

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Storia dei raggi cosmici

Relatore

Prof./Dr. Giulio Peruzzi

Laureanda

Angelica Previtera

Anno Accademico 2017/2018

Indice

Profili introduttivi	3
1.1 L'importanza dei raggi cosmici	3
1.2 Contestualizzazione storico-scientifica	3
1.3 La scoperta	4
La natura dei raggi cosmici	5
2.1 L'esperimento di Bothe-Kohlhorster	5
2.2 La radiazione primaria	6
2.3 Gli Sciami	7
2.4 Raggi "hard" e raggi "soft"	8
2.5 I muoni	8
2.5.1 Instabilità dei muoni	9
2.5.2 Origine dei muoni ed esperimento CPP	9
La ricerca in Italia nel dopoguerra	11
3.1 La crisi della fisica italiana negli anni della Guerra	11
3.2 La rinascita	11
3.2.1 Il Laboratorio Testa Grigia	12
3.2.2 Lo sviluppo dell'Università di Padova	13
3.3 Particelle strane	14
Da dove provengono i raggi cosmici?	17
I recenti studi sui raggi cosmici	19
Bibliografia	23

Riassunto

Dal momento della scoperta, avvenuta nel 1912 da parte di Hess, i raggi cosmici giocarono per circa trent'anni un ruolo fondamentale nello sviluppo della fisica e rappresentarono l'unico strumento adatto a studiare la fisica delle alte energie, prima dell'avvento degli acceleratori di particelle. In questa tesi si è cercato di ricostruire la storia della radiazione cosmica, dalle origini fino ai giorni odierni, ripercorrendo le principali scoperte compiute nel campo e sottolineando il grande contributo portato alla ricerca fisica, sia teorica che sperimentale. Nello specifico lo studio dei raggi cosmici giovò alla definizione delle teorie quantistiche delle forze fondamentali e permise la nascita della fisica delle particelle e l'inizio dell'utilizzo dell'elettronica negli esperimenti fisici. Tuttavia la radiazione cosmica non ebbe un ruolo centrale solo nella prima metà del secolo scorso, ma ancora oggi rappresenta un settore di ricerca maturo, dal momento che alcune questioni riguardanti l'origine dei raggi cosmici non hanno trovato una risposta certa ed esaustiva. Inoltre tale tematica costituisce anche una delle prospettive future della fisica delle alte energie, dal momento che i raggi cosmici rappresentano le uniche sorgenti in natura di energie molto elevate, centinaia - se non migliaia - di volte superiori a quelle presenti negli acceleratori del Cern. Infine nella tesi si è voluto anche sottolineare il notevole contributo fornito dai fisici italiani, e in particolare padovani, a questa pagina della storia della fisica.

Profili introduttivi

1.1 L'importanza dei raggi cosmici

Se i raggi cosmici sono oggi un settore di ricerca maturo, e da cui ci si aspettano novità, tra gli anni '20 e gli anni '50 giocarono un ruolo fondamentale nell'ambito della ricerca sperimentale e teorica. In particolare, i risultati ottenuti dallo studio della radiazione cosmica giovarono alla definizione delle teorie quantistiche delle forze fondamentali e permisero la nascita della fisica delle particelle; peraltro, per la prima volta vennero impiegate apparecchiature elettroniche negli esperimenti di fisica, così contribuendo allo sviluppo anche dell'elettronica.

Tutt'oggi i raggi cosmici costituiscono un settore importante della ricerca, in quanto molte problematiche da essi sollevate non hanno ancora trovato soluzione, tra cui le questioni dell'origine dei raggi cosmici e dei meccanismi attraverso i quali i raggi si propagano dalle sorgenti nello spazio interstellare e intergalattico, di cui si tratterà in seguito.

Segnatamente essi rappresentano per certi versi anche una delle prospettive future della fisica delle alte energie, in quanto per l'appunto sono dotati di energie molto elevate, anche parecchio superiori a quelle mediante le quali siamo oggi in grado di accelerare le particelle negli acceleratori (persino decine di milioni di volte più grandi di quanto si riesce ad ottenere nel LHC del Cern di Ginevra).

Da ultimo lo studio dei raggi cosmici costituisce motivo di orgoglio per l'Università di Padova, atteso che molti fisici padovani diedero un notevole contributo a questo capitolo della storia della fisica.

1.2 Contestualizzazione storico-scientifica

Prima di affrontare nel dettaglio la tematica dei raggi cosmici è opportuno soffermarsi sul panorama di acquisizioni scientifiche intervenute tra la fine dell'Ottocento e gli inizi del Novecento.

Come è noto nel 1897 il fisico inglese Joseph J. Thomson scoprì l'esistenza dell'elettrone, il portatore dell'unità fondamentale di carica negativa e componente dell'atomo. Negli stessi anni i coniugi Pierre e Marie Curie e A.H.Becquerel compirono studi che condussero alla scoperta della radioattività.

Tali approdi scientifici diedero avvio a un filone di ricerche incentrate sulla ionizzazione dell'aria, la quale infatti risultava contenere una piccola percentuale di elettroni liberi e ioni positivi; il tentativo era quello di spiegare il motivo per cui nell'aria si fosse riscontrata un'elevata concentrazione di agenti ionizzanti, non giustificabile con la radiazione di origine terrestre ¹.

¹In tal senso P. LIPARI, *Voci dell'Universo*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10, p. 5.

1.3 La scoperta

La risposta definitiva giunse nell'agosto del 1912 quando il fisico austriaco Victor Franz Hess individuò una “*sorgente extra-terrestre di radiazioni*”, che nel 1925 lo statunitense Robert Millikan definì “*raggi cosmici*”, proprio in omaggio alla loro provenienza celeste ².

Nello specifico Hess analizzò i dati emersi durante il volo di un pallone aerostatico, che superò la quota di 5000 *m* sopra la città di Aussig, in Austria, ed eseguì alcuni esperimenti mediante elettrometri di Wulf. All'epoca gli apparati strumentali ancora non erano agevolmente trasportabili, per questo vi era la necessità di una evoluzione sperimentale che facilitasse la realizzazione delle misure, in particolare ad alta quota. A tal proposito nel 1909 il fisico tedesco Theodor Wulf costruì un elettrometro più sensibile e più facilmente trasferibile rispetto agli elettrometri a foglie d'oro³. Era costituito da due fili di vetro metallizzato con silicio, mantenuti in tensione da un anello di quarzo, in cui l'angolo di deviazione dei fili è proporzionale alla differenza di potenziale applicata tra il sostegno dei fili e l'involucro esterno messo a terra (generalmente l'angolo di deviazione, per valori piccoli, è proporzionale al quadrato della differenza di potenziale). Una volta perfezionato lo strumento Wulf ebbe l'idea di misurare la radioattività al variare dell'altezza, per comprenderne l'origine: decise così nel 1910 di misurare il tasso di ionizzazione in cima alla Torre Eiffel (a circa 300 *m* di altitudine), riscontrando che l'intensità della radiazione variava di poco rispetto a quella misurata al suolo, risultato non sufficiente a confermare l'origine terrestre della radiazione. Per questo egli propose di compiere delle misure a bordo di palloni aerostatici, in modo tale da raggiungere altitudini maggiori e poter verificare esattamente quali fossero gli effetti sulla radiazione. Nonostante ciò nell'articolo che pubblicò in seguito a questi studi egli ribadì che l'ipotesi ancora prevalente fosse quella secondo cui la radioattività avesse origini terrestri.

Tuttavia nel 1911 Schrödinger avanzò l'idea che potesse esistere una diversa sorgente di radiazione, di natura extraterrestre. Fu proprio nell'anno successivo con l'esperimento di Hess che venne confermata tale ipotesi. Nello specifico il fisico austriaco compì diverse misure ad alta quota, dimostrando che fino a circa 1 *km* da terra la radiazione diminuisce ma da quella altitudine in poi la ionizzazione dell'aria cresce sempre più all'aumentare della quota, raggiungendo un valore dalle 3 alle 5 volte maggiore di quello a livello del mare.

Tali risultati, usando le parole di Hess, “*si spiegano meglio assumendo che una radiazione di alto potere ionizzante entri dall'alto nella nostra atmosfera e generi ionizzazione anche negli strati più bassi dell'atmosfera*” ⁴.

Citando le parole di Compton si può ben comprendere l'importanza della scoperta compiuta da Hess: “*Regarding the discovery of the rays, I believe that the credit should be given definitely to Professor Victor F. Hess of Innsbruck [...] It is, I believe, correct to say that Hess was the first to establish the increase in the ionization observed in electroscopes with increasing altitude; and he was certainly the first to ascribe with confidence this increased ionization to radiation coming from outside the earth*”⁵. Siffatta scoperta valse a Hess il premio Nobel per la fisica nel 1936.

Riuscire a capire la natura e l'origine di tale radiazione fu l'obiettivo principale di molti fisici del tempo per circa 40 anni, cioè fino all'avvento dei primi acceleratori di particelle.

²Così G. Busetto, G. Peruzzi, E. Prandini, S. Talas, L. Tibaldo, *Bruno Benedetto Rossi*, in B. Rossi, *L'enigma dei raggi cosmici*, Padova, 2012, p. 3.

³Così A. De Angelis, *L'enigma dei raggi cosmici: Le più grandi energie dell'universo*, pp. 16-17-18

⁴Così P. Lipari, *Voci dell'Universo*, cit. e G. Peruzzi, S. Talas, *La rivista del Nuovo Cimento* della Società Italiana di Fisica, (2007) p.198.

⁵“Riguardo la scoperta dei raggi, io ritengo che il merito debba essere definitivamente dato al Professore Victor F. Hess di Innsbruck [...]. Io credo sia corretto dire che Hess sia stato il primo a stabilire l'incremento nella ionizzazione osservata negli elettroscopi con l'aumento dell'altitudine; ed è stato sicuramente il primo ad attribuire l'incremento della ionizzazione ad una radiazione proveniente al di fuori della terra”: si veda A.H. Compton, lettera di nomination per il Nobel in Fisica, 1936 (16.1.1936) Archivio Nobel, Foundation, Stoccolma

La natura dei raggi cosmici

2.1 L'esperimento di Bothe-Kohlhorster

In seguito alla scoperta dei raggi cosmici la prima questione affrontata dagli scienziati fu quella concernente la natura dei raggi stessi. Inizialmente si ritenne che si trattasse di raggi γ , atteso che le caratteristiche di questi ultimi sembravano ben adattarsi anche ai raggi cosmici. In particolare, faceva propendere a favore di tale convinzione il fatto che i raggi γ fossero i più penetranti tra quelli allora conosciuti e che siffatto potere di penetrazione fosse direttamente proporzionale all'energia posseduta dai raggi ⁶.

Senonché, alla fine degli anni Venti questa soluzione fu messa in dubbio dall'introduzione di un nuovo strumento: il contatore Geiger, realizzato dal fisico tedesco H. Geiger e dal suo assistente W. Müller.



Figura 2.1: Esempi di contatori Geiger-Muller

Si trattava di un rivelatore a gas costituito da un tubo metallico sul cui asse era disposto un filo metallico; il tubo conteneva gas a bassa pressione e tra i due conduttori veniva applicata una differenza di tensione di alcune centinaia di Volt. Quando il gas era attraversato da una particella carica, si generava una scarica registrata da un elettrometro. Il maggior vantaggio di tale apparecchio, a differenza delle camere di ionizzazione di cui sopra, consisteva nel registrare con un impulso elettrico l'arrivo di ogni singola particella. Lo strumento in esame venne utilizzato dai fisici tedeschi Bothe e Kohlhörster nel 1929 per realizzare un esperimento che dimostrò l'impossibilità di ricondurre i raggi cosmici ai raggi γ . Nello

specifico, i suddetti scienziati misero a punto un dispositivo costituito da due contatori separati da uno schermo d'oro, il cui spessore era superiore al potere di penetrazione delle particelle secondarie dei raggi γ .

Ne conseguiva che utilizzando i raggi γ non si sarebbe dovuto registrare alcun impulso riconducibile al passaggio della particella attraverso entrambi i contatori. Per contro, ciò non si verificò quando i raggi cosmici furono sottoposti al medesimo esperimento, infatti essi riuscirono a penetrare 4.1 cm della lamina d'oro; sicché si dimostrò che la radiazione cosmica non è una radiazione γ , ma si tratta piuttosto di una radiazione ancora sconosciuta, costituita da particelle altamente penetranti.

In tal senso significative furono le parole pronunciate dal fisico Bruno Rossi al Congresso di Fisica Nucleare tenutosi a Roma nel 1931: *“i più recenti esperimenti hanno messo in luce fatti così strani che siamo quasi condotti a chiederci se la radiazione penetrante non sia qualche cosa di fundamentalmente diverso dalle altre radiazioni note”*.

⁶Così B. ROSSI, *L'enigma dei raggi cosmici*, cit., pp. 23-24. Per la stesura del paragrafo 2.1 si è fatto riferimento al testo summenzionato, in particolare alle pp. 3-4-23-24-25, nonché a G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp. 199-200

2.2 La radiazione primaria

Negli anni successivi alla scoperta si avviò tra i fisici un dibattito in merito alla natura della radiazione primaria, ossia dei raggi cosmici che provengono dalle sorgenti celesti e che giungono sull'atmosfera terrestre. Da un lato vi era chi, come lo statunitense Millikan, sosteneva la tesi ondulatoria secondo cui la radiazione primaria consisteva in onde elettromagnetiche di alta energia (cioè i raggi γ); dall'altro, scienziati che propugnavano la tesi corpuscolare secondo la quale la radiazione era costituita da particelle cariche ⁷.

Tra i sostenitori della tesi corpuscolare vi era il giovane scienziato veneziano Bruno Rossi, il quale, conclusi gli studi a Padova e Bologna, subito si interessò a tale argomento di ricerca, fino a diventare uno dei pionieri e dei massimi esponenti della fisica della radiazione cosmica.



Figura 2.2: Bruno Rossi mentre lavora sui raggi cosmici all'Univeristà di Firenze

Subito dopo aver letto l'articolo sull'esperimento di Bothe e Kohlhorster, nel 1930 Rossi inventò un circuito costituito da triodi e contatori Geiger-Muller in grado di registrare automaticamente le coincidenze provenienti da differenti contatori. Tale circuito diventò di lì a poco uno degli elementi base dei circuiti logici dei moderni computer elettronici e segnò l'inizio dell'utilizzo dell'elettronica nella fisica sperimentale.

Grazie all'invenzione del nuovo circuito a coincidenze il fisico veneziano dimostrò che i raggi cosmici possono attraversare più di un metro di piombo, evidenziando così il loro notevole potere di penetrazione. Inoltre fu il primo ad osservare che l'interazione della radiazione cosmica con la materia produce un gruppo di particelle, in seguito denominate "showers", con una frequenza inaspettata.

Fu proprio per i risultati degli esperimenti da lui condotti che Rossi si schierò dalla parte dei fisici che sostenevano la tesi corpuscolare, in contrapposizione a coloro che come Millikan continuavano a sostenere che la radiazione cosmica fosse radiazione γ .

La soluzione fu trovata negli anni Trenta da vari fisici, tra cui Compton e Rossi, a fronte degli studi sull'interazione tra il campo magnetico terrestre e la radiazione primaria. Rossi decise di analizzare l'effetto latitudine e l'effetto est-ovest, fenomeni già studiati dal norvegese Störmer in relazione alle aurore boreali. Alla base dell'esperimento vi era l'idea secondo cui se i raggi cosmici primari sono particelle, allora queste devono essere deviate dal campo magnetico terrestre. Segnatamente per l'effetto latitudine ci si aspettava una diminuzione dell'intensità dei raggi cosmici all'avvicinarsi dell'equatore magnetico mentre per l'effetto est-ovest una asimmetria nell'intensità della radiazione cosmica rispetto al meridiano magnetico (un aumento di intensità da est a ovest nel caso di prevalenza di particelle cariche negativamente, un aumento di intensità da ovest a est se le particelle sono positive).

Nel 1931 Rossi tentò di convalidare la teoria sui due effetti a Firenze ma senza ottenere il risultato sperato. In un articolo scritto con Fermi egli spiegò il motivo del "fallimento", dovuto alle condizioni

⁷Così B. ROSSI, *L'enigma dei raggi cosmici*, cit., pp. 7-8-26-27, cui si è fatto riferimento per la stesura del paragrafo 2.2, nonché a G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp. 200-206

sfavorevoli in cui si erano compiute le misure; infatti l'effetto latitudine risulta essere maggiore a basse latitudini mentre quello est-ovest maggiore a grandi altitudini. Per questi motivi si decise di effettuare le misure vicino all'equatore. La spedizione guidata dal fisico italiano potè essere realizzata solo nel 1933, a causa del trasferimento di Rossi da Firenze a Padova e delle difficoltà nell'ottenere i fondi per finanziare il viaggio; nel frattempo altri fisici lo avevano preceduto, tra cui Compton, il quale pubblicò i suoi risultati nel 1932. L'esperimento di Rossi confermò solamente l'effetto latitudine, durante il viaggio da Spalato a Massua, ed evidenziò l'effetto est-ovest in modo più decisivo rispetto ai risultati precedenti. Le misure dell'effetto est-ovest vennero svolte ad una altezza di 2370 *m* e ad una latitudine di 11°30' a nord, con la prevalenza di radiazione da occidente; ciò implica che la radiazione stessa sia costituita da particelle cariche positivamente.

Tali esperimenti diedero, dunque, ragione alla tesi corpuscolare e, in particolare, si comprese finalmente la natura della radiazione primaria, costituita da particelle di carica positiva.

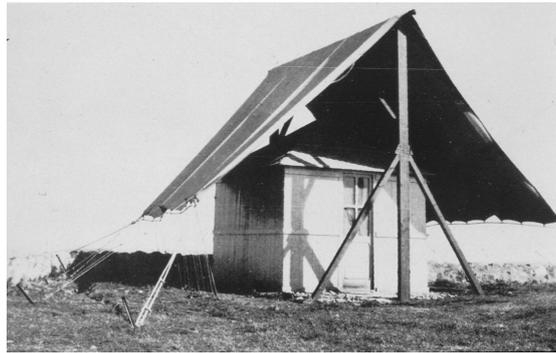


Figura 2.3: La capanna di legno ad Asmara dove Rossi nel 1933 svolse gli esperimenti sull'effetto est-ovest

2.3 Gli Sciami

La spedizione in Eritrea non fu significativa solo per definire la natura della radiazione primaria, ma fu importante anche perchè permise di formulare per la prima volta l'ipotesi circa l'esistenza degli sciami estesi nei raggi cosmici⁸. Rossi aveva scoperto che l'interazione dei raggi cosmici con la materia produce gruppi di particelle (che verranno poi chiamate "showers") con una frequenza inaspettata. Precisamente egli dispose tre contatori Geiger in una configurazione triangolare, orizzontalmente tra di loro e non verticalmente. In questa situazione le coincidenze non potevano essere dovute ad una singola particella che viaggia in linea retta; si ebbe così la prima evidenza sperimentale dell'esistenza degli sciami. Inoltre ad Asmara Rossi e il suo assistente De Benedetti andarono a misurare le frequenze di coincidenze casuali utilizzando due contatori Geiger-Muller, lontani l'uno dall'altro: il risultato ottenuto fu che la frequenza delle coincidenze casuali era molto più grande rispetto al tempo di risoluzione del circuito. Verificarono, inoltre, che la frequenza delle coincidenze registrata utilizzando tre contatori era maggiore rispetto a quella registrata usandone due.

Tutto ciò portò il fisico veneziano a ritenere che non tutte le coincidenze fossero veramente casuali e che dunque fossero esistenti gli "sciami", cioè un elevato numero di particelle secondarie ionizzanti che la radiazione cosmica genera nella materia.

Questa ipotesi fu confermata negli anni successivi grazie alle innovazioni tecnologiche, in particolare all'applicazione della camera a nebbia negli studi concernenti i raggi cosmici.

Tale strumento consentiva di osservare le traiettorie di particelle ionizzanti: segnatamente una particella carica, durante il passaggio attraverso il vapore sovrassaturo contenuto nell'apparecchio, cedeva energia al gas, producendo così ioni attorno ai quali il vapore formava per condensazione goccioline d'acqua. Queste ultime costituivano una scia che rappresentava la traiettoria seguita dalla particella carica.

⁸Così G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp.207-208.

Nel 1933 i fisici Blackett e Occhialini, avvalendosi della sopraccitata camera a nebbia, riuscirono a fotografare il fenomeno degli sciami creati dall’interazione delle particelle con le pareti dello strumento⁹. Sul punto intervennero anche i fisici Pierre Auger e Roland Maze, i quali nel 1938 dimostrarono che, utilizzando i contatori di Geiger-Müller posti a diversi metri di distanza l’uno dall’altro, si registravano delle coincidenze, intese come l’arrivo simultaneo di particelle di raggi cosmici nei due dispositivi. Pertanto risultò chiaro che tali particelle secondarie provenissero da una sorgente comune; fu così confermata ulteriormente l’esistenza degli “*sciame atmosferici estesi*”, i cosiddetti “*Extensive Air Shower (EAS)*”¹⁰.

2.4 Raggi “hard” e raggi “soft”

Dopo il rientro dall’Eritrea Rossi continuò ad approfondire le scoperte compiute a Padova, dove l’anno precedente (1932) aveva ricevuto la cattedra come professore di fisica sperimentale, dedicandosi in particolare alla realizzazione di un apparato strumentale per lo studio degli sciami della radiazione cosmica. Egli misurò la velocità di coincidenze provenienti da tre contatori diversi in funzione dello spessore del piombo posto sopra i contatori. Il risultato è la “*curva di Rossi*”, la quale mostra che all’aumentare dello spessore del piombo il numero di cascate emergenti incrementa in un primo momento fino a raggiungere un massimo, per poi diminuire molto velocemente. Sulla base delle misure compiute Rossi operò una suddivisione della radiazione cosmica locale, ossia quella che giunge sulla Terra, in “*due tipi di corpuscoli elettrizzati: i corpuscoli duri -ossia la componente hard- dotati di un elevatissimo potere di penetrazione, che generano nella materia un numero relativamente piccolo di sciami[.]; i corpuscoli molli - la cosiddetta componente soft - che generano un gran numero di sciami, che hanno un potere di penetrazione assai minore [.]*”¹¹.

Nell’immediato si pose il problema di capire quale fosse la natura dei raggi più penetranti, i cosiddetti “raggi molli”. A tal proposito, esclusa l’ipotesi che questi potessero essere costituiti da elettroni di grande energia¹², Rossi dichiarò che non rimaneva “*altra possibilità se non quella di ammettere l’esistenza di corpuscoli finora sconosciuti*”¹³.

2.5 I muoni

Nello 1937 i fisici H.Neddermeyer e C.Anderson, e in modo indipendente J.C. Street e E.C. Stevenson, scoprirono l’esistenza di una nuova particella: nello specifico inserendo una camera a nebbia in un campo magnetico, analizzarono la curvatura della traiettoria della radiazione cosmica e accertarono l’esistenza di una particella di carica negativa e di massa maggiore rispetto a quella degli elettroni, ma minore di quella dei protoni (da qui il nome “*meso-troni*”, oggi chiamati muoni).

La scoperta del muone interessò molti scienziati, tra cui i tedeschi Euler e Heisenberg, i quali nel 1938 avanzarono due ipotesi al riguardo:

- l’instabilità della nuova particella al fine di spiegare la riscontrata diminuzione della stessa nell’atmosfera a causa del decadimento in volo;

⁹Così B. ROSSI, *L’enigma dei raggi cosmici*, cit., p. 29

¹⁰Cfr. C. ARAMO, *I raggi cosmici*, intervento nel corso dell’International Cosmic Day svoltosi a Napoli il 30 novembre 2017, in www.agenda.infn.it.

¹¹Così B.ROSSI, *Le attuali conoscenze sperimentali sulla radiazione cosmica*, Nuovo Cimento, 15 (1938) 43-65, pp. 60-61, Atti della XXIX Riunione della Società Italiana di Fisica e del Congresso di Fisica. Si tratta di un estratto del discorso tenuto da Rossi in occasione della Conferenza tenutasi a Bologna nell’ottobre del 1937, a cui parteciparono tutti i maggiori esponenti del mondo della fisica del tempo, tra cui Bohr, Fermi, Schrödinger, Sommerfeld, Heisenberg e altri.

¹²Si fa riferimento all’ipotesi sviluppata da Bhabha, Heitler, Carlson e Oppenheimer in quegli anni, basata sull’elettrodinamica quantistica.

¹³Si veda B.ROSSI, *Further Evidence for the Radioactive Decay of Mesons*, Nature, 142 (1938) 993, p. 63. Queste parole sono state pronunciate da Rossi in occasione della Conferenza di cui alla nota 10.

- “the hard component of cosmic rays consisted of mesotrons produced in the upper layers of the atmosphere by primary electrons or photons”¹⁴.

2.5.1 Instabilità dei muoni

Subito dopo la scoperta del mesotrone, questo venne ricondotto dal fisico giapponese Yukawa alla cosiddetta “*particella di Yukawa*” o “*yukon*”, da egli stesso teorizzata un paio di anni prima per descrivere l’interazione nucleare forte tra i nucleoni all’interno del nucleo. L’idea consisteva nel fatto che la forza attrattiva tra neutrone e protone poteva essere spiegata in termini di scambio tra di essi di una particella che fungeva da quanto mediatore, in analogia a quanto avviene con la forza elettromagnetica, in cui la particella mediatrice, il fotone, viene emesso e assorbito dalle particelle cariche.

Si tratta di una particella instabile, che decade in un elettrone e in neutrino, con una vita media dell’ordine del microsecondo, e proprio per queste caratteristiche venne associata al muone¹⁵.

Negli anni immediatamente successivi alla scoperta del muone vennero svolti molti esperimenti da parte dei fisici più impegnati nel campo dei raggi cosmici con riferimento alla misura della vita media degli stessi. In particolare nel 1939 Rossi e Nereson condussero un esperimento alla Cornell University avvalendosi di un particolare cronometro elettronico, denominato “TAC” (acronimo di “Time-to-Amplitude Converter”) in grado di misurare il tempo che intercorre tra il momento in cui il mesotrone viene fermato nell’assorbitore e il momento in cui decade; in tal modo stimarono la durata della vita media del muone in $(2,15 \pm 0,07) \mu s$ ¹⁶.

Un’ulteriore prova diretta dell’instabilità dei “*mesotroni*” venne fornita nel 1941 quando due collaboratori di Bernardini, Conversi e Piccioni, svolsero un esperimento basato sul conteggio delle coincidenze di ritardo tra l’impatto dei mesoni a basse energie e il decadimento degli elettroni; il risultato ottenuto fu che la vita media dei muoni è di $(2,3 \pm 0,15) \mu s$, in accordo con la misura compiuta da Rossi e, nello specifico, in accordo con le stime attuali¹⁷.

2.5.2 Origine dei muoni ed esperimento CPP

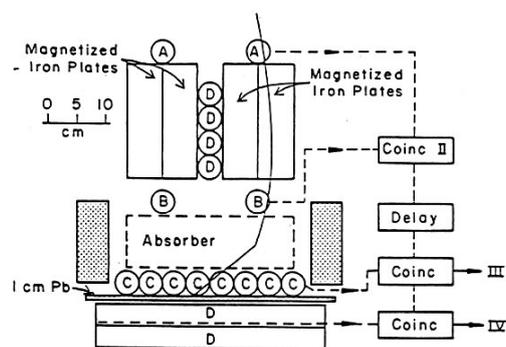


Figura 2.4: L’apparato strumentale usato da Conversi, Pancini e Piccioni

I fisici Tomonaga e Araki ritennero che, se realmente il muone fosse riconducibile alla particella di Yukawa, i mesoni dei raggi cosmici, in presenza di un materiale assorbente, avrebbero dovuto comportarsi in un modo ben preciso: i mesoni positivi non dovevano interagire con i nuclei a causa della repulsione elettrostatica e dunque potevano decadere nell’assorbitore, mentre quelli negativi dovevano subire un processo di cattura nucleare, senza avere il tempo di decadere¹⁸. Tra il 1944 e il 1945 i tre fisici italiani Conversi, Pancini e Piccioni misero in atto una serie di esperimenti, volti a verificare la teoria di Tomonaga e Araki. Nello specifico realizzarono un nuovo apparato strumentale di coincidenze veloci, dotato di lenti magnetiche, al fine di distinguere il comportamento dei mesoni positivi da quelli mesoni negativi. Nel primo

esperimento, utilizzando un assorbitore di ferro, si vide che solo i mesoni positivi cadevano tanto che “[...] the prediction of Tomonaga and Araki seems to be confirmed experimentally”¹⁹. All’inizio del

¹⁴ “[...] la componente hard è costituita da mesotroni prodotti nelle regioni più basse dell’atmosfera a partire da elettroni primari o fotoni”: si veda B. ROSSI, “Further Evidence for the Radioactive Decay of Mesotrons”, cit., p.993

¹⁵ Conoscendo il range della forza forte (1 fm) e sfruttando il principio di indeterminazione $\Delta E \Delta t = \frac{h}{2\pi}$ Yukawa poté stimare la massa di questa particella (200 MeV).

¹⁶ Cfr. G.PERUZZI, Bruno Benedetto Rossi, “L’inesauribile ricchezza della natura”, in ilbolive.unipd.it.

¹⁷ Così G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp.216-217.

¹⁸ Così G.BATTIMELLI, *Muoni sotto le bombe*, in *Asimmetrie*, ottobre 2017, [as23] muone.

¹⁹ “[...] la predizione di Tomonaga e Araki sembra essere confermata sperimentalmente”: si veda M.CONVERSI, E.PANCINI, O.PICCIONI, *On the Decay Process of Positive and Negative Mesons*, *Phys. Rev.*,68, (1945) 232, p. 232.

1946 venne ripetuto l'esperimento, sostituendo l'assorbitore in ferro con un altro in carbonio, dotato per l'appunto di un numero atomico inferiore; la ragione di questa variazione consisteva nell'osservare raggi γ di alta energia eventualmente emessi dopo la cattura nucleare dei mesotroni. Il risultato questa volta però sembrò essere “[...] quite inconsistent with Tomonaga and Araki's prediction”²⁰ in quanto si riscontrò che sia i mesoni positivi sia quelli negativi decadevano nell'assorbitore, annullando quindi la teorizzata differenza di comportamento tra i mesoni di carica opposta. L'esito di quest'ultimo esperimento venne subito comunicato ad Amaldi, il quale si adoperò di informare i fisici americani ancora prima dell'uscita della pubblicazione sulla Physical Review. Fermi, Teller e Weisskopf dimostrarono che i risultati ottenuti non potevano essere spiegati in alcun modo basandosi sulla teoria di Tomonaga e Araki, dal momento che il tempo di cattura nucleare doveva essere di molti ordini di grandezza minore rispetto alla vita media dei mesoni. Constatato che i muoni non rappresentavano la particella di Yukawa e che non erano dunque soggetti all'interazione forte, i fisici Bethe e Marshak formularono una teoria secondo cui i muoni sono particelle secondarie, dovute al decadimento di altri mesoni, i quali costituiscono i “veri yukons”; si tratta dei mesoni π , detti anche pioni²¹. Infatti nel 1947 Powell e i suoi collaboratori attraverso delle lastre fotografiche esposte nelle Ande boliviane avevano riscontrato “[...] the existence of mesons of different mass”²², proponendo come spiegazione delle osservazioni compiute di “represent the primary mesons by the π and the secondary by the μ ”²³.

Si possono riassumere le scoperte di cui sopra con le parole pronunciate da C. Peyrou nel 1982 in occasione del “Paris Colloque on the History of Particle Physics”: “There were two mesons: π and μ . The π decays into a μ and a unique neutral particle because the μ emitted in the decay has always the same range. The best interpretation of Conversi, Pancini and Piccioni result is to assume the π 's have a strong interaction and are produced in nuclear interactions [...] They decay very quickly into μ 's which have very weak interactions with mesotrons”²⁴. Tutte le predette scoperte, dunque, hanno permesso di chiarire la natura non solo della radiazione primaria – ossia di quella proveniente dalla sorgente celeste – ma anche della radiazione locale, cioè quella che giunge sulla Terra. Quando i raggi cosmici entrano nell'atmosfera, essi collidono con i nuclei di cui è composta, rilasciando protoni e neutroni e generando mesoni π ; con riferimento a questi ultimi, alcuni interagiscono nuovamente con i nuclei dei gas atmosferici, altri decadono nei muoni μ . Il continuo susseguirsi di tali interazioni e decadimenti produce una “cascata” di particelle secondarie, molte delle quali, soprattutto elettroni, muoni, fotoni e neutrini, arrivano fino alla superficie terrestre²⁵.

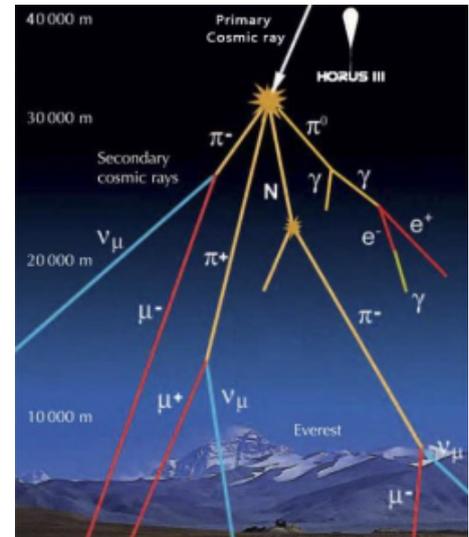


Figura 2.5: Rappresentazione di un tipico sciame di una radiazione cosmica

²⁰ “[...] piuttosto inconsistente rispetto alla predizione di Tomonaga e Araki”: si veda: M.CONVERSI, E.PANCINI, O.PICCIONI, On the Disintegration of Negative Mesons, Phys. Rev., 71, (1947) 209-210, p. 210

²¹ Si veda nota n.16.

²² “l'esistenza di mesoni di massa differente”: si veda: C.M.G. LATTES, G.P.S. OCHHIALINI, C.F. POWELL, Observations on the tracks of slow mesons in photographic emulsions, Nature, 159 (1947)453-6 (Part 1) and 486-92 (Part 2), p. 453

²³ “rappresentare i mesoni primari con π e quelli secondari con i μ ”: C.M.G. LATTES, G.P.S. OCHHIALINI, C.F. POWELL, Observations on the tracks of slow mesons in photographic emulsions, cit., p. 455

²⁴ “Ci sono due mesoni: π e μ . Il π decade nel μ e in un'unica particella neutra perchè il μ emesso nel decadimento ha sempre lo stesso range. La migliore interpretazione del risultato di Conversi, Pancini e Piccioni è di assumere che il π abbia una interazione forte e che siano prodotti nelle interazioni nucleari [...] Essi decadono molto rapidamente in μ i quali hanno una interazioni molto deboli con i mesotrons”: si veda C.PEYROU, The role of cosmic rays in the development of particle physics, J. Phys. (Paris) C-8 (1982) 7-66, p. 21.

²⁵ Si veda www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici.

La ricerca in Italia nel dopoguerra

3.1 La crisi della fisica italiana negli anni della Guerra

Verso la metà del secolo scorso gli studi e le ricerche nell'ambito della fisica conobbero un periodo di grave crisi in Italia, dovuto alla Seconda Guerra Mondiale ²⁶. Molti laboratori di ricerca erano stati in parte distrutti o danneggiati durante i bombardamenti della Guerra, vari scienziati erano stati costretti a lasciare il paese per ragioni politiche e i fisici rimasti erano completamente all'oscuro riguardo le nuove scoperte compiute in quegli anni negli altri paesi (per usare le parole di Nicolò Dallaporta: “[...] *we were all of us ignorant concerning the developments of physics during the six years of war*” ²⁷). Solo alcune città erano rimaste aggiornate circa le ricerche compiute nel campo durante gli anni della Guerra, tra cui Milano e Roma, ma erano ancora “*indietro per quanto riguardava le tecniche sperimentali*”, come spiegò Amaldi, riferendosi in particolare alla situazione romana ²⁸. Ciò era dovuto anche al fatto che l'industria italiana era stata prima impegnata esclusivamente nella produzione di armi per la guerra e in seguito nella ricostruzione di tutto il Paese; per questo motivo i fisici italiani non poterono contare sull'appoggio dell'industria per rendere i laboratori di ricerca all'avanguardia, come ad esempio quelli americani, i quali disponevano di molti potenti acceleratori di particelle.

3.2 La rinascita

Fu proprio in questo periodo di crisi della fisica italiana che vennero attuate una serie di riforme e cambiamenti nel campo della ricerca sperimentale permettendo così al nostro Paese di diventare nel corso di pochi anni uno dei più grandi centri scientifici al mondo nell'ambito dello studio dei raggi cosmici. Significative furono le parole di Amaldi per descrivere la situazione italiana verso la fine degli anni '40: “*gli anni della ricostruzione erano chiaramente terminati grazie ad un'opera collettiva non molto frequente nel nostro paese per ampiezza numerica, varietà e qualità delle persone e durata del tempo (circa un decennio). Le stesse strutture organizzative erano veramente nuove e avrebbero potuto servire d'esempio per altre attività, non solo di fisica pura e applicata, ma di ricerca in generale. Cominciava dunque, in Italia, anzi in Europa, una nuova fase, non solo per le ricerche relative alle particelle elementari ma in generale per tutta la ricerca*” ²⁹.

²⁶Così G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*. Per la stesura del capitolo 3 si è fatto riferimento al testo summenzionato, in particolare alle pp. 218-235.

²⁷ “[...] noi eravamo tutti profondamente ignoranti riguardo gli sviluppi della fisica durante i sei anni della guerra”: si veda N.DALLAPORTA, *Researches on high energy physics in Padova in the period 1945-1960*, in *The restructuring of physical sciences in Europe and the United States 1945-1960*, edited by M.DE MARIA, M.GRILLI, F.SEBASTIANI, (World Scientific, Singapore) 1989, p. 534.

²⁸E.AMALDI, *Gli anni della ricostruzione*, *Giornale di Fisica*, XX (1979) 186-225, p. 206.

²⁹E.AMALDI, *Gli anni della ricostruzione*, cit., p. 225.

3.2.1 Il Laboratorio Testa Grigia

Un esempio significativo di tale rinascita fu dato dal Centro di Studi di Fisica Nucleare del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) per conto dell'Istituto di Fisica di Roma, diretto da Edoardo Amaldi. Gilberto Bernardini, Claudio Longo ed Ettore Pancini seguirono il progetto e la realizzazione all'altezza di 3500 m, vicino a Cervinia, di un laboratorio per lo studio delle particelle elementari per mezzo dei raggi cosmici, chiamato "Laboratorio della Testa Grigia". Il gruppo di fisici che operavano a Milano, costituito da Giorgio Salvini e dai suoi collaboratori, lavorarono nel Laboratorio Testa Grigia, interessandosi in particolare di esaminare le componenti elettromagnetiche provenienti dalle esplosioni nucleari e di raccogliere materiale necessario a formulare una teoria circa la produzione dei mesoni. Era rimasta, infatti, senza soluzione la questione concernente il modo in cui le particelle sopracitate venissero prodotte, se l'interazione nucleone-nucleone producesse un mesone alla volta (in tal senso si parla di "produzione singola"), come sostenevano Heisenberg e altri, o se producesse molti mesoni ("produzione multipla").

I fisici Walter Heitler e Lajos Janossy ritenevano che "*severals mesons would be created in one elementary act*"³⁰, teoria confermata dalle analisi compiute sulle cascate nucleari nel Laboratorio. Nello specifico Salvini e il suo gruppo di lavoro analizzarono esplosioni prodotte in nuclei di differenti dimensioni e i risultati indicarono proprio che un "*incident nucleon interacts usually with more than one nucleon of the same nucleus*"³¹.



Figura 3.6: Il Laboratorio della Testa Grigia al Plateau Rosa, a 3500 metri di quota sopra Cervinia



Figura 3.7: Edoardo Amaldi, Gilberto Bernardini e Ettore Pancini al laboratorio della Testa Grigia (1947)

Fino alla metà degli anni '50 furono realizzati importanti ricerche, interrotte per quasi 10 anni a causa di problemi finanziari. Ma dal 1965 il laboratorio ricominciò a funzionare grazie all'Istituto di Cosmo Geofisica diretto dal Prof. C. Castagnol. Dal 2002 il laboratorio appartiene all'Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario di Torino ed è tuttora operativo, vengono infatti svolti studi sull'astrofisica, sulla fisica dei raggi cosmici, sulla fisica atmosferica e sulla meteorologia.

³⁰ "[...] molti mesoni sarebbero creati in un elementare atto": si veda W.HEITLER, *Theory of Meson Production*, Rev. Mod. Phys.,21 (1949) 113-21, p. 120.

³¹ "[...] il nucleone incidente interagisce solitamente con più di un nucleone dello stesso nucleo": si veda A.LOVATI, A.MURA, G. SALVINI, G. TAGLIAFERRI, *Proprietà delle particelle emesse nelle esplosioni nucleari e confronto tra le esplosioni in C e in Pb*, Nuovo Cimento, 7 (1950) 36-47

3.2.2 Lo sviluppo dell'Università di Padova

Oltre a Roma e Milano, anche Padova in quegli anni divenne uno dei centri più attivi nel lavoro di ricerca sulla radiazione cosmica. Nel 1932 Rossi era diventato professore di fisica sperimentale nella città veneta e aveva anche promosso la realizzazione della attuale sede del Dipartimento di Fisica, inaugurata nel 1937, la quale fin da subito dimostrò di essere uno degli Istituti di Fisica più avanzati dell'epoca, in particolare per la strumentazione presente. Nello specifico Rossi aveva avviato la costruzione di un grande acceleratore da 1 milione di Volt, il primo acceleratore di questo tipo in Italia, insieme ad un altro situato a Roma, nell'Istituto Superiore della Sanità. Inoltre furono costruiti una camera a nebbia Wilson per fotografare le tracce delle particelle e un potente elettromagnete con cui deviare le particelle cariche provenienti dall'acceleratore o i raggi cosmici. Rossi, suo malgrado, non poté usufruire degli strumenti da lui realizzati in quanto costretto, essendo di origini ebraiche, a lasciare l'Italia nel 1938 in seguito alla promulgazione delle leggi razziali³².



Figura 3.8: Michelangelo Merlin al lavoro con lo strumento per lo sviluppo delle emulsioni nucleari nel 1950

Il successore, Antonio Rostagni, subito si diede da fare per mettere in funzione l'acceleratore di Rossi e, in merito a questo, diede vita nel 1947 al "Centro per lo studio degli ioni veloci", finanziato dal CNR, permettendo così di ottenere facilmente i fondi per la ricerca.

A causa di alcuni problemi non fu possibile proseguire l'utilizzazione dell'acceleratore e per questo motivo anche Padova si dedicò completamente alla ricerca sui raggi cosmici e sulle particelle che venivano scoperte. Inoltre Rostagni si impegnò a creare contatti tra i fisici padovani e i laboratori stranieri, in vista di poter far apprendere ai suoi colleghi nuove tecniche o approcci riguardanti la materia analizzata. Tra questi spiccava in particolare Michelangelo Merlin, il quale si occupò anche della realizzazione di uno strumento per lo sviluppo delle emulsioni nucleari, basandosi sul metodo fotografico di Powell e Occhialini. Le emulsioni fotografiche sono costituite da un foglio di emulsione posto su un supporto di plastica trasparente e contengono grani di alogenuro di argento, i quali se esposti alla luce subiscono un processo chimico, riducendo i grani che hanno assorbito i fotoni ad argento metallico. Nel 1910 si era scoperto che la radiazione ionizzante produceva effetti simili: una volta sviluppata una lastra fotografica mostra le tracce delle particelle cariche che

l'hanno attraversata, sotto forma di scie di grani di argento. Proprio in quegli anni vennero esposte sul Monte Rosa a 4550 m di altitudine delle lastre costituite da emulsioni fotografiche, che permettevano di vedere le traiettorie delle particelle e le loro interazioni³³.

Rostagni promosse la costruzione di un ulteriore Laboratorio di ricerca per i raggi cosmici a Pian di Fedaia all'altezza di 2000 m sulle Dolomiti. Qui vi lavorarono Piero Bassi e i suoi collaboratori, i quali iniziarono a utilizzare strumenti elettronici per le osservazioni, e Marcello Cresti insieme ad altri ricercatori del "gruppo padovano", i quali esaminarono la distribuzione angolare delle particelle all'interno delle "extensive air showers". In tutti gli esperimenti svolti in questo Laboratorio furono indispensabili l'utilizzo della camera a nebbia e del potente elettromagnete lasciati da Rossi³⁴.

Cresti, dopo aver lasciato il Laboratorio di Fedaia e dopo aver trascorso alcuni anni a Berkeley, ritornò

³²Così G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp.226-227 e cfr. [divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/archivio-mostre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-ed-oltre/](http://divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/archivio-mostre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-ed-oltre/mostra-fotografica-la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-e-oltre/) a cura di Sofia Talas, Giulio Peruzzi, Elisa Prandini, Luigi Tibaldo, Giovanni Busetto, Fanny Marcon.

³³Cfr. divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/archivio-mostre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-ed-oltre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-agli-anni-50-gli-strumenti/emulsioni-nucleari-anni-1950-60/

³⁴Così G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp.229-231.

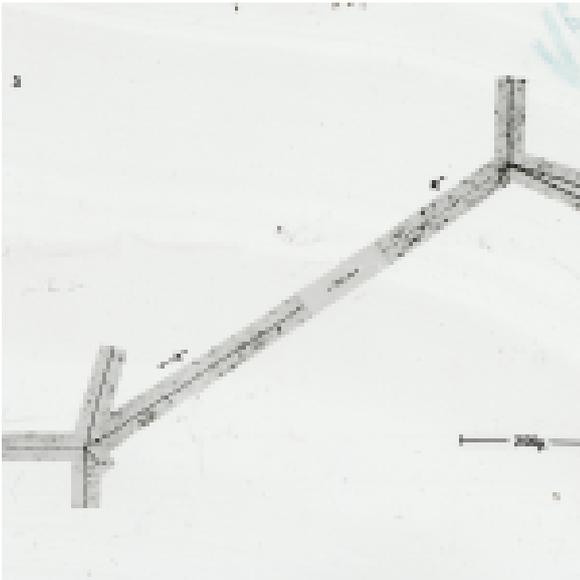


Figura 3.9: Traccia di particelle K in un'emulsione nucleare, Padova, 1950-60



Figura 3.10: Il Laboratorio Fedaia sulle Dolomiti a 2000 m dal livello del mare

a Padova e, arricchito dall'esperienza in collaborazione con Luis Alvarez, iniziò la costruzione di un dispositivo semiautomatico per la ricostruzione delle tracce di particelle in camere a bolla, denominato "Frankstein", il primo strumento in Europa di questo tipo. Inoltre realizzò un separatore elettrostatico di fasci, il quale venne per molti anni utilizzato al CERN a Ginevra.

Negli stessi anni anche a Milano le ricerche furono concentrate sulla ricerca dei raggi cosmici, in particolare sullo studio della componente penetrante delle "EAS" e della produzione locale di particelle penetranti dalle cascate. Il maggiore esponente fu Giorgio Salvini, il quale, dopo aver lavorato nell'immediato dopoguerra al Laboratorio Testa Grigia, dal 1949 al 1951 trascorse un periodo negli USA, ospite dell'Università di Princeton, confrontandosi con Enrico Fermi, Bruno Rossi e John Wheeler. Nel 1955 venne chiamato da Amaldi a Roma, dove fu coinvolto nella costruzione del primo Laboratorio Nazionale facente capo all'INFN, ossia dei Laboratori Nazionali di Frascati, con al suo interno un potente acceleratore di elettroni, un elettrosincrotrone da 1100 MeV.

Infine pure Torino divenne un centro molto attivo nel campo, soprattutto sul piano teorico, grazie ad esponenti come Gleb Wataghin, Marcello Cini, Sergio Fubini, Luigi Aialdo Radicati di Brozolo. Venne anche costruito un nuovo centro di ricerca CNR anche a Torino, similmente a Roma e Padova. Con l'obiettivo di rendere migliore la collaborazione tra i tre centri CNR di Roma, Padova e Torino nel 1951 fu fondato l'INFN, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare; negli anni successivi vennero aperte altre sezioni, tra cui Milano³⁵. L'anno successivo l'Italia fece il suo ingresso nel CERN, favorendo così il confronto della fisica italiana con quella degli altri paesi europei.

3.3 Dalle "strange particles" al "G-stack"

Dopo la scoperta del μ , del mesone π e dei loro decadimenti si poteva pensare di aver completato il quadro teorico riguardante le interazioni fondamentali: i pioni rappresentavano i mediatori delle interazioni nucleari, mentre i fotoni lo erano per quelle elettromagnetiche. Tuttavia nel 1947 a Manchester i fisici Rochester e Butler rivelarono con delle camere a nebbia nuove particelle instabili, con una massa compresa tra $700m_e$ e $1000m_e$, chiamate in seguito "V particles", proprio in merito alla forma della traccia in una emulsione nucleare³⁶. Nell'immediato in altri laboratori, come quelli di Bri-

³⁵Così G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp.233-234-235.

³⁶Così G. PERUZZI, S. TALAS, *La rivista del Nuovo Cimento*, cit., pp.235-245 e
cfr <http://divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/archivio-mostre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno->

stol, dell'Ecole Polytechnique, di Berkely, venne dimostrata l'esistenza di altre particelle sconosciute (denominate appunto "strange particles"), usando emulsioni fotografiche e camere a nebbia. Per anni gli studi si concentrarono su queste nuove particelle, con l'obiettivo di conoscere il loro tempo di vita medio, il loro modo di prodursi e di decadere. Fu dunque necessario uno sforzo di catalogazione, per poter classificare le nuove particelle in tre famiglie:

- V^+ : particelle cariche che decadono in particelle cariche e particelle neutre; questo tipo di particelle erano dette θ
- V^0 : particelle neutre che decadono in due particelle cariche
- τ : particelle che decadono in tre particelle cariche

Dal momento che le nuove particelle erano piuttosto rare da osservare nei raggi cosmici, Powell propose la collaborazione di più laboratori, in modo tale da poter disporre di maggiori dati su cui lavorare. Nello specifico la strategia suggerita dal fisico per lo studio delle "strange particles" era quello di esporre lastre ad emulsione a grandi altitudini (20/30 km), per mezzo di palloni di polietilene in grado di volare per alcune ore ad una altezza stabile e di raccogliere così i dati, distribuiti poi ai vari laboratori per essere analizzati. L'esperimento doveva essere svolto a basse latitudini, da far sì che l'azione del campo magnetico terrestre rimuovesse le particelle a bassa energia, permettendo in tal modo di osservare solo i nuclei pesanti ad alta energia. Per questo motivo e per le buone condizioni meteorologiche si scelse di svolgere due esperimenti nel Sud dell'Italia, entrambi finanziati dal CERN.



Figura 3.11: Un pallone in polietilene per le emulsioni ad alta quota

Il primo esperimento venne realizzato tra il maggio e il giugno del 1952 in Sardegna e vi parteciparono in un primo momento 13 università, tra le quali ricordiamo Bristol, Londra, Parigi, Milano, Padova, Torino, Genova e Cagliari - il cui numero in seguito salì a 19 nel secondo esperimento - rappresentando così il primo esempio di collaborazione internazionale nell'ambito della fisica delle particelle. Non si trattò di un vero e proprio successo per via del fatto che i palloni lanciati non sempre volavano ad una altezza stabile e sufficiente ad ottenere buone misure; ad ogni modo vennero esposte 1300 cm^3 di emulsioni ad una altitudine, tra i 23 e i 27 km dal livello del mare, e il materiale raccolto venne analizzato negli anni successivi.

L'anno seguente venne organizzato il secondo esperimento, in cui le università di Padova e Bristol ricoprirono un ruolo fondamentale nella realizzazione dei palloni. La città italiana realizzò tredici dei ventitrè palloni che vennero lanciati sempre in Sardegna, mentre i rimanenti dieci furono prodotti a Bristol. Questi palloni, rispetto ai precedenti, erano migliori sotto vari punti di vista, per le dimensioni - infatti erano lunghi dai 16 ai 33 m e potevano portare un peso dai 25 ai 35 kg - e per tutto l'equipaggiamento, tra cui il paracadute per l'atterraggio in mare, le sonde radio, i radio trasmettitori e le

boe. Tali modifiche furono possibili grazie a nuove tecniche, in particolare per mezzo della realizzazione da parte dell'ingegnere Iginò Scotoni di una nuova macchina per saldare le cuciture dei palloni. Inoltre l'ingegnere costruì nuove piattaforme di lancio, le quali permettevano di riempire i palloni con la quantità di idrogeno necessaria a raggiungere le altitudini desiderate.

Negli anni a seguire tutti i laboratori membri della collaborazione analizzarono le lastre di emulsione; nuove tecniche avevano reso il lavoro più facile, come ad esempio la procedura di far aderire ogni singola emulsione ad una piastra di vetro, trattata con una apposita soluzione e fatta passare attraverso rulli rivestiti di gomma, limitando con la pressione possibili deformazioni. Nel 1953 in occasione della Conferenza Internazionale, tenutasi a Padova, vennero presentati i primi risultati dell'analisi delle lastre dell'esperimento di quell'anno; molte domande riguardo le nuove particelle

rossi-al-g-stack-ed-oltre/mostra-fotografica-la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-e-oltre/, a cui si è fatto riferimento per la stesura del paragrafo

trovarono risposta, si ottenne una prima “[.] clarification on the different types of decay of the K mesons, with some indication that a single type of particle was decaying into several competitive modes”³⁷, ma rimanevano ancora importanti dubbi. Il principale quesito irrisolto riguardava il cosiddetto “ $\tau - \theta$ puzzle”, consistente nel fatto che le due particelle hanno una massa e una vita media confrontabili ma decadono in modi differenti e con parità diverse: $\tau^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^0$ con $J^P = 0^+, 1^-, 2^+$, mentre $\theta^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ con $J^P = 0^-$. I fisici si interrogavano sulla possibilità che queste potessero rappresentare la stessa particella, con l’ostacolo però della non conservazione della parità.

Proprio per questo motivo si decise di organizzare un nuovo esperimento chiamato “G-stack” (“Giant-stack”), supportato soprattutto da Padova, Milano e Bristol. Nell’ottobre del 1954 venne lanciato da Novi Ligure un altro pallone di polietilene, contenente 15 litri di emulsione, per un peso di 63 kg, con una dimensione di $37 \times 27 \times 15 \text{ cm}^3$ e venne esposto ai raggi cosmici della stratosfera. La scelta di lanciare un solo pallone dalle notevoli dimensioni proveniva dal fatto di voler studiare le tracce dei mesoni pesanti in modo completo durante la loro collisione con un nucleo di emulsione³⁸. Infatti una parte consistente di particelle secondarie rimanevano nello “stack”, permettendo così di ottenere valori precisi della loro energia e del loro decadimento e di osservare la loro forma³⁹. Il vero “spirito guida” dell’esperimento fu Merlin, come evidenziò anche Powell affermando che “*I think my colleagues and I will all agree that if anybody has played a distinctive and leading part, it is Dr. Merlin. He played a very important role [...] his enthusiasm and his confidence in a successful outcome of the examination of the plates [...] We are all of us greatly in his debt*”⁴⁰.

La collaborazione del “G-stack” portò ai risultati attesi anche se non senza delle difficoltà, come descrisse Perkins: “*The flight ended with the parachute failing the open and the aluminium container came down in freefall and destroyed 10% of the stack emulsions*”⁴¹. I risultati ottenuti dal “G-stack”, che rappresentarono l’argomento principale della “Conferenza Internazionale sulle Particelle Elementari” tenutasi nel 1955 a Pisa, diedero una soluzione al “ $\tau - \theta$ puzzle”: τ e θ rappresentano un’unica particella, chiamata K^+ , avente due modi di decadimento con parità diversa. La violazione della parità, già ipotizzata nel 1956 dai fisici Lee e Yang (teoria avanzata rispondendo a una domanda posta loro da Feynman circa la possibilità della non conservazione della parità), verrà poi dimostrata con il famoso esperimento della professoressa Wu dell’anno successivo. Gli esperimenti svolti in Sardegna e il “G-stack” rappresentarono gli ultimi grandi successi riguardanti la fisica dei raggi cosmici. All’inizio degli anni 50 l’era di gloria dei raggi cosmici giunse al termine: con l’avvento degli acceleratori non fu più indispensabile studiare le particelle osservando la radiazione cosmica. L’osservazione e l’analisi dei raggi cosmici lasciarono dunque il posto ad un nuovo ramo della fisica, la fisica delle particelle, la quale da quel momento in poi rappresentò - e rappresenta tuttora - uno dei settori più attivi della ricerca.



Figura 3.12: Preparazione del lancio del G-stack

³⁷ “[.] classificazione in differenti tipi di decadimento dei mesoni K, con alcune indicazioni riguardo un singolo tipo di particella che decadeva in molteplici modi differenti”: si veda N.DALLAPORTA, *Researches on high energy in physics in Padova in the period 1945-1960*, cit., pp.532-547

³⁸ Così P.REDONDI, G.SIRONI, P.TUCCI, G.VEGNI, *The Scientific Legacy of Beppo Occhialini*, 2006, p.28

³⁹ Così M. DE MARIA, L.ORLANDO, *Italy in Space: In Search of a Strategy, 1957-1975*, 2008, p. 26

⁴⁰ “Io penso che i miei colleghi ed io saremo tutti d’accordo sul fatto che se qualcuno ha giocato un ruolo distintivo e dominante, questo è il Dr. Merlin. Ha giocato un ruolo importante [...] il suo entusiasmo e la sua fiducia in un risultato positivo nell’analisi delle lastre [...] Noi tutti gli siamo profondamente grati” si veda: G-STACK COLLABORATION, *Observations on Heavy Mesons Secondaries*, Suppl. Nuovo Cimento, 4 (1956) 398-424

⁴¹ “Il volo terminò con il fallimento dell’apertura del paracadute e il contenitore di alluminio cadde giù in caduta libera ed è andato distrutto il 10% delle emulsioni” si veda: D. PERKINS, *Cosmic-ray work with emulsions, 1940s-1950s*, L. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson (eds) *Pions to Quarks*, Cambridge, 1989

Da dove provengono i raggi cosmici?

Mentre al problema relativo alla natura dei raggi cosmici è stata data soluzione nel corso degli anni, la questione concernente la loro origine rimane ancora in parte irrisolta.

Le ipotesi sul campo sono molteplici ⁴²:

- Per quanto riguarda i raggi cosmici con energia inferiore ai 10^{15} eV la teoria maggiormente condivisa sostiene che le sorgenti dei raggi cosmici siano i resti di supernove. Quando una stella giunge al termine della sua vita, essa prima collassa e poi provoca un'immensa esplosione che lancia nello spazio interstellare l'involucro esterno della stella alla velocità di migliaia di chilometri al secondo, disperdendo così nello spazio elementi come carbonio, ossigeno e altri, sintetizzati poi dalle reazioni nucleari nel centro delle stelle. L'esplosione genera un'onda d'urto a cui sono associati campi elettromagnetici che accelerano i raggi cosmici, permettendo loro di allontanarsi dalla sorgente. Tale teoria riguardo all'accelerazione dei raggi cosmici è stata formulata nel 1949 da Fermi.
- Di contro, per i raggi cosmici con energia compresa tra 10^{15} eV e 10^{18} eV si è intuito che la loro origine debba essere extragalattica, ma le specifiche sorgenti non sono state ancora individuate. Si ipotizza che quest'ultime potrebbero essere rappresentate da nuclei galattici attivi, ossia da buchi neri costituenti la regione centrale di particolari galassie, dai quali viene liberata una considerevole quantità di radiazione su tutto lo spettro elettromagnetico. Sono state prospettate altre possibili sorgenti astrofisiche per spiegare l'origine e l'accelerazione dei raggi cosmici di energia elevata, quali:
 - i lampi gamma, scoperti alla fine degli anni Sessanta e generati da esplosioni cosmiche più potenti delle supernove a seguito del collasso di stelle supermassive;
 - le pulsar, stelle di neutroni prodotte dall'esplosione di supernove che ruotano su se stesse con velocità molto elevate tali da creare campi magnetici in grado di accelerare le particelle ⁴³;
 - i microquasar, sistemi binari composti da una stella in orbita intorno a un buco nero all'interno del quale “cade” parte di materia della stella, alimentando così l'emissione di radiazione e dunque di accelerazione per particelle cariche.

I raggi cosmici sono composti prevalentemente da protoni, i quali essendo particelle elettricamente cariche vengono deviati dai campi magnetici, impedendoci di risalire alla loro origine; al contrario i neutrini, che sono prodotti proprio dai protoni di alta energia, essendo particelle neutre e con massa piccola, non vengono deviati dai campi magnetici e interagiscono poco con la materia, rappresentando così una fonte fondamentale di informazione per risalire alla sorgente diretta dei raggi cosmici con energia superiore ai 10^{15} eV.

⁴²Cfr. P. LIPARI, *Voci dell'Universo*, cit., pp. 7 e ss. e G. BUSETTO, G. PERUZZI, E. PRANDINI, S. TALAS, L. TIBALDO, Bruno Benedetto Rossi, cit., pp. 16-17.

⁴³Si veda N. BUCCIATINI, *Raggi cosmici, particelle dallo spazio profondo*, in *Media Inaf*, 25 luglio 2017.

Di recente è stata elaborata una teoria sulla possibile origine in comune dei raggi cosmici, dei neutrini e dei raggi γ dalla Penn State e della Maryland University, pubblicata su Nature Physics⁴⁴. A tal proposito significative sono le parole del vicepresidente dell’Infn, Antonio Masiero: *“Dalle sorgenti cosmiche noi riceviamo vari tipi di segnali, che chiamiamo ‘messaggeri cosmici’. Ne conosciamo quattro tipi: il primo sono i fotoni, cioè particelle di luce, il secondo sono i raggi cosmici, cioè quelle particelle che arrivano alla sommità della nostra atmosfera, con la quale interagiscono, e poi producono uno sciame che arriva fino a terra; il terzo sono i neutrini ad alta energia che arrivano dallo spazio cosmico; il quarto, scoperto di recente, sono le onde gravitazionali [...] Nel loro cammino dalla sorgente questi raggi attraversano ammassi galattici e gas intergalattici, interagiscono con questa materia e producono neutrini e fotoni con alta energia, comparabile a quella dei raggi cosmici che li hanno prodotti. La nuova teoria ipotizza quindi un’origine comune di questi messaggeri cosmici, i fenomeni più violenti del nostro universo”*⁴⁵.

Tale ipotesi sembra essere confermata nel corso degli ultimi due anni, in seguito alla scoperta di una sorgente comune di raggi γ e neutrini⁴⁶. Il 22 settembre 2017 è stato rivelato da IceCube (rivelatore di neutrini nel Polo Sud) un neutrino denominato IC-170922A di energia molto elevata, pari a 290 MeV. Il satellite Fermi osservando con il telescopio LAT (Large Area Telescope) i raggi γ di alta energia provenienti dalla direzione del neutrino è riuscito a localizzare un’emissione di radiazione γ coincidente con una sorgente nota. Si tratta di un blazar (chiamato blazar TXS 0506+056), un nucleo galattico attivo distante 4,5 miliardi di anni luce, in direzione della costellazione di Orione, con al centro un buco nero che rilascia un getto di radiazione e di materia a velocità prossime a quella della luce.

I telescopi MAGIC hanno orientato i loro giganteschi specchi verso la sorgente individuata, rivelandola e osservandone lo spettro di emissione. Dallo studio dello spettro di energia è stato possibile descrivere l’accelerazione di protoni ad alta energia, la produzione di neutrini come quello osservato e l’emissione della radiazione γ osservata in diverse lunghezze d’onda.

La collaborazione tra l’Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), l’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), l’Agenzia Spaziale Italiana (ASI), varie Università e più di 15 esperimenti per la rivelazione dei fotoni da terra e nello spazio ha permesso di dare in parte una soluzione ad una delle più discusse questioni irrisolte riguardanti i raggi cosmici, ossia l’origine dei raggi cosmici ad alta energia, grazie allo studio dell’astronomia del cosiddetto “multimessaggero”.

⁴⁴Si veda www.meteoweb.eu/2018/01/astrofisica-raggi-cosmici-neutrini-e-raggi-gamma-potrebbero-avere-unorigine-comune/1034488/, articolo a cura di Filomena Fotia, 24 gennaio 2018

⁴⁵Si veda nota 41, cit.

⁴⁶Si confronti con www.dfa.unipd.it/fileadmin/php/files/11/07/2018/14/39/44-CS/UNIPD/INFN/Neutrino-EM/V02/10/07/18.pdf a cura di A. De Angelis, M. Mariotti, E. Prandini

I recenti studi sui raggi cosmici

Negli ultimi anni gli scienziati di tutto il mondo hanno proseguito lo studio dei raggi comici con due differenti approcci: mediante l'osservazione diretta o indiretta della radiazione⁴⁷.

- Il primo metodo sperimentale consiste nel porre rivelatori di particelle al di là dell'atmosfera terrestre, precisamente su satelliti in orbita attorno alla Terra.
 - Un esempio è costituito dal **satellite Pamela**, lanciato nel 2006 e dal quale sono state ottenute misure di grande rilievo nell'ambito dei flussi di antimateria presenti nei raggi cosmici.
 - Più recentemente, nel 2011, l'**esperimento Ams (Alpha Magnetic Spectrometer)**, caratterizzato da grandi magneti e rivelatori di particelle installati nella Stazione Spaziale Internazionale, ha reso possibile ulteriori scoperte circa la composizione dei raggi cosmici⁴⁸.
 - L'**esperimento Cosmic Ray Energetics and Mass (CREAM)** del 2008 riguardò il lancio di sette palloni, raggiungendo altitudini tra i 38-40 *km*, ottenendo così una esposizione cumulativa di 191 giorni: l'obiettivo era quello di estendere la conoscenza della composizione dei raggi cosmici anche alle alte energie, fino a 10^{15} *eV*⁴⁹.

Senonché, l'osservazione diretta presenta il limite di non essere un metodo adeguato in caso di aumento dell'energia della radiazione, in quanto i rivelatori spaziali necessiterebbero di superfici enormi su cui essere disposti.

- Da qui lo sviluppo di un'altra via sperimentale che consiste in grandi distese di rivelatori posti sul suolo, grazie ai quali si analizza lo sciame di particelle secondarie che giunge sulla superficie terrestre; è possibile, così, ricostruire la direzione, l'energia e il tipo della radiazione primaria, generatrice della cascata di particelle.
 - **L'esperimento Argo:**
La collaborazione italo-cinese all'esperimento si è posta come obiettivo la ricerca di una soluzione all'enigma sull'origine dei raggi cosmici⁵⁰. La maggiore difficoltà nel determinare le sorgenti astrofisiche dei raggi cosmici sta nel fatto che questi ultimi vengono deviati dai campi magnetici delle galassie, "perdendo – così – ogni memoria della direzione di provenienza"⁵¹. Per questo motivo sull'Altopiano del Tibet gli scienziati studiano i fotoni di alta energia, ossia particelle prodotte insieme ai raggi cosmici durante i processi di interazione, con la particolare proprietà di non essere deviati dai campi magnetici. Tra i risultati più

⁴⁷Si veda P. LIPARI, *Voci dell'Universo*, cit., pp. 10 e ss.

⁴⁸Così R. BATTISTON, *Grandi occhi puntati sul cosmo*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10, pp. 14 e ss.

⁴⁹Così EUN-SUK SEO, *Panoramica della missione CREAM*, cfr. cosmicray.umd.edu/cream/

⁵⁰Cfr. B. D'ETTORE PIAZZOLI e G. DI SCIASCIO, *Sul tetto del mondo*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10, pp. 20 e ss.

⁵¹Così B. D'ETTORE PIAZZOLI e G. DI SCIASCIO, *Sul tetto del mondo*, cit., p. 20.

rilevanti finora ottenuti mediante l'esperimento in esame è doveroso citare la ricerca di antimateria nei raggi cosmici e la scoperta di una direzione privilegiata di provenienza degli stessi.



Figura 5.13: Rivelatori che si estendono per circa 6700 m^2 , nell'altopiano del Tibet

– **L'esperimento Auger:**

Si tratta del più grande osservatorio dedicato allo studio di raggi cosmici di alta energia costruito dall'uomo, che si estende per oltre 3000 km^2 e che coinvolge quattrocento scienziati provenienti da diciotto Paesi, tra cui l'Italia (con la partecipazione dell'Inaf e dell'Infn)⁵². La ricerca degli studiosi si sviluppa ancora una volta intorno all'origine della radiazione cosmica a elevata energia. Le scoperte più significative riguardano il limite dell'energia massima dei raggi cosmici di provenienza extragalattica e l'individuazione dei nuclei galattici attivi come possibili sorgenti dei raggi in esame⁵³. Segnatamente, si è accertato che l'interazione della radiazione cosmica con quella residua del Big Bang causa una brusca diminuzione del flusso per energie superiori a $4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ (il cosiddetto effetto GZK, teorizzato dagli scienziati Greisen, Zatsepin e Kuz'min nel 1966). Per questo motivo si è ipotizzato che le sorgenti dei raggi cosmici ad alta energia siano le galassie a noi più vicine, ossia i nuclei galattici attivi sopracitati, dal momento che a causa del taglio GZK i raggi non possono percorrere distanze eccessive.



Figura 5.14: Osservatorio Pierre Auger a Malargüe, in Argentina

– **Magic (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov):**

Si tratta di due telescopi, il primo entrato in funzione nel 2003 e il secondo nel 2009, per lo studio dei raggi γ , situati a 2200 m di altitudine, sulla cima di un vulcano, nell'Osservatorio del Roque de Los Muchachos, sull'isola di La Palma (Canarie)⁵⁴. Nello specifico essi rappresentano i più grandi telescopi ottici a specchio mai realizzati, con 17 m di diametro

⁵²Si veda AA. VV., *Quei raggi cosmici da galassie lontane lontane*, in Media Inaf, 21 settembre 2017.

⁵³Si veda G. MATTHIAE e F. SCIANNITI, *A caccia di raggi cosmici nella Pampa*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10, pp. 27 e ss.

⁵⁴Si veda home.infn.it/it/approfondimenti/esperimenti/1389-magic-major-atmospheric-gamma-imaging-cherenkov-telescope

e con 240 m^2 di superficie riflettente ciascuno. Tali telescopi hanno il compito di rivelare la luce Cherenkov, ovvero un lampo di luce che dura qualche nanosecondo, dovuto a particelle che viaggiano ad una velocità maggiore della luce nel materiale attraversato (nello specifico $v = \frac{c}{n}$, dove v è la velocità della particella e n l'indice di rifrazione del mezzo attraversato) e che sono state generate dall'interazione tra i fotoni gamma e i nuclei degli atomi che compongono l'atmosfera terrestre. MAGIC infatti è caratterizzato da centinaia di specchi allineati per mezzo di un sistema di puntamento laser, in grado di rivelare e fotografare questi bagliori con una telecamera con risoluzione temporale inferiore al nanosecondo. Inoltre i telescopi sono in collegamento con quelli posizionati in orbita: appena un evento riguardante un raggio γ viene registrato, subito vengono comunicate le coordinate a terra, permettendo così ai telescopi di posizionarsi verso la direzione di provenienza dei raggi. Analizzando il segnale registrato è possibile ricavare informazioni sulla sorgente dei raggi γ , come collassi gravitazionali, onde d'urto che si generano nella fase di accrescimento dei buchi neri oppure resti di supernove.



Figura 5.15: I telescopi MAGIC all'osservatorio astronomico di Roque de Los Muchachos, La Palma

– **Milagro (Multiple Institution Los Alamos Gamma Ray Observatory):**

Il rivelatore Milagro è situato nelle montagne di Jemez vicino a Los Alamos, in Messico ed è stato progettato per rivelare i fotoni ad alta energia chiamati “raggi VHE gamma”, misurare la loro energia e determinare la direzione di arrivo⁵⁵. Consiste in un laghetto artificiale riempito di acqua in cui sono presenti due strati di fotomoltiplicatori, uno disposto a $1,5 \text{ m}$ e l'altro a 6.5 m sotto il livello dell'acqua, ognuno dei quali è collegato esternamente al laghetto ad apparecchiature elettroniche per fornire tensione al PMT e per trasmettere il segnale, che verrà poi convertito in forma digitale e analizzato. Un fotone o un protone ad alta energia quando entra nell'atmosfera interagisce con i suoi atomi, producendo particelle secondarie, le quali a loro volta interagiscono e producono altre particelle: le particelle cariche e i fotoni che incidono sul rivelatore Milagro emettono luce cherenkov nell'acqua che viene rivelata dai fotomoltiplicatori.

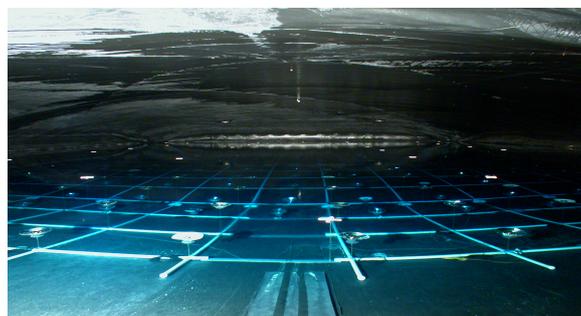


Figura 5.16: Il laghetto artificiale e i fotomoltiplicatori

⁵⁵Cfr. physics.nyu.edu/experimentalparticle/milagro.html

Bibliografia

- [1] AMALDI E., *Gli anni della ricostruzione*, *Giornale di Fisica*, XX (1979) 186-225
- [2] AA. VV., *Quei raggi cosmici da galassie lontane lontane*, in *Media Inaf*, 21 settembre 2017
- [3] BATTIMELLI G., *Muoni sotto le bombe*, in *Asimmetrie*, ottobre 2017, [as23] muone
- [4] BATTISTON R., *Grandi occhi puntati sul cosmo*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10
- [5] BUCCIATINI N., *Raggi cosmici, particelle dallo spazio profondo*, in *Media Inaf*, 25 luglio 2017
- [6] Busetto G., Peruzzi G., Prandini E., Talas S., TIBALDO L., *Bruno Benedetto Rossi*, in ROSSI B., *L'enigma dei raggi cosmici*, Padova, 2012
- [7] CONVERSI M., PANCINI E., PICCIONI O., *On the Decay Process of Positive and Negative Mesons*, *Phys. Rev.*,68, (1945) 232
- [8] CONVERSI M., PANCINI E., PICCIONI O., *On the Disintegration of Negative Mesons*, *Phys. Rev.*, 71, (1947) 209-210
- [9] DALLAPORTA N., *Researches on high energy physics in Padova in the period 1945-1960*, in *The restructuring of physical sciences in Europe and the United States 1945-1960*, edited by M.DE MARIA, M.GRILLI, F.SEBASTIANI, (World Scientific, Singapore) 1989, pp. 532-547
- [10] DE MARIA M., ORLANDO L., *Italy in Space: In Search of a Strategy, 1957-1975*,2008
- [11] D'ETTORE PIAZZOLI B. e DI SCIASCIO G., *Sul tetto del mondo*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10
- [12] G-STACK COLLABORATION, *Observations on Heavy Mesons Secondaries*, *Suppl. Nuovo Cimento*, 4 (1956) 398-424
- [13] HEITLER W., *Theory of Meson Production*, *Rev. Mod. Phys.*,21 (1949) 113-21
- [14] LATTES C.M.G., OCHHIALINI G.P.S., POWELL C.F., *Observations on the tracks of slow mesons in photographic emulsions*, *Nature*, 159 (1947)453-6 (Part 1) and 486-92 (Part 2)
- [15] LIPARI P., *Voci dell'Universo*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10, p.5
- [16] LOVATI A., MURA A., SALVINI G., TAGLIAFERRI G., *Proprietà delle particelle emesse nelle esplosioni nucleari e confronto tra le esplosioni in C e in Pb*, *Nuovo Cimento*, 7 (1950) 36-47
- [17] MATTHIAE G. e SCIANNITI F., *A caccia di raggi cosmici nella Pampa*, in *Asimmetrie*, anno 5 numero 10/9.10
- [18] PERKINS D., *Cosmic-ray work with emulsions, 1940s-1950s*, L. Brown, M. Dresden, L. Hoddeson (eds) *Pions to Quarks*, Cambridge, 1989
- [19] PERUZZI G., SALAS S., *La rivista del Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica*, ??(2007)
- [20] PEYROU C., *The role of cosmic rays in the development of particle physics*, *J. Phys. (Paris) C-8* (1982) 7-66

- [21] REDONDI P., SIRONI G., TUCCI P., VEGNI G., *The Scientific Legacy of Beppo Occhialini*, 2006
- [22] ROSSI B., *Le attuali conoscenze sperimentali sulla radiazione cosmica*, Nuovo Cimento, 15 (1938) 43-65, Atti della XXIX Riunione della Società Italiana di Fisica e del Congresso di Fisica
- [23] ROSSI B., *Further Evidence on the Radioactive Decay of Mesons*, Nature, 142 (1938) 993

Sitografia

- [24] ARAMO C. *I raggi cosmici*, intervento nel corso dell'International Cosmic Day svoltosi a Napoli il 30 novembre 2017, da www.agenda.infn.it
- [25] www.lngs.infn.it/it/raggi-c
- [26] www.divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/archivio-mostre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-ed-oltre/mostra-fotografica-la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-e-oltre/, a cura di Sofia Talas, Giulio Peruzzi, Elisa Prandini, Luigi Tibaldo, Giovanni Busetto, Fanny Marcon
- [27] www.divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/archivio-mostre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-al-g-stack-ed-oltre/la-fisica-dei-raggi-cosmici-a-padova-da-bruno-rossi-agli-anni-50-gli-strumenti/emulsioni-nucleari-anni-1950-60/, a cura di Sofia Talas, Giulio Peruzzi, Elisa Prandini, Luigi Tibaldo, Giovanni Busetto, Fanny Marcon
- [28] www.ilbolive.unipd.it: Bruno Benedetto Rossi, "L'inesauribile ricchezza della natura", a cura di Giulio Peruzzi
- [29] home.infn.it/it/approfondimenti/esperimenti/1389-magic-major-atmospheric-gamma-imaging-cherenkov-telescope
- [30] physics.nyu.edu/experimentalparticle/milagro.html
- [31] cosmicray.umd.edu/cream/
- [32] www.meteoweb.eu/2018/01/astrofisica-raggi-cosmici-neutrini-e-raggi-gamma-potrebbero-avere-unorigine-comune/1034488/, a cura di F. Fotia, 24 gennaio 2018
- [33] www.dfa.unipd.it/fileadmin/php/files/11/07/2018/14/39/44-CS/UNIPD/INFN/Neutrino-EM/V02/10/07/18, a cura di A. De Angelis, M. Mariotti, E. Prandini