

PUBBLICAZIONI
DELL' ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA
DEL CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
diretto dal prof. ANTONINO LO SURDO Accademico d'Italia

N. 91

B. N. CACCIAPUOTI - O. PICCIONI

Sull' assorbimento della componente
elettronica della radiazione cosmica

BOLOGNA
NICOLA ZANICHELLI EDITORE
1943-XXI

ESTRATTO DA » IL NUOVO CIMENTO »
Serie nona - Vol. I - N. 1 - Febbraio 1943 - XXI ▲

Sull'assorbimento della componente elettronica della radiazione cosmica (*)

B. N. CACCIAPUOTI e O. PICCIONI

Istituto Nazionale di Geofisica del C.N.R., diretto dal Prof. A. LO SURDO

(ricevuto il 20 ottobre 1942-XXI)

Riassunto. — Gli Autori hanno effettuato delle accurate curve di assorbimento della radiazione cosmica a 3500 m sul livello del mare con degli strati di piombo e di alluminio. Le curve sperimentali così ottenute vengono confrontate, detratta la parte dovuta alla componente penetrante, con le curve teoriche calcolate da ARLEY per l'assorbimento della componente elettronica. Tale confronto sembra indicare che nei calcoli di ARLEY sia stato sottovalutato il contributo dovuto agli elettroni di bassa energia. Inoltre dall'esame delle curve ottenute a 3500 m e di quelle ottenute in modo analogo al livello del mare si è portati a pensare che lo spettro della radiazione elettronica cambi nel passare da 0 a 3500 metri.

È noto che la componente elettronica dei raggi cosmici, formata da elettroni e positroni, costituisce, unitamente ai fotoni che l'accompagnano, la parte meno penetrante della radiazione cosmica che si suole designare col nome di *componente molle*, per distinguerla da quella parte assai più penetrante, detta *componente dura*, che è formata invece dai *mesoni*. I vari fenomeni connessi con l'esistenza della componente molle sono descritti dalla teoria degli sciami in cascata di BHABHA-HEITLER ⁽¹⁾ e CARLSON-OPPENHEIMER ⁽²⁾. Questa teoria interpreta in maniera brillante, almeno dal punto di vista qualitativo, il comportamento della componente molle quale essa si manifesta attraverso le varie esperienze.

ARLEY ⁽³⁾ nel 1938 ha cercato di estendere i calcoli della teoria degli sciami e di svilupparla più a fondo in maniera da potere effettuare un confronto tra teoria ed esperienza che fosse più quantitativo di quello consentito dai calcoli di BHABHA-HEITLER. Mentre nei calcoli di BHABHA-HEITLER vengono presi in considerazione solamente quegli elettroni e positroni che

(*) Comunicazione fatta alla XLI Riunione della S.I.P.S. e alla XXXII Riunione S.I.F. a Roma il 30 settembre 1942-XX.

⁽¹⁾ H. J. BHABHA e W. HEITLER — «Proc. Roy. Soc.», A **159**, 432 (1937).

⁽²⁾ J. F. CARLSON e J. K. OPPENHEIMER — «Phys. Rev.», **51**, 220 (1937).

⁽³⁾ N. ARLEY — «Proc. Roy. Soc.», A **168**, 519 (1938).

in uno sciame hanno un'energia superiore ad una certa energia critica E_c di cui parleremo nel seguito, in quelli di ARLEY invece viene valutato anche il numero di elettroni con energia minore di E_c . Inoltre ARLEY calcola le probabilità medie di trovare una, due o più particelle in uno sciame, il che costituisce quanto viene misurato sperimentalmente nelle curve di assorbimento e nelle curve di transizione della radiazione elettronica.

Senza entrare nei particolari del calcolo di ARLEY diciamo solo che in esso si trascura l'effetto COMPTON e si suppone che al disopra di quella energia critica E_c , che entra in giuoco nel calcolo di BHABHA-HEITLER, gli elettroni possano perdere la loro energia solamente per irraggiamento, mentre al disotto di E_c le perdite di energia avvengano per sola ionizzazione. L'energia critica E_c è definita come quella per cui la perdita di energia per irraggiamento è uguale a quella per ionizzazione. BETHE e HEITLER (4) hanno dato per E_c l'espressione approssimata

$$E_c = \frac{1600 mc^2}{Z},$$

dove mc^2 è l'energia di riposo dell'elettrone e Z il numero atomico della sostanza attraversata dagli elettroni. Per lo spettro energetico degli elettroni e positroni ARLEY assume la forma seguente: per energie E maggiori di un certo valore E_0 lo spettro energetico è quello calcolato da HEITLER (5) in base alla curva di assorbimento della radiazione cosmica nell'atmosfera, cioè è dato da

$$F(E) dE = \frac{dE}{E^{\gamma+1}},$$

essendo γ una costante. Tale spettro è in accordo con lo spettro sperimentale di BLACKETT (6) per energie E superiori a $E_0 = 2 \cdot 10^8$ eV. Per energie $E < E_0$ ARLEY suppone invece che lo spettro sia rappresentato da una costante; si può vedere infatti che questa semplificazione non altera molto i risultati. La forma dello spettro assunta da ARLEY è dunque quella indicata schematicamente nella fig. 1.

In questa ipotesi ARLEY calcola la probabilità media (cioè rispetto a tutte le energie elettroniche dello spettro) di trovare N elettroni sotto uno strato di spessore l , probabilità che indichiamo con $\bar{P}(N, l)$. Si può vedere che l'espressione trovata per tale probabilità non dipende in maniera sensibile nè dal valore di γ , che ARLEY assume eguale a $3/2$, nè dal rapporto α tra il valore costante F_1 dello spettro per $E < E_0$ e il valore $F(E_0)$ dello spettro per $E = E_0$.

(4) H. A. BETHE e W. HEITLER - « Proc. Roy. Soc. », A **146**, 83 (1934).

(5) W. HEITLER - « Proc. Roy. Soc. », A **161**, 261 (1937).

(6) P. M. S. BLACKETT - « Proc. Roy. Soc. », A. **165**, 11 (1938).

La conoscenza delle probabilità medie $\bar{P}(N, l)$ permette di svolgere una teoria quantitativa di gran parte delle principali esperienze che si possono effettuare sulla componente elettronica della radiazione cosmica. Tuttavia nella discussione di tali esperienze è necessario tener conto del fatto che in realtà i fenomeni ad esse inerenti non sono unidimensionali, come è supposto nella teoria degli sciami, e si devono quindi prendere in considerazione i diversi fattori geometrici. Per esempio le curve di transizione sono determinate, oltrechè dalle differenti probabilità $\bar{P}(N, l)$ che N particelle emergano dallo strato assorbente, anche dalle probabilità, dipendenti dai fattori geometrici, che queste N particelle diano luogo ad una coincidenza; tali fattori dipendono dalle aperture angolari, dalla disposizione del materiale assorbente, dalla sensibilità dei contatori, ecc., e la loro valutazione risulta generalmente difficile e spesso impossibile.

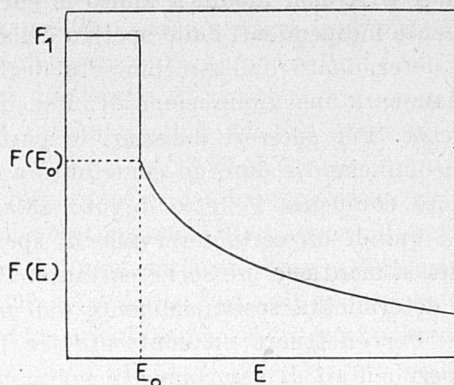


Fig. 1.

Inoltre bisogna tenere conto del fatto che in generale le esperienze risentono non solo dell'effetto dovuto agli sciami generati da elettroni e positroni ma anche dell'effetto di quelli generati dai quanti γ e dalla componente dura; il contributo dovuto a queste due ultime cause si può valutare con opportuni accorgimenti, ma sempre in modo alquanto grossolano. Del resto l'effetto della componente fotonica nelle esperienze in coincidenze è stato studiato teoricamente in un lavoro di ARLEY e ERIKSEN (7) con lo stesso procedimento seguito da ARLEY per lo studio della sola componente elettronica.

Discussione della curva di assorbimento.

In base ai calcoli di ARLEY per la probabilità $\bar{P}(N, l)$ di trovare uno sciame di N particelle sotto uno strato di spessore l si può calcolare come varia il numero di particelle singole al variare dello spessore dello strato assorbente. Dal punto di vista sperimentale ciò corrisponde ad effettuare una curva di assorbimento della radiazione elettronica, cioè per esempio nel collocare degli strati materiali di spessori via via crescenti fra due dei contatori di un telescopio verticale di due, tre, o più contatori. La curva che così si ottiene rappresenta infatti la probabilità media $\bar{P}(\geq 1) = \sum_1^{\infty} \bar{P}(N, l) = 1 - \bar{P}(0, l)$ di trovare almeno una particella al disotto dello strato quando

(7) N. ARLEY e B. ERIKSEN - « Danske Vid. Selsk. Meddel. », 17, 11 (1940).

una particella incide sulla faccia superiore di questo. Nella fig. 3 sono riportate le curve teoriche di ARLEY per $\bar{P}(\geq 1)$ nel caso del piombo e dell'alluminio, calcolate per $\alpha = 10$ e $\alpha = 1$. Una variazione di α da 10 a ∞ non altera apprezzabilmente le curve e si vede anche che una variazione di α da 1 a 10 non modifica molto le curve, di modo che esse risultano praticamente indipendenti dallo spettro della componente molle. L'inizio delle curve è determinato dall'assorbimento degli elettroni primari e quindi si ha inizialmente una diminuzione di intensità con l'aumentare dello spessore assorbente. Per spessori maggiori le particelle secondarie generate nello strato incominciano a dare un contributo apprezzabile all'intensità e questo contributo compensa l'effetto dovuto all'assorbimento degli elettroni primari; si ha quindi un certo intervallo di spessore assorbente entro il quale l'intensità si mantiene pressochè costante. Per grandi spessori la forma della curva è determinata sostanzialmente dall'assorbimento delle particelle secondarie.

Per effettuare un confronto tra le curve teoriche di ARLEY e le curve sperimentali di assorbimento della radiazione elettronica, abbiamo eseguito

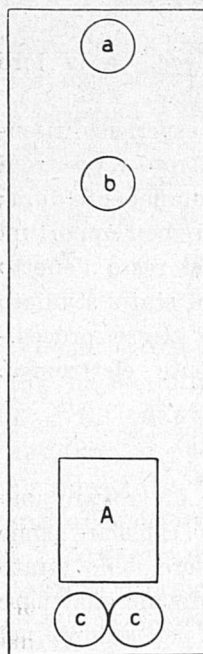


Fig. 2.

alcune misure a Pian Rosà (m 3500 sul livello del mare). Le misure di intensità della componente elettronica effettuate ad una tale altezza offrono il vantaggio di potere essere compiute in un tempo relativamente breve, dato che questa intensità è abbastanza rilevante a 3500 m. Ciò costituisce un fattore importante per l'attendibilità delle misure; si pensi ad esempio che le variazioni meteorologiche producono un effetto notevole sulla intensità della radiazione cosmica. D'altra parte non c'è da aspettarsi una sensibile variazione dello spettro della radiazione elettronica nel passare dal livello del mare a 3500 m, come si può vedere per esempio in base ai calcoli di NORDHEIM⁽⁸⁾, e per di più si vede in base ai calcoli di ARLEY che le curve di assorbimento dipendono poco dalla forma dello spettro.

Il dispositivo sperimentale era costituito da 4 contatori formanti un telescopio verticale com'è indicato nella fig. 2. I contatori avevano una lunghezza utile di 40 cm, un diametro di 4 cm, ed erano costituiti da tubi di ottone dello spessore di 1 mm. La distanza tra il contatore superiore e la coppia inferiore del telescopio era di 45 cm. Venivano misurate le coincidenze triple dovute ad impulsi simultanei nel contatore superiore *a*), in quello intermedio *b*) e nella coppia inferiore *c*) di contatori in parallelo. Tali coincidenze triple erano necessariamente dovute o ad una particella ionizzante attra-

⁽⁸⁾ L. W. NORDHEIM - « Phys. Rev. », 51, 1110 (1937).

versante *a*), *b*) e *c*), oppure ad una particella ionizzante attraversante *c*) e generata nell'assorbitore *A* da una particella ionizzante attraversante i contatori *a*) e *b*). Si noti che se gli strati di materia assorbente vengono collocati invece al disopra del telescopio si ottiene una curva di assorbimento alquanto differente, dato che ad essa contribuiscono anche quegli elettroni e positroni che vengono generati nell'assorbitore dai quanti γ incidenti. La forma teorica di questa curva è stata determinata da ARLEY e ERIKSEN (⁷).

Sono state effettuate in tal maniera due curve di assorbimento: una in piombo, variando gli strati di 4 in 4 millimetri fino ad uno spessore di 190 mm, ed una in alluminio variando gli strati di 2 in 2 cm fino ad uno spessore di 28 cm. Queste curve rappresentano evidentemente come varia l'intensità *totale* della radiazione ionizzante in funzione dello spessore di materiale assorbente; è necessario togliere da questa intensità totale l'intensità della componente mesotronica se si vuole ottenere la curva di assorbimento della sola componente elettronica. Per fare ciò abbiamo effettuato la sottrazione della componente penetrante in base ai risultati di un'esperienza molto accurata eseguita pure a Pian Rosà da BERNARDINI e CACCIAPUOTI (⁸), con un dispositivo sperimentale che non differiva molto dal presente per quanto riguarda le aperture angolari, e con gli stessi contatori.

I dati sperimentali relativi alle misure dell'intensità totale sono riportati nella tabella 1, coi rispettivi errori statistici, unitamente ai dati ottenuti a Roma e di cui parleremo nel seguito.

La curva sperimentale rappresentante l'intensità totale in funzione dello spessore assorbente di piombo è riportata nella fig. 4. Le curve che rappresentano invece la sola componente elettronica sono riportate nella fig. 3; in ordinate sono segnate le intensità ed in ascisse i corrispondenti spessori *l* di materiale assorbente misurati in unità di BHABHA-HEITLER. Ricordiamo che tale unità è, secondo i dati di ARLEY, di 0,36 cm per il piombo e di 6,72 cm per l'alluminio. Le intensità sono state moltiplicate per un opportuno fattore in maniera da fare corrispondere, per $l = 0$, i punti iniziali delle curve sperimentali e di quelle teoriche. Nel tracciare queste curve si è pure effettuata una correzione per gli sciami il cui contributo è stato determinato tracciando le curve di assorbimento ottenute tenendo uno dei contatori fuori dell'angolo solido determinato dagli altri.

Cominciamo con l'esaminare la curva di assorbimenti in piombo. Il confronto con la curva teorica mostra che vi è una certa analogia nella forma delle due curve per quanto non vi sia un accordo quantitativo. Mentre la curva di ARLEY presenta un certo « *pianerottolo* » nell'intervallo compreso tra $l = 2$ e $l = 3$, la curva sperimentale ha il *pianerottolo* compreso fra $l = 5$ e $l = 6$.

Nella curva sperimentale si osserva inoltre una caduta iniziale molto più

(⁸) G. BERNARDINI e B. N. CACCIAPUOTI - « Ric. scient. », 12, 981 (1941).

TABELLA I.

	mm Pb	0	4	8	12	16	20	24	28	32	40	56	72	100	114	190
	COINCIDENZE AL MINUTO	PIAN ROSÀ .	37,92 ±0,37	33,91 ±0,36	30,95 ±0,28	29,7 ±0,27	28 ±0,23	27,86 ±0,24	27,42 ±0,24	26,33 ±0,27	25,86 ±0,23	25 ±0,24	23,47 ±0,24	22,34 ±0,23	20,65 ±0,21	—
ROMA		11,46 ±0,11	10,82 ±0,11	10,42 ±0,098	10,29 ±0,097	10,27 ±0,098	10,06 ±0,093	9,9 ±0,095	9,82 ±0,094	9,76 ±0,095	9,62 ±0,095	9,35 ±0,09	9,15 ±0,09	—	8,73 ±0,09	—
	em Al	0	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28				
	PIAN ROSÀ .	37,8 ±0,4	35,23 ±0,38	32,8 ±0,35	31,28 ±0,32	30,32 ±0,32	29,32 ±0,33	28,46 ±0,31	27,33 ±0,33	26,3 ±0,3	25,57 ±0,3	24,75 ±0,3				

notevole di quella presentata dalla curva teorica; questo fatto sembra confermare quanto ci era stato detto da B. FERRETTI e cioè che nel calcolo svolto da ARLEY sono stati sottovalutati gli elettroni di bassa energia.

Il fatto che il pianerottolo sperimentale della curva si trovi spostato verso gli spessori maggiori, rispetto a quello teorico, sembra poi indicare

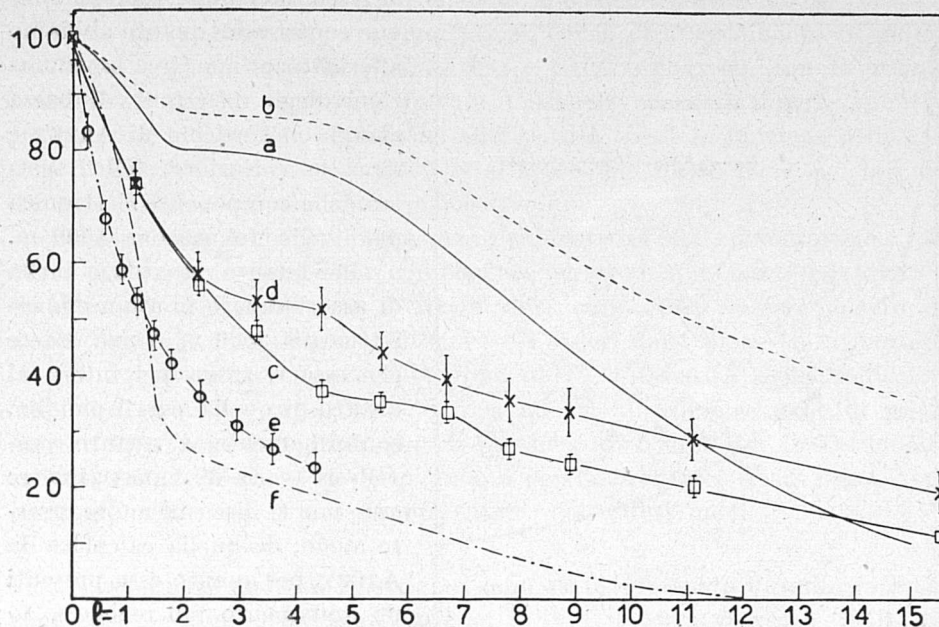


Fig. 3. - Curve di assorbimento della radiazione elettronica in piombo e alluminio a) e b) curve teoriche secondo ARLEY per Pb, calcolate rispettivamente con $\alpha = 10$ e $\alpha = 1$; f) curva teorica secondo ARLEY per Al, calcolata per $\alpha = 10$; c) curva sperimentale ottenuta a Pian Rosà per Pb; d) curva sperimentale ottenuta a Roma per Pb; e) curva sperimentale ottenuta a Pian Rosà per Al. Le intensità sono state moltiplicate per opportuni fattori in maniera da avere per tutte le curve un'intensità iniziale eguale a 100.

che l'energia media degli elettroni a Pian Rosà sia maggiore di quella calcolata da ARLEY per il livello del mare; ciò induce a pensare che non soltanto la curva di assorbimento risente della forma dello spettro, contrariamente a quanto afferma ARLEY, ma che inoltre lo spettro varia effettivamente nel passare dal livello del mare a 3500 m.

Per ottenere maggiori informazioni su questo punto abbiamo ripetuto l'esperienza a Roma eseguendo con lo stesso dispositivo una curva di assorbimento in piombo (*). Tale curva è pure riportata nella fig. 3 (detratta al

(*) Vogliamo ringraziare il Prof. GILBERTO BERNARDINI per le discussioni relative a questo lavoro e la Dott. CAMILLA FESTA per l'aiuto datoci nella esecuzione delle misure di assorbimento fatte a Roma.

solito la componente dura) in maniera da fare coincidere il punto iniziale con quello delle curve precedentemente descritte. La curva effettuata a Roma mostra che il pianerottolo si manifesta in un intervallo di spessori che corrisponde in modo abbastanza soddisfacente con quello del pianerottolo teorico, pure essendo alquanto più basso di quest'ultimo. L'andamento della curva

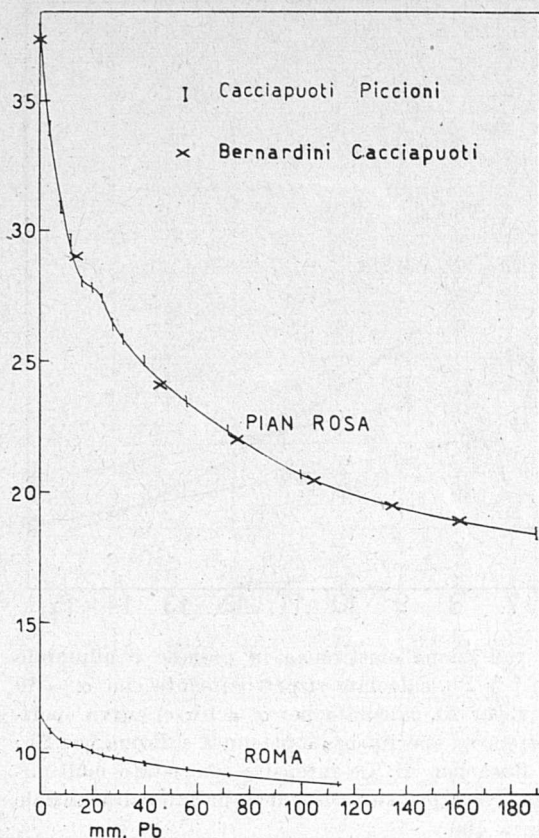


Fig. 4. - Curve di assorbimento della radiazione cosmica in Pb, ottenute a Pian Rosà e Roma.

al livello del mare sembra dunque confermare quanto abbiamo affermato prima circa la valutazione degli elettroni di bassa energia nel calcolo di ARLEY e circa la variazione dello spettro della componente elettronica dal livello del mare a 3500 m.

Per quanto riguarda la curva di assorbimento in alluminio effettuata a 3500 m si può vedere che essa si trova per intero al disotto di quella per il piombo, conformemente a quanto prevede la teoria di ARLEY; inoltre essa non si discosta molto, grosso modo, da quella calcolata da ARLEY, per quanto essa presenti un andamento più regolare.

È importante notare, come abbiamo già detto, che le curve di ARLEY sono state calcolate nell'ipotesi, implicita nella teoria della moltiplicazione in cascata, che i fenomeni in questione fossero unidimensionali; ora questo non è certo il caso nelle esperienze pratiche dove i fattori geometrici sono in generale assai diversi da quelli considerati nel caso ideale trattato da ARLEY. Se si prende in esame il dispositivo sperimentale della fig. 2 si può per esempio pensare che l'assorbitore A dia luogo a degli effetti di diffusione tendenti ad aumentare l'angolo solido determinato dai contatori $a)$, $b)$ e $c)$. Questo fatto può fare sì che le varie probabilità $\bar{P}(N, l)$ figurino nella sommatoria $\sum_1^{\infty} \bar{P}(N, l)$ con dei pesi diversi a seconda del valore di N . La forma della curva di assorbimento può allora risultare alquanto modificata e in particolare il pianerottolo può essere spostato rispetto a quello calcolato nel

al livello del mare sembra dunque confermare quanto abbiamo affermato prima circa la valutazione degli elettroni di bassa energia nel calcolo di ARLEY e circa la variazione dello spettro della componente elettronica dal livello del mare a 3500 m.

Per quanto riguarda la curva di assorbimento in alluminio effettuata a 3500 m si può vedere che essa si trova per intero al disotto di quella per il piombo, conformemente a quanto prevede la teoria di ARLEY; inoltre essa non si discosta molto, grosso modo, da quella calcolata da ARLEY, per quanto essa presenti un andamento più regolare.

È importante notare, come abbiamo già detto, che le curve di ARLEY sono state calcolate nell'ipotesi, implicita nella teoria della moltiplicazione in cascata, che i fenomeni in questione fossero unidimensionali; ora questo non è certo il caso nelle esperienze pratiche dove i fattori geometrici sono in

caso unidimensionale. Tuttavia nel caso nostro non riteniamo che gli effetti di diffusione possano avere influenzato molto l'andamento delle curve, dato che l'assorbitore A era tenuto molto vicino alla coppia inferiore di contatori c e la sua base ricopriva esattamente questi contatori. Almeno la parte iniziale delle curve di assorbimento in piombo deve risentire poco degli effetti di diffusione, dato che essa corrisponde a piccoli spessori di A .

Nella fig. 4 abbiamo pure riportata la curva di assorbimento in piombo effettuata a Pian Rosà da BERNARDINI e CACCIAPUOTI ⁽⁹⁾, con le ordinate moltiplicate per un opportuno fattore. Come si vede dalla figura i punti di BERNARDINI e CACCIAPUOTI relativi all'intensità totale in funzione dello spessore di piombo assorbente a 3500 m si accordano molto bene con la curva da noi ottenuta con il nostro dispositivo.

Notiamo infine che un'indicazione dell'esistenza del « pianerottolo » nella curva di assorbimento della componente elettronica è data dai lavori di PICCIONI ⁽¹⁰⁾ e PATANÈ ⁽¹¹⁾, al livello del mare. Nelle nostre misure si è avuto cura di controllare costantemente i valori della pressione atmosferica le cui variazioni influiscono notevolmente sull'intensità della radiazione. Abbiamo tracciato varie curve corrispondenti alle diverse serie di misure ottenute per ogni dato intervallo di pressione di 5 mm Hg. In tal modo si sono ottenute tre curve per il piombo e per l'alluminio a Pian Rosà; quelle riportate nelle figg. 3 e 4 rappresentano dei valori medi.

Le esperienze che qui riportiamo sono state effettuate durante la Spedizione per lo studio dei raggi cosmici in Val d'Aosta (inverno 1940-1941) organizzata dall'Istituto nazionale di geofisica con mezzi forniti dal Comitato per la geofisica e la meteorologia del Consiglio nazionale delle ricerche.

⁽¹⁰⁾ O. PICCIONI - « Ric. scient. », n. 5, 298 (1940).

⁽¹¹⁾ S. PATANÈ - « Ric. scient. », n. 4, 426 (1941).