

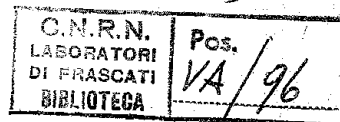
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-56/32 (1956)

G. Salvini: L'ELETTROSINCROTRONE DI FRASCATI DA 1000 MeV E
LE RICERCHE POSSIBILI CON ESSO.

Estratto dalla: Energia Nucleare, 3, 435 (1956)

VA 9



estratto da

energia nucleare
rivista bimestrale edita dal CISE
via Serbelloni, 1 - Milano
vol. 3, n. 6, 15 dicembre 1956
p. 435-449

L'elettrosincrotrone di Frascati da 1000 MeV e le ricerche possibili con esso

G. Salvini*

Dopo aver passato in rapida rassegna gli elettrosincrotroni esistenti od in costruzione di energia maggiore di 500 MeV, si descrive l'elettrosincrotrone italiano da 1000 MeV. Tale macchina permetterà di svolgere un interessante programma di ricerche sperimentali. Si esaminano in particolare alcune direzioni possibili di ricerca. Le ricerche sui mesoni pesanti e sugli iperoni saranno possibili soltanto presso la soglia ed in alcuni casi, data l'attuale energia. Le ricerche sulla produzione singola e multipla di mesoni saranno di estremo interesse, ma dovranno impiegarsi tecniche molto raffinate. A queste energie appare anche molto promettente un programma di ricerche di elettrodinamica. Si considera la possibilità di studiare l'effetto Compton e la produzione di coppie.

INTRODUZIONE

1. I primi studi di orientamento per la costruzione di un elettrosincrotrone da porsi a disposizione di tutti i fisici nucleari italiani si sono iniziati in Italia nel febbraio del 1953.

L'iniziativa di questo progetto fu presa dal Comitato Direttivo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, il quale discusse ed approvò una proposta del suo Presidente, prof. Gilberto Bernardini.

La proposta iniziale era per 500-600 MeV, ed il gruppo di ingegneri e di fisici costituito appunto nel febbraio '53 ebbe l'incarico di definire un primo progetto di larga massima, che permettesse di prevedere i tempi, i costi e le energie raggiungibili (**).

L'esame della situazione mondiale nel campo delle macchine acceleratrici, funzionanti od in progetto, e l'esame dell'interesse scientifico del-

le varie esperienze possibili con i fotoni e gli elettroni di 500, 600, ... 1000 MeV, persuasero però il Comitato Direttivo della convenienza di portare l'energia massima dell'elettrosincrotrone da 600 a 1000 MeV. Argomenti scientifici in favore di questo ingrandimento, furono portati da Bernardini e Salvini al ritorno da un viaggio di informazione negli Stati Uniti (***)).

(***) Gli argomenti suddetti si trovano nella nota citata. E' però da osservare che oggi, in base alla nuova conoscenza acquisita sui mesoni pesanti e sugli iperoni, la nostra discussione andrebbe impostata in modo parzialmente diverso. Infatti tra le ragioni addotte in favore dei 1000 MeV fu citata la possibilità di produrre mesoni pesanti e si considerarono e si citarono essenzialmente le soglie di produzione di mesoni pesanti singoli. Oggi è invece chiaro che i mesoni pesanti e gli iperoni non sono di massima prodotti singolarmente, in accordo con nuovi principi conservativi che i fisici cercano di esprimere attribuendo alla nuova particella nuovi imprevisi numeri quantici. Le soglie di produzione con un elettrosincrotrone vengono considerate quindi nel § 4 di questa nota.

Per una discussione dell'argomento detto, vedi ad esempio: B. d'ESPAGNAT and J. PRENTEK, Cern Report, 55-11, July 1955: « A mathematical formulation of the Gell-Mann new particles model ».

(*) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

(**) Per un breve rendiconto di questa fase iniziale, vedi: G. SALVINI, Supplemento al Nuovo Cimento, vol. 12, pag. 77 (1954).

I lavori di progetto sulla macchina da 1000 MeV furono quindi iniziati nel 1954, con idee scientifiche e tecniche sufficientemente chiare. Si discussero in particolare le alternative tra elettrosincrotrone a focheggiamento debole e forte (*) e si arrivò ad un progetto definitivo di un elettrosincrotrone da 1000 MeV a focheggiamento debole (vedi § 3) alla fine del 1954. Non altrettanto chiare, allora, e non chiarissime a tutt'oggi, le idee sul piano di finanziamento: non toccherò qui questo problema, che si inserisce, anche come ottimo termometro, nella generale impreparazione del nostro Paese ai grandi moderni problemi della scienza e della tecnica.

Nella presente nota farò un quadro degli elettrosincrotroni esistenti nel mondo, e darò le linee di massima del nostro progetto (**). In particolare parlerò delle esperienze di fisica con esso possibili, quali oggi si farebbero se oggi esso già funzionasse.

GLI ELETTROSINCROTRONI DI ALTA ENERGIA (≥ 500 MeV) ESISTENTI NEL MONDO OD IN COSTRUZIONE

2. Un quadro degli elettrosincrotroni esistenti od in progetto è dato in tabella 1.

Come si vede, sono ormai due gli elettrosincrotroni funzionanti intorno ai 1000 MeV. Tra qualche anno essi saranno 4, e, secondo i progetti, tra quattro anni dovrebbe essere in funzione lo straordinario acceleratore di Cambridge da 6 GeV, che permetterà la fotoproduzione di

(*) G. SALVINI, Supplemento al Nuovo Cimento, vol. 2, Serie X, pag. 442 (1955) «The design of a 1000 MeV electronsynchrotron: a comparison between the strong and weak focusing».

(**) Il progetto particolareggiato della nostra macchina verrà pubblicato tra qualche mese, quando avremo più solide garanzie sul suo valore. Esso proviene dalla collaborazione dei seguenti fisici ed ingegneri, con i seguenti compiti essenziali:

Per lo studio teorico: E. PERSICO, G. BERNARDINI, P. G. SONA, A. TURRIN.

Per l'iniezione: M. AGENO, G. CORTELESSA, R. QUERZOLI.

Per il magnete: F. AMMAN, G. DIAMBRINI, G. GHIGÒ, G. C. SACERDOTI, G. SANNA, R. TOSCHI, G. SALVINI.

Per l'elettronica e la radio frequenza: A. ALBERICI, M. PUGLISI, I. F. QUERCIA.

Per il vuoto: G. CORAZZA.

L'amministrazione della Sezione è affidata al dr. Agostini.

coppie nucleone-antinucleone, un processo la cui soglia con fotoni è a 3,8 GeV.

Non è facile dare la ragione delle energie di tabella 1, scelte dai vari Istituti per il loro elettrosincrotrone, e mi limito ad alcune osservazioni.

Quando l'energia degli elettroni va oltre i 500-600 MeV cominciano a diventare apprezzabili, e quindi rapidamente elevate e preponderanti, le perdite di irraggiamento (***). Infatti l'energia W irraggiata (misurata in volt-elettroni) da un elettrone per ogni giro entro la macchina è data da:

$$W = C \frac{E^4}{R}; \quad C = 8,85 \times 10^{-8} \quad (1)$$

ove E è l'energia dell'elettrone in MeV, R è il raggio dell'orbita in metri. Ad esempio, nel nostro elettrosincrotrone è $R=3,6$ m; $E=10^3$ MeV; quindi $W=24\,500$ volt-elettroni.

Occorre quindi un sistema acceleratore a radio frequenza capace di rifornire all'elettrone per giro l'energia W perduta, cioè capace sostanzialmente di oscillare con una ampiezza di tensione sostanzialmente maggiore di $\pm W$ volt (e la carica dell'elettrone è qui assunta come unità).

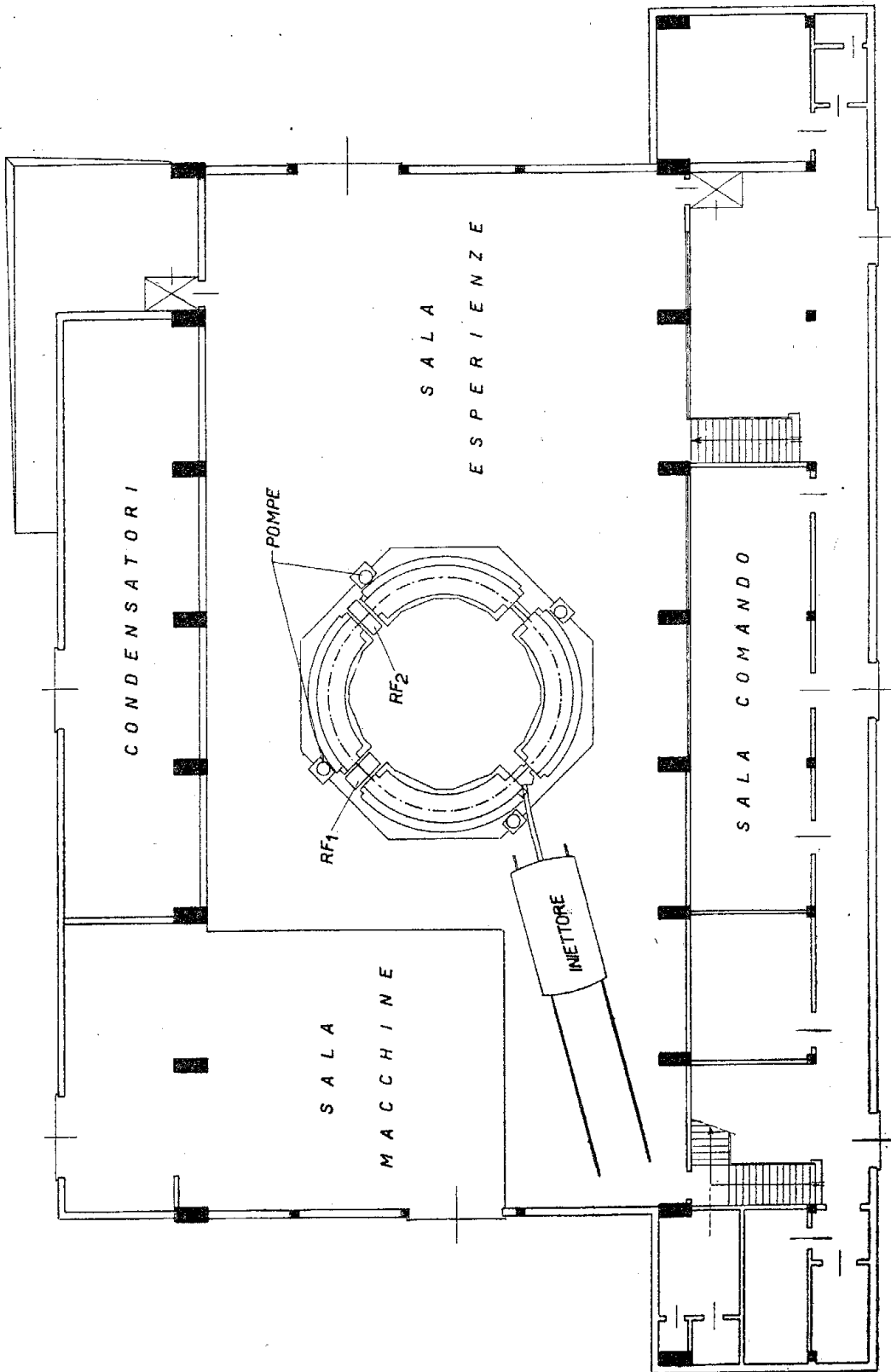
Facendo i conti dalla (1) si vede che gli elettrosincrotroni di cui alle colonne I, II, IV, V della tabella 1 non richiedono alle cavità risonanti acceleratrici un'ampiezza di tensione maggiore di 60 000 V, e che anche l'elettrosincrotrone di colonna III non richiede una tensione maggiore di 200 000 V.

Questi valori di tensione sono stimati un limite massimo di tensione per una cavità risonante del tipo occorrente ad un elettrosincrotrone: oltre questi valori occorrono soluzioni nuove, originali e rischiose. Questo limite ha contribuito a fissare, prima ancora che il raggio e la mole dei magneti, l'energia degli odierni massimi elettrosincrotroni.

Ebbene, l'elettrosincrotrone da 6 GeV di colonna VI della tabella 1 vuol rompere questo

(***) J. SCHWINGER, Phys. Rev., vol. 75 (1949), pagina 1912.

Per una istruzione generale sulle macchine acceleratrici vedi: E. PERSICO, Lezioni sugli acceleratori di particelle, Conti e Pioda, Roma, 1954 - M. STANLEY LIVINGSTON, High Energy Accelerators, Interscience Publishers, New York, 1954.



SCALA 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10metri

FIG. 1. — Pianta dell'elettrosincrotrone da 1000 MeV e dell'edificio che lo contiene.

TABELLA I

QUADRO D'INSIEME DEGLI ELETTROSINCROTRONI DI GRANDE ENERGIA (> 500 MeV), IN FUNZIONE OD IN COSTRUZIONE IN EUROPA E NEGLI STATI UNITI

MACCHINA	I 520 Caltech	II 1000 Cornell	III 1500 Caltech	IV 1000 Frascati	V 1000 Stoccolma	VI 6000 Cam- bridge (USA)
Energia max (MeV) . . .	520	1000-1200	1500	1000	1000	6000
Frequenza di ripetizione (imp./sec)	1	30	1	20	25	30
Magnete:						
tipo di focalizz. . . .	debole	forte	debole	debole	forte	forte
indice n del campo . .	0,6	± 21	0,6	0,61		100 (o 116)
numero sez. diritte . .	4	4	4	4	28	48
raggio di curvatura (m)	3,50	3,80	3,76	3,60	3	26
lunghezza di una sezione diritta (metri)	1,55	1	1,55	1,206	0,42	1,21
peso ferro (10^3 kg) . .	135	20	135	93	20	
peso rame (10^3 kg) . .	30	5	30	10	2,4	
altezza intraferro (cm) .	24	~ 4	7,6	8,6		~ 4
larghezza intraferro (cm)	100	~ 9	26	22,7		~ 12
campo max (gauss) . . .	4810	$8,8 \times 10^3$ (1000 MeV)	$13,4 \times 10^3$	$9,26 \times 10^3$	11×10^3	$7,6 \times 10^3$
campo all'iniezione (gauss)	13,7	21	13	22,7		25
Iniettore:						
tipo	trasformatore di impulsi	Van der Graaff	trasformatore di impulsi	Cockroft- Walton	microtrone	accel. lineare
energia di iniezione (ci- netica, in MeV)	1	2	1	2	6	20
Accelerazione						
Radio Frequenza:						
numero di cavità riso- nanti	1	2	2	2	1	16
tipo di cavità	klystron	klystron	klystron	klystron	klystron	16 cavità risonanti in fase (drift tubes)
tensione max alla cavità (volt)	5000	50.000	200.000	50.000	40.000	10^6 volt/ cavità
frequenza max della ca- vità (cicli/sec)	$20,32 \times 10^6$	$87,2 \times 10^6$ (8 ^a armonica)	42,8 (4 ^a armonica)	$43,7 \times 10^6$ (4 ^a armonica)	120×10^6	500×10^6 (350 ^a armon.)

MACCHINA	I 500 Caltech	II 1000 Cornell	III 1500 Caltech	IV 1000 Frascati	V 1000 Stoccolma	VI 6000 Cam- bridge (USA)
----------	------------------	--------------------	---------------------	---------------------	------------------------	---------------------------------

Vuoto:

numero delle pompe a diffusione	6	4	6	4		
materiale della ciambella	acciaio inos- sidabile	vetro pyrex	acciaio inos- sidabile	araldite + quarzo		

Complemento alla Tabella 1

- I) Questo elettrosincrotrone dell'Istituto di Tecnologia di California è stato smontato, ed il suo magnete utilizzato per la costruzione nello stesso luogo dell'elettrosincrotrone di colonna III.
- II) Elettrosincrotrone dell'Università di Cornell (Ithaca) il cui funzionamento (a 900 MeV) è iniziato in questi mesi.
- III) Elettrosincrotrone dell'Istituto di Tecnologia di California (Caltech): ha raggiunto i 1200 MeV in queste settimane.
- IV) Elettrosincrotrone italiano oggetto di questa nota.
- V) Elettrosincrotrone a focheggiamento forte in costruzione all'Istituto di Tecnologia di Stoccolma. Alcuni dati sono omessi per insufficiente informazione.
- VI) Elettrosincrotrone, ancora allo stato di progetto iniziale nel luglio 1956, da realizzarsi a Cambridge (Massachusetts). Vedi: Livingstone, The Cambridge Electron Accelerator, CERN Symposium 1956.

muro, con una soluzione audace nella quale si prevedono 16 cavità risonanti distribuite lungo l'anello del magnete, abbondantemente capaci di rifornire i 4,4 MeV per giro necessari per compensare le perdite di irraggiamento degli elettroni al loro massimo più l'aumento di energia di circa mezzo MeV per giro (vedi bibliografia indicata in tabella 1). Questa macchina si pone quindi oltre il limite di creazione di coppie di nucleoni-antinucleoni, e magari di coppie di iperoni, in modo da poter esplorare, almeno vicino alla soglia di produzione, tutti i fenomeni fisici elementari a noi noti.

Per quanto riguarda le macchine da 1000-1500 MeV, vedremo al § 4 e segg. che esse possono arrivare a coprire in tutto od in parte il campo della produzione dei mesoni pesanti e della produzione multipla di mesoni.

CARATTERISTICHE PRINCIPALI E BREVE DESCRIZIONE DELL'ELETTROSINCROTRONE ITALIANO DA 1000 MeV.

3. Nel presente paragrafo riassumo i dati di progetto dell'elettrosincrotrone da 1000 MeV in

corso di costruzione presso la Sezione Acceleratore dell'INFN, sottolineando con particolare riguardo quelle informazioni che possono interessare i ricercatori in vista delle future esperienze da farsi a macchina ultimata. Le caratteristiche particolareggiate si trovano descritte nella relazione interna della Sezione Acceleratore (*).

Magnete: Ha struttura anulare e risulta costituito da 4 settori magnetici (cfr. fig. 1) aventi ciascuno un raggio di curvatura di 360 cm ed apertura molto prossima a 90°, separati da 4 tratti rettilinei liberi dal campo magnetico e lunghi 120,6 cm. La fig. 2 mostra una sezione radiale del magnete, e mette in evidenza la sua struttura a C, il traferro delle dimensioni di 22,7 x 8,6 cm² nel quale è alloggiata la camera a vuoto destinata a contenere il fascio di elettroni e gli avvolgimenti di eccitazione. Il campo magnetico nel traferro ha funzione di guida e di focheggiamento per gli elettroni da accelerare ed ha un gradiente radiale corrispondente

(*) G. SALVINI, Relazione G19 della Sezione Acceleratore dell'INFN, 1955.

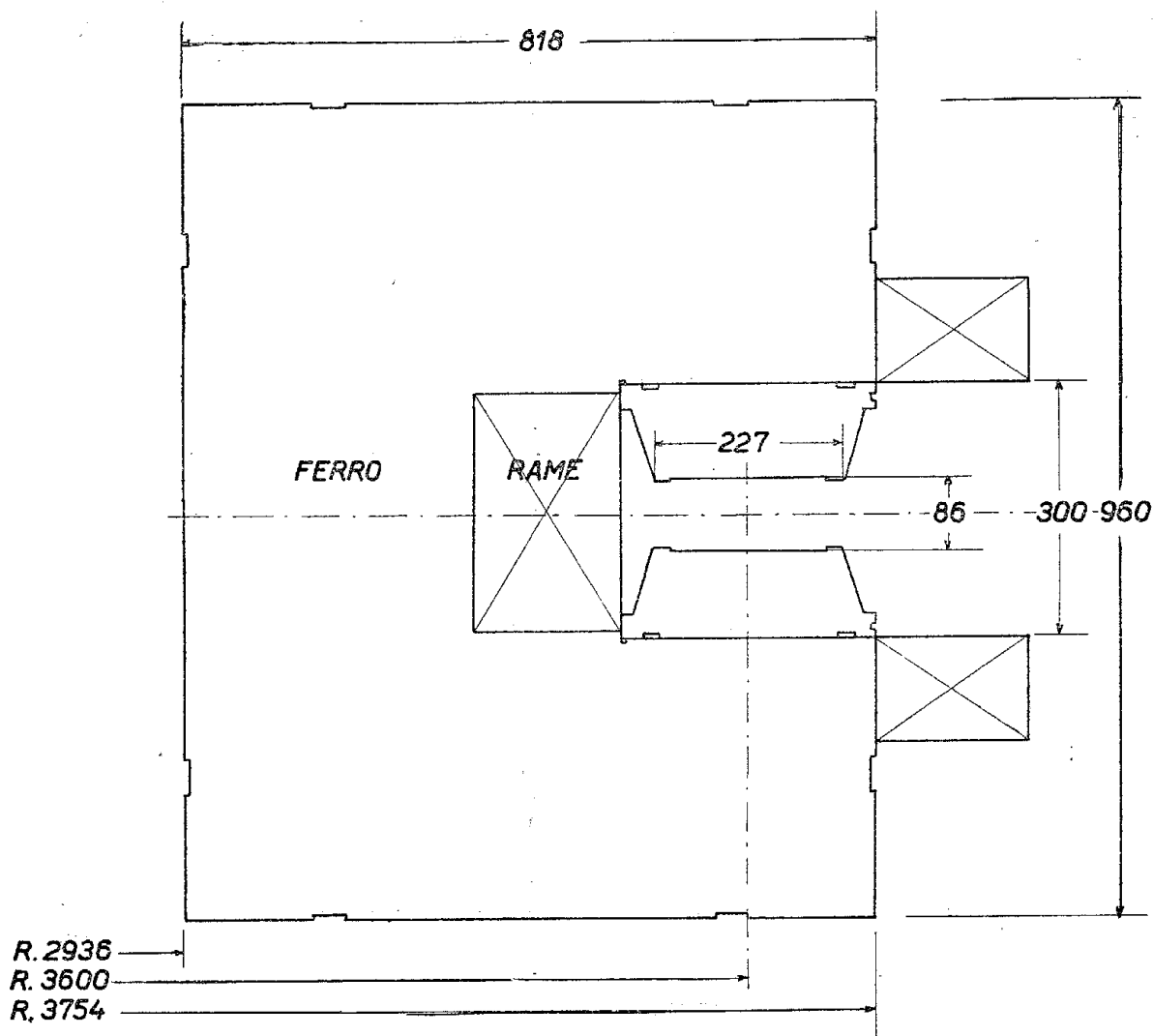


FIG. 2. — Sezione radiale del magnete dell'elettrosincrotrone di fig. 1 (dimensioni in mm).

ad un indice n pari a 0,61. Il valore massimo dell'induzione magnetica sull'orbita di equilibrio corrispondente all'energia finale di 1000 MeV è di 9260 gauss, mentre l'iniezione ha luogo quando il campo sulla stessa orbita è pari a 22,7 gauss. L'eccitazione è sinusoidale a 20 periodi al secondo con componente continua regolabile tra 4170 e 4630 gauss così da realizzare le condizioni migliori per l'iniezione. Tre delle quattro sezioni diritte risultano completamente occupate dalle due cavità risonanti, e dal deflettore elettrostatico dell'iniettore. La quarta sezione diritta (v. fig. 1) è libera ed in essa si pensa di

sistemare i dispositivi relativi all'estrazione del fascio di fotoni.

Iniettore: È un Cockroft-Walton in gas compresso e può fornire impulsi di elettroni di 2 MeV (energia cinetica), con una stabilità dell'energia del 2%, con una durata variabile da 1 a 10 μ s ed alla dovuta frequenza di ripetizione di 20 p/s. Il numero massimo di elettroni iniettabili per impulso è di circa $5 \cdot 10^{12}$. Il fascetto all'iniezione ha la sezione di circa 1 cm² ed una apertura angolare di circa $3 \cdot 10^{-3}$ rad. Il progetto e la costruzione dell'iniettore sono

curati dall'Istituto di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità.

Accelerazione a radio frequenza ()*: È effettuata da due cavità risonanti del tipo rientrante coassiale operanti in 4^a armonica della frequenza di rivoluzione degli elettroni. La 1^a operante nella prima fase dell'accelerazione, da

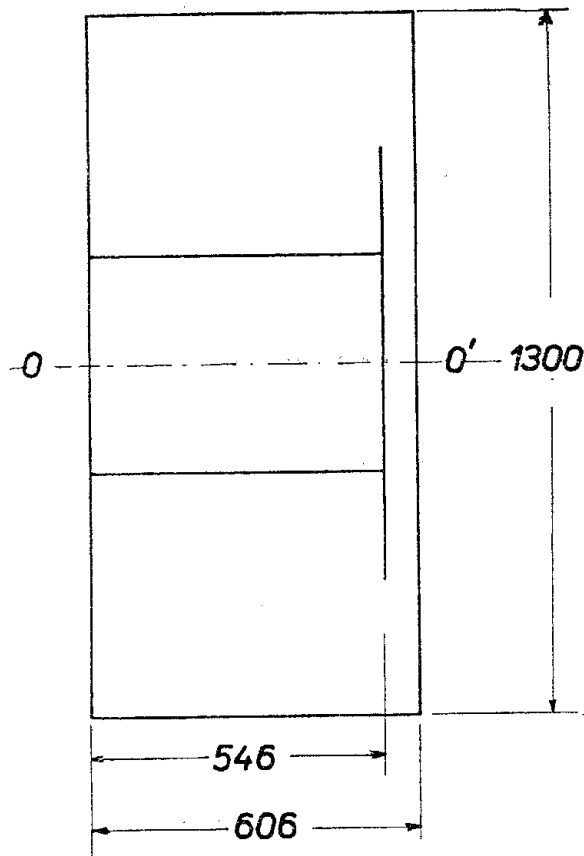


FIG. 3. — Cavità risonante del primo sistema acceleratore (RF₁). La cavità è circa un solido di rotazione intorno all'asse O-O' (dimensioni in mm).

2,5 a circa 7 MeV, è modulata in frequenza tra 42,6 e 43,7 megahertz. La 2^a modulata solo in ampiezza opererà a frequenza costante di 43,7 MHz, con una tensione massima di 50-60 000 volt. Il funzionamento di entrambe le cavità è impulsato a 20 p/s. La potenza massima dell'impianto è prevista in circa 60 kW.

(*) M. PUGLISI, I. F. QUERCIA, F. LEPRI: Relazione R11 della Sezione Acceleratore dell'INFN (1955).

La fig. 3 indica la sezione della 1^a cavità risonante, in rame. La forma di essa è circa di rotazione intorno all'asse O-O'.

Impianto di vuoto e ciambella: La sezione della ciambella (**) è mostrata nella fig. 4; le sue dimensioni esterne sono di circa 23 × 7,8 cm². La lunghezza di un settore di ciambella (un settore per quadrante) misurata lungo l'orbita principale è di 565 cm. Il vuoto da realizzare entro la ciambella è compreso tra 10⁻⁵ e 10⁻⁶ mm Hg, e verrà ottenuto mediante quattro pompe rotative e quattro pompe a diffusione da 3000 litri/s.

La ciambella verrà realizzata in araldite e quarzo.

È difficile prevedere l'intensità finale di questa macchina: le condizioni all'iniezione fanno prevedere attualmente, come limite superiore, qualche 10¹⁰ elettroni per impulso.

*Composizione spettrale del fascio di fotoni (***)*: Si prevede (ma non esiste una dimostrazione sperimentale precisa) uno spettro di bremsstrahlung estendentesi fino all'energia massima degli elettroni; la radiazione di energia molto bassa è assorbita nel bersaglio (target) e nelle pareti della ciambella, così che la forma dello spettro della radiazione emergente dalla macchina presenta un taglio alle basse energie. Lo spettro di fotoni è dunque all'incirca del tipo:

$$N(E) dE = k \frac{dE}{E}$$

ove k è una costante, E è l'energia dei fotoni ed $N(E)dE$ è il numero di fotoni di energia compresa tra E ed $E + dE$.

Durata di ciascun impulso di fotoni: Dipende dalla modalità con la quale viene effettuato l'urto degli elettroni contro il bersaglio. Usando tecniche di collisione diverse è stato possibile in altri sincrotroni ottenere impulsi di fo-

(**) È ormai nell'uso chiamare ciambella (gli americani Doughnut, o Donut) il recipiente toroidale del vuoto entro il quale gli elettroni vengono accelerati.

(***) W. BLOCKER, R. KENNEY, W. K. H. PANOFSKY: Phys. Rev., vol. 79, pag. 419 (1950).

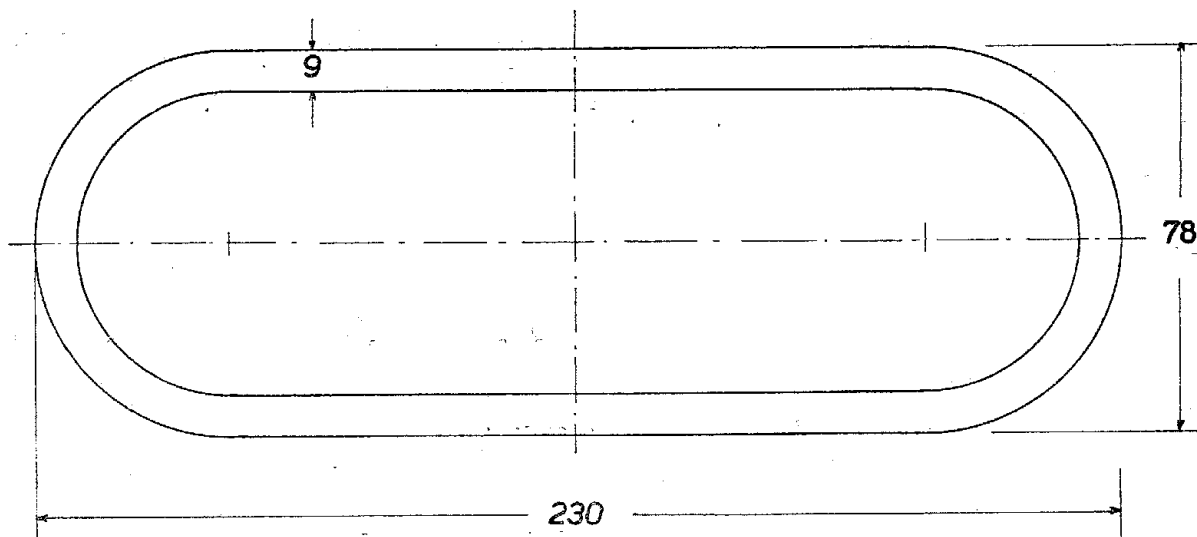


FIG. 4. — Sezione della ciambella dell'elettrosincrotrone (dimensioni in mm).

toni dalla durata minima di circa $1 \mu\text{s}$ a quella massima di circa $5000 \mu\text{s}$.

Estrazione del fascio di elettroni: Si sta attualmente studiando l'estrazione del fascio di elettroni, ma è previsto che solo a macchina funzionante egregiamente con fotoni si realizzerà questa possibilità.

La fig. 1 rappresenta la macchina entro il suo edificio. Lo spazio libero a fianco del sincrotrone costituisce la sala esperienze (circa $11 \times 17 \text{ m}^2$) ed è destinato ad accogliere le apparecchiature per la taratura del fascio γ , e le apparecchiature delle singole esperienze (magneti, assorbitori, rivelatori e loro elettronica).

La fotografia di fig. 5 mostra l'elettrosincrotrone di Cornell in fase di messa a punto. La fotografia di fig. 6 mostra il primo pezzo del nostro magnete (metro campione) realizzato in Genova presso la Ditta Ansaldo San Giorgio, ed oggi allo studio per le decisioni definitive circa il progetto.

ESPERIENZE POSSIBILI CON L'ELETTROSINCROTRONE

L'energia di soglia

4. Si è più volte osservato che lo sviluppo della fisica nucleare alle alte energie ha avuto in questi anni uno svolgimento essenzialmente inatteso e capriccioso strettamente legato alle

numerose scoperte di nuove particelle, senza una guida teorica che ne costituisse il filo conduttore.

Se si esclude quella linea di pensiero che si sviluppa dall'equazione di Dirac, e che ha guidato recentemente alla ricerca ed alla scoperta dell'antiprotone e dell'antineutrone, nulla di certo e consistente ci resta, se non una forse ben fondata fiducia nei teoremi generali della meccanica quantistica, per guidare un programma di ricerca nella fisica delle alte energie.

I fisici cercano di inquadrare in una veste matematica efficace e capace di deduzione feconda i fatti sperimentali nucleari, di ripetere con i mesoni i successi, almeno parziali, dell'elettrodinamica, cioè della fisica del fotone e dell'elettrone. Ma sinora non si è visto molto di più che un succedersi di « teorie » più o meno pseudo-elettrodinamiche, la cui tenuta ai nuovi fatti sperimentali non supera di solito l'anno o il biennio: teorie pur eleganti e geniali, ma che non possono non farci pensare che la strada da battere potrebbe essere un'altra.

In queste condizioni, che non sono poi troppo da drammatizzare in un'epoca in cui il desiderio di consapevolezza dei propri limiti è acutissimo e generale a tutta la nostra cultura, un programma di ricerche nucleari con una grossa macchina non può che essere schizzato sulla base di una estrapolazione dei risultati delle

esperienze precedenti con macchine di minore energia massima. Si lavora e si progetta sorretti inconsciamente o no da alcuni generali assiomi peraltro ragionevoli: che occorre andare ad energie sempre più alte, che occorre calcolare con la massima precisione tutte le « fasi » dei processi di diffusione, che occorre calcolare presso la soglia le funzioni di eccitazione relative ai mesoni leggeri e pesanti, che la parità si deve conservare, e così via.

Noi faremo circa lo stesso in questo paragrafo, soffermandoci su qualche particolare sperimentale essenzialmente a titolo di esempio:

È da ricordare che il numero più efficace per esprimere l'energia di una macchina non è tanto l'energia massima delle particelle da essa accelerate (protoni od elettroni) nel sistema del

laboratorio, ma piuttosto l'energia cinetica, rispetto al suo baricentro, del sistema costituito dalla particella accelerata incidente e dalla particella del bersaglio che viene colpita: è questa energia cinetica quella « disponibile », quella che ad esempio può tradursi in nuova massa, quindi condurre tra l'altro alla creazione di nuove particelle.

Lo studio del problema dei due corpi, trattato ovviamente con la meccanica relativistica (*), ci dimostra che l'energia disponibile è maggiore per le particelle incidenti di piccola massa o nulla (per es.: elettroni, fotoni), rispetto alle particelle più pesanti (per es.: pro-

(*) E. SEGRÈ: *Experimental Nuclear Physics*, vol. II, parte VI, Sez. 1 - John Wiley & Sons, New York, 1953.

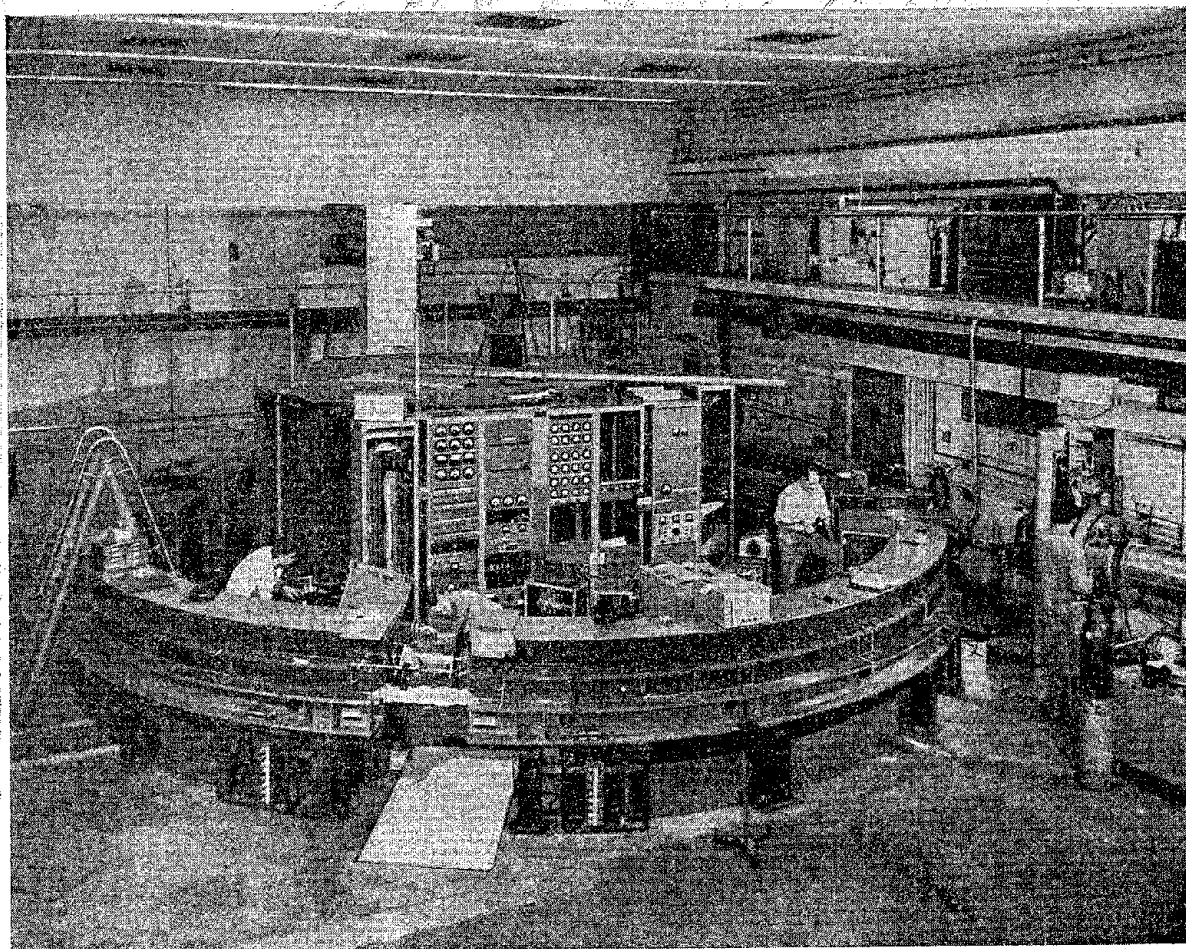


FIG. 5. — Vista d'insieme dell'elettrosincrotrone di Cornell (v. tab. 1) in fase di messa a punto.

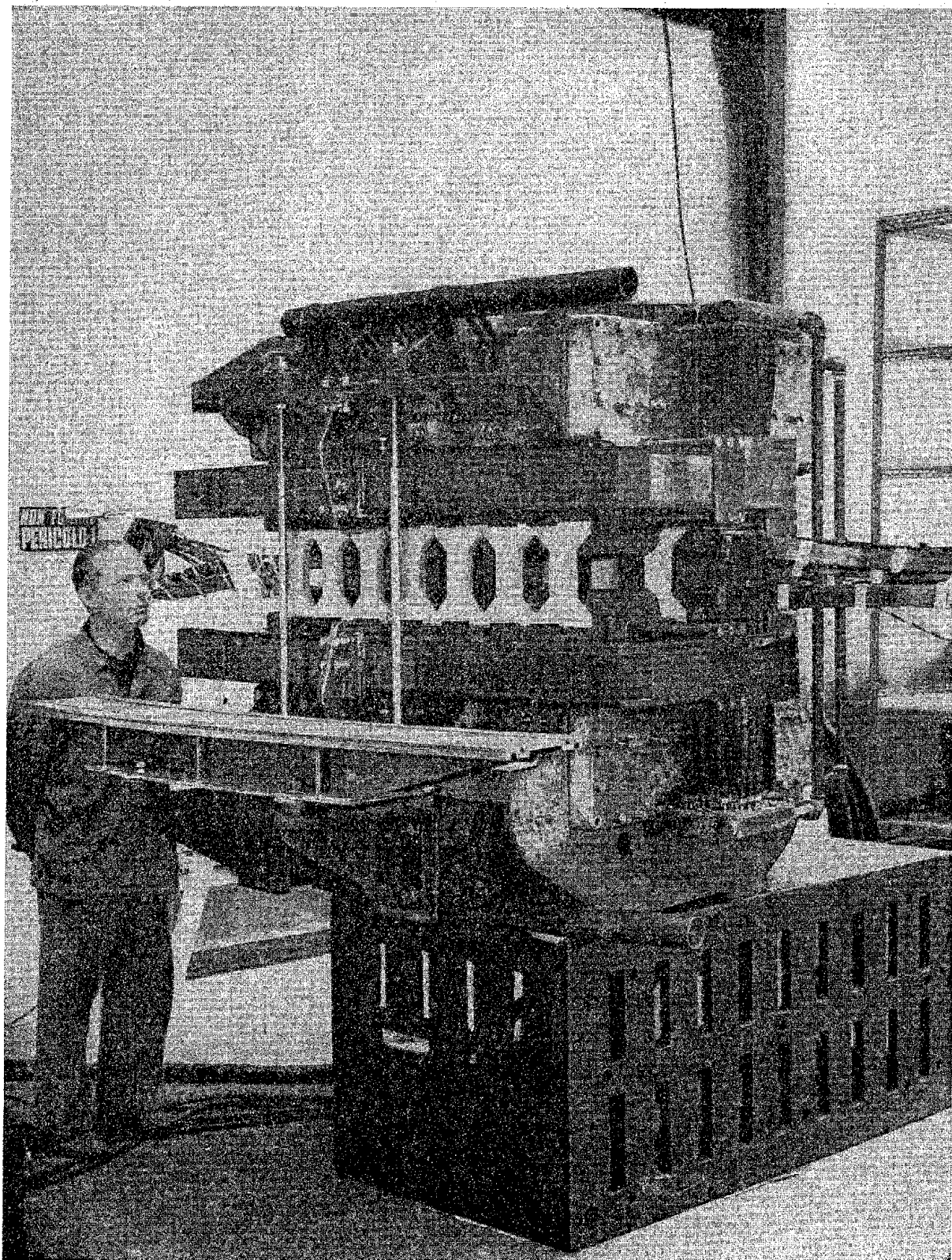


FIG. 6. — Il primo metro del magnete dell'elettrosincrotrone di fig. 1, sul quale attualmente si sta misurando il campo magnetico. (Costruito nelle Officine Ansaldo San Giorgio).

toni), pur a parità di energia cinetica nel laboratorio.

A parità quindi di energia massima nel laboratorio una macchina per elettroni e fotoni ha un maggiore rendimento in energia disponibile: ecco un'altra delle ragioni per le quali si è scelto da noi un elettrosincrotrone.

Nella fig. 7 abbiamo dato la massima massa creabile nell'urto di fotoni contro protoni in funzione dell'energia del fotone, essendo i protoni supposti fermi nel sistema del laboratorio. Osserviamo che le soglie per creazione da elettroni sono estremamente vicine a quelle per creazione da fotoni, e quindi, nella approssimazione della figura, ancora quelle della fig. 7.

L'energia minima (energia di soglia) E_γ di un fotone nel sistema del laboratorio affinché nell'urto contro idrogeno sia creata una massa M (per es. la massa $M=273 m_e$ di un mesone π^+ , ove m_e è la massa dell'elettrone) è data da:

$$E_\gamma = \frac{1}{2} \frac{M}{M_p} (M + 2M_p) \quad (2)$$

ove M_p è la massa del protone:

$$M_p = 938,23 \text{ MeV} = 1836,1 m_e.$$

La curva di fig. 7 è appunto il grafico della funzione (2).

Come si vede, con un elettrosincrotrone da 1000 MeV noi potremo a rigore studiare i processi nucleari di creazione sino alla produzione contemporanea di 5 mesoni π , e sino ad una massa creata di $722 \text{ MeV}/c^2$.

Esamineremo nel prossimo paragrafo il caso dei mesoni pesanti e degli iperoni.

Vogliamo però osservare che di vivo interesse può anche essere la creazione di particelle nell'urto contro altri nuclei che non l'idrogeno, cioè nell'urto tra un fotone ed uno dei nucleoni legati nel nucleo. In questo caso il nucleone urtato non può pensarsi inizialmente fermo nel sistema del laboratorio, poichè dobbiamo attribuire ad esso un'energia cinetica entro il nucleo che lo possiede (*). Senza entrare in particolari stime di questa energia cinetica interna, diremo che non sono improbabili entro i nuclei (per es. i nuclei di elio) energie cinetiche del nucleone di 5-15 MeV. Quando la quantità di moto del protone all'istante dell'urto è diretta verso il fo-

(*) Vedi ad es.: J. M. BLATT, V. F. WEISSKOPF: Theoretical nuclear Physics, in particolare cap. III, VII.

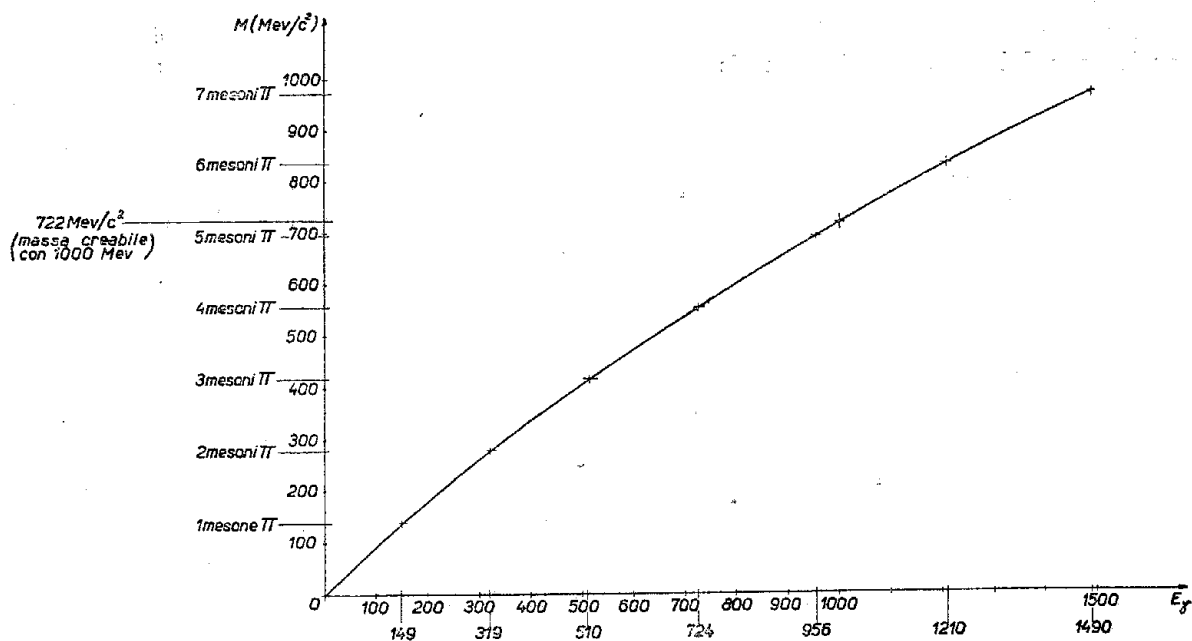


FIG. 7. — Ascisse: energia E_γ del fotone urtante contro un nucleone fermo. Ordinate: massima massa creabile M (in MeV/c^2 , $c=1$) da un fotone di energia E_γ . Sono indicate esplicitamente sulle ascisse e sulle ordinate, rispettivamente, le energie di soglia per la creazione di determinate particelle e la natura di queste.

tone urtante, allora l'energia di soglia del fotone, che indicheremo in questo caso con E' , può notevolmente diminuire. Essa è data in questo caso da:

$$E'\gamma = E\gamma \frac{1}{\Gamma + \beta\Gamma}, \text{ ove } \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \beta = \frac{v}{c}$$

è con v si indica la velocità del protone entro il nucleo, rispetto al sistema del laboratorio nel quale il nucleo è supposto fermo. Nella tabella 2 (per la cui intelligenza rimandiamo al §.5) sono date le soglie di produzione per alcuni processi nucleari nell'ipotesi che il protone (o, con ottima approssimazione, il neutrone) abbia entro il nucleo una energia cinetica di 0, 5, 10, 15 MeV.

FOTOPRODUZIONE DI MESONI PESANTI E DI IPERONI

5. Non ancora è stata osservata in laboratorio la creazione di mesoni pesanti e di iperoni (*) da parte di fotoni contro nuclei. Infatti soltanto da alcuni mesi sono in funzione due elettrosincrotroni capaci di accelerare gli elettroni sino ad 1 GeV (vedi tabella 1), quindi capaci di produrre mesoni pesanti.

L'esperienza dimostra che i mesoni pesanti e gli iperoni non sono prodotti singolarmente (*), e quindi i processi più significativi di fotoproduzione di queste particelle, almeno ad energie non lontane dal GeV, sono i seguenti:

- A) $\gamma + p \rightarrow \Lambda^0 + \theta^+$
- B) » $\rightarrow \Lambda^0 + \tau^+$
- C) » $\rightarrow \Sigma^+ + \theta^0$
- D) » $\rightarrow \Sigma^0 + \theta^+$ (l'esistenza dell'iperone)
- E) » $\rightarrow \theta^0 + \theta^+ + n$ (Σ^0 è ancora dubbia)
- F) » $\rightarrow \theta^0 + \theta^0 + p$
- G) » $\rightarrow \theta^- + \theta^+ + p$

ove i simboli hanno i seguenti significati:

γ indica il fotone incidente;

n indica il neutrone;

p indica il protone;

Λ^0 indica l'iperone di massa = 1115 MeV/c²;

(*) Per un elenco di queste particelle vedi ad es.: D. K. BUTT, E. G. MICHAELIS, G. L. MILLER, P. T. TRENT, C. F. POWELL: The elementary particles of Nature. Science Information Service, 82 Park Street, London W 1, 1956.

τ^+ , θ^0 , θ^+ , θ^- sono i cosiddetti mesoni K, ciascuno diverso per la carica od il modo di decadimento, ma per ciascuno dei quali assumiamo, secondo le più recenti indicazioni sperimentali, la massa unica di 493 MeV, con una incertezza dell'ordine di circa 3 MeV. Σ^+ , Σ^0 , sono gli iperoni di massa pari a circa 1189 MeV/c² (**).

Nella tab. 2 si danno le energie minime del fotone incidente perchè avvengano le reazioni indicate sopra con A), B), C)... nel §5. Questa energia è quella occorrente al fotone nel caso che l'urto avvenga contro un nucleone « vibrante », entro un nucleo, e dotato di energia cinetica T rispetto al laboratorio. Nell'ipotesi ben inteso che il nucleone urtato sia diretto contro il fotone nell'istante precedente l'urto.

Ci si può domandare quali sono le ragioni per le quali si vuole cercare di dimostrare l'esistenza di queste reazioni nucleari, peraltro probabile.

A parte le nostre generali esigenze di completezza dell'informazione sulle poco note e discusse « particelle strane » (mesoni ed iperoni), possiamo dare la seguente più specifica ragione di tale ricerca.

Le ricerche più fini (fatte a Berkeley, col bevatrone) (***), sui mesoni K sembrano indicare che tutti i mesoni K hanno la stessa massa entro gli errori sperimentali. Ci si domanda pertanto se si tratta di una stessa particella che disintegra in modi diversi o se siamo in presenza, nonostante i coincidenti valori di massa, di più particelle diverse. Sino ad oggi non si sa formulare una teoria che convalidi l'ipotesi della particella unica, anche perchè è difficile considerare come una stessa particella i τ (mesoni K che disintegrano in tre pioni) ed i θ (mesoni K che disintegrano in due pioni), i quali dovrebbero avere opposta parità.

(**) Congresso della S.I.F., Comunicazione del dott. KENNETH M. CROWE.

(***) Per una discussione di questi problemi vedi ad es.: N. N. BISWS, L. CECCARELLI-FABBRICHESI, M. CECCARELLI, K. GOTTSTEIN, N. C. VARSHNEYA and P. VALOSKMEK, Nuovo Cimento, vol. 4, pag. 631 (1956) e bibliografia ivi citata.

BIRCE, PERKINS, PETERSON, STORK, WHITEHEAD, Nuovo Cimento, vol. 4, pag. 834 (1956).

Ringrazio il dr. Gatto per la discussione di questo argomento.

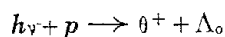
TABELLA 2

ENERGIA DI SOGLIA DELLE REAZIONI A, B, C, D, E, F, G (§ 5). SI INDICA CON T L'ENERGIA CINETICA DEL NUCLEONE ENTRO IL NUCLEO. I NUMERI IN TABELLA INDICANO IN MeV L'ENERGIA MINIMA (DI SOGLIA) DEL FOTONE, QUANDO IL NUCLEONE URTATO POSSEGGA UNA ENERGIA T , CON MOTO DIRETTO CONTRO IL FOTONE INCIDENTE

REAZIONE	$T=0$	$T=5$	$T=10$	$T=15$
A, B	910	820	786	760
C, D	1040	938	899	870
E, F, G	1507	1359	1303	1261

Ebbene, per chiarire questi problemi, è interessante vedere se le frequenze dei vari modi di disintegrazione dei mesoni K prodotti nell'urto fotone-nucleo sono tra loro negli stessi rapporti che per i mesoni K prodotti in altro modo (per es. nell'urto mesone-nucleo), o no. Per queste misure di fotoproduzione si possono forse usare nuclei diversi dall' H_2 e quindi le soglie possono scendere, raggiungendo i valori indicati in tabella 2 per $T \neq 0$.

Quale valore potrà avere la sezione d'urto per fotoproduzione dei mesoni K? Non è possibile una risposta, nella attuale ignoranza delle forze nucleari. Una stima fatta dal dr. Sona (*) con la sola approssimazione di Born, e supponendo che le costanti di accoppiamento mesone K-nucleone siano dello stesso ordine di grandezza che le costanti relative alle forze pione-nucleo, porta ad una sezione d'urto totale $\sigma_{tot} \simeq 10^{-30}$ cm² per la reazione:



Se questo valore è vicino al vero, i mesoni K da fotoproduzione saranno presto osservati in laboratorio, poichè non è difficile pensare di rivelarli con l'impiego delle lastre nucleari, o delle camere a bolle, o delle camere a diffusione.

(*) Dr. G. SONA, comunicazione privata.

FOTOPRODUZIONE DI PIONI

6. Sono state sinora studiate con una approssimazione del \pm (5-15%) le sezioni d'urto differenziali di fotoproduzione di pioni, dalla soglia (149 MeV) sino alla energia massima di circa 500 MeV (**).

I processi studiati sino ad ora sono essenzialmente i seguenti:

- 1) H) $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$
- 2) I) $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p$
- 3) L) $\gamma + n \rightarrow \pi^- + p$
- 4) M) $\gamma + n \rightarrow \pi^0 + n$

Tra questi i primi due sono sperimentalmente i più immediati, in quanto che basta per essi un bersaglio di puro idrogeno.

I processi ora detti sono processi di fotoproduzione singola, ma naturalmente dalla energia di 319 MeV in su (vedi fig. 7) è possibile creare due pioni contemporaneamente, ed a 960 MeV già è energeticamente possibile la creazione di 5 pioni (fotoproduzione multipla) (***)

Indubbiamente si apre qui un campo di ricerca vastissimo e complicato, del quale è difficile valutare a priori la fecondità di risultati. Vogliamo fare in proposito alcune osservazioni.

(**) M. BENEVENTANO, G. BERNARDINI, D. COULSON LEE, E. STOPPINI and L. TAU, Nuovo Cimento, vol. 4, pag. 323 (1956) e bibliografia ivi citata.

(***) Fotoproduzione di due pioni è stata già sperimentalmente osservata da: K. M. CROWE, R. M. FRIEDMAN, D. C. HAGERMAN, Phys. Rev., vol. 100, pag. 1799 (1955).

L'integrazione teorica dei processi di produzione nucleare diviene in genere più difficile quando ci si allontana dalla soglia di produzione, e questo è dovuto al fatto che la creazione di una particella (per es. pioni da fotone) vicino alla soglia può avvenire in un numero abbastanza ristretto di « modi » mentre fuori della soglia il numero di modi possibili aumenta. Ad esempio il processo H) vicino alla soglia interessa essenzialmente i bassi livelli di momento angolare del pione prodotto (stati S, P), mentre lontano dalla soglia possono anche interessare il processo stati di momento angolare più elevato (stati D, F, G...) (*); difficile quindi, per questa ed altre ragioni, è una interpretazione dei processi di creazione lontano dalle soglie, ed è probabile che anche ad alte energie ed anche per i processi multipli lo studio più interessante si compia nei dintorni della soglia di produzione di 1, 2, ...n pioni di varia carica.

Per compiere esperienze significative bisogna dunque che il fascio di γ del sincrotrone sia di alta intensità e di ben noto spettro energetico, poichè le sezioni d'urto dei processi di fotoproduzione sono probabilmente basse presso la soglia, e sono probabilmente una rapida funzione dell'energia del fotone.

Sino ad oggi non si è lavorato con fotoni monoenergetici, ma con un fascio di fotoni distribuiti nell'energia con un tipico spettro di irraggiamento. Ne discende che l'energia del fotone che ha destato un certo processo non si può conoscere che a posteriori, dall'esame dei prodotti della reazione. Ad esempio, nella reazione H) prima detta una misura dell'energia e della direzione del pione emesso determina in modo univoco l'energia del fotone incidente. Nel caso di fotoproduzione di n pioni contro nucleone, il numero delle coordinate libere N che occorre conoscere per determinare l'energia del fotone incidente è dato (a parte casi particolari) da $N=3n$, se è nota (come è normalmente il caso) la direzione del fotone incidente. Ecco dunque che i nostri processi di fotoproduzione multipla devono essere rivelati con strumenti capaci di misurare l'energia e la direzione (o diciamo il vettore quantità di moto) di

(*) G. BERNARDINI: Lectures on photoproduction, Supplemento vol. II del Nuovo Cimento, pag. 104 (1955).

tutti i pioni prodotti, inclusi i pioni neutri: si va verso l'impiego di camere a bolle con campo magnetico, di lastre nucleari, di tecniche finemente visualizzanti.

Inoltre un problema di molti corpi diviene rapidamente complicatissimo anche in prima approssimazione: si va verso l'impiego delle calcolatrici elettroniche, e verso l'automazione dell'informazione sperimentale (**).

Tenuto conto della complessità dei processi multipli e della attuale precisione e rapidità dei nostri strumenti rivelatori delle interazioni, c'è da domandarsi se le tecniche di rivelazione attuali non siano inferiori al compito, e non sia da augurarsi che rapidamente continui il progresso delle tecniche di rivelazione, che pur già tanto è avanzato in questi anni con l'invenzione della camera a bolle.

Particolare menzione tra i processi multipli merita la fotoproduzione di due pioni (***). Si è visto recentemente che qualche comprensione della fisica dei mesoni si può raggiungere con un modello fenomenologico che assuma che la sola interazione nucleare importante sia l'assorbimento o l'emissione di mesoni singoli da nucleoni, e che soltanto gli stati intermedi di bassa energia siano importanti. Una buona verifica di questi assunti può farsi appunto con i processi in cui due pioni sono creati contemporaneamente: il problema teorico può infatti trattarsi nei dettagli se si pensa di poter trascurare l'interazione pione-pione.

ESPERIENZE DI ELETTRODINAMICA

7. Un elettrosincrotrone è anche una macchina nucleare che offre la possibilità di svolgere un programma di ricerche elettrodinamiche di

(**) Questo aspetto recentissimo della ricerca nucleare di alta energia, cioè l'automazione dell'informazione, è ad es. già particolarmente sviluppato nelle ricerche che si fanno attualmente al Laboratorio Nazionale di Brookhaven sulla produzione multipla di pioni da nucleoni, come anche nei progetti di esperienze impieganti come strumento fondamentale una camera a bolle: uno strumento cioè che può raccogliere centinaia di migliaia di fotografie in poche settimane; fotografie che andranno esaminate e risolte con procedimenti particolarmente rapidi.

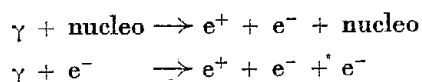
(***) R. E. CUTKOSKY, F. ZACHARIASEN: Phys. Rev., vol. 103, pag. 1108 (1956) e bibliografia ivi citata.

grande interesse. Come è noto l'elettrodinamica quantistica è teoricamente ben fondata, ed è l'unico ampio campo della fisica dove la teoria e l'esperienza abbiano collaborato finemente in una costruzione non ancora perfetta, ma certo molto solida (*). Ciononostante è da dire che la teoria elettrodinamica non è stata ancora sottoposta ad un sicuro collaudo sperimentale nella regione delle interazioni ad alta energia: in un certo senso l'ansia delle ricerche mesoniche non ha dato tempo ai grossi elettrosincrotroni per le ricerche di elettrodinamica. Eppure questo collaudo andrà fatto, poichè non esistono a tutt'oggi argomenti sicuri per dedurre dalle pur finissime misure a bassa energia, quali ad esempio quelle relative al Lamb-Shift (*), che i conti debbano tornare anche ad energie elevate, mettiamo tra i 100 ed i 1000 MeV.

Volendo esemplificare potremmo indicare, quale possibile programma di misure elettromagnetiche con un elettrosincrotrone del nostro tipo, i seguenti processi:

— Effetto Compton (urto fotone-elettrone). Esistono misure precise soltanto sino a 20 MeV, e queste ultime si accordano notevolmente con la teoria (entro il 2%), cioè con la nota formula di Klein-Nishina. Recentemente (***) si è ricalcolato l'effetto Compton, tenendo conto delle correzioni di ordine più elevato, e sarà di estremo interesse confrontare questi risultati con la esperienza con fotoni tra i 500 ed i 1000 MeV. Non sono misure facili, poichè le sezioni d'urto sono basse, dell'ordine di 10^{-27} cm², ed il confronto diviene particolarmente significativo solo se lo si spinge sino ad una precisione dell'ordine dell'1-2%.

— Produzione di coppie di elettroni. Non esistono, oltre i 300 MeV, misure dei seguenti processi:



(*) J. C. GUNN: Theory of radiation, Rep. Progress Phys., vol. 18, pagg. 127-183 (1955).

(**) BROWN e FEYNMAN: Phys. Rev., vol. 85, pag. 231 (1951).

Uno studio approfondito di queste reazioni, che sino ad ora hanno dato risultati sperimentali in accordo con la teoria, implicherà anche una rielaborazione dei calcoli teorici sino ad ora fatti, che non sono sufficientemente precisi, oltre che una tecnica sperimentale di primissimo ordine.

— Processi multipli di ordine elevato. È noto che esistono, e lo si è dimostrato sperimentalmente a basse energie, alcune interazioni elettromagnetiche complicate, quali il doppio effetto Compton, la creazione contemporanea di più coppie, etc. (***). Non esiste uno studio sistematico di questi processi ad alte energie.

Come si è detto, queste ricerche andranno prima o poi fatte, e non sono affatto ovvie.

L'effetto più significativo tra quelli ricordati è forse l'effetto Compton, che consiste in un urto nel quale si ha normalmente un grosso trasferimento di impulso dal fotone all'elettrone.

A questo proposito, ed in generale per l'urto elettrone-fotone, osserviamo quanto segue. Nel baricentro del sistema fotone-elettrone la lunghezza d'onda del fotone è, per fotoni che abbiano 1000 MeV nel laboratorio, pari a circa $4,5 r_0 = 1,27 \times 10^{-12}$ cm, ove r_0 è il raggio classico dell'elettrone. Questa lunghezza d'onda è maggiore di r_0 , ma già confrontabile con esso. Non si possono quindi del tutto escludere effetti nuovi derivanti dall'eventuale struttura interna dell'elettrone.

Appare dunque anche da questo brevissimo cenno che ad un elettrosincrotrone da 1000 MeV si offrono ampie possibilità di ricerca, capaci di impegnare molti fisici per molti anni. In generale non saranno esperienze facili, perchè si richiederanno per esse tecniche sperimentali e calcoli teorici delicati e sottili.

(***) J. C. GUNN: Theory of radiation, Rep. Progress Phys., vol. 18, pagg. 127-183 (1955).