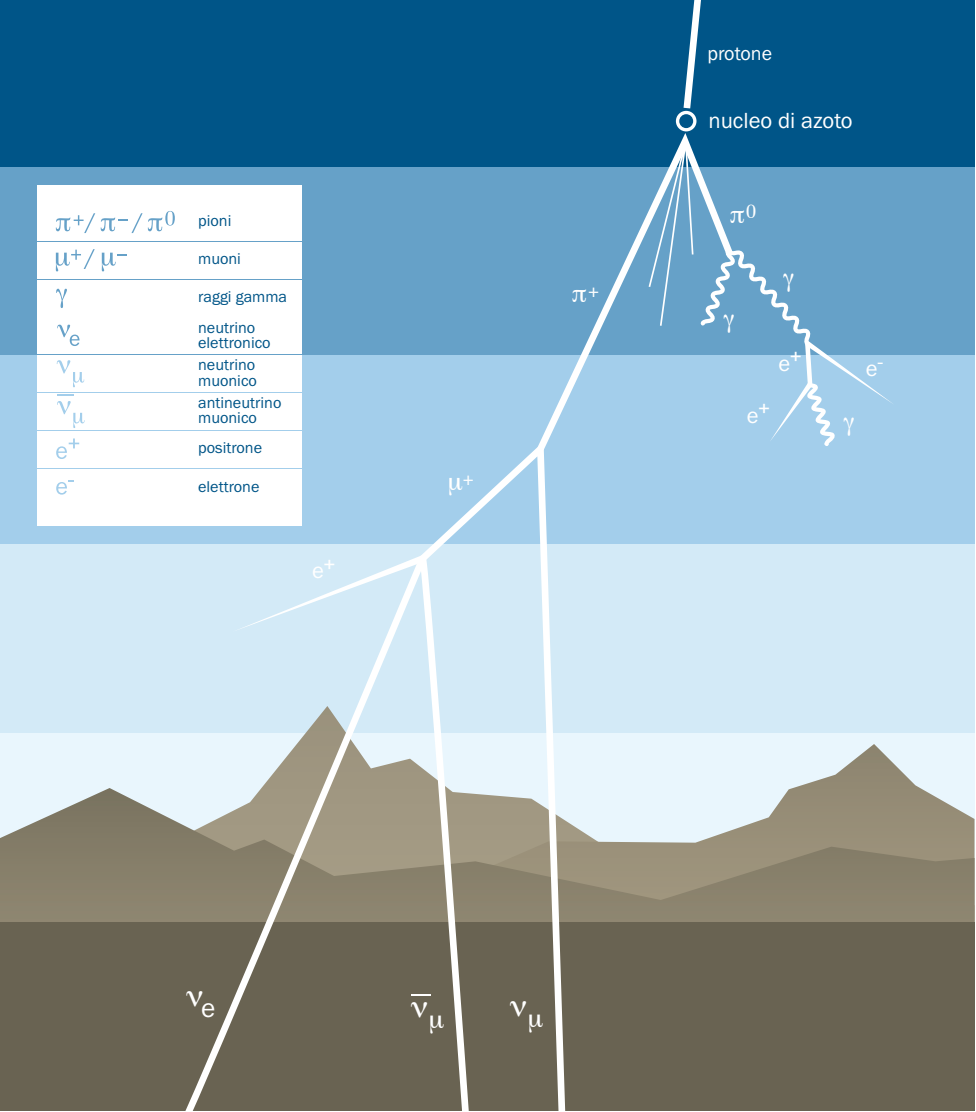


a.

La scoperta

La storia, anzi la preistoria, dei raggi cosmici ha inizio alla fine dell'Ottocento. I fisici avevano da poco compreso che la materia è composta di atomi e che la carica elettrica ha una struttura “granulare”, si presenta cioè solo in multipli interi di una carica elementare indivisibile. Nel 1897 il fisico inglese Joseph J. Thomson aveva scoperto una particella di massa piccolissima: l'elettrone, identificata come la portatrice dell'unità fondamentale di carica negativa. L'elettrone era una componente dell'atomo: quest'ultimo cessava dunque di essere “indivisibile” e mostrava di possedere una struttura interna. Diversi esperimenti dimostrarono che l'aria (come gli altri gas) è sempre, sia pure debolmente, “ionizzata”, contiene cioè una piccola percentuale di elettroni liberi e di ioni positivi (atomi che hanno perso uno o più elettroni). Poiché gli elettroni e gli ioni positivi tendono a ricombinarsi per formare atomi neutri, qualcosa, una forma di radiazione, doveva agire sulla materia per estrarre in continuazione gli elettroni dagli atomi. Una possibile sorgente per questa “radiazione ionizzante” era stata appena scoperta da Henri Bequerel e da Pierre e Marie Curie: la radioattività. I raggi *alfa*, *beta* e *gamma* emessi dai nuclei delle sostanze radioattive sono particelle di grande energia, anche milioni di volte più grande di quella trasportata dai fotoni del Sole. Quando particelle così energetiche penetrano nella materia creano scompiglio nelle nuvole di elettroni che circondano i nuclei, e si lasciano dietro una scia di elettroni liberi e atomi ionizzati. L'ipotesi che la ionizzazione dell'aria sia dovuta in buona parte all'esistenza di tracce di sostanze radioattive contenute nell'aria e nei diversi materiali terrestri è corretta, ma non è tutta la storia. Per oltre un decennio gli esperimenti di fisici in diversi Paesi dell'Europa portarono a risultati contraddittori. Un pioniere in questa ricerca è stato Domenico Pacini. L'esperimento decisivo, però, avvenne il 7 agosto del 1912. Alle sei del mattino di quel giorno un pallone si sollevò dalla città di Aussig in Austria. Il pallone volò per due ore e mezza, superando la quota di 5.000 metri. A bordo c'erano un pilota, un meteorologo e il fisico Victor Hess, che aveva con sé gli strumenti per misurare la ionizzazione dell'aria. Sorprendentemente la ionizzazione ad alta quota risultò maggiore che al suolo. La conclusione di Hess fu: “I risultati delle mie osservazioni si spiegano meglio assumendo che una radiazione di alto potere ionizzante entri dall'alto nella nostra atmosfera”. Nel 1936 Victor Hess ricevette il premio Nobel per la scoperta dei raggi cosmici. Chiarire la natura di questa misteriosa radiazione richiese più di venti anni. Oggi sappiamo che i raggi cosmici sono particelle di varia natura elettricamente cariche, o neutre come nel caso dei fotoni e dei neutrini, che arrivano continuamente sulla Terra da tutte le direzioni. I raggi cosmici hanno uno spettro di energia che si estende fino a valori straordinari, anche decine di milioni di volte più grandi di quanto si riesce a ottenere in macchine acceleratrici come il *Large Hadron Collider* (Lhc) del Cern di Ginevra.

a.
Hess durante una lezione mostra ai suoi studenti l'apparato per la rivelazione dei raggi cosmici.



b.

b. Rappresentazione schematica di uno sciame di raggi cosmici prodotto quando una particella primaria (in questo caso un protone) interagisce con i nuclei dell'atmosfera terrestre. Nella realtà, gli sciami possono essere composti anche da milioni di particelle, con una complessa storia di interazioni a catena, produzioni, assorbimenti o decadimenti spontanei.

La maggior parte della componente elettricamente carica dei raggi cosmici (circa il 90%) è costituita da protoni. Gli elettroni sono solo una frazione di qualche per cento, mentre il resto è composto da nuclei atomici completamente ionizzati, privati cioè del loro involucro di elettroni. È anche presente una piccola, ma molto importante, quantità di antimateria: antiprotoni e antielettroni. L'isotropia dei raggi cosmici carichi è la conseguenza dei campi magnetici che permeano la nostra galassia e lo spazio intergalattico. Questi campi deviano la traiettoria delle particelle cariche, e “mescolano” le loro direzioni. Mentre il cielo visto con fotoni (che viaggiano in linea retta) ci appare puntellato di stelle, galassie e altre sorgenti, il cielo visto con i raggi cosmici appare splendere con una luminosità diffusa e uniforme. Determinare la composizione dei raggi cosmici è difficile perché essi non raggiungono direttamente la superficie

della Terra. Le particelle che arrivano dalle lontane sorgenti astrofisiche (la radiazione “primaria”) interagiscono ad alta quota (a circa 15-20 km di altezza) con gli atomi dell'aria. In queste violente interazioni l'energia di una particella primaria si suddivide tra molte particelle secondarie di diverso tipo, create nell'interazione stessa. Le particelle secondarie, viaggiando attraverso l'aria, possono a loro volta interagire (o decadere spontaneamente) e produrre ancora altre particelle. Gran parte di questa radiazione “secondaria” è assorbita nell'atmosfera, ma una piccola frazione arriva al suolo sotto forma di una miscela di particelle di diverso tipo: fotoni, elettroni, positroni, muoni e neutrini, ma anche “pioni”, “kaoni” e altre strane bestie del mondo microscopico. Un bel rompicapo per i fisici della prima metà del ventesimo secolo, che non conoscevano l'esistenza di queste particelle e nemmeno le leggi che determinano il loro comportamento.

La fisica delle particelle elementari nasce da questi studi sulla radiazione secondaria prodotta dai raggi cosmici. Una svolta si ebbe nel 1931, quando Carl Anderson scoprì nella radiazione cosmica particelle con la massa dell'elettrone ma carica elettrica positiva. Poco tempo prima Paul Dirac, sulla base di considerazioni puramente teoriche, aveva previsto l'esistenza dell'antielettrone. Anderson, senza conoscere la teoria di Dirac, lo aveva trovato e per questa scoperta condivise il Nobel con Victor Hess. Negli anni successivi tra i raggi cosmici dovevano essere scoperte altre nuove e insospettate particelle: i muoni, i pioni, le particelle “strane” K e Lambda. Lo studio dei prodotti secondari dei raggi cosmici è favorito se gli strumenti vengono posti il più in alto possibile, più vicino cioè alla quota dove le particelle primarie interagiscono. Questo ha portato allo sviluppo di laboratori ad alta quota sulle Alpi e su altre catene montuose in tutto il mondo.

L'Universo delle alte energie

Il problema centrale della fisica dei raggi cosmici rimane ancora oggi aperto. Qual è la loro origine? Come ottengono le loro straordinarie energie? Esiste una relazione fondamentale tra la temperatura di un corpo e lo spettro e l'intensità della radiazione elettromagnetica che esso emette. La scoperta e comprensione di questa relazione (la *legge del corpo nero*) all'inizio del '900 da parte di Max Planck e Albert Einstein è il primo capitolo della rivoluzione scientifica della Meccanica Quantistica. Tanto maggiore è la temperatura di un corpo, tanto maggiore è l'energia media dei fotoni che irradia. La luce delle stelle ci permette ad esempio di stimare la temperatura della loro superficie. La luce bianco-gialla del Sole ci dice che la sua superficie è a circa 6.000 °C, le stelle blu sono un po' più calde, quelle rosse un po' più fredde. L'emissione dei raggi cosmici, invece, non è determinata dalla temperatura della loro sorgente, ma da processi di natura differente. I raggi cosmici possono, infatti, avere un'energia anche cento miliardi di miliardi (10²⁰) di volte più elevata dei fotoni del Sole, e nessun luogo nell'Universo attuale ha una temperatura così straordinaria. Si pensa oggi che le sorgenti dove i raggi

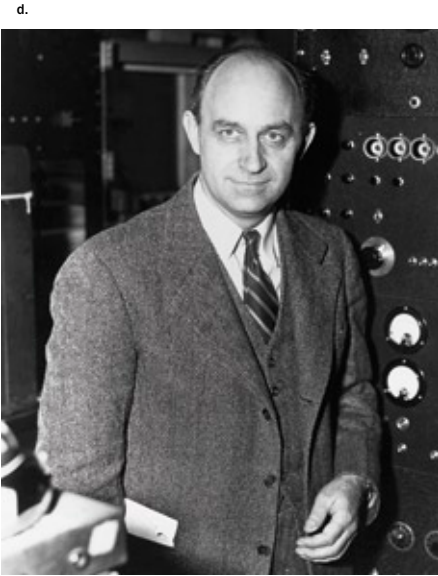
cosmici sono accelerati corrispondano e traccino i luoghi dove avvengono i processi più violenti nell'Universo, dove grandi masse sono accelerate e si scontrano. In questi cataclismi cosmici si formano gli intensi campi elettrici capaci di accelerare particelle cariche fino a grandissime energie. L'opinione più diffusa è che la maggior parte dei raggi cosmici siano accelerati dalle esplosioni di supernova. Queste gigantesche esplosioni avvengono quando il nocciolo interno di una stella alla fine della sua vita collassa sotto il suo stesso peso. Quando la materia del nocciolo raggiunge e supera la densità della materia nucleare, si produce un colossale “rimbalzo”, un'immensa esplosione che lancia nello spazio interstellare l'involucro esterno della stella alla velocità di migliaia di chilometri al secondo. Sono queste esplosioni che “seminano” lo spazio con gli elementi come carbonio, ossigeno e altri, che sono sintetizzati dalle reazioni nucleari nel centro delle stelle. La teoria suggerisce che all'onda d'urto generata da questa violentissima espulsione di materia siano associati i campi elettromagnetici che accelerano i raggi cosmici. Le particelle verrebbero accelerate fino ad altissime energie gradualmente, in numerosi piccoli passi mentre attraversano e riattraversano l'onda d'urto dell'esplosione, continuamente deviate da campi magnetici turbolenti. I concetti fondamentali

c. L'Universo “violento”. Questa nuvola di gas (il resto della supernova N132D) di forma approssimativamente sferica si sta espandendo alla velocità di oltre 2.000 km al secondo ed è tutto ciò che rimane di una stella massiva (10-15 volte più pesante del Sole) a circa 3.000 anni dalla sua esplosione. L'onda d'urto delle esplosioni di supernova è un probabile sito di accelerazione dei raggi cosmici.

d. Enrico Fermi diede un importante contributo alle teorie sui raggi cosmici con un'ipotesi dei meccanismi di accelerazione, che è stata confermata da recenti osservazioni proprio del satellite che la Nasa ha dedicato al grande fisico italiano.



c.

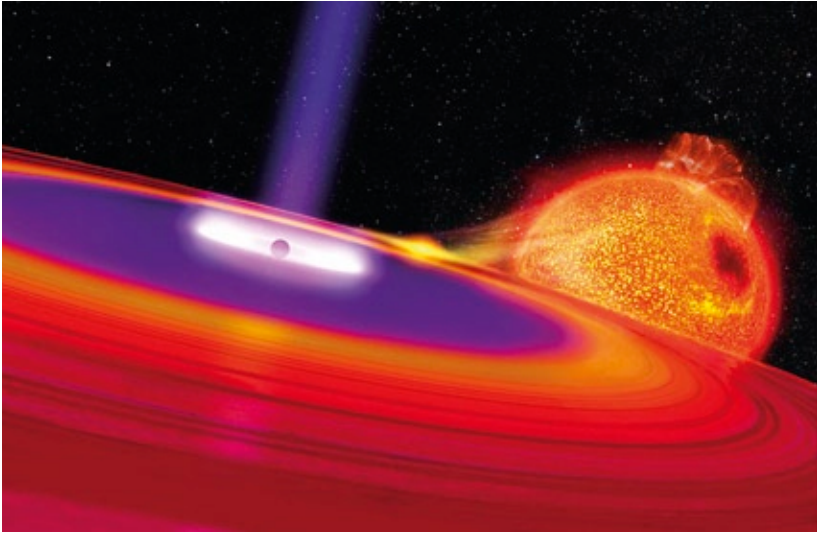
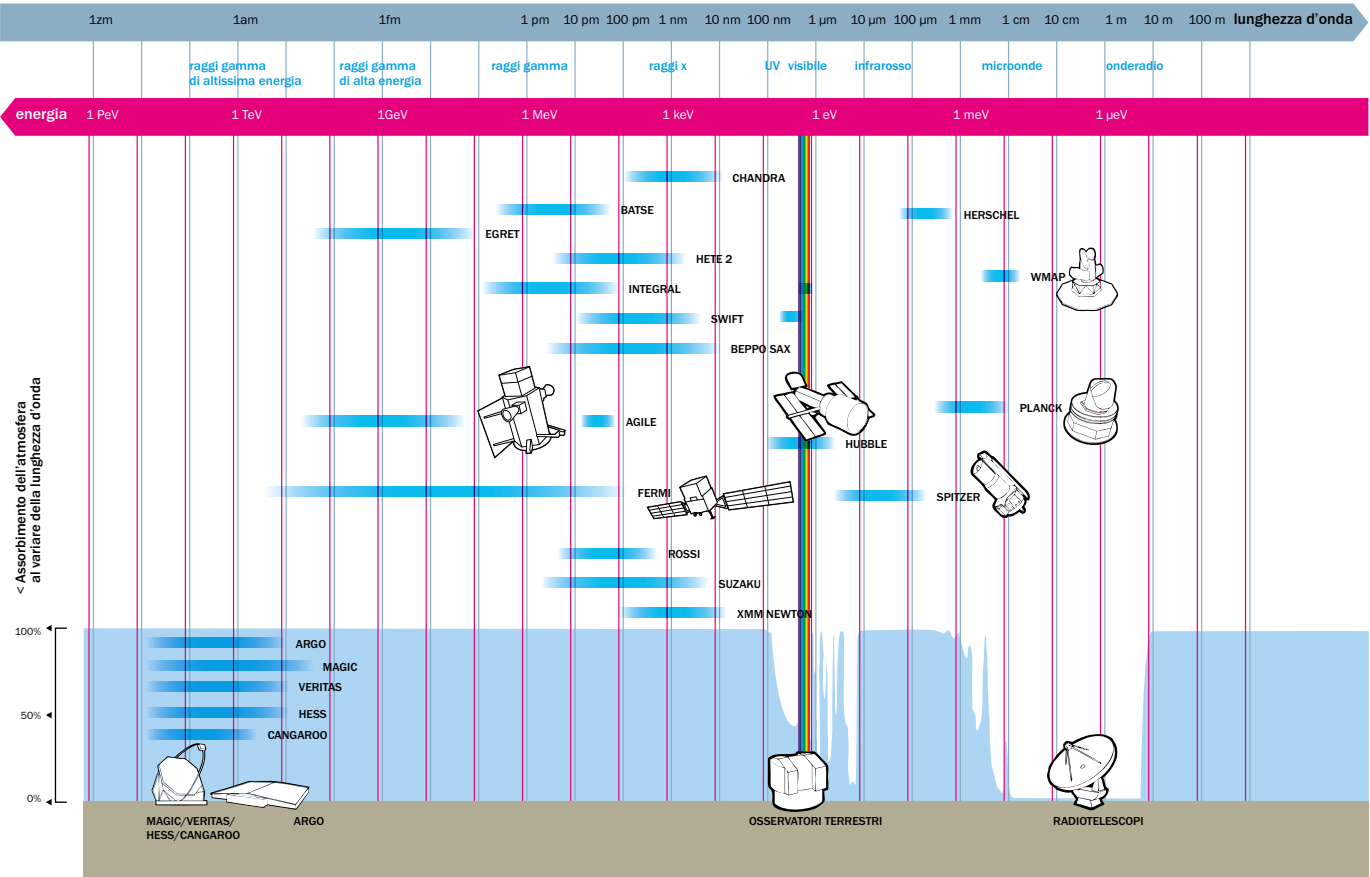


d.

Tutti i colori dell’Universo

L’atmosfera che avvolge la Terra viene attraversata con limitato assorbimento solo dalla luce visibile, dall’infrarosso e dalle onde radio, mentre le onde di altre frequenze vengono quasi totalmente assorbite. Fino ai primi decenni del secolo scorso, quindi, il cielo poteva essere osservato solo a occhio nudo o con telescopi ottici, a lunghezze d’onda comprese tra i 400 e i 700 nm, tra il violetto e il rosso. Per vedere il cielo in altri “colori” era necessaria l’invenzione di altri strumenti. Alla fine degli anni ’30 dello scorso secolo apparvero i primi radiotelescopi, in grado di sfruttare la trasparenza dell’atmosfera a lunghezze d’onda radio, tra 1 mm e 30 m; con tecniche interferometriche, sfruttando cioè i tempi di arrivo dei segnali su diverse antenne separate spazialmente, sono state ottenute dettagliatissime immagini del cielo. Ma per “vedere” l’Universo in tutta la sua varietà, anche alle frequenze dei raggi X o gamma, sono stati necessari gli strumenti

tipici della fisica delle particelle. A partire dal 1948, essi vennero montati su razzi, dal 1964 su palloni stratosferici e, a partire dal 1970, su satelliti. Per i raggi gamma di altissima energia, apparati a terra rivelano i fotoni non direttamente, bensì osservando gli estesi sciame di particelle da essi prodotti nell’atmosfera. Nella figura, assieme all’andamento della percentuale di assorbimento in atmosfera delle onde elettromagnetiche alle diverse lunghezze d’onda, viene schematizzato il quadro degli strumenti “in azione”, molti dei quali con importante partecipazione italiana e dell’Infn: per ognuno di essi, la banda indica l’intervallo di lunghezze d’onda (e, corrispondentemente, di energia) in cui essi riescono a “vedere”, dalla Terra o nello spazio. Mettendo insieme le loro immagini, osserviamo finalmente l’Universo in tutti i suoi “colori”. [C. S.]



e.

e.
Rappresentazione artistica di un microquasar, un sistema binario formato da un buco nero in orbita ravvicinata con una stella “normale”. La materia della stella, precipitando nel buco nero, acquista energia cinetica. Parte di questa energia è riemessa sotto forma di due jet di radiazione e materia emessi lungo l’asse di rotazione del buco nero. All’emissione dei jet è associata l’accelerazione di particelle.

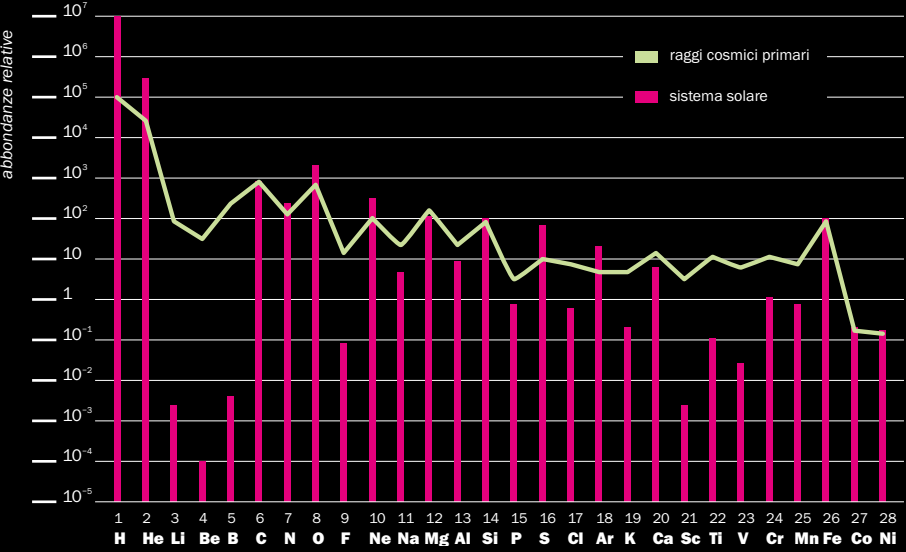
di questa teoria dell’accelerazione dei raggi cosmici sono stati formulati da Enrico Fermi in un celebre lavoro del 1949, uno dei numerosi e importantissimi contributi di colui che è stato uno dei maggiori scienziati del ventesimo secolo. Le esplosioni di supernova non sono gli unici oggetti, o eventi astrofisici, che possono produrre raggi cosmici. Le regioni centrali di particolari galassie (dette *nuclei galattici attivi*) rilasciano grandi quantità di energia, quando la materia di gas interstellare e di stelle disintegrate precipita verso giganteschi buchi neri (con una massa anche di miliardi di masse solari) che formano il centro di queste galassie. Ci sono indicazioni che i raggi cosmici di energia più elevata siano formati proprio in questi mostruosi sistemi. Altri candidati per l’accelerazione dei raggi cosmici sono i cosiddetti *lampi gamma* (o *Gamma Ray Bursts*), le *pulsar*, i *microquasar*. I lampi gamma sono uno dei fenomeni più sorprendenti ed enigmatici osservabili nel cielo. Sono stati scoperti, per puro caso, alla fine degli anni ’60 dai satelliti militari americani Vela, che monitoravano la superficie della Terra alla ricerca di possibili esplosioni nucleari segrete. Per un tempo brevissimo (da qualche centesimo a qualche centinaio di secondi) un punto nel cielo si illumina in un intensissimo “lampo” di radiazione gamma, che durante la sua breve durata supera in luminosità il resto

dell’Universo visibile. Al violento lampo iniziale segue un’emissione più debole che decresce gradualmente nel tempo, scomparendo in pochi giorni o settimane. I lampi sono il risultato di esplosioni cosmiche ancora più potenti delle supernovae, e sono per questo gli oggetti più lontani mai visti dalla Terra. L’origine di queste esplosioni potrebbe essere il collasso gravitazionale di stelle supermassive, oppure la coalescenza (dovuta alla radiazione di onde gravitazionali) di un sistema binario formato da due stelle di neutroni per formare un buco nero. La prima pulsar mai scoperta “ticchettava” trenta volte al secondo. Jocelyn Bell, la giovane astronoma che operava il telescopio radio che aveva registrato il fenomeno non poteva credere ai suoi “occhi”. Che cosa poteva produrre un fenomeno periodico così rapido? Era forse il segnale radio di una civiltà extraterrestre? Il mistero venne chiarito in breve tempo. L’esplosione di una supernova produce delle minuscole stelle di neutroni con un raggio anche di pochi chilometri. Quando il nocciolo della stella in collasso gravitazionale si contrae, per la conservazione del momento angolare, la sua rotazione aumenta di velocità, come avviene a una pattinatrice che piroetta stringendo le braccia vicino al corpo. Le stelle di neutroni sono enormemente più piccole della stella

I raggi cosmici, la composizione

La composizione dei raggi cosmici che arrivano dallo spazio non è poi così diversa da ciò che ci circonda, nel nostro sistema solare. In figura, sono rappresentate le abbondanze relative (ponendo il silicio arbitrariamente a 100) dei primi elementi della tavola periodica, nel caso del Sistema Solare (barre magenta) e dei raggi cosmici primari (linea spezzata verde). La scala è logaritmica e la figura, a prima vista, potrebbe trarre in inganno: infatti, nel Sistema Solare l'idrogeno e l'elio rappresentano il 91,1% e

l'8,8% rispetto al numero totale di nuclei, e tutti gli altri elementi contribuiscono per il rimanente 0,1%! Nei raggi cosmici, le proporzioni tra i vari elementi sono simili a quelle nel sistema solare, ma con alcune significative differenze; in particolare, nei raggi cosmici sono molto più abbondanti i nuclei leggeri, tra elio e carbonio, e quelli più leggeri del ferro: essi sono il risultato della frammentazione di nuclei più pesanti a seguito di urti con la materia interstellare. [C. S.]



prima della compressione e quindi ruotano velocissime, anche 1.000 volte al secondo. Questa veloce rotazione genera degli elevatissimi campi magnetici. Ne conseguono dei complessi fenomeni elettromagnetici in grado di accelerare particelle fino a energie elevatissime e che generano fasci ruotanti di fotoni che, come fari nella notte, ci illuminano periodicamente e ci appaiono pulsare. Questi fenomeni sottraggono energia alla pulsar che lentamente rallenta la sua rotazione. Un microquasar è un sistema binario composto da una stella normale in stretta orbita intorno a un buco nero (con massa alcune volte quella del Sole). Un “rivolo” di materia viene continuamente rubato alla stella e cade verso il buco nero. La caduta genera l'energia cinetica che alimenta l'emissione di radiazione, e si converte nell'accelerazione di particelle cariche fino a

energie molto elevate. Lo studio delle sorgenti dei raggi cosmici è stato rivoluzionato dallo sviluppo di nuovi telescopi (come *Fermi*, *Agile*, *Magic*, *Hess*) in grado di osservare raggi gamma, cioè fotoni di alta e altissima energia. L'accelerazione dei raggi cosmici è, infatti, accompagnata dall'emissione di luce con un ampio spettro di energia, che “segnala” la loro produzione. L'accelerazione dei raggi cosmici è accompagnata dall'emissione non solo di fotoni ma anche di neutrini, particelle prive di carica e dotate di massa piccolissima, che giungono sulla Terra senza subire deviazione nel loro percorso e che interagiscono pochissimo con la materia. Per queste loro caratteristiche i neutrini sono degli ottimi messaggeri, perché conservano fino a noi, praticamente intatte, le informazioni sulle loro sorgenti e quindi su ciò che avviene nel nostro Universo.

Telescopi per raggi cosmici

Per proseguire gli entusiasmanti studi sulle particelle elementari in modo più controllato e in condizioni di osservazione più favorevoli i fisici iniziarono a costruire delle macchine acceleratrici in grado di produrre “raggi cosmici artificiali”, cioè fasci di particelle di alta energia. A partire dagli anni '50 del secolo scorso, la fisica delle particelle si trasferisce così dai palloni e dagli osservatori in montagna a laboratori come quelli dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare o del Cern. Ma lo studio dei raggi cosmici è proseguito. L'osservazione “diretta” delle particelle che arrivano dallo spazio richiede di porre i rivelatori al di sopra dell'atmosfera terrestre. Questo è possibile usando speciali palloni stratosferici che possono arrivare ai confini dell'atmosfera o, in modo più difficile ma più efficace, ponendo gli strumenti su satelliti in orbita attorno alla Terra. Recentemente il satellite *Pamela*, lanciato il 15 giugno del 2006 dal cosmodromo russo di Baikonur ha ottenuto risultati molto importanti. Di grandissimo interesse sono le misure, con un dettaglio senza precedenti, dei flussi di antimateria (antielettroni e antiprotoni) nei raggi cosmici. Una parte di queste antiparticelle potrebbe essere, infatti, generata dall'invisibile materia oscura presente nella nostra galassia. Con il crescere dell'energia, il flusso dei raggi cosmici diventa sempre più piccolo e le

osservazioni dirette diventano impossibili, perché gli strumenti che si possono mettere su un pallone o un satellite non sono sufficientemente grandi. Altre tecniche “indirette” sono possibili. Alle energie più elevate lo sciame prodotto da una singola particella primaria può contenere anche decine di miliardi di particelle secondarie. Una parte dello sciame raggiunge il suolo sotto forma di un disco sottile (qualche metro di spessore) e con un raggio che va da qualche centinaio di metri fino a qualche chilometro. Rivelatori al suolo possono osservare l'arrivo di uno sciame e ricostruire la direzione, l'energia e il tipo di particella primaria. L'aria attraversata dallo sciame assorbe energia dalle particelle e riemette istantaneamente una tenue luce di fluorescenza: nelle notti senza luna, telescopi speciali sono in grado di osservare questi deboli bagliori. Per gli anni futuri si profila un'affascinante prospettiva: quella di studiare le sorgenti cosmiche di radiazione di alta energia, che sono poi i luoghi più estremi e violenti dell'Universo, con una combinazione di diversi “messaggeri”: la luce (in tutti i suoi “colori” o lunghezze d'onda), i neutrini e i raggi cosmici. Ma esiste anche un quarto importantissimo messaggero: le onde gravitazionali, vibrazioni dello spaziotempo che secondo le leggi della gravitazione di Einstein accompagnano l'accelerazione di grandi masse. Tutti questi studi ci consentiranno di mettere alla prova le leggi fisiche fondamentali.

Biografia

Paolo Lipari è ricercatore all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Roma 1 La Sapienza. Da molti anni si interessa di quell'ambito della fisica che sta all'intersezione tra particelle, astrofisica e cosmologia.

Link sul web

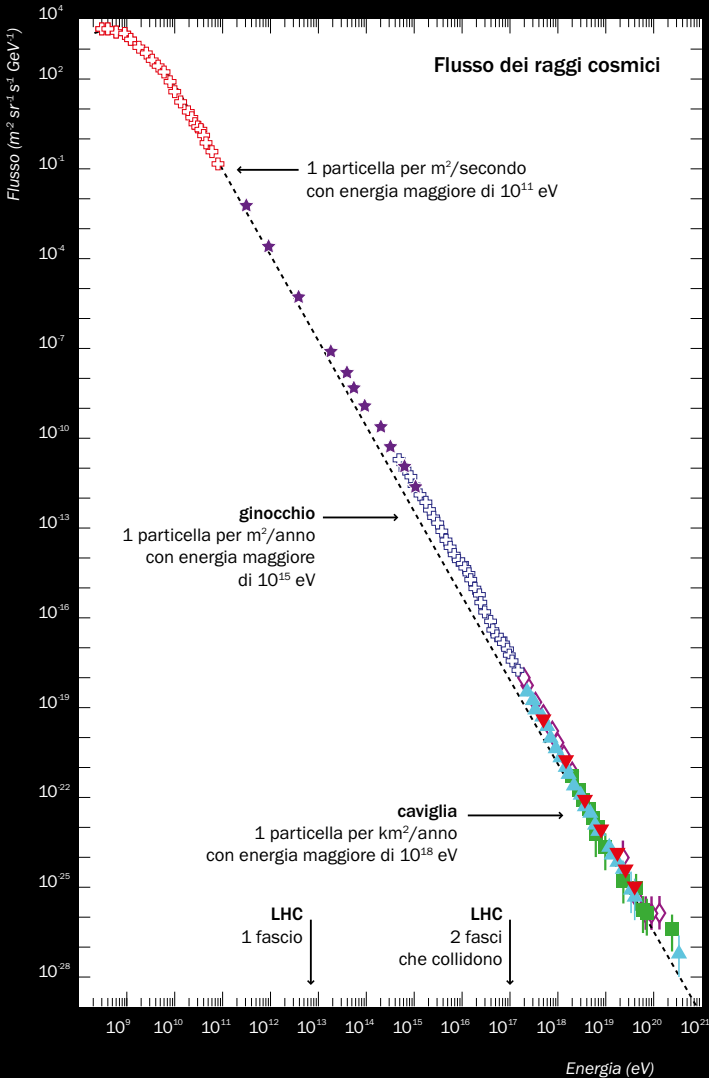
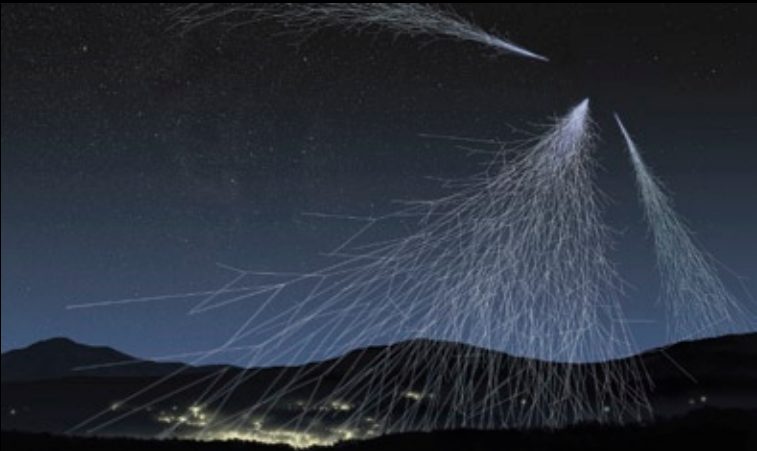
http://auger.cnrs.fr/presse/ScAm_jan97.html

<http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/cosmicrayrpp.pdf>

I raggi cosmici, le energie

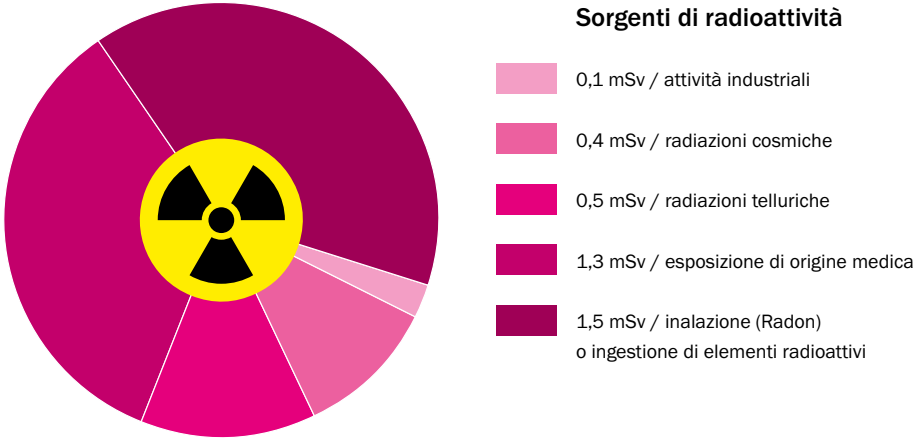
Che energie hanno i raggi cosmici? La risposta è nella figura, nel caso delle particelle che arrivano dallo spazio, prima di interagire con l'atmosfera. Il grafico ci dice, per ogni energia E, quanti protoni con energia compresa tra “E – 0,5 GeV” ed “E + 0,5 GeV” attraversano, in 1 secondo, un'area di 1 metro quadrato, provenendo da direzioni comprese in un angolo solido unitario, cioè in 1 steradiante. Come si vede, i raggi cosmici coprono un grandissimo intervallo in energia, arrivano fino a 10²¹ eV (se un grammo d'acqua assorbisse tutta questa energia, la sua temperatura crescerebbe di 15 °C!) ma sono sempre più rari all'aumentare dell'energia. Il loro flusso diminuisce assai rapidamente, con un grafico che appare rettilineo a tratti (ma con cambi di pendenza in corrispondenza delle regioni convenzionalmente indicate come “ginocchio” e “caviglia”), solo perché ambedue gli assi, energia e flusso, sono in scala logaritmica. Come si vede dalla figura, contando le particelle con energia superiore a 10¹¹ eV, oppure a 10¹⁸ eV, si passa da una particella a metro quadro al secondo a 1 particella a km² all'anno, cioè con un fattore di riduzione pari a circa 30 mila miliardi!

Energie così elevate non si possono raggiungere con gli acceleratori, nemmeno col Large Hadron Collider (Lhc) del Cern, dove l'energia massima raggiungibile dai protoni sarà di 7x10¹² eV. Ben maggiore è però l'energia che a Lhc si sprigiona negli urti frontali tra due protoni: essa è la stessa che si otterrebbe facendo urtare un protone cosmico da 10¹⁷ eV contro un protone di un nucleo dell'alta atmosfera. Gli acceleratori perdono (per poco) la gara in energia, ma vincono (di molto) quella in intensità! I diversi simboli indicano i diversi esperimenti con cui sono stati raccolti i dati riportati nello schema. [C. S.]



Radiazioni e salute

In figura sono rappresentate le varie sorgenti di radiazioni ionizzanti che contribuiscono alla dose media ricevuta in un anno da ciascun italiano, espresse nell'unità di misura appropriata, il Sievert. L'esposizione legata a esami radiodiagnostici è chiaramente un valore medio su tutto il campione, è assai diversa a seconda delle vicende personali, e rappresenta comunque una grossa parte della dose totale. Va notato però che anche la componente di origine naturale non è uniforme tra la popolazione, ma presenta ampia variabilità in base a molti fattori, quali la latitudine di residenza, la composizione geologica del suolo, i materiali di costruzione delle abitazioni e dei luoghi di lavoro, o l'altitudine sul livello del mare. Quest'ultima variabile è particolarmente rilevante nel caso dei raggi cosmici, che rappresentano circa il 10% del totale. Infatti, la radiazione che ci attraversa è costituita dagli sciame di particelle prodotte nell'atmosfera dai raggi cosmici primari, sciame che sono composti da un numero crescente di particelle man mano che penetrano nell'atmosfera, raggiungono un massimo intorno ai 10.000 metri per poi affievolirsi in prossimità della superficie terrestre. La dose ricevuta dal personale di volo delle compagnie aeree è significativamente superiore a quella dei pescatori! La vita convive da sempre con le radiazioni cosmiche: al livello del mare, ciascuno di noi è attraversato da un centinaio di particelle al secondo, per lo più muoni e, in minor misura, elettroni e positroni. Ci attraversano anche i neutrini, un numero sterminato di neutrini: il Sole ne produce qualcosa dell'ordine di 10³⁸ al secondo, e sulla Terra ne arrivano quasi 100 miliardi al secondo, per ogni centimetro quadrato. Fortunatamente per noi, le loro interazioni con la materia sono estremamente rare, (attraversano senza alcun problema il pianeta Terra!); per i neutrini, siamo “trasparenti” e non ci creano alcun problema di salute. [C. S.]



1. Fu lo scienziato austriaco Victor Hess a scoprire, nel 1912, l'esistenza dei raggi cosmici. Portando i suoi strumenti a 5.000 metri di quota, a bordo di un pallone aerostatico, poté osservare che il segnale prodotto dalle particelle cariche aumentava con l'altezza, a conferma della loro origine cosmica.





a.

Grandi occhi puntati sul cosmo

Luoghi estremi per nuovi osservatori.

di Roberto Battiston

È passato quasi un secolo da quando Victor Hess avviò la serie di esperimenti che portò nel 1912 alla scoperta dei raggi cosmici, l'intenso flusso di particelle che da sempre bombarda il nostro pianeta. Hess era incappato nei "prodotti" del grandioso acceleratore cosmico, una scoperta che anticipava di quasi quarant'anni gli acceleratori di particelle e apriva un nuovo campo di ricerca alla fisica moderna: la fisica delle particelle elementari. Da quel momento gli straordinari risultati ottenuti con gli esperimenti condotti sugli acceleratori dominarono lo sviluppo di questo settore fino al trionfo del Modello Standard, la teoria che descrive compiutamente le particelle elementari e le loro interazioni. Negli ultimi anni lo studio dei

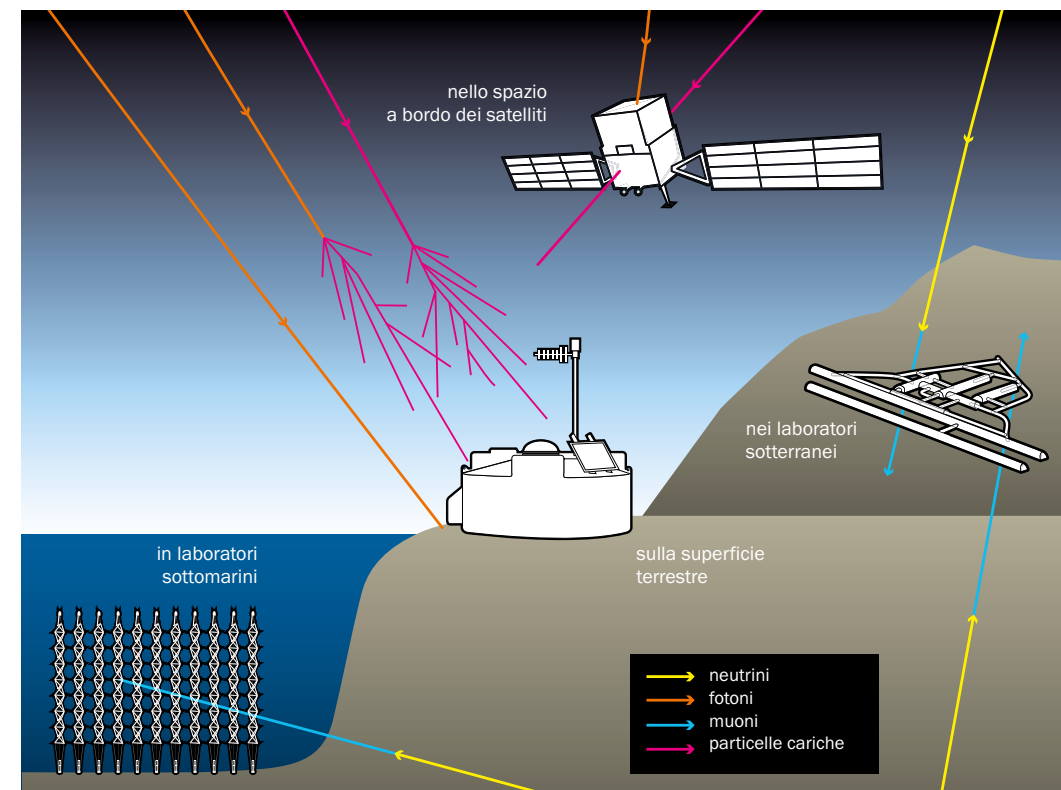
raggi cosmici è però tornato più vivace che mai. Questo accade anche perché si sta raggiungendo un limite – in dimensioni e costi – delle macchine acceleratrici, che in futuro difficilmente potranno creare particelle con energie superiori a quelle finora raggiunte, alcune migliaia di miliardi di elettronvolt. Lo studio dei raggi cosmici rappresenta una via alternativa per accedere a stati della materia non ancora osservati sperimentalmente, ma già ipotizzati da studi teorici: ad esempio la materia oscura di tipo supersimmetrico, l'antimateria nucleare primordiale, la materia ultradensa formata da quark di tipo "strano" o le particelle "supermassive" create al momento del Big Bang. I raggi cosmici restano però di attualità anche in quanto straordinario fenomeno astrofisico, alla cui origine sta un meccanismo ancora sconosciuto: i ricercatori si chiedono, per esempio, quali siano i motori cosmici in grado di accelerare le particelle fino a energie così straordinariamente elevate e dove essi si

trovino, nella nostra o in altre galassie. La gamma di energie dei raggi cosmici è davvero straordinaria: dalle particelle solari di bassa energia, fino alle particelle di origine ignota ma con energie superiori a 100 miliardi di miliardi di elettronvolt. Gli esperimenti mostrano che col crescere dell'energia il flusso di questi messaggeri cosmici diminuisce progressivamente. Si tratta di esperimenti basati su tecniche molto diverse e a cui l'Italia con l'Infn partecipa spesso da protagonista. Questi rappresentano straordinari esempi di ingegnosità. I rivelatori più arditi sono quelli posti su palloni stratosferici o addirittura nello spazio: i più moderni sono composti da grandi magneti e da avanzati rivelatori di particelle, muniti di centinaia di migliaia di canali di registrazione dei segnali, del tutto simili – in piccolo – agli apparati di fisica delle alte energie, ma lanciati nello spazio. È questo il caso del sofisticato esperimento *Ams* che sarà installato sulla Stazione Spaziale Internazionale nel

a.
La Stazione Spaziale Internazionale (Iss) su cui verrà installato l'esperimento *Ams*. *Ams* sarà portato in orbita e agganciato all'Iss dagli astronauti dello Shuttle, il cui lancio è previsto per il febbraio 2011.

b.
I "messaggi dallo spazio" sono raccolti in luoghi e con tecniche diversi: le particelle cariche e i fotoni delle varie energie sono rivelati a terra o su satellite (vd. box Tutti i colori del cielo), mentre i neutrini si riescono a "vedere" solo schermandosi dal resto dei raggi cosmici, in grandi installazioni sotterranee o sottomarine. Ma i neutrini possono arrivare anche dal sottosuolo, dopo aver attraversato quasi tutta la Terra! Tra i modi di interazione, comunque rarissimi, quello più utile per rivelare i neutrini è l'urto con la produzione di un muone: lasciando traccia negli strumenti è il muone a segnalare il neutrino iniziale.

b.



febbraio del 2011 o dell'esperimento Pamela, che, in orbita dal 2006, ha fornito nuove misure di grande interesse sulla composizione dei raggi cosmici. Questi rivelatori sono complementari ai satelliti che osservano i raggi gamma di alta energia come il piccolo satellite Agile dell'Agenzia Spaziale Italiana (Asi) e in particolare il grande osservatorio Fermi della Nasa, progetti a cui l'Infn ha dato un contributo molto importante. Gli *spettrometri magnetici* registrano tutti i parametri dei raggi cosmici “primari” dotati di carica elettrica, identificando con precisione i tipi di particelle che li compongono. È grazie a questo tipo di esperimenti che abbiamo scoperto come i raggi cosmici carichi siano costituiti per circa il 90% da protoni, mentre il restante 10% sono per la maggior parte nuclei di elio, quel che rimane infine sono elettroni, positroni, antiprotoni e altri nuclei atomici (più pesanti dell’elio); c’è poi l’abbondante componente neutra composta da fotoni e neutrini. Ma grandi rivelatori spaziali o sofisticati palloni stratosferici non sono in grado di misurare direttamente i raggi cosmici provvisti di più alta energia perché questi eventi, essendo rarissimi, necessitano di enormi superfici sensibili. Così, per studiarli, i fisici

ricorrono a esperimenti molto particolari, che osservano i segnali prodotti da queste particelle nell’atmosfera. Si tratta di grandi distese di rivelatori posti nelle zone più alte del pianeta, come *Argo* in Tibet a 3.400 metri di altitudine o il gigantesco *Auger* che si estende su più di 3.000 km quadrati nella pampa argentina a 1.400 metri slm. Si sta studiando la possibilità di realizzare nello Spazio esperimenti ancora più sensibili: la luminescenza emessa dagli sciame atmosferici di altissima energia può essere raccolta e misurata da rivelatori posti nello spazio, punto di vista dal quale è possibile con un singolo strumento osservare delle superfici almeno cento volte più grandi di quella di Auger. Altre tecniche, che stanno dando ottimi risultati nello studio dei raggi cosmici di più alta energia, sono basate su grandi specchi parabolici – come quelli di *Magic* alle Canarie e di *Hess* in Namibia – in grado di raccogliere la luce Cherenkov emessa dalle particelle e dai raggi gamma di altissima energia che entrando nell’atmosfera producono sciame di nuove particelle. In questo modo è possibile osservare e studiare i fenomeni più violenti che accadono nell’Universo in grado di produrre fotoni aventi energie di centinaia di GeV. Esiste infine una componente dei raggi

- c.**
Una delle gallerie dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso, il più grande laboratorio sotterraneo al mondo dedicato allo studio della fisica astroparticellare.
- d.**
Vista dell’esterno della grande sfera dell’esperimento Borexino, allestito nella Sala C dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell’Infn. Borexino è un rivelatore di neutrini solari, in grado però di osservare anche i neutrini geotermici, quelli cioè che provengono dal cuore del nostro pianeta.

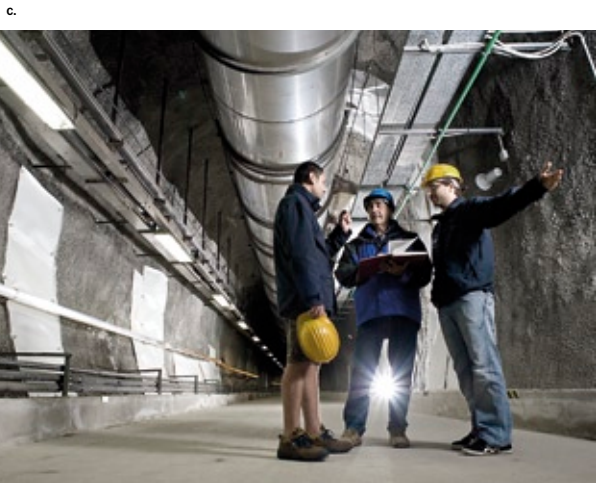


e.

- e.**
L'esperimento Lvd, allestito nella Sala A dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn, è in attesa dell'esplosione di una supernova nella nostra galassia. L'obiettivo di questo esperimento è studiare i neutrini prodotti negli eventi più violenti che avvengono nell'Universo, come i collassi gravitazionali delle stelle.

cosmici, talmente penetrante che l'intero pianeta viene utilizzato per la loro rivelazione: i neutrini cosmici. Per rivelare questa componente i fisici stanno sviluppando enormi esperimenti sotterranei, ad esempio nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn, dove operano straordinari esperimenti come *Borexino*, in grado di “vedere” i neutrini solari, e *Lvd*, ma anche esperimenti sottomarini, come gli esperimenti *Nemo* al largo di Capo Passero in Sicilia e *Antares* al largo di Marsiglia in Francia, o addirittura sotto il ghiaccio dell'Antartide, come nel caso dell'esperimento *IceCube*. Non avendo carica, i neutrini si propagano dalla sorgente che li ha emessi senza essere deflessi

dal campo magnetico galattico: studiare le direzioni di provenienza porterebbe quindi alla nascita di una nuova astronomia basata sui neutrini invece che sui fotoni. Cento anni dopo la loro scoperta, i raggi cosmici non hanno quindi perso il loro fascino e il loro studio ci aiuterà anche in futuro a comprendere la natura e le leggi fisiche che la descrivono. Nei prossimi anni i raffinati esperimenti attualmente in corso, potrebbero riservarci importanti sorprese: che la risposta venga dallo spazio, dagli altipiani del Tibet o dalle profondità del mare, i ricercatori hanno lanciato la sfida e sono al lavoro per analizzare le informazioni fornite da questi messaggeri del cosmo.



Biografie

Roberto Battiston è professore di fisica generale all'Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia. È viceresponsabile dell'esperimento Ams e presidente della Commissione II dell'Infn per la fisica astroparticellare.

Link sul web

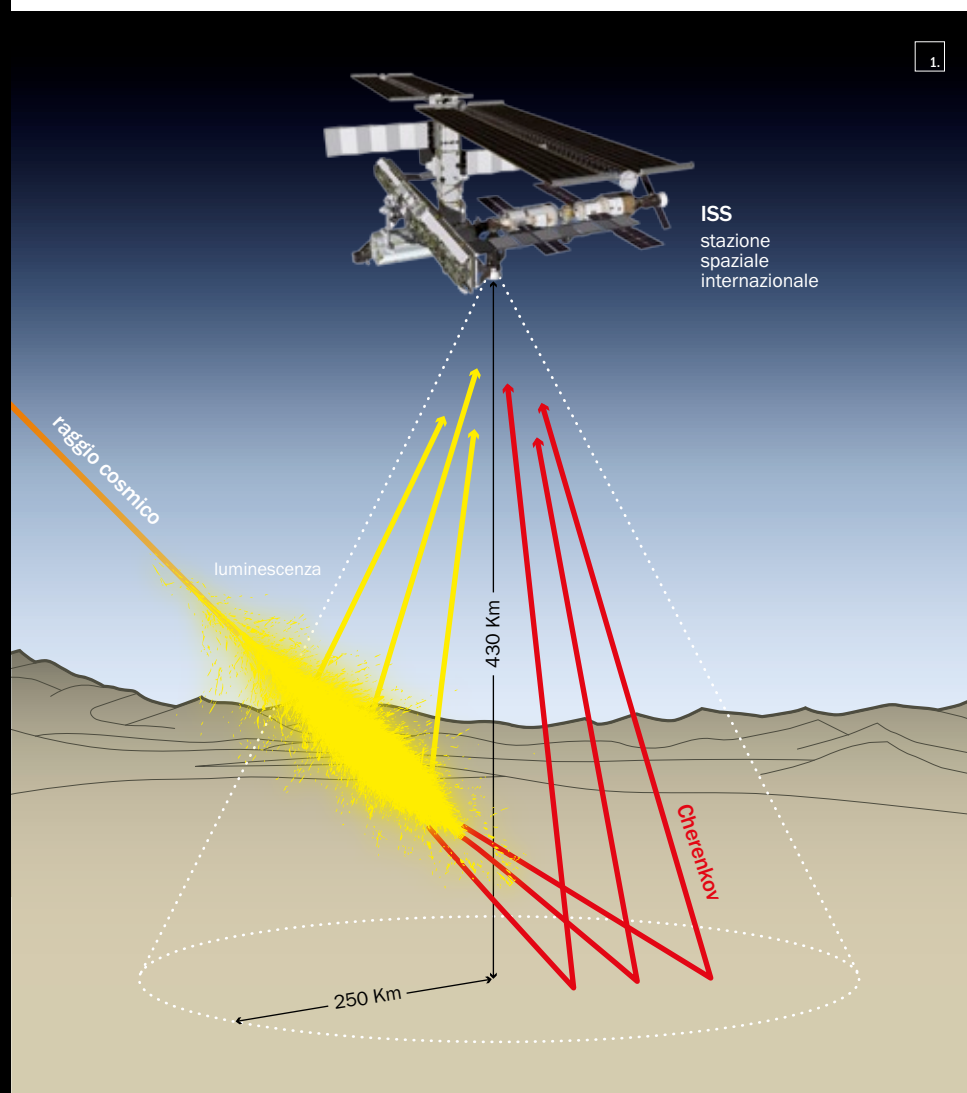
- <http://fermi.gsfc.nasa.gov>
- <http://ams-02project.jsc.nasa.gov>
- <http://pamela.roma2.infn.it/index.php>
- <http://magic.mppmu.mpg.de>
- www.lngs.infn.it
- www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites.html

Il progetto Jem-Euso

Usare l'atmosfera del nostro pianeta come un grande rivelatore per osservare i raggi cosmici, non da terra ma dallo spazio. Questo è ciò che vuole realizzare il progetto Jem-Euso (*Japanese Experiment Module - Extreme Universe Space Observatory*). Si tratta di una proposta nata da un'idea italiana e recentemente rilanciata da una iniziativa internazionale coordinata dalla Agenzia Spaziale Giapponese (Jaxa), che diventerebbe così il primo esperimento spaziale per lo studio della radiazione cosmica di altissima energia. Quando i raggi cosmici di alta energia interagiscono con l'atmosfera formano un striscia fluorescente (nella frequenza degli ultravioletti) lunga fino a 100 km, che può essere osservata nel cielo notturno da un telescopio posto al di fuori dell'atmosfera terrestre. La fluorescenza è indotta nell'azoto dalle particelle secondarie cariche dello sciame come risultato di un complesso processo relativistico a cascata.

Oltre alla luce di fluorescenza, vi sarà anche la luce emessa per effetto Cherenkov lungo lo sciame, ricco di elettroni ultrarelativistici: parte di questa luce, riflessa sul terreno, raggiungerà il telescopio di Euso. Euso sarà collocato a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (Iss) e osserverà, da un'altezza di oltre 400 km, i raggi cosmici che interagiscono con l'atmosfera della Terra, per trovare una risposta ai quesiti fondamentali sulla loro natura, la loro origine e la storia che portano con sé.

1. Principio di funzionamento dell'esperimento Euso. Il telescopio posto sulla Stazione Spaziale Internazionale osserva dall'alto l'atmosfera e raccoglie in successione temporale la luce di fluorescenza prodotta dallo sciame e quella Cherenkov riflessa dal terreno, ricostruendo così l'energia e la direzione di provenienza del raggio cosmico primario.



Sospetti di materia oscura?

Intervista a Piergiorgio Picozza.

di Antonella Varaschin

Nella primavera del 2009 è uscita sulla prestigiosa rivista internazionale *Nature* una ricerca firmata dalla collaborazione dell'esperimento Pamela (*Payload for Antimatter-Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*). La notizia in breve tempo ha fatto il giro del mondo e la pubblicazione è stata sotto i riflettori dei più importanti convegni scientifici internazionali. Abbiamo chiesto di spiegarci di che cosa si tratta a Piergiorgio Picozza, ricercatore dell'Infn, docente all'Università di Roma Tor Vergata e responsabile internazionale dell'esperimento. "Pamela potrebbe aver visto la prima evidenza indiretta di materia oscura", ci racconta Picozza, senza nascondere la propria soddisfazione. "In particolare – approfondisce Picozza – Pamela ha misurato un inaspettato eccesso di positroni (antielettroni) di alta energia. Questo potrebbe appunto rappresentare un segnale di quella materia sulla cui natura non sappiamo ancora nulla e che chiamiamo 'oscura' perché non direttamente visibile ai nostri occhi e ai nostri strumenti, poiché non assorbe né emette radiazione, ma che supponiamo sia, sulla base di osservazioni sperimentali e calcoli teorici, ben cinque volte più abbondante della materia ordinaria nel nostro Universo". Frutto di una collaborazione internazionale che coinvolge Italia, Russia, Germania e Svezia, Pamela è un rivelatore di antimateria che può essere considerato un vero

e proprio osservatorio spaziale, perché permette di condurre ricerche in diversi campi della fisica. Lanciato in orbita nel 2006 con un razzo russo partito dal cosmodromo di Baikonur, in Kazakistan, Pamela da allora invia a terra 16 gigabyte di dati al giorno, dalla cui analisi è emerso il risultato che tanto rumore ha provocato all'interno della comunità scientifica. I ricercatori stanno ora cercando di capire quale possa essere l'origine di queste antiparticelle così energetiche. Nel proporre una risposta a questo interrogativo Picozza è cauto e spiega: "Queste particelle possono essere prodotte da sorgenti astrofisiche altamente energetiche, come le pulsar, ma potrebbero, appunto, anche essere il prodotto dell'annichilazione della materia oscura". "Ovviamente – conclude Picozza – prima di considerare sorgenti esotiche come la materia oscura, dobbiamo escludere tutte le altre possibilità". Un aiuto alla comprensione di questo fenomeno potrebbe arrivare anche dai risultati di altri esperimenti: il satellite Fermi, i cui dati sugli elettroni concordano con quelli di Pamela, Ams-02 che sarà collocato il prossimo anno a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) dagli astronauti che partiranno con l'ultimo volo dello Shuttle, oppure l'acceleratore Lhc del Cern di Ginevra, dove si raggiungeranno energie che dovrebbero essere sufficienti a produrre artificialmente particelle di materia oscura.

Sul tetto del mondo

La collaborazione italo-cinese di Argo studia sull’altipiano del Tibet i raggi cosmici di alta energia.

di Benedetto D’Ettorre Piazzoli e Giuseppe Di Sciascio

La parola Argo riporta alla memoria storia e miti dell’antica Grecia. Argo era il nome del cane di Ulisse, di varie città greche e il nome della nave di Giasone che trasportò gli Argonauti alla conquista del Vello d’Oro nella misteriosa Colchide. E Argo era anche il nome di un mostro dai cento (o mille, a seconda delle tradizioni) occhi, mai tutti contemporaneamente dormienti. È a questo antico mito che si ispira il rivelatore di radiazione cosmica Argo, installato sull’altipiano tibetano, vicino al villaggio di YangBaJing a 4.300 m di altitudine. È infatti costituito da 18.500 “occhi” (tanti sono i suoi elementi sensibili), i quali consentono di rivelare gli sciame di particelle che si sviluppano nell’atmosfera terrestre quando una particella della radiazione cosmica primaria colpisce la Terra. A seguito dell’urto con un atomo dell’atmosfera si sviluppa, in un processo moltiplicativo a cascata, un cosiddetto *sciame atmosferico esteso* le cui particelle (essenzialmente elettroni, positroni, muoni e fotoni) vanno a costituire una sorta di disco parabolico, spesso qualche metro e con un diametro di circa 100-150 metri, che viene “fotografato” dagli occhi di Argo. In virtù della rotazione terrestre il rivelatore può esplorare con continuità quasi tutta la volta celeste dell’emisfero Nord. A quasi un secolo dalla loro scoperta, i raggi cosmici continuano a sorprendere i ricercatori mostrando caratteristiche inattese. Nonostante gli enormi progressi nella costruzione di sempre più sofisticati rivelatori e nello sviluppo di

complesse tecniche di analisi, le domande cruciali sulla loro origine restano senza una sicura risposta. In particolare, non sono stati ancora identificati con certezza gli oggetti astrofisici che li producono, né ben compresi i loro meccanismi di accelerazione e propagazione nella nostra galassia. Uno dei motivi principali di questa difficoltà è dovuta al fatto che i raggi cosmici carichi vengono deviati dai campi magnetici galattici perdendo ogni memoria della direzione di provenienza. Quindi, come è stato sperimentalmente verificato, ci si aspetta che il flusso di raggi cosmici anche di altissima energia (cioè dell’ordine di centinaia di TeV) osservato a terra sia altamente isotropo, non consentendo l’identificazione di alcuna sorgente della radiazione. Un modo per individuare i siti di produzione della radiazione cosmica è pertanto quello di rivelare l’emissione di fotoni di alta energia (*astronomia gamma*). Queste particelle, prodotte assieme ai raggi cosmici carichi nelle complesse interazioni che avvengono in prossimità delle sorgenti non vengono deviate dai campi magnetici, poiché elettricamente neutre, e conservano così intatte fino a noi le informazioni sulla direzione di provenienza. Quindi, uno dei principali obiettivi dell’astronomia gamma di alta energia è proprio l’individuazione dei siti di produzione dei raggi cosmici. Argo è un rivelatore multiruolo con l’ambizione di affrontare il problema nei suoi molteplici aspetti, sia studiando la radiazione cosmica, sia

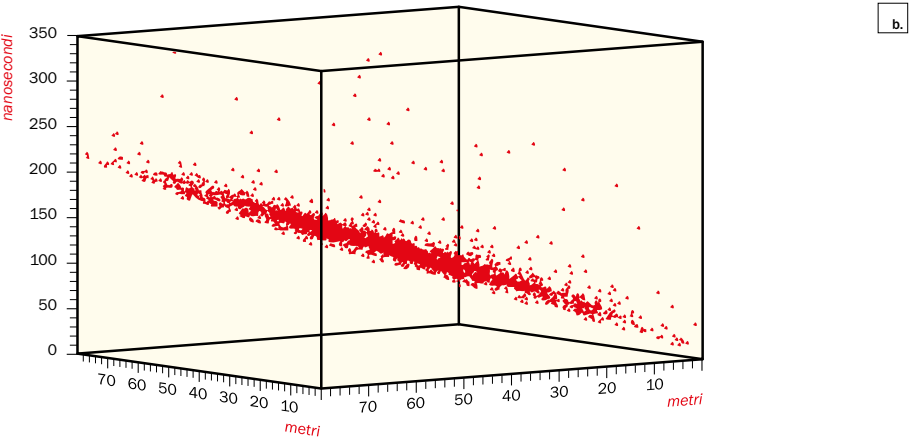


a.

a.
L’edificio che ospita i moduli dei rivelatori di Argo, a oltre 4.000 metri di altitudine sull’altipiano del Tibet. Qui, dove le condizioni ambientali sono estreme, ricercatori italiani dell’Infn collaborano con i colleghi cinesi all’esperimento dedicato allo studio dei raggi cosmici.

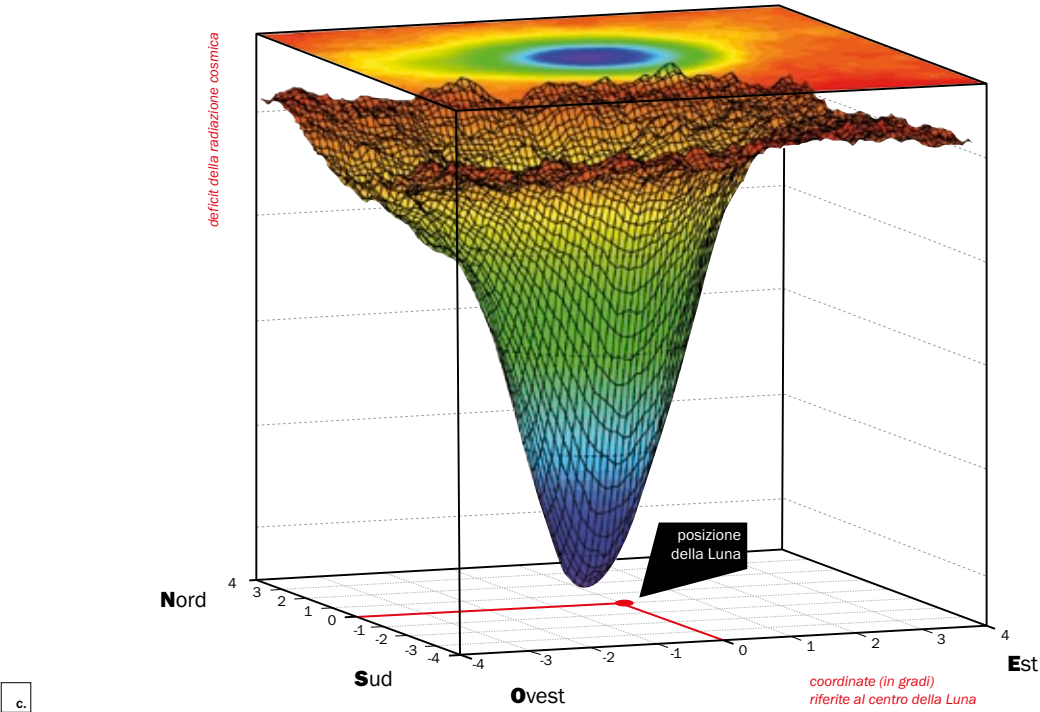
monitorando con continuità quasi tutto il cielo dell’emisfero Nord alla ricerca di emissioni di fotoni di alta energia. Tra i risultati più interessanti finora ottenuti, dopo soli due anni di raccolta dati, possiamo considerare la ricerca di antimateria (essenzialmente antiprotoni) nei raggi cosmici e la scoperta di direzioni privilegiate di provenienza della radiazione cosmica. Per quanto riguarda la ricerca di antiprotoni di alta energia (dell’ordine di qualche TeV) la tecnica usata è lo studio dell’“ombra della Luna”. Infatti, la distribuzione isotropa della radiazione

cosmica mostra un deficit in direzione della Luna poiché essa ne ostacola la propagazione verso la Terra facendo loro ombra. Se l’energia dei raggi cosmici è sufficientemente bassa, il campo magnetico terrestre deflette la loro traiettoria, producendo come risultato un deficit spostato rispetto alla posizione reale della Luna. Se l’ombra causata dai protoni appare spostata verso ovest, quella dovuta agli antiprotoni risulta deflessa in direzione opposta, quindi verso est: in linea di principio sarebbe quindi possibile vedere due distinte ombre. Dallo studio degli eventi in prossimità della Luna si possono quindi cercare



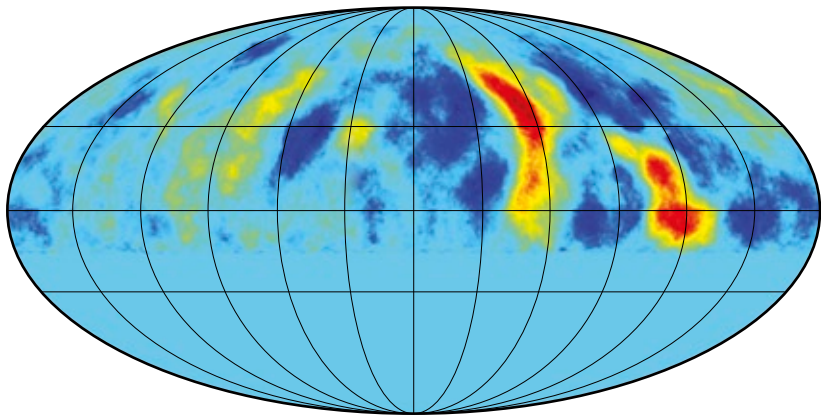
b.

b.
Ricostruzione di uno sciame di raggi cosmici di alta energia così come visto da Argo: la struttura dello sciame mette in evidenza i diversi tempi di arrivo delle particelle sulla superficie del rivelatore.



c.

c.
L’ombra della Luna. Nell’immagine è rappresentato il deficit di raggi cosmici in corrispondenza del nostro satellite, che scherma la superficie terrestre dalle particelle in arrivo.



d.

tracce di antimateria nei raggi cosmici. L'analisi dei dati finora raccolti non mostra alcuna evidenza di antiprotoni all'energia dei TeV (energie sinora inaccessibili agli esperimenti su satellite). Raccogliendo dati per altri 2-3 anni, il risultato di Argo potrà confermare o confutare i modelli di accelerazione dell'antimateria in antigalassie e di produzione di antiprotoni da materia oscura di massa elevata. Quella che si misura in prossimità della Luna non è l'unica disomogeneità nella distribuzione della radiazione cosmica. Sono state individuate, infatti, due aree con un eccesso di radiazione di alta energia. Questo eccesso è pari a circa lo 0,1% rispetto al fondo uniforme della radiazione cosmica, con circa 13 deviazioni standard (la deviazione standard misura lo scostamento dal valore medio). La probabilità che questo eccesso pari a circa 13 deviazioni standard sia dovuto al caso è estremamente bassa. È stato possibile misurare questo piccolo eccesso grazie all'enorme quantità di dati raccolti. I ricercatori di Argo, infatti, hanno analizzato i dati sperimentali di oltre un anno di attività in modo da assicurare l'omogeneità dell'osservazione e li hanno "filtrati" per la ricerca di anisotropie su piccola-media scala (ovvero quasi locali). Questo risultato è molto enigmatico proprio perché, come ricordato, i campi magnetici presenti nella nostra galassia deviano le particelle cariche che compongono la radiazione cosmica rendendo uniforme la loro distribuzione sulla volta celeste. Tra le ipotesi formulate vi è la possibilità che queste regioni siano correlate alla presenza della supernova che ha prodotto la pulsar denominata "Geminga". Poiché questa supernova è relativamente giovane (300 mila anni) le regioni potrebbero essere testimonianza transiente dell'esplosione: sarebbe come se fossimo colpiti dai proiettili stessi, convogliati verso di noi da una particolare struttura del campo magnetico locale. L'analisi dettagliata di questi dati è in corso. Questo studio è molto importante perché potrebbe aiutarci a comprendere meglio l'origine e i meccanismi di propagazione della radiazione cosmica nella Galassia, fornendo un'importante prova che i raggi cosmici sono prodotti e accelerati dalle supernovae. E potrebbe anche spiegare le recenti osservazioni del flusso di positroni e di elettroni da parte di esperimenti su satellite, come Pamela e Fermi, e su pallone, come *Atic*.

Biografie

Benedetto D'Ettorre Piazzoli insegna fisica astroparticellare all'Università di Napoli Federico II. Ha svolto attività scientifica in fisica dei raggi cosmici e al Cern. È il responsabile italiano dell'esperimento Argo-Ybj in Tibet.

Giuseppe Di Sciascio è ricercatore dell'Infn presso la Sezione di Roma Tor Vergata. Svolge la sua attività di ricerca nell'esperimento Argo-Ybj fin dalle prime fasi di progettazione.

Link sul web

<http://argo.na.infn.it>

Fisici con gli scarponi chiodati

Storia degli esperimenti in alta montagna.

di Alba Zanini

d.
Mappa del cielo in coordinate equatoriali, che è uno dei sistemi di riferimento più usati in astronomia. Questa mappa è stata ottenuta dopo 584 giorni di misura contiene circa 90 miliardi di eventi di energia maggiore di 1 TeV. La scala di colori misura la significatività statistica dell'eccesso. Si osservano chiaramente due regioni con eccessi estesi (in rosso) di radiazione cosmica.

a.
Il Laboratorio di Pic du Midi sui Pirenei (2.887 m, fondato nel 1873). Nei primi anni del '900 è stato sede delle ricerche pionieristiche del gruppo di Manchester, con George Rochester e Patrick Blackett, del gruppo di Bristol, con Cecil Powell, e del gruppo di Parigi, con Pierre Auger, Luis Leprince-Ringuet, Rafael Armenteros. Oggi è attivo per osservazioni astronomiche, studio dei raggi cosmici e fisica e chimica dell'atmosfera.



a.

La fisica moderna, forse è cosa poco nota, deve moltissimo alla montagna. Nella prima metà del '900 proprio presso le stazioni di ricerca ad alta quota si sono svolte ricerche pionieristiche che hanno prodotto una rapidissima accelerazione nello sviluppo della conoscenza scientifica. Dopo la scoperta della “radiazione proveniente dallo spazio” nel 1912, infatti, lo studio dei raggi cosmici, con le straordinarie scoperte che hanno aperto la strada alla visione moderna della fisica, si è svolto principalmente nei laboratori di montagna in Europa e nel mondo. Si tratta di luoghi ideali per questo tipo di ricerca: sopra i 3.000 metri il ridotto strato di atmosfera e la minore intensità della radiazione di origine terrestre permettono di rivelare le diverse componenti della radiazione secondaria prodotta dall'interazione dei raggi cosmici primari (principalmente protoni) con i nuclei dell'atmosfera. L'epopea della ricerca in alta quota comincia nella prima metà del '900, quando fisici provenienti da tutto il mondo furono protagonisti di una sfida scientifica di enorme portata, che si svolse in piccoli laboratori sulle cime della Alpi, sulle Ande, sulle Montagne Rocciose, nel Caucaso, e che nell'arco di pochi decenni porta a una visione del tutto inedita della fisica nucleare e aprì la strada all'astrofisica, alla fisica delle particelle elementari, alla cosmologia. Fino agli anni '50, prima della costruzione e dell'utilizzo degli acceleratori di particelle, lo studio delle interazioni nucleari di alta energia era possibile solo presso i laboratori di montagna, osservando le interazioni dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera. Molte particelle elementari sono state scoperte in questo contesto, come anche sono state rivelate per la prima volta in esperimenti ad alta quota le “particelle strane”, particelle instabili, i cui i meccanismi di produzione e di decadimento sono dotati di proprietà particolari. Grazie all'eccellenza raggiunta in quegli anni dalla fisica nucleare italiana l'Infn ha partecipato fin dalla sua fondazione, nel 1951, a questa entusiasmante avventura scientifica. La vita in questi laboratori richiedeva, oltre a una grande passione per la ricerca scientifica, una buona dose di spirito di avventura e la disponibilità a lavorare in condizioni disagiate, il che, a dire il vero, vale ancora oggi. “I laboratori di montagna [...] diventarono in quegli anni dei punti di incontro di giovani fisici provenienti da molti paesi – scrive Edoardo Amaldi – La vita in comune nelle baracche di montagna e il coordinamento di esperimenti progettati da gruppi diversi furono gli elementi che spianarono la strada all'idea di collaborazioni più ampie ed ambiziose”. Tra quei giovani fisici, vi furono scienziati di valore altissimo e molti di loro furono in seguito insigniti del premio Nobel: basti ricordare Robert Millikan (1923), Arthur Compton (1927), Carl Anderson (1936), Enrico Fermi (1938), William Blackett (1948), Cecil Powell (1950); altri (tra i quali, Rafael Armenteros, André Lagarrigue, Luis Leprince-Ringuet) negli anni successivi, quando ebbe inizio l'era delle grandi macchine acceleratrici, furono tra i fondatori e i protagonisti delle ricerche al Cern.



b.



c.

- b.
Il laboratorio dello Jungfrauoch (Svizzera, 3.454 m, fondato nel 1926). La facilità di accesso, grazie alla ferrovia costruita nel 1912, lo rese ben presto uno degli osservatori più importanti per lo studio della radiazione cosmica. Fu frequentato da tutti i grandi fisici dell'epoca. Oggi ospita soprattutto esperimenti di fisica e chimica dell'atmosfera ed è una delle stazioni del network mondiale per il controllo del flusso dei neutroni negli sciami cosmici.
- c.
Il laboratorio di Chacaltaya sulle Ande (Bolivia, 5.230 m, fondato nel 1942). Qui, nel 1947, è stato scoperto il pione, la particella prevista dalla teoria di Yukawa (Premio Nobel nel 1949); per questa scoperta Cecil Powell ottenne nel 1950 il premio Nobel.

1928

1938

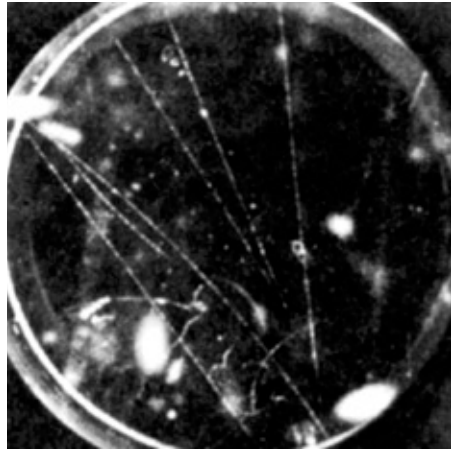
1947

1950

1953

Le scoperte

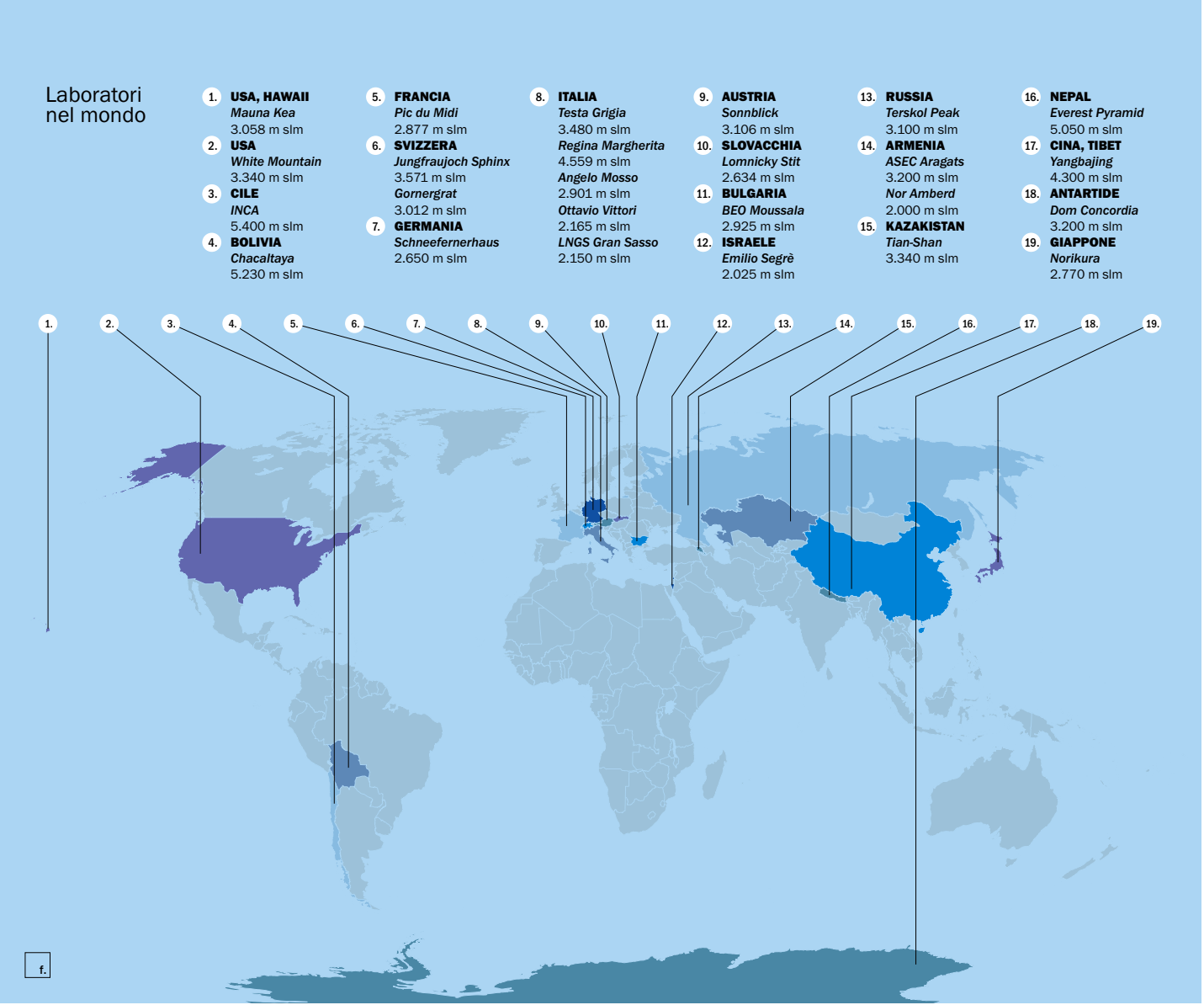
- ◀ Laboratorio di Huancayo, Perù (3.350 m, fondato nel 1919): Robert Millikan e Arthur Compton iniziano una serie di esperimenti sui raggi cosmici, ritenuti fino a quel momento radiazione di natura elettromagnetica.
- ◀ Usando diversi rivelatori distribuiti sulle Alpi, Pierre Auger nota che strumenti distanti fra loro segnalano contemporaneamente un evento: è l'evidenza della formazione dello sciame di particelle secondarie prodotte da protoni primari di alta energia.
- ◀ Chacaltaya, Bolivia (fig. c): Cesare Lattes (fig. d), Giuseppe Occhialini e Cecil Powell rivelano con le emulsioni nucleari il decadimento del pione in un neutrino e un muone che a sua volta decade in un elettrone, un neutrino e un antineutrino. È la scoperta sperimentale del pione previsto dalla teoria di Yukawa.
- ◀ Pic du Midi, Francia: Patrick Blackett e Rafael Armenteros rivelano le tipiche tracce a V rovesciata con la camera a nebbia a coincidenza – inventata da Blackett e Occhialini nel 1933 – posta in un intenso campo magnetico.
- White Mountain, Stati Uniti: le stesse tracce biforcute rivelate da Blackett e Armenteros sono evidenziate da Carl Anderson. Indicate inizialmente come “particelle V”, queste nuove particelle vengono chiamate successivamente *iperoni Λ* (fig. e).
- Jungfrauoch, Svizzera (fig. b): Cecil Powell rivela con le lastre fotografiche il decadimento in tre particelle del mesone K. Questa prima scoperta viene confermata un anno dopo da J.B. Hardin al Pic du Midi.
- Testa Grigia, Italia (3.480 m, fondato nel 1947, diretto da Gilberto Bernardini). A partire dagli anni '50 ospita gli esperimenti del gruppo di Roma (“I ragazzi di via Panisperna”) con Enrico Fermi, Edoardo Amaldi, Enrico Persico, Franco Rasetti, Ettore Pancini.
- ◀ Bagneres de Bigorre, ai piedi del Pic du Midi: un'epocale conferenza sui raggi cosmici avvia il processo di sintesi complessiva dei risultati. Ha inizio la fisica delle astroparticelle e, con essa, lo studio della simmetria, della stranezza, della conservazione di parità.



d. e.

d.
1950 - Cesare Lattes a Chacaltaya.

e.
Il decadimento dell'iperone Λ in un protone p e un pione π^- , visto con la camera a nebbia.



Oggi, nell'era degli acceleratori di particelle, dei satelliti e dell'esplorazione spaziale, i laboratori di alta quota costituiscono ancora luoghi di eccellenza per la ricerca scientifica, per la calibrazione di strumenti, per la validazione di dati ottenuti dai satelliti. Tuttora gli esperimenti sui raggi cosmici condotti in alta quota permettono di osservare reazioni di altissima energia, di diversi ordini di grandezza superiore a quella raggiungibile con i più potenti acceleratori oggi esistenti (Lhc a Ginevra, in Svizzera, e Tevatron a Chicago, negli Stati Uniti). L'Infn è impegnato nell'esperimento Argo a Yangbajin, in Tibet, per lo studio dei gamma ray burst, raggi gamma energetici di origine ancora sconosciuta e nell'esperimento Auger, in Argentina, per lo studio degli sciame atmosferici prodotti da raggi cosmici di altissima energia. E si è concluso recentemente l'esperimento *Slim* a Chacaltaya, in Bolivia, per la ricerca di monopoli magnetici e particelle strane provenienti dall'Universo primordiale. In alta quota sono installati i grandi telescopi Cherenkov (Magic, Hess), i telescopi a muoni per la previsione del “tempo spaziale” (*space weather forecast*), e molti dei *neutron monitor* per il monitoraggio della variazione dell'intensità dei raggi cosmici legata all'attività solare.

Biografia
Alba Zanini è ricercatrice alla sezione Infn di Torino e si occupa degli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti, in campo medico e ambientale. Svolge ricerche in diversi laboratori di alta montagna, sui voli aerei ad alta quota e nelle missioni spaziali.

Link sul web
www.montagna.tv/cms/?cat=539

f.
I più importanti laboratori di alta quota in Europa e nel mondo.

A caccia di raggi cosmici nella Pampa

Una rete di rivelatori su un territorio grande più di trenta volte la città di Firenze.

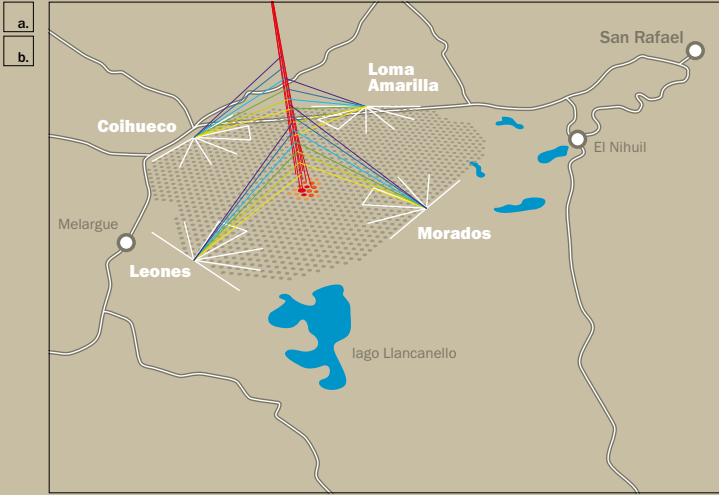
di Giorgio Matthiae e Francesca Scianitti

Malargüe, Argentina. Sull'altipiano Pampa Amarilla, a 1.400 metri di quota, migliaia di occhi sono in allerta. Osservano i raggi cosmici che inondano la Terra a energie anche mille volte più alte di quelle degli acceleratori più potenti del mondo, prodotti da eventi cosmici di proporzioni inimmaginabili. Il clima secco e temperato, il cielo libero, l'atmosfera rarefatta, l'inquinamento luminoso pressoché assente fanno di questo luogo a ridosso delle Ande un punto d'osservazione ideale. Distribuiti su 3.000 chilometri quadrati di terreno pianeggiante, gli occhi volti a cielo sono i rivelatori di Auger, il più grande osservatorio per raggi cosmici di altissima energia mai realizzato e il più imponente esperimento di fisica delle astroparticelle oggi esistente. Le particelle e i fotoni che bombardano ininterrottamente la Terra sono originati da fenomeni relativamente ordinari nel complesso degli avvenimenti cosmici. Ma ognuno di questi eventi, per noi invisibili e silenziosi, ha dimensioni colossali e libera enormi quantità di materia e di energia, di particelle e radiazione.

Le energie dei raggi cosmici possono variare moltissimo, raggiungendo anche valori superiori a centinaia di miliardi di miliardi di elettronvolt. I più energetici raggiungono l'atmosfera a velocità molto vicine alla velocità della luce, accelerati da meccanismi naturali di cui sappiamo ancora molto poco. E non sappiamo molto sull'origine dei raggi cosmici. A causa della carica elettrica, infatti, le particelle cosmiche sono soggette a numerose interazioni e deviazioni, dovute ai campi magnetici galattici ed extragalattici, che rendono difficile identificare il luogo che le ha generate. Queste deviazioni, tuttavia, sono importanti per i raggi cosmici di energia più bassa, ma

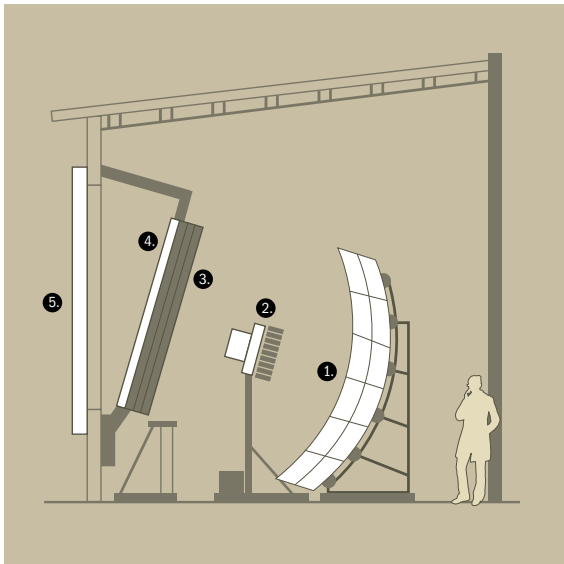
a.
Mappa del sito occupato da Auger, nella provincia argentina di Mendoza. Lo sciame cosmico che investe il territorio è visto dai rivelatori di superficie sottostanti e dai quattro telescopi a fluorescenza di Auger. Ogni telescopio registra la crescita e lo sviluppo dello sciame, fatto di miliardi di particelle secondarie.

b.
Uno dei 1.600 rivelatori di superficie di Auger, nella pampa argentina. Ogni rivelatore è dotato di antenna per la trasmissione dei dati ed è autoalimentato grazie alle batterie e ai pannelli solari.





c.



d.

hanno effetti più limitati sul percorso dei raggi cosmici di altissima energia. È quindi possibile, in questo secondo caso, risalire alla direzione di provenienza e ottenere preziose informazioni sulla sorgente che li ha emessi. In prossimità della superficie terrestre, le informazioni portate dai raggi cosmici sono mediate dall'intervento dell'atmosfera. I raggi cosmici primari, infatti, perdono buona parte della loro energia nell'interazione con i nuclei dell'atmosfera, dando luogo a nuove particelle in un processo a cascata che si propaga verso terra lungo traiettorie ramificate, a formare un vero e proprio *sciame* di raggi cosmici secondari. Una prolifica fase di ricerca sulle proprietà di questi fenomeni a cascata seguì, alla fine degli anni '20, la scoperta degli sciami atmosferici da parte del fisico francese Pierre Auger. Fu subito chiaro, infatti, che lo studio degli sciami secondari avrebbe permesso di risalire alle caratteristiche dei raggi cosmici primari di alta energia. I rivelatori estesi per sciami atmosferici, come quelli dell'esperimento Auger, rivelano particelle secondarie in numero proporzionale all'energia del raggio cosmico primario e i rari raggi cosmici di altissima energia sono in grado di produrre particelle secondarie in numero elevatissimo. L'osservatorio Auger è dedicato proprio allo studio dei raggi cosmici di altissima energia, al limite superiore dello spettro. Il sistema di rivelazione di Auger è di tipo "ibrido" perché comprende rivelatori di diversa natura. È costituito, infatti, dalla combinazione di rivelatori "di superficie" (figg. b, c, f) e di

telescopi a fluorescenza (figg. d, e). I primi, 1.600 taniche d'acqua a 1,5 chilometri l'una dall'altra, osservano il fronte dello sciame di raggi cosmici quando colpisce la superficie terrestre, rivelando e contando le particelle prodotte al livello del suolo. I 24 telescopi distribuiti intorno ai rivelatori di superficie, d'altra parte, raccolgono i lampi di luce di fluorescenza prodotti nell'aria dalle particelle cariche dello sciame, osservandone così lo sviluppo longitudinale, lungo la direzione di provenienza. I rivelatori di superficie devono il loro funzionamento al fenomeno fisico che si manifesta quando una particella carica attraversa un mezzo materiale – l'acqua, nel caso di Auger – a velocità sufficientemente alta. È l'effetto Cherenkov: un lampo di luce ultravioletta prodotto dal passaggio di particelle cariche nel liquido, a una velocità superiore a quella della luce nello stesso mezzo. La luce Cherenkov è dunque una sorta di "onda d'urto" che i rivelatori possono raccogliere grazie ai fotomoltiplicatori di cui sono dotati. Nel caso dei telescopi, invece, il mezzo usato per la rivelazione è l'atmosfera stessa, i cui atomi emettono luce ultravioletta al passaggio dello sciame, per un effetto di fluorescenza. Nell'attraversare l'atmosfera, infatti, le particelle cariche dello sciame eccitano le molecole di azoto che, tornando allo "stato fondamentale", emettono luce ultravioletta. Grazie a entrambi questi metodi di rivelazione i ricercatori possono ottenere le informazioni necessarie a ricostruire l'energia e la direzione con la quale i raggi

c. Rappresentazione artistica della rivelazione di uno sciame cosmico da parte dei rivelatori di superficie di Auger.

d. Schema di uno dei 24 telescopi di fluorescenza di Auger.

1. specchio sferico
2. fotocamera PMT
3. diaframma
4. filtro
5. otturatore

cosmici sono pervenuti fino alla Terra, con una precisione molto superiore rispetto a precedenti esperimenti. Questo consente di formulare ipotesi sulla natura delle sorgenti di raggi cosmici di alta energia e sui meccanismi con cui essi sono accelerati alle enormi energie con cui raggiungono l'atmosfera terrestre. In funzione già da diversi anni, Auger ha raggiunto il massimo potenziale operativo con tutta la rete di rivelatori attivi nell'autunno dello scorso anno. I primi risultati sono stati pubblicati nel 2007 e hanno permesso di ottenere preziose informazioni sulle proprietà delle particelle di altissima energia. In particolare, l'andamento del flusso dei raggi cosmici in funzione dell'energia mostra una "caviglia", cioè una variazione netta di andamento, in corrispondenza dell'energia di 4×10^{18} eV (vedi fg. h, p. 31). Questa struttura è probabilmente collegata al passaggio, a energie elevate, da particelle di origine galattica a particelle di origine extragalattica (fig. h). I ricercatori impegnati



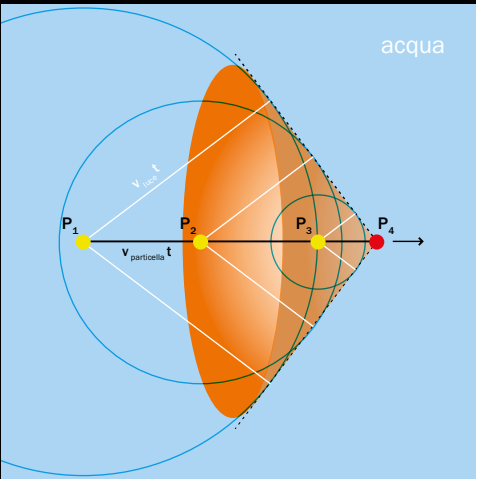
e.

e. Uno dei quattro edifici contenenti ciascuno 6 dei 24 telescopi a fluorescenza. I quattro edifici si trovano sul perimetro della zona occupata dall'intera rete di rivelatori di Auger.

[as] box

L'effetto Cherenkov

Nell'immagine di sinistra, un aereo supersonico crea al suo passaggio un cono d'aria condensata: l'effetto è dovuto all'onda d'urto generata dal moto dell'aereo in aria a una velocità superiore alla velocità del suono. Nella figura di destra è rappresentato l'effetto Cherenkov dovuto al passaggio di una particella carica in un mezzo materiale, come l'acqua, a una velocità superiore alla velocità della luce nello stesso mezzo. È mostrato in particolare l'istante t in cui

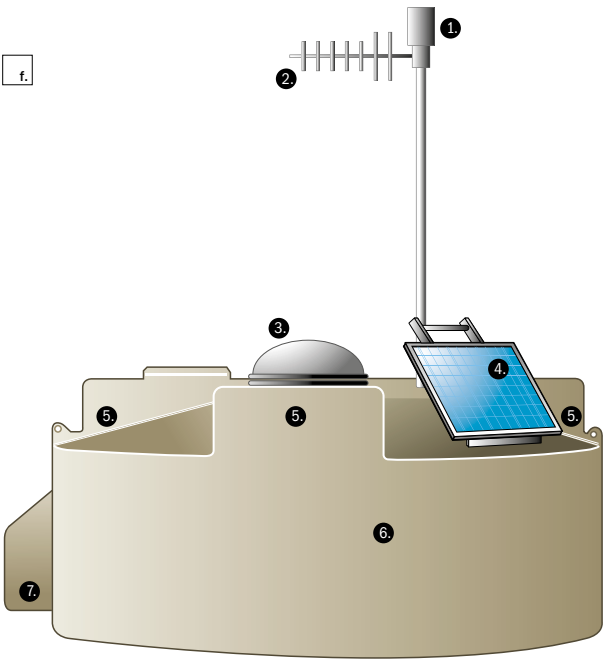


la particella si trova nella posizione P_4 . Il cono di luce che segue la particella è dovuto all'involuppo delle onde elettromagnetiche emesse ad ogni passo precedente: all'istante t i diversi fronti d'onda sferici si sovrappongono a formare un cono. L'apertura del cono Cherenkov dipende dalla velocità della particella e dall'indice di rifrazione dell'acqua, n (in un mezzo con indice di rifrazione n , infatti, la velocità della luce si riduce al valore c/n). I due fenomeni sono accumulati

dal fatto che l'aereo e la particella viaggiano a una velocità superiore a quella con cui si trasmette il segnale generato dal loro passaggio: l'onda sonora nel caso dell'aereo che rompe la barriera del suono, e l'onda elettromagnetica per la particella. "Superando" il segnale, l'aereo e la particella provocano un effetto d'urto che si manifesta in un caso, come una vera e propria onda d'urto, mentre nel caso della particella il moto provoca un flash ultravioletto, la luce Cherenkov.

in Auger hanno potuto inoltre confermare l'evidenza di un calo nel flusso dei raggi cosmici alle più alte energie. Questa diminuzione sembrerebbe consistente con l'idea che attraversando lo spazio extragalattico, i raggi cosmici interagiscano con i fotoni del fondo cosmico a microonde (Cmb, *Cosmic Microwave Background*) – la radiazione residua del Big Bang – perdendo parte della loro energia. L'interazione dei raggi cosmici con il fondo a microonde fu prevista teoricamente dallo scienziato americano Kenneth Greisen e dai sovietici Georgiy Zatsepin e Vadim Kuz'min, nel 1966, e si manifesta con un calo netto di flusso nella distribuzione energetica (*taglio Gzk*) per energie superiori a circa 4×10^{19} eV. Se dotati di energia sufficientemente elevata, infatti, i protoni possono interagire con i fotoni della radiazione cosmica di fondo, producendo pioni e perdendo quindi parte della loro energia iniziale. L'effetto Gzk pone così un limite all'energia massima dei raggi cosmici provenienti da altre galassie e osservabili sulla Terra. Se l'osservazione del taglio Gzk costituisce già di per sé un'indicazione del fatto che i raggi cosmici rivelati al limite dello spettro di energia sono di origine extragalattica, gli scienziati della

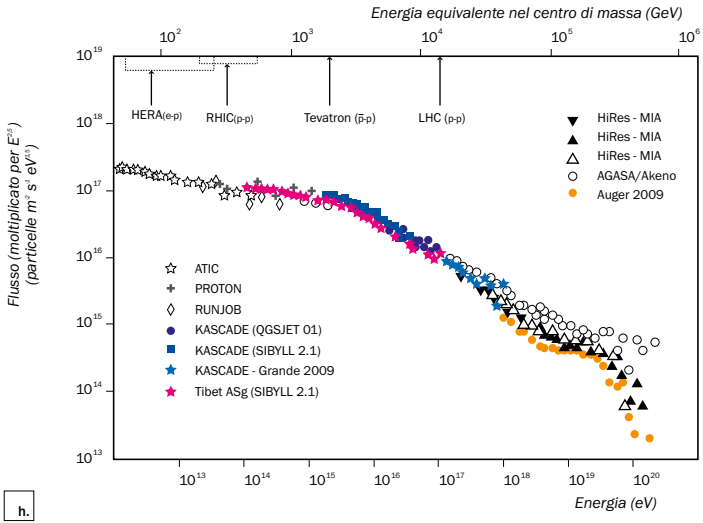
collaborazione Auger stanno ora cercando di identificare le sorgenti: le galassie, cioè, in cui queste particelle sono generate. Lo studio è eseguito confrontando le direzioni dei raggi cosmici misurate a terra con la posizione nella sfera celeste delle galassie riportate nei cataloghi oggi disponibili, in particolare con i cataloghi di galassie con nuclei attivi (Agn, *Active Galactic Nuclei*). Al loro centro, queste galassie mostrano una regione compatta caratterizzata da un'elevata emissione di radiazione, estesa su tutto lo spettro elettromagnetico, dalle onde radio ai più energetici raggi gamma. Si ritiene che il fenomeno sia dovuto al processo di accrescimento di un buco nero al centro della galassia, che inglobando materia produrrebbe intensi getti di radiazione elettromagnetica. A causa del taglio Gzk, i raggi cosmici che raggiungono la Terra a energie molto elevate non possono avere percorso distanze eccessive. Per questo, le possibili sorgenti di raggi cosmici di altissima energia possono essere individuate solo tra le galassie Agn più vicine, con distanze dell'ordine di circa 300 milioni di anni luce. Entro queste distanze la distribuzione spaziale della materia extragalattica, in particolare delle galassie Agn, è molto disomogenea.



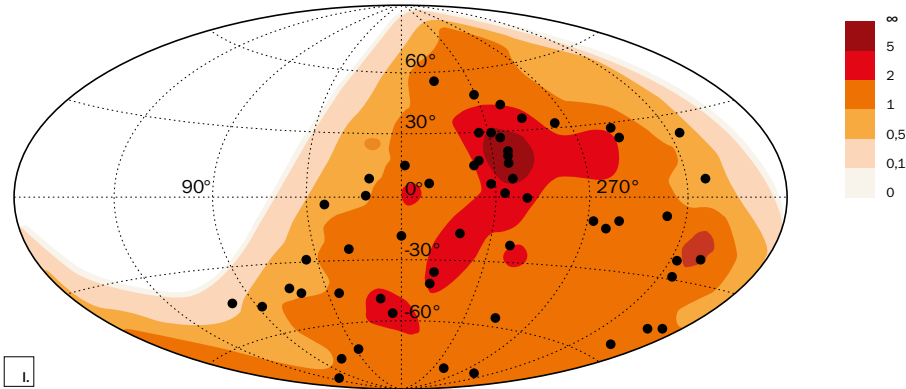
f. Uno dei rivelatori di superficie o *tank*. La tank è un contenitore di plastica riempito di acqua dove le particelle cariche dello sciame (elettroni, positroni e muoni) producono luce Cherenkov rivelata da tre fotomoltiplicatori (PMTs). L'analisi dei segnali è fatta in loco e i dati sono trasmessi via radio al sistema di acquisizione dell'Osservatorio. La sincronizzazione delle diverse tank avviene mediante il sistema Gps.

1. antenna Gps
2. antenna per la comunicazione
3. elettronica
4. pannello solare
5. fotomoltiplicatori
6. contenitore di plastica
7. batteria

g. L'Osservatorio Pierre Auger, a cui l'Argentina ha anche dedicato un francobollo, è stato progettato e realizzato da una vasta collaborazione internazionale che include più di 70 enti di ricerca da Argentina, Australia, Bolivia, Brasile, Repubblica ceca, Francia, Germania, Italia, Messico, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Slovenia, Spagna, Regno Unito, Usa e Vietnam.



h.



i.

La collaborazione Auger ha confrontato le direzioni osservate dei raggi cosmici di alta energia con la distribuzione delle galassie Agn emettitrici di raggi X, classificate in base ai dati del satellite Swift della Nasa – una collaborazione, alla quale partecipano anche Italia e Regno Unito, che studia l'origine dei *gamma ray burst* e l'Universo lontano (fig. I). Il catalogo Swift-Bat (*Burst Alert Telescope* di Swift) mostra una correlazione con gli eventi di alta energia di Auger, che sono difatti localizzati preferenzialmente nella regione della sfera celeste dove è presente una maggiore densità di galassie. A causa dello scarso numero di eventi osservati fino a oggi, questa osservazione non può essere conclusiva, ma dà una forte indicazione sulla provenienza dei raggi cosmici di alta energia da particolari tipi di galassie.

Biografia
Giorgio Matthiae è professore del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma Tor Vergata. Partecipa all'esperimento Auger dal 1998 e dal 2007 è responsabile internazionale della collaborazione.

Link sul web
www.auger.org
<http://auger-ed.Ings.infn.it/ED/>
www.phys.psu.edu/~coutu/Auger_Google_Earth.htm



i.

h. Flusso dei raggi cosmici primari, provenienti dallo spazio esterno alla Terra, in funzione dell'energia E. Nella regione ad alta energia sono rilevanti i dati dell'esperimento HiRes e quelli più recenti di Auger. È anche riportata per confronto l'energia ottenibile con gli acceleratori Lhc, al Cern, e Tevatron negli Stati Uniti, per le collisione tra protoni. Ad alta energia sono chiaramente visibili:
• una variazione della pendenza all'energia di circa 4×10^{18} eV, chiamata caviglia (*ankle*, in inglese);
• una forte riduzione dell'intensità per energie superiori a circa 4×10^{19} eV, chiamata taglio Gzk.

i. Si ritiene che tra le sorgenti più probabili di raggi cosmici di alta energia vi siano le galassie con nuclei attivi, regioni compatte al centro della galassia caratterizzate da un'elevata emissione di radiazione, dovuta con buona probabilità al processo di accrescimento di un buco nero.

i. Mappa del cielo in coordinate galattiche. I 58 eventi dell'Osservatorio Auger con energia superiore a $5,5 \times 10^{19}$ eV sono rappresentati con punti neri, mentre con diverse gradazioni dal giallo al rosso è rappresentata la densità di galassie Agn dal catalogo Swift-Bat, entro una distanza di circa 600 milioni di anni luce. Si nota una concentrazione di eventi nella zona ad alta densità di galassie (marrone scuro).



Cosmici e nuvole

Come i raggi cosmici possono influenzare l’atmosfera e il clima del nostro pianeta.

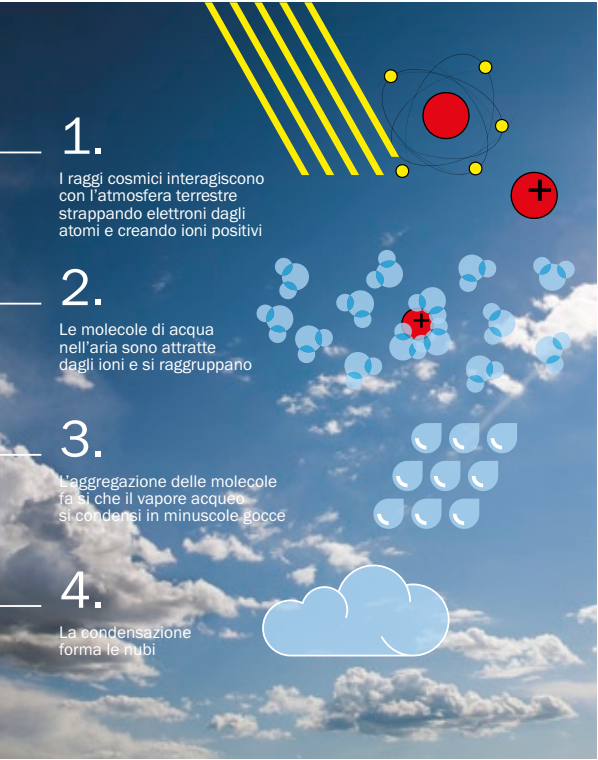
di Mauro Messerotti

Nel bilancio energetico della Terra e del suo clima, le nubi hanno un ruolo fondamentale. In particolare, si stima che in base alla tipologia delle nubi, dell’altezza e del loro contenuto di polveri e corpuscoli, o gocce disperse nell’aria (*aerosol*), la copertura nuvolosa possa determinare un raffreddamento, in termini di perdita di potenza energetica per unità di superficie, di 30 watt per metro quadrato. È certamente un valore importante se il fenomeno nuvoloso copre una porzione rilevante del globo e se è persistente nel tempo: una copertura nuvolosa su vasta scala potrebbe contribuire a un raffreddamento globale del nostro pianeta, così come la sua assenza potrebbe favorirne il riscaldamento. Il dibattito scientifico sull’argomento è ancora

aperto e lo è in modo particolare la valutazione dell’aspetto di scala spaziale del fenomeno nuvoloso, che potrebbe influire sul clima in misura limitata a livello regionale, ma considerevole a livello globale. Tenuto conto inoltre delle grandi scale di tempo che caratterizzano questi fenomeni, le osservazioni della Terra dallo spazio potranno contribuire ad avvalorare l’interpretazione corretta solo se di lunghissima durata e se correlate con gli altri parametri meteorologici. Uno studio sulla correlazione tra il flusso dei raggi cosmici e la copertura nuvolosa nei bassi strati dell’atmosfera terrestre è stato pubblicato nel 1997 dagli scienziati danesi Henrik Svensmark e Eigil Friis-Christensen e in seguito avvalorato da studi basati sui dati raccolti fino al 2005. Ma a che cosa sarebbe dovuta la correlazione? L’interpretazione di Svensmark e Friis-Christensen tiene conto del ruolo dei raggi cosmici nel favorire la formazione dei nuclei di condensazione da cui hanno origine le nubi. I raggi cosmici infatti, urtando le particelle dell’atmosfera, contribuirebbero ad aumentare il grado di ionizzazione degli strati atmosferici bassi e, in definitiva, la quantità di particelle cariche libere. Sarebbero proprio queste ultime a favorire l’addensarsi delle nubi, favorendo la formazione di nuclei di condensazione. Gli esiti di queste ricerche hanno suscitato diverse critiche inerenti da un lato il metodo di trattamento dei dati, dall’altro la microfisica della formazione delle nubi, mettendo così in dubbio il possibile ruolo dei raggi cosmici nella formazione degli addensamenti nuvolosi. D’altra parte, studi paleoclimatici, come quello pubblicato nel 2001 sulla rivista *Science* da Gerard Bond e i suoi collaboratori, mostrano una correlazione simile addirittura negli ultimi 10 mila anni. Per tutto questo arco di tempo, infatti, aumenti del flusso di raggi cosmici coincidono con periodi di raffreddamento del globo, e viceversa. Questi studi tengono conto del fatto che nell’interazione dei raggi cosmici con le diverse specie atomiche presenti nell’atmosfera terrestre sono prodotti numerosi nuclei radioattivi (*radioisotopi cosmogenici*). La ricostruzione del paleoclima si ottiene studiando la variazione temporale delle quantità di questi nuclei nell’atmosfera in correlazione con gli indicatori della temperatura del globo. Ad esempio, la quantità di ossigeno 18 (¹⁸O) nel guscio calcareo di conchiglie risalenti al periodo Fanerozoico (il cui inizio risale a 545 milioni di anni fa) dipende dalla temperatura del mare. Anche il carbonio 14 (¹⁴C) e il berillio 10 (¹⁰Be) presenti negli anelli degli alberi, nei sedimenti e nei ghiacci, forniscono un’indicazione sul flusso dei raggi cosmici nel passato, in quanto generati nell’interazione dei raggi cosmici con l’atmosfera. Il carbonio 14, in particolare, è dovuto alla cattura da parte di un nucleo di azoto di uno dei neutroni prodotti in atmosfera dai raggi cosmici (¹⁴N + n → p + ¹⁴C) e la sua quantità si riduce della metà in circa 5.730 anni (tempo di dimezzamento). Il berillio 10, invece, è prodotto dalla frammentazione di ossigeno e azoto atmosferici da parte dei raggi cosmici e il suo tempo di dimezzamento è di circa 1,5 milioni di anni. L’evidenza di questi studi impone dunque di verificare l’effettiva influenza dei raggi cosmici sulla formazione delle nubi. A questo scopo sono stati concepiti gli esperimenti Cloud (*Cosmics Leaving Outdoor Droplets*), diretto da James Kirkby al Cern di Ginevra, e Sky (“nuvola” in lingua danese), diretto da Svensmark all’Istituto Nazionale dello Spazio a Copenhagen. Cloud inizierà a operare nel 2010 e consentirà di studiare gli effetti di fasci di particelle accelerate in un ambiente simile a

a. Interagendo con i nuclei dell’atmosfera terrestre, i raggi cosmici di alta energia danno luogo alla formazione di nuove particelle. Il processo di moltiplicazione a cascata si manifesta in forma di veri e propri sciami di particelle secondarie che inondano ininterrottamente la superficie terrestre.



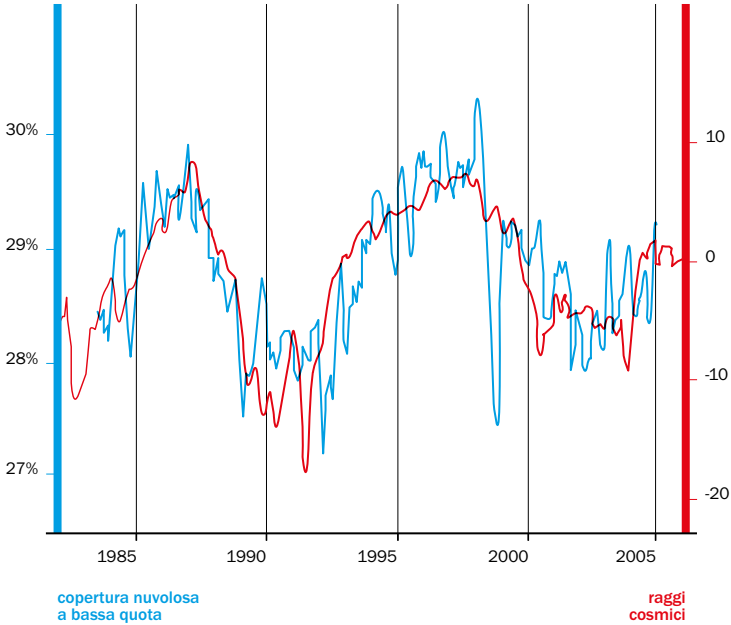


b.

quello degli strati alti dell'atmosfera. I primi risultati di Sky, invece, mostrano che cosa accade in un ambiente simile a quello dei bassi strati atmosferici: in queste condizioni, i raggi cosmici naturali (per lo più muoni), decadono determinando la produzione di elettroni, i quali favoriscono la formazione di aggregati molecolari. Sarebbero proprio questi i nuclei di condensazione delle nubi. Ma vi è un altro aspetto di cui è necessario tenere conto. Il flusso dei raggi cosmici dipende dall'attività del Sole e la quantità di raggi cosmici che raggiungono la Terra è modulato su scala di tempo decennale: quando il Sole è attivo, l'effetto del vento solare, denso e veloce, costituisce uno schermo efficace contro i raggi cosmici, il cui flusso quindi diminuisce. Per la ragione inversa, quando l'attività solare è bassa il flusso aumenta. Su scale di tempo dei milioni di anni, invece, il flusso è modulato dalla posizione del Sole nella Galassia: quando il Sole si trova in una regione povera di supernovae – le sorgenti più prolifiche di queste particelle – si ha un minor flusso di raggi cosmici e viceversa. Quindi, nella meteorologia dei raggi cosmici anche il Sole e il suo moto nella Galassia assumono un ruolo determinante, che viene studiato negli ambiti della meteorologia dello spazio e della cosmoclimatologia. Le complesse interazioni tra meteorologia dello spazio e meteorologia terrestre costituiscono un campo di indagine ancora da esplorare, nel quale il ruolo dei raggi cosmici rappresenta un test sperimentale di enorme importanza.

Biografia
Mauro Messerotti è ricercatore all'Inaf-Osservatorio Astronomico di Trieste, docente al Dipartimento di Fisica dell'Università di Trieste e associato alla Sezione di Trieste dell'Infn. Si occupa di radiofisica solare, con particolare riguardo alle interferenze radio sui sistemi Gps, e di meteorologia eliosferica.

Link sul web
<http://www.spacecenter.dk/research/sun-climate>
http://www.space.dtu.dk/English/Research/Research_divisions/Sun_Climat/Experiments_SC/SKY.aspx
<http://cloud.web.cern.ch/cloud>
<http://ulisse.sissa.it/chiediAulisse/domanda/2008/Ucau081002d001>



c.

b.
Rappresentazione del processo di formazione delle nubi in base all'interpretazione di Svensmark e Friis-Christensen. I raggi cosmici, urtando le particelle dell'atmosfera, contribuirebbero ad aumentare il grado di ionizzazione degli strati atmosferici bassi favorendo l'addensarsi delle nubi.

c.
I risultati del progetto Isppc (*International Satellite Cloud Climatology Project*), il primo progetto satellitare di climatologia delle nubi a livello mondiale, nell'ambito del programma mondiale di ricerca sul clima (*Wcrp*). Isppc raccoglie dati dal 1983 e continuerà fino a giugno 2010. Nel grafico è rappresentato il confronto tra l'oscillazione annua della copertura nuvolosa mondiale negli strati bassi dell'atmosfera e l'oscillazione annua del flusso di raggi cosmici sulla Terra. La corrispondenza tra i due andamenti sembra confermare l'esistenza di una correlazione tra i due fenomeni.

L'inafferrabile neutrino

I leggerissimi messaggeri dall'Universo violento.

di Piera Sapienza

Elusivi, camaleontici, i neutrini possono attraversare tutto l'Universo senza essere deflessi né assorbiti, e fornire così informazioni sui luoghi più estremi del cosmo. Ipotizzati da Wolfgang Pauli nel 1930 per risolvere il problema dell'energia mancante nel decadimento beta nei nuclei, i neutrini, privi di carica, interagiscono così debolmente con la materia che lo stesso Pauli dubitava che potessero essere mai rivelati. Il neutrino fu invece scoperto da Frederick Reines e Clyde Cowan nel 1956, utilizzando un reattore nucleare come sorgente. Negli anni '60 Raymond Davis e John Bahcall effettuarono un esperimento per "vedere" l'interno del Sole tramite i neutrini e verificare in modo diretto l'ipotesi della generazione di energia nucleare nelle stelle. Il flusso di neutrini rivelati risultò però molto più basso di quanto previsto. Per un paio di decenni centinaia di fisici, chimici e astronomi cercarono di risolvere il mistero. La teoria e l'esperimento sembravano corretti e il deficit di neutrini solari fu successivamente confermato da esperimenti in Russia, Italia e Giappone. L'idea che il mistero dei neutrini mancanti fosse dovuto alla fisica delle particelle piuttosto che al modello solare standard fu proposta da Bruno Pontecorvo già nel 1969. Pontecorvo sosteneva che i neutrini "soffrono" di una sorta di "disturbo di personalità multipla" che li fa oscillare tra diversi stati o tipi e che quindi, durante il viaggio dal Sole alla Terra, i neutrini oscillano da un tipo a un altro. L'oscillazione tra i diversi tipi comporta inoltre che

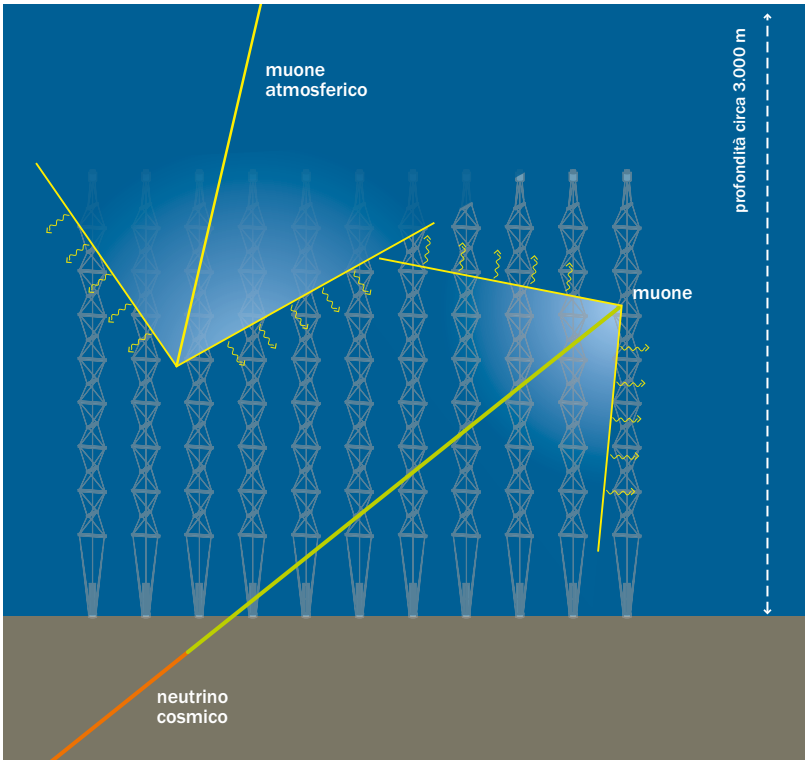
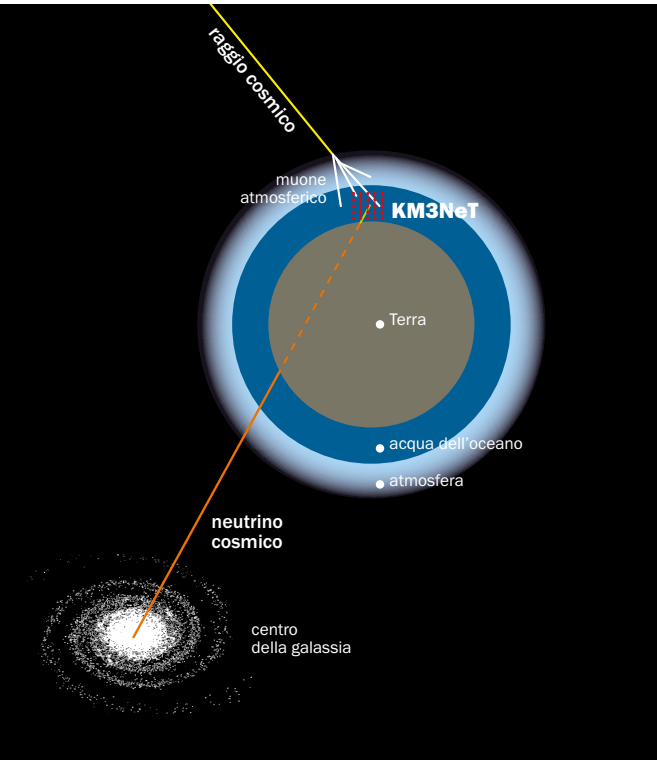
a.

b.



a.
Raymond Davis (a sinistra) e John Bahcall nella miniera di oro Homestake a Lead nel Sud Dakota, dove era allestito l'esperimento per lo studio dei neutrini solari. Davis mostra a Bahcall la nuova tanica in acciaio che conteneva la grande quantità di liquido (40 mila litri) usato per catturare i neutrini.

b.
Il nucleo della galassia Centaurus A. I centri delle galassie sono sorgenti di particelle cosmiche e radiazione di altissima energia



c.

i neutrini abbiano una massa diversa da zero. Poiché gli esperimenti rivelavano i neutrini elettronici (quelli prodotti nel Sole), i neutrini che arrivano a terra come neutrini di altro tipo (muonici) non erano contati: in questo modo il flusso osservato era inferiore a quello previsto. C'era una mancanza di neutrini. I neutrini sono anche prodotti nelle collisioni tra i raggi cosmici e le particelle dell'atmosfera terrestre. Nel 1998 un gruppo giapponese annunciò di aver osservato le oscillazioni dei neutrini atmosferici. Le oscillazioni di neutrino furono così confermate e ora sappiamo che i neutrini hanno una massa, sia pur piccolissima. Lo studio delle reazioni nucleari che avvengono nel Sole tramite i neutrini solari continua ancora: in Italia, ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn con il rivelatore Borexino. Il 23 febbraio 1987 i rivelatori di neutrini Kamiokande, Imb e Baksan registrarono una ventina di eventi in coincidenza temporale con l'esplosione della supernova SN1987A che seguì al collasso gravitazionale di una supergigante blu nella Nube di Magellano, una galassia distante circa 168 mila anni luce. Malgrado l'esiguo numero di eventi, la rivelazione dei neutrini dalla SN1987A è stata di estrema importanza per la verifica dei modelli che descrivono i

collassi gravitazionali nelle supernovae. La prossima frontiera è la rivelazione dei neutrini di alta energia (cioè con energia maggiore di 1 TeV), messaggeri dell'Universo "violento" in cui stelle massicce accrescono buchi neri, lampi di luce gamma brillano per brevi istanti con intensità pari a miliardi di miliardi di soli, Nuclei Galattici Attivi (Agn) emettono enormi quantità di energia. In questi "oggetti" astrofisici si verificano le condizioni per accelerare particelle fino a energie elevatissime. Attraverso la rivelazione dei neutrini è possibile individuare i più potenti acceleratori cosmici (galattici ed extra-galattici) e svelare il mistero dell'origine dei raggi cosmici. I neutrini prodotti dall'interazione dei protoni accelerati nelle sorgenti astrofisiche con altri protoni o radiazione gamma attraversano imperturbati regioni dense e caldissime come l'interno delle sorgenti astrofisiche e possono giungere fino a noi dagli estremi limiti dell'Universo senza essere deflessi (come i protoni) o assorbiti (come i raggi gamma di alta energia e i protoni più energetici). Ma, se per osservare i neutrini provenienti dal Sole sono necessari rivelatori di alcune migliaia di tonnellate, installati in laboratori sotterranei dove la roccia sovrastante garantisce quel "silenzio cosmico" che permette di identificare i rari eventi dovuti

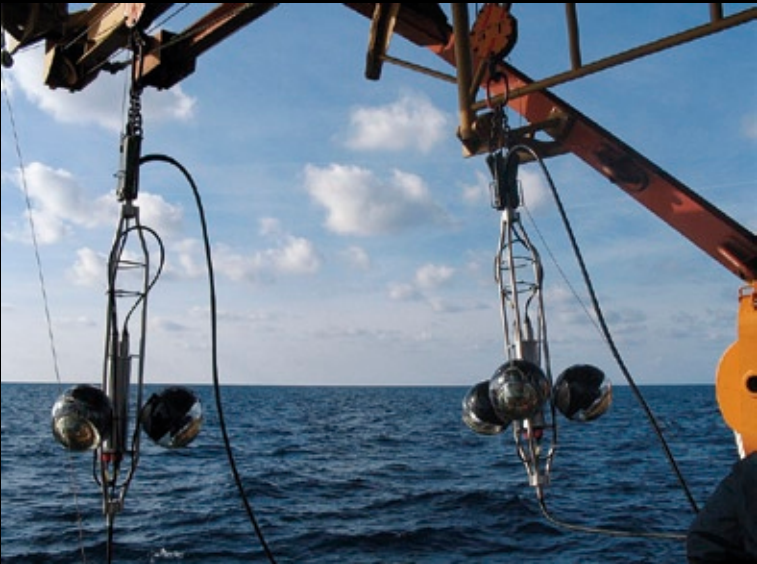
c.
A sinistra, rappresentazione dei neutrini provenienti dal centro della Galassia che, dopo aver attraversato la Terra, arrivano sul fondo del Mar Mediterraneo. A destra, schema del passaggio dei muoni (prodotti dai neutrini quando interagiscono con la materia) attraverso le torri del rivelatore Nemo. I fotomoltiplicatori collocati sulle torri raccolgono la luce Cherenkov, prodotta dai muoni.

a neutrini, per allargare il nostro orizzonte di osservazione a sorgenti cosmiche di neutrini di alta energia sono necessari volumi di rivelatore dell'ordine del chilometro cubo. L'unica soluzione percorribile è quella di utilizzare le profondità marine o gli spessi ghiacci dell'Antartide che hanno una triplice funzione: *schermo* dalla pioggia di particelle cariche che colpisce continuamente la Terra, *bersaglio* per la "conversione" del neutrino in particella carica (il muone) e da *radiatore* che al passaggio del muone nell'acqua o nel ghiaccio emette luce direzionale che viene rivelata da sensori ottici. I sensori ottici, installati su alcune centinaia di strutture meccaniche alte diverse centinaia di metri e distanziate 100-200 metri, "registrano" i tempi di arrivo e l'intensità della luce raccolta permettendo così di risalire alla direzione di provenienza e all'energia del neutrino. I telescopi per neutrini, installati a circa 3.000 metri di profondità, guardano il cielo a testa in giù selezionando le tracce che raggiungono il rivelatore dall'emisfero celeste opposto e usando tutta la Terra come filtro, solo i neutrini, infatti, possono attraversarla senza essere assorbiti. Per osservare l'intero cielo sono necessari due telescopi di neutrini in emisferi opposti. Nei ghiacci dell'Antartide *IceCube*, un telescopio da un chilometro cubo (km³) che osserva l'emisfero Nord, è già in avanzata fase di costruzione. Un telescopio installato nel Mediterraneo invece, grazie alla rotazione della Terra, osserverebbe l'87% del cielo, compreso il centro galattico e una frazione importante del piano galattico in cui sono state individuate numerose sorgenti candidate come sorgenti di neutrini di alta energia. In particolare, l'osservazione di neutrini da resti di supernova consentirebbe di risolvere l'enigma dell'origine dei raggi cosmici, almeno per quanto riguarda i raggi cosmici galattici. La costruzione di un telescopio per neutrini delle dimensioni di circa un chilometro cubo ad alta profondità nel Mediterraneo pone molte

sfide tecnologiche a causa delle condizioni ambientali estreme: corrosione, pressioni elevatissime (sino a 350 volte la pressione atmosferica), limitata accessibilità. Nemo, un esperimento dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare a cui partecipano circa 80 ricercatori italiani, progetta, realizza ed effettua test di prototipi degli elementi chiave per il telescopio km³. Insieme alle collaborazioni Antares e *Nestor*, anch'esse operanti nel Mediterraneo nell'ambito dei telescopi per neutrini, Nemo partecipa al consorzio KM3NeT, formato da ricercatori provenienti da 10 nazioni europee e cofinanziato dall'Unione Europea con l'obiettivo di definire l'architettura e le tecnologie per la costruzione di un telescopio di dimensioni dell'ordine di un chilometro cubo nel Mar Mediterraneo. Nell'ambito del progetto sono state anche effettuate più di 30 campagne a mare per la caratterizzazione del sito ideale per l'installazione dell'esperimento, individuando i fondali marini di Capo Passero (3.500 m di profondità, a 80 km dalla costa siciliana), come uno dei migliori siti per l'installazione dell'esperimento km³. Nell'ultima decina di anni l'astronomia con neutrini ha compiuto notevoli progressi grazie a IceCube che è in costruzione e allo sviluppo di tecnologie ormai mature per l'avvio della costruzione del telescopio km³ nel Mediterraneo. L'astronomia per neutrini nasce per rispondere a domande cruciali quali l'origine dei raggi cosmici e lo studio degli ambienti astrofisici più estremi, in cui particelle sono accelerate fino a energie milioni di volte più elevate delle energie raggiungibili con il Large Hadron Collider del Cern. I telescopi per neutrini di alta energia sono strumenti di scoperta che apriranno una nuova finestra osservativa sull'Universo. È quindi molto probabile che guardando il cosmo con nuovi "occhi", come è spesso avvenuto in passato, si scoprano fenomeni inattesi.

Biografia Piera Sapienza è ricercatrice e responsabile dell'esperimento Nemo presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn. Partecipa inoltre all'esperimento Antares e al progetto europeo KM3NeT.	Link sul web http://www.sns.ias.edu/~jnb/ http://www.lns.infn.it www.icecube.wisc.edu http://nemoweb.lns.infn.it
---	--

A pesca di neutrini. Antares, il primo telescopio sottomarino



1. Installazione di una delle linee dell'apparato.

1.

Strane creature popolano gli abissi marini. Piovre e altri animali giganti, mostri inattesi e spaventosi per lungo tempo hanno animato l'immaginazione dei marinai di tutto il mondo. Da poco più di un anno, tuttavia, sul fondo del Mar Mediterraneo è in attività una nuova creatura stanziale, di forma e dimensioni che qualcuno potrebbe trovare mostruose, sicuramente inedite: non è un organismo vivente ma un prodotto della tecnologia più avanzata tale da permetterle di operare nelle condizioni estreme in cui si trova (a pressioni elevatissime e in ambiente altamente corrosivo qual è quello dell'acqua salata), per di più con limitatissime possibilità di interventi di manutenzione. Si tratta indubbiamente di un'impresa un po' fuori del comune, anche per il fatto che lo scopo è quello di cercare le particelle più elusive che si conoscano: i neutrini. E non neutrini qualsiasi, ma quelli che ci si aspetta vengano emessi nei fenomeni più violenti e spesso più lontani nell'Universo. Non per niente l'apparato porta il nome di una stella: Antares, la gigante rossa nella costellazione dello Scorpione. Antares è in realtà l'acronimo di Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch, il che chiarisce anche la natura interdisciplinare di questa iniziativa che, se da un lato si propone di aprire una nuova finestra osservativa sull'Universo, dall'altro si offre come una piattaforma unica per osservazioni continue e in tempo reale delle profondità marine.

L'apparato Antares si trova a una profondità di circa 2.500 metri e a una distanza di circa 40 chilometri al largo della costa di Tolone in Francia. Il suo principio di funzionamento si basa sulla rivelazione della cosiddetta luce Cherenkov, cioè i deboli segnali luminosi emessi in un mezzo trasparente

da particelle cariche molto veloci. Ecco che quindi l'acqua diventa insieme uno schermo per fermare le particelle indesiderate (per questo occorre andare a grande profondità) e lo stesso mezzo di rivelazione in cui installare dei sensori di luce ultrasensibili, i fotomoltiplicatori. Antares consiste in un reticolo di 900 fotomoltiplicatori installati su 12 linee semiflessibili, alte fino a 450 metri e disposte su una superficie dell'ordine di 0,1 km². Le linee sono zavorrate sul fondo e mantenute in posizione pressoché verticale da una boa posta alla sommità. Un sistema di triangolazioni acustiche permette di determinare istante per istante la posizione dei singoli fotomoltiplicatori, anche se le linee dovessero ondeggiare sotto l'azione delle correnti. L'installazione di queste strutture richiede l'uso di una nave dotata di posizionamento dinamico, e avviene con una procedura ormai ben collaudata. Per le connessioni sottomarine è necessario raggiungere l'apparato con un sottomarino pilotato o teleguidato (il Remotely Operated Vehicle o Rov).

La costruzione di questo gigante ha visto impegnata in uno sforzo più che decennale una collaborazione che conta oggi più di 150 persone, tra scienziati, ingegneri e tecnici provenienti da poco meno di trenta sedi in Francia, Germania, Italia, Olanda, Romania, Russia e Spagna. Sono numeri da record e in effetti l'apparato ne detiene più di uno: è il più grande apparato in presa-dati nell'emisfero boreale ed è il primo telescopio per neutrini sottomarino mai costruito al mondo, visto che in precedenza apparati simili erano stati installati solo in fondo al lago siberiano Baikal o sotto il ghiaccio dell'Antartide.

I primi risultati di Antares sono stati pubblicati nei mesi

scorsi, e vanno a migliorare i limiti esistenti sui flussi di neutrini provenienti da un certo numero di oggetti celesti nel cielo australe. Se da un lato si festeggia il successo dell'esperimento e si spera nella grande scoperta, dall'altro il completamento dell'apparato mostra che la tecnologia è ormai matura per concepire imprese ancora più ambiziose, come l'installazione di un rivelatore con volume sensibile dell'ordine del chilometro cubo. È quanto propone da tempo la collaborazione Nemo (NEutrino Mediterranean Observatory), impegnata in un lungo programma di caratterizzazione del sito ottimale per l'installazione (a 3.500 m di profondità e a 100 km dalla costa siciliana) e di sviluppo delle tecniche per la realizzazione di un apparato di questa grandezza. Ed è anche quanto si spera che il consorzio KM3NeT, cofinanziato dall'Unione Europea, permetterà di fare. Come per Antares, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è pronto a cogliere la sfida. Ma chi ha più paura degli abissi marini? [Marco Circella]

Biografia

Marco Circella, ricercatore Infn alla Sezione di Bari, è impegnato in diversi progetti per la neutrino-astronomia nel Mediterraneo, collaborando ad Antares, Nemo e KM3NeT. Dal 2008 è coordinatore tecnico della collaborazione Antares.

Link sul web

<http://antares.in2p3.fr>

<http://www.km3net.org>

Il cielo inquieto

Il volto gamma del nostro Universo.

di Francesco Longo



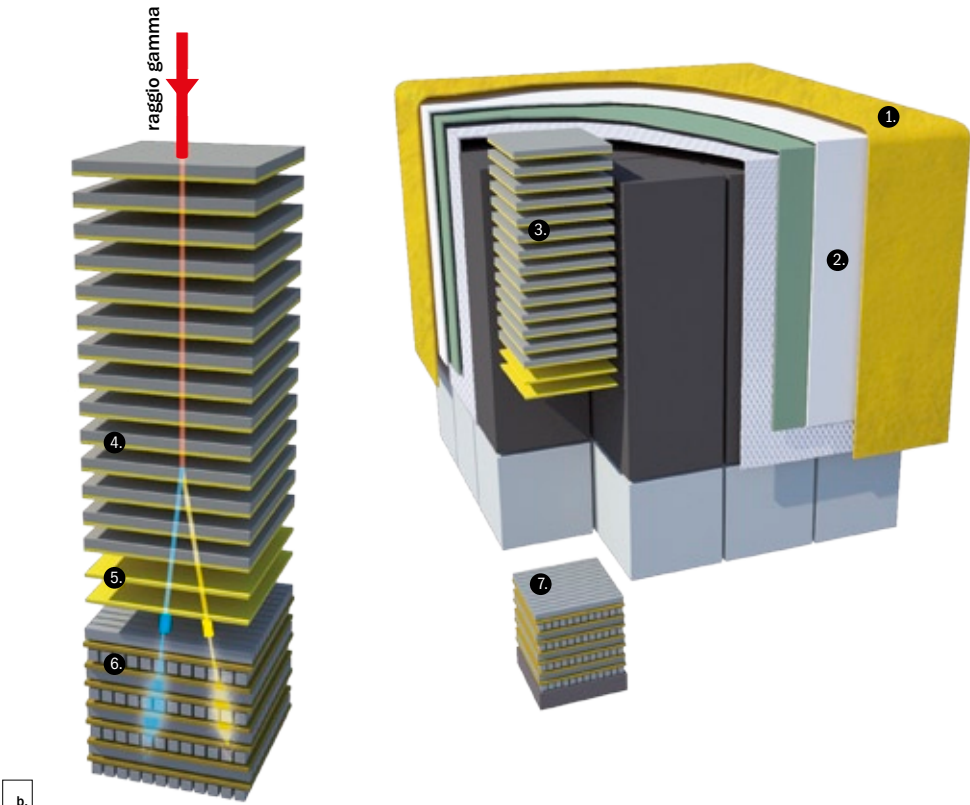
a.

Agli albori della fisica delle particelle e sino agli anni '50, i fisici erano impegnati ad analizzare la radiazione cosmica. Arrivarono presto i primi risultati e le prime scoperte scientifiche. Lo studio delle particelle elementari prese le sembianze di una vera e propria impresa su cui investire fondi, risorse umane e soprattutto tempo. Nella stretta connessione tra la fisica fondamentale e la realizzazione delle macchine acceleratrici, il successo non si fece attendere. Tuttavia le limitazioni sperimentali nella realizzazione di acceleratori di particelle a energie sempre più elevate, ha reso di nuovo attuale lo studio dei raggi cosmici. Alle altissime energie, l'astrofisica particellare è pronta a raccogliere il testimone della fisica delle particelle.

Per proseguire in questa impresa, alcune domande sono cruciali. Quali sono le macchine acceleratrici che la natura utilizza per produrre particelle di così elevata energia? Da quali regioni dell'Universo essi provengono? Quale il meccanismo fisico con cui le sorgenti celesti sono in grado di accelerare tale radiazione? Dove puntare gli strumenti osservativi in volo e da terra? Una diretta conseguenza dei meccanismi di accelerazione all'opera in tali sorgenti è la generazione di radiazione elettromagnetica alle alte energie, nella frequenza X e gamma (fino a 100 GeV cioè miliardi di elettronVolt). La radiazione a queste frequenze è rivelabile solo grazie a osservazioni da parte di esperimenti satellitari. E spesso il successo di queste missioni è dovuto anche all'uso di rivelatori e tecnologie che hanno messo a frutto l'esperienza nata con la fisica delle particelle. Molte sono attualmente le missioni che si occupano dello studio degli acceleratori cosmici. Nella banda dei raggi X, ad esempio, il telescopio satellitare della Nasa, Swift è dedicato all'osservazione dei lampi di raggi gamma, o gamma ray burst (Grb): fenomeno enigmatico e molto sfuggente, forse il segnale della nascita di un buco nero dalla morte di una stella massiva oppure l'evento finale della fusione di due stelle di neutroni. L'asso nella manica di questo satellite è la rapidità di puntamento: dopo aver rilevato il segnale in banda gamma, localizza in tempi molto rapidi il Grb e si ripunta autonomamente nella direzione della sorgente, osservandola in banda X e nell'ottico.

Il satellite Agile dell'Agenzia Spaziale Italiana, lanciato nell'aprile del 2007, cui partecipano fisici e astrofisici dell'Infn e dell'Inaf, è dotato anche di uno strumento in grado di osservare la radiazione X da circa ventimila elettronVolt (20 keV) sino a sessantamila elettroVolt (60 keV). Esso permette di localizzare in modo preciso i Grb e le sorgenti celesti, spesso variabili, che emettono in banda X. La localizzazione degli eventi transienti è spesso l'informazione cruciale per determinarne la natura e l'origine. È solo grazie a questa informazione che i telescopi in altre bande possono osservare il cielo nella direzione indicata e vedere le sorgenti celesti rivelate dai satelliti. È stato questo, una

a. Il lancio del satellite dell'esperimento Fermi dal Kennedy Space Center di Cape Canaveral, nel giugno del 2008.



b.

decina di anni fa, il passo decisivo nella determinazione dell’origine dei Grb. Il satellite italo-olandese *BeppoSax*, intitolato al grande fisico italiano Giuseppe Occhialini (detto Beppo), è stato in grado infatti di localizzare già nel 1997 la controparte X di un Grb permettendo ai telescopi ottici di determinarne la distanza. Nonostante questo, dopo quarant’anni di indagini e supposizioni sui gamma ray burst, le domande aperte sono tuttavia ancora molte. Alcune di queste riguardano l’emissione ad alta energia. Il 10 maggio del 2009, uno stesso Grb, ad esempio, è stato osservato per la prima volta da Agile e Fermi, entrambi i satelliti in banda gamma realizzati con il contributo fondamentale dei fisici dell’Infn. Questo Grb è stato forse prodotto dalle particelle accelerate dalle instabilità di getti di plasma di elettroni e positroni in moto a velocità prossime a quella della luce. All’opera vi è probabilmente la versione relativistica del meccanismo proposto da Fermi, per spiegare come una particella elementare viene accelerata dall’interazione con un’onda d’urto massiva in moto: esattamente quello che succede nelle principali sorgenti astrofisiche sotto indagine dai satelliti gamma. E nel nome dato al telescopio Fermi si vuole proprio riconoscere al grande fisico l’importanza della teoria che formulò nel 1949 per individuare un meccanismo in grado di accelerare le particelle elementari nelle sorgenti cosmiche. Entrambi i satelliti in grado di osservare radiazione gamma, Agile e Fermi, sono strumenti basati sul meccanismo di rivelazione di fotoni per mezzo della produzione di coppie elettrone-antielettrone. Il fotone, che deve arrivare con energia superiore alla decina di MeV, interagisce con gli strati di materiale a elevato numero atomico e produce una coppia elettrone/positrone, di cui si ricostruisce la traccia con un tracciatore al silicio e si stima l’energia con un calorimetro elettromagnetico (fig. b). I due telescopi sono interessati anche ad altri oggetti celesti contraddistinti da emissione in banda gamma. Si tratta, per esempio, dei nuclei galattici attivi, che ospitano al loro interno un buco nero caratterizzato da una massa pari a miliardi di volte quella solare. Anche la Via Lattea in banda gamma è una ricca fonte di informazioni. Si sono già osservati un sistema binario, alcuni resti di supernova, possibili sorgenti di raggi cosmici, e molte pulsar (stelle di neutroni, in rapida rotazione attorno al proprio asse, immerse in un elevato campo magnetico), di cui alcune sono state scoperte solo grazie alla loro emissione gamma. Sono invece le interazioni dei raggi cosmici a produrre i raggi gamma provenienti dal Sole, dall’atmosfera terrestre e dalla stessa Via Lattea. Lo stesso meccanismo è certamente all’opera anche in altre galassie. In particolare per la

- b.
- Schema del Lat, *Large Area Telescope*, il rivelatore di raggi gamma di alta energia, collocato a bordo del satellite Fermi.
- 1. Scudo termico**
Riveste l’intera struttura e costituisce la coperta termica e lo scudo di protezione dalle micrometeoriti che potrebbero colpire e danneggiare lo strumento.
- 2. Rivelatori di anticoincidenza**
Uno strato di rivelatori a scintillazione segnala l’ingresso di particelle cariche e le distingue dai raggi gamma.
- 3. Tracciatore**
È un apparato in grado di ricostruire con grande precisione la traiettoria delle particelle cariche. È costituito da strati alternati di tungsteno e di rivelatori al silicio.
- 4. Lastra di tungsteno**
All’interno un raggio gamma di energia superiore a un milione di elettronvolt crea due particelle, un elettrone e un antielettrone.
- 5. Rivelatori di silicio**
Determinano la traiettoria delle due particelle prodotte dall’interazione del fotone con la lastra di tungsteno.
- 6. Calorimetro elettromagnetico**
Misura l’energia depositata dalle due particelle, elettrone e antielettrone.
- 7. Barre di scintillatore**
All’interno di 8 strati di barrette di ioduro di cesio, ad orientamento alternato, elettrone ed anti-elettrone producono due sciami elettromagnetici, con emissione di luce di scintillazione, misurando la quale si risale all’energia delle due particelle.
- Le misure di energia dell’elettrone e dell’antielettrone, assieme alle loro traiettorie misurate dal tracciatore, permettono di ricavare l’energia e la direzione del raggio gamma incidente.



c.

- c.
- La coppia di telescopi per raggi gamma Magic I e Magic II, installati sull’isola La Palma nell’arcipelago delle Canarie.

prima volta è stato possibile distinguere in modo preciso una sorgente di raggi gamma all’interno di una galassia che non sia la Via Lattea. È il caso della sorgente rivelata da Fermi nella Grande Nube di Magellano. Essa è coincidente con una zona di alta formazione stellare dove si pensa siano presenti molte stelle massive, diversi resti di supernova e pertanto un alto tasso di formazione di raggi cosmici. Ora l’attesa si fa trepidante. È previsto infatti che il prossimo massimo di attività solare, nel 2012, sia accompagnato da un certo numero di brillamenti solari, di cui si conosce ancora poco in banda gamma. Nel prossimo futuro si spera inoltre di riuscire a percepire il segnale gamma dovuto all’annichilazione della materia oscura come previsto da diversi modelli teorici. Gli strumenti su satellite non sono però in grado di rivelare il debole flusso di raggi gamma di energia superiore a diverse centinaia di GeV. A queste energie i raggi gamma interagiscono con l’atmosfera e sciamano producendo particelle secondarie di velocità maggiori di quella della luce nell’aria, i cui effetti sono osservabili da parte di opportuni telescopi, come Magic. I suoi specchi e la sofisticata elettronica

di lettura, messi a punto con il contributo decisivo dei fisici dell’Infn, consentono di vedere il segnale ottico di pochi nanosecondi che tali particelle causano, detto luce Cherenkov. La grande area degli specchi fa di Magic il telescopio gamma da terra dotato della soglia di rivelazione più bassa in energia (attualmente attorno a 50 GeV). Dalla scorsa primavera è dotato di un telescopio gemello. Grazie a Magic II, gli sciami elettromagnetici verranno osservati in stereo. Questa possibilità aumenta la sensibilità del telescopio, riducendo il fondo degli altri segnali prodotti dai raggi cosmici. Magic ha visto diverse classi di sorgenti in grado di produrre fotoni con energia sino a qualche TeV. Tra le scoperte più importanti vi sono la rivelazione per la prima volta di un segnale pulsato ad alta energia dalla pulsar nella Nebulosa del Granchio e la rivelazione dell’emissione gamma del più distante nucleo galattico attivo sinora mai osservato a tali energie. Aumentando la sensibilità degli strumenti da terra e in cielo e migliorando le tecniche osservative, il successo può essere alle porte. Questi straordinari acceleratori cosmici sveleranno i misteri dell’universo violento alle altissime energie.

Biografia

Francesco Longo collabora agli esperimenti Agile, Fermi Lat e Magic. È coordinatore del gruppo di studio delle sorgenti nel sistema solare per il rivelatore Lat di Fermi e per lo studio delle sorgenti galattiche nell’esperimento Agile. Per tutti e tre gli esperimenti si occupa di gamma ray burst.

Link sul web

<http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html>

<http://agile.asdc.asi.it/>

<http://agile.iasf-roma.inaf.it/>

www-glast.stanford.edu/,

<http://fermi.gsfc.nasa.gov>

<http://glast.pi.infn.it/>

<http://magic.mppmu.mpg.de/>

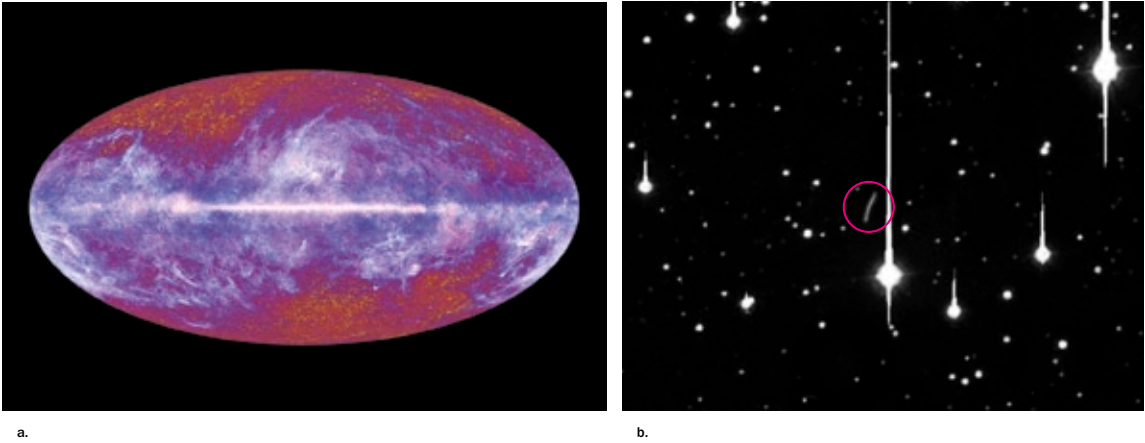
Archeologia cosmica

Lo studio della radiazione fossile
per comprendere l’origine dell’Universo.

di Anna Gregorio

Uno dei campi che più ha tratto giovamento dall'ultima generazione di esperimenti di astrofisica è lo studio del Cosmic Microwave Background (Cmb), la cosiddetta *radiazione fossile*. Misurare questa radiazione corrisponde a guardare l'Universo come era alle sue origini, dopo il Big Bang, e rappresenta una delle opportunità più interessanti per capire la nascita e l'evoluzione dell'Universo in cui viviamo. Nei primi istanti dopo il Big Bang la temperatura del cosmo è incredibilmente alta, ma col passare dei secondi l'Universo si espande e la sua temperatura scende velocemente. La radiazione in questa fase è come “intrappolata” dalla materia, la luce è continuamente emessa e assorbita dalle particelle elementari di materia e l'Universo è opaco. Solo 380 mila anni dopo il Big Bang la temperatura scende (3.000 kelvin) al punto in cui le particelle viaggiano più lentamente e possono combinarsi a formare i primi atomi. In questo processo gli elettroni vengono catturati e i fotoni della luce rimangono liberi, indipendenti dalla materia attorno a loro. Si libera quindi una luce che può viaggiare attraverso l'Universo divenuto trasparente. È questa la radiazione fossile o *radiazione del*

fondo cosmico, che da allora pervade il Cosmo in modo pressoché uniforme. Non tutto succede contemporaneamente nel nostro Universo, che in certe zone è più caldo in altre più freddo, e in corrispondenza sarà più o meno denso. Dopo un miliardo di anni, stelle e galassie si sono formate a partire da questi primordiali addensamenti di materia, lasciando un'impronta inconfondibile sulla radiazione fossile che mostra piccole variazioni di temperatura (anisotropie) in corrispondenza di queste strutture. La radiazione fossile rappresenta in effetti la prima, la più antica fotografia dell'Universo e di quei “semi” che hanno portato all'Universo come lo vediamo ora. E la sua temperatura? Dal momento in cui la radiazione si è liberata, l'Universo si è espanso e raffreddato, per cui noi oggi misuriamo un segnale molto debole e freddo, a 2,7 K, ovvero a -270,4 °C, vicinissimo allo zero assoluto! Questa radiazione è nella banda delle microonde con variazioni di temperatura, le anisotropie, inferiori al milionesimo di grado. La prima misura della radiazione fossile, che costituiva una conferma del modello del Big Bang e valse il Nobel ad Arno Penzias e Robert Wilson, risale al 1965 e venne effettuata a terra



con un’antenna per telecomunicazioni che per caso rilevò questo segnale. Ma per misurare con precisione qualcosa di così freddo dobbiamo usare strumenti a bassa temperatura per evitare che essi stessi producano della radiazione che si sommi al segnale. A terra tutto quello che ci circonda è caldo e l'atmosfera può produrre segnali spuri. Inoltre da qui possiamo osservare solo il cielo corrispondente all'emisfero in cui si trova lo strumento di misura. Dopo i primi esperimenti da terra e da pallone, le osservazioni dallo spazio, possibilmente con un satellite molto lontano da noi, sono risultate di fondamentale importanza per le osservazioni della radiazione fossile. Il satellite Cobe (*Cosmic Background Explorer*) della Nasa ha dimostrato per primo che la radiazione fossile non è perfettamente uniforme e omogenea, ma presenta delle piccole deviazioni, le anisotropie. Una scoperta che nel 2006 è valso il premio Nobel a John C. Mather e George F. Smoot. Il 30 giugno 2001, venne lanciato il satellite Wmap (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), successore di Cobe, che riesce a misurare le minime deviazioni della radiazione fossile con una sensibilità e precisione ancora maggiori.

Wmap è ancora in orbita a 1,5 milioni di chilometri dalla Terra, in equilibrio gravitazionale con la Terra e il Sole, in una posizione che offre un ambiente eccezionalmente stabile e pulito per osservare il cielo. Ai tempi di Penzias e Wilson la radiazione fossile sembrava fotografata con una macchina digitale con poche migliaia di pixel e tutto risultava uniforme, ma adesso è come se usassimo le moderne macchine digitali con decine di milioni di pixel. Grazie a Cobe, Wmap e, da pochi mesi, al satellite Planck possiamo vedere i dettagli delle impronte dell'Universo primordiale. Lanciato dalla base di Kourou nella Guiana Francese il 14 maggio 2009, Planck, l'ultimissimo prodotto dell'Esa (*European Space Agency*), orbita nella stessa regione di spazio di Wmap. A bordo sono presenti due strumenti, Lfi (*Low Frequency Instrument*) che indaga la radiazione nella banda a bassa frequenza (più fredda) e Hfi (*High Frequency Instrument*) per la parte ad alta frequenza (più calda). Entrambi fanno capo a due consorzi internazionali a leadership italiana e francese. Questa ampia banda di frequenze, da Lfi fino a Hfi, permette a Planck di distinguere al meglio la radiazione fossile dagli altri segnali che

a.
La mappa del cielo a microonde prodotta da Planck durante il suo primo anno di attività. La striscia centrale rappresenta la nostra galassia, la Via Lattea.

b.
Il satellite Planck, in orbita a un milione e mezzo di chilometri dalla Terra, fotografato dal telescopio di Loiano, vicino a Bologna (la sua traccia nell'immagine qui sopra è indicata dal cerchietto azzurro, le scie luminose di alcune stelle sono artefatti della rivelazione al telescopio).



c.

permeano comunque il nostro Universo, come ad esempio quello prodotto dalle galassie stesse. Le soluzioni tecniche adottate, la risoluzione angolare, ovvero la precisione nell'osservazione dei dettagli, la sensibilità, dieci volte maggiore di quella di Wmap, e l'ampia copertura in frequenza permetterebbero a Planck di misurare da terra il calore emesso da un coniglio sulla Luna rendono Planck uno strumento ideale per misurare le piccole variazioni di temperatura della radiazione fossile e le caratteristiche fondamentali del nostro Universo primordiale con una precisione mai raggiunta prima. Planck è operativo dal 13 agosto 2009. Nella figura a si vede la mappa del cielo a microonde prodotta da Planck durante il

primo anno di attività . La scala dei colori indica la variazione di temperatura della radiazione fossile rispetto al suo valore medio (rosso significa più freddo, blu più caldo). La precisione di Planck nella misura di queste minime differenze di temperatura e della loro “forma” ci consentiranno di risalire alle variazioni di densità dell'Universo primordiale e quindi a una gran quantità di informazioni cosmologiche. Il loro studio ci darà indicazioni sull'età dell'Universo, sulla sua composizione, sulla natura della materia oscura e dell'energia oscura e una migliore stima della massa dei neutrini, nonché di tutti i parametri cosmologici che descrivono la fisica del Big Bang.

Biografia
Anna Gregorio, ricercatrice dell'Università di Trieste, è docente del corso di laboratorio di astrofisica spaziale. Collabora all'esperimento Planck, è stata responsabile dell'integrazione e dei test di verifica e calibrazione dello strumento Lfi ed è ora responsabile delle operazioni dello stesso strumento.

Link sul web

www.rssd.esa.int/Planck

www.satellite-planck.it

www.videocorner.tv/videocorner2/bestof_vod/index.htm

www.as.oats.inaf.it/planck

c.
 Il satellite Planck.
 Massa: 1,9 tonnellate;
 dimensioni: 4,2 m altezza
 e 4,2 m diametro;
 vita operativa:
 15 mesi + 1 anno di estensione.

Spaziotempo in movimento

Interferometri per astronomia gravitazionale.

di Francesco Fidecaro

a.
 Al lavoro su uno degli specchi di Virgo. Questi specchi hanno una riflettività del 99,999%. La loro superficie è così levigata che le dimensioni di eventuali irregolarità sono dell'ordine del milionesimo di metro. Per evitare che movimenti del terreno li facciano anche impercettibilmente vibrare è stato costruito un sistema di superattenuatori, giganteschi ammortizzatori che sostengono gli specchi mediante catene di pendoli.



a.

Gli straordinari progressi della fisica durante il XX secolo hanno permesso di costruire strumenti che gli astronomi vissuti in precedenza non avrebbero mai potuto immaginare. Sono cresciute le dimensioni dei telescopi, si è ampliato lo spettro osservato passando dal visibile all’infrarosso, alle onde radio, oppure all’ultravioletto, ai raggi X e gamma. Non solo, sono state osservate particelle di altissima energia, oppure fiotti di raggi gamma, da associare a qualche violento evento successo nell’Universo milioni di anni fa. Oggi le osservazioni si susseguono numerose, anche grazie alla strumentazione imbarcata sui satelliti, usata per osservare direttamente quelle particelle che altrimenti sarebbero assorbite dall’atmosfera terrestre prima di essere rivelate, e si va costruendo un’immagine del cosmo sempre più ricca e affascinante. Accanto a queste varie forme di luce, che ci hanno anche permesso di ricostruire l’evoluzione dell’Universo risalendo fino a qualche centinaia di migliaia di anni dall’inizio, esiste un altro tipo di radiazione, associato al moto di una qualsiasi massa presente nello spazio. Questa radiazione è

associata alla più debole delle interazioni fondamentali, la gravitazione, ed è il meccanismo con il quale si trasmette, alla velocità della luce, la forza di gravità. Le proprietà delle onde gravitazionali, come si generano e come si rivelano, sono state dedotte nel 1916 da Albert Einstein dalla sua teoria della gravitazione, ovvero la relatività generale. La radiazione gravitazionale è stata messa in evidenza attraverso osservazioni di sistemi astrofisici, ma tuttora non si è riusciti a captarla con strumentazione terrestre, talmente è debole il segnale atteso. Ma già da ora ci si prepara all’osservazione sistematica dell’Universo per il tramite di questi nuovi segnali. I rivelatori per onde gravitazionali hanno come elemento sensibile delle masse, isolate al meglio dalle perturbazioni locali, e come trasduttore un fascio di luce che misura di quanto esse distino l’una dall’altra. L’onda gravitazionale, al suo passaggio, cambia la posizione relativa delle masse di una quantità quasi assurda: un milionesimo di milionesimo di metro, pari a un millesimo del raggio del nucleo di un atomo. Queste distanze possono essere misurate con il metodo dell’interferometria,

confrontando le distanze misurate dalla luce in due direzioni diverse. Lo strumento risultante è un interferometro con due bracci perpendicolari tra loro, che funziona come un’antenna. E siccome con antenne più grandi si ha maggiore sensibilità, gli interferometri per onde gravitazionali sono cresciuti e hanno ora dimensioni di qualche chilometro, mentre è in sviluppo un interferometro, chiamato Lisa (*Laser Interferometer Space Antenna*) con bracci di 5 milioni di chilometri, da collocare ovviamente nello spazio. Attualmente sono in funzione tre grandi interferometri nel mondo, due negli Stati Uniti per il progetto Ligo (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*), con bracci di 4 km e uno in Italia, vicino a Pisa, con bracci di 3 km, chiamato *Virgo*, dal nome dell’ammasso di galassie a decine di milioni di anni luce dalla Via Lattea. Completano il quadro un interferometro di 600 m in Germania (Geo 600) e uno in Giappone di 300 m (*Tama*). Questi strumenti sono ora in ascolto, in attesa della “prima luce”, ovvero della prima evidenza di un segnale gravitazionale da registrare e studiare. Ma già da ora vi

sono accordi per un uso congiunto dei dati raccolti. Infatti, il singolo interferometro è in ascolto di tutta la sfera celeste, ma non è in grado di fornirne la direzione di provenienza dell’onda gravitazionale. Invece, sfruttando i tempi di arrivo nei vari rivelatori è possibile ricostruire la posizione della sorgente. Se a questa posizione corrisponde un oggetto astrofisico già visto con altri mezzi, si avranno ulteriori notizie sulla natura della sorgente. Se verranno osservati fenomeni transitori, come l’aumento di luminosità originato da una supernova oppure fiotti di raggi gamma, allora si potrà associare alla forma d’onda registrata, già segnale di violenti movimenti di enormi masse, le altre osservazioni e avere una ben maggiore comprensione di ciò che avviene quando sono in gioco energie estreme. Le onde gravitazionali possono attraversare indisturbate tutto l’Universo a noi conosciuto, tale è la trasparenza della materia nei loro confronti. Quindi esse giungono dal cuore del cataclisma stellare, fornendo dati altrimenti inaccessibili. Si ritiene che le onde gravitazionali siano quindi anche il primo segnale emesso in eventi di altissima energia e quindi gli interferometri, sfruttando la loro capacità

di ascolto omnidirezionale, forniranno informazioni affinché tutti gli strumenti utili vengano puntati verso la sorgente per studiarne l’evoluzione fin dai primi istanti. Questo programma ambizioso può essere a giusto titolo chiamato astronomia gravitazionale. Esso conta tra i suoi obiettivi l’osservazione di *candele standard gravitazionali*, cioè sorgenti di onde gravitazionali di ampiezza nota per cui se ne può determinare la distanza dalla Terra, un dato molto difficile da ottenere in astronomia classica. Le candele standard gravitazionali ci consentono di studiare in modo completamente nuovo la scala delle distanze e la distribuzione di materia nell’Universo. L’osservazione di fenomeni violenti a distanze cosmologiche, quali la coalescenza di buchi neri di milioni di masse solari, una prerogativa questa della missione Lisa, darà ulteriori informazioni su ciò che avveniva nell’Universo giovane. Altrettanto interessante risulterà l’astronomia multi messaggero, in cui lo stesso fenomeno viene visto in tanti modi diversi. Le varie radiazioni osservate, con diversa evoluzione della loro intensità nel tempo, daranno ciascuna un’immagine complementare. I modelli proposti

dovranno essere in grado di spiegare tutte le osservazioni, dalle onde radio a quelle gravitazionali, ma vi sarà sicuramente qualcosa di nuovo e inatteso. Con il miglioramento degli strumenti, e con l’interferometro spaziale Lisa, che osserva fenomeni su scale di tempo più lunghe, inizierà anche *l’astrometria gravitazionale*, dalla quale si conta di ottenere misure di precisione relative alla forza di gravità e quindi di estendere il campo di validità della teoria della gravitazione o, ancora una volta, richiederne una drastica revisione.

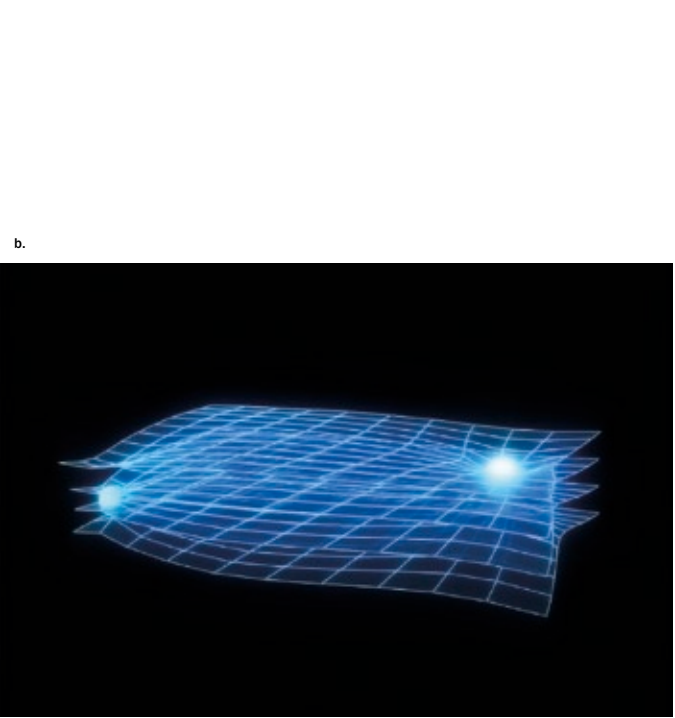
Biografie

Francesco Fidecaro insegna all'Università di Pisa ed è attualmente il responsabile scientifico della collaborazione Virgo. Ha collaborato al progetto e alla realizzazione del sistema di isolamento sismico per gli specchi di Virgo.

Link sul web

http://lisa.nasa.gov

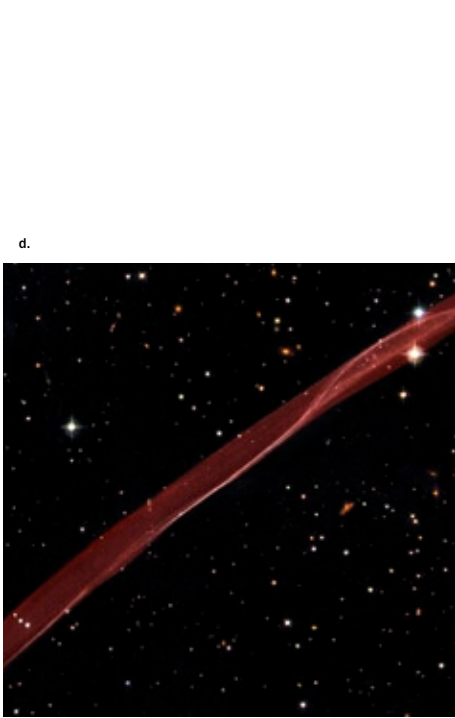
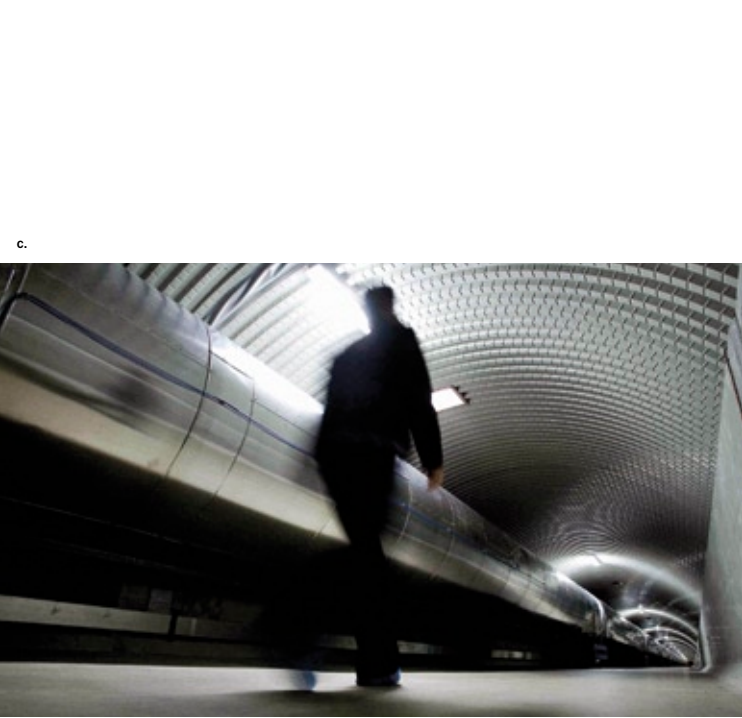
http://www.virgo.infn.it



b.
Rappresentazione artistica di due masse che curvano lo spaziotempo.

c.
L'interno di uno dei bracci dell'interferometro Virgo, a Cascina, nella campagna pisana. Ciascuno dei suoi due bracci è lungo 3 chilometri, ma il percorso compiuto dal raggio laser che vi scorre all'interno viene aumentato virtualmente per mezzo della riflessione su speciali specchi.

d.
Una sottile striscia di gas fluttua nella nostra galassia. Fa parte dei resti della supernova SN1006, prodotti dall'esplosione, vista dagli antichi astronomi ormai più di un migliaio di anni fa, di una nana bianca distante circa 7.000 anni luce. Questa supernova è stata probabilmente l'oggetto più brillante mai visto dall'uomo nel cielo. Oggi i resti di questa violentissima esplosione hanno un diametro di circa 60 anni luce e si stanno ancora espandendo a una velocità di quasi 10 milioni di chilometri all'ora.



Radiografia a muoni

L'idea di usare la misura dell'assorbimento dei raggi cosmici per sondare l'interno di volumi altrimenti inaccessibili, nello stesso modo in cui l'assorbimento di raggi X fotografa l'interno del corpo umano, risale a circa mezzo secolo fa. Tra le applicazioni concrete la più spettacolare venne realizzata dal premio Nobel Luis W. Alvarez, che esaminò la piramide di Chefren alla ricerca di sale nascoste (senza trovarne!). Nel 2003 un gruppo di ricercatori dei Laboratori di Los Alamos ha proposto un diverso uso dei muoni cosmici, basato sulla misura non dell'assorbimento ma della deviazione angolare che essi subiscono attraversando un materiale. L'analisi delle deviazioni dei singoli muoni con un sofisticato programma di *imaging* fornisce la distribuzione del materiale in tre dimensioni. La nuova tecnica, chiamata *tomografia muonica*, richiede un numero inferiore di muoni e, di conseguenza, un tempo di attesa inferiore rispetto alla misura dell'assorbimento, ma richiede una strumentazione più complessa, dovendo misurare la direzione, e non solo la posizione, di ciascuna

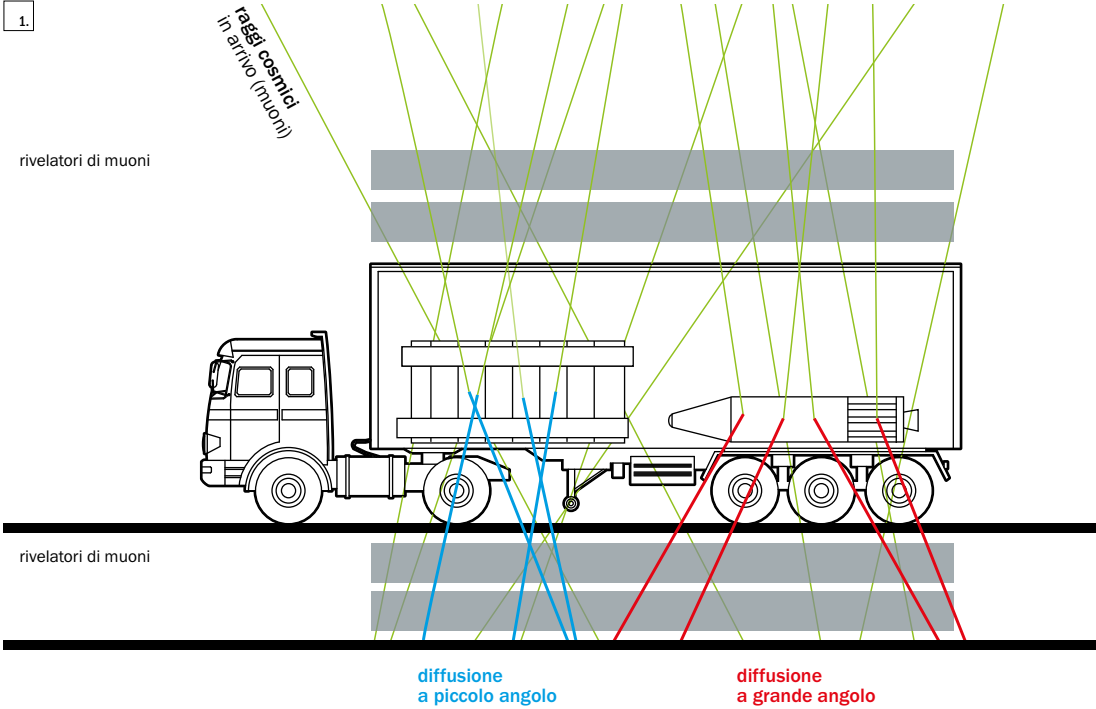
particella. Rivelatori adeguati sono stati sviluppati per gli esperimenti a Lhc, ed è proprio utilizzando due camere a deriva per muoni dell'esperimento Cms che un gruppo Infn-Università di Padova, assieme a colleghi di Genova e Brescia, ha costruito ai Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Infn il primo, e finora unico al mondo, prototipo di tomografo a raggi cosmici di grandi dimensioni (circa 11 m³). Questo strumento ha permesso di dimostrare che anche all'interno di grandi volumi è possibile determinare posizione, forma e densità del materiale contenuto, in particolar modo per elementi con elevato numero atomico (piombo o uranio, ad esempio). L'elevato potere di penetrazione dei muoni permette inoltre di ottenere immagini anche dietro schermi impenetrabili ai normali strumenti per radiografie con raggi X. Al momento sono allo studio applicazioni della tecnica per controlli di sicurezza, con l'obiettivo di identificare la presenza di sorgenti radioattive anche se efficacemente schermate da metalli pesanti. [Gianni Zumerle e Germano Bonomi]

Biografie
Gianni Zumerle è professore all'Università di Padova. È stato responsabile nazionale dell'esperimento Cms a Lhc al Cern, al quale tuttora collabora.
Germano Bonomi è ricercatore all'Università di Brescia. È attualmente impegnato nel campo dell'antimateria, della fisica ipernucleare e in quello della fisica applicata alla sicurezza.

Link sul web
<http://muradio.pd.infn.it>.

1.
Schema concettuale di una possibile applicazione della tomografia muonica. Due rivelatori, posti uno sopra e l'altro sotto un container per trasporto merci, misurano la deflessione angolare di ciascun raggio cosmico. L'analisi delle deflessioni su un campione statisticamente significativo permette di risalire alla posizione e alla forma del materiale contenuto, in particolar modo di elementi pesanti, come per esempio il piombo utilizzato per schermare materiale radioattivo.

1.



[as] radici

Le prime tracce.

di Piero Spillantini,

professore all'Università di Firenze

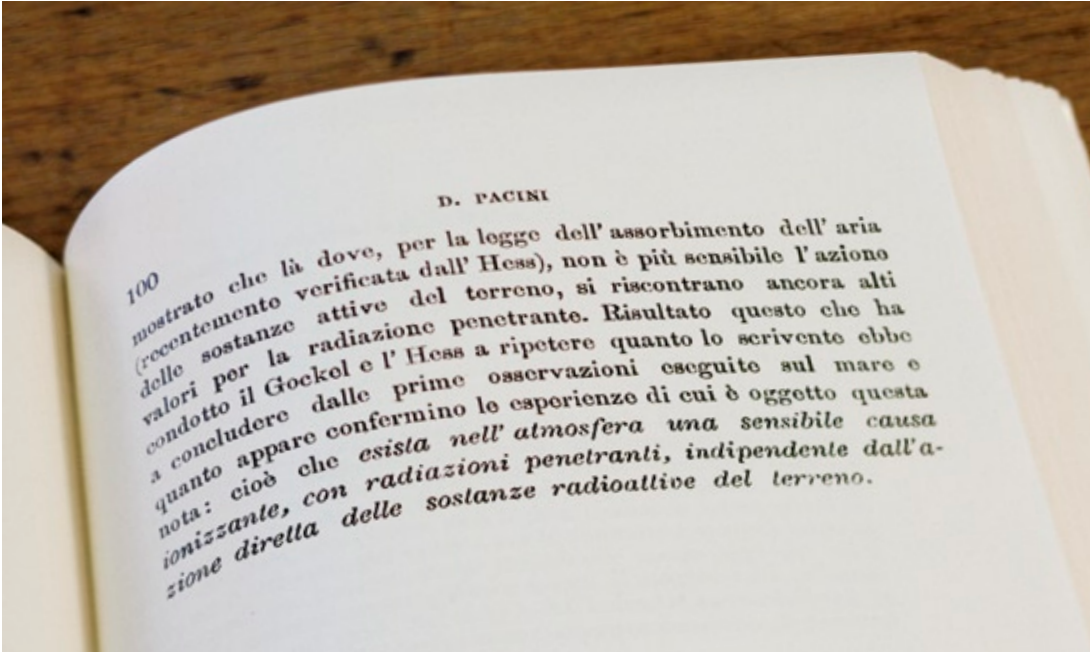
A cavallo tra il XIX e XX secolo regnava una grande agitazione e una intensa attività tra i chimici e fisici che si occupavano della struttura atomica della materia. La radioattività naturale, appena scoperta dal fisico francese Antoine Henri Becquerel nel 1898, forniva “proiettili” di energie enormi, due-tre ordini di grandezza più alte di quanto si riusciva a ottenere in laboratorio. Gli elettroscopi, misurando la velocità di dispersione di una carica registrata in una camera a ionizzazione, erano gli strumenti per conoscere la ionizzazione prodotta dalle particelle (α , β , γ) emesse dai nuclei radioattivi. Per misurare l'eccezionale capacità di penetrazione della componente γ ci si doveva allontanare dai materiali che si supponeva fossero la sua sorgente. C'era allora la torre Eiffel, nuova di zecca, e Theodor Wulf nel 1910 trovò che anche lassù la componente penetrante continuava a essere molto intensa. Più in alto si poteva andare con un nuovo mezzo, la mongolfiera, e appena possibile la si usò; l'intensità della componente penetrante non diminuiva, anzi addirittura cresceva con l'altezza, come scoprì Viktor Hess nel 1912. Ma ci si poteva allontanare dalla Terra anche andando al largo della costa, e sott'acqua. Ed è quello che fece in Italia un bravo fisico, Domenico Pacini. Pacini, dopo due anni alla Regia Università di Roma, vinse nel 1905 il concorso di assistente

nel Regio Ufficio Centrale di Meteorologia e Geodinamica, e negli anni tra il 1908 e il 1912 effettuò per il suo ufficio varie misure della ionizzazione dell'aria indotta dal radio e altre sostanze, al variare delle condizioni meteorologiche nelle campagne di misura, a terra e in montagna, completate da misure da lui autonomamente organizzate sulla superficie dell'acqua e sott'acqua, nel lago di Bracciano e al largo della costa di Livorno. Nella nota all'Accademia dei Lincei del 1909, per “spiegare il fatto che la ionizzazione prodotta dalle radiazioni penetranti oscilla entro larghi limiti” e “ non basta ammettere l'esistenza di un agente nel terreno”, Pacini “discute le diverse ipotesi avanzate al riguardo e in particolare quella di Richardson dell'origine solare” (dalla relazione della commissione per la libera docenza). Esisteva già a quei tempi una comunità internazionale di ricercatori in stretto contatto epistolare tra loro coinvolta in queste ricerche. I lavori di Pacini sono ben inseriti in questa comunità e ricevono, anche se non del tutto, il giusto riconoscimento. Tuttavia “in Pacini è impressionante lo svolgersi di un filo conduttore per la ricerca basato sul convincimento, espresso fin dal primo lavoro, che l'azione diretta delle sostanze attive nel terreno non è sufficiente a spiegare le proprietà osservate della radiazione penetrante, come



a.

a.
Domenico Pacini.



b.

confermato dall'analisi delle oscillazioni, dalle misure sul mare e sotto il mare" (tratto dalle lezioni di Otranto, "Domenico Pacini e la scoperta dei raggi cosmici", di Francesco Guerra e Nadia Robotti), e nel suo lavoro pubblicato nel 1912 poté affermare, prima di tutti gli altri, e anche prima del famoso volo sul pallone di Hess, che si doveva tener conto di una radiazione proveniente dall'alto dell'atmosfera, così penetrante da poter giungere a terra dopo aver attraversato tutta l'atmosfera, equivalente a ben 10 metri d'acqua. È possibile asserire, come Edoardo Amaldi in una lettera indirizzata al direttore dell'Istituto Fisico della Regia Università di Roma, Eccellenza Antonino Lo Surdo, che "il primo scopritore dei raggi cosmici fu l'italiano Pacini, a cui seguirono i tedeschi Hess, Kolhörster, eccetera"? Si trattava di una scoperta fondamentale, che contraddiceva altre ricerche in ambito internazionale condotte in quegli anni; ma era scritta in italiano da una persona scrupolosa e schiva, che operava in condizioni difficili per i pochi mezzi e la poca libertà di manovra, in missioni fatte spesso a proprie spese, e non ebbe la dovuta risonanza. Molta più fortuna

continuarono ad avere le misure fatte in mongolfiera ad altezze via via crescenti, fino ai 9.000 metri raggiunti da Kolhörster nel 1914. Domenico Pacini muore nel 1934, e nel 1936 il premio Nobel per la scoperta dei raggi cosmici fu attribuito a Victor Hess. Solo verso gli anni venti si comincerà a capire che la radiazione penetrante è composta da particelle cariche, elettroni, protoni e altre particelle, all'epoca ancora non identificate, con energie impensabilmente elevate, migliaia di volte più di quelle delle particelle della radioattività naturale, milioni di volte più dell'energia di quelle che si potevano ottenere con le apparecchiature dell'epoca. La radioattività naturale continuava ancora a servire come mezzo di indagine della struttura della materia (Ernest Rutherford, proprio in quegli anni, fece passare le particelle α emesse dal radio attraverso un sottile strato d'oro per capire la struttura dell'atomo, fino ad allora sconosciuta), ma si offriva all'indagine della materia uno strumento enormemente più energetico e penetrante, cui fu dato poi il nome di "raggi cosmici", strumento da studiare ma anche da utilizzare.

b.
Frase conclusiva dell'articolo di Domenico Pacini apparso su *Il Nuovo Cimento*, serie VI, Tomo III, pagg. 93-100, 1912. Da sottolineare l'espressione "Risultato questo che ha condotto il Gockel e l'Hess a ripetere quanto lo scrivente ebbe a concludere..."; il risultato è quello dell'esperimento in pallone di Gockel di cui si parla subito sopra, e la conclusione è quella scritta in corsivo in questa figura.

[as] tecnologia e ricerca

Specchi magici.

di Antonella Varaschin

Con la loro estensione di 240 metri quadri ciascuno, sono le superfici riflettenti più grandi al mondo. Stiamo parlando degli specchi dei due telescopi Magic, che sono in attività sulla cima del vulcano Taburiente, sull'isola di La Palma alle Canarie. Questi telescopi gemelli sono stati costruiti per studiare la radiazione gamma che arriva dal cosmo. I raggi gamma sono fotoni di alta e altissima energia che, quando interagiscono con i nuclei dell'atmosfera terrestre, producono altre particelle. Queste, a loro volta, viaggiando a una velocità superiore a quella della luce nell'aria, emettono un debole bagliore, fenomeno che viene chiamato effetto Cherenkov. Gli specchi dei telescopi Magic hanno il compito di raccogliere questa flebile luce e focalizzarla su una telecamera che ne registra la forma e l'intensità. Questo segnale viene poi analizzato dai ricercatori. Per riuscire nella loro missione, questi specchi devono avere caratteristiche particolari. Oltre alle loro dimensioni, hanno anche un'alta riflettività che arriva fino al 90%. Ma il loro punto di forza è soprattutto l'accuratezza della geometria: la loro forma sferica da 34 a 36 metri di raggio di curvatura si adatta alla superficie parabolica del telescopio che permette di focalizzare, con grandissima precisione, il segnale luminoso all'interno della camera fotosensibile. "Per realizzarli sono state impiegate due diverse tecniche,

entrambe innovative, frutto di un lavoro sinergico tra mondo della ricerca e mondo dell'industria", sottolinea Mosè Mariotti, ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e professore all'Università di Padova, responsabile dell'ottica dei due telescopi. Gli specchi del primo telescopio sono realizzati con la tecnica del taglio al diamante. "Questa tecnica esisteva già – spiega Mariotti – ma è stata potenziata e il suo perfezionamento ha richiesto un lavoro di oltre tre anni. In genere, gli specchi sono fatti in vetro, materiale che poi però deve essere periodicamente rialluminato per mantenerne la riflettività. Questi specchi, invece, sono stati creati direttamente in alluminio, che viene levigato al diamante per ottenere l'alta riflettività". Il vantaggio degli specchi in alluminio risiede principalmente nel fatto che il metallo invecchia molto meno rapidamente, perdendo un 1% di riflettività all'anno contro il 4% del vetro. Quindi, pur essendo al momento della produzione più costosi, richiedono negli anni meno manutenzione. L'altro vantaggio dell'alluminio rispetto al vetro è la sua leggerezza, che permette quindi di fabbricare specchi di dimensioni maggiori. Nella costruzione del secondo telescopio, invece, sono state impiegate due diverse tecniche. Oltre a quella del taglio al diamante, ne è stata impiegata un'altra, sviluppata dall'Istituto Nazionale di Astrofisica (Inaf), in stretta collaborazione

con il partner industriale Medialario, chiamata *cold slumping*: questi secondi specchi sono in vetro, ma rispetto a quelli tradizionali sono costituiti da due lastre sottili di vetro incollate a sandwich su un supporto a nido d'ape che dà spessore, garantisce la rigidità e permette di raggiungere grandi dimensioni. "Così noi italiani siamo diventati leader nella realizzazione dei grandi specchi – conclude Mariotti – ora impiegati in Magic, ma che in futuro saranno probabilmente utilizzati in Cta (*Cherenkov Telescope Array*), un esperimento in fase di progettazione, analogo al sistema di telescopi Magic, ma con un numero elevato di telescopi (circa 50) di diverse dimensioni che lavoreranno in stereoscopia. Cta prevede la realizzazione di due apparati, uno nell'emisfero nord e l'altro nell'emisfero sud del pianeta. E in futuro stiamo anche pensando di utilizzare questi specchi per produrre energia". In questo modo l'esperimento potrebbe autosostenersi dal punto di vista energetico. Di notte questi telescopi sarebbero impegnati nell'attività di osservazione del cielo, mentre di giorno servirebbero a produrre energia. È chiaro che non presenta un diretto vantaggio economico, ma la ricerca su strumenti così avanzati dal punto di vista dell'ottica può essere utilizzata per comprendere come poter sfruttare anche dal punto di vista industriale questi progressi.

a.



b.



a.
Primo piano degli specchi di uno dei due telescopi di Magic.

b.
È stato grazie al lavoro sinergico tra i ricercatori della collaborazione Magic (nella foto ai piedi di uno dei due telescopi) e mondo dell'industria che gli specchi di Magic sono stati realizzati.

[as] benvenuti a bordo

Messaggeri d’oriente. Intervista a Stefano Mastroianni, ricercatore dell’esperimento Argo.

di Francesca Scianitti



Il viaggio, dalle pendici del Vesuvio agli altipiani del Tibet, dura tre giorni. All’arrivo, gli spazi lasciano senza fiato. Non solo per l’altitudine che rende l’aria rarefatta. “[...] Tutto ciò che vedi è sconfinato e si ripete in modo simile in ogni direzione. È meraviglioso, ma stordisce”. Stefano Mastroianni è napoletano: le sfumature mediterranee del suo accento aumentano i contrasti del suo racconto. Specializzato nella progettazione dell’elettronica di lettura per i rivelatori di particelle, lavora come ricercatore tra Napoli e un piccolo villaggio del Tibet, YangBajing, a 4.300 metri sul livello del mare. Qui, più di dieci anni fa è nato l’esperimento Argo. Ma come si arriva, giovanissimi, a lavorare a un esperimento localizzato in un ambiente così distante e così estremo? Stefano sorride sornione. “È stata per lo più una fortunata coincidenza – racconta – la progettazione vera e propria di Argo è cominciata nel 1999, proprio nell’anno in cui avrei dovuto scegliere un argomento per la mia tesi di laurea. E l’opportunità di lavorare ad Argo, riunendo in sé le mie tre principali passioni, la fisica, l’elettronica e la montagna, mi sembrò perfetta.” Argo rivela raggi cosmici e gamma primari a energie superiori ad alcune centinaia di miliardi di elettronvolt, misurando le particelle cariche generate dalla loro interazione con l’atmosfera. E la scelta del luogo non è casuale. “In alta montagna – spiega Stefano – diminuisce l’assorbimento delle particelle secondarie da parte dell’atmosfera. I rivelatori coprono integralmente i 6.500 mq di superficie occupata da Argo, consentendo di rivelare anche sciame con un numero di particelle molto piccolo. È quindi possibile lavorare a un’energia di soglia dei raggi cosmici primari più bassa rispetto agli apparati al suolo tradizionali. “In questo modo – continua – Argo è in grado di aprire una finestra sul cosmo ancora poco esplorata, al confine tra le misure dirette, con satelliti, e quelle indirette, con altri apparati al suolo. Il tipo di radiazione rivelata da Argo fornisce preziose informazioni sulle sorgenti

e sui meccanismi di accelerazione dei raggi cosmici, per esempio in supernovae, stelle di neutroni e buchi neri.” Ma se per l’astronomia gamma e per la fisica dei raggi cosmici l’alta quota è ideale, in un ambiente così duro, non mancano le difficoltà e la passione per la fisica non è la sola qualità richiesta. “Serve un po’ di tempo perché il corpo si abitui a rinunciare alla solita quantità di ossigeno – racconta Stefano – per un paio di giorni si lavora con l’affanno e il corpo ti fa lo scherzo di svegliarti di soprassalto nella notte con la sensazione di non avere abbastanza aria per respirare. Poi tutto torna normale, anzi quasi meglio. Dopo tre settimane in queste condizioni, quando gioco a calcetto con gli amici, al rientro, sono un vero fenomeno. È l’effetto *doping d’alta quota*, ma sfortunatamente dura poco.” L’ambiente è estremo nel bene e nel male. A causa delle distanze e della complessità del viaggio, infatti, l’organizzazione del lavoro è stata particolarmente delicata. “Una volta provato e assemblato in Italia, il materiale è stato spedito in Tibet in container, via nave verso Pechino e poi in treno e camion. Il viaggio, così, dura circa 3 mesi. Questo non ha escluso imprevisti nell’approvvigionamento del materiale e, talvolta, per ovviare abbiamo dovuto sacrificare spazio prezioso in valigia. Il luogo, poi, ci ha costretti a mantenere fede a obiettivi minimi irrinunciabili: la robustezza e la ridondanza nella progettazione, la possibilità di controllo e intervento remoto, via computer, per essere il più possibile indipendenti dalla presenza umana qualificata”. Stefano ha dedicato gli anni delle tesi di laurea e di dottorato alla progettazione e installazione del sistema di selezione degli sciame di particelle generati dai raggi cosmici primari, la cosiddetta elettronica logica di decisione (o anche *trigger*), e al controllo dell’acquisizione dati. Gli sciame di particelle osservati da Argo spaziano da quelli con densità di particelle molto bassa, come quelli prodotti da fotoni di più bassa energia, sino a sciame molto densi,

come quelli da raggi cosmici di energia elevatissima. “Argo deve poter rivelare sciame composti da meno di un centinaio di particelle distribuite sull’intera superficie del rivelatore – spiega Stefano – fino a densità di oltre un migliaio di particelle per metro quadro. Per questo è stato necessario mettere a punto più canali di selezione degli sciame – i *trigger* – basati sulla densità di particelle. Dopo il dottorato – continua – mi sono occupato del sistema di acquisizione dati dell’esperimento, che provvede alla raccolta delle informazioni sulla posizione e tempo di arrivo delle particelle dello sciame, all’archiviazione temporanea e al successivo trasferimento ai centri di analisi di Pechino e al Cnaf di Bologna (*Centro Nazionale per la Ricerca e Sviluppo delle Tecnologie Informatiche e Telematiche*)”. In contatto più diretto con gli obiettivi di fisica per i quali Argo è stato progettato, oggi Stefano lavora all’analisi dei dati, ma anche all’implementazione di un nuovo sistema di elettronica di lettura del rivelatore per estenderne l’intervallo di energie accessibili. “Passando da alcune centinaia di miliardi di elettronvolt (GeV) a milioni di miliardi di elettronvolt (PeV) – spiega – sarà possibile studiare con lo stesso rivelatore tutto lo spettro energetico dei raggi cosmici.” Argo continuerà a prendere dati per altri due anni. E poi? “I prossimi due anni non saranno una fase di attesa. Saremo impegnati più che mai nel completamento della raccolta dei dati e nelle analisi che ci suggeriranno come migliorare il rivelatore stesso per renderlo più sensibile verso i nostri obiettivi di fisica. I risultati, poi, ci diranno come comportarci per il futuro, anche perché la fisica delle astroparticelle è davvero in rapida evoluzione”. Stefano ha 34 anni e il futuro sembra non preoccuparlo affatto. Al termine del suo racconto il motivo di questa mancanza di esitazione è più chiaro ed è più che mai evidente la forza che deriva dall’aver contribuito, già giovane laureando, a posare la prima pietra di Argo.

[as] con altri occhi

Stasera è di scena l’Universo.

di Lucilla Giagnoni



a.

a.
Lucilla Giagnoni sulla scena durante lo spettacolo Big Bang.

Mi chiamo Lucilla, faccio l’attrice e sono autrice teatrale; scrivo le storie che racconto. Racconto le storie che m’interessano e che mi salvano. Nel 2001 quando ho visto, come tutti, crollare le Torri mi sono accasciata sulla scala di casa e ho pensato: ci vogliono parole di bellezza per uscire dall’inferno. Ho scritto, così, “Vergine madre”, un lavoro dedicato alla Divina Commedia di Dante: l’opera che più di ogni altra ci mostra la strada per uscire dal buio dell’inferno. La Divina Commedia finisce con la parola “stelle”. Per essere precisi: l’Inferno finisce con la parola “stelle”, il Purgatorio finisce con la parola “Stelle”, il Paradiso con la parola “stelle”. Evidentemente Dante ci teneva davvero molto che noi guardassimo le stelle. “Che cosa indicano, quale misteriosa verità custodiscono o rivelano, le stelle?”. Mi sono messa a studiare ciò che non conoscevo ed è nato il mio ultimo spettacolo, “Big Bang”. Ho scoperto che per parlare delle Stelle, bisognava parlare della Creazione del mondo e dell’Inizio. Mi sono accorta che non mi bastava più la lingua che conoscevo, quella della poesia, ma dovevo usarne almeno altre due, così diverse fra loro in apparenza: quella del testo sacro e quella della scienza. Il testo sacro sulla creazione che fonda la nostra cultura è il Libro della Genesi. L’ebraico con cui è scritto è antico di almeno 3.000

anni, una lingua che non ci è mai stata veramente restituita in una traduzione che ne rispettasse la ricchezza semantica e la forza primordiale. Nell’alfabeto ebraico ogni lettera corrisponde a un numero, o meglio, è un numero. Così il sapiente che leggeva il testo sacro poteva nello stesso tempo vedere un racconto e un insieme di numeri. Il Libro della Genesi è una struttura architettonica fatta di corrispondenze numeriche perfettamente congegnate. Come, con evidenza, è finemente congegnato l’Universo. Qual è il suo codice segreto? Il suo alfabeto? Se ci volessimo chiedere qual è il vero linguaggio della scienza dovremmo riconoscere che è quello delle formule: $E=mc^2$ (quante volte si è detto che è poesia!). Una formula scientifica è fatta di lettere e numeri. La lingua del testo sacro è fatta di lettere e numeri. Alle orecchie dei non addetti ai lavori sia l’inizio del libro della Genesi che le trasformazioni di Lorentz suonano come mantra misteriosi capaci di schiudere universi. Con la parola si crea il mondo. All’inizio fu il Verbo. La parola è il Codice. La prima azione che compie il Dio della Bibbia è parlare: “Sia la luce!” e la Luce fu. $E=mc^2$. E la lingua della poesia? Per fortuna non ha bisogno di spiegazioni, non servono addetti ai lavori. Qui incomincio davvero a divertirmi. Gli scienziati non fanno altro che citare

Shakespeare. Silenzio... ora parla Amleto, il principe dell’indeterminazione: “Essere o non essere”... e a me viene in mente il gatto di Schrödinger che è e non è. Parla Prospero, il mago incantatore delle forze della natura: “Siamo fatti della stessa materia di cui sono fatti i sogni”... e a me viene in mente la schiuma quantistica. Parla Lady Macbeth, la donna senza nome, il lato oscuro di Macbeth... e a me viene in mente la materia oscura. Un gioco a scoprire nuovi codici che mi diverte e mi fa pensare. Se Einstein è un poeta, Shakespeare è uno scienziato e l’antico redattore del testo biblico uno che già sapeva tutto. Dante, nella Divina Commedia è stato l’ultimo a fondere questi tre linguaggi: teologia, scienza e poesia. Io, che evidentemente non sono Dante, cerco i punti di contatto, le possibilità di dialogo, con risultati che mi sorprendono assai. Piccole rivelazioni che emergono dal mio personalissimo caos originario, fino al mio rapporto privato con la creazione: mia figlia. Sì, ho scoperto che Big Bang in fondo parlava di me e mia figlia: la mia luce, il mio inizio e la mia fine. Io, che mi chiamo Lucilla ho chiamato mia figlia, me ne rendo conto solo adesso, Bianca. Come la luce. Ecco, sempre una questione di parole. Big Bang. Un attimo di silenzio e... Sia la Luce e la Luce fu.

[as] incontri

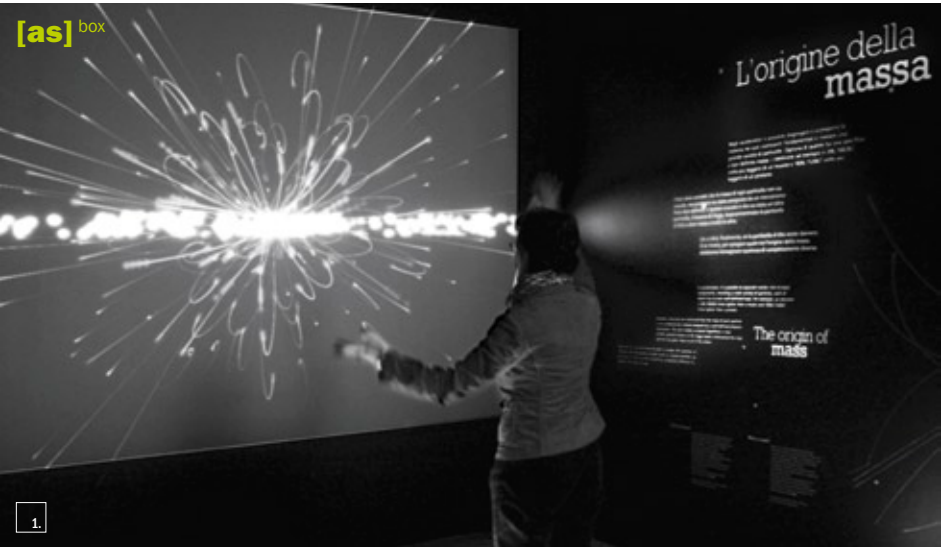
Scoprire la passione per la scienza, sperimentandola.

di Vincenzo Napolano

Come portare la scienza nel cuore dei giovani? “Rendendoli protagonisti di un vero, grande esperimento scientifico.” È questa la formula di “EEE (*Extreme Energy Events*), La Scienza nelle Scuole”, progetto ideato dal prof. Antonino Zichichi e avviato nel 2005 con il rapporto determinante dell’Infn con il Cern, la Società Italiana di Fisica e il Centro Fermi, sotto l’egida del Ministero per l’Università e la Ricerca Scientifica. EEE è un esperimento per la rivelazione e lo studio dei raggi cosmici di alta energia “esteso” su una superficie di milioni di chilometri quadrati. Ha però una caratteristica che lo rende speciale: i suoi telescopi per raggi cosmici sono installati nelle scuole superiori, già ora in più di trenta città italiane. Studenti e insegnanti partecipano all’assemblaggio e installazione dei rivelatori, alla presa dati e all’analisi dei risultati, in sostanza a tutte le fasi dell’esperimento. “Abbiamo

coinvolto ragazzi e insegnanti – afferma il prof. Zichichi – in un’impresa scientifica alla frontiera delle nostre conoscenze attuali. Speriamo davvero che EEE ci aiuti a capire qualcosa in più su come e quando nascono i ‘raggi cosmici’ primari generati nelle zone più remote dello spazio”. L’avventura scientifica degli studenti comincia ogni volta con una trasferta al Cern di Ginevra, dove costruiscono con le loro stesse mani dei rivelatori, gli Mrpc (*Multigap Resistive Plate Chamber*). Ideati nell’ambito dell’esperimento Alice di Lhc per ottenere la massima precisione possibile nella misura del tempo di volo delle particelle, questi rivelatori raggiungono una risoluzione temporale, ad oggi insuperata, di 40 millesimi di miliardesimi di secondo. Installati nelle scuole del progetto, consentono di rivelare le coincidenze e le correlazioni temporali tra i segnali prodotti dai raggi cosmici, identificando gli sciami di particelle generati nell’atmosfera

dai raggi cosmici di energia più elevata. “Naturalmente la presenza dei telescopi di EEE su un’area tanto vasta è cruciale per gli obiettivi dell’esperimento – commenta il prof. Zichichi – ed è allo stesso tempo la chiave per coinvolgere una così numerosa comunità di giovani e i loro insegnanti”. Delle oltre cinquanta scuole che partecipano al progetto, otto sono state scelte come siti “pilota” in cui installare i prototipi dei telescopi. Qui i ragazzi hanno osservato i segnali prodotti dalle particelle che attraversavano i rivelatori e hanno stabilito dei turni per controllarne il corretto funzionamento. Insieme ai docenti e ai ricercatori che li hanno seguiti, come quelli del Centro Fermi e dell’Infn, hanno imparato ad analizzare i dati raccolti, e ora aspettano con ansia l’interpretazione dei primi risultati. Uno comunque EEE l’ha certamente raggiunto: far scoprire ai ragazzi la passione per la scienza, facendola.



È stata l’intera città di Torino a partecipare con mostre, spettacoli teatrali, conferenze e laboratori in piazza alla quarta edizione dell’Euroscience Open Forum - ESOF 2010, il prestigioso incontro biennale dedicato alla ricerca e all’innovazione scientifiche. Tra le iniziative di successo la mostra a cura dell’Infn al Museo Regionale di Scienze Naturali “L’invisibile meraviglia”, che in tre mesi ha raccolto oltre 15000 visitatori. La mostra propone al grande pubblico un viaggio attraverso le questioni aperte e le grandi sfide della fisica contemporanea con un linguaggio e strumenti di comunicazione originali e innovativi.

1.
Una delle installazioni della mostra dell’Infn “L’invisibile meraviglia” allestita a Torino al Museo Regionale di Scienze Naturali fino a settembre 2010.

Un tau, ecco l'oscillazione_ Ai Laboratori del Gran Sasso, il rivelatore Opera ha osservato per la prima volta in modo diretto la trasformazione di un neutrino da un tipo in un altro, cioè la cosiddetta "oscillazione". I neutrini dell'esperimento Cngs (*Cern Neutrinos to Gran Sasso*) vengono prodotti artificialmente al Cern di Ginevra, tutti di tipo muonico. Dal Cern sono poi inviati al Gran Sasso, dove giungono dopo aver percorso, in 2,4 millisecondi, 730 km attraverso la crosta terrestre: un tragitto sufficientemente lungo da consentire ad alcuni di essi di trasformarsi da muonici in tau. E i ricercatori di Opera hanno effettivamente trovato impressa sulle lastre di emulsione nucleare del rivelatore la "fotografia" di una reazione che solo il neutrino tau, non quello muonico lanciato dal Cern, poteva far avvenire interagendo col piombo del bersaglio dell'esperimento. Il fatto che il neutrino oscilli implica che la sua massa sia diversa da zero (fino ad alcuni anni fa, invece, si credeva che il neutrino non avesse massa), e ciò ha una enorme importanza per la comprensione del nostro universo. [A.V.]



La macchina dei record_ Funziona davvero bene. Anche se, come ogni prototipo, bisogna imparare a conoscerlo. Così, da alcuni mesi gli "acceleratoristi" del Large Hadron Collider (Lhc) lavorano senza soluzione di continuità. Perché ci vuole tempo per imparare "guidare" la macchina più potente al mondo. I risultati del loro lavoro sono arrivati e continuano ad arrivare copiosi. Lhc, infatti, sta inanellando un record dopo l'altro. Il primo: il 30 marzo scorso i protoni all'interno dell'acceleratore si sono scontrati a 7 TeV, un'energia mai raggiunta prima sulla Terra, dando così ufficialmente l'avvio al programma di ricerca di Lhc. Inoltre, i protoni viaggiano all'interno dell'anello in pacchetti (*bunch*), ciascuno composto da cento miliardi di particelle. A questi numeri si aggiunge il record di "luminosità": 10^{31} collisioni al secondo per centimetro quadrato, che tra due fasci di protoni da 3,5 TeV ciascuno corrisponde a un milione di collisioni al secondo. Al momento le collisioni avvengono tra "treni" di 50 bunch per fascio, i cui "vagoni" viaggiano a 150 miliardesimi di secondo l'uno dall'altro. Il prossimo passo è previsto per novembre quando, anziché protoni, si scontreranno ioni di piombo. [A.V.]



Il Tevatron rincorre Lhc_ Il Tevatron, il collisore di protoni e antiprotoni del Fermilab di Chicago non si fermerà, come previsto, alla fine del 2011, ma correrà molto probabilmente per altri tre anni fino a tutto il 2014. La "forte raccomandazione" a continuare la corsa del Tevatron arriva dalla commissione scientifica, che stabilisce priorità e indirizzi di ricerca del laboratorio statunitense, il Pac (*Physical Advisory Committee*), convinta dai recenti dati e dalle analisi "estremamente significative" forniti dagli scienziati degli esperimenti Cdf e DZero. Questi risultati mostrano, secondo la commissione, quanto sia probabile nei prossimi tre anni rivelare al Tevatron un segnale dell'Higgs o comunque aprire nuovi scenari per la fisica fondamentale. Il Fermilab quindi non vuole perdere quella che considera "un'opportunità di ricerca così eccitante e convincente e con una potenziale importanza storica complementare al programma di Lhc" e vuole perseguirla "anche senza ulteriori finanziamenti." Il verdetto del *Department of Energy* (DOE), a cui il laboratorio di Chicago ha chiesto un finanziamento aggiuntivo di 150 milioni di dollari, non è infatti scontato. E i fisici del Fermilab lo aspettano col fiato sospeso. [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