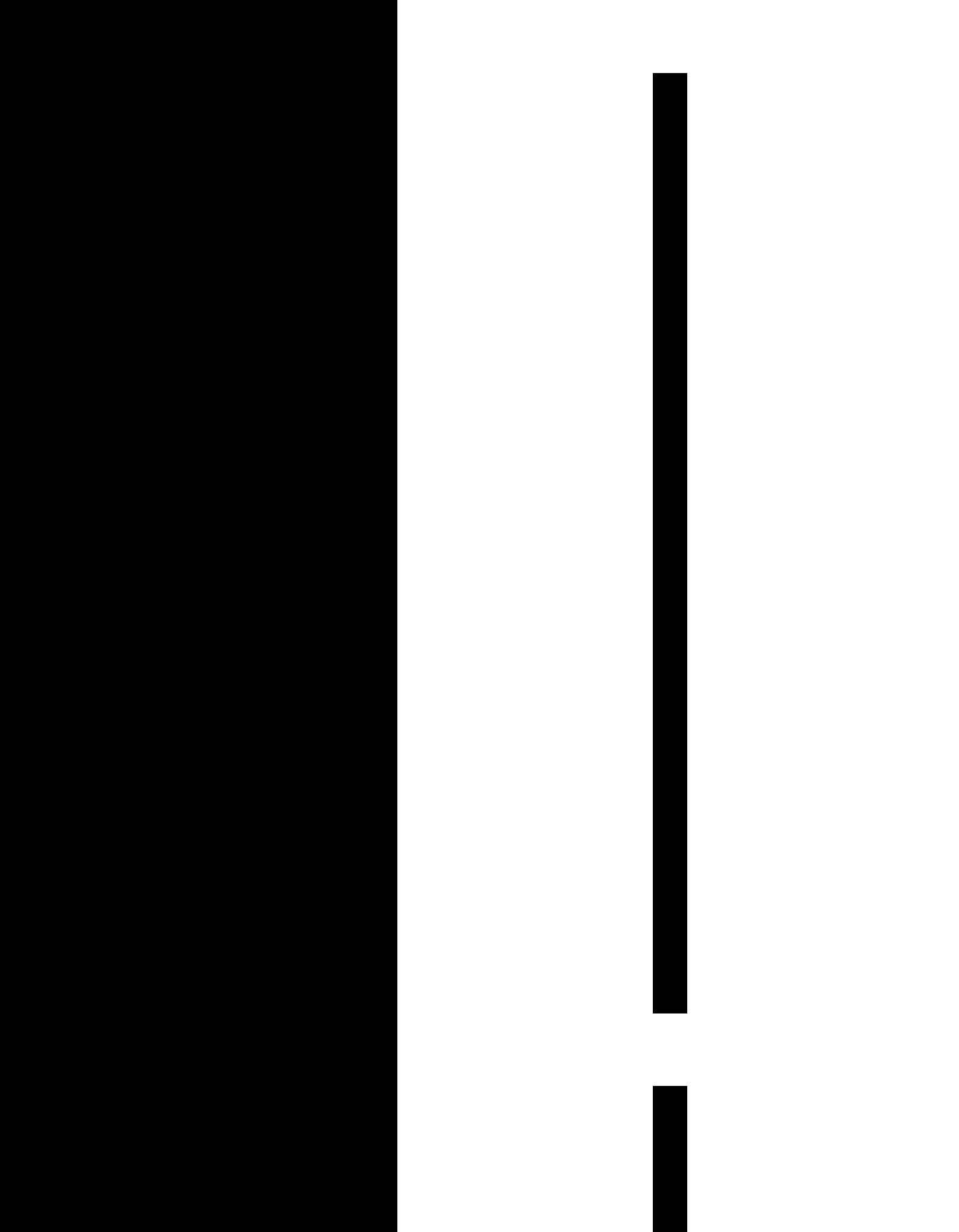


[muone]

anno 12 numero **23** / 10.17

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

Il fascino di una particella che viene scoperta nel 1936 come “mesone”, ma che poi, molti anni dopo, si rivela tutt'altra cosa, persiste tutt'oggi.

Era stata identificata come la particella funzionale a trasformare neutroni in protoni nelle teorie dell'epoca ed era stata predetta da Yukawa, quindi niente di imprevisto, anzi... Senonché la natura è capace di sorprese straordinarie e, grazie al famoso esperimento fatto da Conversi, Pancini e Piccioni negli anni '40 sotto le bombe che cadevano su Roma, si vide che questo oggetto non era un mesone (anche se per molto tempo si continuò a chiamarlo “mesone-mu”) e non aveva affatto interazioni forti come il protone e il neutrone, anzi piuttosto deboli!

Quindi non più mesone-mu ma “muone”. Era un elettrone pesante e, poiché non era predetto da nessuna teoria e non sembrava servire a nulla nell'interpretazione di allora della natura, il fisico Isaac Raabi pronunciò la famosa frase “*Who ordered that?*” (“E questo chi lo ha ordinato?”). Invece, in realtà, era il primo segnale dell'esistenza delle tre famiglie dei leptoni (e dei quark), che poi furono incasellate nel modello standard.

Per quanto riguarda la questione posta da Raabi, la risposta non la sappiamo ancora, ma abbiamo imparato a sfruttare le sue straordinarie proprietà, sviluppando tecniche sperimentali che ci hanno permesso di osservare il bosone di Higgs e i neutrini cosmici.

Ci siamo persino ingegnati per capire come la particella “inutile” potesse essere usata anche al di là del mondo della fisica delle alte energie. Il muone non ha interazioni forti, come già detto, e poiché è 210 volte più pesante dell'elettrone irraggia molto poco e quindi procede dritto, sensibile solo alla quantità di materia che incontra lungo il suo cammino. I muoni che ci cadono addosso dal cielo non sono certo pochi (uno al minuto su ogni centimetro quadrato), quindi li possiamo usare per fare qualcosa di simile alla radiografia, lo studio dell'interno di qualcosa che non possiamo vedere direttamente: la tomografia muonica. Qualche esempio? Nell'interno della Piramide di Cheope alla ricerca di camere nascoste o per l'ispezione di camion, che potrebbero portare materiali molto densi e sospetti, o del reattore danneggiato di Fukushima e, ancora più interessante per noi, per studiare la presenza e distribuzione del magma in vulcani come il Vesuvio e l'Etna. Uno studio che l'Infn conduce in collaborazione con l'Ingv.

Non sappiamo chi ha ordinato il muone, ma è certo che lo sappiamo sfruttare molto bene!

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

as

23 / 10.17

[muone]

Una vita da mediano

di Filippo Ceradini

4

[as] radici

Muoni sotto le bombe.

di Giovanni Battimelli

13

Sapori di famiglia

di Lorenzo Calibbi

15

Passaggi proibiti

di Alessandro Massimo Baldini

18

Luci e ombre

di Tommaso Chiarusi

21

[as] selfie

I muoni vanno a scuola.

di Alessandro Recchia e Laura Lidia Prudeniano

24

[as] spazi

Giornate cosmiche.

di Catia Peduto

26

Attraverso la roccia

di Luca Lista

28

[as] intersezioni

Misure vulcaniche.

di Giovanni Macedonio

31

Precisamente anomalo

di Luca Trentadue

33

A stretto raggio

di Aldo Antognini ed Elisa Rapisarda

38

[as] con altri occhi

Un uomo curioso.

di Luca "Militant A" Mascini

42

[as] traiettorie

Dalle stelle alle star.

di Francesca Mazzotta

44

[as] riflessi

Profondo blu.

di Eleonora Cossi

46

[as] illuminazioni

Raggi cosmici in tasca.

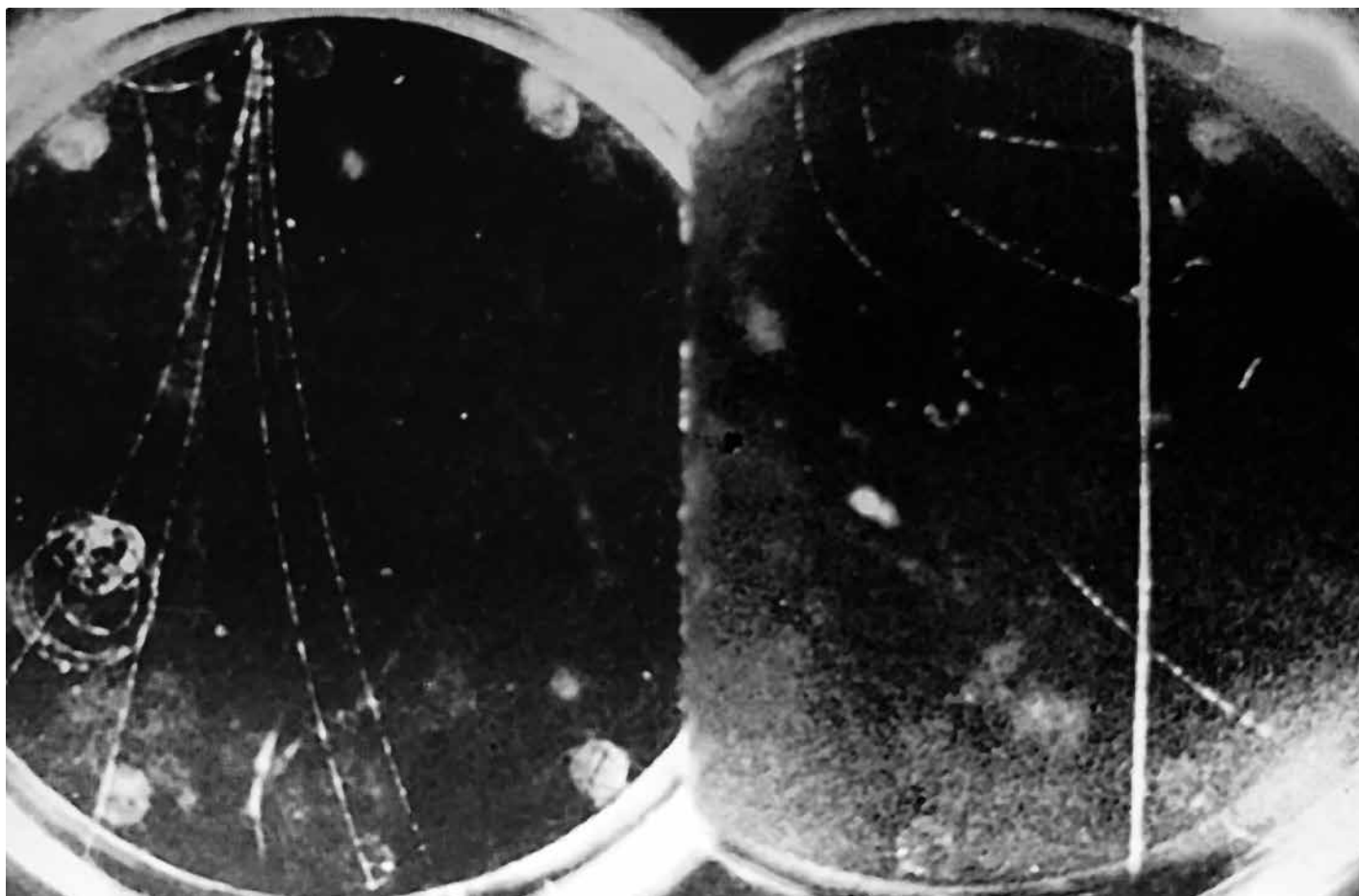
di Delia Tosi e Justin Vandenbroucke

48

Una vita da mediano

Storia della più elegante, eclettica e robusta tra le particelle

di Filippo Ceradini



A metà degli anni '30 si conoscevano l'elettrone, il positrone, il protone, il neutrone ed era stata ipotizzata l'esistenza del neutrino. Era un'epoca di grande fermento culturale e di progresso tecnologico. Erano state formulate le prime teorie delle interazioni tra particelle: la teoria del decadimento β (vd. fig. d a p. 11) da Enrico Fermi nel 1934, la teoria delle "forze nucleari" da Hideki Yukawa nel 1935, la teoria quantistica della radiazione elettromagnetica da vari studiosi, tra cui Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Viktor Weisskopf e Walter Heitler (quest'ultimo l'aveva esposta in un suo famoso trattato del 1936). I fisici sperimentali avevano sviluppato tecniche per rivelare le particelle ionizzanti con la camera di Wilson e il contatore di Geiger-Müller, e con questi strumenti si studiavano le particelle prodotte in interazioni dei raggi cosmici nell'atmosfera. Gli esperimenti erano condotti per lo più in alta montagna, al Pike's Peak sulle Montagne Rocciose, al Pic du Midi sui Pirenei e al Plateau Rosa sulle Alpi. Nel 1936, studiando le tracce in una camera di Wilson, Carl Anderson e Seth Neddermeyer

osservarono una particella che non si poteva identificare né con il protone né con l'elettrone. La nuova particella, a differenza degli elettroni, rilasciava tracce più nitide e definite e sembrava non perdere energia lungo il percorso. L'anno successivo, Jabez Street ed Edward Stevenson stimarono che questa particella avesse una massa intermedia tra quella dell'elettrone e quella del protone e, per questo, fu chiamata "mesotrone", oppure semplicemente "mesone" (da *mesos* che in greco vuol dire "nel mezzo"). Come si sarebbe capito un decennio dopo, era stato scoperto quello che oggi chiamiamo "muone", la più elegante, eclettica e penetrante tra le particelle. Misure più accurate permisero di definire le caratteristiche del mesotrone: una massa pari a circa 200 volte la massa dell'elettrone e una carica elettrica sia positiva che negativa. Inoltre, si verificò che i mesotroni positivi decadevano in positroni, con uno spettro di energia continuo, caratteristica tipica del decadimento β dei nuclei. Più problematica fu la misura della loro vita media.

a.
Fotografie di tracce osservate in una camera di Wilson, di diametro di circa 30 cm. Uno sciame di elettroni e positroni, a sinistra, una singola particella ionizzante, a destra.

A quei tempi non si disponeva di strumenti di rivelazione con buona risoluzione temporale e per determinare la vita media dei mesotroni si confrontavano le misure del flusso di queste particelle nei laboratori in montagna ad alta quota con quelle a livello del mare. I primi risultati furono discordanti a causa del diverso comportamento dei mesotroni negativi e positivi (i primi possono essere catturati dai nuclei mentre i secondi decadono in volo). Il problema fu risolto da Bruno Rossi che fin dal 1930 aveva sviluppato nuovi circuiti elettronici che permettevano di mettere in coincidenza temporale i segnali prodotti dai vari rivelatori usati in un esperimento. Nel 1941, Franco Rasetti e, indipendentemente da lui,

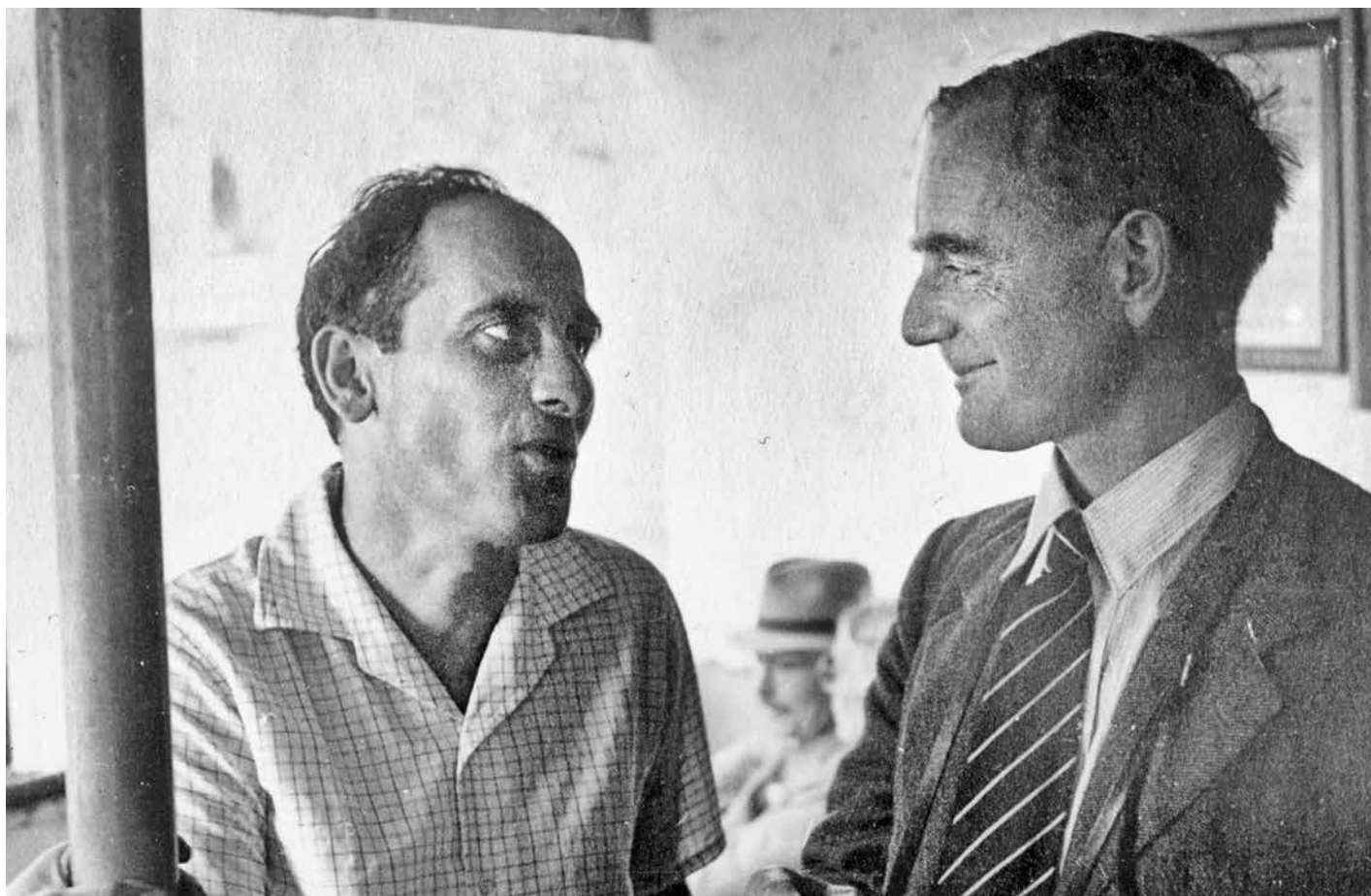
Bruno Rossi e Norris Nereson, utilizzando i nuovi circuiti accoppiati a contatori di Geiger-Müller, misurarono la vita media di queste particelle ottenendo un valore di 2,2 microsecondi. Questa misura fornì anche la prima verifica diretta della legge relativistica di dilatazione dei tempi: infatti, viaggiando alla velocità della luce i mesotroni percorrerebbero solo meno di settecento metri prima di decadere e non potrebbero giungere fino a noi dopo essere stati prodotti nell'alta atmosfera (vd. in *Asimmetrie* n. 17 p. 42, ndr). Il motivo per cui li osserviamo abbondantemente a livello del mare è che la loro vita media nel sistema del laboratorio (in cui viaggiano a velocità prossime a quella della luce) risulta notevolmente dilatata rispetto ai 2,2

microsecondi della vita media nel loro sistema di riposo.

Fino ai primi anni '40 si riteneva che il mesotrone fosse la particella mediatrice delle forze nucleari immaginata da Yukawa nel 1935. La teoria di Yukawa (vd. in *Asimmetrie* n. 7 p. 12, ndr) prevedeva che i costituenti del nucleo atomico, protoni e neutroni, interagissero e fossero legati tramite lo scambio di particelle aventi una massa dell'ordine di qualche centinaio di masse elettroniche, una caratteristica condivisa dal mesotrone. L'identificazione del mesotrone con la particella di Yukawa sembrava naturale, ma venne smentita dall'esperimento di tre giovanissimi ricercatori italiani, Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni, che durante la seconda



b.
Franco Rasetti, in una foto del 1941. Negli anni '30 Rasetti faceva parte del famoso gruppo dei ragazzi di via Panisperna.



guerra mondiale facevano ricerche sui raggi cosmici nell'allora nuovo Istituto di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza" e, dopo il bombardamento di San Lorenzo, trasferirono gli strumenti nel liceo Virgilio. Conversi, Pancini e Piccioni utilizzarono un metodo sperimentale innovativo che includeva i contatori di Geiger-Müller, circuiti di coincidenza e analizzatori magnetici (le lenti magnetiche sviluppate da Gilberto Bernardini): un moderno spettrometro. Le coincidenze dei contatori e le lenti magnetiche permettevano di selezionare i decadimenti dei mesotroni positivi e negativi. I mesotroni venivano fatti passare attraverso materiali detti "assorbitori" con un numero atomico molto diverso, come il carbonio o il ferro, al cui interno decadevano. L'analisi delle misure dei diversi fenomeni di cattura nucleare e decadimento dei mesotroni positivi e negativi mostrò che il mesotrone non era soggetto alla forza nucleare e non poteva quindi essere la particella di Yukawa (vd. anche p. 13, ndr).

La sua natura fu chiarita poco dopo, osservando le tracce di una particella "madre" di massa leggermente maggiore,

che decade in un mesotrone e in un'altra particella neutra invisibile (che fu poi identificata come neutrino). L'osservazione fu fatta da Cecil Powell, César Lattes e Giuseppe Occhialini, utilizzando delle lastre di emulsione fotografica di grande sensibilità sviluppate in collaborazione con la ditta Ilford. La particella madre fu chiamata mesone- π , mentre alla particella "figlia" (il "vecchio" mesotrone), venne dato il nome di mesone- μ . Si capì allora che il mesone- π era proprio la particella di Yukawa. Il μ , che ben presto fu ribattezzato "muone", era invece una particella del tutto nuova e inattesa da un punto di vista teorico. Oggi sappiamo che il μ è una particella elementare, appartenente alla categoria dei "leptoni" (dal greco *leptos*, leggero). Il muone ha perso quindi la definizione di "mesone", nome che fu dato a una categoria di adroni (particelle soggette all'interazione forte, l'interazione fondamentale alla base delle forze nucleari), costituiti da un quark e un antiquark. Il mesone- π (chiamato poi più comunemente "pione"), invece, è un vero e proprio "mesone", di massa pari a 140 MeV (ovvero 274 volte la massa dell'elettrone).

c.
Giuseppe Occhialini (a sinistra)
e Cecil Powell (a destra).

[storia del muone]

anni

1935

1940

1945

1950

1955

1960

1965

1970

1975

1980

1985

1990

1995

2000

2005

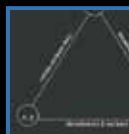
2010

2015

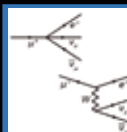
2020



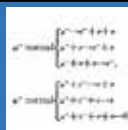
1942
Rasetti, Rossi e Nereson
Vita media del mesotrone



1947-8
Pontecorvo, Puppi
Universalità dell'interazione debole



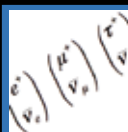
1947
Pontecorvo e Hicks
Decadimento del muone



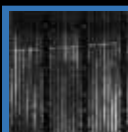
1953
Konopinski e Mahmoud
Conservazione del numero leptonico



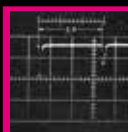
dal 1958
Ricerca di processi Lfv



1957-9
Nishijima e Pontecorvo
Ipotesi di due famiglie leptoniche



1962
Lederman, Schwartz, Steinberger
Il neutrino muonico è distinto dal neutrino elettronico



1963
Frisch e Smith
Misura della vita media di muoni cosmici, test della dilatazione relativistica della vita media dei muoni



1977
Bailey
Misura del tempo di vita del muone al CERN



dal 1982 Superkamiokande
dal 1989 al 2000 Macro
Osservazione dei muoni prodotti da neutrini atmosferici



1982
Rubbia
Decadimento di Z in $\mu\mu$



dal 2002
MEG
Ricerca del decadimento $\mu \rightarrow e\gamma$



2015
IceCube
Evento di muone indotto da neutrini 4 PeV



2012
CMS
Decadimento del bosone di Higgs in 4 muoni



1937
**Neddermeyer e Anderson,
 Street e Stevenson**
 Scoperta del mesotrone



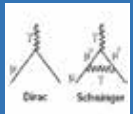
1947
**Conversi, Pancini e
 Piccioni**
 Il mesotrone non è la
 particella di Yukawa



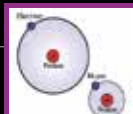
1947
Lattes, Occhialini e Powell
 Il mesotrone è il prodotto di
 decadimento del mesone- π



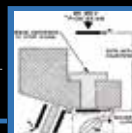
1947
Kusch
 Misura del momento
 magnetico
 dell'elettrone



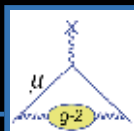
1948
Schwinger
 Descrizione dell'anomalia
 del momento magnetico
 dei leptoni



1953
Fitch e Rainwater
 atomo muonico



1957
Garwin, Lederman e Weinrich
 Osservazione della violazione
 di P nei decadimenti del muone



dal 1958
 Misura del momento magnetico
 del muone (esperimenti al CERN
 Muon Ring, al Brookhaven
 National Laboratory e al Fermilab)



1960
Hughes
 Produzione
 del muonio



1962
Alvarez et al.
 Studio della piramide
 di Giza con i muoni

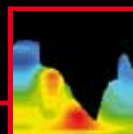
- proprietà del muone e interazioni deboli
- sistemi esotici
- muografia
- rivelazione di neutrini muonici
- decadimenti in muoni
- test di relatività



dal 2005
 Spettroscopia
 muonica per la
 misura del raggio
 del protone



dal 2016
 Esperimento
 Muon g-2 al Fermilab



2007
 Prima radiografia
 muonica di un vulcano
 (Monte Asama)



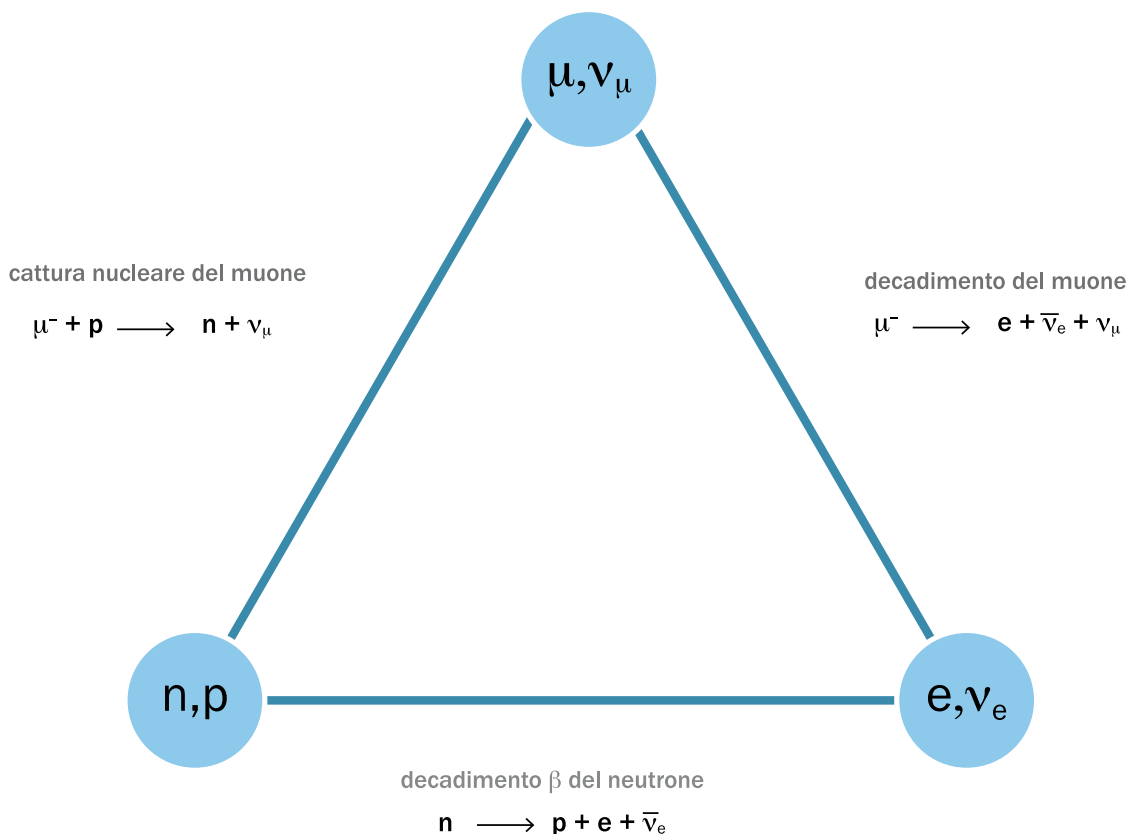
2013
 Nascita dei tomografi
 muonici per lo
 screening di navi e
 container

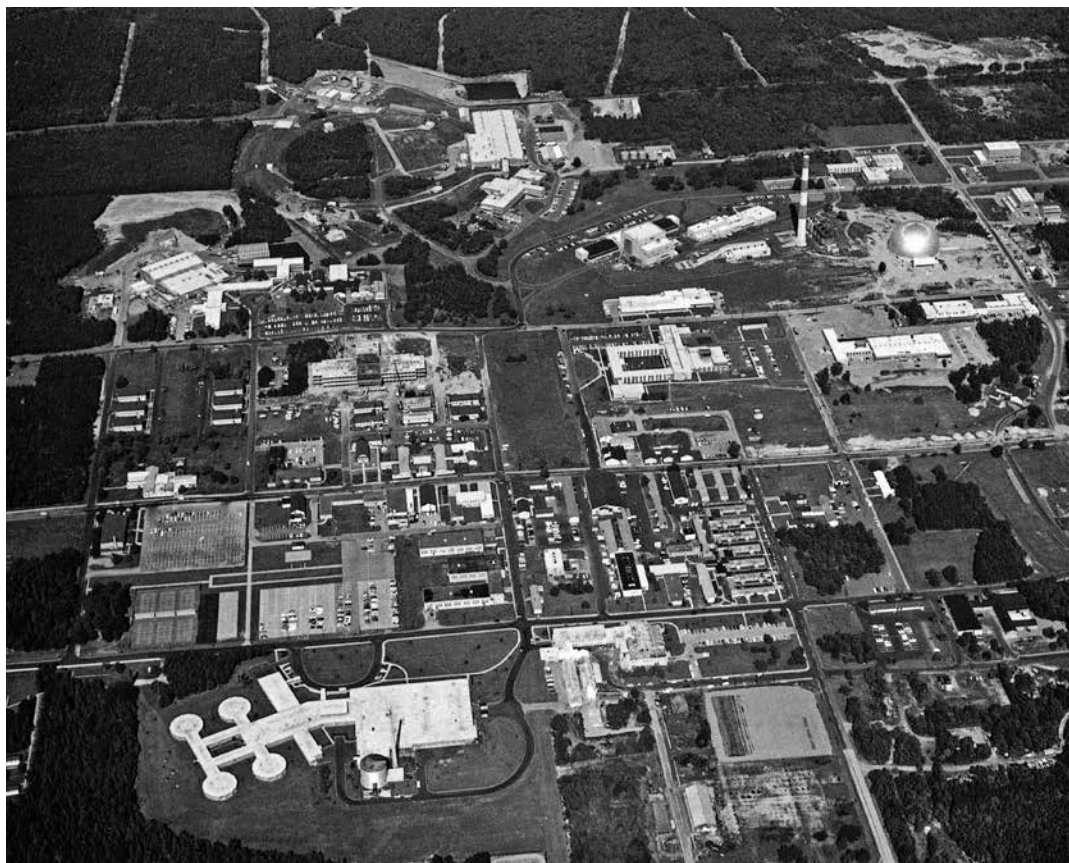
Subito dopo la scoperta di Lattes, Occhialini e Powell, gli italiani Bruno Pontecorvo e Giampietro Puppi, analizzando il decadimento β del neutrone, il decadimento del muone in elettrone e la cattura del muone da parte di un neutrone (vd. fig. d), giunsero alla conclusione che si trattava di processi dovuti tutti alla stessa interazione, l'interazione debole descritta dalla teoria di Fermi. Questa è la più peculiare tra le interazioni fondamentali, quella che permette il maggior numero di trasgressioni. La teoria originale di Fermi, estesa ai quark dalla teoria di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, prevede un unico parametro fondamentale, la "costante universale di Fermi", che è determinata dalla vita media e dalla massa proprio del muone. La massa del muone è ottenuta con grande precisione dai livelli di energia dell'atomo muone-elettrone (μ^+e^- , detto "muonio"), e vale 106 MeV (207 volte la massa dell'elettrone). La vita media del muone è stata poi misurata con precisione crescente utilizzando fasci intensi di muoni, e il suo valore attuale è di 2,197 microsecondi: come risultato la costante universale di Fermi è nota attualmente con la precisione di una parte per milione, e questo grazie al solo muone. L'unico decadimento del muone che

conosciamo è in elettrone, neutrino e antineutrino. Per lungo tempo si sono cercati altri modi di decadimento. Il primo tentativo risale al 1948, quando Ted Hincks e Bruno Pontecorvo cercarono senza successo il decadimento di un muone in elettrone e fotone. Nel 1953 Emil Konopinski e Hormoz Mahmoud introdussero il concetto di "numero leptonico", come quantità conservata nell'interazione debole. L'idea era che l'elettrone, il muone negativo e il neutrino avessero un numero leptonico pari a +1, e che il positrone, il muone positivo e l'antineutrino avessero un numero leptonico pari a -1. Nel decadimento del muone, in effetti, il numero leptonico si conserva se si ipotizza che vengano emessi un neutrino e un antineutrino.

Alla fine degli anni '50, per opera di Kazuhiko Nishijima e Bruno Pontecorvo, emerse l'idea dell'esistenza di "famiglie" leptoniche e di due tipi di neutrino: il neutrino elettronico e il neutrino muonico. L'elettrone e il corrispondente neutrino elettronico, da una parte, il muone e il corrispondente neutrino muonico, dall'altra, costituiscono due distinte famiglie leptoniche, ognuna con il proprio numero leptonico conservato. Il decadimento in elettrone e fotone è invece proibito, perché

d.
Il cosiddetto "triangolo di Puppi", che illustra il fatto che tre processi diversi (decadimento β , decadimento del muone e cattura muonica) sono accomunati dalla stessa costante di accoppiamento, essendo dovuti alla stessa interazione universale, l'interazione debole.





e.
Vista aerea del Laboratorio di Brookhaven nel 1963 circa. Nella parte centrale superiore della foto è visibile l'Alternating Gradient Synchrotron (Ags).

viola la legge di conservazione del numero leptonico muonico ed elettronico. Ciò comporta che il neutrino e l'antineutrino prodotti nel decadimento del muone appartengano a famiglie diverse.

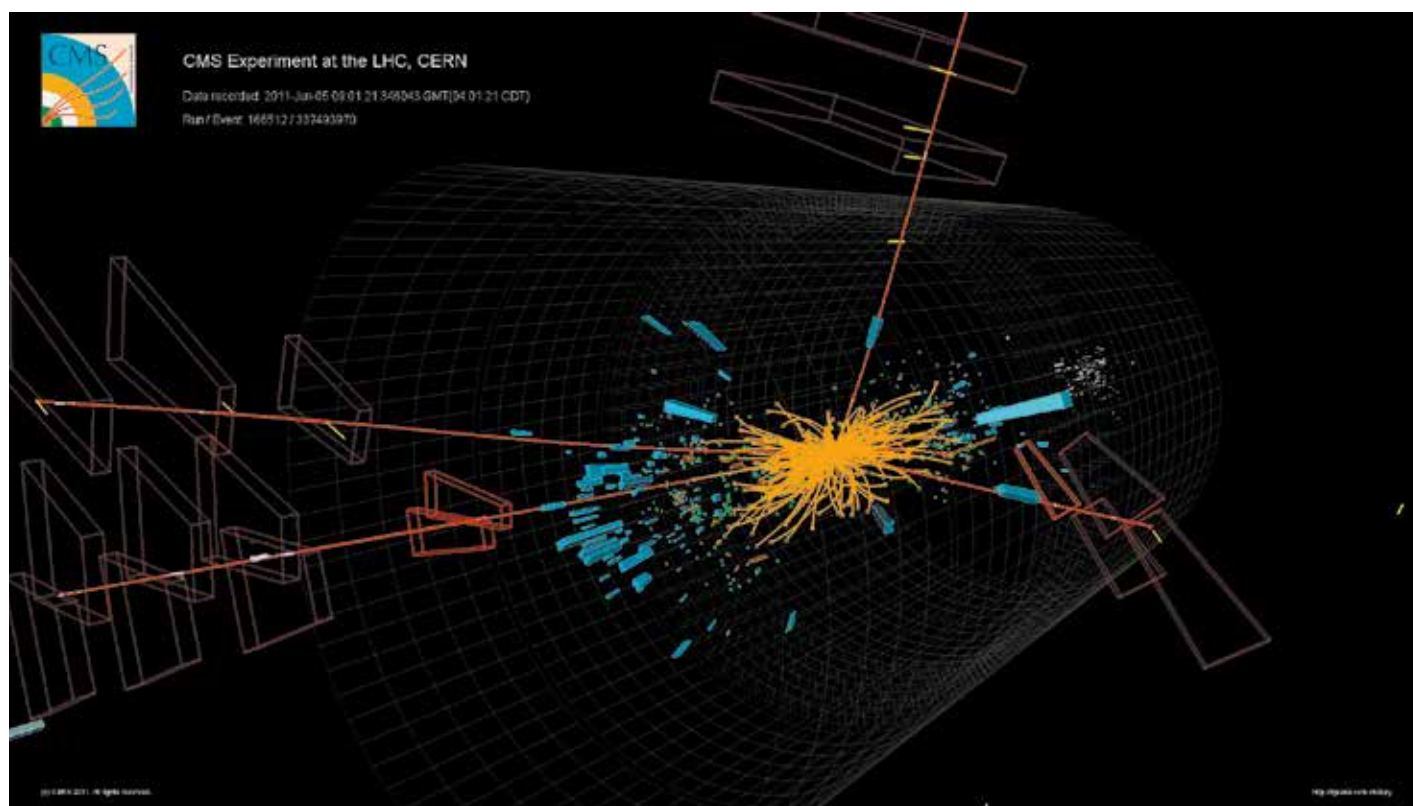
Per verificare questa ipotesi Pontecorvo e, indipendentemente, Melvin Schwartz proposero di usare fasci di neutrini prodotti nel decadimento di pioni in muoni. Utilizzando il più potente acceleratore dell'epoca, l'Ags di Brookhaven, nel 1962 Leon Lederman, Jack Steinberger e Melvin Schwartz mostrarono che i neutrini prodotti con il fascio dell'Ags, fatti interagire con un bersaglio di alluminio, producevano a loro volta muoni ma non elettroni: erano dunque neutrini di tipo muonico. Veniva così confermata l'esistenza di due famiglie leptoniche, cui si sarebbe aggiunta in seguito la terza, quella del leptone τ , scoperto dal gruppo di Martin Perl nel 1975.

Decadimenti del muone in violazione della legge di conservazione del numero leptonico sono stati lungamente cercati, fino a raggiungere oggi un limite superiore sui decadimenti proibiti di uno su un milione di milioni. Il muone ha sempre difeso strenuamente la sua identità e l'identità della sua famiglia distinta dalle altre (vd. pp. 15 e 18, ndr). Tra gli anni '50 e gli anni '70 il muone è stato il protagonista di molte misure che hanno prodotto importanti risultati. Nel 1953 Val Fitch e James Rainwater introdussero un nuovo metodo per misurare il raggio dei nuclei basato sulla formazione di atomi muonici. Se un nucleo cattura un muone negativo, questo orbita intorno al nucleo a distanza molto più piccola

degli elettroni e i raggi X emessi da questo atomo esotico risentono in modo molto più netto delle dimensioni del nucleo. Con questo metodo, negli anni successivi, sono stati misurati in modo sistematico i raggi di vari nuclei. Aumentando la precisione delle misure, in tempi recenti è stato ottenuto un risultato piuttosto sorprendente: il raggio del protone misurato nell'idrogeno muonico è diverso da quello misurato con altri metodi! È quello che oggi si chiama il *proton radius puzzle* che intriga i ricercatori e ha stimolato nuove verifiche (vd. p. 38, ndr).

Un altro relevantissimo risultato fu la verifica della violazione della "parità" nell'interazione debole (vd. in Asimmetrie n. 16 p. 33). Nel 1956 due giovani fisici teorici, Tsung-Dao Lee e Chen-Ning Yang, per spiegare il bizzarro comportamento di alcune particelle proposero che le interazioni deboli, responsabili del decadimento β dei nuclei e del decadimento del muone, non fossero invarianti per trasformazioni di parità, cioè distinguessero tra destra e sinistra. Il muone, come l'elettrone, ha uno spin che produce un dipolo magnetico e questo può avere due orientazioni nella direzione del moto: destrorsa o sinistrorsa.

L'idea di Yang e Lee era che tutti i fermioni potessero avere un comportamento diverso in queste due orientazioni. Questa ipotesi può essere verificata, studiando il decadimento del muone in elettrone. Pochi mesi dopo la proposta teorica di Lee e Yang, Richard Garwin, Leon Lederman e Marcel Weinrich misurarono la direzione degli elettroni prodotti nel decadimento



di muoni, di cui si conosceva l'orientazione dello spin. L'ipotesi di Lee e Yang venne così confermata e, in più, Garwin, Lederman e Weinrich ebbero la felice intuizione di mettere in rotazione il dipolo magnetico del muone e osservarono che la direzione dell'elettrone seguiva quella dello spin del muone. Da questo iniziò una lunga campagna di esperimenti per misurare il cosiddetto "momento magnetico del muone". Esperimenti sempre più precisi, effettuati intrappolando muoni di carica positiva o negativa in un "anello magnetico", hanno mostrato che il momento magnetico del muone ha un valore diverso da quello previsto dai calcoli teorici nell'ambito dell'elettrodinamica quantistica. Le misure e i calcoli hanno raggiunto la precisione di una parte per milione e per chiarire l'origine di quello che si chiama anche il *muon g-2 puzzle* si stanno progettando misure e impostando calcoli teorici che raggiungano precisioni

più spinte (vd. p. 33, ndr). I muoni, infine, sono presenti negli stati finali di molti processi subnucleari e ciò li ha resi importanti protagonisti nella scoperta di varie particelle. I bosoni W e Z, mediatori dell'interazione debole, ad esempio, sono stati osservati per la prima volta dalla collaborazione UA1 al Cern guidata da Carlo Rubbia nel decadimento in muoni. E lo stesso bosone di Higgs, nel 2012, ha dato prova della propria esistenza disintegrandosi, oltre che in fotoni, in uno stato finale con quattro muoni. "E questo chi l'ha ordinato?", disse del muone il grande fisico statunitense Isidor Rabi, quando fu chiara la natura di questa nuova particella, che non sembrava rispondere ad alcuna necessità di carattere teorico. Settant'anni dopo, di fronte alla ricchezza della fisica dei muoni e alle conoscenze sul mondo subnucleare che ci ha fornito, non possiamo che rallegrarci della sua esistenza.

f.
Visualizzazione di un evento di produzione di una coppia di bosoni Z, prodotti di decadimento del bosone di Higgs, in cui si possono osservare quattro muoni (le linee rosse).

Biografia

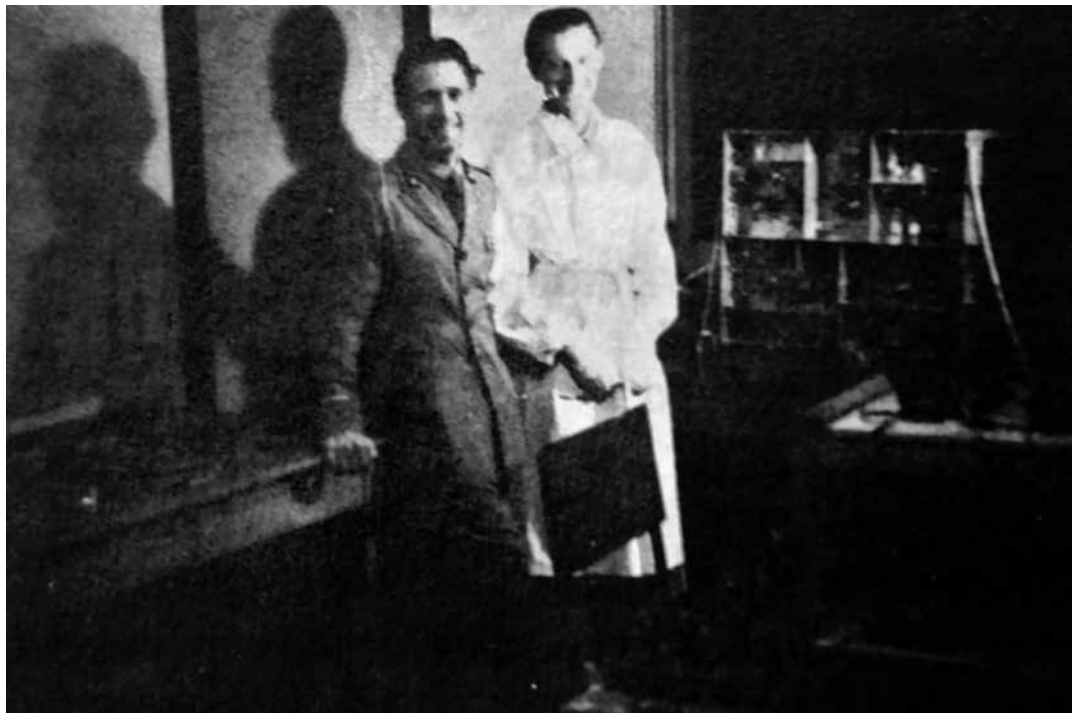
Filippo Ceradini è stato ricercatore Infn, professore all'Università Sapienza di Roma dal 1987 e uno dei fondatori dell'Università Roma Tre nel 1992. L'incontro con il muone è avvenuto con la tesi di laurea nel 1970 ai Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf), dove ora partecipa all'esperimento Kloe. Ha fatto ricerca al Cern con l'esperimento UA1, è stato tra gli iniziatori del progetto RD5 su metodi di trigger e misura di muoni in esperimenti al Lhc e poi dell'esperimento Atlas.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.1

Muoni sotto le bombe.

di Giovanni Battimelli

storico della fisica



a.
Marcello Conversi e Oreste Piccioni
nello scantinato del liceo Virgilio.
Il luogo fu scelto anche per la
sua vicinanza al Vaticano, che gli
alleati non avrebbero mai osato
bombardare.

“La mia opinione personale è che la moderna fisica delle particelle abbia avuto inizio negli ultimi giorni della seconda guerra mondiale, quando un gruppo di giovani italiani, mentre si nascondevano alle truppe di occupazione tedesche, cominciarono un notevole esperimento.”, commentò Luis Alvarez, in un passaggio del suo discorso di accettazione del premio Nobel. Si riferiva a un risultato pubblicato nel febbraio 1947 su *Physical Review*: una breve nota a firma di Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni dal titolo “*On the Disintegration of Negative Mesons*”. Nell’articolo veniva comunicato l’esito di un esperimento, che avrebbe sconvolto radicalmente il panorama della fisica delle particelle. Il mondo dei costituenti elementari della materia si era arricchito, negli anni ‘30, di alcuni nuovi componenti: all’elettrone e al protone si erano aggiunti via via il neutrone, il positrone, il neutrino (allo stato di oggetto teorico, non ancora identificato sperimentalmente) e infine il mesotrone. La “ragion d’essere” del mesotrone (ben presto ribattezzato mesone, vd. anche p. 4, ndr) era stata fornita dalla teoria di campo di Yukawa, che prevedeva come mediatore delle interazioni forti dei nuclei una particella massiva assai simile al mesotrone dei raggi cosmici.

Nell’ipotesi che il mesotrone fosse la particella di Yukawa la teoria sviluppata da Sin-Itiro Tomonaga e Gentaro Araki prevedeva un ben definito comportamento dei mesoni dei raggi cosmici in presenza di un materiale assorbente. In particolare, si sarebbe dovuta registrare una netta differenza tra mesoni positivi e negativi: i primi non avrebbero potuto interagire con i nuclei a causa della repulsione elettrostatica, e avrebbero quindi dovuto decadere nell’assorbitore, mentre i secondi avrebbero dovuto subire il processo di cattura nucleare senza avere il tempo di decadere spontaneamente. Ma i risultati ottenuti dai fisici di Roma mostravano che i mesoni a fine percorso non si comportavano affatto secondo queste previsioni. La collaborazione tra i tre fisici era cominciata nei primi anni della guerra, con la messa a punto della strumentazione necessaria per lo studio della vita media del mesotrone, in particolare l’elettronica veloce e i circuiti di coincidenza. Dopo il bombardamento di San Lorenzo del luglio 1943, che aveva coinvolto gli edifici della nuova città universitaria, tutta l’apparecchiatura fu trasportata negli scantinati del liceo Virgilio nei pressi del Vaticano. Qui la misura della vita media fu effettuata da Conversi e Piccioni (Pancini si era spostato

al nord dopo l'8 settembre, combattendo come comandante di una formazione partigiana in Veneto), durante i mesi dell'occupazione tedesca di Roma, nell'inverno 1943-1944, ottenendo un risultato comparabile con quello che negli stessi mesi avevano ottenuto Rossi e Nereson negli Stati Uniti. I due passarono quindi allo studio del comportamento dei mesoni arrestati in un assorbitore di ferro, e i risultati ottenuti in questo secondo esperimento sembravano in pieno accordo con le previsioni teoriche: la metà circa dei mesoni in arrivo dava segno di prodotti di decadimento. Una prova più convincente di questo effetto fu ottenuta in un terzo esperimento, condotto nel 1945 dopo la liberazione, in rinnovata collaborazione con Pancini, in cui furono utilizzate delle lenti magnetiche per selezionare i mesoni in funzione della carica e studiare separatamente il comportamento delle particelle positive e negative. L'evidenza confermava nettamente le previsioni di Tomonaga e Araki: i mesoni positivi decadevano, i negativi erano "mangiati" dai nuclei.

Per studiare il meccanismo di cattura nucleare dei mesoni negativi, che secondo le incerte previsioni dei teorici avrebbe potuto dare luogo all'emissione di radiazione gamma, i tre decisero di ripetere l'esperimento usando come assorbitore, anziché il ferro, un materiale più leggero, come il carbonio, trasparente a questa radiazione. E qui registrarono il dato completamente inatteso: nel carbonio non si evidenziava alcuna differenza tra mesoni di diversa carica, tutti decadevano allo stesso modo senza che i negativi mostrassero sensibili tracce di cattura nucleare. Il risultato fu comunicato per lettera ad Edoardo Amaldi, in visita

negli Stati Uniti nella seconda metà del 1946. Per suo tramite raggiunse i fisici americani ancora prima della pubblicazione sulla *Physical Review*, e ne seguì un'immediata reazione di nuove ipotesi teoriche e ricerche sperimentali. Fermi, Teller e Weisskopf provarono che l'anomalo comportamento dei mesoni negativi nel carbonio non poteva essere spiegato in alcun modo se si manteneva l'ipotesi che si trattasse della particella di Yukawa, perché il calcolo del tempo di cattura nucleare mostrava che questo avrebbe dovuto essere più breve della vita media del mesone di qualcosa come dodici ordini di grandezza. Bethe e Marshak formularono la teoria a due componenti del mesone, secondo cui i mesotroni osservati a livello del mare, quelli dell'esperimento di Roma, sarebbero i prodotti secondari, non soggetti all'interazione forte, del decadimento di un altro tipo di mesoni primari, da rintracciare negli strati alti dell'atmosfera. Queste sarebbero state le "vere" particelle previste da Yukawa, chiamate poi mesoni- π o pioni. E, puntualmente, le tracce di queste particelle furono subito individuate in emulsioni nucleari esposte in quota da Perkins, e da Occhialini e Powell. Ma l'interrogativo aperto era soprattutto quello relativo alla natura del mesone secondario (denominato in seguito mesone- μ , o muone), e alla sua collocazione nella gerarchia dei costituenti elementari, in cui non sembrava esserci più posto né giustificazione per un oggetto simile. L'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni dava inizio in tal modo a una fase completamente nuova della ricerca in fisica fondamentale, aprendo la strada allo studio delle proprietà delle particelle come il muone che oggi chiamiamo leptoni e alla comprensione dell'universalità delle interazioni deboli.



b.
Le lastre magnetiche originali utilizzate da Conversi, Pancini e Piccioni per il loro esperimento, conservate al Museo del Dipartimento di Fisica della Sapienza, a Roma.

Sapori di famiglia

La conservazione dei numeri leptonici

di Lorenzo Calibbi



a.
Il sapore, in fisica, è una caratteristica tipica (un “numero quantico”) di diversi leptoni e quark, altrimenti indistinguibili in base ad altre proprietà.

Compito della ricerca fondamentale è esplorare mondi ignoti, aprire porte verso una comprensione più profonda della natura. La fisica del muone ci fornisce diverse opportunità in questo senso, alcune delle quali hanno a che fare con il suo “sapore”.

Nel modello standard, conosciamo tre famiglie di leptoni, ognuna delle quali è costituita da una particella carica (rispettivamente l’elettrone, il muone e il leptone tau) e dal neutrino corrispondente. Analogamente, anche i quark si presentano in tre diverse generazioni o sapori (in inglese *flavours*), come sono stati fantasiosamente battezzati dai fisici. Perché vi siano tre

famiglie e perché le masse di particelle di differenti sapori siano tanto diverse è uno dei misteri che il nostro modello standard delle particelle, nonostante i grandi successi e le accuratissime predizioni di molti fenomeni, non arriva a spiegare. Molti ritengono che questo “mistero del sapore” possa essere spia di una teoria, non ancora formulata, delle particelle e delle loro interazioni, più fondamentale del modello standard. Come nel mondo della fisica classica, così in quello quantistico delle particelle, le leggi di conservazione rivestono grande importanza. Pensiamo ad esempio alla conservazione dell’energia. Vi sono alcune quantità

conservate, dette numeri quantici, che non hanno sempre equivalenti classici, dalle quali i fisici apprendono informazioni preziose per determinare le proprietà fondamentali delle particelle. Una di queste è il cosiddetto “numero leptonico”, vale a dire la somma del numero di leptoni (leptoni a carica negativa e neutrini) meno il numero di antileptoni (leptoni a carica positiva e antineutrini) in una data reazione. Finora non sono stati osservati processi (ovvero decadimenti di particelle o collisioni), in cui il numero leptonico iniziale sia diverso da quello finale, come del resto predetto dal modello standard. Ma c’è di più: il modello standard, nella sua formulazione



$$L: 1 = 1 + (-1) + 1$$

$$L_e: 0 = 1 + (-1) + 0$$

$$L_\mu: 1 = 0 + 0 + 1$$



$$L: 1 = 1 + 0$$

$$L_e: 0 \neq 1 + 0$$

$$L_\mu: 1 \neq 0 + 0$$

originaria in cui i neutrini non hanno massa, predice anche che i numeri leptonici associati ad ogni singola famiglia siano conservati, cioè che in una reazione non cambi, ad esempio, il numero di muoni e neutrini muonici meno il numero di antimuoni (muoni positivi) e antineutrini muonici, e lo stesso nel caso degli elettroni e dei tau. Tale predizione non è stata finora contraddetta da quanto osservato nel caso di processi dei leptoni carichi e, anzi, spiega la presenza di un neutrino e di un antineutrino fra le particelle prodotte nel decadimento del muone.

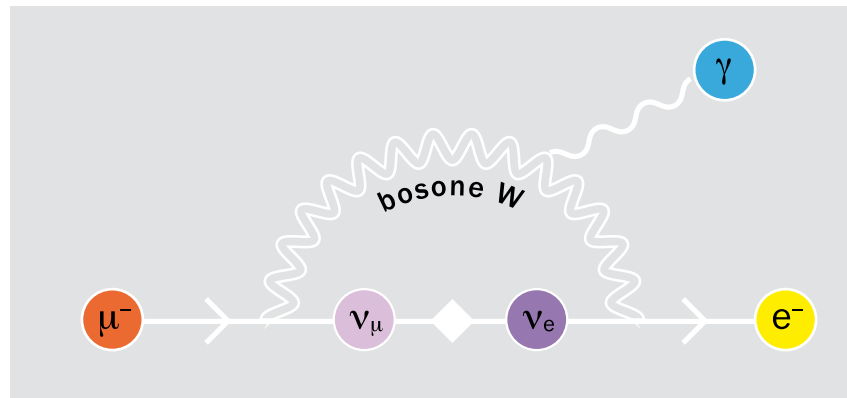
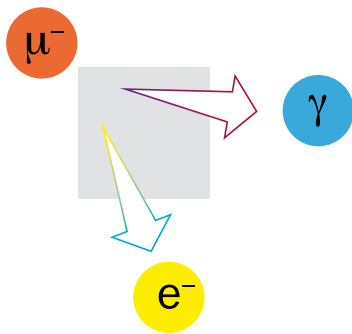
Il muone, infatti, decade con una probabilità prossima al 100% in un elettrone, un neutrino muonico e un antineutrino elettronico. Come mostrato nella fig. b, in questo processo non solo il numero leptonico totale, ma anche i numeri leptonici del muone e dell'elettrone sono singolarmente conservati: il sapore è preservato, nel caso di quello muonico viene semplicemente trasferito dal muone al suo neutrino. Diverso sarebbe il caso di un decadimento del muone in un elettrone e un fotone, un processo che i fisici cercano di osservare da più di settant'anni! Come vediamo sempre in fig. b, in tale decadimento il numero leptonico totale sarebbe conservato, ma non i numeri di famiglia: assisteremmo cioè a una trasformazione di sapore, da muonico a elettronico. Altrettanto accadrebbe nel caso di un muone che decadesse in un elettrone più una coppia elettrone-positrone. A prima vista, può sorprendere

che tali processi con cambiamento di sapore, spesso chiamati processi Lfv (dall'inglese *lepton flavour violation*), non siano stati ancora osservati. In primo luogo perché fenomeni analoghi avvengono piuttosto di frequente nell'ambito dei quark, i cui sapori si mescolano e trasformano. Inoltre, abbiamo da più di quindici anni l'evidenza che i numeri di famiglia leptonici non sono conservati nella propagazione dei neutrini.

Per illustrare quest'ultimo fenomeno, detto di "oscillazione dei neutrini", dobbiamo aprire una breve parentesi. Secondo la meccanica quantistica uno stato fisico, come per esempio una particella, può essere una sovrapposizione, una "miscela", di stati distinti. Così come il gatto del famoso esperimento concettuale di Schrödinger può trovarsi nell'imbarazzante situazione di sovrapposizione degli stati di vita e di morte (vd. in *Asimmetrie* n. 12 p. 14, ndr), meno drammaticamente un neutrino di un dato sapore è in realtà una miscela di neutrini di masse diverse. Ciò fa sì che vi sia una certa probabilità che neutrini di sapore definito, ad esempio prodotti da decadimenti di muoni, si trasformino, propagandosi, in neutrini di diverso sapore e vengano osservati in processi che coinvolgono elettroni o tau. Le misure effettuate dagli esperimenti che hanno osservato le oscillazioni dei neutrini mostrano inoltre che i tre sapori si mescolano in larga misura, senza che nessuno di essi prevalga, un po' come una torta venuta piuttosto male in cui i sapori dei diversi ingredienti (diciamo

b.

Se ci fosse un solo numero leptonico L, comune a elettroni e muoni, posto convenzionalmente uguale a 1 per le particelle (leptoni negativi e neutrini) e -1 per le antiparticelle (leptoni positivi e antineutrini), questo numero sarebbe conservato nel decadimento a sinistra, che rappresenta il decadimento del muone in elettrone, neutrino e antineutrino, che è quello che si osserva sperimentalmente, ma anche in quello di destra, in elettrone e fotone, che non è mai stato osservato. Se introduciamo invece due numeri leptonici distinti per famiglie o sapori (ovvero L_e per gli elettroni e i loro neutrini e L_μ per i muoni e i loro neutrini), assegnando, per ciascun sapore, di nuovo +1 alle particelle e -1 alle antiparticelle, ma 0 alle particelle o antiparticelle dell'altro sapore, il decadimento di sinistra conserva entrambi questi numeri, mentre in quello di destra né L_e né L_μ sono conservati. Si noti che la somma dei singoli termini di L_e e L_μ fa L.



dolce, aspro e salato) siano tutti egualmente percepibili. Dunque, il sapore dei neutrini, cioè il numero leptonico di famiglia, è, come dicono i fisici, “violato”, e non di poco. Perché dunque tale processo di violazione non è ancora stato osservato nel caso dei leptoni carichi, in particolare dei muoni? Torniamo all’ipotetico decadimento del muone in elettrone e fotone. Come abbiamo detto, tale processo Lfv è proibito nel modello standard, ma ora sappiamo che i neutrini oscillano cambiando di sapore. È pertanto possibile immaginare il processo rappresentato nella fig. c, in cui, secondo un altro caratteristico fenomeno quantistico, il muone emette per un tempo infinitesimale un neutrino muonico e un bosone W. Se il neutrino oscilla in un neutrino elettronico, e il bosone emette un fotone e poi trasforma il neutrino in elettrone, vediamo realizzato il nostro cambiamento di sapore dei leptoni carichi! Purtroppo però, se calcoliamo la probabilità che questo processo Lfv avvenga, scopriamo che dipende dal rapporto fra le minuscole masse dei neutrini e quella del W elevato alla quarta potenza e che quindi possiamo attenderci un solo decadimento di questo tipo ogni 10^{54} decadimenti ordinari, un numero decisamente troppo piccolo per poter essere mai osservato in un esperimento! Perché allora continuiamo a cercare processi di questo tipo? Proprio perché è dalle cose che riteniamo “impossibili” che abbiamo l’opportunità di imparare di più.

L’osservazione di una violazione del sapore leptonico dei leptoni carichi sarebbe infatti un segnale inequivocabile di nuova fisica al di là del modello standard e forse una porta verso la soluzione del sopra citato mistero del sapore. Inoltre, come abbiamo visto, l’estrema “soppressione” di tali processi Lfv (ovvero il fatto che la probabilità che avvengano è molto molto piccola) è una conseguenza della piccolezza delle masse dei neutrini, non del fatto che i numeri leptonici di famiglia siano quantità conservate, e quindi non è prevista nella maggior parte delle estensioni del modello standard che sono state proposte. Ad esempio, se le particelle che conosciamo avessero un partner supersimmetrico (vd. anche in *Asimmetrie* n. 18 p. 13, ndr), potremmo immaginare di sostituire nel diagramma di fig. c i neutrini e il W con i corrispondenti partner supersimmetrici, il che genererebbe il nostro processo senza la soppressione dovuta alla leggerezza dei neutrini e quindi potenzialmente alla portata degli esperimenti attualmente in costruzione.

c. Diagramma che mostra come sia teoricamente possibile che un muone decada in elettrone e fotone attraverso l’oscillazione (vale a dire il cambiamento di sapore) dei neutrini: il muone si trasforma in un bosone W e un neutrino muonico, entrambi virtuali; il neutrino muonico oscilla in un neutrino elettronico; nel frattempo il bosone emette un fotone ed è riassorbito dal neutrino elettronico, trasformandolo in un elettrone.

Biografia

Lorenzo Calibbi lavora all’Accademia Cinese delle Scienze di Pechino. Dopo il dottorato, conseguito all’Università di Padova, ha fatto ricerca alla Sissa di Trieste, a Monaco di Baviera e a Bruxelles. Si occupa di fisica delle particelle al di là del modello standard.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.2

Passaggi proibiti

Processi di violazione dei numeri leptonici

di Alessandro Massimo Baldini



a.
Mentre era ancora in Canada, Bruno Pontecorvo (la foto è di pochi anni dopo) cercò di chiarire quale fosse il modo principale di decadimento del muone, assieme al suo collega Ted Hincks.

La pressoché perfetta separazione tra le tre famiglie leptoniche note (e , μ , τ), predetta dal modello standard delle interazioni fondamentali, costituisce una sfida estremamente affascinante per i fisici sperimentali delle alte energie. La semplice osservazione di un qualsiasi processo elementare coinvolgente leptoni carichi che violasse questa regola (ovviamente senza gli opportuni neutrini a ristabilirla!) ci direbbe a chiare lettere che il modello standard non sarebbe più valido, ma che necessiterebbe di una radicale trasformazione.

Storicamente è stata proprio la non osservazione di processi di questo tipo, detti anche Lfv (vd. p. 15, ndr), cioè che violano la legge di conservazione del sapore leptonico, ad aver orientato la costruzione teorica del modello standard e il concepimento di tre famiglie separate. Furono per primi Bruno Pontecorvo, allora in Canada, e il suo collega Ted Hincks a cercare di chiarire quale fosse il modo principale di decadimento del muone. Con il loro esperimento del 1947, i due stabilirono un primo limite sulla possibilità che un muone decadesse in un elettrone e un fotone:

meno di un muone su dieci. Oggi sappiamo che la probabilità è molto molto più piccola, ma questo limite diede il via alla ricerca sperimentale dei processi Lfv, che ancora oggi ci appassiona. Il muone è indubbiamente una particella privilegiata per queste ricerche, perché ha una massa piccola, cosa che ne rende energeticamente favorevole la realizzazione di fasci intensi e inoltre fa sì che abbia, di fatto, un solo modo di decadimento, che ne rende più agevole la distinzione rispetto ai possibili modi di decadimento Lfv. Ogni particella, infatti, può decadere, cioè trasformarsi, solo in particelle più leggere. Quindi, nel caso del muone, queste sono l'elettrone, il fotone e i neutrini. Il tau, 17 volte più pesante del muone, può decadere invece in molti modi diversi, rendendone più complessa l'identificazione sperimentale.

Un'altra proprietà interessante del muone è che vive molto a lungo, circa 2,2 microsecondi! Può sembrare un tempo molto piccolo per i nostri standard, ma è sufficiente per permetterci di trasportare agevolmente i muoni dal punto di produzione

al punto di utilizzo, facendoli comodamente arrestare là dove i nostri rivelatori sono pronti per studiarne i possibili modi Lfv di decadimento. Il tau vive 7,5 milioni di volte meno del muone rendendo anche per questo aspetto molto più difficile la costruzione di rivelatori che possano “vederlo”.

Il decadimento di un muone in un elettrone e un fotone (sinteticamente scritto come $\mu \rightarrow e\gamma$) non è l'unico decadimento Lfv del muone che viene ricercato. Altre possibilità sono il decadimento in due elettroni e un positrone (scritto come $\mu \rightarrow 3e$, indicando con “e” sia i positroni che gli elettroni) e infine la conversione del muone in un elettrone ($\mu \rightarrow e$) in presenza di un nucleo atomico (vd. fig. b).

I tre processi sono legati dal fatto che un fotone può sia dar luogo a una coppia elettrone-positrone (questo avviene in presenza di un campo elettromagnetico esterno), sia essere assorbito da un nucleo atomico. A questo punto, l'esistenza del processo $\mu \rightarrow e\gamma$ implicherebbe quella degli altri due processi, anche se la probabilità per i secondi sarebbe più piccola di un fattore di circa cento, come si può calcolare “semplicemente” nell'ambito dell'elettrodinamica quantistica (la Qed, vd. in Asimmetrie n. 19 p. 4, ndr).

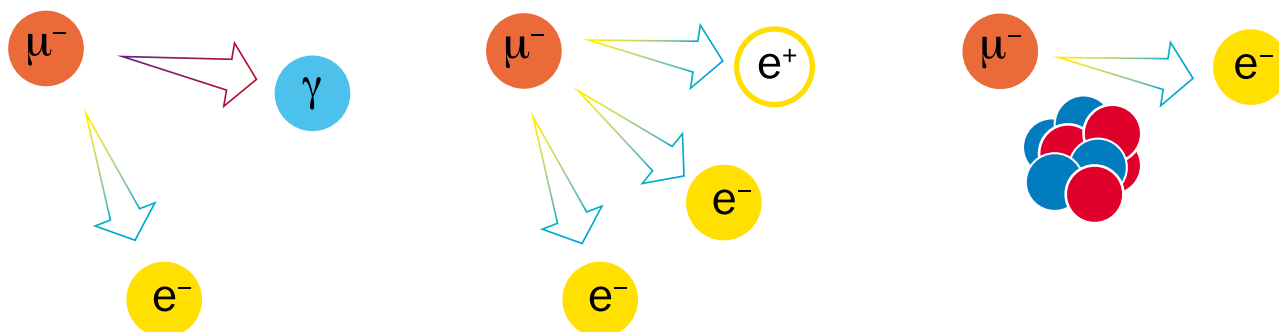
Meglio restringere la ricerca al solo decadimento $\mu \rightarrow e\gamma$ allora? Niente affatto! Innanzitutto, sperimentalmente si misurano meglio i parametri (direzione, energia) degli elettroni, rispetto a quelli dei fotoni, perché gli elettroni, essendo elettricamente carichi, lasciano tracce rivelabili con maggior accuratezza di quella ottenibile con i fotoni: questi ultimi, essendo neutri, non lasciano direttamente tracce nei rivelatori ma lo fanno solo dopo aver interagito con materiali

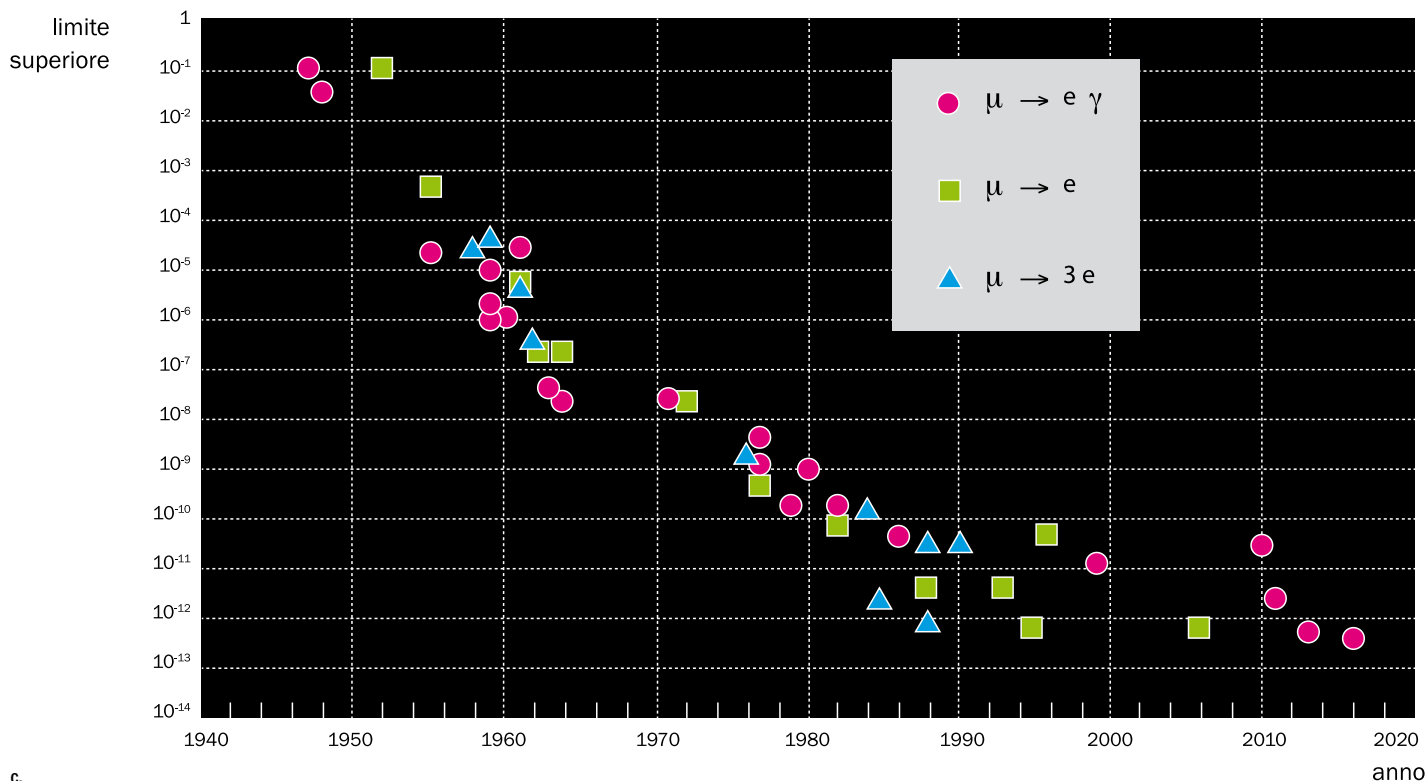
opportuni. La necessità di questo “doppio passo” rende le informazioni ottenute di qualità peggiore a quella ottenibile dagli elettroni. Risulta che la capacità di distinguere un buon segnale da un evento di fondo è molto migliore (almeno di un fattore 100) nel caso di $\mu \rightarrow 3e$ e $\mu \rightarrow e$ che di $\mu \rightarrow e\gamma$. In secondo luogo, teoricamente, possono esistere (anche se non sono presenti nelle teorie più in voga per il superamento del modello standard) processi Lfv senza la presenza del fotone, che potrebbero dar luogo a $\mu \rightarrow 3e$ e $\mu \rightarrow e$ ma non a $\mu \rightarrow e\gamma$. È quindi fondamentale che tutte queste ricerche vengano perseguite.

Nei 70 anni dall'esperimento di Pontecorvo e Hincks la sensibilità nella ricerca dei processi Lfv è aumentata di dieci miliardi di volte, come si vede nella fig. c a p. 19, dove la sensibilità raggiunta per i tre processi descritti sopra è riportata in funzione dell'anno di misura. Questi miglioramenti sono stati possibili grazie al notevole progresso nella produzione di fasci di muoni super intensi e nel miglioramento delle tecniche di rivelazione delle particelle elementari.

Uno dei laboratori dove si sono svolti molti degli esperimenti di ricerca dei processi Lfv è il Paul Scherrer Institut (Psi), vicino a Zurigo (vd. fig. b p. 39), che possiede una linea di fascio con un'intensità di 100 milioni di muoni al secondo, la più intensa al mondo in questo momento. Nel 2016 l'esperimento Meg al Psi ha concluso una prima fase di ricerca, stabilendo che meno di un muone ogni 2500 miliardi decade in un elettrone e un fotone! L'anno prossimo Meg ricomincerà la ricerca di $\mu \rightarrow e\gamma$ con rivelatori migliorati, cercando di incrementare la propria sensibilità di un ulteriore fattore 10. Tra qualche anno, inoltre, il Psi ospiterà sulla stessa linea

b.
Da sinistra a destra, i decadimenti $\mu \rightarrow e\gamma$, $\mu \rightarrow 3e$ e $\mu \rightarrow e$ (in presenza di un nucleo atomico).





c.
Il grafico mostra il miglioramento negli anni dei limiti superiori posti sulle probabilità dei decadimenti Lfv del muone.

di fascio un altro esperimento, chiamato Mu3e, per la ricerca di $\mu \rightarrow 3e$, che si propone di aumentare di un fattore 100 la sensibilità di questo decadimento rispetto al precedente limite. Due laboratori, il Jparc in Giappone e il Fermilab negli Usa, stanno costruendo delle linee di fascio di muoni ancora più intense, che raggiungeranno i 100 miliardi di muoni al secondo all'inizio degli anni 2020, per ricercare la conversione del muone in elettrone ($\mu \rightarrow e$) con una sensibilità di una conversione ogni 10 milioni di miliardi di muoni.

Le ricerche dei processi Lfv vengono chiamate "la frontiera dell'alta intensità", perché, come si è visto, per riuscire a vedere decadimenti rarissimi, ossia a bassissima probabilità, si usano fasci superintensi di muoni. È un po' come se volessimo essere abbastanza sicuri di vincere il primo premio di una lotteria, che è ovviamente un evento di bassissima probabilità: dovremmo acquistare un gran numero di biglietti, abbastanza vicino al numero totale delle possibili combinazioni. Questa analogia ci permette anche di farci un'idea più precisa di quanto siano rari i processi Lfv che stiamo cercando: la misura del 2016 di Meg ci dice che la probabilità di un muone di decadere in un elettrone e un fotone è un milione e mezzo di volte più piccola di quella di fare 13 al totocalcio mettendo a caso 1, X o 2, ovviamente con una sola schedina - stiamo veramente cercando un ago in un pagliaio! Anche le ricerche che si svolgono al Cern con l'acceleratore Large Hadron Collider (Lhc) cercano di verificare i limiti di validità del modello standard. Lo fanno in un modo differente, spingendo le energie dei fasci di protoni che collidono a valori

mai raggiunti in precedenza per cercare di produrre nuovi tipi di particelle mai osservati prima e che potrebbero essere la causa dei processi Lfv. Questi esperimenti vengono chiamati "la frontiera dell'alta energia".

Le due frontiere, quella dell'alta energia e quella dell'alta intensità, sono molto diverse per le tecniche utilizzate ma affrontano lo stesso tema: la ricerca di un avanzamento nella comprensione della microstruttura del nostro universo.

Biografia

Alessandro Massimo Baldini è ricercatore presso la sezione Infn di Pisa. Ha iniziato la propria attività scientifica al Cern in esperimenti di camera a bolle per lo studio delle proprietà dei neutrini e la ricerca di oscillazioni di sapore. Ha collaborato per molti anni all'esperimento Macro presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs) alla ricerca di un possibile segnale di neutrini da supernovae galattiche e successivamente ha lavorato presso la centrale nucleare di Chooz nelle Ardenne all'omonimo esperimento per la ricerca di oscillazioni di neutrino. È attualmente portavoce dell'esperimento Meg al Psi di Zurigo alla ricerca del decadimento del muone in un elettrone e un fotone.

Link sul web

<https://meg.web.psi.ch/>
<https://mu2e.fnal.gov/>
<http://comet.kek.jp>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.3

Luci e ombre

Come si rivelano i muoni

di Tommaso Chiarusi

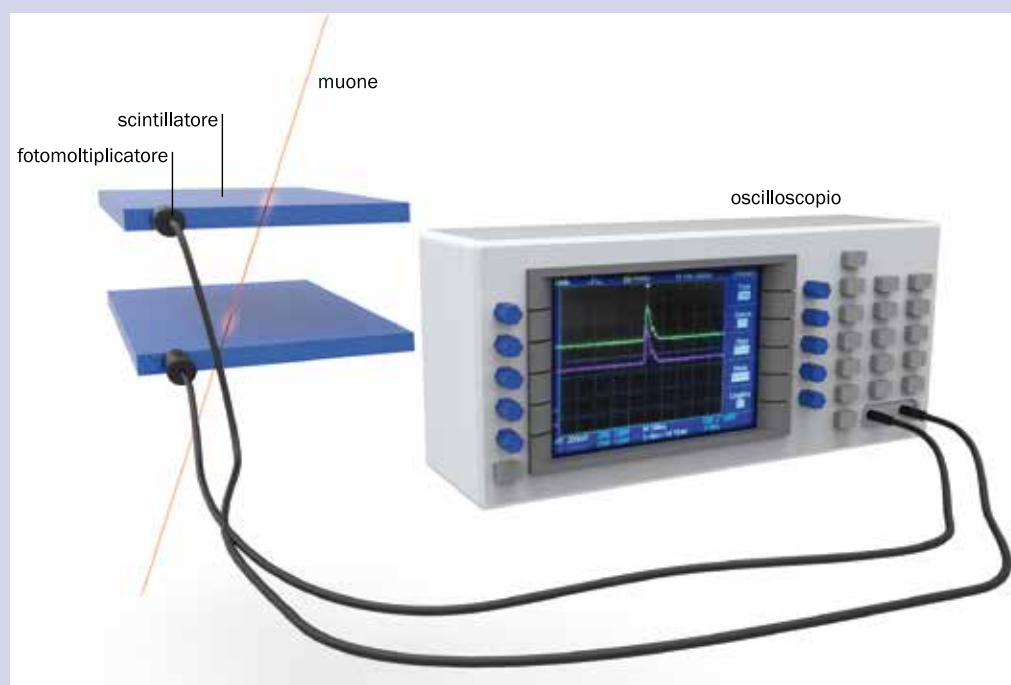
La prima esperienza con i muoni nel curriculum di un fisico avviene generalmente nei laboratori didattici (vd. p. 24 e 26, ndr), con semplici strumentazioni di misura degli “sciame” atmosferici (o *shower*, cioè docce, come le chiamano i fisici). Questi sciame sono composti di particelle secondarie, generate a partire dal primo impatto dei raggi cosmici con gli strati dell’atmosfera (vd. Asimmetrie n. 10, ndr). Dopo il neutrino, il muone è la particella più “penetrante”, cioè che ha perdite di energia molto contenute nell’attraversare la materia: è presente al livello del mare con un flusso di poche centinaia di eventi al secondo e un normale edificio non ne rappresenta uno schermo efficace. Dotato di carica elettrica, esso interagisce principalmente con

gli elettroni del mezzo in cui si muove. L’energia trasferita al suo passaggio viene poi riceduta dalla materia come radiazione. Così, non appena attiviamo un semplice sistema di rivelazione costituito da scintillatori e fotomoltiplicatori, il segnale dei muoni può essere facilmente osservato con un oscilloscopio (vd. fig. a).

Un salto in avanti ci porta ai moderni e complessi apparati sperimentali usati negli acceleratori di particelle, come Lhc al Cern. La collocazione in siti sotterranei garantisce la schermatura dai fotoni e da particelle cariche degli sciame atmosferici, eccezion fatta proprio per i muoni: a una profondità tra 50 e 100 m, il loro flusso si riduce di almeno due ordini di grandezza, con un’incidenza inferiore a poche decine di Hz per m². Tuttavia, le apparecchiature

di misura coprono aree che si estendono per centinaia di m², esponendosi a un significativo numero di muoni al secondo. Questi potrebbero confondersi con i muoni originati nelle collisioni negli acceleratori, rischiando di contaminare misure di estremo interesse come, ad esempio, quelle dell’importante segnale in quattro muoni legato alla produzione del bosone di Higgs (vd. in Asimmetrie n. 8 p. 18, ndr). Il “rumore” atmosferico, come si chiama in gergo questo “fondo” sperimentale, è però facilmente eliminabile dai dati acquisiti, richiedendo che le tracce siano originate in una zona molto ristretta, compatibile con il vertice delle interazioni, e che i primi segnali misurati coincidano con i tempi delle collisioni.

Per contro, i muoni atmosferici, attraversando dall’alto al basso tutto



a.
I muoni si possono rivelare con un semplice apparato di misura, come quello mostrato in figura, costituito da una coppia di scintillatori letti da fotomoltiplicatori. Imponendo una soglia sull’ampiezza del segnale e un opportuno intervallo di coincidenza temporale, nello schermo dell’oscilloscopio appaiono i segnali elettrici prodotti quando i due rivelatori sono attraversati dallo stesso muone cosmico.

l'apparato sperimentale, sono utilizzati per l'allineamento delle strutture di rivelazione, incluso l'apparato dedicato a tali particelle: lo "spettrometro per muoni". Esso è generalmente formato da strati di celle con un forte campo elettrico e riempite con gas ionizzabile. Il passaggio dei muoni è rivelato dalla migrazione degli elettroni liberati attratti sull'anodo della cella. Date le proprietà di penetrazione dei muoni, lo spettrometro è posizionato in ampi settori periferici rispetto al vertice delle interazioni, ed è generalmente permeato da un forte campo magnetico. Così, dalla misura della curvatura delle traiettorie dei muoni si può risalire alla loro energia, cui è legata in modo inversamente proporzionale. Migliore è la misura della curvatura, più piccolo è l'errore sull'energia.

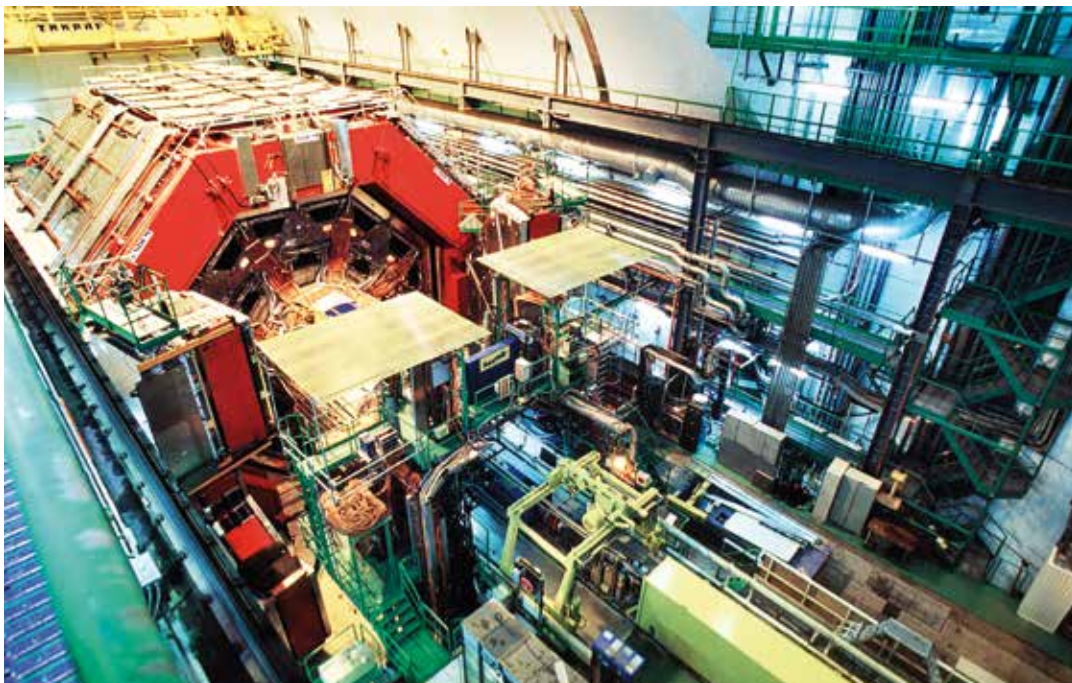
Uno dei primi esperimenti con gli acceleratori a sfruttare una parte dei propri apparati per la misura di muoni indotti da raggi cosmici è stato L3, attivo al collisore Large Electron-Positron (Lep) del Cern negli anni '90 del secolo scorso. Il suo ampio spettrometro per muoni, in combinazione con uno strato di circa 200 m² di scintillatori plastici posizionati appositamente sulla sua sommità, formavano l'esperimento L3+Cosmics, in presa dati dalla fine del 1998 fino a tutto il 2000.

Il gruppo di scintillatori sulla sommità serviva a discriminare i muoni atmosferici da quelli prodotti nell'acceleratore, e faceva scattare il sistema di acquisizione dei dati di L3+Cosmics in modo completamente separato da quello standard di L3 per le collisioni del Lep.

Il principale risultato di L3+Cosmics è consistito nella misura del flusso dei muoni atmosferici in un intervallo energetico da 10 a 2000 GeV (ben 10 volte oltre l'energia disponibile nelle collisioni del Lep), con una precisione complessiva migliore del 2%, cioè 10 volte maggiore della precisione con cui erano noti allora tali flussi da precedenti misure. Un'ulteriore importante misura è stata quella del rapporto del numero dei muoni positivi rispetto a quello dei muoni negativi, risultato pari a circa 1,28, cioè con una

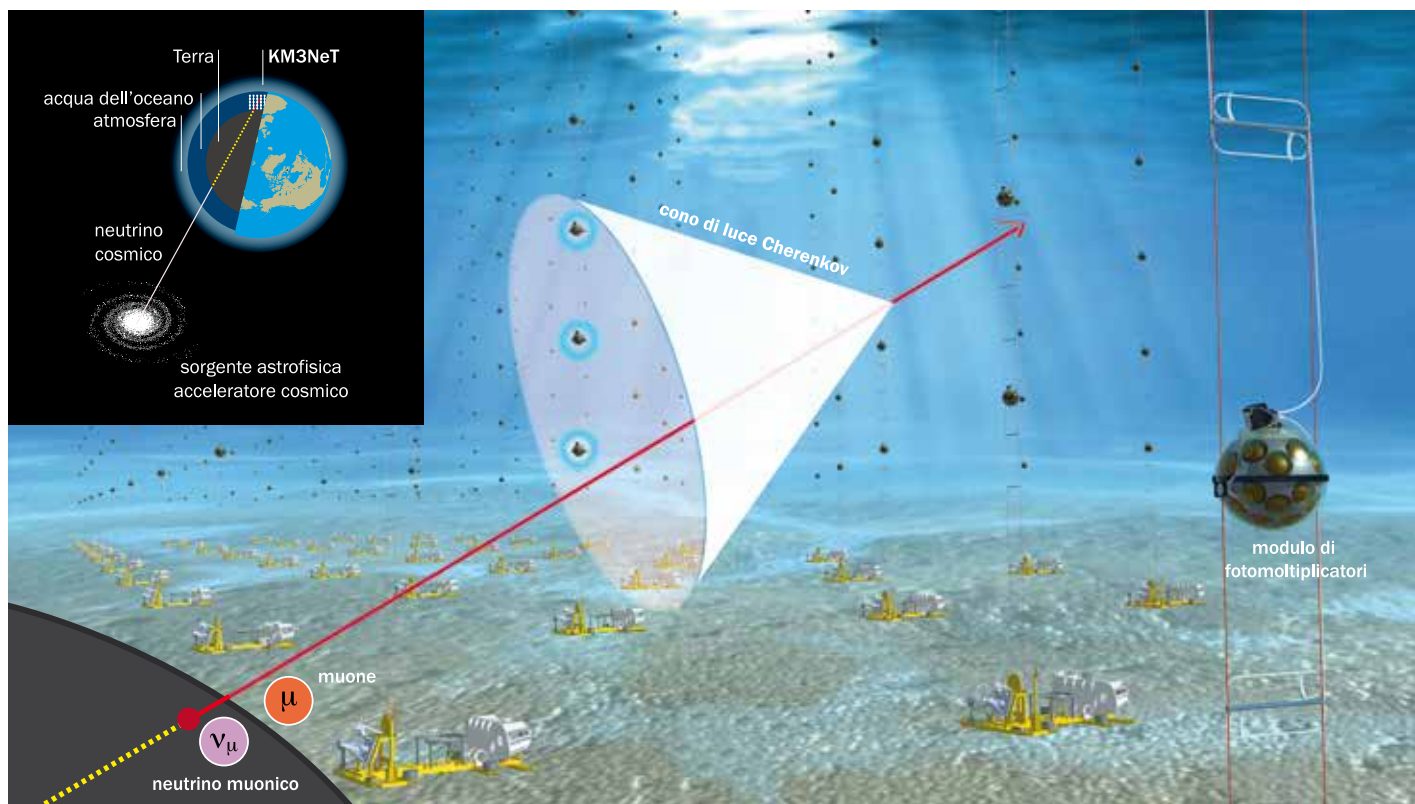
prevalenza di muoni positivi, con una precisione dell'1% su quasi tutto l'intervallo energetico. Tale rapporto è legato alla prevalenza di protoni (con carica elettrica positiva) nei raggi cosmici primari, e dà informazioni sulle interazioni di questi con l'atmosfera. Nello spettrometro era possibile separare eventi multipli appartenenti allo stesso sciame, dato importante poiché la molteplicità di muoni è legata sia all'energia che al tipo del raggio cosmico primario. Per affinare tali indagini, occorre però aggiungere altre informazioni sullo sciame, come la densità radiale delle particelle rispetto alla direzione di propagazione e il numero di elettroni. Misure impossibili sotto terra. Per questo L3+Cosmics si era dotato di una piccola rete di 50 scintillatori posti sul tetto del capannone soprastante l'infrastruttura sotterranea. Risultati più precisi sono stati ottenuti successivamente da esperimenti dedicati, con griglie di rivelatori estese dai circa 0,5 km² di Cascade/Cascade-Grande, attivo a Karlsruhe in Germania fino al 2013, ai 3000 km² del Pierre Auger Observatory (Pao) nella Pampa, in Argentina, ancora in presa dati.

I muoni sono stati anche protagonisti delle verifiche sperimentali delle oscillazioni dei neutrini, in primis nel 1998 con gli esperimenti Super-Kamiokande, sotto il Monte Ikeno in Giappone, e Macro, nelle sale sotterranee dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Tali esperimenti hanno chiarito il cosiddetto "neutrino-puzzle atmosferico", cioè la discrepanza del rapporto tra le abbondanze dei neutrini elettronici e muonici prodotti negli sciame atmosferici. Poiché i neutrini "parlano" soltanto attraverso la forza debole, essi possono essere rivelati solo in via indiretta, principalmente tramite la misura dei componenti carichi della propria "famiglia" (ovvero la coppia [ν , l], dove ν indica il neutrino del tipo l e $l = e, \mu, \tau$, cioè l'elettrone, il muone o il tau), in cui si convertono nelle interazioni con la materia. Misurando quindi un deficit del flusso di muoni generati nelle interazioni dei neutrini muonici atmosferici, è stato provato che circa la metà dei neutrini muonici cambiassero sapore, in accordo con la teoria



b.

Il rivelatore L3 al Lep. Lo spettrometro era suddiviso in ottanti, ciascuno composto da 3 strati di camere a deriva. In esse, decine di fili metallici paralleli all'asse del fascio fungevano da anodo, garantendo una risoluzione spaziale nel piano trasversale di circa 50 μm . Il grande solenoide, che conteneva tutto L3, con una corrente di 30 kA, creava un campo di induzione magnetica di circa 0,5 T in un volume superiore a 1000 m³.



delle oscillazioni che prevede la transizione da neutrino muonico a neutrino del tau. L'evidenza diretta di tale oscillazione è stata poi ottenuta dall'esperimento Opera conclusosi nel 2010 (vd. in *Asimmetrie* n. 21 p. 22, ndr). L'attuale frontiera dell'utilizzo di muoni come "firma" dell'interazione di neutrini riguarda i telescopi Cherenkov nelle profondità di laghi (Baikal-GVD, in Russia) o mari (Antares e Km3net, nel Mar Mediterraneo) o sotto i ghiacci antartici (IceCube, in Antartide). Questi sfruttano l'effetto Cherenkov, ovvero fotoni emessi in fase dalle molecole di materia, stimulate da particelle cariche che vi si propagano con velocità superiore a quella della luce nel mezzo stesso. Poiché i fotoni Cherenkov indotti da un muone "relativistico" hanno tutti la stessa angolazione rispetto alla sua traiettoria (circa 42° in acqua), griglie di migliaia di fotomoltiplicatori, estese su un volume di circa 1 km³, permettono di ricostruirne la direzione con precisioni migliori di 1°. I muoni con energie maggiori di 10 TeV mantengono circa la stessa direzione dei neutrini progenitori. È possibile, quindi, risalire alle porzioni di cielo corrispondenti per ricercarne le possibili sorgenti astrofisiche. Per verificare la precisione di puntamento, si ricorre alla misura della cosiddetta "ombra della Luna" nel flusso di muoni atmosferici. In pratica si cerca il

deficit nel flusso di muoni in corrispondenza delle direzioni di arrivo dei raggi cosmici che impattano sul nostro satellite, di cui è nota la posizione, e che quindi non creano sciami. Insomma, dal più semplice esperimento didattico ai moderni e complessi rivelatori, la misura dei muoni è uno strumento fondamentale sia impiegato nelle calibrazioni degli apparati sperimentali che come oggetto di ricerche decisive nella moderna fisica astroparticellare.

c. Una rappresentazione artistica del telescopio per neutrini Km3net. Un neutrino muonico, interagendo con la roccia sottostante il rivelatore, si converte in un muone "relativistico" (cioè un muone che viaggia alla velocità prossima a quella della luce nel vuoto) che ne prosegue la traiettoria. Il muone, muovendosi nell'acqua del mare, emette luce Cherenkov che viene captata dai moduli ottici (i fotomoltiplicatori) del telescopio.

Biografia

Tommaso Chiarusi è ricercatore Infn presso la sezione di Bologna. Attualmente è il coordinatore del sistema di acquisizione dei dati del rivelatore Km3net e studia l'ombra della Luna nei dati di Antares. In passato ha partecipato all'esperimento L3+Cosmics.

Link sul web

<http://www.astroparticelle.it/>
<http://l3cos.web.cern.ch/>
<http://www.km3net.org/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.4

[as] selfie

I muoni vanno a scuola.

di Alessandro Recchia e Laura Lidia Prudeniano

Liceo Scientifico "A. Scacchi" di Bari

Liceo Scientifico "Arcangelo Scacchi" di Bari. Primo piano. Percorso tutto il corridoio, ci si trova di fronte a una porta, del colore delle altre, certo, ma custode di un posto magico: il laboratorio di raggi cosmici. Lecito chiedersi il perché di una tale struttura in un Istituto Scolastico. Il motivo si chiama progetto "EEE", acronimo di *Extreme Energy Events*. Si tratta di una speciale attività di ricerca scientifica nata da un'idea del professor Antonino Zichichi, che coinvolge un centinaio di istituti superiori su tutto il territorio nazionale, portata avanti dal Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi con la collaborazione dell'Infn, del Miur e del Cern. L'entusiasmante obiettivo finale è la possibilità reale per gli studenti di rilevare e raccogliere informazioni, per mezzo di strumenti moderni e avanzati, sui raggi cosmici di alta energia, che generano muoni rilevabili al suolo. Il nostro laboratorio, come quello di circa altre cinquanta scuole della collaborazione, ospita un telescopio Mrpc

(Multigap Resistive Plate Chambers), costituito da tre rivelatori simili a condensatori piani, al cui interno circola del gas che subisce un processo di ionizzazione al passaggio di particelle cariche. Dunque, quando una particella energetica colpisce il telescopio, ionizza la miscela gassosa, innescando un meccanismo a valanga. Una volta attraversate le tre camere, il passaggio della particella viene registrato dal computer ed è compito di noi studenti leggere e analizzare i dati raccolti. Guidati dai docenti referenti della nostra scuola, e con la supervisione del coordinatore nazionale del progetto EEE, il prof. Marcello Abbrescia dell'Università degli Studi e della sezione Infn di Bari, svolgiamo un'attività di monitoraggio giornaliero per tenere sotto controllo l'apparato e il suo corretto funzionamento. Segue la compilazione dell' "e-log" (cioè una specie di "libro di bordo" elettronico), su piattaforma condivisa con le altre scuole e con il Cnaf di Bologna, e l'invio di ogni ulteriore informazione o file. L'attività più impegnativa



a.
Il gruppo degli studenti del quinto anno nel laboratorio di raggi cosmici del Liceo "A. Scacchi" di Bari. Sullo sfondo il rivelatore EEE.

è quella dell'analisi dei dati raccolti dal telescopio, ad esempio lo studio della correlazione della frequenza di acquisizione con la temperatura e la pressione, o la ricerca di variazioni significative legate all'attività solare. Si tratta di applicare concetti matematici e statistici a casi concreti, ottimo esercizio per noi studenti, con il valore aggiunto della sensazione di partecipare a una vera ricerca scientifica.

EEE, approdato nel nostro liceo nel 2009 per volontà del preside Emanuele Stellacci, prosegue da allora sotto la supervisione dell'attuale dirigente scolastico, il prof. Giovanni Magistrale, mentore e sostenitore delle molteplici attività e idee che nascono e si sviluppano intorno al progetto. Tra le più attraenti e ambite c'è sicuramente la possibilità, per i ragazzi di quarto e quinto anno, di visitare il Cern di Ginevra, vivendo ancora una volta l'esperienza di piccoli ricercatori fisici in trasferta e imparando così ad apprezzare ancora meglio il funzionamento degli acceleratori e rivelatori di particelle. Non solo! È unica l'occasione, in un centro così prestigioso, di respirare un clima

di collaborazione, fiducia, supporto reciproco, in cui è ben accetto il dialogo e, perché no, anche una punta di divertimento!

Nelle mura della scuola, invece, abbiamo potuto aprire, grazie all'aiuto del prof. Nicola De Filippis del Politecnico di Bari, il nostro portale web dal nome "Cosmic Ray Station" (<http://serverps.liceoscacchibari.it/>), interamente dedicato ai dati del nostro telescopio. Non è mancata, inoltre, l'opportunità di dar vita a una rivista scientifica curata da noi studenti e intitolata, sulla falsariga del progetto EEE, *Explosive Editorial Experience*. Nato come mezzo per condividere le stimolanti esperienze vissute al Cern, il nostro giornale è diventato un modo per raccontarci e parlare ai nostri lettori di fisica classica, fisica delle particelle, astronomia, matematica, chimica e di tutte le nostre piccole e grandi passioni. Incoraggiati dalle critiche positive ricevute, abbiamo deciso di aprire un blog, interamente gestito da ragazzi, grazie al quale è possibile un contatto più diretto con i curiosi e gli interessati (<https://exedex.wordpress.com/>).

Nel campo più specifico dell'analisi

dati, abbiamo gradualmente affrontato problemi di volta in volta diversi. Alcuni dei nostri risultati più importanti sono stati condivisi all'interno della collaborazione EEE, e, con nostro grande orgoglio, fatti oggetto di presentazioni a congressi della Società Italiana di Fisica (Sif). E come un bambino che gioca sulla spiaggia si diverte a trovare un sasso o una conchiglia più bella del solito e rimane stupito dalla vastità del mare, così noi, giovani protagonisti di un progetto spalancato su qualcosa di grande, qualcosa che ci avvicina agli orizzonti della fisica particellare, raggiungiamo piccole tappe che ci segnano e ci spronano a continuare.

b.
I ragazzi del liceo "A. Scacchi" di Bari in visita al Cern di Ginevra.



Giornate cosmiche.

di Catia Peduto



a.
Carolin Schwerdt è la coordinatrice internazionale dell'International Cosmic Day.

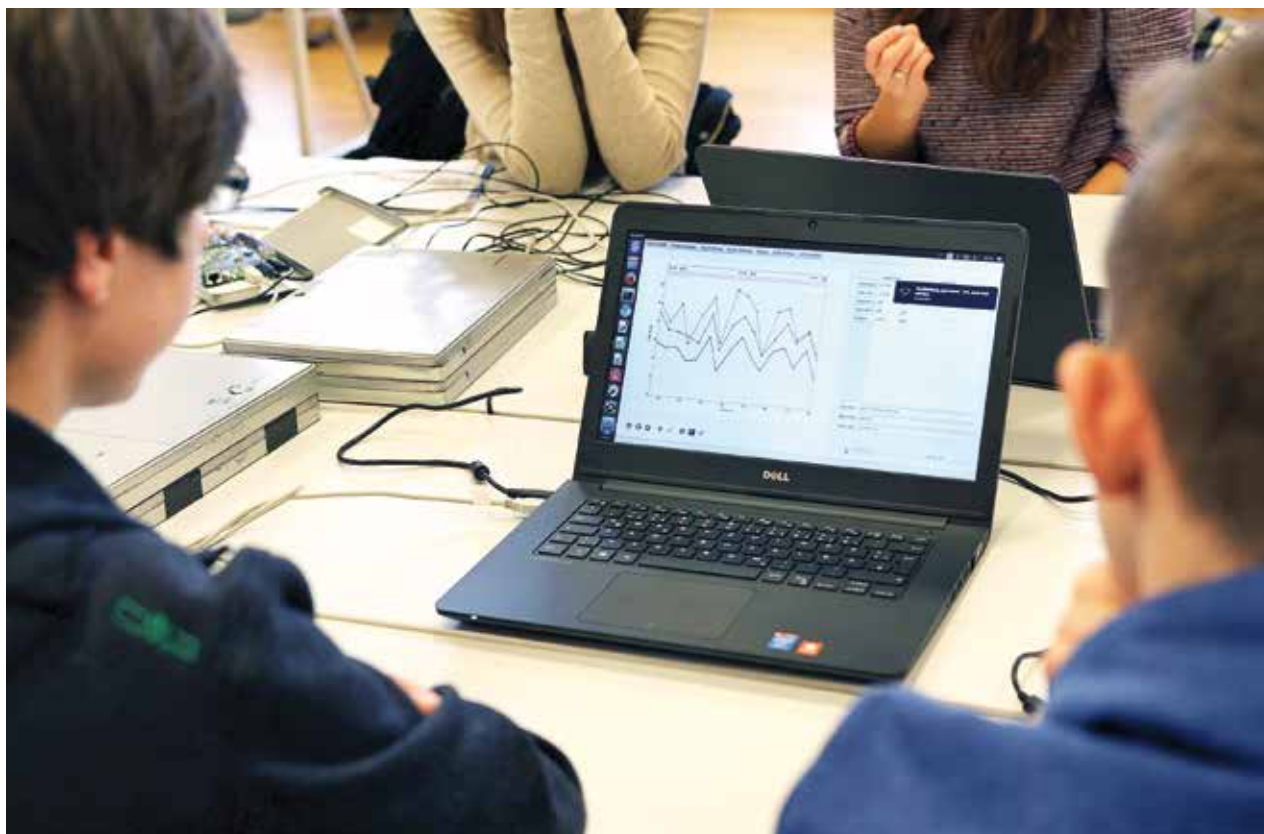
È giunto alla settima edizione l'International Cosmic Day, l'iniziativa che porta studenti delle scuole superiori di tutto il mondo alla scoperta delle proprietà dei raggi cosmici e, in particolare, dei muoni. Ha luogo tutti gli anni in autunno e può vantare in Italia, grazie all'Infn, la partecipazione delle università di Bologna, del Salento (Lecce), Padova, Pavia, Perugia e Sapienza (Roma). Ma tante altre potrebbero aggiungersi in futuro.

La paternità dell'idea è di un ricercatore del laboratorio Desy di Zeuthen (nei pressi di Berlino), Michael Walter, che la ebbe durante l'anno del centenario della scoperta dei raggi cosmici da parte di Victor Hess, nel 2012. L'incarico di mettere in piedi la giornata dedicata ai raggi cosmici fu dato a Carolin Schwerdt, che da allora coordina questo progetto e più in generale tutte le iniziative didattiche nell'ambito della fisica delle astroparticelle di Desy a Zeuthen.

“Quando mi fu dato l'incarico di disegnare, organizzare e coordinare l'International Cosmic Day cinque anni fa, decisi di fondare un gruppo di lavoro all'interno di Desy. Dato che l'idea di Michael era di dare all'iniziativa un carattere internazionale, ci siamo poi subito messi in contatto con i colleghi di Quarknet del Fermilab di Chicago”, ci racconta Carolin. “Successivamente abbiamo portato a bordo anche l'International Particle Physics Outreach Group (un gruppo di comunicatori, educatori e divulgatori di cui l'Infn fa parte, ndr)”.

L'International Cosmic Day si propone di avvicinare gli studenti delle scuole superiori al mondo della ricerca scientifica di frontiera, permettendo loro di svelare i misteri dell'universo racchiusi nei raggi cosmici. Il giorno dedicato all'International Cosmic Day gli studenti si recano nelle università delle loro città per analizzare i dati di un rivelatore di raggi cosmici con l'ausilio dei ricercatori e studiare il flusso delle particelle secondarie prodotte: i muoni. È anche possibile partecipare rimanendo nella propria scuola, se fornita di un rivelatore di raggi cosmici e di un punto di collegamento a internet. Le domande a cui devono rispondere sono semplici: da dove provengono la maggior parte di questi muoni? Provengono da tutte le direzioni dell'universo?

Gli studenti devono misurare l'intensità del flusso di muoni cercando di individuare come questa dipenda dalla direzione di provenienza. Poi, attraverso una video-chat su Skype (di cui ce



ne sono molteplici durante tutta la giornata), confrontano i loro risultati con quelli ottenuti dai gruppi di altre università e centri di ricerca in tutto il mondo. E alla fine li pubblicano online, corredati di immagini e commenti. Gli “atti” (*proceedings*) del progetto vengono poi pubblicati in un libretto che viene distribuito a tutti i partecipanti. Gli studenti seguono, così, lo stesso *iter* degli scienziati nel loro lavoro quotidiano nell’ambito di una collaborazione scientifica internazionale.

Nel 2016 hanno partecipato all’International Cosmic Day circa 1200 studenti in 16 Paesi europei, americani e asiatici suddivisi in 45 gruppi. Quasi la metà di questi studenti erano italiani. “Di anno in anno, nuovi gruppi di studenti si aggiungono a quella che è ormai una *community* ‘cosmica!’”, afferma con entusiasmo Carolin.

L’iniziativa, coordinata da Desy, dal 2016 è organizzata oltre che con l’Infn e il Fermilab anche in collaborazione con il Cern di Ginevra (in particolare, con la collaborazione Atlas)

e la collaborazione internazionale IceCube (il rivelatore di neutrini posto in Antartide, vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 38, ndr). Anche se non sono progettati per rivelare raggi cosmici, Atlas e IceCube hanno messo a disposizione i loro dati per l’International Cosmic Day - infatti entrambi registrano anche dati su muoni, che possono essere analizzati.

“In futuro vogliamo permettere ad ancora più studenti e insegnanti di partecipare all’International Cosmic Day”, commenta Carolin. “Il prerequisito per poter partecipare è di disporre di un rivelatore di raggi cosmici in sede e questo è un limite per molte università e scuole. Vorremmo dunque consentire la partecipazione anche alle realtà che non hanno uno strumento in loco. Per questo vorremmo rendere disponibili i dati su una piattaforma online, così che (come fanno gli scienziati) gli studenti possano partecipare all’analisi e alla discussione dei dati, anche senza averli raccolti con un rivelatore”, conclude Carolin.

b.
Studenti alle prese con l’analisi dei dati dei raggi cosmici durante una giornata dell’International Cosmic Day.

Attraverso la roccia

La tecnologia della radiografia muonica

di Luca Lista



Una delle domande tipiche che si sente rivolgere chi fa ricerca di base è: “Sì, ma a che cosa serve tutto ciò?”. Non sempre è facile rispondere, perché le applicazioni pratiche possono arrivare anche molti anni dopo una scoperta scientifica, ma il caso del muone è particolare.

Avendo proprietà identiche a quelle dei più noti elettroni, a eccezione della massa che è circa 200 volte più grande, quando attraversano la materia i muoni perdono una piccola quantità di energia (per unità di spessore di materia attraversata) e quindi riescono ad attraversare grandi spessori, prima di fermarsi una volta esaurita tutta la loro energia. Tutti noi siamo, pertanto, attraversati costantemente da una pioggia di muoni originati dagli urti di particelle di provenienza cosmica con l'atmosfera. Tra tutte le particelle prodotte in queste interazioni, ci raggiungono solo le particelle più penetranti, tra cui i neutrini e i muoni, che possono avere energie anche superiori a quelle prodotte al Lhc di Ginevra. Mentre i raggi X non riescono ad attraversare più di pochi metri di roccia, i muoni cosmici ne possono attraversare anche alcuni chilometri.

La capacità di attraversare grandi spessori di materia permette dunque di utilizzare i muoni, proprio come i raggi X, per fare vere e proprie radiografie di strutture di grandi dimensioni. Una lastra di una normale radiografia viene impressionata (quindi scurita) maggiormente, quanto più riceve radiazione X. Un colore nero sulla lastra corrisponde alle zone in cui non c'è nulla lungo il percorso del raggio, a parte l'aria. Le zone che corrispondono alle ossa appaiono invece in bianco e ai tessuti molli corrispondono sfumature di grigio. Con lo stesso principio, un rivelatore di muoni può essere posto “dietro” una struttura da radiografare rispetto ai muoni cosmici di cui il rivelatore misura con precisione la direzione da cui provengono. Il numero di muoni che arriva ogni secondo da ciascuna direzione al livello del mare è stato misurato con grande precisione, ed è in accordo con i modelli che descrivono l'interazione della radiazione cosmica con l'atmosfera. Un “deficit” di muoni in corrispondenza di una certa direzione indica che una parte dei muoni si è fermata nell'attraversare la materia. Contando quanti muoni provengono da ciascuna direzione e confrontando questi conteggi con quanto

a.

La prima applicazione della muografia fu realizzata verso la fine degli anni '60 nella piramide di Chephren, nella piana di Giza (nei pressi de Il Cairo), per capire se al suo interno esistessero altre camere ancora da scoprire.

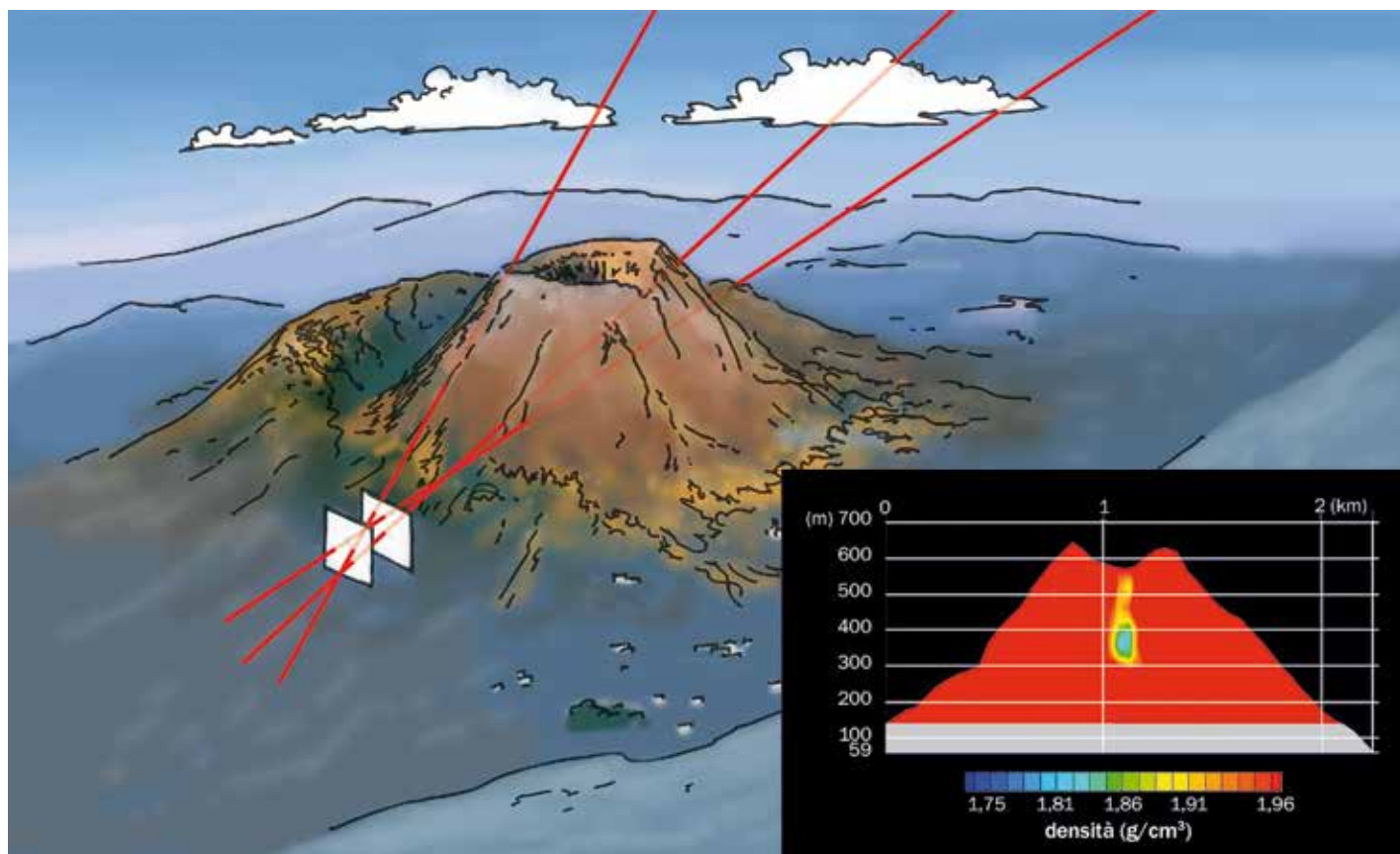
ci si aspetta nel caso ci fosse solo l'aria tra il rivelatore e l'alta atmosfera, si può avere una misura precisa della quantità di materia attraversata lungo la traiettoria dei muoni. Tutto questo permette di produrre una "muografia", del tutto simile a una radiografia. La muografia fu applicata per la prima volta alla fine degli anni '60 per risolvere un importante enigma archeologico. A differenza della piramide di Cheope, nella quale erano state scoperte tre camere disposte ad altezza diversa, e con alcuni passaggi, la piramide di Chephren (situata assieme a quella di Cheope nella piana di Giza, nei pressi de Il Cairo, vd. fig. a) sembrava più semplice, con una camera sepolcrale al centro del basamento della piramide e una sotterranea, senza passaggi secondari. Gli archeologi però si chiedevano se in realtà esistessero altre camere ancora da scoprire. Il premio Nobel Luis Alvarez propose allora di installare rivelatori di muoni nella camera centrale per effettuare una muografia della piramide. La misura fu fatta, sotto la sorveglianza degli archeologi, nonostante un'interruzione dovuta alla guerra arabo-israeliana e i limiti tecnologici di allora. Dopo alcuni mesi di presa dati, necessari a registrare un numero sufficiente di muoni,

l'esperimento dimostrò che non vi era alcuna cavità, evitando un'indagine tradizionale con interventi invasivi e irreversibili.

Le applicazioni più recenti della radiografia muonica interessano in particolar modo i vulcani. Installando un rivelatore alla base, è possibile contare i muoni che attraversano l'intero cono vulcanico per avere informazioni sulla struttura interna, in particolare sul condotto vulcanico, che ha una densità diversa rispetto alla roccia che lo circonda e che può risultare quindi visibile nella muografia. Recenti misure sono state fatte in particolare sul vulcano Asama prima e dopo l'eruzione del 2009, mostrando significative differenze. Alcune stazioni permettono di effettuare continuamente muografie, misurando variazioni in tempo reale o quasi, allo scopo, insieme a metodi più tradizionali, di identificare eventuali segnali precursori di eruzioni.

Con questo metodo si può esplorare solo la parte esterna del cono. I raggi cosmici, infatti, provengono dall'atmosfera e sono più abbondanti nella direzione verticale. Studiare strutture sotterranee è possibile quando un rivelatore può essere collocato ancora più in profondità rispetto alle strutture da

b.
Principio di funzionamento della radiografia muonica di un vulcano.
Nel grafico in basso a destra: una muografia del vulcano Satsuma-Iwojima, in Giappone.



studiare, come è stato fatto da gruppi dell'Infn nelle aree archeologiche di Aquileia e di Fiumicino. Una situazione ideale è quella presente nel sottosuolo napoletano, dove numerose cavità sono state scavate nella roccia tufacea sin dall'antichità. Nel centro storico di Napoli sono state recentemente studiate le cavità circostanti il tunnel borbonico, nel quale un gruppo dell'Ingv (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) e dell'Infn, che lavora al progetto premiale Muraves, ha installato rivelatori simili a quelli utilizzati per fare misure sullo Stromboli e sul Vesuvio.

Con i muoni cosmici è anche possibile analizzare strutture di dimensioni più piccole, permettendo l'identificazione di oggetti molto densi, come potrebbero essere materiali radioattivi illegalmente trasportati in un container. Un'altra proprietà dell'interazione dei muoni con la materia ci può aiutare per questo: attraversando la materia, infatti, i muoni, oltre a perdere energia, sono anche deflessi di un angolo che tende a essere più grande, quanto maggiore è la densità della materia attraversata. È possibile, quindi, misurare la deflessione del muone misurandone la direzione prima e dopo che abbia attraversato l'oggetto, utilizzando due rivelatori messi uno sopra e uno sotto.

Dalle misure fatte con molti muoni, si realizza una tomografia tridimensionale che può evidenziare gli oggetti più densi all'interno del container. Un prototipo di un apparecchio del genere è stato

realizzato presso i laboratori Infn di Legnaro e ha ottenuto promettenti risultati.

Per miliardi di anni i muoni sono arrivati sulla Terra senza che l'umanità se ne accorgesse o ne fosse a conoscenza. Scoperti per caso un'ottantina di anni fa, sono diventati presto uno strumento di indagine utile e inatteso, dimostrando ancora una volta che il mero desiderio di conoscenza - la ricerca di base - può stimolare il progresso tecnologico per tutta l'umanità.

c.
Il muografo posizionato all'interno del tunnel borbonico a 35 metri di profondità all'interno del monte Echia, nel centro storico di Napoli.



Biografia

Luca Lista è ricercatore presso la sezione Infn di Napoli e partecipa all'esperimento Cms al Cern. Si occupa principalmente di analisi dei dati e di sviluppo di metodi statistici per la fisica delle particelle elementari. Negli ultimi anni è stato referente per la sezione di Napoli per le attività di divulgazione scientifica.

Link sul web

<http://www.scienceinschool.org/it/2013/issue27/muons> <http://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2010/51/News%20Articles/1312698>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.5

[as] intersezioni

Misure vulcaniche.

di Giovanni Macedonio

ricercatore dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Ingv)



La radiografia muonica rappresenta uno strumento innovativo per investigare l'interno dei vulcani. Essa può essere utilizzata in associazione con altre tecniche di indagine geofisica, come la tomografia sismica, le indagini geoelettriche, la magnetotellurica e le misure del campo gravitazionale. In particolare, la radiografia muonica permette di ottenere una misura indipendente della distribuzione della densità dell'interno del cono vulcanico ed evidenziare la presenza di eventuali condotti attraverso i quali può scorrere il magma. La conoscenza della struttura interna del vulcano ci permette non solo di comprendere la dinamica delle precedenti eruzioni, ma anche di interpretare le osservazioni e i segnali sismici associati al passaggio del magma all'interno della struttura. Infatti, il magma è costituito da roccia fusa con bolle di gas e cristalli al suo interno. La presenza delle bolle modifica la densità del magma, che dipende principalmente dalla frazione di volume del gas al suo interno. Durante il moto del magma all'interno del vulcano e la sua interazione con le pareti dei condotti, si producono oscillazioni della struttura vulcanica,

con frequenze che dipendono dalle dimensioni e forma dei condotti e dalla quantità di bolle di gas contenute nel magma. L'analisi di queste oscillazioni, registrate dai sismometri dislocati sulle pareti del vulcano, permette di diagnosticare la presenza del magma in movimento e di evidenziare eventuali situazioni di pericolo. Il gas, prevalentemente costituito da vapore acqueo e anidride carbonica, rappresenta il motore delle eruzioni perché è proprio il gas che, con la sua espansione, trasporta il magma in superficie. Inoltre, la quantità di gas contribuisce a definire lo stile eruttivo: essa è bassa nelle eruzioni effusive (colate di lava), in cui il magma fuoriesce dal cratere come una schiuma viscosa, ed è più alta nelle eruzioni esplosive in cui il magma fuoriesce dal cratere sotto forma di un getto di gas e magma frammentato. È molto importante, quindi, conoscere sia la geometria dei condotti vulcanici, sia il valore della densità del magma per stimare la quantità di gas presente al suo interno. Da questo punto di vista, la radiografia muonica costituisce un ottimo strumento di indagine, in quanto fornisce direttamente un'immagine che

rappresenta la mappa della densità dell'interno del vulcano. Parallelamente, anche le misure del campo di gravità forniscono informazioni sulla densità delle zone sottostanti e, per questo motivo, possono essere associate alla radiografia muonica. Le misure di gravità sui vulcani vengono solitamente effettuate con periodiche campagne di misura, durante le quali vengono misurati contemporaneamente, in decine o centinaia di punti, il valore dell'accelerazione di gravità e le coordinate del punto di misura. Queste ultime sono necessarie soprattutto per la correzione della variazione del valore dell'accelerazione di gravità con la quota. Le informazioni sulla densità dell'interno del vulcano si ottengono successivamente tramite opportuni modelli di inversione. Attualmente, i metodi di integrazione dei dati di radiografia muonica con le misure della gravità sono oggetto di ricerca scientifica, come lo sono, in generale, tutti i metodi di integrazione dei dati tra le diverse tecniche di indagine geofisica. È di particolare interesse la possibilità di poter costruire, con un approccio

multiparametrico, un modello dell'interno del vulcano che tenga conto delle diverse proprietà delle rocce e dei fluidi presenti al suo interno. Le rocce e i fluidi, infatti, sono caratterizzati oltre che dalla densità, anche da altre proprietà meccaniche, elettriche e magnetiche. Tra queste, la rigidità delle rocce, insieme alla loro densità, determina la velocità di propagazione delle onde sismiche misurabili dalle differenze dei tempi di arrivo dei terremoti alle varie stazioni sismiche dislocate sul vulcano. La resistività elettrica delle rocce determina la quantità di corrente che attraversa il sottosuolo, in risposta alle differenze di potenziale elettrico applicate a opportuni elettrodi posti sulla superficie del vulcano durante le misure geoelettriche, mentre le proprietà magnetiche delle rocce influenzano il valore del campo magnetico terrestre, anche esso misurabile in superficie. Infine, attraverso la tecnica della magnetotellurica si registrano le variazioni del campo elettromagnetico dovute all'interazione tra le rocce del sottosuolo e le onde elettromagnetiche prodotte dalla ionosfera, fornendoci informazioni sulle proprietà

elettromagnetiche delle rocce alle diverse frequenze e delle loro variazioni in funzione del tempo (per esempio in prossimità di un'eruzione). Sarà proprio l'integrazione di tutte queste informazioni che ci permetterà di conoscere meglio l'interno dei vulcani e ottenerne un modello di dettaglio. Attualmente, uno degli aspetti più interessanti della radiografia muonica è la possibilità di ottenere direttamente un'immagine radiografica dell'interno del vulcano, senza la necessità di utilizzare complessi modelli di inversione. A partire da queste immagini, oggi bidimensionali, sarà possibile costruire immagini tridimensionali dell'interno del vulcano attraverso l'utilizzo di più rivelatori posti in diversi punti di osservazione. Infine, a differenza delle altre tecniche, la radiografia muonica permette di osservare l'interno del vulcano "da remoto", senza la necessità di accedere alle aree sommitali. Questa caratteristica rende la radiografia muonica potenzialmente idonea al monitoraggio durante una crisi vulcanica, quando si evidenzia il rischio di una possibile eruzione.



a.
Lo strumento con cui nell'aprile 2013 è stata fatta una presa dati dimostrativa sul Vesuvio, il prototipo Mu-Ray sviluppato dall'Infn. Il rivelatore di muoni è formato da 384 scintillatori plastici letti da fotomoltiplicatori al silicio. Il consumo dell'intero apparato è sufficientemente basso da funzionare senza essere connesso alla rete elettrica. All'interno del progetto premiale Infn-Ingv Muraves entro il 2017 è prevista l'installazione sul Vesuvio di tre rivelatori con quattro piani traccianti da 1 m² ciascuno. I nuovi rivelatori sono una versione migliorata del prototipo Mu-Ray.

Precisamente anomalo

La misura del momento magnetico del muone

di Luca Trentadue

Non accade di frequente che si passino più di novanta anni a misurare e calcolare con precisione, si potrebbe dire maniacale, un numero e che, dopo averlo misurato e calcolato fino alla undicesima cifra decimale, non ci si accontenti e si voglia proseguire ancora. Ma il caso che considereremo è un po' speciale, e ha richiesto e continua a richiedere un trattamento altrettanto speciale.

Il "momento magnetico del muone", come anche quello analogo dell'elettrone, è un numero, un semplice numero, ma un numero molto importante tra quelli che rappresentano l'insieme delle quantità misurabili che si possono predire nel modello standard. L'"anomalia" dei suoi valori lo rende una grandezza particolarmente ricca di implicazioni per la fisica delle interazioni tra particelle elementari.

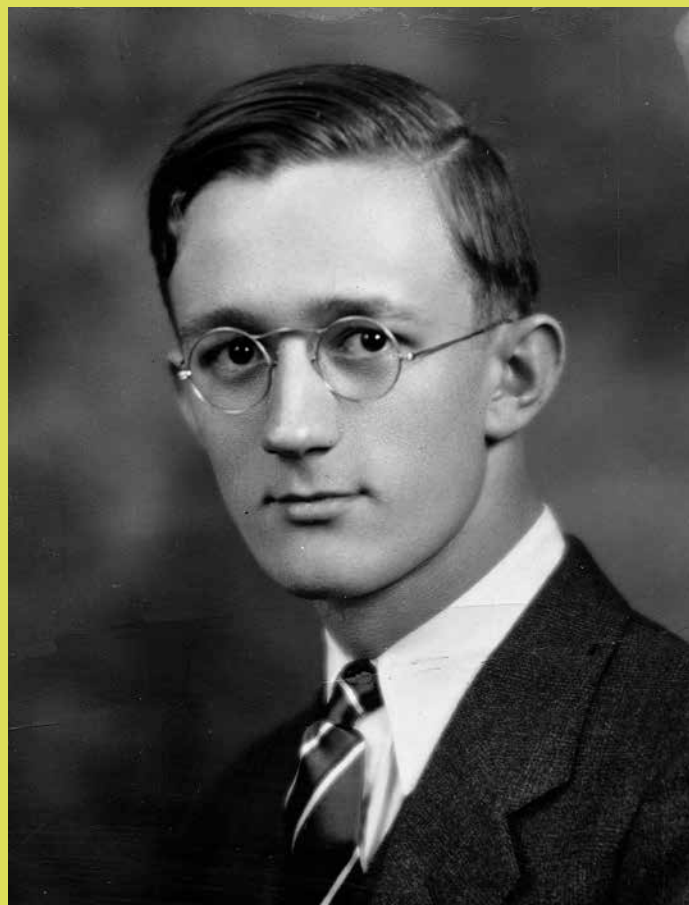
La storia ha avuto inizio nei primi anni '20 del secolo scorso, quando nel pieno sviluppo delle nuove ipotesi quantistiche si vollero stabilire rinnovate relazioni tra le grandezze fisiche.

I leptoni, oltre a una carica elettrica, una massa e uno spin, hanno anche un momento di dipolo elettrico e un momento di dipolo magnetico. Secondo l'elettromagnetismo classico, una particella carica, come l'elettrone e il muone, che ruota su se stessa, dovrebbe avere un momento magnetico proporzionale al suo spin. La costante di proporzionalità si chiama "magnetone di Bohr". Nel 1928, con la sua equazione relativistica dell'elettrone, Paul Dirac predisse che il momento di dipolo magnetico dell'elettrone avrebbe avuto un valore doppio rispetto alla predizione classica. Questa "anomalia" quantistica viene riassunta dal cosiddetto "fattore g ", che misura il momento di dipolo in unità di magnetone di Bohr, e vale 1 secondo la meccanica classica e 2 secondo la teoria di Dirac.

Il valore 2 fu confermato da esperimenti fatti negli anni immediatamente successivi, anche se con una precisione limitata. Dovettero passare circa una ventina di anni, quando, alla fine degli anni '40, il fisico tedesco naturalizzato statunitense Polykarp Kusch e l'americano Henry Foley, dopo una serie di delicate misure, osservarono che il valore del momento magnetico dell'elettrone differiva da 2 per la piccola ma molto importante quantità dello 0,12 %. Questa scoperta valse a Kusch il premio Nobel nel 1955. Quindi, il fattore g risultava essere doppiamente anomalo: non solo differiva dal valore classico ($g=1$), ma anche da quello predetto dalla teoria di Dirac ($g=2$). Per rendere più chiara questa differenza venne definita una nuova quantità: $a=(g-2)/2$, chiamata anche semplicemente " $g-2$ ", che corrisponde alla differenza relativa dal valore $g=2$. Una quantità analoga si può definire naturalmente anche per il muone.

a.

Polykarp Kusch ottenne il premio Nobel per le sue ricerche sul momento magnetico dell'elettrone.



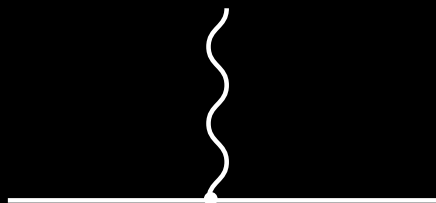
Dal punto di vista della teoria, contemporaneamente, le cose andavano avanti. Nella seconda metà degli anni '40, essenzialmente per i contributi di Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman e Freeman Dyson, furono poste le basi per una teoria quantistica relativistica delle interazioni elettromagnetiche: l'elettrodinamica quantistica (o Qed), per la quale i primi tre ricevettero il premio Nobel.

Il primo calcolo della quantità a per l'elettrone in Qed fu ottenuto da Julian Schwinger nel 1948 (vd. il secondo diagramma in fig. 1 nell'approfondimento a p. 34) e dette il valore $a=\alpha/2\pi=0,00116$. Qui α rappresenta la "costante di struttura fine", la costante di accoppiamento dell'elettrodinamica (vd. in Asimmetrie n. 17 p. 19, ndr).

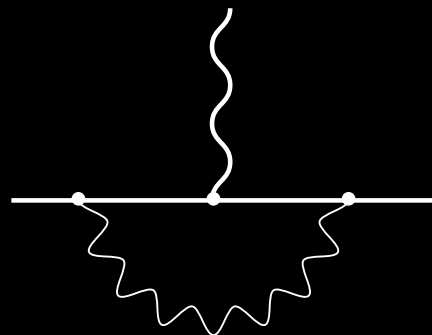
13.000 modi di essere anomalo

$g = 2$

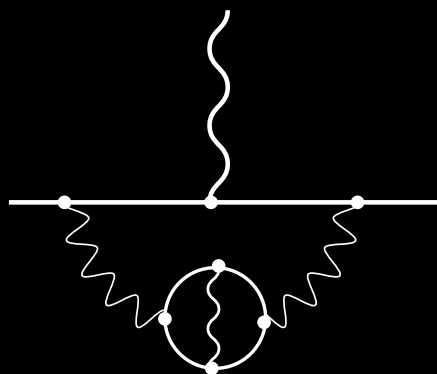
livello albero



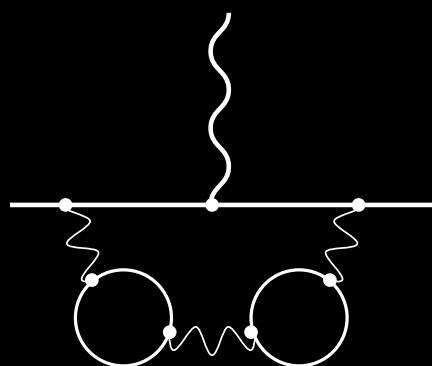
ordine α



ordine α^3



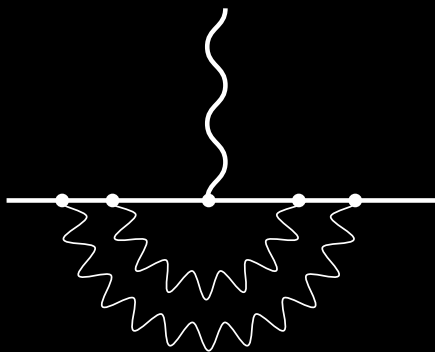
...



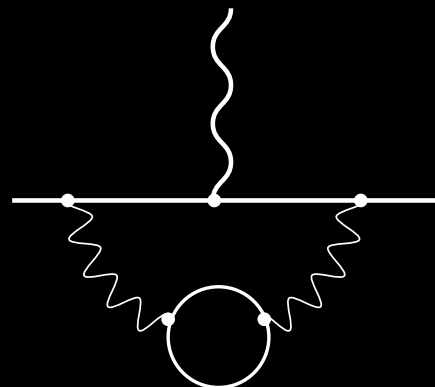
Particelle cariche, come ad esempio gli elettroni, emettono fotoni quando vengono accelerate. Come conseguenza si ha che, oltre ai protagonisti iniziali, in un certo processo di interazione partecipano anche una serie di "comprimari", essenzialmente fotoni ma anche elettroni, sia reali, cioè emessi dalle particelle cariche e lasciati liberi di propagarsi, che "virtuali", cioè emessi da particelle cariche e poi riassorbiti in un tempo successivo. In breve il numero di particelle, fotoni o elettroni che siano, non è costante ma può variare. Di fatto il numero dei fotoni emessi, potendo avere ciascuno energia arbitrariamente piccola, può essere addirittura non definibile.

Un modo di rappresentare le numerose e diverse possibilità di combinazione di comprimari in un dato processo fu proposto nel 1949 da Feynman e le figure che le rappresentano da allora sono chiamate appunto "diagrammi di Feynman". Questi diagrammi non solo servono a rappresentare come può avvenire una certa reazione tra elettroni, ma ciascuno di questi diagrammi, come per esempio quelli in fig. 1, permette, secondo quanto stabilito da regole molto dettagliate e precise, di calcolare la probabilità che un certo processo avvenga. È possibile, secondo le regole della maggiore complessità e della gerarchia dei diagrammi definire con quale accuratezza il processo

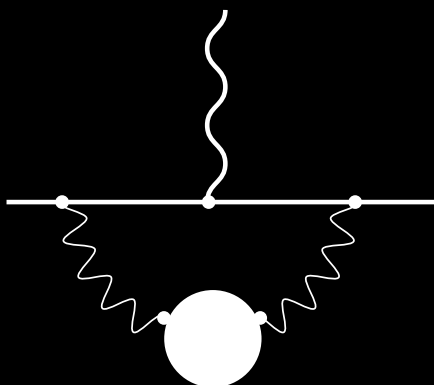
ordine α^2



...



contributo adronico



1.

I contributi a ordini crescenti in *loop* al momento magnetico di elettrone o muone sono rappresentati dai diagrammi di Feynman in figura. Il primo diagramma rappresenta il contributo a "livello albero" (zero *loop*) che dà il valore corrispondente all'equazione di Dirac $g=2$. Il secondo rappresenta il contributo a un *loop*, calcolato da Schwinger nel 1948 che dà un contributo ad α proporzionale a α , precisamente pari a $\alpha/(2\pi)$. Sono poi rappresentati solo alcuni dei molti diagrammi a due e tre *loop* che danno rispettivamente contributi proporzionali a α^2 e α^3 . L'ultimo diagramma rappresenta il contributo di polarizzazione del vuoto dove la "bolla" piena rappresenta il contributo di tutti i possibili adroni. Le gambe esterne, uguali per tutti i diagrammi, rappresentano l'elettrone o il muone (linee continue) e il fotone (linea ondulata).

è descritto, cioè con quale ordine di approssimazione ne stiamo calcolando la probabilità. I diagrammi possono essere ordinati per linee uscenti e per aree chiuse (o "*loop*") in gruppi di un determinato ordine che contribuiscono, con la stessa accuratezza, al calcolo della probabilità di un certo processo. Poiché ad ogni punto di contatto tra un fotone e un elettrone, cioè ad ogni vertice, viene attribuita una costante, che è l'unità di carica elettrica e che in Qed è un numero minore di uno, il contributo complessivo del diagramma, proporzionale al numero dei vertici, diminuisce all'aumentare degli stessi. Sommando contributi sempre più piccoli al processo principale si mette insieme

una serie di probabilità con valori decrescenti, dando quindi una determinazione via via più accurata. Il prezzo da pagare è quello di avere, per ogni ordine e all'aumentare dell'ordine di linee uscenti e di aree chiuse, un numero crescente di diagrammi e quindi di contributi da calcolare. A due *loop*, i diagrammi possibili sono 7, a tre *loop* sono 72, a quattro *loop* 891 e a cinque *loop* oltre 12.000. Calcolare con grande accuratezza il momento magnetico significa quindi calcolare diagrammi con trama più ricca e con linee sempre più fitte di comprimari, che congiungono in tutti i modi possibili le particelle protagoniste.

Se confrontato con il valore sperimentale ottenuto da Kusch e Foley, il calcolo di Schwinger dava conto quasi interamente dell'anomalia e quindi rappresentava uno straordinario successo della Qed. La ragione dell'anomalia era quindi nelle "correzioni radiative", cioè nelle correzioni dovute ai processi virtuali che accompagnavano l'interazione principale, dovute alle particelle virtuali emesse e riassorbite dai protagonisti del processo (vd. approfondimento). Se infatti si ignorano le correzioni radiative, la quantità a si annulla e non sussiste dunque nessuna anomalia. La Qed veniva così confermata come l'approccio teorico che poteva descrivere con estrema accuratezza i processi quantistici, essere messa a confronto diretto con gli esperimenti e quindi descrivere le interazioni fondamentali fra particelle elementari. Da allora, il modello standard ha permesso di calcolare i momenti magnetici di elettrone e muone includendo in modo

coerente e sistematico i valori che se ne ottengono in termini di tutte e tre le interazioni fondamentali. Oltre che per testare il modello standard a precisioni sempre più crescenti, i momenti magnetici sono anche delle formidabili "finestre" verso una possibile nuova fisica. Infatti, il loro valore numerico verrebbe modificato nel caso in cui ci fossero nuove interazioni o nuove particelle a energie più elevate di quelle raggiunte dagli acceleratori attuali. Questa sensibilità è proporzionale alla massa del leptone, ed è quindi maggiore per il momento di dipolo del muone, dato che questo ha una massa circa duecento volte quella dell'elettrone. La prima misura del momento magnetico del muone fu fatta alla Columbia University di New York nel 1960 e dava un valore del tutto compatibile con il valore ottenuto per l'elettrone ma non abbastanza preciso da metterne in evidenza la differenza.

È nei primi anni '60 che, al ciclotrone del Cern, fu fatta la prima misura di precisione da un gruppo di fisici tra cui l'italiano Antonino Zichichi. Anche questo risultato, ottenuto con una precisione dello 0,4%, non si discostava dal valore ottenuto per l'elettrone.

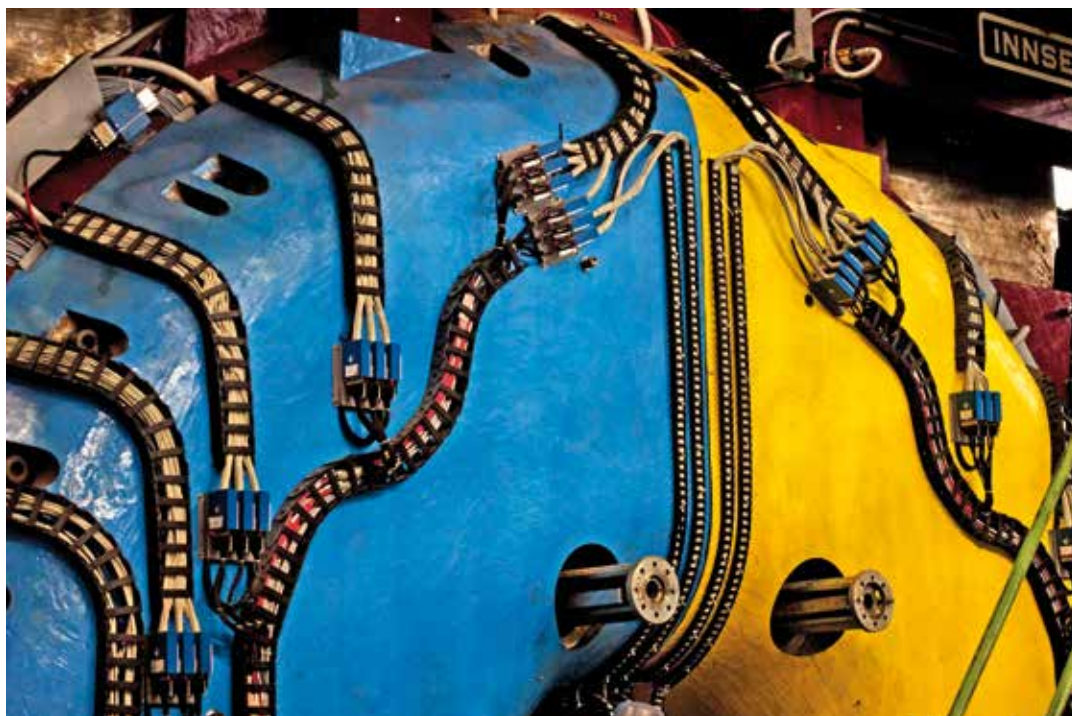
Ancora al Cern, tra la seconda metà degli anni '60 e i primi anni '70, furono costruiti degli anelli di accumulazione di muoni e un gruppo di fisici, tra cui l'italiano Emilio Picasso, ottenne nuove misure del momento magnetico con precisioni crescenti e con valori in eccellente accordo con il valore teorico del tempo.

La sfida per la teoria fu invece quella di ottenere risultati ancora più accurati. Dopo il pionieristico conto effettuato da Schwinger, i principali sviluppi furono quelli di Robert Karplus e Norman Kroll con il calcolo a due *loop*, il calcolo a tre *loop* iniziato da Toichiro Kinoshita, proseguito da Benny Lautrup ed Eduardo De Rafael e poi da Riccardo Barbieri, Juan Alberto Mignaco ed Ettore Remiddi. Questo fu completato da Stefano Laporta e Remiddi con un risultato analitico esatto nel 1996, quasi trent'anni dopo. Nei primi anni '80 Kinoshita e collaboratori iniziarono il calcolo dei contributi a quattro *loop*, obiettivo non ancora raggiunto. Riguardo al calcolo delle correzioni radiative esiste tuttavia un ostacolo che il semplice conto non può superare ed è quello del calcolo del cosiddetto "contributo adronico" al momento magnetico del muone. A causa del comportamento della cromodinamica quantistica (Qcd, vd. in Asimmetrie 16 p. 18, ndr) a basse energie, questo contributo non può essere calcolato con le tecniche diagrammatiche viste in precedenza (vd. approfondimento).



b.

Il primo esperimento "g-2" nel sincrociclotrone del Cern negli anni '60, in cui erano all'opera Farley (a sinistra) e Zichichi (a destra).



c.
Un dettaglio dell'esperimento Kloe nei Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn, che ha misurato il contributo adronico al momento magnetico del muone.

Fortunatamente però, grazie a un'osservazione fatta già nel 1960 dai fisici italiani Nicola Cabibbo e Raoul Gatto, esso può essere ricavato indirettamente dalla misura sperimentale del processo di annichilazione di una coppia leptone antileptone in adroni.

A partire dagli anni '80 una serie di misure sempre più accurate per determinare il contributo adronico sono state ottenute in vari esperimenti a Novosibirsk (in Siberia, con l'acceleratore Vepp-2m e Cmd), a Pechino (con Bes-II), allo Slac a Palo Alto in California (con Babar) e nei Laboratori dell'Infn di Frascati (nell'acceleratore Dafne con il rivelatore Kloe), con risultati confrontabili in accuratezza tra di loro. All'inizio degli anni 2000, misurando il momento magnetico anomalo del muone con l'esperimento E821 del Brookhaven National Laboratory di Upton, nello Stato di New York, si è trovato un valore che si discosta decisamente da quello teorico, con una probabilità che questo accada a causa di una fluttuazione statistica di meno dell'1%.

Recentemente, per capire se questa discrepanza è dovuta al contributo adronico, è stato proposto un nuovo metodo per misurarlo attraverso processi di *scattering* tra muoni

ed elettroni, anziché nel processo di annichilazione di due elettroni in adroni. Questo approccio innovativo potrebbe permettere di ridurre l'errore sul contributo adronico e migliorare quindi il confronto tra teoria e dati sperimentali o mettere in evidenza la presenza di nuova fisica.

Al Fermilab di Chicago (Usa) è in fase di costruzione un nuovo esperimento (Muon g-2), a cui partecipa anche l'Infn, e un altro è previsto entrare in funzione presso J-Parc in Giappone. Questi esperimenti sono progettati per misurare l'anomalia del muone con una precisione di 140 parti per miliardo, quasi un fattore 4 di miglioramento rispetto a E821 (vd. in Asimmetrie n. 19 p. 22, ndr).

È quindi di prima importanza migliorare l'accuratezza con cui si determinerà il contributo adronico.

Nei prossimi anni la soluzione della questione aperta della discrepanza tra risultati sperimentali e calcolo teorico del momento magnetico anomalo del muone potrebbe portare a nuovi indizi sulla natura di una nuova fisica al di là del modello standard, in attesa di conferme dirette ottenute dai risultati a più elevate energie e maggiore luminosità degli esperimenti di Lhc.

Biografia

Luca Trentadue è docente di fisica teorica all'Università di Parma. Svolge attività di ricerca presso il Cern di Ginevra. Si occupa di divulgazione scientifica con seminari e lezioni. Ha realizzato e coordina la mostra interattiva permanente dell'Università di Parma "Microcosmo con vista" (<http://www.fis.unipr.it/microcosmo/home.html>).

Link sul web

http://www.treccani.it/enciclopedia/elettrodinamica-quantistica-verifiche-sperimentali_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/

https://en.wikipedia.org/wiki/Anomalous_magnetic_dipole_moment

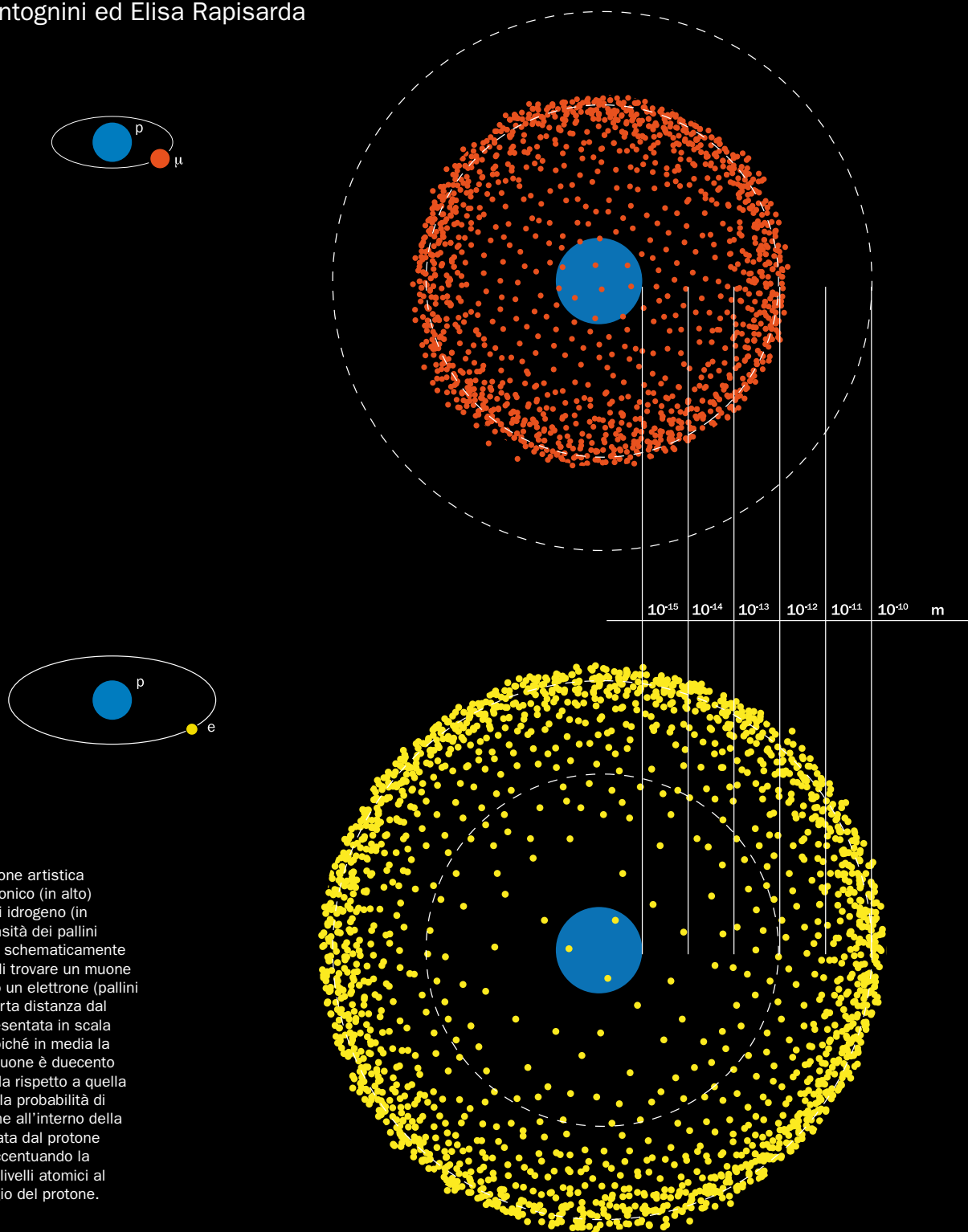
<http://www.g-2.bnl.gov/publications/ff/EPNd.htm>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.6

A stretto raggio

Dalla spettroscopia muonica al raggio del protone

di Aldo Antognini ed Elisa Rapisarda



a.
Rappresentazione artistica dell'atomo muonico (in alto) e dell'atomo di idrogeno (in basso). Le densità dei pallini rappresentano schematicamente le probabilità di trovare un muone (pallini rossi) o un elettrone (pallini gialli) a una certa distanza dal protone rappresentata in scala logaritmica. Poiché in media la distanza del muone è duecento volte più piccola rispetto a quella dell'elettrone, la probabilità di trovare il muone all'interno della regione occupata dal protone è maggiore, accentuando la sensibilità dei livelli atomici al valore del raggio del protone.



Un atomo è formato da un nucleo (carico positivamente) attorno cui orbitano gli elettroni. Che cosa succederebbe se al posto degli elettroni intorno al nucleo orbitassero dei muoni negativi? Non è fantascienza, ma qualcosa che i fisici riescono davvero a creare in laboratorio: è l'atomo "muonico", un atomo esotico in cui al posto dell'elettrone c'è un muone negativo legato dalla forza elettromagnetica al nucleo. Il muone, infatti, è una particella fondamentale come l'elettrone, i neutrini e i quark e interagisce in maniera simile all'elettrone: stessa interazione elettromagnetica, stessa interazione debole e nessuna interazione forte. Però è 200 volte più pesante dell'elettrone. Poiché i raggi orbitali sono inversamente proporzionali alla massa della particella che si muove attorno al nucleo, l'orbita del muone in un atomo muonico è 200 volte più piccola dell'orbita di un elettrone in un analogo atomo elettronico (cioè un atomo ordinario). Il muone orbita quindi molto vicino al nucleo e i suoi livelli energetici sono fortemente influenzati dalla struttura nucleare. Un parametro nucleare come la dimensione del nucleo può allora essere determinato dalla misura molto precisa

dei livelli energetici dell'atomo muonico e dal loro confronto con le previsioni teoriche. Queste sono estremamente accurate dal momento che l'atomo muonico è un sistema a due corpi, la cui interazione è nota.

Perché si formi un atomo muonico in laboratorio è necessario che un muone, attraversando la materia, perda tutta la sua energia cinetica in modo da poter essere catturato nel potenziale elettrostatico del nucleo. Questo è del tutto analogo a ciò che successe in natura, trecentomila anni dopo il Big Bang, agli elettroni che costituirono i primi atomi ordinari. Gli atomi muonici si formano in stati altamente eccitati. Nel decadere da un livello energetico eccitato allo stato fondamentale, il muone emette raggi X (fotoni) caratteristici dell'atomo, con energie che, a seconda della carica nucleare, possono raggiungere anche diversi MeV. L'osservazione di questi raggi X fu la prima prova sperimentale della formazione degli atomi muonici. Sebbene le prime osservazioni fossero effettuate utilizzando i muoni dei raggi cosmici, solamente la disponibilità in laboratorio di intensi fasci di muoni consente di raggiungere un'alta precisione sperimentale. La misura dei raggi X muonici fu un campo di

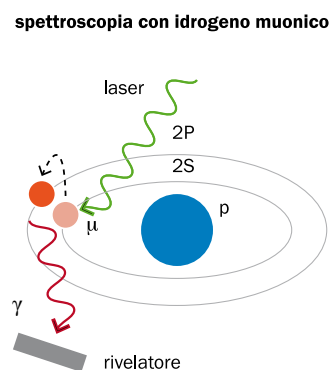
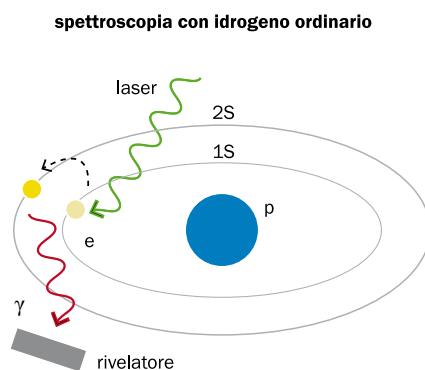
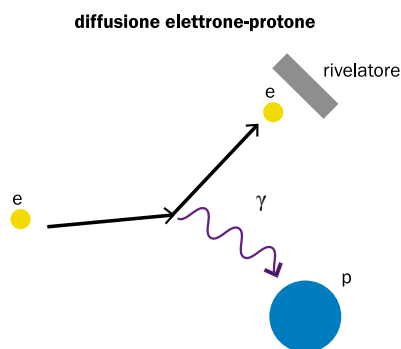
b.
Visione aerea del Paul Scherrer Institut, nei pressi di Zurigo (in Svizzera), dove ancora oggi la fisica degli atomi muonici viene coltivata assiduamente.

ricerca estremamente attivo dagli anni '50 fino agli anni '80 presso grandi laboratori come il Cern, la Columbia University, la University of Chicago, il Los Alamos e il Paul Scherrer Institut (Psi). Sebbene questa intensa attività sia giunta a una fine negli anni '80, in concomitanza, da un lato, con la chiusura di grandi canali di produzione di fasci di muoni come il sincrociclotrone del Cern e il ciclotrone di Chicago e, dall'altro, con il sempre più diffuso interesse verso le collisioni ad alta energia, la fisica degli atomi muonici continua a essere coltivata ed è ancora molto vivace al Psi.

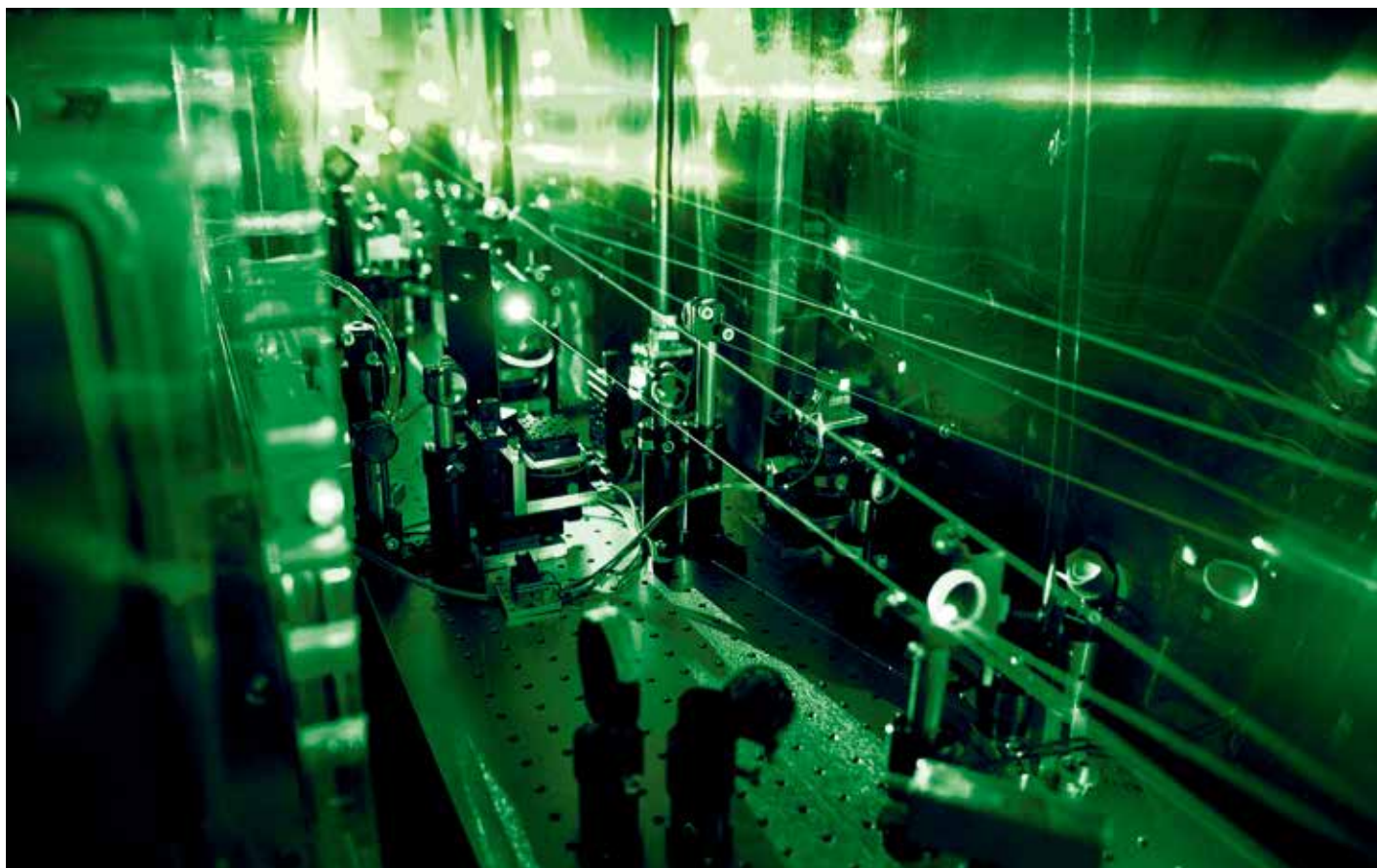
Il lavoro sperimentale di quegli anni portò alla misura dei raggi X muonici di quasi tutti gli elementi stabili, eccetto i più leggeri, l'idrogeno, l'elio e il litio, e poche altre eccezioni. Le prime misure furono effettuate usando scintillatori. Successivamente, l'avvento di rivelatori al germanio permise un significativo miglioramento dell'accuratezza e della precisione di rivelazione degli spettri energetici muonici consentendo, a sua volta, un notevole avanzamento nella comprensione dell'atomo muonico e dei relativi effetti nucleari. Oggi, il progetto muX al Psi mira a estendere

questa tecnica a elementi instabili sfruttando la disponibilità di spettrometri gamma ad alta efficienza di rivelazione e sviluppando un nuovo metodo di produzione degli atomi muonici. Sempre al Psi, la collaborazione Crema a partire dal 2000 ha sviluppato una tecnica pionieristica, basata sulla spettroscopia laser, che permette la misura delle transizioni energetiche in atomi muonici leggeri. Con tale tecnica la collaborazione ha ricavato con successo il raggio del protone, misurando la transizione tra due livelli denominati 2S e 2P nell'atomo di idrogeno muonico. In questo esperimento, un impulso laser viene utilizzato per indurre la transizione del muone dal livello atomico 2S al livello 2P, dal quale il sistema decade spontaneamente nello stato fondamentale emettendo un raggio X. Tale processo avviene solamente se la frequenza del laser è uguale alla frequenza della transizione atomica. Questa può dunque essere determinata con grande precisione osservando il picco dei raggi X emessi. La dimensione finita del protone (il nucleo dell'idrogeno) introduce una piccolissima correzione nei livelli atomici e nelle frequenze di

transizione, proporzionale al quadrato del raggio del protone. Tale correzione è dovuta al fatto che la funzione d'onda della particella orbitante (l'elettrone nell'idrogeno ordinario, il muone nell'idrogeno muonico) penetra nella regione di spazio occupata dal protone. Poiché, come abbiamo detto, il muone è mediamente più vicino al protone rispetto all'elettrone, l'effetto è più accentuato nell'idrogeno muonico. Questo sistema è dunque più sensibile al raggio del protone e permette di determinare il suo valore con maggiore precisione. La spettroscopia laser dell'idrogeno muonico messa a punto al Psi si va ad aggiungere così agli altri due metodi sperimentali utilizzati per determinare il raggio del protone (vd. fig. c). L'approccio storico consiste nell'utilizzare processi di diffusione di elettroni su un bersaglio di idrogeno. Fu la misura precisa della distribuzione angolare degli elettroni a rivelare che il protone non è un oggetto puntiforme, bensì un sistema composito. Per questa scoperta Robert Hofstadter ebbe il premio Nobel nel 1961. L'altro metodo per determinare il raggio del protone consiste appunto nella spettroscopia laser di alta precisione



c.
I tre metodi per determinare il raggio del protone: la diffusione di elettroni su protoni (nuclei di idrogeno), lo studio della transizione tra i livelli 1S-2S negli atomi di idrogeno ordinari e lo studio della transizione 2S-2P negli atomi muonici.



dell'atomo di idrogeno. Poiché l'influenza della dimensione del protone sui livelli energetici dell'atomo d'idrogeno elettronico è minima, un'alta precisione sperimentale è necessaria, tale da stimolare lo sviluppo di tecnologie laser innovative culminate col premio Nobel a Theodor Hänsch nel 2005.

Il valore del raggio del protone ottenuto dalla spettroscopia muonica, pari a $0,84087 \pm 0,00039$ fermi (un "fermi", in onore di Enrico Fermi, è un milionesimo di miliardesimo di metro, chiamato anche "femtometro"), è un ordine di grandezza più preciso rispetto a quello determinato con le altre due tecniche, grazie alla maggiore sensibilità dell'atomo muonico agli effetti nucleari. Tuttavia esso è in significativo disaccordo (per ben 6 sigma, vd. in *Asimmetrie* n. 22 p. 4, ndr) con i valori ottenuti dagli altri due metodi (il valore ottenuto dalla diffusione di elettroni su idrogeno, per esempio, è pari a $0,879 \pm 0,008$ femtometri), il che ha originato quello che dal mondo scientifico è stato denominato il *proton radius puzzle*.

Nuovi calcoli dei livelli atomici, ipotesi di fisica al di là del modello standard e revisioni della complessa struttura del protone sono stati proposti al fine di spiegare questa discrepanza, che però rimane tuttora irrisolta. Dal punto di vista sperimentale ambiziosi progetti sono in fase di realizzazione, fra cui la misura della struttura "iperfine" dell'idrogeno muonico. Tre collaborazioni sono impegnate in questo sforzo, una guidata da un gruppo di ricercatori dell'Infn al Rutherford Laboratory (UK), una presso il Psi e un'altra nel laboratorio Riken in Giappone.

d.

Il laser del Paul Scherrer Institut impiegato per misurare il raggio del protone con la spettroscopia muonica.

Biografia

Aldo Antognini è ricercatore del Paul Scherrer Institut (Psi) e insegna al Politecnico di Zurigo (Ethz). Sin dal dottorato si occupa della spettroscopia laser di atomi muonici, dello sviluppo di laser ad alta energia e di nuovi fasci di muoni a bassa energia. Dal 2017 è titolare di un Erc Consolidator Grant.

Elisa Rapisarda è fisico nucleare sperimentale al Paul Scherrer Institut (Psi). Ha conseguito il PhD nel 2006 e ha poi lavorato presso l'Università di Catania, la Kuleuven in Belgio e presso l'esperimento Isolde del Cern. La sua principale attività di ricerca riguarda la struttura nucleare di nuclei radioattivi.

Link sul web

<https://www.psi.ch/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.7

[as] con altri occhi

Un uomo curioso.

di Luca "Militant A" Mascini

voce del gruppo rap Assalti Frontali

a.

Luca Mascini, in arte "Militant A", è il cantante e autore delle canzoni degli Assalti Frontali.



Il sabato a Roma molte scuole sono chiuse e così anche la "Alberto Manzi" dello storico quartiere Pigneto. Ma un sabato di gennaio del 2016 il cancello era aperto per "Pezzettini - La festa della lettura", incontro con scrittori, musicisti e scienziati, a cui anch'io ero stato invitato. Arrivo spensierato con l'intenzione di cantare la canzone rap "Il lago che combatte" e parlare della storia del lago della Snia, unico lago naturale di Roma nato in modo incredibile proprio a poche centinaia di metri da dove eravamo. Che poi anche il nome della scuola mi spingeva a immaginare una lezione "alternativa" in onore del grande maestro di scuola elementare Alberto Manzi, considerato oggi "il maestro d'Italia", ma che a suo tempo per le sue idee aperte su una scuola diversa, sui voti e le pagelle (che non dava perché, diceva, "non aiutano a crescere in intelligenza, amicizia e solidarietà"), fu isolato e sospeso dall'insegnamento e dalla paga. Immaginavo di iniziare così: "Studiate laghi e mari, ma sapete che a due passi da qui c'è un muro e dietro quel muro un passaggio che porta a un lago, un vero lago incantato dove l'acqua è di tutti e sulla riva c'è una specie di castello... che sono i resti di un grande centro commerciale costruito abusivamente i cui lavori hanno fatto emergere l'acqua

'bullicante' che da sempre scorre in questa zona".

Tra gli altri invitati a parlare c'era anche una scienziata: Barbara Sciascia, dei Laboratori di Frascati dell'Infn, che doveva intervenire prima di me. Mi appoggio al muro e penso "tra poco ci siamo", immaginando che avrebbe stordito la platea e sarebbe toccato a me risvegliare l'ambiente. Ma quando Barbara inizia, mi accorgo che quelle cose che a scuola ricordavo respingenti, sono entusiasmanti: mi coinvolgo a sentir parlare di galassie, di stelle che crescono, esplodono e diventano buchi neri, e che noi siamo fatti della stessa materia delle stelle. E che Leonardo Da Vinci studiò la struttura dell'occhio raccogliendo cadaveri in modo illegale. E che malattie prima incurabili oggi le vinciamo grazie allo studio delle stelle e anche ai disegni di Leonardo. Più ascoltavo più mi veniva voglia di fare un rap subito, un rap sulla scienza, sugli scienziati...

*Il mio nome è Leonardo e non sono un bugiardo
ho contato le galassie sono più di un miliardo
nella notte io guardo le stelle
i buchi neri, i misteri, e non sto nella pelle
vedo cose sconosciute e il mio occhio gode*

*la stella che cresce, cresce troppo e poi esplode
 è il destino di tutte e ogni notte ci penso
 noi siamo così uguali a tutto il grande universo
 stamattina giù al fiume che bagna la campagna
 dove scorre la vita, solitaria e taccagna
 ho visto un uomo per terra povero contadino
 era un mio caro amico bevevo il suo vino
 ho detto ai miei ragazzi organizziamo il trasporto
 mi parlava da vivo mi parlerà più da morto
 portate a casa e zitti che la legge non vuole
 e vedremo che vuol dire essere belli come il sole
 cosa, cosa, cosa vedono i miei occhi...*

Pian piano, Barbara mi trascinava dentro i segreti della scienza in modo diverso dal solito, come avrebbe fatto Alberto Manzi e tutti quelli che pensano a una scuola bella, attrattiva, intelligente, partendo dall'idea che il Sapere con la S maiuscola non è qualcosa che si tramanda come un dogma chiuso con lezioni frontali, da sapientoni con la verità in tasca, ma si crea insieme ogni giorno, stimolando l'immaginazione, anche a costo di pagare in prima persona. Così quando è il mio momento di intervenire rilancio: "Il poeta e lo scienziato in fondo sono simili: si nutrono di intuizioni, di emozioni, di entusiasmo e oggi voglio cantarvi di scienza e di donne e uomini curiosi":

*... a casa ho acceso un fuoco e raccolto i miei in giardino
 ho messo su un po' d'acqua e dentro l'occhio del mio contadino
 ho avuto un colpo di genio: fare l'occhio sodo
 ora aspetto che bolle, controllo il mio brodo
 non c'era altro modo per farlo a fettine
 guardare dentro i tessuti, gli atomi e le proteine
 la mia lacrima scende e non è per il vento*

*ora vi servo il sapere su un piatto d'argento
 sono un uomo di scienza a volte vado a vuoto
 faccio tentativi, mi muovo nell'ignoto
 quello che vedo lo disegno, lo annoto
 oggi ho visto nell'occhio: carbonio ossigeno e azoto
 le particelle, proprio quelle, che le stelle spargono in cielo
 quando esplodono come zucchero a velo
 adesso ho capito: finirò in una cella
 siamo polvere davvero, polvere di una stella*

Il rap scorreva bene e in mezzo a questa lezione un po' poetica e un po' scientifica, tanti alzavano la mano, facevano domande. Qualcuno chiedeva: "Bella questa canzone, ma è vero che veniamo tutti da una pepita?". Io rispondevo: "Bella questa domanda, ma rivolgila a Barbara...". E mentre pensavo che il maestro Manzi sarebbe stato contento di noi, finivo così il mio rap:

*Sappiamo tutto... macché, il buio è profondo
 ma ogni luce che si accende è un passo avanti nel mondo
 sappiamo il 5% di quello che succede
 accendi la tua lampada e qualcosa si vede
 sappiamo che il primo granello di vita
 è nato sotto le onde del mare e il mare da una pepita
 stava tutto lì dentro, unito e compresso
 le galassie, i pianeti, l'intero universo
 e questa è la storia di un lungo pezzo di scienza
 ognuno spinge in là i confini della conoscenza
 un pensiero va anche a quel contadino
 se oggi un team guarisce gli occhi di un bambino
 Alex aveva un tumore una cosa seria
 l'ha salvato lo studio dell'antimateria
 la spiegazione ce l'ha data la via del protone
 auguri Alex tu sei bello come il sole.*



b.
 Il gruppo rap Assalti Frontali.
 La canzone nata a seguito
 dell'incontro con la ricercatrice
 dell'Infn nella scuola del Pigneto
 si chiama "Un uomo curioso" e
 si trova nell'album "Mille gruppi
 avanzano".

[as] traiettorie

Dalle stelle alle star.

di Francesca Mazzotta



a.
Ioannis Katsavounidis nello
stabilimento di Netflix a Los Gatos,
in California.

Ioannis Katsavounidis, oggi responsabile di un innovativo progetto di Netflix sulla compressione video ("*video encoding*"), ha lavorato per quattro anni a Macro, un esperimento dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs) dell'Infn che studiava nel dettaglio particelle penetranti della radiazione cosmica, muoni e neutrini. "Molte delle cose che ho imparato lavorando a Macro ai Lngs sono riemerse nelle fasi successive della mia carriera e mi hanno aiutato a risolvere problemi in altri campi di ricerca".

[as]: Di cosa ti sei occupato nel corso dell'esperimento Macro?

[Ioannis]: Ho lavorato sia sul hardware sia sul software degli scintillatori di Macro. Tutti i segnali che arrivano sui rivelatori a scintillazione devono essere interpretati attraverso una serie di coefficienti, le "costanti di calibrazione", che permettono di ricostruire con precisione l'energia e la posizione delle particelle rivelate. La qualità delle

costanti di calibrazione determina la qualità dell'analisi dei dati sperimentali. Migliorando l'hardware e riscrivendo il software del sistema di calibrazione abbiamo abbassato considerevolmente il margine di errore sull'analisi dei dati raccolti dalle particelle penetranti rivelate, dei muoni in particolare. Credo che questo sia stato il mio contributo più importante a Macro. Posso affermare che anche grazie a questo lavoro l'analisi dei dati sperimentali di Macro ha raggiunto un livello di qualità tale da essere pubblicata sulle migliori riviste internazionali di fisica.

[as]: E come sei passato dalla ricerca di base allo sviluppo di tecnologie di encoding?

[I]: Il mio campo di ricerca è stato da sempre l'analisi dei segnali, e segnali sono sia quelli che arrivano dai muoni cosmici sia quelli di un video. Nel 2000 uno dei miei professori della University of Southern California ha fondato una *start*

up che lavorava sull'analisi dei segnali video e mi ha contattato, proponendomi di lavorare insieme. Ci ho pensato un po' e ho deciso di provarci. Sono rientrato negli Stati Uniti e da allora ho sempre lavorato nel campo del *video processing*.

[as]: C'è qualcosa che accomuna pixel e neutrini?

[I]: Pur essendo entrambi piccolissimi, i neutrini sono infinitamente più piccoli dei pixel. Entrambi sono però molto interessanti, i pixel creano le immagini che diventano video e i neutrini sono dappertutto. E sia i neutrini sia i pixel richiedono tantissima attenzione per essere analizzati.

[as]: Su cosa stai lavorando ora a Netflix?

[I]: Stiamo lavorando a un progetto chiamato "*cellular encoding*" da circa dodici mesi. Il nostro obiettivo è codificare i contenuti multimediali di Netflix nel formato più adatto ai

cellulari, che solitamente presentano una bassa banda di rete. Per farlo partiamo da un nuovo codice di Google, VP9, che esegue una prima riduzione del volume di dati necessario per la riproduzione di un video. Diminuiamo poi ulteriormente questo volume grazie a una combinazione di algoritmi chiamata “*Dynamic Optimization*”. In un primo momento il *Dynamic Optimizer* analizza il video per trovare dei segmenti, dei “*video shot*”, dal contenuto omogeneo, ad esempio quei pochi secondi in cui la macchina da presa del regista sta riprendendo una persona prima di spostarsi su un'altra. Ogni *video shot* è poi codificato in risoluzioni multiple. Si ottengono così tantissime versioni di un singolo *video shot* che sono successivamente valutate in termini di qualità percepita da un algoritmo sviluppato da Netflix, il Vmaf (Video Mutimethod Assessment Fusion). Il *Dynamic Optimizer* calcola infine la combinazione ottimale per mettere insieme tutti i segmenti del video ottenendo il risultato sperato: una codifica con il minimo volume di dati.

[as]: E come si è arrivati a questo risultato?

[I]: Come in tutte le ricerche scientifiche, il punto di partenza sono stati gli esperimenti. Inizialmente abbiamo raccolto dati sulle caratteristiche dei video per poi sviluppare un parametro di misura di qualità percepita dall'occhio umano (il Vmaf). Abbiamo poi creato un prototipo del sistema con

il quale abbiamo fatto dei test preliminari. Quando è stato evidente che il prototipo funzionava, abbiamo aggiunto altre componenti, ottenendo un sistema più complesso da testare su un maggior numero di video con caratteristiche diverse, dai cartoni animati ai film d'azione. Le sequenze ottenute con questo sistema sono state poi riprodotte su dei cellulari per verificarne la qualità. I test sono stati un successo e abbiamo così deciso di presentare i nostri risultati al Mobile World Congress di Barcellona nel febbraio 2017.

[as]: Il tuo percorso è una chiara dimostrazione del forte legame tra ricerca di base e innovazione tecnologica. Come si potrebbe incoraggiare in Europa una maggiore comunicazione tra questi due campi?

[I]: L'Europa è molto forte nel campo della ricerca di base. Ma le aziende europee non investono abbastanza nell'innovazione tecnologica e non fanno abbastanza per attrarre ricercatori. Questo accade invece negli Stati Uniti, e così tanti ricercatori attraversano l'oceano Atlantico per trovare aziende più forti. In Europa, dovrebbero esistere più incentivi per le aziende. Si dovrebbe consentire una maggiore flessibilità nell'assumere, o anche licenziare, se necessario, persone nuove. Creare un gruppo di ricerca in un'azienda può essere molto costoso, quindi una collaborazione economica tra aziende, università ed enti di ricerca potrebbe rappresentare un incentivo per le prime.

b.
L'esperimento Macro nei
Laboratori Nazionali del Gran
Sasso dell'Infn, dove Ioannis ha
lavorato alla fine degli anni '90.



[as] riflessi

Profondo blu.

di Eleonora Cossi

a.
Salvo Viola nei Laboratori Nazionali del Sud (Lns) nel porto di Catania. Sulla sua sinistra i fotomoltiplicatori di Km3net e alle sue spalle l'osservatorio Sn1.



Nello Ionio meridionale, alla distanza di 90 km dalla costa siciliana, in direzione sud-est, è attualmente in costruzione uno dei più affascinanti progetti scientifici al mondo. È l'osservatorio per neutrini sottomarino Km3net che nel 2020 dovrebbe raggiungere un ambizioso traguardo scientifico e ingegneristico, 230 stringhe di fotomoltiplicatori ancorate a 3.500 m di profondità (vd. fig. c a p. 23, ndr). Le stringhe andranno a costruire una griglia di alcune decine di migliaia di sensori ottici disposti in un volume di circa un chilometro cubo, in grado di rivelare la radiazione luminosa prodotta per effetto Cherenkov dalle particelle secondarie (muoni, elettroni, tau e adroni), che i neutrini generano

interagendo con la materia (in questo caso l'acqua). Ad oggi sono state posizionate due strutture prototipo, alte circa 450 m e poi disconnesse, e due stringhe alte 750 m. Tutte le strutture sono collegate al cavo di comunicazione in fibra ottica che, dagli abissi, porta in tempo reale i dati registrati dai sensori fino alla stazione di terra di Portopalo gestita dai Laboratori del Sud dell'Infn (Lns). Ma ai Lns i fisici che lavorano al progetto non ricevono solo i dati catturati dai fotomoltiplicatori. Le stringhe, infatti, ospitano anche sensori acustici, idrofoni, utilizzati principalmente per monitorare gli spostamenti delle strutture sottomarine, ma anche per

studi di biofisica. E proprio grazie a questi strumenti, già nel 2008, sono arrivati risultati inaspettati sulla popolazione e sul transito dei cetacei al largo della Sicilia. L'idea di posizionare dei sensori acustici sui moduli di sostegno dei fotomoltiplicatori nasce circa 15 anni fa con l'esperimento Ovde. "L'osservatorio, installato presso il sito sottomarino di test dei Lns a 2100 m di profondità al largo di Catania - ci racconta Salvo Viola, ricercatore dei Lns esperto del sistema di posizionamento acustico e di calibrazione per Km3net - aveva l'obiettivo di misurare il rumore acustico di fondo e realizzare uno studio di fattibilità per un rivelatore acustico di

neutrini. Esiste, infatti - ci spiega Viola - una tecnica di rivelazione dei neutrini di altissima energia, la tecnica 'termoacustica', per cui è previsto che lo sciame di particelle prodotto dall'interazione dei neutrini crei anch'esso un segnale sonoro rivelabile". L'idea di utilizzare questa nuova tecnica necessita lo sviluppo di sensori molto sensibili e la misura accurata dei rumori di fondo.

Con Ovde, che ha funzionato per più di 2 anni, è stato possibile effettuare il primo monitoraggio acustico nel Mediterraneo nella banda di frequenze di interesse. Nei dati emerse chiaramente che tra i vari suoni registrati vi erano anche quelli emessi dai capodogli, presenti a centinaia, e quindi in quantità molto maggiore rispetto a quanto prima ritenuto (si valutava la presenza in poche decine in tutto il Mediterraneo). Inoltre, sempre grazie ai dati di Ovde, i ricercatori sono riusciti a ricostruire le dimensioni dei capodogli in transito. Questi cetacei infatti, producono dei suoni che i biologi marini chiamano "click" e che sono emessi dalla parte frontale del capo. Dall'analisi di questi click, grazie a un nuovo algoritmo realizzato in sinergia da fisici e biologi, è stato possibile tracciare i movimenti degli animali e ricostruire la grandezza dell'esemplare e quindi determinare se si trattasse di piccoli, femmine o maschi adulti.

L'importanza e la novità dei risultati fece sì che si decidesse di proseguire la campagna di ecomonitoraggio, dando così avvio a una collaborazione interdisciplinare concretizzata nel 2010 grazie al progetto del Miur Futuro

in ricerca-Smo, che coinvolge l'Infn (in primo luogo i Lns), l'Ingv, le Università di Roma Sapienza e Roma Tre e di Pavia, Messina e Catania (vd. anche in *Asimmetrie* n. 17 p. 44, ndr). "Così tra il 2012 e il 2013 sono state installate tre nuove stazioni di misura acustiche - prosegue Viola - La prima, equipaggiata con 14 sensori acustici, è stata installata a Capo Passero a bordo del prototipo Nemo (Neutrino Mediterranean Observatory) per proseguire gli studi di fattibilità della tecnica termoacustica. Altre due stazioni (Sn1 e Ovde2/Smo) sono state installate al largo di Catania, e fanno parte del primo nodo cablato della nuova infrastruttura di ricerca europea Emsc-Eric (European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory)".

Sn1 ha registrato dal 2012 al 2013 non solo le voci dei capodogli ma anche quelle della balenottera "comune" (vd. fig. b), monitorandone la presenza per circa un anno. I dati di Sn1 hanno permesso anche di eseguire il primo monitoraggio a lungo termine dell'inquinamento acustico sottomarino in Italia, fornendo dati preziosissimi per identificare le sorgenti potenzialmente più pericolose per l'ambiente come gli *air-gun*, potenti cannoni ad aria compressa utilizzati per le prospezioni del fondale marino per la ricerca di idrocarburi. Ovde2/Smo è tutt'ora in funzione e, grazie ai suoi sofisticati sensori, fornisce in tempo reale dati sulla presenza di cetacei e sul rumore acustico, oltre a essere un eccellente banco di test per i futuri rivelatori acustici di neutrini.

b.
La balenottera comune del Mediterraneo (*Balenoptera physalus*) è stata recentemente aggiunta tra le specie più vulnerabili dalla Iucn (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources). Il Mar Ionio potrebbe rappresentare un importante corridoio per le sue migrazioni stagionali. La bioacustica permette di studiarne i comportamenti e quantificarne la popolazione, per definire le migliori strategie per la conservazione della specie.



[as] illuminazioni

Raggi cosmici in tasca.

Tutti possono rivelare i muoni. Basta avere uno smartphone e scaricare la app "Deco".

I sensori d'immagine della fotocamera nei telefoni cellulari sono progettati per rilevare la luce visibile, ma possono anche rivelare particelle energetiche, inclusi i muoni secondari prodotti dall'interazione di raggi cosmici nell'atmosfera (chiamati muoni "atmosferici"). Quando un fotone ottico (circa due elettronvolt di energia) interagisce nella zona attiva del sensore, può causare per effetto fotoelettrico il rilascio di elettroni nel semiconduttore (silicio) del sensore. Le macchine fotografiche digitali si basano su questo stesso meccanismo. Se una particella più energetica, come un muone atmosferico, con miliardi

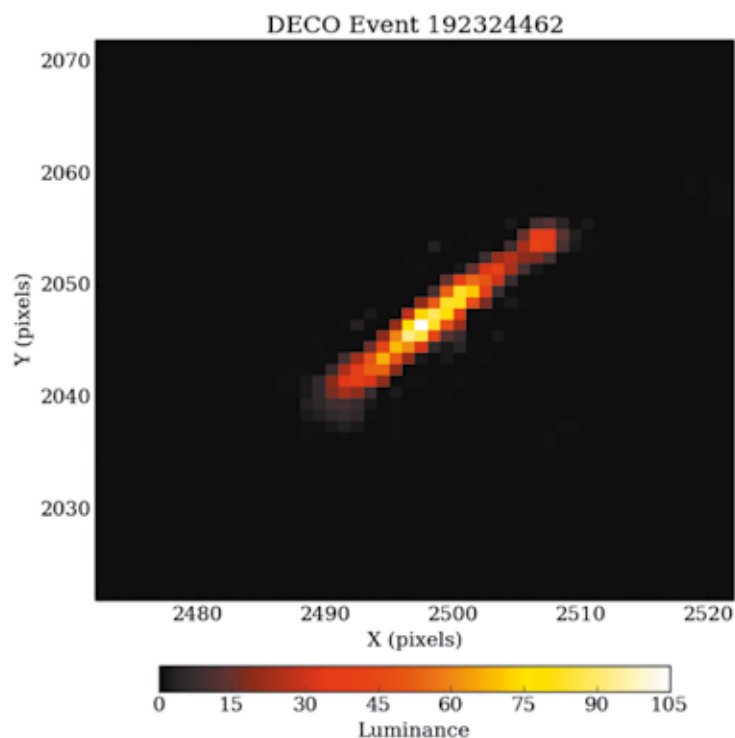
di elettronvolt di energia, colpisce il medesimo sensore, può estrarre molti elettroni nei diversi pixel attraversati e causare la presenza di una traccia in una fotografia scattata in pieno buio. Deco è una app per cellulari progettata per individuare muoni prodotti nei raggi cosmici e altre particelle energetiche come le radiazioni beta (elettroni) e gamma (fotoni ad alta energia). Per installare Deco (per ora solo su Android), occorre scaricare l'applicazione all'indirizzo <https://wipac.wisc.edu/deco>. Si consiglia di eseguire Deco con il telefono piatto posto su un tavolo con la fotocamera rivolta verso il basso, se possibile coprendo l'obiettivo con del nastro adesivo nero per bloccare la luce ambientale. Poiché i muoni possono viaggiare

attraverso gli edifici, non è necessario portare il telefono all'aperto.

Data l'altissima diffusione dei cellulari (in media ogni abitante della Terra ne ha uno), Deco ha un grande potenziale educativo e scientifico. Ad esempio, se tutti i romani che abitano all'interno del Grande Raccordo Anulare avessero l'app attiva, l'area collettiva dei sensori ammonterebbe a decine di metri quadri, e sarebbe in grado di campionare in dettaglio raggi cosmici su un'area di decine di chilometri quadrati. Inoltre, ogni sensore si basa sulla stessa tecnologia a semiconduttore usata in esperimenti come il Fermi-Lat (vd. in *Asimmetrie* n. 23 p. 20, ndr).

Sul sito web di Deco è possibile esplorare il database e analizzare gli eventi delle particelle raccolti dal proprio telefono (individuabili grazie al numero ID - una lunga sequenza di lettere e numeri - visualizzato all'interno della app) o dai telefoni degli altri utenti. I dati registrati in tutti i continenti si possono selezionare usando ora, posizione (per garantire la privacy, latitudine e longitudine sono raccolte arrotondando al punto più vicino a 0,01 gradi), modello di telefono o altri dati. È anche possibile visualizzare le immagini della videocamera degli eventi riconosciuti come particelle e vedere dove ognuno di questi eventi è stato registrato. Una versione per iOS può essere testata contattando deco@wipac.wisc.edu. Esiste un gruppo Google dedicato alla app, a cui ci si può iscrivere per entrare in contatto con gli sviluppatori di Deco e con altri utenti (dettagli sul sito web di Deco).

[Delia Tosi e Justin Vandenbroucke, University of Wisconsin]



a.
Immagine di un muone atmosferico creata da Deco.

Per approfondire: <https://arxiv.org/pdf/1510.07665v1.pdf>



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

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 sulle 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 8068342 356
direttore_infn@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

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

www.infn.it



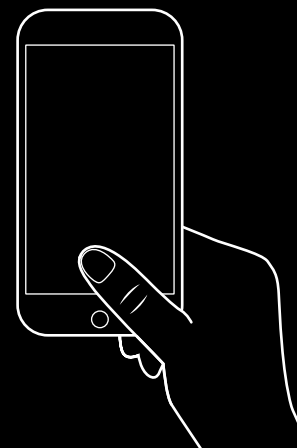
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it