

Luisa Bonolis

Gruppo di Storia della Fisica, Roma

## I signori dei raggi cosmici. Dai laboratori terrestri alla fisica nello spazio

### La "radiazione dall'alto"

La storia della ricerca sui raggi cosmici è tra le più affascinanti imprese scientifiche del Novecento, ricca di sorprese, conflitti personali e esperimenti su scala planetaria. La scoperta dell'esistenza di una radiazione proveniente dallo spazio esterno alla Terra ha le sue origini nella pervicacia con cui all'inizio del Novecento alcuni scienziati cercarono di comprendere perché strumenti in grado di rilevare radiazioni ionizzanti continuassero a farlo anche dopo essere stati accuratamente schermati. Tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento erano stati scoperti i raggi X e l'emissione naturale di radiazioni di vario tipo da parte di elementi spontaneamente radioattivi come l'uranio; si pensava quindi che una radiazione così penetrante, in grado di scaricare gli elettroscopi schermati, provenisse dalla crosta terrestre, ricca di elementi di questo tipo. Alcuni sospettavano invece che un nuovo tipo di radiazione proveniente da sorgenti extraterrestri potesse essere all'origine del fenomeno. Era necessario eseguire misure precise per verificare o rigettare queste ipotesi. Verso la fine degli anni '10 alcuni coraggiosi ricercatori utilizzarono palloni d'alta quota per portare gli strumenti a migliaia di metri di altezza. Gli strumenti rivelarono che la radiazione ionizzante aumentava invece di diminuire e nel 1911 il tedesco Victor Hess, spingendosi fino a 5000 metri di quota, fu costretto ad arrivare alla sorprendente conclusione che la radiazione proveniva dall'alto e non dal basso. Voli successivi effettuati da Werner Kolhörster confermarono che la radiazione penetrante, a 9 km di altezza, era dieci volte superiore a quella a terra e che la sua capacità di essere assorbita era molto inferiore a quella dei raggi gamma di origine naturale, i più penetranti conosciuti all'epoca.

Seppure insignito soltanto nel 1936 del premio Nobel per la Fisica, Victor Hess è stato universalmente considerato lo scopritore della radiazione extraterrestre, che lui stesso aveva inizialmente denominato *Höhenstrahlung* (radiazione dall'alto), e che successivamente il fisico americano Robert Millikan aveva felicemente ribattezzato raggi cosmici. Tuttavia negli stessi anni, e forse perfino con qualche anticipo rispetto a Hess, l'italiano Domenico Pacini era giunto indipendentemente alle stesse conclusioni seguendo una linea di ricerca del tutto diversa. Domenico Pacini era nato il 20 febbraio 1878 a Marino (Roma) e si era laureato in fisica nel 1902 presso la Facoltà di Scienze dell'Università di Roma, dove lavorò per qualche tempo come assistente di Pietro Blaserna, direttore dell'Istituto di Fisica di via Panisperna, da lui stesso progettato secondo i più moderni dettami dell'epoca. Nell'agosto del 1905 Pacini ottenne un posto di ruolo come assistente al Regio Ufficio Centrale di Meteorologia e Geodinamica, da cui si dimise poi nel 1928, quando ebbe un incarico all'Università di Bari, dove divenne direttore dell'Istituto di Fisica. Il contributo di Domenico Pacini alla fisica si sviluppò inizialmente lungo tre linee principali di ricerca. La prima riguardava aspetti geofisici come lo studio della radiazione solare, del magnetismo terrestre e della meteorologia. Le sue ricerche sulla conducibilità elettrica attraverso i gas gli consentirono poi di acquisire una profonda competenza della strumentazione necessaria a misurare i bassi livelli di ionizzazione che si riscontrano nel campo della radioattività ambientale e dell'elettricità atmosferica.

Studi recenti hanno messo in luce in maniera approfondita e sistematica il ruolo svolto da Pacini nell'ambito del problema della ionizzazione residua che persisteva anche dopo aver schermato accuratamente gli elettroscopi.<sup>1</sup> Per stabilire la variazione della velo-

ciò di carica di un elettroscopio – e quindi dell'intensità della radiazione – Pacini effettuò una serie di misure sulla superficie terrestre e poi confrontò questi dati con quelli ottenuti sulla superficie del mare, nel golfo di Livorno. In disaccordo rispetto al punto di vista dominante all'epoca, i risultati supportavano sostanzialmente l'idea che una parte non trascurabile della radiazione penetrante fosse indipendente dall'emissione del suolo. Pacini concluse, che «dai risultati qui ottenuti appare che una parte non piccola della radiazione penetrante presente nell'aria, e in modo particolare quella parte che è soggetta ad oscillazioni anche notevoli, ha origine indipendente dall'azione diretta delle sostanze attive contenute negli strati superiori della crosta terrestre». L'anno successivo, nel giugno 1911, Pacini mise a punto una tecnica per misurare l'intensità della radiazione in profondità, racchiudendo l'apparecchio in una scatola di rame per poterlo immergere alla profondità di 3 metri dalla superficie del mare (e a 8 m di distanza dal fondo). Per la prima volta veniva introdotta la tecnica di misurazione della radiazione sott'acqua. Eseguì l'esperienza a 300 metri dalla costa livornese, nello stesso luogo dell'anno precedente, utilizzando il cacciatorpediniere *Fulmine*. Con lo stesso dispositivo eseguì nuove osservazioni di questo tipo anche nel lago di Bracciano, a nord di Roma, trovando di nuovo che la radiazione si attenuava di circa il 20% in profondità. Pacini metteva quindi in evidenza che nelle condizioni in cui erano state condotte entrambe le esperienze «l'azione della superficie e quella del fondo erano trascurabili». In questo stesso periodo Hess stava studiando l'andamento della radiazione con l'altezza scoprendo che l'elettroscopio si scaricava più velocemente con l'aumentare dell'altitudine. Questi risultati confermavano quanto Pacini stesso aveva scoperto nell'ultima serie di osservazioni riguardo l'esistenza nell'atmosfera di «una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive nel terreno». Queste ricerche, pubblicate sulla rivista *Il Nuovo Cimento*, in una nota intitolata "La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque", sono state praticamente dimenticate. Pacini morì a Roma il 23 maggio 1934.<sup>2</sup>

### La natura dei raggi cosmici

Fino alla fine degli anni '20, gli scienziati che lavoravano sui raggi cosmici si occuparono principalmente della loro origine extraterrestre e degli aspetti geofisici del fenomeno. Venivano investigate caratteristiche diverse come l'intensità, la distribuzione, l'assorbimento e la diffusione di questa radiazione, mentre la questione riguardante la sua natura non suscitava un reale interesse. In virtù della loro straordinaria capacità di penetrazione, era opinione diffusa che i raggi cosmici fossero in realtà raggi gamma analoghi a quelli emessi da sorgenti radioattive, ma di energia ancora più elevata. Si pensava anche che interagendo con la materia avrebbero provocato l'espulsione di elettroni attraverso l'effetto Compton. A quel tempo, l'espulsione di elettroni dagli atomi attraverso l'effetto Compton era l'unico processo conosciuto di interazione dei raggi gamma con la materia. Per studiare la radiazione secondaria prodotta dalla radiazione *ultra-gamma*, i fisici tedeschi Walther Bothe e Werner Kolhörster collocarono due contatori Geiger-Müller uno sopra l'altro, interponendo tra loro spessori crescenti di lastre di piombo e registrarono il numero di conteggi simultanei segnalati dai due strumenti. Nell'autunno del 1929 Bothe e Kolhörster pubblicarono un articolo in cui presentavano dei risultati sorprendenti. I contatori segnalavano coincidenze anche in presenza di una lastra d'oro spessa 4 cm. Data la bassa capacità di penetrazione degli elettroni Compton, Bothe e Kolhörster ne dedussero che le coincidenze registrate non potevano che essere prodotte da singole particelle elettricamente cariche ed estremamente penetranti, che causavano un segnale in entrambi i contatori dopo aver attraversato l'intera atmosfera. Questa scoperta metteva così in serio dubbio l'ipotesi dei raggi cosmici come radiazione gamma. I due fisici tedeschi collocarono due contatori Geiger-Müller uno sopra l'altro interponendo tra loro una spessa lastra di

oro e registrarono il numero di conteggi simultanei segnalati dai due strumenti al passaggio di un singolo corpuscolo. Data la bassa capacità di penetrazione degli elettroni Compton, questi avrebbero dovuto essere completamente catturati da un materiale assorbente, anche molto sottile, posto tra i due strumenti di rivelazione. Al contrario, i due fisici osservarono con enorme stupore che i presunti elettroni secondari erano in grado di attraversare la spessa lastra di un metallo assai denso come l'oro (Fig. 1) (N.B. Tutte le figure incluse nel testo, ove non diversamente indicato, provengono dalla letteratura scientifica dell'epoca, per la quale si rimanda alla bibliografia generale).

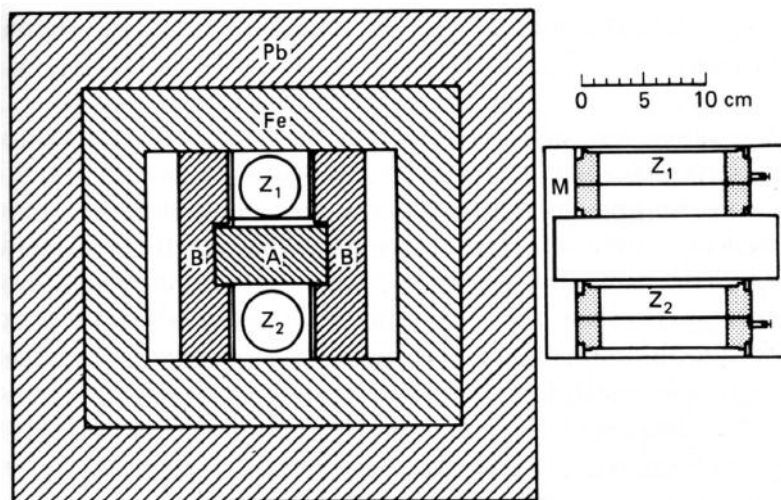


Figura 1. L'esperimento di Bothe e Kolhörster (1929). Le coincidenze tra i contatori  $Z_1$  e  $Z_2$  vengono prodotte da particelle dei raggi cosmici che attraversano entrambi i contatori. I segnali possono essere prodotti soltanto da raggi cosmici perché la schermatura blocca segnali dovuti alla radioattività. Le osservazioni venivano fatte registrando gli impulsi simultanei con e senza l'assorbitore da 4.1 cm di oro, un metallo scelto per la sua alta densità. Le coincidenze venivano individuate connettendo i fili dei contatori a due elettrometri a filo, a loro volta filmati su pellicola. La risoluzione temporale era di circa  $1/100$  s.

Alla luce dei risultati ottenuti, Bothe e Kolhörster ne dedussero che le coincidenze registrate potevano essere prodotte unicamente da singole particelle elettricamente cariche che attraversavano entrambi i contatori. Nel loro articolo intitolato *Das Wesen der Höhenstrahlung* [La natura della radiazione dall'alto], apparso nell'autunno del 1929, Bothe e Kolhörster presentavano i risultati principali delle loro ricerche sui raggi cosmici.<sup>3</sup> La loro conclusione suggeriva che i raggi cosmici dovessero avere natura corpuscolare, mettendo in serio dubbio la teoria sostenuta in particolare dal fisico americano Robert Millikan, che li considerava radiazione gamma di altissima energia prodotta dalla fusione di elementi leggeri nelle profondità dello spazio interstellare.<sup>4</sup>

L'articolo dei fisici tedeschi attirò l'attenzione del giovanissimo Bruno Rossi, arrivato di recente all'Istituto di Fisica di Arcetri come assistente del direttore Antonio Garbasso. Fu «come un fascio di luce che rivela l'esistenza di un mondo insospettato, pieno di misteri e ancora inesplorato».<sup>5</sup>

### Nuove finestre tecnologiche

Bruno Rossi era nato nel 1905 a Venezia e aveva trascorso la sua infanzia in quella città unica, sospesa tra cielo e mare, la cui magica atmosfera colpì profondamente la sua fantasia. Sperimentò precocemente un senso di meraviglia verso il mondo che lo circondava, e più tardi andò alla ricerca delle «regolarità, delle relazioni di causa ed effetto», indagando

do «il mondo nascosto al di là dei nostri sensi, e che ne controlla il comportamento».<sup>6</sup> Le lunghe passeggiate lungo la spiaggia del Lido di Venezia nelle prime ore del mattino gli ispirarono i primi interrogativi sul mondo che lo circondava: il Sole ancora basso sull'orizzonte, la lunga scia dorata prodotta dal riflesso sulle acque increspate, «i piccoli tesori abbandonati sulla spiaggia dalla marea che si ritira». Bruno Rossi conservò sempre il suo stupore infantile per la natura e per tutto ciò che si nasconde dietro a ciò che i nostri occhi riescono a catturare. Questo sentimento lo guidò più tardi nelle sue scelte alla fine degli anni '20, quando appena laureato a Bologna si trovava all'Istituto di Fisica di Arcetri: «La mia attività doveva indirizzarsi ai problemi fondamentali della fisica contemporanea; doveva puntare alla scoperta di qualche segreto della natura». Nella prefazione alla sua autobiografia, Rossi accennò ai suoi sentimenti personali riguardo la scelta della fisica: «Questo fascino per i segreti della Natura è la ragione per cui sono stato un fisico sperimentale. È la ragione per cui, per me, i momenti più eccitanti sono stati quelli in cui un esperimento ha fornito un risultato contrario a tutte le previsioni, dimostrando così che le ricchezze della Natura superano di gran lunga l'immaginazione umana».

L'Istituto si trovava sulla collina di Arcetri, vicino alla villa *Il Gioiello*, dove Galileo Galilei aveva trascorso gli ultimi anni della sua vita. Ad Arcetri, Rossi trovò Gilberto Bernardini, appena laureato a Pisa e anche lui curioso delle novità che arrivavano dal mondo internazionale. A quel tempo Roma e Firenze erano le roccaforti della fisica moderna, grazie alla presenza di Enrico Fermi ed Enrico Persico, appena installati sulle cattedre di fisica teorica, cattedre nuove di zecca create per loro grazie alla lungimiranza di Orso Mario Corbino, direttore dell'Istituto di Fisica romano, con il determinante appoggio dei matematici.

Ad Arcetri c'erano anche alcuni giovani brillanti; i loro nomi sarebbero presto divenuti noti a livello nazionale e internazionale: Giuseppe Occhialini, figlio di Augusto, direttore dell'Istituto di Fisica dell'Università di Genova, che avrebbe sempre seguito le orme di Rossi, condividendone gli interessi fino al termine della sua vita scientifica; Giulio Racah, un giovane e brillante teorico, che, a causa delle leggi razziali emanate nel 1938 dal regime fascista, sarebbe emigrato a Gerusalemme, diventando il fondatore di una importante scuola di fisica, nonché protagonista nel campo della fisica delle particelle elementari; Guglielmo Righini, futuro direttore dell'Osservatorio di Arcetri, e Beatrice Crinò che diventerà sua moglie; Lorenzo Emo Capodilista successivamente trasferito a Berkeley, dove diverrà collaboratore di Emilio Segrè; Daria Bocciarelli, che si trasferirà all'Istituto di Sanità a Roma, diretto da Cesare Trabacchi, contribuendo alle ricerche in fisica nucleare che di lì a poco sarebbero diventate una specialità dell'area romana.<sup>7</sup> A quell'epoca Enrico Fermi e Franco Rasetti stavano creando a Roma il primo nucleo di un gruppo di giovani che, dopo la drammatica emigrazione dello sparuto gruppo di padri fondatori della fisica moderna in Italia, avrebbero contribuito a mantenere viva questa tradizione e a svilupparla ai livelli di eccellenza che contraddistinguono ancora oggi la fisica italiana nel mondo.

Anche ad Arcetri stava per aprirsi una linea di ricerca che, accanto al filone nucleare, sarebbe diventata una grande tradizione della fisica italiana. I risultati e le straordinarie conclusioni degli esperimenti di Bothe e Kolhörster, che mettevano in serio dubbio la teoria dei raggi cosmici come radiazione *ultra-gamma*, suscitavano comprensibilmente l'entusiasmo di Rossi. Concentrandosi sui nuovi problemi sollevati da questo lavoro, il giovanissimo fisico sentì che un progetto di ricerca in tale ambito poteva essere decisamente alla sua portata: «Che cosa erano, infatti, questi corpuscoli della radiazione cosmica? Erano particelle della stessa natura delle particelle già note, solo dotate di maggiore energia? O erano particelle di natura completamente diversa? E quali erano le loro proprietà? Problemi di questo genere erano quelli che avevo sognato di affrontare all'inizio della mia carriera di ricercatore. Ora il mio sogno prometteva di avverarsi». Con questa scelta Rossi era destinato a collocarsi all'avanguardia della ricerca scientifica dell'epoca.

Immediatamente si mise al lavoro insieme a Bernardini, Occhialini e Daria Bocciarelli costruendo i primi contatori Geiger-Müller e mettendo a punto quello che diventerà universalmente noto come *circuito di coincidenze alla Rossi* (Fig. 2). Questo dispositivo consen-

tiva di rivelare il passaggio simultaneo di particelle cariche attraverso un numero *arbitrario* di contatori, migliorando notevolmente il potere risolutivo temporale rispetto al metodo dei fisici tedeschi. Si trattava del primo passo del programma di ricerca di Bruno Rossi, volto a confermare l'ipotesi della natura corpuscolare dei raggi cosmici e a comprendere il comportamento di questa misteriosa radiazione.<sup>8</sup>

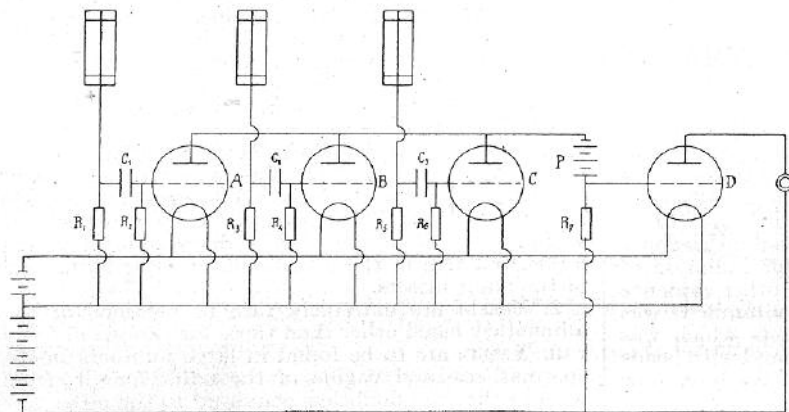


Figura 2. Il circuito di coincidenze ideato da Rossi (1930). La resistenza  $R_7$  viene fissata in relazione alla resistenza di placca di una singola valvola nel suo stato normale in modo che quando gli impulsi negativi provengono da tutte le griglie *tranne una*, la corrente che scorre nelle altre è ancora sufficiente a produrre una caduta di potenziale nella resistenza  $R_7$ , che bilancia il potenziale totale della batteria. Se invece gli impulsi negativi si presentano sulle griglie di *tutte* le valvole, la caduta di potenziale in  $R_7$  scompare e la griglia della valvola in uscita riceve un segnale positivo che si traduce nel conteggio di una coincidenza. Il circuito valvole-contatori di Rossi, che aveva una risoluzione temporale di 0.001 s, era il precursore dei circuiti logici AND che sarebbero stati alla base dei moderni computer.

La tecnica dei contatori Geiger-Müller introdotta da Rossi fu poi alla base della scoperta della radioattività indotta dai neutroni effettuata a Roma dal gruppo di Fermi nel 1934.<sup>9</sup>

Come Galileo, che utilizzò le lenti per costruire occhi più potenti per guardare oltre il nostro pianeta, Rossi trasformò il contatore Geiger-Müller in un "telescopio" per raggi cosmici, un rivelatore per le particelle provenienti dallo spazio profondo. La possibilità di collocare contatori secondo geometrie variabili, interponendo tra essi degli assorbitori metallici stava aprendo una via del tutto inedita nello studio dell'interazione tra raggi cosmici e materia, un passo significativo verso la comprensione del mondo delle particelle subnucleari e delle forze fondamentali che le governano.

Munito del circuito di coincidenze, che divenne uno strumento essenziale per la successiva ricerca in questo settore, Rossi cercò inizialmente di verificare se i raggi cosmici fossero dotati di una carica elettrica, indagando il loro comportamento in presenza di campi magnetici. All'epoca Rossi non poteva sapere che la radiazione cosmica a livello del mare contiene particelle di carica sia positiva che negativa, così che gli esperimenti da lui effettuati con barre magnetizzate non furono in grado di fornire risultati chiari in questo senso (Fig. 3).

Le investigazioni di Rossi condotte nel periodo compreso tra il 1930 e la fine del 1932 ebbero anche un ruolo fondamentale nell'individuare l'esistenza di due componenti di natura assai diversa presenti nei raggi cosmici rivelati al livello del mare. Una prima componente dura risultò essere in grado di attraversare uno schermo costituito da un metro

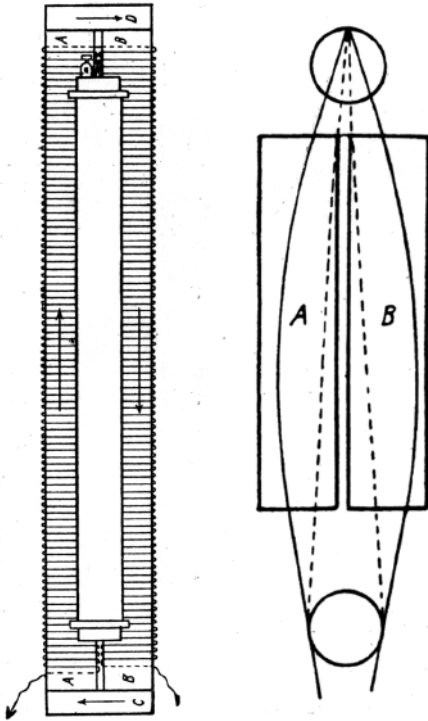


Figura 3. La lente magnetica costruita da Bruno Rossi su suggerimento di Luigi Puccianti. Il dispositivo consiste in un circuito magnetico chiuso, formato da due sbarre di ferro magnetizzate in senso opposto, e da due contatori collocati sopra e sotto il magnete. A seconda della direzione della magnetizzazione e del segno della carica dei corpuscoli, quelli che attraversavano il contatore superiore sarebbero stati concentrati sul contatore inferiore o allontanati da esso. Rossi misurò il tasso di coincidenza con campi magnetici opposti e trovò inizialmente una piccola differenza a favore di particelle positive, un effetto molto inferiore a quello aspettato. In un secondo esperimento la differenza trovata era nei limiti degli errori sperimentali. Questo tipo di apparato sarà successivamente utilizzato nell'esperimento di Conversi Pancini e Piccioni che alla metà degli anni '40 fornì chiare indicazioni sulla natura leptonica del muone.

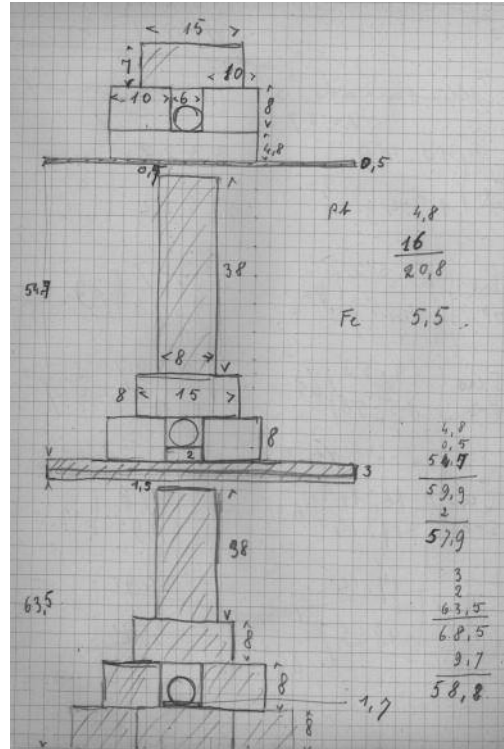


Figura 4. Disegno originale dell'apparato sperimentale con cui Rossi dimostrò che i raggi cosmici contengono particelle capaci di attraversare un metro di piombo. Le coincidenze venivano registrate da tre contatori  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  separati da uno spesso strato di piombo. L'uso di tre contatori in coincidenza, piuttosto che due soltanto, consentiva di ridurre notevolmente la possibilità di conteggi casuali (B. Rossi, *Quaderno di laboratorio*, Archivi del Massachusetts Institute of Technology).

di piombo (corrispondente ad uno spessore superiore a quello dell'atmosfera terrestre) dopo essere stata filtrata da uno schermo metallico spesso dieci centimetri (Fig. 4).

Una serie di esperimenti mise in luce l'esistenza di una componente molle, generata nell'atmosfera dai raggi cosmici primari che bombardano continuamente il nostro pianeta, e capace successivamente di produrre cascate di particelle in uno schermo di metallo prima di essere assorbita (Fig. 5). Un fenomeno talmente sorprendente da generare non poca perplessità in un'epoca in cui esistevano diffusi timori che l'elettrodinamica quantistica, la teoria di campo che descrive l'interazione di particelle cariche con il campo elettromagnetico, dovesse fallire alle alte energie caratteristiche dei raggi cosmici.<sup>10</sup> L'articolo inviato da Rossi fu respinto dalla rivista *Die Naturwissenschaften* perché troppo in contra-

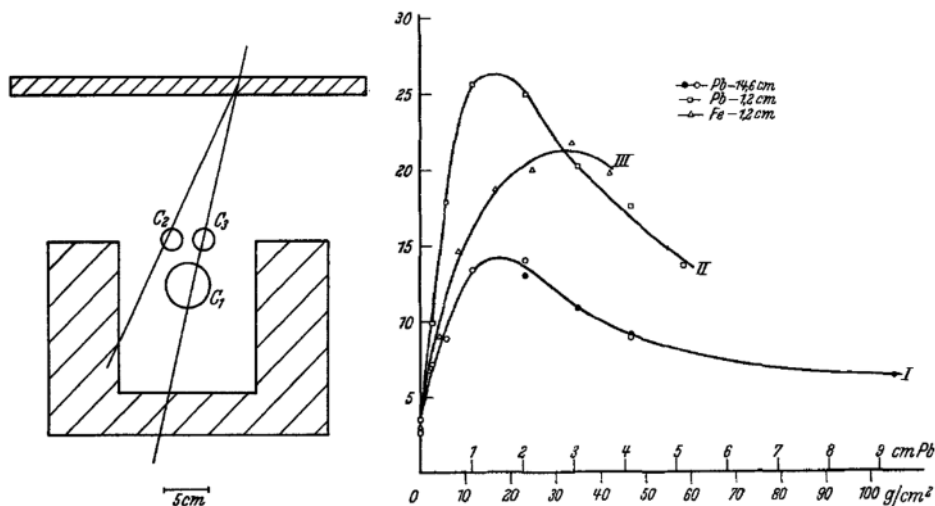


Figura 5. Le due componenti della radiazione cosmica presenti a livello del mare. A sinistra una tipica configurazione sperimentale usata da Rossi consistente in tre contatori collocati in una geometria triangolare racchiusi in una scatola di piombo. Almeno due particelle che emergono simultaneamente dal piombo sono necessarie a produrre una coincidenza tripla, una di esse può essere "primaria", ma l'altra deve essere stata prodotta nell'assorbitore di piombo dall'interazione dei raggi cosmici con la materia attraversata. Nella figura, la parte superiore è mobile e può essere sostituita con schermi di materiali e spessori diversi collocati a distanza variabile dai contatori. Sulla destra, il grafico del tasso di coincidenze in funzione dello spessore di ferro o di piombo posto a distanze diverse dal set di contatori. Le curve I e II si riferiscono a misurazioni eseguite a distanza di 14.6 e 1.2 cm rispettivamente. Ciascuna curva risulta dalla sovrapposizione di due effetti: la componente molle dei raggi cosmici, che contribuisce principalmente a produrre sciami di particelle secondarie nel caso di piccoli spessori del piombo, viene assorbita rapidamente (parte in rapida salita della curva e diminuzione iniziale nella produzione delle particelle secondarie); la componente dura fornisce un contributo alla produzione degli sciami anche a spessori maggiori e viene assorbita molto lentamente (lunga coda della curva nel piombo). Il contributo della componente molle aumenta con il numero atomico dello schermo, come si vede dal confronto tra le curve II e III ottenute con il piombo e il ferro, alla distanza fissa di 1.2 cm.

sto con le conoscenze diffuse all'epoca e successivamente pubblicato su *Physikalische Zeitschrift* solo grazie alla garanzia fornita da Werner Heisenberg, che conosceva profondamente e stimava il lavoro pionieristico di Rossi.

Infatti, pur seguite con attenzione da alcuni teorici, inizialmente le ricerche di Rossi non furono sempre del tutto apprezzate né comprese, principalmente per via della mancanza di adeguati strumenti teorici così come di una conoscenza approfondita delle particelle e delle loro interazioni. Enrico Fermi era tra coloro che mostravano il più grande interesse e considerazione per le ricerche di Rossi, tanto da chiedergli di tenere la relazione introduttiva sui raggi cosmici durante il congresso internazionale di fisica nucleare che si svolse a Roma nel 1931, con la partecipazione dei maggiori fisici dell'epoca (Fig. 6). Con il determinante appoggio di Fermi, Rossi ebbe la cattedra di fisica sperimentale all'Università di Padova dove si trasferì alla fine del 1932.

Per verificare la natura corpuscolare dei raggi cosmici, Rossi aveva anche cercato di comprendere cosa accade quando un flusso di particelle cariche, inizialmente isotropico, entra nel campo magnetico della Terra, subendone l'influenza. Aveva discusso l'argomento con Fermi, con il quale aveva scritto un lavoro, l'unico a firma congiunta. Entrambi mantennero un costante dialogo sui raggi cosmici che si interruppe soltanto a causa della precoce scomparsa di Fermi nel 1954. Nel 1930 Rossi aveva infatti congetturato l'esistenza dell'effetto est-ovest, un ulteriore effetto geomagnetico che si sarebbe aggiunto all'effetto di latitudine (riguardante una dipendenza della intensità dei raggi cosmici dalla latitudine geomagnetica), già predetto ma non ancora pienamente verificato a quel tempo. L'effetto est-ovest è più facilmente osservabile alle basse latitudini e ad alta quota. Nel-



Figura 6. Enrico Fermi e Bruno Rossi durante il Convegno di Fisica Nucleare organizzato a Roma nel 1931.

l'autunno del 1933, coadiuvato da Sergio De Benedetti, Rossi riuscì ad organizzare una spedizione in Eritrea, programmata già da tempo. Il progetto era stato entusiasticamente sostenuto da Antonio Garbasso, ma problemi logistici, dovuti anche alla lentezza con cui furono erogati i fondi, fece sì che quando le osservazioni di Rossi e del suo collaboratore Sergio De Benedetti dimostrarono l'esistenza dell'effetto est-ovest nell'autunno del 1933, due articoli che riportavano analoghe osservazioni erano già comparsi ad opera di due gruppi statunitensi: Arthur Compton e il suo collaboratore Luis Alvarez e Thomas H. Johnson.<sup>11</sup> Questi risultati non soltanto costituivano una conferma della natura corpuscolare dei raggi cosmici, ma indicavano che le particelle avevano carica positiva, contrariamente alle aspettative dei sostenitori dell'ipotesi corpuscolare, secondo cui doveva trattarsi con tutta probabilità di elettroni dotati di energie molto elevate. Rossi e De Benedetti osservarono anche un fenomeno del tutto nuovo: di quando in quando rivelatori posti anche a grande distanza venivano colpiti da gruppi di particelle; si trattava della prima osservazione degli sciami estesi atmosferici "riscoperti" qualche anno più tardi da Pierre Auger.

Nel frattempo il fisico statunitense Arthur Compton, stimolato dalla relazione di Rossi al convegno di Roma, aveva progettato una vasta campagna per la verifica dell'effetto di latitudine. Alla fine del 1933, la natura corpuscolare dei raggi cosmici trovava una concreta conferma in una serie di esperimenti condotti in diverse parti della Terra.<sup>12</sup>

### **I raggi cosmici e la nascita della fisica delle particelle**

Nell'estate del 1932, sciami di particelle erano comparsi nelle fotografie scattate a Cambridge da Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini utilizzando una camera a nebbia aziona-



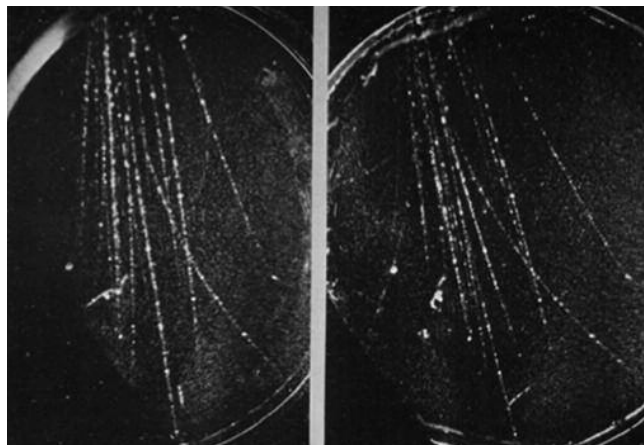


Figura 7. Sciame formato da circa 16 tracce separate che mostrano la formazione di coppie elettrone-positrone prodotte dalla camera a nebbia controllata da contatori costruita da Blackett e Occhialini. La camera, del diametro di 13 cm e dallo spessore di 3 cm, era posta verticalmente con due contatori di 10 cm posti sopra e sotto la camera. Qualunque raggio cosmico che attraversava entrambi i contatori doveva passare anche attraverso la zona illuminata della camera. I contatori erano connessi a un circuito a valvole alla Rossi in modo da registrare solo coincidenze simultanee. L'intero apparato era collocato in un campo magnetico di 0.3 T. Il metodo si basava sull'assunzione che la radiazione penetrante al livello del mare fosse di natura corpuscolare.

ta da un circuito di coincidenze alla Rossi, che ne aumentava grandemente l'efficienza. Nell'insieme delle tracce prodotte dal passaggio delle particelle secondarie generate dall'interazione tra i raggi cosmici e la materia, Blackett e Occhialini individuarono la causa delle coincidenze precedentemente rivelate da Rossi. Nello stesso periodo, Carl Anderson, un giovane collaboratore di Robert Millikan, dimostrava l'esistenza dell'elettrone positivo.<sup>13</sup> Blackett e Occhialini dal canto loro, trovarono che molte tracce da loro fotografate presentavano in modo evidente il fenomeno della formazione di coppie elettrone-positrone (Fig. 7). L'osservazione sperimentale dell'antimateria costituiva una importante prova a sostegno della teoria relativistica dell'elettrone formulata da Paul A.M. Dirac appena pochi anni prima.

La teoria della cascata elettromagnetica, pubblicata nel 1937 da J. Franklin Carlson e J. Robert Oppenheimer e contemporaneamente da Homi J. Bhabha e Walther H. Heitler, fornì la spiegazione degli sciame di particelle osservati in laboratorio: un elettrone in moto accelerato emette un fotone altamente energetico, e il fotone a sua volta produce una coppia particella-antiparticella oppure un elettrone Compton. Questi elettroni, insieme alla particella originaria, forniscono nuovi fotoni. Il meccanismo prosegue fino alla completa dissipazione dell'energia primaria.

La teoria della cascata elettromagnetica lasciava tuttavia irrisolto il problema della componente penetrante dei raggi cosmici, anch'essa rivelata negli esperimenti di Rossi. Questo enigma fu risolto grazie alle ricerche intraprese da Anderson e Seth Neddermeyer: nel 1937 i due studiosi suggerirono infatti l'esistenza di particelle di carica unitaria e massa compresa tra quella di un normale elettrone libero e quella di un protone. Una particella di massa analoga era stata prevista nel 1935 dal fisico giapponese Hideki Yukawa quale mediatore delle forze nucleari: al momento sembrò quindi ragionevole identificare con la particella di Yukawa il mesotrone dei raggi cosmici, come era stata battezzata la nuova particella. Tale scoperta costituiva dunque un punto di arrivo e al tempo stesso l'inizio di un lungo cammino per la nascente fisica delle particelle.<sup>14</sup>

Nel frattempo, accanto alle attività di ricerca e di didattica, Rossi fu coinvolto anche nella progettazione e nella supervisione della costruzione del nuovo Istituto di Fisica di Padova, inaugurato nel 1937. Nella primavera del 1938 Rossi aveva sposato Nora Lombroso, ma nel frattempo si stavano addensando nubi minacciose, che nel giro di qualche mese avrebbero spazzato via la nuova realtà creata dalle due nascenti scuole di fisica moderna in Italia. In Europa appariva sempre più vicina una guerra, mentre Mussolini e il movimento fascista divennero convinti sostenitori dell'antisemitismo nazista. Nel luglio del 1938 fu pubblicato il *Manifesto della razza*, redatto da alcuni "scienziati" italiani, e i

mesi seguenti videro la promulgazione di una serie di leggi che privavano gli ebrei italiani dei loro diritti civili. Come ricorda lo stesso Rossi nella sua autobiografia: «[...] ai primi di settembre appresi che, per effetto di questi decreti, non ero più un cittadino del mio paese e che, in Italia, la mia attività di insegnante e di scienziato era terminata». Edoardo Amaldi parlò di «annullamento del gruppo di ricerca padovano»,<sup>15</sup> ma la decimazione toccò ogni settore della scienza e della cultura ed ebbe effetti sulla popolazione di tutto il territorio nazionale.<sup>16</sup>

Quando Rossi, insieme alla giovane sposa Nora Lombroso, partì nell'autunno del 1938, anche in Italia, come era già avvenuto nella Germania nazista, era iniziata una imponente "fuga di cervelli". Edoardo Amaldi, insieme a un piccolo gruppo di fisici, restò quasi solo a fronteggiare la catastrofe. Tuttavia, grazie all'impulso dato da personalità quali Orso Mario Corbino, Antonio Garbasso, Enrico Fermi, Bruno Rossi, Franco Rasetti e dai loro allievi, e successivamente allo straordinario coraggio con cui Edoardo Amaldi e Gilberto Bernardini si assunsero la responsabilità della "ricostruzione" e dello sviluppo, la fisica moderna italiana sarebbe tornata a fiorire nel dopoguerra e a mantenere un'eccellenza, che continua ancora oggi.

### **Una nuova stagione per i raggi cosmici**

Durante gli anni '20 e '30 del Novecento, i tradizionali contatti tra fisici di diverse nazionalità avevano dato vita a relazioni scientifiche e umane molto forti. Proprio questi legami consentirono ai ricercatori in fuga dalla persecuzione nazi-fascista di rifarsi una vita altrove, in Europa o in America. La corrispondenza di Rossi tra la fine del 1938 e la prima metà del 1939, che testimonia la sua disperata richiesta di aiuto a vari membri della comunità scientifica internazionale, evidenzia bene la tragedia personale di un'emigrazione forzata.<sup>17</sup> Nel dicembre di quel 1938 Fermi stava lasciando Roma con la sua famiglia per recarsi a Stoccolma, dove avrebbe ricevuto il premio Nobel. I pochi amici e collaboratori che li videro partire dalla Stazione Termini sapevano bene che Fermi non sarebbe tornato in Italia. I due personaggi di punta della rinascita della fisica moderna in Italia stavano abbandonando per sempre il nostro paese.

Dopo un breve soggiorno a Copenhagen, ospitati da Niels Bohr, Bruno e Nora arrivarono a Manchester a metà dicembre 1938 e furono calorosamente accolti da Patrick Blackett e da sua moglie Constance. Insieme ad altri fisici Rossi ebbe modo di ricominciare il suo lavoro di fisico sperimentale su temi di punta che verso la fine degli anni Trenta stavano aprendo una nuova stagione nello studio della radiazione cosmica. Ma "il gruppo di Manchester" era destinato ad avere una vita brevissima. Nel maggio del 1939 la Germania e l'Italia annunciarono la loro alleanza, nota come "Asse Roma - Berlino", e il 22 maggio Hitler e Mussolini firmarono il "Patto d'Acciaio", che consolidava ulteriormente il legame tra i due paesi. Queste circostanze mettevano in difficoltà gli italiani che si erano rifugiati in Gran Bretagna. All'inizio di giugno, Bruno Rossi e sua moglie Nora salparono per gli Stati Uniti d'America. Nell'autunno precedente Rossi aveva contattato anche Arthur H. Compton, uno dei più influenti fisici statunitensi; questi gli aveva scritto una lettera di solidarietà nella quale, oltre a prendere l'impegno di cercare per lui una posizione accademica negli Stati Uniti, lo invitava ad un simposio sui raggi cosmici che avrebbe avuto luogo a Chicago nel giugno del 1939.

Al convegno di Chicago un'intera giornata fu dedicata al problema della instabilità radioattiva dei mesotroni, ma apparve chiaro a tutti che le prove raccolte su questo fenomeno non potevano ancora essere considerate come decisive. Il fenomeno del decadimento era familiare ai fisici fin dalla fine dell'Ottocento, quando era stata scoperta la radioattività naturale, ma ora, per la prima volta, i fisici si trovavano di fronte al decadimento spontaneo di una particella e Rossi, ansioso di misurarsi con problematiche all'avanguardia della fisica, si lanciò in una nuova avventura sperimentale. Tra l'estate del 1939 e l'estate del 1941, nel corso di una serie di spedizioni in alta montagna, effettuate con collabora-

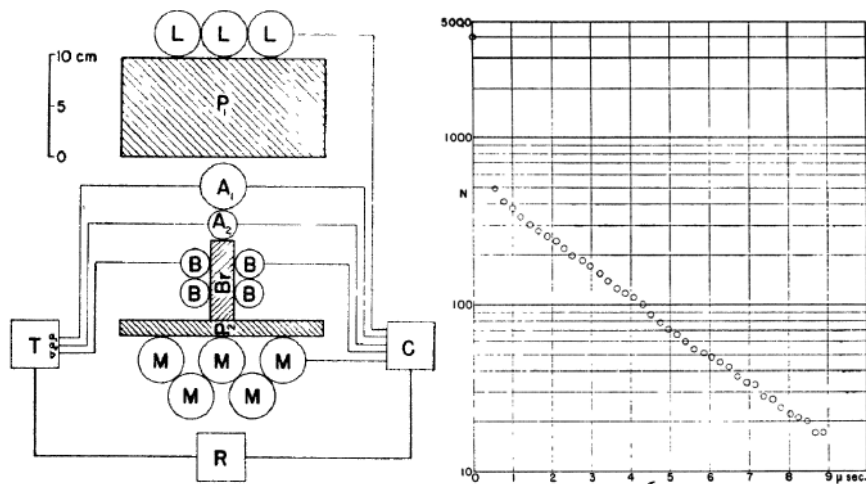


Figura 8. A sinistra: esperimento per la misura della curva di decadimento dei mesotroni a riposo. Un circuito elettronico C registra le anticoincidenze prodotte dai mesotroni che, dopo aver attraversato L, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e lo schermo P<sub>1</sub> si fermano nella placca di ottone Br e successivamente decadono producendo un elettrone che scarica uno dei contatori B, senza scaricare i contatori M (anticoincidenza LA<sub>1</sub>A<sub>2</sub>B-M). Tale evento è individuato dal circuito C, la cui risoluzione temporale è lunga in confronto con la vita media dei mesotroni. Il cuore dell'esperimento è costituito dall'orologio elettronico ideato da Rossi che misura gli intervalli temporali tra l'arrivo dei mesotroni sull'assorbitore Br e l'emissione degli elettroni di decadimento. A parte il ritardo nella risposta dei contatori, questo tempo equivale alla vita media dei mesotroni in Br, quando la coincidenza è causata da un processo di disintegrazione. A destra la curva sperimentale di disintegrazione dei mesotroni. L'ascissa  $\tau$  rappresenta il ritardo registrato dal circuito temporale, l'ordinata è il *logaritmo* del numero N di anticoincidenze accompagnate da ritardi superiori rispetto all'ascissa corrispondente. I punti sperimentali si dispongono su una linea retta, dimostrando che il decadimento del mesotrone segue una *legge esponenziale* come qualsiasi processo di disintegrazione.

tori di volta in volta diversi, Rossi affrontò il problema del decadimento del mesotrone. Gli eleganti esperimenti condotti da Rossi in quel periodo fornirono la prova definitiva dell'esistenza di tale processo di decadimento e dimostrarono la dilatazione relativistica della vita media di queste particelle in moto – confermando per la prima volta la teoria di Einstein. Un ultimo esperimento, condotto insieme a Norris Nereson nel 1942, culminò nella prima misura precisa della vita media dei mesotroni a riposo (Fig. 8), un risultato già ottenuto con un brillante esperimento da Franco Rasetti, seppure con un valore più lontano da quello attualmente accettato.<sup>18</sup> Questi esperimenti si basavano, tra l'altro, sulla tecnica delle *anticoincidenze*, una estensione del metodo delle coincidenze (una combinazione logica nota come NOT) suggerita dalla necessità di selezionare eventi in cui la scarica avveniva in alcuni contatori, *ma non in altri*.

Queste ricerche, completate da Rossi durante la guerra, conclusero simbolicamente un'era che egli stesso chiamò «l'età dell'innocenza della fisica delle particelle». Un'epoca che terminò con il passaggio dalla ricerca – in tempo di pace – alla Cornell University, dove Rossi si trasferì nel 1940, al lavoro – in tempo di guerra – prima partecipando al progetto di ricerca sul radar del MIT Radiation Lab e poi al progetto Manhattan, la colossale impresa finalizzata alla costruzione di armi nucleari che coinvolse migliaia di persone. Come molti altri, Rossi avvertiva la minaccia derivante dal delirio di conquista di Hitler, ma nel luglio del 1943, quando Bethe lo invitò a lavorare nel laboratorio segreto di Los Alamos, nel nuovo Messico, provò un'angoscia profonda: «Essendomi rassegnato al fatto che né accettando né rifiutando la richiesta di Los Alamos potevo sottrarmi a una pesante responsabilità, vidi che la scelta non poteva essere basata che sulla necessità di combattere l'immediato pericolo [...] occorreva evitare ad ogni costo che Hitler avesse la bomba prima di noi». Ma il primo test della nuova arma venne realizzato quando ormai la Ger-

mania era vinta, così che dopo il bombardamento nucleare delle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki nell'agosto del 1945, Rossi decise immediatamente di lasciare i laboratori di Los Alamos e accettò il posto offertogli al *Massachusetts Institute of Technology*.

Nel frattempo, in Italia, i superstiti avevano condotto importanti ricerche nel solco della tradizione da lui iniziata. Alla fine del 1946 vennero resi noti i risultati di un esperimento cruciale eseguito durante la guerra da Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni. L'esperimento, che tra l'altro impiegava le lenti magnetiche utilizzate da Rossi all'inizio degli anni '30 (Fig. 3), indicava che il mesotrone dei raggi cosmici non poteva essere il mediatore delle interazioni nucleari, come si era creduto fino a quel momento. Questo lavoro è stato considerato l'atto di nascita della moderna fisica delle particelle elementari, perché forniva i primi indizi di una sottostante realtà complessa, che emergerà assai lentamente nel corso dei successivi vent'anni. L'elettrodinamica quantistica non può da sola descrivere il comportamento di tutte le particelle elementari, che sono anche sottoposte all'azione delle interazioni deboli e delle interazioni forti. Nel 1947 Cecil F. Powell, Cesare Lattes e Giuseppe Occhialini dimostrarono infatti che il mesotrone, subito ribattezzato muone – e di cui ben presto fu chiarita la stretta parentela con l'elettrone – è in realtà il prodotto del decadimento del mesone  $\pi$ , che interagisce attraverso la forza nucleare forte. Fino alla metà degli anni '50 i raggi cosmici continuarono a regalare ai fisici un intero zoo di nuove particelle e l'Europa produsse risultati di grande rilievo nonostante la devastazione prodotta dalla guerra.

Ma ormai il centro di gravità della ricerca si era spostato dall'Europa agli Stati Uniti, dove la comunità dei fisici poteva disporre di risorse enormi grazie al favore delle autorità che speravano in nuove ricadute dopo quelle dovute alle applicazioni belliche. Fisici come Enrico Fermi e Bruno Rossi contribuirono allo straordinario sviluppo della scienza americana nel dopoguerra. Oltre a promuovere attività scientifica di altissimo livello e nuove linee di ricerca, essi attrassero e allevarono una nuova brillante generazione di fisici. Molti dei loro studenti e collaboratori sarebbero divenuti premi Nobel per la fisica.

### **L'origine dei raggi cosmici**

Il "Cosmic Ray Group" fondato da Rossi al MIT divenne, negli anni, un centro di fama internazionale. Nel corso degli anni '50, quando l'avvento di acceleratori di alta energia mise a disposizione nei laboratori terrestri fasci di particelle per lo studio dei componenti elementari della materia, gli aspetti geofisico e astrofisico ritornarono in primo piano rispetto a quello nucleare e subnucleare, ma i raggi cosmici restarono una fonte incontrastata di particelle di altissima energia. Uno dei cavalli di battaglia del gruppo fu lo studio degli sciami estesi atmosferici (EAS), che fornirono importanti indicazioni sull'esistenza di particelle di energie incredibilmente elevate, impossibili da raggiungere in qualsiasi laboratorio terrestre. Uno sciame viene prodotto dall'arrivo di un raggio cosmico primario di alta energia e si sviluppa nell'atmosfera attraverso una catena di reazioni nucleari, elettromagnetiche e processi di decadimento. La diffusione nell'atmosfera si traduce a livello del suolo in un gran numero di particelle che investono un'area molto estesa.

Questi problemi all'epoca suscitarono l'interesse di Fermi verso i meccanismi con cui le particelle dei raggi cosmici venivano accelerate nello spazio interstellare e nel 1949 scrisse un fondamentale lavoro che riprese poi nel 1954, l'anno della sua precoce scomparsa. In quello stesso anno anche Rossi e alcuni collaboratori scrissero un articolo in cui affrontavano questi problemi, che ormai stavano spostando l'attenzione di alcuni fisici dei raggi cosmici verso lo spazio esterno alla Terra. Alla fine degli anni Cinquanta John Linsley e Livio Scarsi, un allievo di Occhialini, montarono nell'area desertica di Volcano Ranch nel Nuovo Messico una rete di rivelatori estesa su un'area del diametro di 1.8 km, successivamente ampliata a 3.6. Le prime osservazioni mostrarono l'esistenza di primari

di energia dell'ordine di circa  $10^{19}$  eV e successivamente perfino di  $10^{20}$  eV (equivalenti all'energia cinetica di una palla da tennis che viaggia a circa 85 km/h, ma concentrati in un singolo protone!); tali livelli di energia fornirono le prime indicazioni che queste particelle dovevano avere una provenienza da sorgenti esterne alla nostra galassia.

L'evoluzione della fisica dei raggi cosmici di fatto ha generato due nuove scienze, la fisica delle particelle elementari e l'astrofisica dei raggi cosmici. Mentre la fisica dei raggi cosmici si spostava gradualmente verso l'astrofisica, Rossi continuò ad essere uno degli ispiratori di questa nuova linea di ricerca, che lo spinse sempre più ad interessarsi all'origine dei raggi cosmici e quindi alle fonti da cui hanno origine le particelle che arrivano dallo spazio, insieme ai meccanismi che le accelerano fino alle altissime energie osservate.<sup>19</sup> Il problema centrale della fisica dei raggi cosmici rimane ancora oggi aperto. Qual è la loro origine? Come ottengono le loro straordinarie energie? Oggi questo tipo di studi viene effettuato nell'Osservatorio Auger, che copre una estensione di 3000 km<sup>2</sup> nella Pampa argentina (un'area pari a quella del Salento). L'esperienza indaga sulle particelle dotate delle energie più alte conosciute finora nell'Universo consentendo di formulare ipotesi sulla natura delle sorgenti e sui meccanismi con cui sono accelerate.<sup>20</sup>

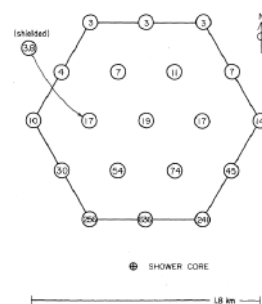


Figura 9. L'esperimento di Volcano Ranch che nel corso degli anni '60 dimostrò l'esistenza di raggi cosmici primari di energie dell'ordine di  $10^{20}$  eV. Il rivelatore è costituito da una vasta area su cui sono distribuiti una serie di contatori a scintillazione costruiti utilizzando sostanze fluorescenti. L'emissione di lampi di luce della durata di pochi millisecondi viene rilevata da un fotomoltiplicatore che traduce gli impulsi luminosi in un segnale elettrico.

## Fisica nello spazio

Nel frattempo, la sua posizione di rilievo aveva reso Rossi uno degli scienziati più influenti degli Stati Uniti d'America, e gli diede anche l'opportunità di partecipare alla politica scientifica statunitense. All'inizio dell'era spaziale, inaugurata il 4 ottobre 1957 con il lancio in orbita dello Sputnik russo, Rossi provò lo stesso entusiasmo che lo aveva accompagnato ad Arcetri e non esitò a compiere il salto verso questa nuova dimensione scientifica, che si rivelò subito di straordinaria ricchezza. La sua capacità immaginativa e la sua straordinaria padronanza delle tecniche sperimentali furono alla base di idee la cui realizzazione ha aperto prospettive e campi di ricerca completamente nuovi nel panorama della fisica moderna e contemporanea.

La notizia del satellite sovietico produsse una forte reazione negli Stati Uniti. Gli scienziati ne intravedevano le potenzialità applicative: nello spazio esterno all'atmosfera terrestre un Universo precedentemente invisibile agli astronomi e al di là della portata dei fisici poteva essere ora esplorato. Il 21 gennaio 1958, circa quattro mesi dopo lo Sputnik, l'Explorer I, il primo satellite americano, individuò le fasce di Van Allen. Questa fu la prima importante scoperta scientifica dell'esplorazione spaziale. Numerose osservazioni avevano da tempo fornito una evidenza indiretta della presenza di gas ionizzati nello spazio esterno alla Terra. Una decisiva evidenza proveniva dalle osservazioni delle comete. Nel 1951 Ludwig Biermann interpretò la deflessione di circa  $6^\circ$  della coda delle comete dalla direzione radiale rispetto al Sole in termini di interazione tra gli ioni della coda cometaria e il flusso di particelle *continuamente* emesso dal Sole a velocità di centinaia di chilometri al secondo. Utilizzando il modello di una corona solare statica e a simmetria sferica, Sidney Chapman concluse successivamente che il riscaldamento dell'alta atmosfera rilevato dai razzi, dovesse essere causato dal calore fuoriuscente dal Sole attraverso la corona. La temperatura dell'ordine del milione di gradi spiegava quindi la sua estensione nello spazio interplanetario, ben oltre l'orbita terrestre.

In parallelo con l'analisi dei dati osservativi, verso la fine degli anni Cinquanta esistevano quindi due visioni dello spazio interplanetario: il flusso di particelle fuoriuscente dal

Sole ad alta velocità, proposto da Biermann e l'atmosfera solare statica che Chapman supponeva si estendesse oltre la Terra. Eugene Parker si rese conto del fatto che la corona e i flussi di gas solare non potevano essere entità distinte. Secondo Parker, la corona solare non era in equilibrio ma si espandeva continuamente nello spazio, riempiendo l'intero sistema solare e generando un flusso ad alta velocità, che chiamò *vento solare*, per distinguere dai precedenti modelli di un'atmosfera statica o di una radiazione corpuscolare che si comportava come un insieme di "proiettili". Tuttavia la teoria non fu accolta con favore. Un lavoro presentato all'*Astrophysical Journal* nel 1958 fu respinto da due referees e pubblicato grazie all'intervento dell'allora direttore, l'astrofisico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar.

Alla fine degli anni '50, la maggior parte degli scienziati era ormai persuasa che un plasma di origine solare pervadesse lo spazio interplanetario fino all'orbita terrestre e probabilmente oltre. Tuttavia non esisteva alcun accordo, nemmeno approssimativo, circa le proprietà di questo plasma. Il lancio di sonde spaziali nel 1959 rendeva ormai possibile misurare la densità degli ioni e degli elettroni nello spazio esterno alla cavità magnetica terrestre. Le prime osservazioni dirette furono fatte nel 1959 dai satelliti sovietici Lunik I e Lunik II, che erano riusciti a misurare un flusso di ioni positivi alla distanza di 29 raggi terrestri. L'interesse per il plasma interplanetario del Gruppo di Raggi Cosmici del MIT, guidato da Bruno Rossi, era percepito come una "naturale estensione" della propria linea di ricerca in quanto principalmente motivato dalla sua connessione con il problema delle variazioni temporali nell'intensità dei raggi cosmici in coincidenza del minimo del ciclo solare, e viceversa. Rossi sentiva che nuove opportunità «di trovare qualcosa di inaspettato» si aprivano attraverso la tecnologia spaziale, così come all'inizio degli anni Trenta il contatore Geiger-Müller era stato lo strumento che aveva trasformato le ricerche dei raggi cosmici in un nuovo campo della fisica.

Un programma concreto per lo sviluppo di un esperimento avente lo scopo di misurare la composizione e il moto d'insieme del plasma interplanetario fu subito sviluppato con la collaborazione fondamentale di Herbert Bridge a cui si unirono Frank Scherb, Edwin Lyon, Constance Dilworth-Occhialini e successivamente Alan Lazarus, Alberto Bonetti e Alberto Egidi. Nel maggio 1959 i risultati di uno studio preliminare apparvero sull'*Annual Report for the Laboratory for Nuclear Science*. Un ulteriore obiettivo era quello di misurare la direzione del moto del flusso di plasma. Lo strumento preparato dal gruppo di Rossi per essere lanciato a bordo di un razzo era fondamentalmente una cosiddetta *tazza di Faraday* modificata. La *tazza di Faraday* è un dispositivo per misurare la corrente in un fascio di particelle cariche e nella sua forma più semplice consiste di una cavità metallica conduttrice che intercetta il fascio e attraverso un conduttore elettrico trasporta la corrente a uno strumento di misura. Ma uno strumento di questo tipo, pur molto affidabile nella sua semplicità, considerando le condizioni in cui avrebbe dovuto operare, era soggetto a una seria fonte di errore. La forte radiazione solare che avrebbe investito il collettore causando l'esplosione di elettroni che, muovendosi verso la griglia, avrebbero prodotto nel circuito del collettore una corrente dello stesso segno di quella generata dai protoni in moto nella direzione opposta provenienti dal vento solare. Un problema non banale, che richiese una soluzione ingegnosa. A questo scopo furono previste altre due griglie che con funzioni diverse avrebbero tenuto sotto controllo questo inconveniente, non completamente eliminabile. Infatti, un problema di fondo delle sonde sovietiche risiedeva nel fatto che non avevano alcuna protezione contro l'interferenza dei fotoelettroni, che falsavano quindi la misura dell'intensità. Inoltre non erano in grado di misurare l'energia dei protoni che, al contrario degli elettroni dotati di moti molto più disordinati, erano quelli che potevano fornire dati attendibili sul moto d'insieme del flusso di plasma (Fig. 10).

Lo strumento fu lanciato soltanto il 25 marzo 1961 a bordo del satellite Explorer X. La sonda del MIT stabilì alcune questioni di base sulle condizioni esistenti nello spazio interplanetario, oltre a dimostrare l'esistenza di un vento solare supersonico e di una cavità

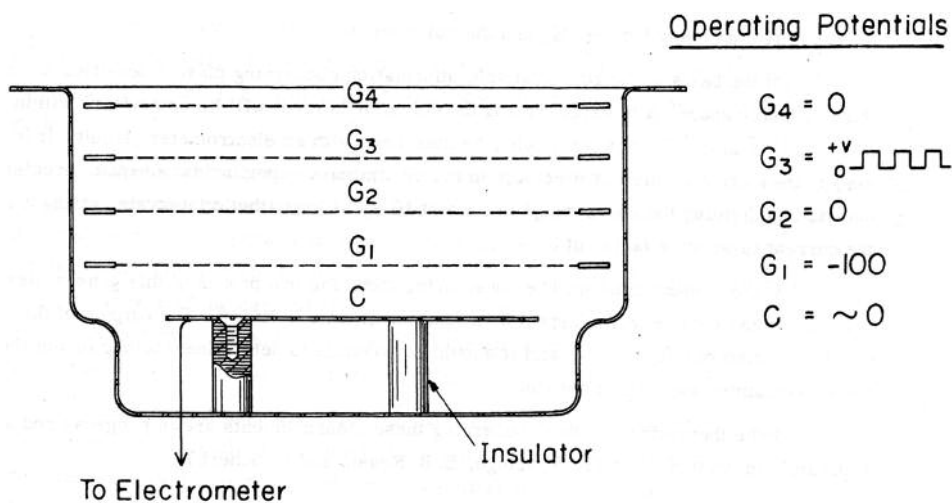


Figura 10. Sezione della *Plasma Probe* costruita dal gruppo di Rossi al MIT. Il flusso dei protoni del plasma solare avrebbe fluito attraverso la griglia  $G_4$  verso il collettore, tenuto a un opportuno potenziale negativo in modo da evitare che gli elettroni del plasma potessero raggiungerlo. Le griglie  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$  hanno la funzione di tenere sotto controllo il disturbo proveniente dalla corrente diretta e inversa dei fotoelettroni generati dalla luce solare che investe la placca del collettore.

geomagnetica, una regione di spazio in cui il campo magnetico terrestre costituisce uno schermo per il vento solare.<sup>21</sup> Prima della scoperta delle fasce di Van Allen, lo spazio che circonda la Terra al di fuori dell'alta atmosfera e della ionosfera si riteneva piuttosto semplice. Il meccanismo generale era stato descritto nella teoria magnetoidrodinamica del fisico svedese Hannes Alfvén, che aveva messo in evidenza come un gas ionizzato in moto dovesse trasportare con sé un campo magnetico. Le ricerche stabilirono che esiste una regione dello spazio che circonda la Terra le cui proprietà e la cui forma sono determinate dal campo magnetico terrestre, dal plasma solare e dal campo magnetico interplanetario. Il plasma è un eccellente conduttore elettrico. Per questa ragione il vento solare non può penetrare direttamente all'interno del campo magnetico terrestre e, a una distanza di circa 10 raggi terrestri, il dipolo viene compresso e il vento solare è costretto a fluire intorno a questa regione, denominata magnetosfera, che si estende ad una distanza di molti raggi terrestri, in cui il campo magnetico domina rispetto ai moti del gas e delle particelle cariche. Dalla parte opposta – lato notturno – il campo assume invece una forma allungata estendendosi fino a circa 100 raggi terrestri. L'onda d'urto che si forma nella parte frontale della magnetosfera, là dove il vento solare investe il campo magnetico terrestre, è simile all'onda che compare davanti a una barca che si muove nell'acqua. Un aereo che viaggia a velocità supersonica produce ugualmente un'onda d'urto nell'aria davanti all'aereo in volo. In un plasma come quello del vento solare, il principio rimane vero; in questo caso la velocità del flusso è superiore a quella del suono e alla cosiddetta velocità di Alfvén, così da formare un'onda d'urto in corrispondenza dell'ostacolo creato dalla magnetosfera terrestre. L'onda d'urto costringe il vento solare a fluire intorno alla magnetosfera. La magnetosfera è costituita da molte parti (Fig. 11) ed è composta da particelle cariche e flussi magnetici. Queste particelle, oltre ad essere responsabili di molti straordinari fenomeni come le aurore e le emissioni radio naturali, si muovono e circolano intorno alla magnetosfera generando perfino delle tempeste.

I dati provenienti dal satellite Mariner 2, lanciato nell'agosto di quello stesso 1961 confermarono che il vento solare è la norma nello spazio interplanetario, e le sue proprietà generali divennero note con maggiore precisione. La velocità media è di circa 450 km/s e la densità è di circa 6 protoni/cm<sup>3</sup>.

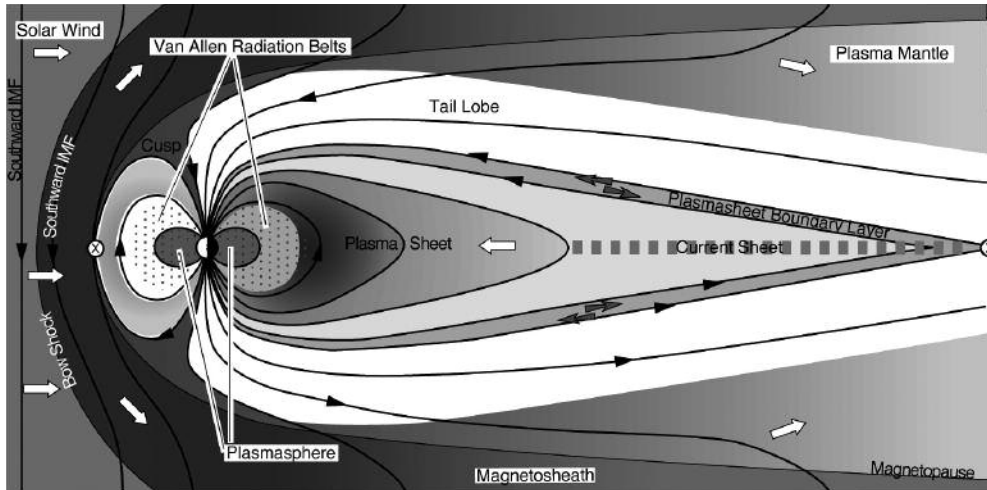


Figura 11. La dinamica della magnetosfera terrestre è controllata dal campo magnetico della Terra, così che la magnetosfera può essere divisa in 7 regioni determinate dalla topografia del campo. Il flusso del vento solare intorno al campo magnetico terrestre è supersonico e superalfvénico, quindi, prima che il vento solare raggiunga la magnetopausa, esso forma un'onda d'urto stazionaria, attraverso la quale viene decelerato, riscaldato e deflesso. Il plasma così modificato fluisce intorno alla magnetopausa, lo strato di equilibrio tra le pressioni del plasma solare e il campo magnetico, che racchiude la magnetosfera a una distanza di circa 10 raggi terrestri, nella così detta regione di transizione. La magnetosfera è un sistema dinamico estremamente complesso, composto da plasmi che hanno caratteristiche diverse.

Dopo il volo di Explorer X il concetto di "spazio esterno" risultava profondamente mutato e la relazione Terra - Sole emergeva del tutto rinnovata da quella che Alfvén ha considerato una rivoluzione scientifica confrontabile con l'introduzione del telescopio come strumento di osservazione del cielo da parte di Galileo. I presupposti costruttivi dello strumento messo a punto dal gruppo di Rossi vennero successivamente riutilizzati per l'esplorazione delle magnetosfere degli altri pianeti del sistema solare. Nel frattempo Occhialini, che ancora una volta seguiva le orme del suo antico maestro, insieme a sua moglie Connie Dilworth, aveva deciso di iniziare anche a Milano un'attività di ricerca nel settore della fisica spaziale.

Dopo aver guardato verso il cielo nei suoi laboratori terrestri, Rossi stava vivendo la sensazione eccitante di essere sulla soglia di una nuova era scientifica, che sarebbe stata dominata dai problemi dell'Universo. Questa previsione, fatta da lui stesso nel 1960, sarebbe stata confermata ampiamente, come dimostrano le ricerche attuali. Ma di lì a poco, lo stesso Rossi avrebbe avuto ancora una volta una prova di quanto «le ricchezze della Natura superano di gran lunga l'immaginazione umana», come lui stesso amava sempre ricordare. Stava cominciando per lui una nuova avventura scientifica che lo avrebbe accompagnato fino agli ultimi anni della sua vita.

### Una nuova astronomia

Prima del 1940 lo studio del Sole era un'attività caratteristica di un numero assai limitato di laboratori nel mondo. Le ricerche sulla ionosfera generarono le prime ipotesi sull'emissione di raggi X da parte del Sole. Un test sperimentale era all'epoca impossibile perché l'atmosfera terrestre oscura completamente i raggi X e gli ultravioletti. Dopo la seconda guerra mondiale, quando le V-2 tedesche cominciarono ad essere utilizzate per le ricerche di alta quota, divenne possibile studiare come le varie regioni della ionosfera vengono create e mantenute dalla radiazione solare e vennero trovati gli indizi della presenza di una emissione X. Ma la vera svolta si ebbe nel 1948, quando Herbert Friedman lan-



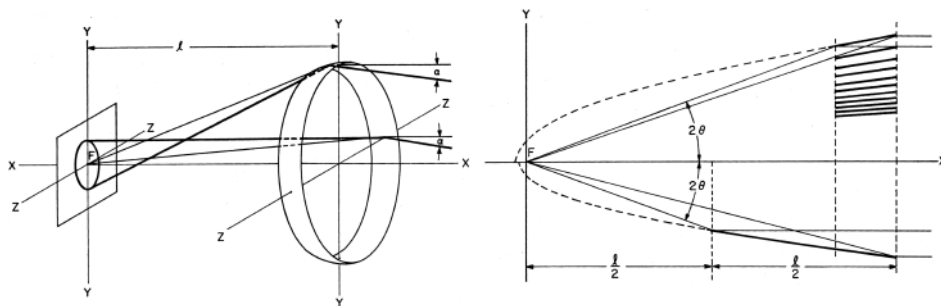


Figura 12. A sinistra: formazione dell'immagine dei raggi X da parte di un piccolo segmento di uno specchio parabolico il cui piano si trova a distanza  $L$  dal fuoco  $F$ . I raggi incidenti nel piano  $xy$  parallelo all'asse vengono concentrati da uno specchio in un punto in  $F$ . In prima approssimazione, un fascio di raggi paralleli che formano un piccolo angolo  $\alpha$  con l'asse vengono concentrati su un cerchio nel piano focale il cui centro si trova in  $F$  e il cui raggio è  $R=1/\alpha$ . In tal modo un rivelatore di raggio  $R$  nel piano focale rileverà tutti i raggi che colpiscono lo specchio formando con l'asse angoli inferiori a  $R/L$ . A destra: la risoluzione angolare dello strumento è determinata dalla dimensione dell'area di rilevazione all'altezza del fuoco del paraboloide e dalla perfezione della superficie ottica.

ciò i suoi contatori sensibili alla luce ultravioletta e X a bordo di una V-2 che salì ad una altezza di 150 km, raccogliendo dati che confermarono l'esistenza di radiazione X all'altezza dello strato E, la regione della ionosfera che va dai 90 ai 130 km di altezza, confermando che esso viene creato dall'emissione solare in questa lunghezza d'onda. Nel corso degli studi successivi Friedman divenne un esperto del settore e nel 1958, l'anno della scoperta delle fasce di Van Allen, riferì dei suoi falliti tentativi di osservare sorgenti extrasolari di raggi X. In quegli stessi mesi Bruno Rossi, che stava portando avanti il progetto sul vento solare, meditava sull'opportunità di compiere del lavoro esplorativo nel campo dell'astronomia X. In effetti gli studi di Friedman avevano ben delineato il tipo di emissione X proveniente dal Sole e questo chiariva bene che i flussi provenienti da stelle simili al Sole sarebbero stati di una intensità talmente debole da scoraggiare qualsiasi scienziato all'epoca. Soltanto esperimenti con satelliti avrebbero realmente consentito uno studio del genere, grazie a una più lunga permanenza nello spazio degli strumenti, un presupposto importante per rivelare sorgenti deboli di raggi X. Nonostante i precedenti tentativi fallimentari, Rossi pensava che fosse possibile sviluppare dei rivelatori più efficienti: «Nessuno aveva ancora esplorato il cielo con rivelatori per raggi X sensibili come quelli che speravo di costruire e questa, per me, rappresentava una ragione sufficiente per intraprendere questa esplorazione; la mia lunga esperienza come fisico dei raggi cosmici mi aveva insegnato che quando si entra in un territorio inesplorato c'è sempre la possibilità di trovare qualcosa di imprevisto».

Il gruppo del MIT, che studiava i raggi cosmici, era già troppo impegnato per affrontare un nuovo progetto, ma Rossi non era tipo da rinunciare, così si rivolse a Martin Annis, un suo ex allievo esperto di rivelazione di raggi X da esplosioni d'alta quota, il quale aveva una piccola società, la *American Science & Engineering*, che lavorava prevalentemente per il Dipartimento della Difesa. Annis decise di accettare il rischio di tale impresa. I rivelatori impiegati fino a quel momento erano contatori Geiger-Müller dotati di una finestra di mica dell'area di circa  $1\text{ cm}^2$  che consentiva ai raggi X di penetrare all'interno. Il modo migliore sarebbe stato quello di concentrare su un piccolo rivelatore i raggi incidenti su un'area di raccolta molto più vasta. Nella compagnia lavorava anche Riccardo Giacconi, ex allievo di Occhialini che si mise subito al lavoro. Giacconi suggerì di utilizzare la ben nota proprietà della riflessione totale dei raggi X nel caso di un angolo incidente piccolissimo rispetto alla superficie riflettente. Secondo gli studi di H. Wolter, una immagine X può essere formata attraverso una prima riflessione da uno specchio parabolico, seguita da una seconda riflessione dello stesso tipo da parte di uno specchio iperbolico. Per au-

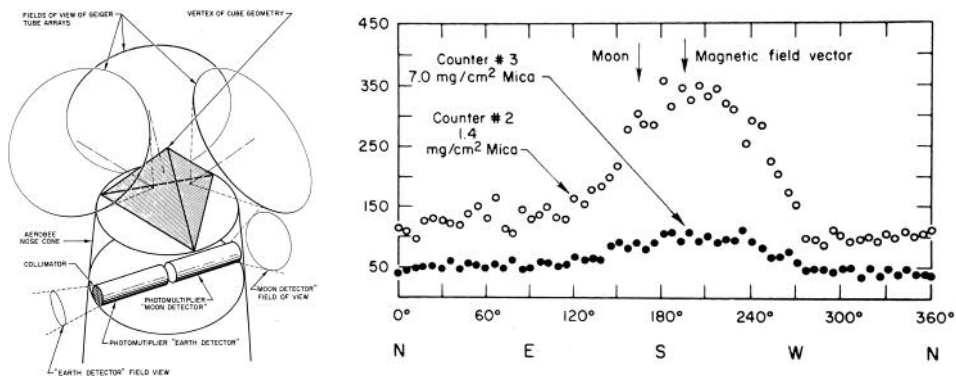


Figura 13. A sinistra: il sistema di tre batterie di contatori Geiger-Müller del tipo “pancake” (vista d’insieme secondo un angolo semisferico) e di rivelatori a scintillazione (in anticoincidenza con il corrispondente segnale in uscita da ciascuna batteria di contatori) per la riduzione di circa il 90% del segnale, variabile nel tempo e con l’orientazione, proveniente dalla radiazione di fondo generata dalle particelle dei raggi cosmici. La strumentazione include anche un sistema sensorio che comprende due fotomoltiplicatori per l’accurata determinazione dell’orientazione del razzo, che consente in qualsiasi momento di individuare la regione del cielo rilevata dal sistema di contatori. A destra: la curva superiore è costituita da punti che rappresentano i dati raccolti in funzione dell’angolo azimutale della direzione perpendicolare al piano del contatore 2 e un piccolo picco raccolto dal contatore 3, meno sensibile. Le curve non vanno a zero da entrambi i lati, indicando che esiste un fondo di raggi X nell’area di cielo spazzata dai contatori durante il volo.

mentare la quantità di radiazione raccolta, Rossi ebbe l’idea di innestare vari specchi uno dentro l’altro (Fig. 12).

Ma la costruzione di uno strumento del genere, dotato di una superficie metallica perfettamente lucidata, avrebbe richiesto dei tempi assai lunghi, così, nell’attesa, il gruppo preparò un esperimento preliminare con uno strumento costruito da Frank Paolini. Il sistema di rilevazione era costituito da tre sistemi di contatori dotati di larghe finestre di mica molto sottile, che nell’insieme erano in grado di raccogliere segnali da un angolo solido costituito da  $2/3$  di una semisfera (Fig. 13). Lo scopo ufficiale di questo primo esperimento era di cercare di rilevare raggi X provenienti dalla superficie lunare sotto l’influsso della radiazione solare. Nessuna istituzione governativa avrebbe finanziato un esperimento tanto rischioso da voler indagare sulle deboli fonti provenienti dallo spazio profondo. Questa “rete per raggi X” preparata da Paolini fu lanciata con un razzo Aerobee il 18 giugno 1962 e raccolse nel corso di 350 secondi una serie di dati che, in corrispondenza del contatore 2, rivelarono l’esistenza di un forte picco di radiazione nella regione sud del cielo (Fig. 13).

Ma non poteva trattarsi della Luna, il segnale era troppo forte e non si trovava in quella direzione. L’analisi dei dati richiese uno sforzo di molte settimane, durante le quali il gruppo cercò meticolosamente di accertare l’eventuale esistenza di segnali di interferenza che avrebbero potuto falsare l’interpretazione. È evidente come questo tipo di esperimenti poneva problemi del tutto nuovi ai pionieri della fisica nello spazio.

In autunno, essendo finalmente certi di aver interpretato correttamente le loro osservazioni, si sentirono autorizzati ad informare la comunità scientifica della scoperta e inviarono al *Physical Review* una nota intitolata “Evidence for X Rays From Sources Outside the Solar System”. Queste osservazioni fornivano la prova evidente dell’esistenza di una nuova classe di oggetti celesti che emettevano una quantità di raggi X mille volte superiore rispetto a quella emessa dal Sole in tutte le lunghezze d’onda e una quantità di energie mille volte superiore a quella emessa nello spettro visibile. Pur accolta con grande interesse, la notizia generò anche considerevole scetticismo, tanto che la nota fu inizialmente respinta ed accettata per la pubblicazione soltanto dopo che Bruno Rossi in persona ebbe assicurato a Samuel Goudsmith, il direttore dell’epoca, che si sarebbe assunto personalmente la responsabilità del suo contenuto. Tale scetticismo era comprensibile, l’esistenza di



Figura 14. Bruno Rossi e Giuseppe Occhialini (Beppo per gli amici) negli ultimi anni della loro vita. Due satelliti per l'astronomia X sono stati loro dedicati: il Bruno Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) e il BeppoSax.

una sorgente di raggi X – presumibilmente assai remota – ma di eccezionale intensità, tanto da essere osservabile con tali semplici, seppure ingegnosi, strumenti, era qualcosa di totalmente diverso dall'esperienza millenaria nel campo dell'astronomia.

Come sottolineava Bruno Rossi in una intervista a Richard F. Hirsh (21 luglio 1976, *American Institute of Physics*): «Avevo una lunga esperienza nel lavoro sui raggi cosmici, e questa esperienza mi aveva insegnato che *tutte le volte che uno scienziato si avventura in un campo precedentemente inesplorato, è probabile che si debba confrontare con fenomeni del tutto nuovi e inaspettati* [nostra enfasi]».

L'esperimento promosso da Rossi inaugurava infatti l'astronomia a raggi X, che accanto all'astronomia gamma si è rivelata uno strumento fondamentale per la comprensione dei processi più svariati in atto nelle profondità dell'Universo.

A distanza di 50 anni sono state identificate oltre 100000 sorgenti X, tra queste vi sono gli oggetti più esotici dell'Universo: buchi neri, stelle di neutroni e quasar. Nel 2002 Riccardo Giacconi ha avuto il Premio Nobel per la Fisica per «I suoi pionieristici contributi all'astrofisica, che hanno portato alla scoperta delle sorgenti cosmiche di raggi X». Il suo mentore, Bruno Rossi, che sarebbe anche stato meritevole del premio, era purtroppo scomparso dieci anni prima.

## Epilogo

L'intuizione dell'importanza di sfruttare nuove finestre tecnologiche per guardare l'Universo con occhi nuovi è una chiave fondamentale per comprendere le vaste motivazioni di fondo che modellarono l'evoluzione dell'identità scientifica di Rossi da "fisico dei raggi cosmici" ad "astronomo dei raggi cosmici". Esiste infatti un'unità profonda nel suo lavoro, che guida e articola la sua linea di ricerca fino agli esperimenti spaziali dei primi anni '60. Questi rappresentano gli atti conclusivi di un progetto di ricerca coerente, ini-

ziato trenta anni prima sulle colline di Arcetri, che aveva visto Rossi costantemente alle frontiere della fisica vivendo da protagonista la vicenda dei raggi cosmici fin dal suo trasformarsi in un vero e proprio campo di ricerca fisica, attraverso la sua evoluzione verso l'astrofisica e la nascita della ricerca spaziale. La ricostruzione della sua vita scientifica mette in luce un intero arco evolutivo di un settore di grande potenzialità, settore che, grazie al contributo di questi padri della scienza moderna, ha mostrato capacità di innovarsi e articolarsi. Un settore che sta mostrando la sua vitalità in un momento in cui la fisica delle alte energie con acceleratori si trova certamente in una fase assai critica ed è costretta a vivere delle aspettative, seppure assai fondamentali, che possono derivare dall'entrata in funzione del *Large Hadron Collider* del CERN. Nel frattempo, a conferma della lungimirante visione di personaggi come Rossi, lo studio dei "raggi cosmici" e dei segnali in genere che vengono dallo spazio esterno alla Terra rappresenta ormai una irrinunciabile alternativa alla fisica delle alte energie per lo studio dell'Universo nel suo complesso e per la comprensione dei processi elementari che hanno dato origine all'Universo stesso.

Bruno Rossi morì a Cambridge il 21 novembre 1993. Rispettando le sue volontà, le ceneri furono sepolte a Firenze nel cimitero monumentale Porte Sante, che si estende lungo la Basilica di San Miniato al Monte e si trova sulla via per Arcetri, là dove aveva avuto inizio la sua straordinaria odissea scientifica.

## Note

<sup>1</sup> DE ANGELIS, A. "Domenico Pacini, uncredited pioneer of the discovery of cosmic rays", *Riv. Nuovo Cimento*, 33, (2010), 713-756; Carlson, P. e De Angelis, A. "Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays", *Eur. Phys. J. H*, 35, (2010), 309-329; De Angelis, A., *L'enigma dei raggi cosmici. Le più grandi energie dell'universo*, Springer, 2012. BONOLIS, L. "I pionieri dei raggi cosmici in Italia: Domenico Pacini e Bruno Rossi", in *Scienziati d'Italia*, a cura di M. Cattaneo, Codice edizioni, 2011, p. 143-156.

<sup>2</sup> PACINI, D. "La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque", *Nuovo Cimento*, 3, (1912), 93-100, p. 100.

<sup>3</sup> Per una più dettagliata rassegna dei lavori scientifici inerenti alle ricerche dell'epoca si rimanda alla bibliografia qui di seguito indicata.

<sup>4</sup> RUSSO, A. *Le reti dei fisici. Forme dell'esperimento e modalità della scoperta nella fisica del Novecento*, La Goliardica Pavese, 2000.

<sup>5</sup> ROSSI, B. *Cosmic Rays*, McGraw-Hill, Londra 1966, p. 43.

<sup>6</sup> Tutte le citazioni tra virgolette senza referenza provengono da Rossi, B. *Momenti nella vita di uno scienziato*, Zanichelli, Bologna 1987. La principale informazione biografica su Bruno Rossi è contenuta nella appena citata biografia, e in altre note autobiografiche: Rossi, B. "Bruno Benedetto Rossi", in *Scienziati e Tecnologi contemporanei*, Mondadori, 1974, Vol. II, 436-438; Rossi, B. "Early Days in Cosmic Rays", *Phys. Today*, 34, (1981), 35-42; Rossi, B. "I miei anni a Los Alamos", *Le Scienze* 34, 197, (1985), 36-45. I seguenti lavori di carattere generale saranno integrati man mano da riferimenti bibliografici più strettamente inerenti a momenti particolari del percorso scientifico di Rossi: DE MARIA, M. "Il ragazzo di Arcetri", *Sapere*, (agosto-settembre 1994), 23-36; *Giornata Lincea in ricordo di Bruno Rossi. Maestro, fisico e astrofisico. Roma 21 aprile 1994*, Accademia Nazionale dei Lincei, 1995; MORRISON, P. "Bruno Rossi in time and space", in *Cosmic Ray, Particle and Astroparticle Physics. A Conference in Honour of Bruno Rossi, Giuseppe Occhialini and Bruno Pontecorvo 11-13 September 1995, Florence, Italy*, a cura di A. Bonetti, Accademia Nazionale dei Lincei, 1997, 13-22; CLARK, G. W. "Bruno Benedetto Rossi, 13 April 1925. 21 November 1993", *Proceedings of the American Philosophical Society* 144, (2000), 329-341; PALMA, B. e PALMA, U. "Bruno Rossi. Venezia 1905-Cambridge MA 1993", *Il Nuovo Saggiatore*, 21, 5-6, (2005), 35-39; *The scientific legacy of Bruno Rossi. A scientific colloquium in honour of Bruno Rossi on the 100th anniversary of his birth*, a cura di A. Pascolini, Università di Padova, 2006.

<sup>7</sup> D'AGOSTINO, S. "Alcune considerazioni sull'opera di Bruno Rossi e della scuola fiorentina di fisica nelle ricerche sui raggi cosmici", *Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze*, 2 (1984), 69-83; RUSSO, A. "Bruno Rossi e la scuola di Firenze", in *Una difficile modernità. Tradizioni di ricerca e comunità scientifiche in Italia: 1880-1940*, a cura di A. Casella et al., La Goliardica Pavese, 2000, 287-298; BONETTI, A. e MAZZONI, M. "The Arcetri School of Physics", in *The scientific legacy of Beppo Occhialini*, a cura di P. Redondi et al., Società Italiana di Fisica, 2006, p. 3-34; Scarsi, L. "Bruno Rossi and the Group of Arcetri", *Proceedings of the 19th European Cosmic Ray Symposium, Florence, Italy, 30 August-3 September 2004*, a cura di O. Adriani et al., World Scientific, 2005, 6539-6544; ZELDES, N. "Giulio Racah and Theoretical Physics in Jerusalem", *Arch. for Hist. of Ex. Sci.* 63 (3) 289-323, 2009; De Santis, D. "Il genio di Daria per l'hi-tech", 62-63, *Sapere*, dicembre 2010.

<sup>8</sup> BONOLIS, L. "Walther Bothe and Bruno Rossi: the birth and development of coincidence methods in cosmic ray physics", <http://arxiv.org/abs/1106.1365>.

<sup>9</sup> LEONE, M. MASTROIANNI, A. e ROBOTTI, N. "Bruno Rossi and the Introduction of the Geiger-Müller Counter in Italian Physics: 1929-1934", *Physica*, XLII (2005), 453-480.

- <sup>10</sup> BUSTAMANTE, M. C. "Bruno Rossi au début des années trente: une étape décisive dans la physique des rayons cosmiques", *Arch. Int. Hist. Sci.*, 44 (1994), 92-115; BONOLIS, L. "First hints of electromagnetic showers in Bruno Rossi's notebooks", *Da Archimede a Majorana: la fisica nel suo divenire. Atti del XXVI. congresso nazionale di storia della fisica e dell'astronomia*, a cura di E. GIANNETTO *et al.*, Guaraldi 2009, 339-350.
- <sup>11</sup> DE MARIA, M. MALIZIA, G. e RUSSO, A. "La nascita della fisica dei raggi cosmici in Italia e la scoperta dell'effetto Est-Ovest", *Giornale di Fisica*, 33 (1992), 207-228.
- <sup>12</sup> DE MARIA, M. RUSSO, A. "Cosmic ray romancing: the discovery of the latitude effect and the Compton-Millikan controversy", *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 19 (2), 1989, 211-266.
- <sup>13</sup> DE MARIA, M. RUSSO, A. "The discovery of the positron", *Rivista di Storia della Scienza*, 2 (2), 1985, 237-286.
- <sup>14</sup> RUSSO, A. "I raggi cosmici e la scoperta di nuove particelle", *La Fisica nella Scuola*, 38 (4), Supplemento (2005), 86-99; RUSSO, A. "I raggi cosmici e la nascita della fisica delle particelle elementari", in *Atti dell'VIII Congresso Nazionale di Storia della Fisica*, a cura di F. Bevilacqua, Milano, 1988, 429-471.
- <sup>15</sup> AMALDI, E. "The Case of Physics", *20th Century Physics: A Selection of Historical Writings by Edoardo Amaldi*, a cura di G. BATTIMELLI e G. PAOLONI, World Scientific, 1998, 168-190.
- <sup>16</sup> ORLANDO, L. "Physics in the 1930s: Jewish physicists' contribution to the realization of the 'new tasks' of physics in Italy", *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 29, 1, (1998), 141-181.
- <sup>17</sup> BONOLIS, L. "Bruno Rossi and the Racial Laws of Fascist Italy", *Phys. Persp.*, 13, (2011), 58-90; BONOLIS, L. "Fuga dall'Italia fascista: il caso Bruno Rossi", *Sapere*, (dicembre 2010), 52-61.
- <sup>18</sup> Per un eccellente resoconto degli esperimenti sul decadimento del mesotrone si veda MONALDI, D. "Life of  $\mu$ : The Observation of the Spontaneous Decay of Mesotrons and its Consequences, 1938-1947", *Ann. Sci.*, 62 (4), 2005, 419-455; "The Indirect Observation of the Decay of Mesotrons: Italian Experiments on Cosmic Radiation, 1937-1943", *Hist. St. Nat. Sci.*, 38, 2008, 353-404.
- <sup>19</sup> CLARK, G. W. "The Contributions of Bruno B. Rossi to Particle Physics and Astrophysics", *Atti del XXV Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Milano, 10-12 novembre 2005*, SISFA, 2008, R1.1-R1.16.
- <sup>20</sup> Sito dell'Auger Observatory: <http://www.auger.org/>.
- <sup>21</sup> "Alle origini della fisica spaziale", in *Relatività, Quanti, Chaos e altre Rivoluzioni della Fisica*, a cura di E. GIANNETTO *et al.*, *Atti del XXVII Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Bergamo 2007*, Guaraldi 2010, 351-356.

