

76. M. AGENO, G. CORTELLESA, R. QUERZOLI. — Sullo spettro dei raggi gamma di bassa energia, nella radiazione cosmica.

Riassunto. — Con uno spettrometro a scintillazione ad un canale, munito di un cristallo di ioduro di sodio, si studia lo spettro energetico della componente ultra-molle della radiazione cosmica, all'aperto (al livello del mare) e sotto circa 100 g cm^{-2} . Si trova che tale componente è sostanzialmente costituita da fotoni secondari per la maggior parte di energia compresa tra 50 e 200 keV. La banda ha un massimo molto marcato attorno a 80 keV all'aperto e a 90 keV sotto 100 g cm^{-2} . La intensità incidente all'aperto viene valutata grossolanamente a 100 quanti al minuto, per centimetro quadrato e steradiante attorno alla verticale. Ciò corrisponde nell'ipotesi (vera in prima approssimazione) che la radiazione incidente sia isotropa, a un flusso di energia pari all'1% circa dell'energia totale incidente sulla superficie del suolo per effetto della radiazione cosmica.

Mediante misure di assorbimento in piombo, si conferma la natura fotonica della componente ultra-molle, mettendo in evidenza la discontinuità dell'assorbimento ai due lati del limite K di questo elemento.

Résumé. — Avec un spectromètre à scintillations à un seul canal, muni d'un cristal d'iodure de soude, on observe le spectre énergétique de la composante ultra-molle de la radiation cosmique, à ciel ouvert (au niveau de la mer) et sous environ 100 g cm^{-2} . On trouve alors que cette composante est en substance constituée par des photons secondaires pour la plupart d'une énergie comprise entre 50 et 200 keV. La bande a un maximum très marqué autour de 80 keV à ciel ouvert et de 90 keV sous 100 g cm^{-2} . L'intensité incidente à ciel ouvert est évaluée grosso modo à 100 quanta par minute, par centimètre carré et sterad. autour de la verticale. Dans l'hypothèse (vraie en première approximation) que la radiation incidente soit isotrope, cela correspond à un flux d'énergie égal à 1 pour cent environ de l'énergie totale incidente sur la surface du sol par l'effet de la radiation cosmique.

Moyennant des mesures d'absorption en plomb, on a la confirmation que la composante ultra-molle est formée par des photons, en mettant en évidence la discontinuité de l'absorption sur les deux côtés de la limite K de cet élément.

Summary. — The energy spectrum of the ultra-soft component of cosmic radiation was studied with a single-channel scintillation spectro-

meter with one sodium iodide crystal in the open air (at sea level) and below about 100 g cm^{-2} . It was found that this component consists substantially of secondary photons, the majority of which have an energy of between 50 and 200 keV. The band has a very well-defined maximum at about 80 keV in the open air and about 90 keV below 100 g cm^{-2} . The intensity incident in the open air was roughly estimated at 100 quanta per min. per cm^2 sterad. about the vertical. On the hypothesis (which is true as a first approximation) that the incident radiation is isotropic, this corresponds to an energy flux of about 1 per cent. of the total cosmic radiation energy incident on the surface of the earth.

The discontinuity of absorption on both sides of the K limit in lead absorption measurements confirms the photon nature of the ultra-soft component.

Zusammenfassung. — Mit einem einkanaligen Szintillationsspektrometer, das mit einem Natriumjodid-Kristall versehen ist, wird das energitische Spektrum der überweichen Komponenten der kosmischen Strahlung im Freien (auf Meereshöhe) und bei etwa 100 g cm^{-2} untersucht. Hierbei wird gefunden, dass diese Komponente hauptsächlich aus Sekundärphotonen besteht, die ihrerseits wieder eine Energie zwischen 50 und 200 keV haben. Das Band hat ein sehr ausgesprochenes Maximum bei 80 keV im Freien und bei 90 keV bei 100 g cm^{-2} . Die einfallende Intensität im Freien wird auf ungefähr 100 Quanten pro Minute pro Quadratcentimeter und Sterad. um die Senkrechte angesehen. Unter der Voraussetzung (die annäherungsweise richtig ist), dass die einfallende Strahlung isotrop ist, bedeutet dies einen Energiestrom, der etwa 1% der auf die Bodenfläche infolge kosmischer Strahlung einfallenden Gesamtenergie entspricht.

Durch Messung der Absorbierung in Blei wird die photonische Natur der überweichen Komponente bestätigt, wobei die Unterbrechung der Absorbierung zu beiden Seiten der Grenze K dieses Elements deutlich wird.

1. - INTRODUZIONE

E' noto da parecchi anni che nella radiazione cosmica a livello del mare è presente un numero assai elevato di elettroni e fotoni di bassissima energia, che vengono generalmente interpretati come il prodotto finale di degradazione energetica della componente elettromagnetica nell'aria.

Questa radiazione pochissimo penetrante è stata tuttavia fino ad oggi ben poco studiata per due ragioni. In primo luogo, essa non è per la maggior parte in grado di azionare i normali apparati di rivelazione, in quanto di energia inferiore al « taglio » introdotto dalle pareti dei contatori. In secondo luogo, i metodi che hanno permesso di sviluppare completamente la teoria degli sciami moltiplicativi alle alte energie, cadono completamente in difetto a queste energie così basse, di modo che neppure col calcolo si è potuto finora esattamente prevedere la struttura della componente elettromagnetica al disotto di qualche MeV.

Ciò che se ne sa fino ad oggi si può pertanto riassumere in poche parole. M. SCHÖNBERG ⁽¹⁾ fece per il primo osservare, nel 1938, come esistano notevoli divergenze tra le misure dell'intensità della radiazione cosmica eseguite a grande altezza mediante contatori in coincidenza e quelle eseguite con camere di ionizzazione. Le divergenze si possono spiegare ammettendo l'esistenza di una componente assai molle, capace in parte di attraversare l'unica parete di una camera di ionizzazione, ma non le numerose pareti di un gruppo di contatori in coincidenza.

L'esistenza effettiva di questa radiazione ultra-molle fu poi messa sperimentalmente in evidenza da G. BERNARDINI e B. FERRETTI ⁽²⁻³⁾ al livello del mare, con un sistema di contatori in coincidenza in cui le particelle per essere rivelate dovevano essere capaci di attraversare almeno 3 mm. di alluminio. Studiando l'assorbimento di questa radiazione in pochi millimetri di piombo o di ottone e la generazione di secondari elettronici negli stessi schermi, BERNARDINI e FERRETTI giunsero alle seguenti conclusioni:

a) esiste una assai intensa componente ultra-molle della radiazione cosmica, costituita da elettroni e fotoni. Il 10% della radiazione totale viene infatti assorbito da 2 mm di Pb e il 20% da 4 mm di Pb, mentre 8 mm di Pb assorbono praticamente come 4 mm.

b) l'energia media da attribuire alla frazione della radiazione totale che viene assorbita da 4 mm. di Pb sembra essere di 3-10 MeV.

c) il numero di fotoni presente nella radiazione ultra-molle sembra essere approssimativamente uguale a 10 volte il numero degli elettroni.

Vanno forse messe in relazione con l'esistenza di questa componente ultra-molle anche alcune osservazioni di altri Autori. P. AUGER e collaboratori ⁽⁴⁾ dimostrarono l'esistenza di piccoli sciami atmosferici locali capaci di produrre coincidenze tra contatori non schermati e posti tutti

nel raggio di una cinquantina di centimetri. BARNÓTHY J. e M. FORRÓ (⁵⁻⁶) ad una profondità equivalente a 1000 m. di acqua e successivamente M. MIESOWICZ, L. JURKIEWICZ e J. M. MASSALSKI (⁷) a profondità equivalenti a 600 e 540 metri di acqua, trovarono anch'essi coincidenze doppie tra contatori, attribuibili a una radiazione assai molle. I primi due Autori con un telescopio di contatori in coincidenza trovarono un eccesso di coincidenze doppie tra i contatori estremi, sulle coincidenze triple, eccesso che attribuiscono a una radiazione scarsamente ionizzante forse secondaria dei mesoni μ . MIESOWICZ, JURKIEWICZ e MASSALSKI confermano in parte l'eccesso di coincidenze doppie trovato da BARNÓTHY e FORRÓ, dimostrano che queste coincidenze doppie in eccesso sono dovute a raggi gamma con coefficiente di assorbimento in piombo di circa $1,4 \text{ cm}^{-1}$ e suggeriscono, senza per altro dimostrarlo, che si tratti di raggi gamma dovuti a radioattività locale e di energia dell'ordine di 1 MeV.

Allo scopo di portare un contributo allo studio di questo campo ancora pressochè inesplorato, ci siamo proposti di studiare la composizione spettrale dei raggi gamma di bassissima energia presenti nella radiazione cosmica. Abbiamo fatto uso a questo scopo di uno spettrometro a scintillazione a un canale, munito di un cristallo di ioduro di sodio, il cui schema e le cui prove di taratura sono state già descritte da noi in altro lavoro (⁸). Il cristallo dello spettrometro era in queste misure di forma cilindrica, di 5 cm. di altezza e 4,5 cm. di diametro, schermato da 0,7 mm. di alluminio e da un sottile strato diffondente di MgO. Solo per le prime misure orientative abbiamo fatto uso di un cristallo più piccolo, di 1,27 cm. di altezza e uguale diametro.

Questa tecnica, da non molto entrata nell'uso, presenta al nostro scopo dei vantaggi veramente notevoli e precisamente: l'elevatissimo rendimento (che con un cristallo delle dimensioni del nostro è praticamente 1 fino a circa 0,5 MeV e non scende poi mai al di sotto di $1/2$) e la proporzionalità tra l'energia lasciata dal raggio gamma nel cristallo e la ampiezza dell'impulso di tensione che ne consegue. Per quanto lo scarso potere risolutivo e la difficoltà di risalire dallo spettro degli impulsi di tensione a quello dei raggi gamma incidenti, rappresentino degli inconvenienti spesso abbastanza gravi, tuttavia le informazioni che se ne possono trarre sulla componente ultra-molle della radiazione cosmica sono, come vedremo, molto più estese di quelle ottenibili coi soliti contatori di Geiger.

Le misure che seguono sono state eseguite, assieme a molte altre su cui riferiremo in altra occasione, nel periodo gennaio-luglio del 1954.

2. - MISURE ORIENTATIVE.

Una prima serie di misure, a carattere orientativo, è stata eseguita in laboratorio, sotto una copertura che si può valutare a circa 100 gr. cm^{-2} , con un cristallo più piccolo (altezza = diametro = 1,27 cm.) di quello poi usato nelle misure finali. Queste misure hanno subito messo in evidenza una forte concentrazione di impulsi nella parte bassa dello spettro e precisamente tra 50 e 200 KeV circa, con un massimo molto marcato attorno a 90 KeV (fig. 1).

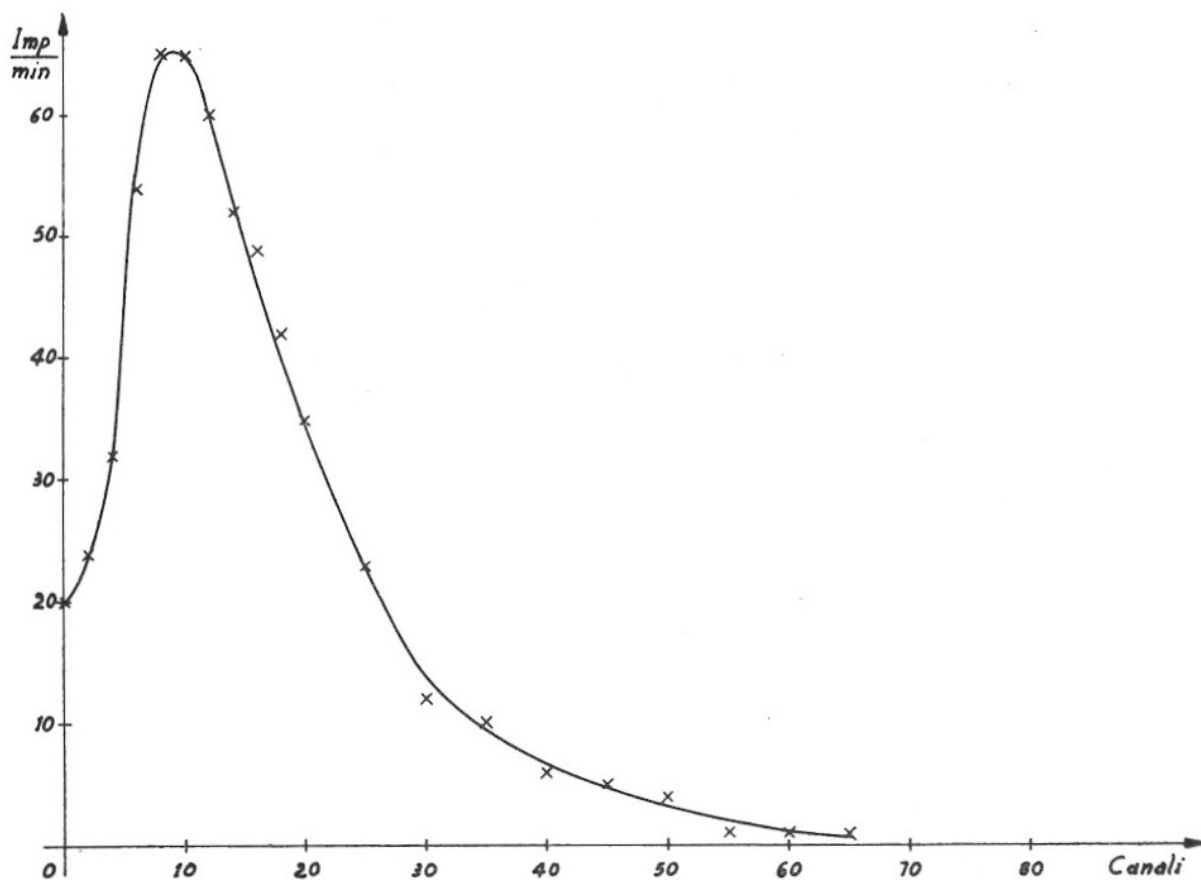


Fig. 1. - Spettro dei secondari dei raggi cosmici sotto 100 g cm^{-2} .

Poichè sulla base dei lavori di BERNARDINI e FERRETTI non ci si attendeva un tale risultato, si è ritenuto necessario prendere in esame le tre seguenti possibilità:

- a) che l'effetto osservato fosse di carattere strumentale;
- b) che si trattasse di un effetto dovuto a radioattività delle pareti o di oggetti circostanti;
- c) che fosse un effetto veramente imputabile alla radiazione cosmica.

Per poter escludere la prima di queste alternative, si sono fatte le prove seguenti.

Si è innanzi tutto esaminato lo spettro degli impulsi di fondo del fotomoltiplicatore, in assenza di cristallo. Il numero totale di impulsi registrati con e senza cristallo a varie amplificazioni è indicato nella tabella I.

TABELLA 1.

	Amplificazione	Imp/min
con cristallo	17.8 KeV/canale	1.668 ± 29
senza cristallo	17.8 » »	0
» »	2.18 » »	6 ± 1
» »	1.64 » »	43 ± 3

La figura 2 mostra la ripartizione spettrale degli impulsi di fondo del fotomoltiplicatore con amplificazione equivalente a 1,64 KeV/canale.

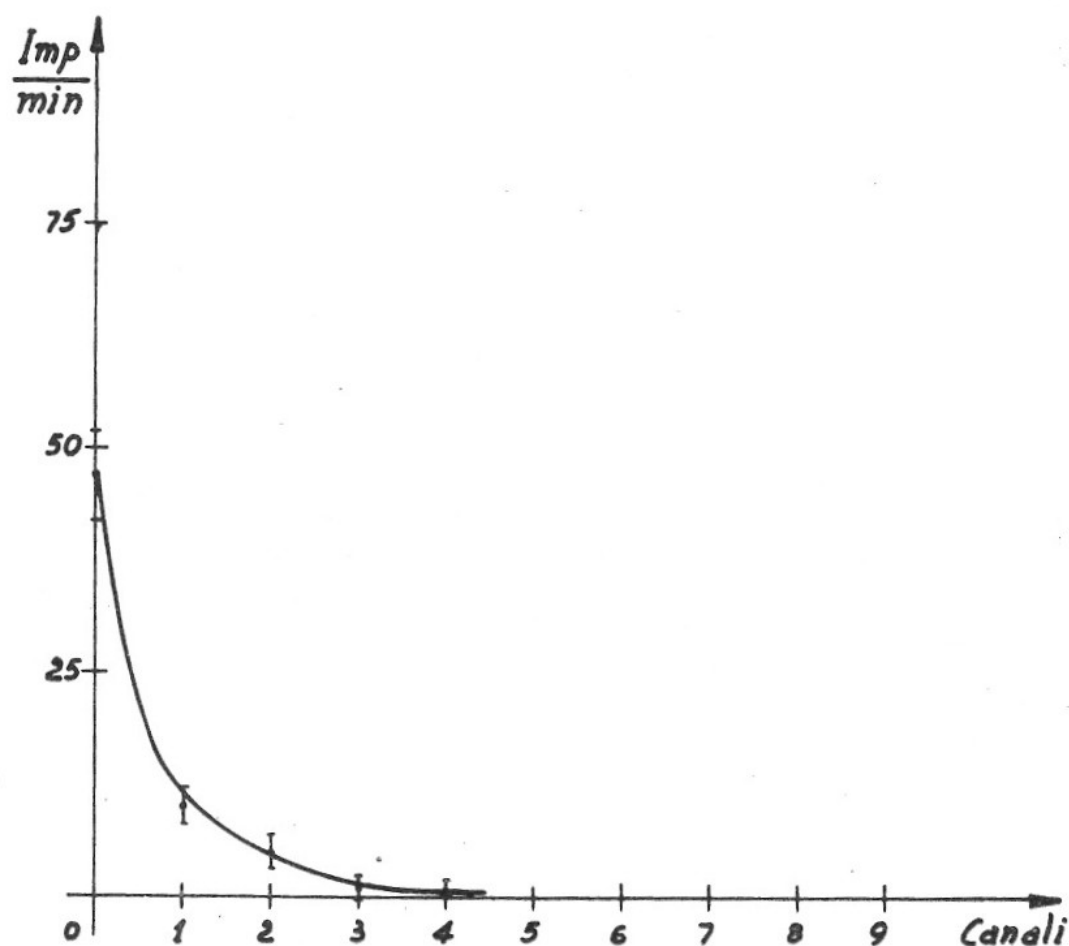


Fig. 2. - Spettro degli impulsi di fondo del fotomoltiplicatore.

Rimesso a posto il cristallo dello spettrometro, si è ricontrollata la linearità di risposta dell'apparato, coi metodi indicati nel precedente lavoro già citato ⁽⁸⁾. Inoltre, si è verificato che al variare dell'amplificazione, la posizione e l'intensità del massimo della figura 1 variassero rispettivamente in ragione diretta e inversa dell'amplificazione stessa.

Infine, come ultima conferma del carattere non strumentale della distribuzione osservata, si è fatto uno spettro degli impulsi del contatore a scintillazione nelle stesse condizioni della figura 1, ma con il cristallo schermato da ogni lato da 2 cm. di piombo. Tale spettro è riportato nella figura 3.

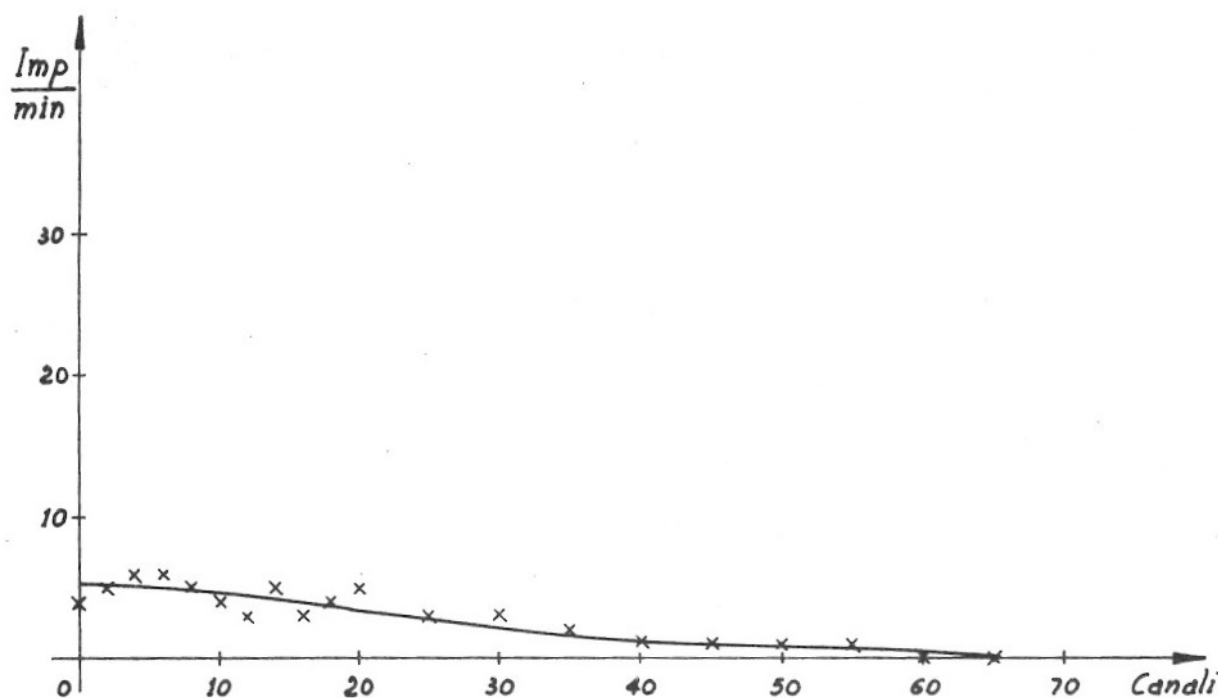


Fig. 3. - Spettro con cristallo schermato da 2 cm di piombo.

La seconda delle alternative sopra considerate, e cioè quella che l'effetto osservato fosse almeno per la maggior parte imputabile a radioattività delle pareti o di oggetti circostanti, ha richiesto un esame assai più approfondito. E' innanzi tutto da osservare che radiazione di così bassa energia, rivelata al centro di una stanza del laboratorio, sotto una copertura di circa 100 gr cm⁻², è certamente, almeno in gran parte generata nelle pareti o nel soffitto. Il problema era quindi quello di determinare se si trattasse di secondari di una radiazione proveniente dall'esterno o non piuttosto di radioattività dei materiali circostanti.

Un primo gruppo di prove è consistito essenzialmente nel cambiare la posizione del cristallo nel laboratorio, rispetto alle pareti o al soffitto, pur lasciando la copertura inalterata, allo scopo di mettere in

evidenza eventuali conseguenti variazioni d'intensità o di spettro. Nulla di tutto ciò si è potuto osservare:

1) variando la distanza del cristallo dalle pareti, da una distanza massima di 2,5 m. ad una minima di 2 cm.;

2) trasportando il cristallo in altro ambiente, le cui pareti laterali erano ricoperte da grandi armadi di legno assai spesso.

Una misura dell'andamento dell'intensità totale in funzione della distanza del cristallo dal soffitto ha dato i risultati raccolti nella figura 4.

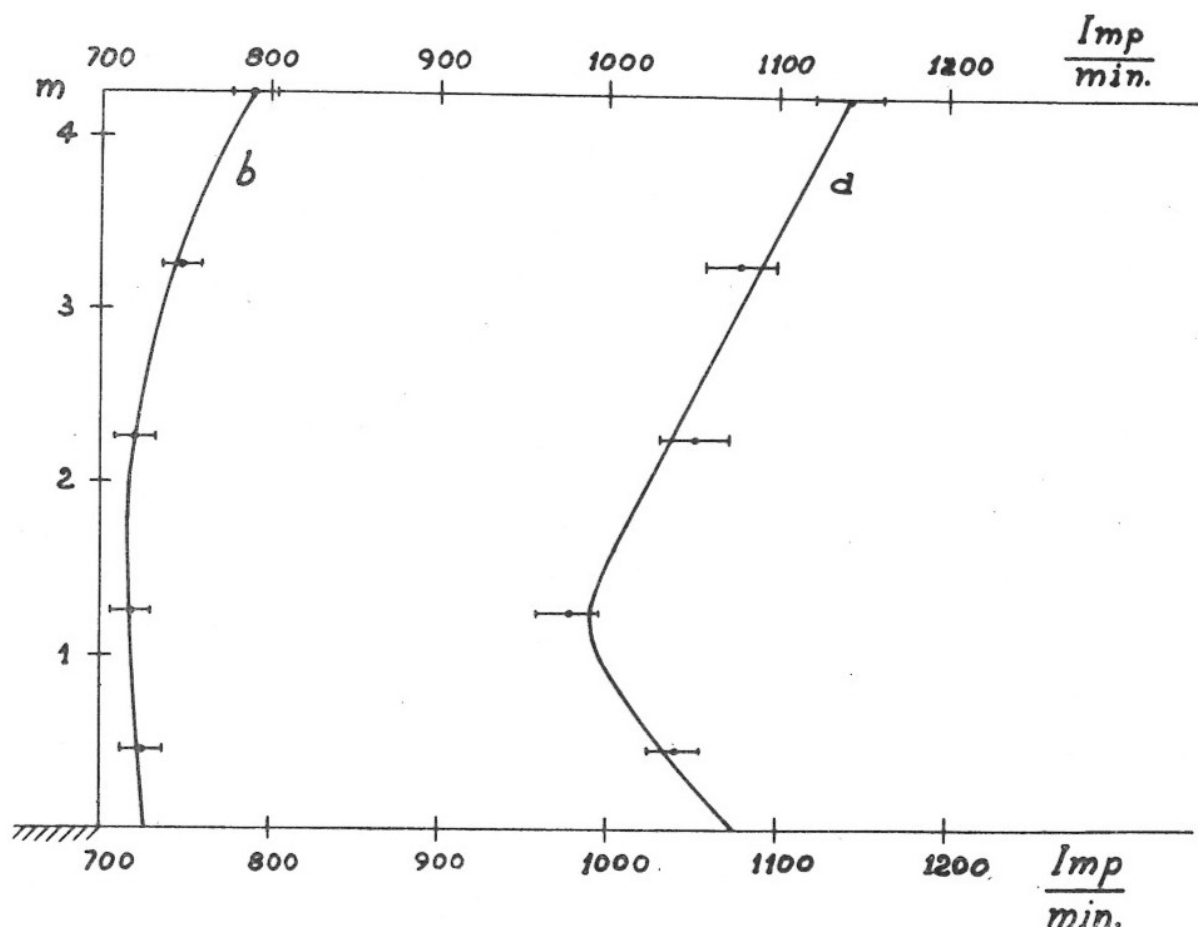


Fig. 4. - Intensità totale della radiazione all'interno del laboratorio in funzione della distanza del cristallo dal soffitto.

La curva *a* è stata ottenuta col cristallo schermato lateralmente con 5 mm di piombo e la curva *b* col cristallo schermato anche superiormente pure con 5 mm di piombo. Come si vede, la intensità della radiazione proveniente dal semispazio superiore si mantiene entro gli errori costante, dando così una indicazione che ad essa contribuiscono pressochè ugualmente il soffitto e le pareti laterali della stanza.

Un secondo gruppo di prove ha avuto lo scopo di stabilire se vi fosse una direzione preferenziale d'arrivo sul cristallo della radiazione responsabile degli impulsi osservati. Diversi spettri eseguiti schermanto parzialmente il cristallo con piombo hanno dimostrato che la radiazione in arrivo è sostanzialmente isotropa, fatto in ogni caso spiegabile se si tratta di raggi gamma di molto bassa energia.

Con un terzo gruppo di prove si è cercato di stabilire se i raggi gamma provenienti da sostanze radioattive contenute nelle pareti (essen-

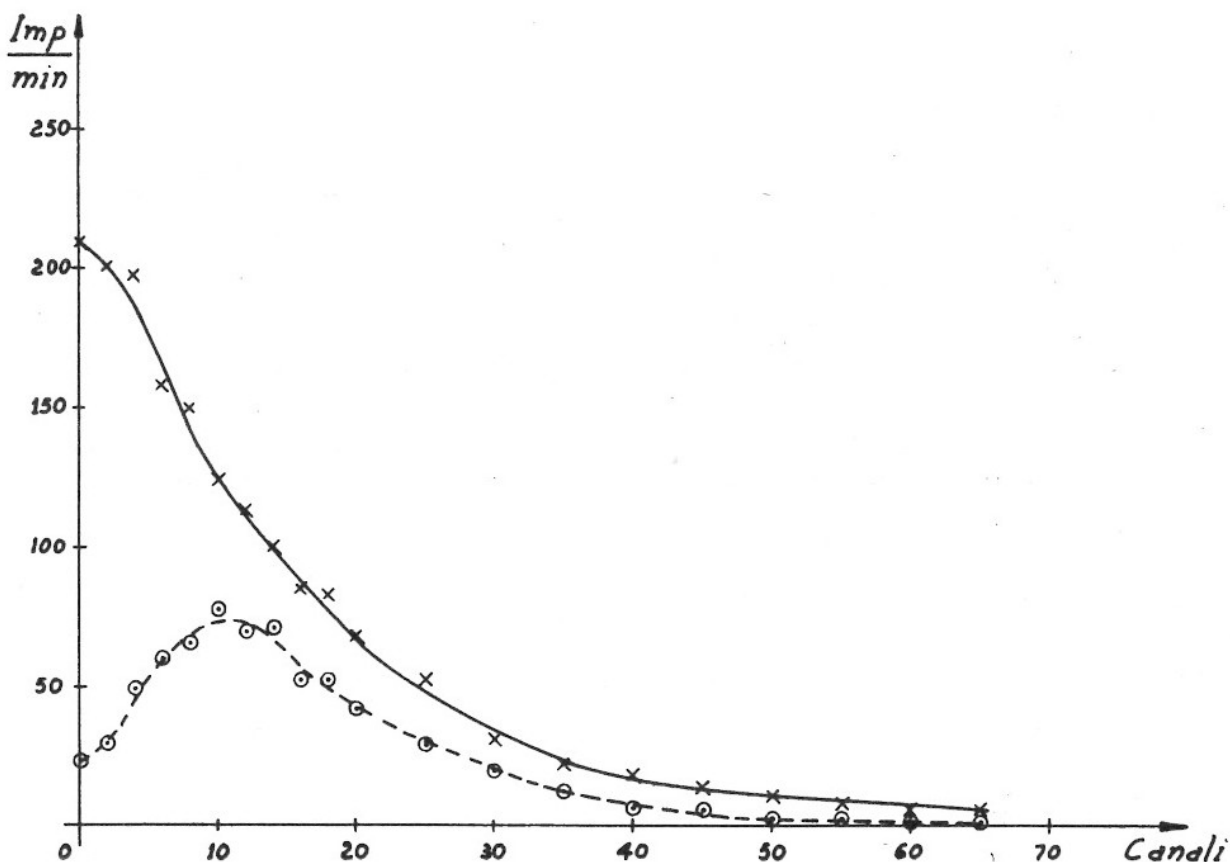


Fig. 5. - Spettro in presenza e in assenza di una sorgente di Radio (400 mc) filtrata dalle pareti.

zialmente Th, U e K) potessero nelle pareti stesse raggiungere uno spettro di equilibrio simile a quello osservato. A questo scopo in un ambiente prossimo a quello in cui si eseguivano le misure con lo spettrometro è stata posta una sorgente di 400 mC di Radio, schermata da alcuni centimetri di piombo in direzione del cristallo. Tra questo e la sorgente erano interposti due grossi muri maestri dell'edificio. Nella figura 5 sono posti a confronto i due spettri d'impulsi misurati con e senza la presenza della sorgente di Radio. La differenza tra le due curve, graficata nella figura 6, dà lo spettro d'impulsi dovuti alla presenza della sorgente. Come si vede, l'andamento di questo spettro è assai diverso da quello os-

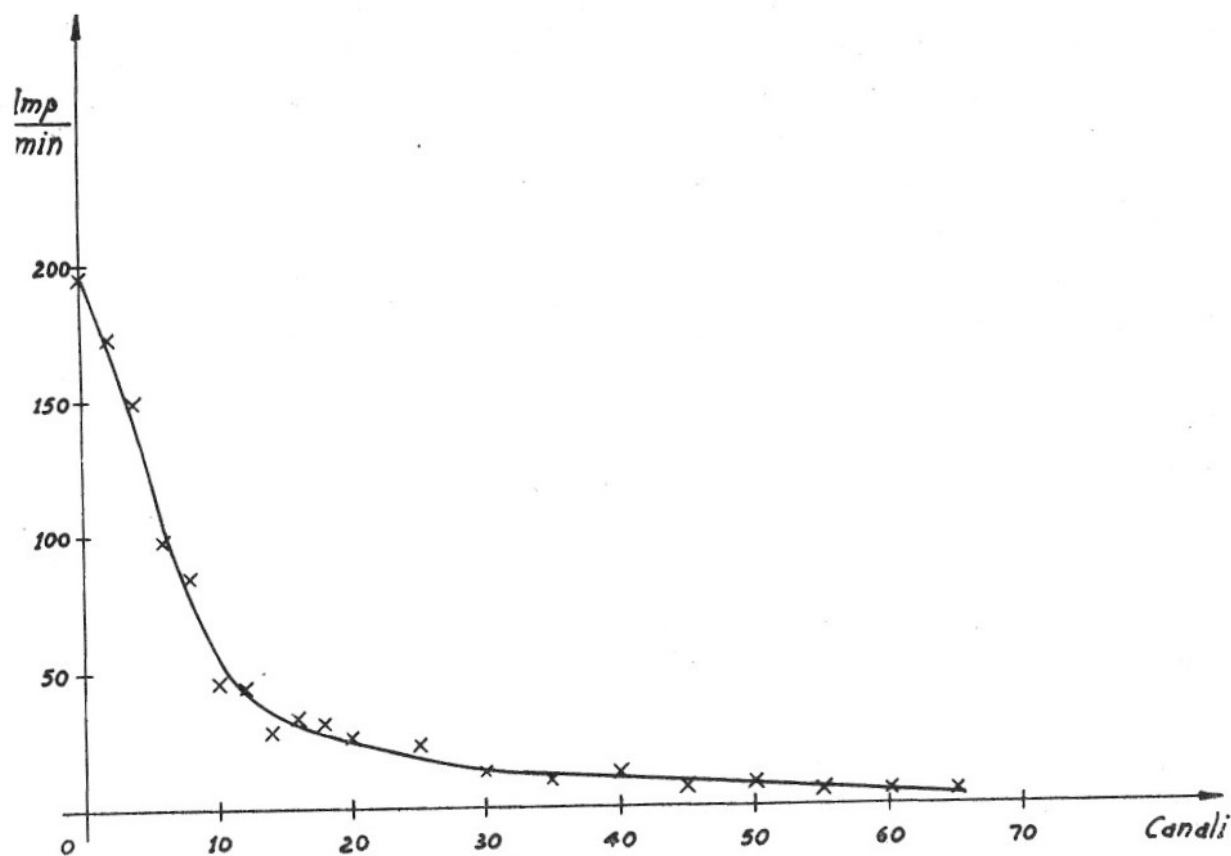


Fig. 6. - Spettro di degradazione di una sorgente di radio, filtrata dalla parete.

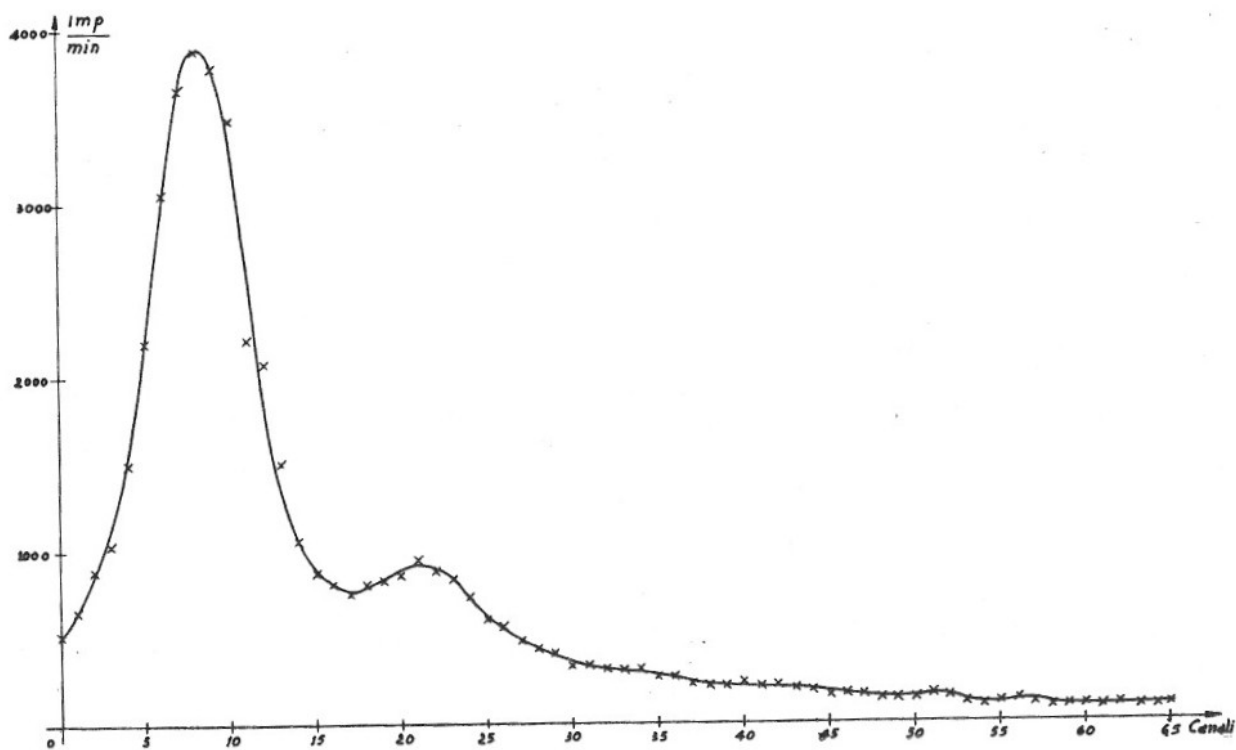


Fig. 7. - Spettro della radiazione X e γ di un preparato di Uranio.

servato senza sorgente, in quanto il massimo è spostato al di sotto della soglia dello spettrometro. Supposto che lo spettro della figura 1 sia dovuto a raggi gamma di parete, sembra che se ne debba concludere che tale spettro non ha ancora raggiunto la sua configurazione di equilibrio. Ciò sembra in accordo col fatto che la posizione del massimo, attorno a 90 KeV, coincide bene con la posizione media delle righe X caratteristiche degli elementi più pesanti della famiglia del Torio e dell'Uranio. Resta però allora inesplicabile come tale spettro appaia assai più ricco di raggi gamma di energia poco superiore ai 90 KeV di quanto non siano gli spettri di raggi X di Torio e Uranio, ottenibili col nostro spettrometro. Basta per convincersene confrontare i due spettri delle figure 12 e 7 ottenuti (con cristallo di 3 cm) l'uno con cristallo scoperto e l'altro da un preparato di nitrato di uranile tutto schermato, assieme al cristallo, con 2,5 cm di piombo.

Quanto al potassio eventualmente contenuto nelle pareti, sembra ch'esso non debba neppure essere preso in considerazione, data la debole intensità dei raggi gamma ch'esso emette. D'altra parte 1 Kgr di KCl posto in prossimità del cristallo dello spettrometro non ha prodotto un sensibile aumento nel numero totale degli impulsi di fondo.

Un ultimo gruppo di prove è stato infine eseguito all'esterno del laboratorio su una delle terrazze superiori dell'Istituto. Il contributo delle

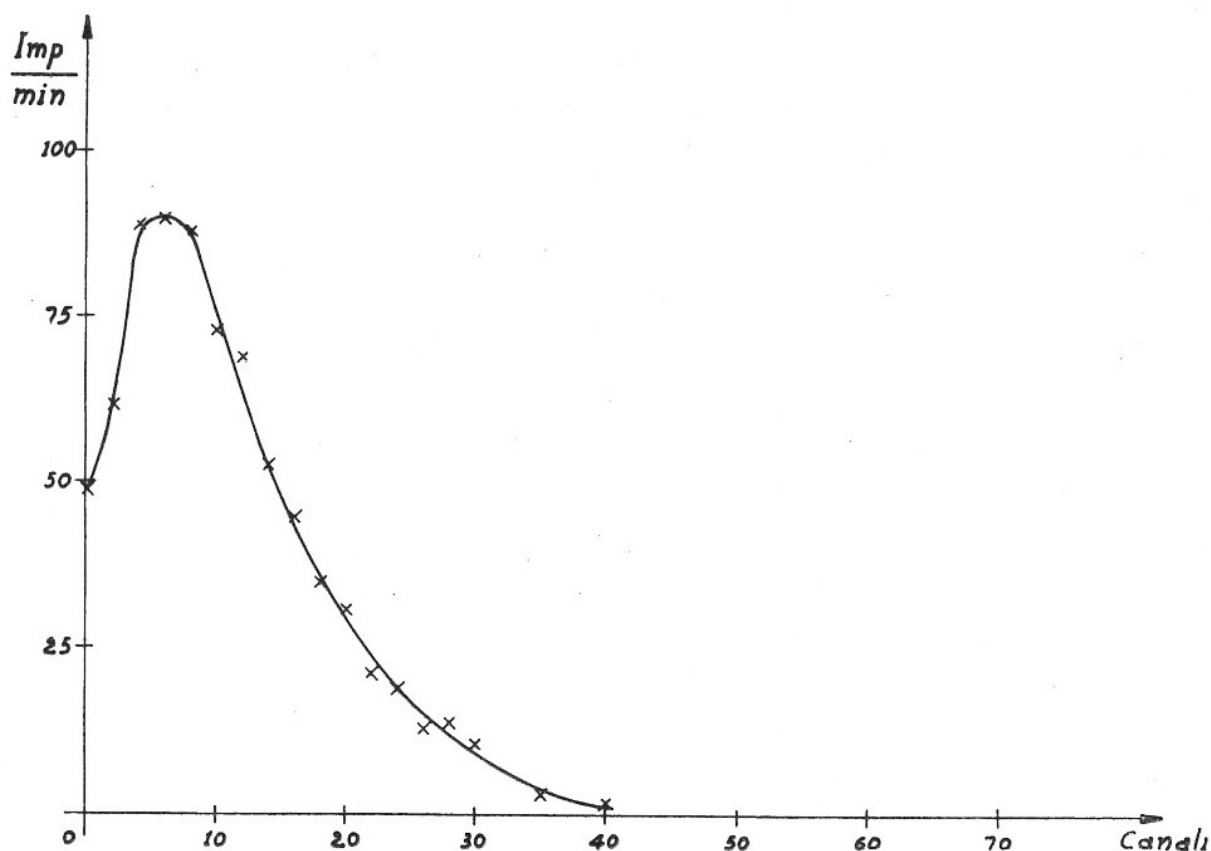


Fig. 8. - Spettro dei secondari dei raggi cosmici all'aperto.

radiazioni provenienti dai muri dell'edificio avrebbe dovuto qui essere assai minore che all'interno. Le misure orientative hanno invece rivelato una intensità nel massimo solo lievemente inferiore che all'interno, mentre la posizione del massimo era sensibilmente spostata verso le basse energie. La figura 8 mostra a titolo di esempio uno spettro ottenuto col cristallo completamente libero al centro della terrazza e a 4,5 m dal pavimento di essa.

Sulla base di tutte queste misure orientative sembra dunque che si possa concludere quanto segue: la radiazione cosmica genera nella materia un numero assai elevato di secondari di bassa energia, con massimo nell'aria attorno a 80 KeV e nel cemento attorno a 90 KeV ed estendentesi grosso modo da 50 a 200 KeV.

3. - SPETTRO D'IMPULSI DOVUTO ALLA COMPONENTE ULTRA-MOLLE

Giunti, sulla base delle misure orientative descritte nel paragrafo precedente, a questa prima conclusione, ci siamo posti innanzi tutto il problema di determinare con una certa precisione lo spettro degli impulsi generati nel nostro spettrometro dalla componente ultra-molle all'aperto e sotto 100 gr cm⁻². Tutte le misure che seguono sono state eseguite col cristallo grande dello spettrometro (5 cm di altezza e 4,5 di diametro).

La prima serie di misure è stata eseguita all'aperto, in condizioni geometriche tali, da rendere minimo un eventuale contributo di sostanze radioattive contenute nei materiali dell'edificio. A questo scopo il cristallo è stato messo in un pozzo verticale di piombo, le cui pareti avevano lo spessore di 2,5 cm e un diametro interno di 9 cm. Il centro del cristallo si trovava a 11 cm circa dalla base superiore del pozzo. In queste condizioni, l'angolo solido di provenienza della radiazione ultra-molle registrata dallo spettrometro era 0,53 steradiani, attorno alla verticale. La taratura dello spettrometro è stata fatta mediante i raggi gamma e X di conversione interna di Re¹⁸⁷ ottenuto mediante bombardamento con neutroni di una lastrina di tungsteno (figura 9). Nelle condizioni prescelte la costante dello spettrometro era 7,5 KeV/can e la soglia 4 canali. La figura 10 mostra lo spettro di impulsi dovuti alla componente ultra-molle ottenuto in tal modo.

Non è possibile dire a priori con che precisione tale spettro d'impulsi rappresenti anche lo spettro energetico della radiazione incidente, data la probabilità relativamente elevata che un raggio gamma non lasci nel cristallo tutta la sua energia. Abbiamo pertanto voluto vedere innanzi

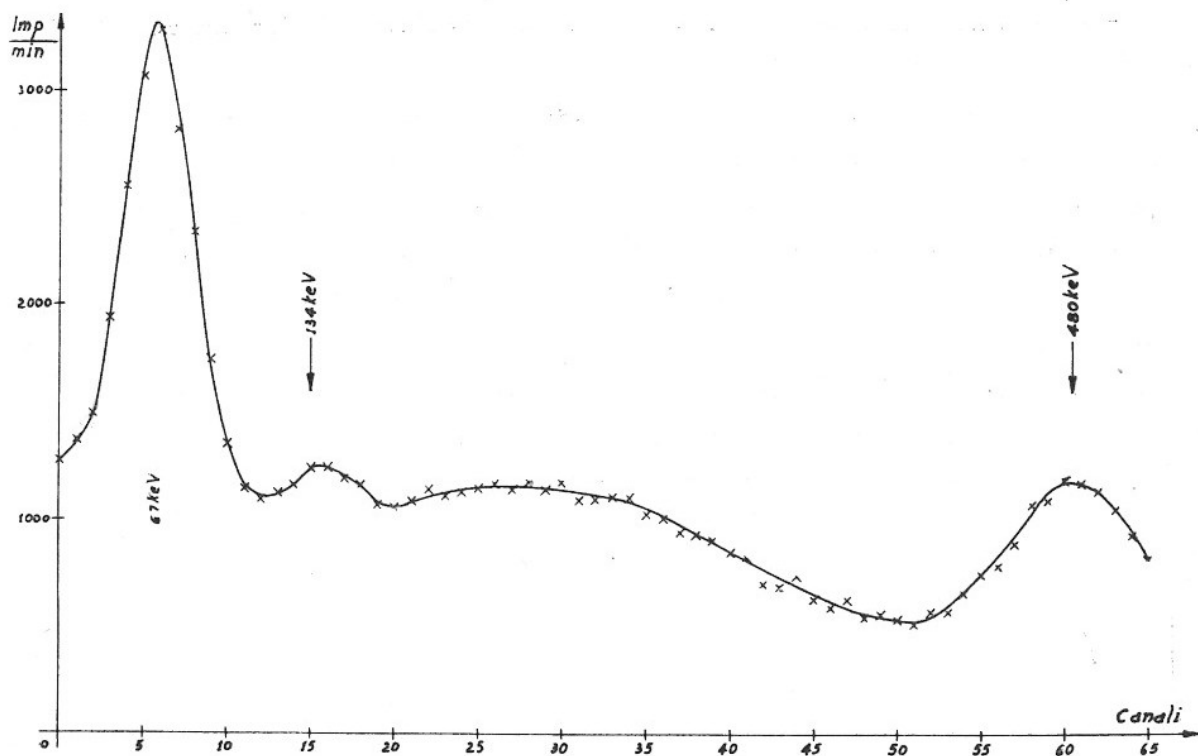


Fig. 9. - Spettro dei raggi X e γ del ^{187}Re (da W irradiato).

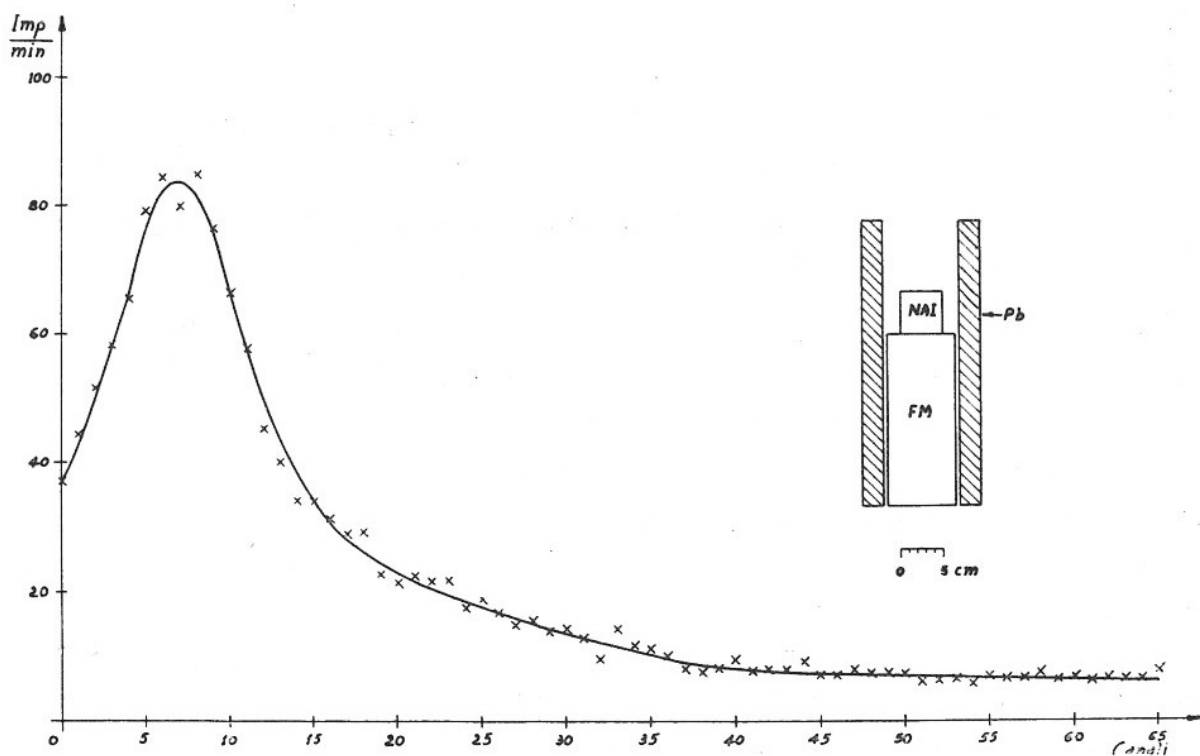


Fig. 10. - Spettro dei raggi cosmici all'aperto, attorno alla verticale.

tutto se una frazione sensibile degli impulsi registrati fosse da attribuirsi a elettroni.

Abbiamo fatto a questo scopo una seconda serie di misure, filtrando la radiazione ultra-molle giungente sul cristallo con 1 cm di paraffina. Lo spessore è stato scelto in modo da non attenuare sensibilmente i raggi gamma anche di energia molto bassa e da sottrarre invece agli elettroni incidenti non meno di 1,5 MeV (circa). Si era precedentemente verificato che il numero di impulsi al minuto per canale al di sopra di 1,5 MeV era trascurabile in confronto al corrispondente numero, attorno a 100 KeV. Lo spettro ottenuto è mostrato nella figura 11, assieme alle condizioni geometriche in cui è stata eseguita la misura.

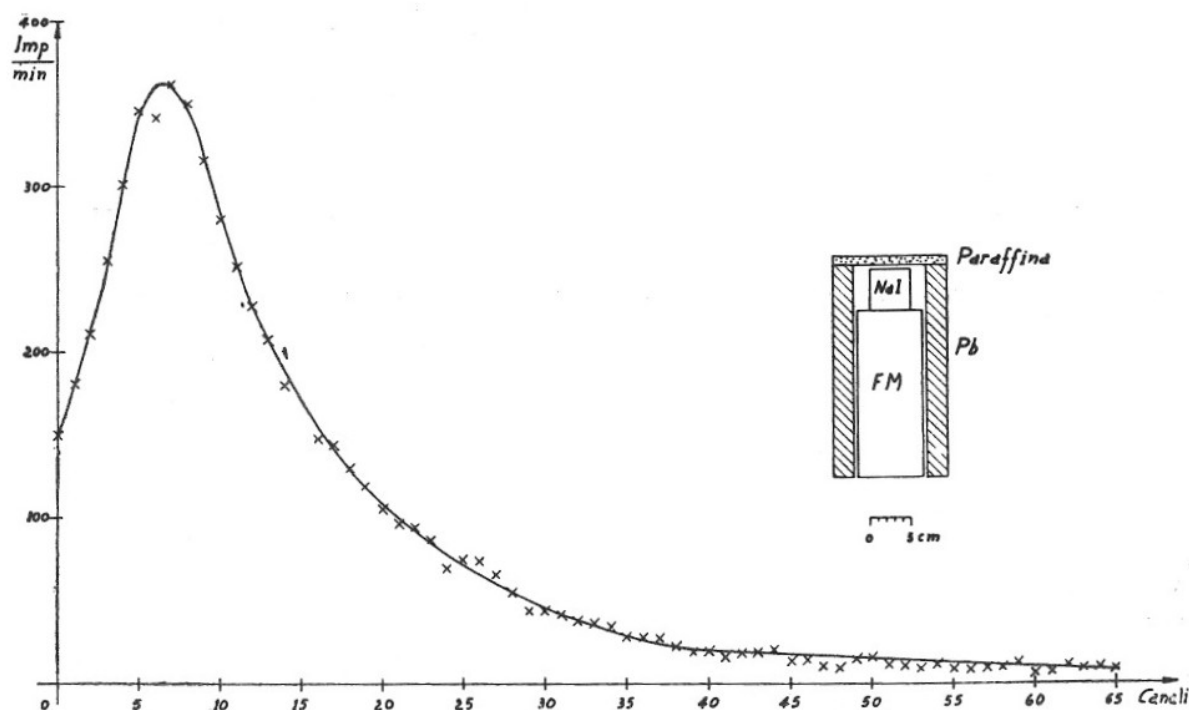


Fig. 11. - Spettro dei raggi cosmici all'aperto sotto 1 cm di paraffina.

Per quanto le intensità assolute delle due curve della figura 10 e della figura 11 non siano direttamente confrontabili data la sostanziale differenza nelle condizioni geometriche, risulta evidente che il massimo sugli 80 keV non è spostato verso le basse energie: esso è quindi sostanzialmente dovuto a raggi gamma.

Analoghe misure, senza e con 1 cm di paraffina come filtro sono state poi eseguite all'interno del laboratorio, sotto circa 100 gr cm^{-2} . I risultati sono mostrati nelle figure 12 e 13. Qui la misura senza paraffina è stata eseguita prima col cristallo completamente scoperto e poi col cristallo schermato da 4 mm di piombo. Nella misura del fondo, il picchetto a 75 keV sembra doversi attribuire alla radiazione di fluorescenza del piombo

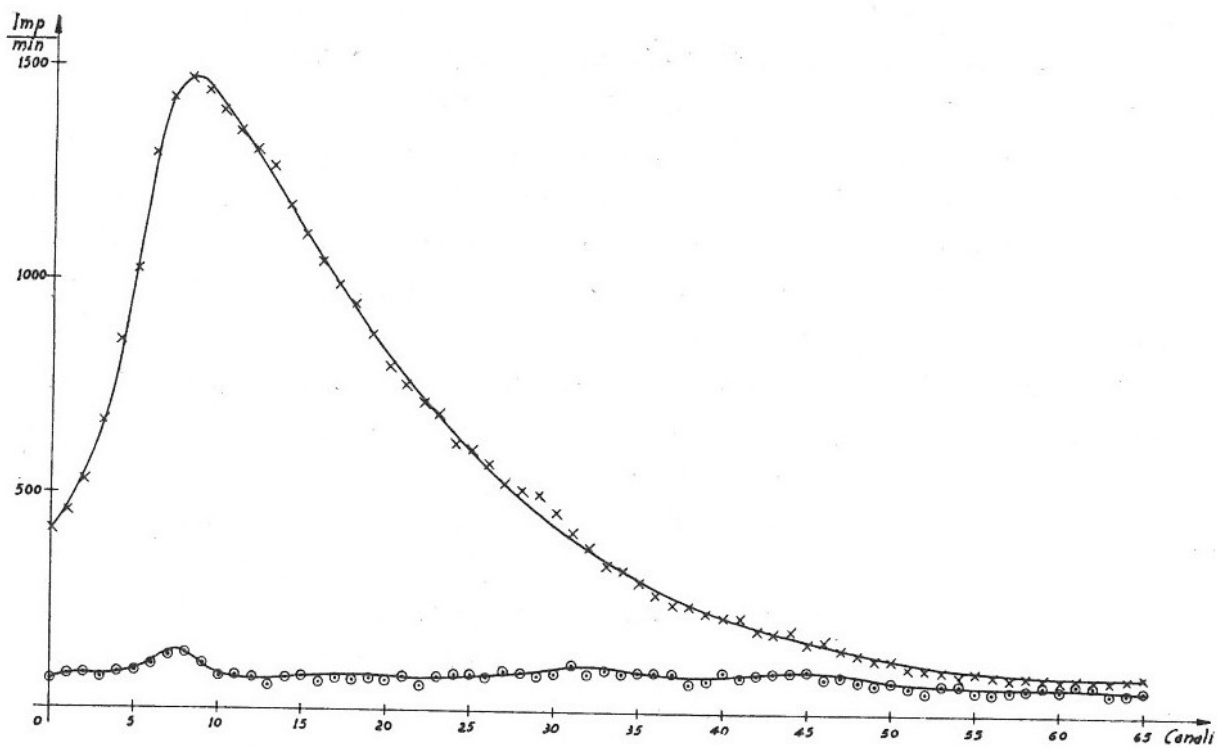


Fig. 12. - Spettro dei secondari dei raggi cosmici, sotto 100 g cm^{-2} e fondo con 4 mm di piombo.

($K\alpha$), emessa a seguito di ionizzazioni ed effetti fotoelettrici nel livello K provocati dalla radiazione cosmica.

La misura con paraffina è eseguita nelle stesse condizioni geometriche della corrispondente misura eseguita all'esterno (figura 11). L'in-

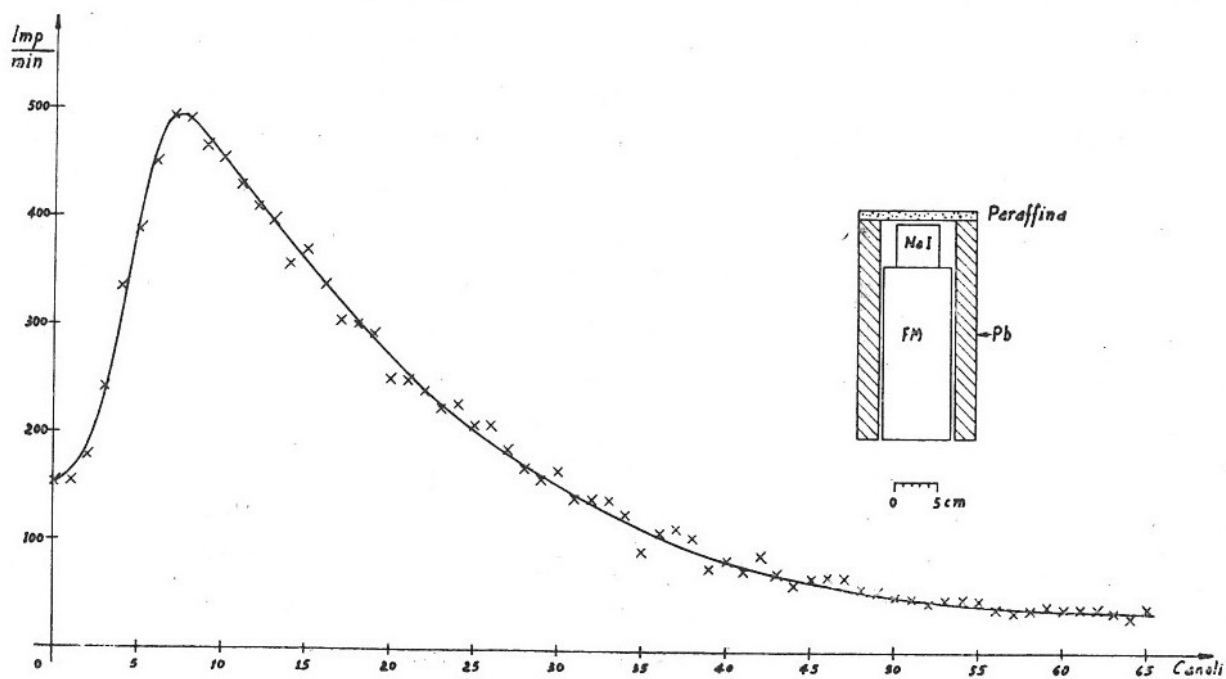


Fig. 13. - Spettro dei secondari dei raggi cosmici sotto 100 g cm^{-2} , filtrati da 1 cm di paraffina.

tensità sul massimo risulta del 30% circa superiore che all'aperto: ciò non è per altro di per sé molto significativo, dipendendo dalla composizione e struttura dello strato di materiale in cui si generano i secondari. La presenza dell'assorbitore di paraffina non determina neppure in questo caso uno spostamento del massimo, confermando che la banda di impulsi tra 50 e 200 keV è sostanzialmente da attribuirsi a raggi gamma.

La misura eseguita all'esterno attorno alla verticale si presta ad una valutazione grossolana del numero totale di raggi gamma nella banda. Essendo in questo campo di energie il rendimento del cristallo assai prossimo ad 1, si può ammettere che ciascun quanto incidente dia luogo ad un impulso, anche se esso non lascia effettivamente tutta la sua energia nel cristallo. Detraendo un fondo (dovuto parte ad elettroni e parte a gamma di energia molto maggiore) pari all'intensità media tra 40 e 60 canali, si ottiene un flusso di circa 2000 quanti/min. steradiante attorno alla verticale tra 30 e 340 KeV, su un'area di quasi 20 cm². L'intensità sarebbe quindi attorno alla verticale di circa 100 quanti/min. cm² steradiante. Una valutazione dell'intensità, migliore di questa che rappresenta ovviamente soltanto un ordine di grandezza, sarà oggetto di un successivo lavoro.

Accettando per il momento il dato ora stabilito, ed attribuendo ad ogni quanto un'energia pari ad un valore medio attorno ai 100 keV, si ottiene un flusso di energia di 10 MeV/min. cm² steradiante. Questo dato è da confrontare con il flusso totale di energia che giunge sulla superficie della terra da tutte le direzioni e che è approssimativamente di 6000 MeV/min cm² (⁹). Ammettendo che la radiazione ultra-molle sia sostanzialmente isotropa, ciò equivale all'1% circa dell'energia totale.

Un problema assai più difficile è quello di risalire dalla distribuzione in ampiezza degli impulsi allo spettro energetico della radiazione incidente. Ciò è dovuto al fatto, ben noto e già citato, che non sempre i quanti incidenti lasciano tutta la loro energia nel cristallo, di modo che in ciascun canale sono presenti sia impulsi dovuti a quanti gamma di energia pari a quella del canale, sia impulsi dovuti a quanti gamma di energia superiore. Le difficoltà dell'analisi dipendono essenzialmente, nel nostro caso, dal fatto che si ha a che fare con uno spettro continuo. E' tuttavia presumibile che lo spettro energetico dei gamma incidenti non differisca molto dallo spettro osservato, e questo per le ragioni seguenti.

In primo luogo, nel campo di energia che a noi interessa, il cristallo di NaI da 5 cm ha praticamente rendimento uno. La frazione del numero di quanti incidenti assorbita per effetto fotoelettrico è sempre superiore al 50% e nel caso di interazione Compton è assai elevata la probabilità del riassorbimento fotoelettrico del quanto diffuso. Ne segue

che i quanti gamma incidenti di energia compresa nella banda considerata ($\sim 30 \div 350$ keV) hanno elevata probabilità di lasciare tutta la loro energia nel cristallo e di esser quindi contenuti nel canale corrispondente.

In secondo luogo, i quanti gamma incidenti di energia decisamente superiore alla banda possono effettivamente esser contati come appartenenti a canali della banda se danno luogo nel cristallo ad un effetto Compton sotto un angolo opportuno, seguito da fuga del quanto diffuso. Questi effetti Compton sono, però, come è ben noto, almeno in prima approssimazione equiprobabili per tutti i possibili valori dell'energia dell'elettrone di rinculo. Ne segue che questi quanti gamma di energia più elevata debbono dar luogo, nella banda energetica che a noi interessa, sostanzialmente ad un fondo uniforme. E' ciò, d'altra parte, che appunto si osserva, facendo lo spettro del fondo col cristallo schermato da 4 mm di Pb (figura 12). Questa osservazione giustifica la detrazione, fatta sopra, di un fondo uniforme, per il calcolo approssimativo della intensità.

Per ciò che concerne infine gli elettroni eventualmente presenti, essi sono certamente, come abbiamo visto, assai pochi e la loro distribuzione non può non essere uniforme nella zona che ci interessa, dato che un assorbitore di 1 cm di paraffina non altera sensibilmente l'andamento dello spettro. E' quindi da ritenere che la detrazione di un fondo uniforme sia sufficiente ad eliminare, oltre ai gamma di più elevata energia, anche gli elettroni incidenti di energia compresa nella nostra banda.

Riteniamo tuttavia che questo problema, delle correzioni da apportare allo spettro d'ampiezza degli impulsi per tener conto delle interazioni con solo parziale cessione di energia, vada ulteriormente approfondito, il che ci ripromettiamo di fare in un prossimo lavoro. Una riprova che queste correzioni siano piccole è per altro il fatto che l'andamento dello spettro d'impulsi si mantiene sostanzialmente lo stesso, quando al cristallo da 5 cm si sostituisca quello da 1,27 cm, col quale ultimo le interazioni con cessione solo parziale di energia sono evidentemente assai più probabili.

4. - MISURE DI ASSORBIMENTO

Per quanto le misure precedenti fossero già sufficienti per concludere che la intensa banda di secondari tra 50 e 200 keV sia sostanzialmente costituita da raggi gamma, abbiamo voluto ottenere del fatto una ulteriore conferma mediante misure di assorbimento. Dato che la radiazione incidente non ha marcate proprietà direzionali, ma è sostanzialmente isotropa, abbiamo ritenuto non opportuna una misura del coefficiente di

assorbimento, canale per canale, in una qualsiasi sostanza. Ciò perchè le misure avrebbero richiesto, per tener conto della cattiva geometria, correzioni tali da rendere assai incerto e poco significativo il risultato. E' inoltre presumibile che negli assorbitori la radiazione cosmica incidente generi dei secondari (della specie proprio da noi studiata) con un ritmo difficilmente calcolabile a questo punto della nostra ricerca, e di conseguenza il coefficiente di assorbimento apparente misurato non sarebbe stato in pratica confrontabile coi dati noti in nostro possesso.

Abbiamo però osservato che il limite K di assorbimento del piombo (87,4 keV) cade proprio in prossimità del massimo della nostra banda.

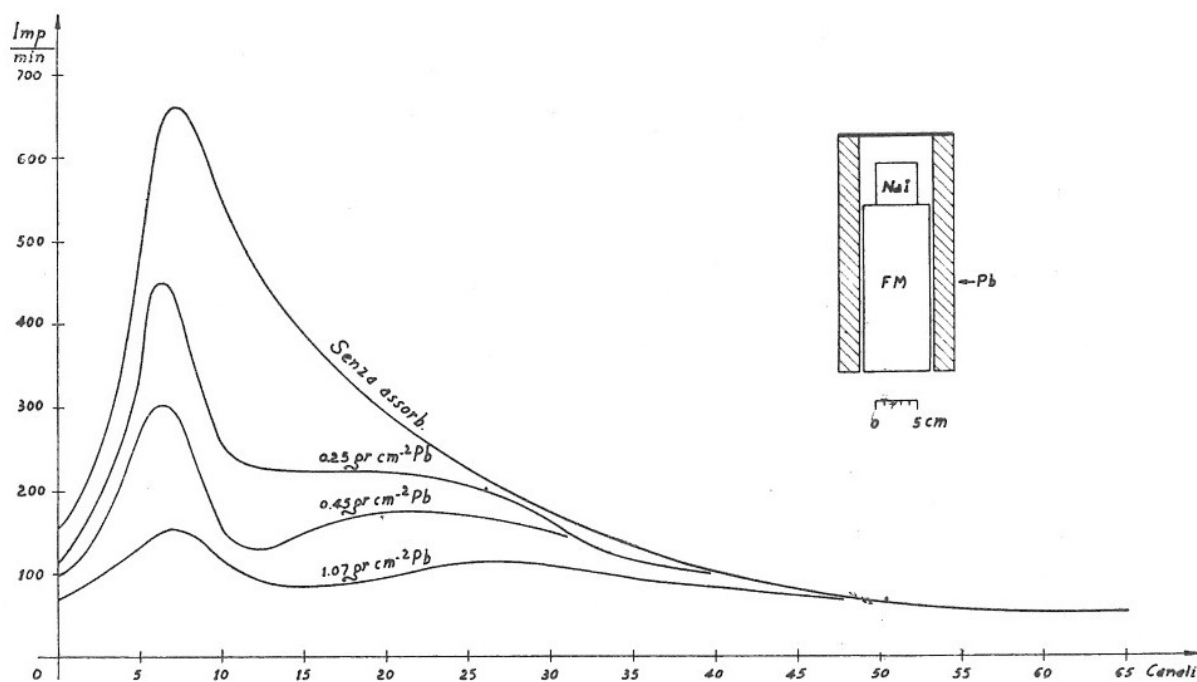


Fig. 14. - Curva di assorbimento in piombo dei secondari dei raggi cosmici sotto 100 g cm^{-2} .

Questo fatto ci offriva la possibilità di confermare che la radiazione ultramolle è sostanzialmente costituita da raggi gamma, mettendo in evidenza una netta differenza tra i coefficienti di assorbimento del piombo, a destra e a sinistra del massimo della banda.

Le misure sono state eseguite nelle condizioni geometriche indicate nella figura 14. Si sono fatti 4 spettri, variando lo spessore di piombo usato come assorbitore, al di sopra del cristallo. Gli spessori usati sono: 0 - 0,25 - 0,43 - 1,07 gr cm^{-2} . Nella figura sono riportati gli andamenti dei 4 spettri e non i punti sperimentali per evitare confusione nella zona di più alta energia, dove le curve vengono praticamente a coincidere. Detratto il fondo con il criterio indicato nel paragrafo precedente, si è determinato canale per canale il coefficiente di assorbimento apparente. Tale

valore è riportato (curva a tratto continuo) nella figura 15, che mostra anche per confronto l'andamento effettivo del coefficiente di assorbimento del piombo in questa zona secondo i dati di COMPTON e ALLISON (¹⁰). Se si tiene conto del potere risolutivo, assai limitato, di uno spettrometro a scintillazione, si vede che la curva teorica tratteggiata deve dar luogo ad un andamento sperimentale esattamente del tipo di quello da noi ottenuto. La discontinuità al limite K si traduce in un punto di flesso della porzione ascendente della curva. Invece (come del resto si era previsto)

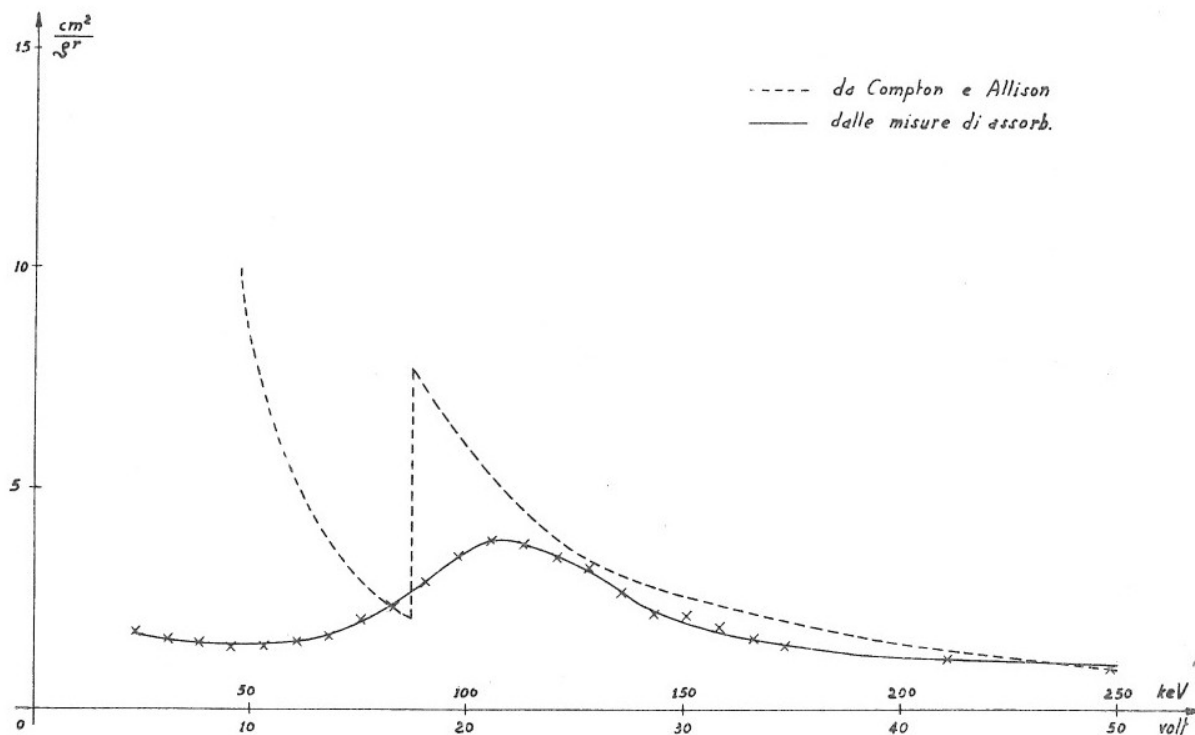


Fig. 15. Coefficiente di assorbimento del piombo.

i valori assoluti sperimentali risultano molto diversi dal vero, soprattutto nella zona di bassa energia, attorno ai 50 keV. Ciò è dovuto senza dubbio in parte a non corretta detrazione del fondo in questa zona e in parte probabilmente a generazione di secondari negli assorbitori stessi.

Come controllo del metodo si sono eseguite nelle condizioni geometriche indicate nella figura 16, delle misure di assorbimento in piombo dei raggi X caratteristici emessi da un preparato di nitrato di uranile, aventi energia assai prossima al massimo della nostra banda di secondari cosmici. Un assorbitore fisso di alluminio eliminava gli elettroni emessi dal preparato. Si sono usati gli stessi spessori di piombo delle misure precedenti. La costante dello spettrometro era in queste misure 4,95 keV/can. e la soglia 2,5 canali.

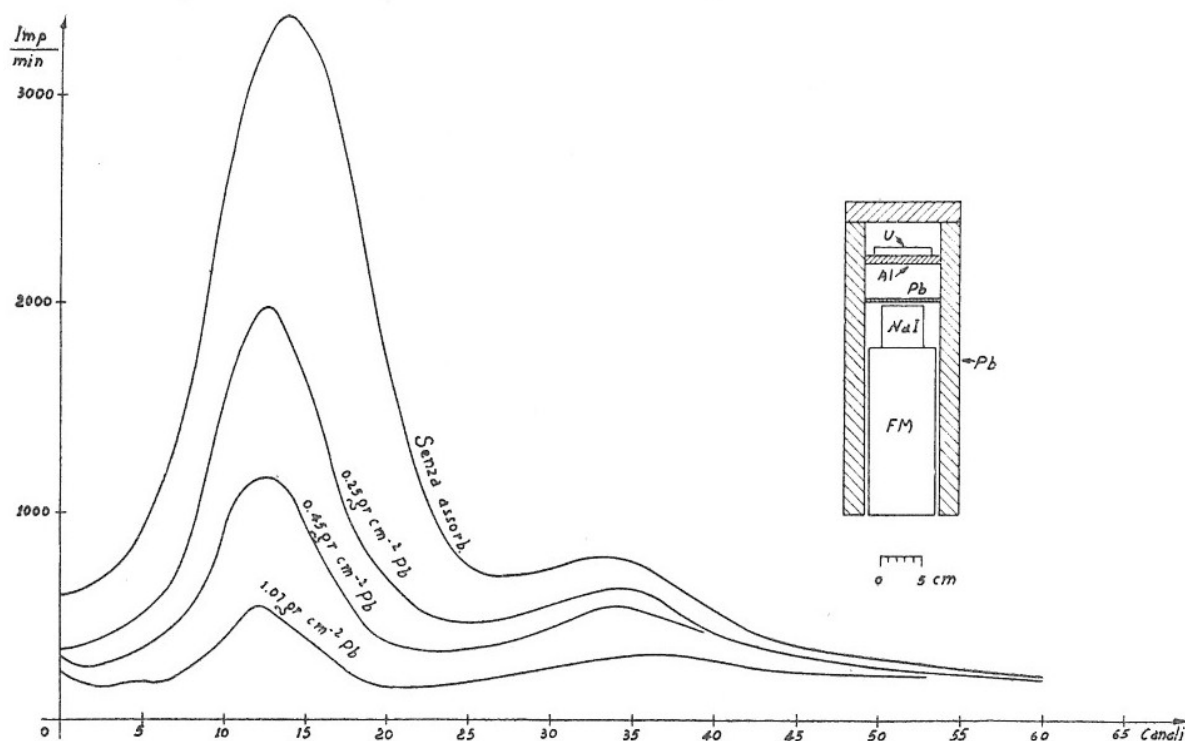


Fig. 16. - Curva di assorbimento in piombo dei raggi X di Uranio.

Come risulta dalla figura 16, ove son riportati i quattro spettri ottenuti, l'andamento del coefficiente di assorbimento apparente per raggi gamma di questa energia è proprio quello già trovato nel caso dei secondari dei raggi cosmici. Ne esce quindi confermata la conclusione che questi ultimi siano sostanzialmente raggi gamma, per la maggior parte di energia assai prossima ai 90 keV.

5 - DISCUSSIONE DEI RISULTATI.

Non è possibile istituire un confronto diretto fra le nostre misure e quelle di BERNARDINI e FERRETTI citate nel paragrafo 4, data la diversità delle tecniche e delle condizioni sperimentali adottate. E' tuttavia da osservare che è possibile stabilire un accordo tra i risultati di questi Autori e i nostri, quando si tenga conto dei fatti seguenti.

In primo luogo, il telescopio di contatori di BERNARDINI e FERRETTI eliminava certamente buona parte della radiazione di più bassa energia. E' quindi naturale che essi trovassero una energia media alquanto maggiore della nostra e un rapporto fotoni-elettroni di circa 10 e quindi sensibilmente inferiore al nostro.

In secondo luogo, è da osservare che essi hanno valutato l'energia

media della componente fotonica dal coefficiente di assorbimento in piombo. Ma a ciascun valore di tale coefficiente al di sopra del minimo corrispondono sempre due possibili valori dell'energia dei raggi gamma incidenti, uno al di sopra di 3 MeV e l'altro al di sotto. Ad esempio raggi gamma nella banda 5-10 MeV hanno lo stesso coefficiente di assorbimento di raggi gamma tra 1,4 e 2 MeV circa. Le loro misure sono quindi compatibili non solo con la loro valutazione dell'energia media, ma anche con una energia media attorno a 1,5 MeV, assai più vicina ai nostri risultati.

Non è da escludere che la radiazione gamma osservata sotto terra da MIESOWICZ, JURKIEWICZ e MASSALSKI e da questi Autori valutata di energia attorno al MeV sia una radiazione secondaria, della stessa origine di quella da noi studiata. Anche in questo caso il valore dell'energia media più elevato del nostro si può spiegare con un « taglio » alle basse energie introdotto dal telescopio di contatori.

In un prossimo lavoro daremo conto delle esperienze da noi fatte allo scopo di trarre informazioni sull'origine di questi secondari di bassa energia.

Desideriamo in conclusione rivolgere un cordiale ringraziamento ai nostri collaboratori tecnici Corindo Felici, Alvaro Grisanti, Rocco Orlando per il costante, disinteressato aiuto da loro datoci nella preparazione e nella esecuzione delle varie esperienze e al sig. Pietro Bastianelli che ha eseguito per noi molte lunghe serie di misure.

Roma — Istituto Superiore di Sanità - Laboratorio di Fisica.

BIBLIOGRAFIA

- (¹) SCHÖNBERG M. - Ric. Scient., 9 (2): 459 (1938).
- (²) BERNARDINI G. e FERRETTI B. - Ibid., 10 (1): 39 (1939).
- (³) — N. Cimento, 7: 173 (1939).
- (⁴) AUGER P. - Huitième Conseil de l'Institut International de Physique, Solvay, 1948.
- (⁵) BARNØTHY J. e FORRÒ M. - Phys. Rev., 74: 1300 (1948).
- (⁶) — Ibid., 55: 870 (1939).
- (⁷) MIESOWICZ M., JURKIEWICZ L. e MASSALSKI J. M. - Ibid., 77: 380 (1950).
- (⁸) AGENO M., CORTELLESA G. e QUERZOLI R. - Rend. Ist. Sup. Sanità, 18: 344 (1955).
- (⁹) JANOSSY L. - Cosmic Rays, 305 (Oxford, 1948).
- (¹⁰) COMPTON A. H. e ALLISON S. K. - X-rays in Theory and Experiment, Appendix IX (New York, 1948).