

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-54/48 (1954)

G. Salvini: IL PROGETTO ITALIANO DI UN ELETTROSINCROTRONE.

Estratto dal Nuovo Cimento Suppl. 12, 77 (1954)

**NON CONSULTABILE  
FUORI SEDE**

G. SALVINI  
1054 - N. 1  
*Supplemento al Nuovo Cimento*  
12. 77-100



## **Il progetto italiano di un elettrosincrotrone.**

G. SALVINI

*Istituto di Fisica dell'Università - Pisa  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione Acceleratore*

### **1. - Decisione di costruire una macchina nucleare.**

1.1. - Nel mese di Febbraio del 1953 si sono iniziati in Italia gli studi per la costruzione di un sincrotrone per elettroni (elettrosincrotrone) da porsi a disposizione di tutti i fisici nucleari italiani.

Vogliamo anzitutto richiamare brevemente come si è arrivati a questa decisione, ed alla costituzione del centro che attualmente ha in istudio questa macchina.

Alla fine dell'estate del 1952 il prof. GILBERTO BERNARDINI ritornò in Italia dagli Stati Uniti, ove aveva svolto attività di ricerca nel campo della fisica mesonica presso alcuni centri dotati di grandi macchine nucleari. BERNARDINI, che veniva ad assumere la presidenza dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, (I.N.F.N.) allora istituito, propose di impegnare buona parte dei fondi a disposizione per costruire un elettrosincrotrone, di energia massima intorno ai 500 milioni di elettron-volt, da porsi a disposizione di tutti i fisici interessati alla fisica nucleare, con il quale fosse possibile iniziare anche in Italia quegli studi di fisica mesonica in laboratorio che sembrano essere la via maestra per arrivare alla comprensione delle forze nucleari.

Nella discussione che seguì tra i Direttori delle Sezioni dell'I.N.F.N. si concluse che probabilmente i fondi disponibili erano sufficienti, particolarmente se si teneva conto che una macchina quale un elettrosincrotrone di grande energia non si può realizzare in meno di tre o quattro anni, e che era lecito sperare che la dotazione dell'I.N.F.N. fosse ormai assicurata anno per anno. Il Comitato Direttivo dell'I.N.F.N. (e cioè i professori AMALDI, BERNARDINI, CALDIROLA, ROSTAGNI e WATAGHIN) decise pertanto che si costituisse un

centro di studi per realizzare il progetto e quindi il Sincrotrone Italiano, e mi invitò ad assumere il coordinamento di questo centro, ed a cercare i collaboratori adatti per esso.

Questo gruppo (Sezione Acceleratore) cominciò a vivere ed a lavorare verso la fine di marzo di quest'anno, ed io riferisco ora della sua attività.

La Sezione Acceleratore è attualmente composta da fisici che diremo maturi o più esperti, da giovani fisici, da ingegneri, da un amministratore e da altro personale tecnico e subalterno. Essa ha scelto come sua sede la città di Pisa, ma oltre che a Pisa l'attività della Sezione Acceleratore si svolge in altri centri. A Roma, presso l'Istituto Superiore di Sanità, è allo studio il progetto dell'iniettore del sincrotrone; esso è affidato ad un gruppo diretto dal prof. AGENO, del quale fanno parte i dottori CORTELESSA, QUERZOLI e l'ing. SCACCIA. A Roma, presso l'Istituto di Fisica dell'Università, lavora il gruppo diretto dal prof. PERSICO, con il quale collaborano i dottori BERNARDINI, TURRIN e SONA, quest'ultimo dell'Università di Firenze. A Firenze, presso il Centro per lo studio della Fisica delle microonde, sotto la guida del prof. CARRARA, lavora attualmente l'ing. PUGLISI, incaricato degli studi preliminari per l'accelerazione a radio frequenza. A Milano, presso l'Istituto di Elettrotecnica Generale del Politecnico, diretto dal prof. BOTTANI, lavorano ai modelli analogici della vasca elettrolitica l'ing. DADDA dell'Istituto di Elettrotecnica e l'ing. AMMAN, del nostro gruppo. Infine a Pisa lavorano, per i problemi di elettronica e per la realizzazione del vuoto e della ciambella nella quale circoleranno gli elettroni, i professori QUERCIA e TAGLIAFERRI, ed il dottor CORAZZA; lavorano al modello, al progetto definitivo del magnete ed alle misure in campo magnetico gli ingegneri SACERDOTI e CANARUTTO, ed io con loro.

Questo gruppo è naturalmente in aumento, e dovrà essere opportunamente irrobustito da meccanici, tecnici, disegnatori necessari per la realizzazione del sincrotrone.

Scopo finale della Sezione Acceleratore è il realizzare un sincrotrone funzionante a 500 milioni di elettron-volt o più, a seconda di quanto le nostre finanze permetteranno.

1.2. - Il nostro programma di lavoro è stato diviso in più parti, e di esso sino ad ora è stata svolta solo una piccola frazione. Si è pensato che un primo periodo di tempo, mettiamo da Marzo a Giugno o Luglio '53, doveva essere speso per il primo studio dei problemi connessi a questa macchina, e insomma per quella preparazione culturale che sostanzialmente mancava in ciascuno di noi.

In questo primo periodo sino a Luglio la Sezione Acceleratore si è avvalsa di un aiuto che è da considerarsi notevolissimo, e cioè dell'assistenza, della guida e della vera e propria istruzione che ci è stata impartita dal prof. MATTHEW

SANDS dell'Istituto Tecnologico di California, il quale è venuto nel 1952-53 all'Istituto di Fisica di Roma, a trascorrere un anno di studio. È stato appunto il contatto con il prof. SANDS che ci ha chiarito i problemi fondamentali, ed ha contribuito a darci la fiducia che in Italia si può realizzare un sincrotrone.

Una seconda fase della nostra preparazione è consistita in un viaggio di informazione all'estero, prima per alcuni giorni in Inghilterra (QUERCIA e SALVINI), poi per un periodo più lungo negli Stati Uniti.

Scopo del viaggio è stato quello di informarsi a fondo sulla situazione là esistente, di stabilire rapporti di lavoro con i gruppi realizzatori di sincrotroni negli Stati Uniti, e sapere quale effettivamente era la situazione delle grandi macchine americane, quali erano i problemi e le difficoltà fondamentali per realizzare un sincrotrone per elettroni, quali erano i fisici e gli ingegneri americani con i quali la collaborazione era più conveniente ed opportuna, quali erano i procedimenti tecnici ed industriali seguiti per portare a compimento un impianto tanto complesso, come si poteva impostare un piano finanziario e quanto era possibile prevedere le effettive spese una volta che si fosse compiuto il progetto.

Inoltre era scopo del nostro viaggio sapere quali sono le ricerche attualmente in corso con gli elettrosincrotroni e quali sono le ricerche in corso con altre macchine acceleratrici, ed assicurarsi che veramente un elettrosincrotrone è la macchina più conveniente oggi per l'Italia, tenendo conto del costo e delle ricerche attualmente in corso ed in vista di quelle che con essa si potranno svolgere nel prossimo futuro.

Ma non è molto facile avere in pochi mesi un « visto » per gli Stati Uniti, e quindi proprio per questa ragione ci siamo ridotti nel mese di Luglio ad un programma meno esteso. Il viaggio di informazione è stato compiuto dal prof. BERNARDINI e da me, ed è terminato due giorni or sono.

Io riferisco appunto oggi sulla situazione attuale delle macchine nucleari nel mondo, sul lavoro che sino ad ora si è svolto nella nostra Sezione, e sulla situazione generale quale è apparsa dopo il viaggio negli Stati Uniti.

## 2. - Le informazioni raccolte nei nostri viaggi.

2.1. - È nota ormai a tutti i fisici nelle sue grandi linee la situazione delle grandi macchine acceleratrici, ed è noto come è nato il sincrotrone. L'idea venne, indipendentemente, nel 1945, al russo VEKSLER (1) ed all'americano McMILLAN (2). Essi intuirono e descrissero analiticamente la possibilità che intervenga una spontanea stabilità di fase fra il periodo di rotazione delle

(1) V. J. VEKSLER: *Journ. Phys. USSR*, **9**, 153 (1945).

(2) E. M. McMILLAN: *Phys. Rev.*, **68**, 143 (1945).

particelle che si muovono entro il campo magnetico di guida e la cavità acceleratrice che ad ogni giro aumenta la loro energia.

Queste vie nuove permisero di affrontare i limiti di alta energia che sembravano ormai irraggiungibili con i già esistenti ciclotroni e con i betatroni: nei ciclotroni, come è noto, il limite era segnato dalla variazione relativistica della massa della particella con la velocità; nei betatroni appariva difficile superare i 200-300 MeV in quanto che diventano enormi le quantità di flusso che occorre fornire durante l'accelerazione.

Il principio di stabilità di fase può applicarsi a magneti di forme diverse o del tipo dei precedenti ciclotroni, nei quali le traiettorie hanno raggi crescenti con l'energia, o del tipo all'incirca dei betatroni, nei quali le traiettorie hanno raggio circa costante. Ai primi, come è ben noto, si dà il nome di sincrociclotroni, mentre si dà il nome di sincrotroni a quelle macchine che accelerano le particelle con il sincronismo suddetto su traiettorie a raggio circa costante <sup>(3)</sup>.

Il nuovo principio venne impiegato per la prima volta in una grande macchina nucleare nel 1947, a Berkeley, impiegando un magnete da 181 pollici che era già in costruzione per un grande ciclotrone.

Si raggiunse così il primo grande obiettivo della fisica nucleare di grande energia, e cioè la creazione in laboratorio dei mesoni  $\pi$ . Da allora i progressi sono continuati rapidi: dai primi mesoni ottenuti, ancora al di sotto della soglia di produzione, sfruttando l'energia cinetica interna del nucleo, si è arrivati a macchine che possono produrre non solo mesoni di energia cinetica zero, o molto bassa, ma anche mesoni di energia di 100, 200, 500 MeV: macchine che possono ormai, tra l'altro, creare più mesoni per volta.

Il progresso si è svolto in più direzioni: si sono create macchine che possono dare fasci di mesoni di grande intensità, quale ad esempio il grande sincrociclotrone dell'università di Chicago, e macchine che possono dare mesoni di alta energia cinetica, addirittura di 1000, 1500 MeV, quali ad esempio il famoso cosmotrone di Brookhaven. Sia l'una che l'altra sono macchine che accelerano direttamente protoni, e nelle quali i mesoni si ricavano per urto di questi protoni contro nuclei opportuni.

Più snelle, e sotto molti riguardi diverse, sono invece quelle macchine che permettono lo studio della fisica nucleare essenzialmente utilizzando i fotoni; quelle macchine cioè che non accelerano protoni, ma elettroni, i quali a loro volta, per urto ed irradiazione contro opportuni nuclei, danno vita a fasci di fotoni che sono appunto quelli che servono per gli studi di fisica nucleare.

Chiameremo queste macchine per elettroni elettrosincrotroni (e.s.), mentre

<sup>(3)</sup> Per uno studio dei principi fondamentali della accelerazione in risonanza vedi M. S. LIVINGSTONE: *Advances in Electronics*, I, Cap. VI (New York, 1948).

riserviamo il nome di protosincrotroni ai sincrotroni per protoni. Non ci occuperemo nel seguito dei sincrociclotroni, ai quali si è prima accennato.

2.2. - Un quadro di insieme dei principali sincrotroni esistenti, di energia maggiore di 300 MeV, è dato nella Tabella I riportata nelle due pagine seguenti. Inoltre nella fig. 1 abbiamo schizzato alcuni disegni che rappresentano i tre tipi fondamentali di sincrotroni oggi esistenti. Precisamente in fig. 1a è rappresentato il tipo con magneti a sezione a C e intraferro interno; in

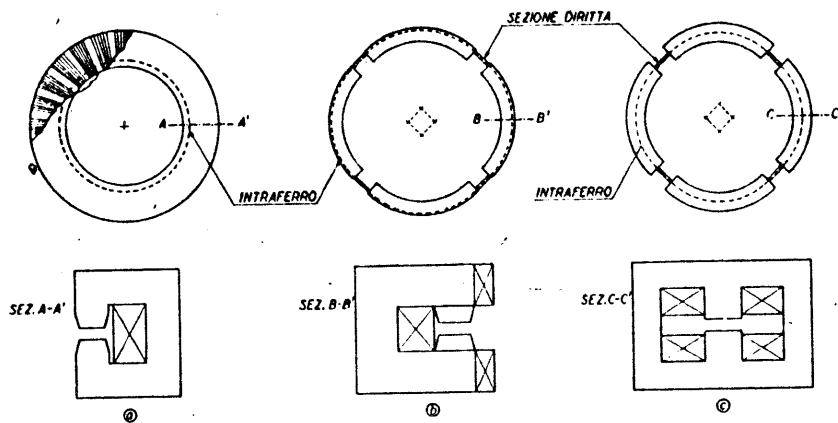


Fig. 1. - Tre schizzi rappresentanti le strutture fondamentali impiegate nella realizzazione dei magneti per i sincrotroni di grande energia ( $> 300$  MeV): a) Tipo a C con intraferro all'interno; b) Tipo a C con intraferro all'esterno; c) Tipo a H con intraferro al centro.

fig. 1b è il tipo a con sezione C con intraferro esterno; in fig. 1c è il tipo a sezione ad H e intraferro nell'interno della H. Il principio di funzionamento è naturalmente lo stesso per tutti questi tipi (\*). Le particelle percorrono traiettorie di raggio circa costante nel centro dell'intraferro.

Cominciamo dalle energie più basse, ed ecco che vengono primi, sia nel tempo che nella scala delle energie, i sincrotroni da 300 MeV, sincrotroni tutti per elettroni, ed ormai quasi tutti funzionanti. Sono i sincrotroni americani delle Università di California, di Cornell, di Massachusetts (MIT), di Michigan ed il sincrotrone inglese dell'Università di Glasgow. Può essere curioso ricordare perchè questi sincrotroni furono progettati quasi contemporaneamente (nel 1946-47) e tutti per una energia poco superiore ai 300 MeV: a quei tempi si pensava al mesone  $\mu$ , e non ancora al mesone  $\pi$ . Ora 300 MeV circa è l'energia che occorre per produrre con fotoni contro nuclei una coppia di mesoni  $\mu$ , e vi erano ragioni per pensare che i mesoni  $\mu$  fossero creati in coppie. È curioso

(\*) Un'ampia rassegna sui sincrotroni, ricca di dati ed elementi costruttivi si trova in *Annual Review of Nuclear Science*, 1, 169-198 (1952).

TABELLA I. - Quadro d'insieme degli elettrosincrotroni e dei protosincrotroni di grande energia ( $\geq 300$  MeV) in funzione od in avanzata costruzione negli Stati Uniti ed in Inghilterra.

Caratteristiche	Macchina	322 Cal. (1)	300 Cornell (2)	330 MIT (3)	400 Glasgow (4)	300 Mi (5)
<b>Magnete:</b>						
— tipo . . . . .	a 3 gambe come i ciclotroni		cfr. fig. 1a)	cfr. fig. 1a)	cfr. fig. 1a)	cfr. fig. 1c)
— peso ferro (tonnellate) . . . . .	135		75	50	120	12,5
— peso rame (tonnellate) . . . . .	1,75		1,8	1	3	—
— indice $n$ del campo . . . . .	0,67		0,67	0,7	0,7	0,6
— raggio dell'orbita d'equilibrio (m) . . . . .	1		1	1,02	1,25	1
— altezza intraferro (cm) . . . . .	9,4		8,2	7,3	10	8,7
— larghezza intraferro (cm) . . . . .	12		14	8,8	20	17
— numero dei settori . . . . .	—		—	—	—	4
— lunghezza sezioni diritte (m) . . . . .	0		0	0	0	0,75
<b>Excitazione magnete:</b>						
— tipo . . . . .	a impulsi (condensatori)		alternata	a impulsi (condensatori)	a impulsi (condensatori)	alternata (condensatori)
— impulsi al secondo . . . . .	6		30	2	5	20
<b>Radiofrequenza:</b>						
— tipo di oscillatore . . . . .	autoeccitato(c.l.c) cavo coassiale		autoeccitato(c.l.c) cavo coassiale	autoeccitato(c.l.c) cavo coassiale	autoeccitato(c.l.c) cavo coassiale	autoeccitato(c.l.c) cavità risonante
— tipo di cavità acceleratrice . . . . .	47,7		47,5	46,5	38	32,1
— frequenza massima (MHz) . . . . .						
<b>Iniezione:</b>						
— preaccelerazione a betatrone . . . . .	sì		sì	sì	sì	no
— energia di iniezione (keV) . . . . .	100		80	80	—	500
— tipo iniettore alta energia . . . . .	no		no	no	no	trasformatore d'impulsi
<b>Energia massima (MeV) . . . . .</b>	322		300	330	350	300

(1): Elettrosincrotrone dell'Università di California (Berkeley) da 322 MeV. — (2): Elettrosincrotrone dell'Università di Cornell (Ithaca) da 300 MeV. — (3): Elettrosincrotrone del Massachusetts Institute of Technology. — (4): Elettrosincrotrone dell'Università di Glasgow (Glasgow) (in costruzione). — (5): Elettrosincrotrone dell'Università di Michigan (Ann Arbor).

TABELLA I (seguito).

	Macchina	500 Caltech (6)	1200 Cornell (7)	3500 Cosmotron (8)	1000 Birmin. (9)	6000 Bevatron (10)
<b>Caratteristiche</b>						
<b>Magnete:</b>		cfr. fig. 1c	cfr. fig. 1b	cfr. fig. 1b	cfr. fig. 1b	cfr. fig. 1c
— tipo . . . . .		135	20	1650	—	?
— peso ferro (tonnellate) . . . . .		20	5	70	—	?
— peso rame (tonnellate) . . . . .		0,6	0,6	~0,6	0,7	0,6
— indice $n$ nel campo . . . . .		3,50	3,81	9,15	4,50	15
— raggio dell'orbita di equilibrio (m) . . . . .		~25 (*)	4,2	20	10	~30
— altezza intraferro (cm) . . . . .		~100 (*)	10	70	35	~120
— larghezza intraferro (cm) . . . . .		4	4	4	—	4
— numero dei settori . . . . .		1	1	3,30	0	4,5
— lunghezza sezioni diritte (m) . . . . .						
<b>Eccitazione del magnete:</b>		a volano	alternata+c.c.	a volano	a volano	a volano
— tipo . . . . .		1	30	0,25	0,1	0,15
— impulsi al secondo . . . . .						
<b>Radiofrequenza:</b>		eccitato ad am- plificatore (cl. C)	autoeccitato(cl.C)	amplificatore a larga banda	amplificatore a larga banda	?
— tipo di oscillatore . . . . .		cavità risonante	cavità risonante	a induzione e.m.	tipo ciclotrone	?
— tipo di cavità acceleratrice . . . . .		20,3	64	4,2	9,6	2,5
— frequenza massima (MHz) . . . . .						
<b>Iniezione:</b>		no	no	no	no	no
— preaccelerazione a betatrone . . . . .		1000	2000	3600	500	10000
— energia di iniezione (keV, cinetica) . . . . .		trasformatore	Van de Graaff	Van de Graaff	Cockroft-Walton	acceleratore lineare
— tipo iniettore alta energia . . . . .		d'impulsi				
<b>Energia massima (MeV) . . . . .</b>		500	1200	3500	1300	~6000

(6): Elettrosincrotrone dell'Istituto di Tecnologia di California (Caltech). — (7): Elettrosincrotrone dell'Università di Cornell (Ithaca) da 1200 MeV in costruzione. — (8): Protosincrotrone del Laboratorio Nazionale di Brookhaven da 3500 MeV. — (9): Protosincrotrone dell'Università di Birmingham (Birmingham) da 1000 MeV. — (10): Protosincrotrone dell'Università di California (Berkeley) da 5-6000 MeV. — (\*) Si intende la zona dell'intraferro con  $n \approx 0,6$ .



pensare oggi a questa ragione, oggi che sei anni sembrano già storia lontana, perchè tutto si è cercato con queste macchine, ma l'unica cosa della quale non ci si è ancora preoccupati è appunto lo studio della creazione delle coppie di mesoni  $\mu$ , anche se molte volte, e da molte parti, si è detto che questo studio può essere molto interessante.

Il primo in ordine di tempo, ed il primo posto in funzione, è il sincrotrone di California (4): esso ancora conserva la struttura a tre gambe dei ciclotroni, per quanto sia costruito in lamierino da trasformatori, ed ha un peso notevolmente maggiore dei suoi pari in energia (cfr. Tab. I).

I tre successivi (300 Cornell, 330 MIT, 400 Glasgow) segnano già un notevole progresso di struttura: il magnete ha perso quella tipica forma «a ciclotrone» che ha ispirato l'architettura dei sincrotroni alla loro origine, ed ha guadagnato notevolmente di peso e di eleganza. La ciambella ove gli elettroni vengono accelerati corre all'interno ed il contorno esterno del sincrotrone è delimitato dai dorsi dei grandi C di lamierino magnetico (cfr. fig. 1a).

Un sincrotrone che indica un progresso tecnico rispetto a questi ora detti, è il sincrotrone a sezioni diritte (racetrack, proposto da H. R. CRANE (5)), dell'Università di Michigan. In esso, come in tutti i seguenti, l'iniezione è veloce ed è eliminata l'accelerazione con fase di betatrone. Questo sincrotrone fu iniziato nel '47, ed è pronto solo da pochi mesi; è il primo che possiede la struttura dei sincrotroni quali adesso si progettano e costruiscono: esso è del tipo indicato in fig. 1c.

Proseguendo nel nostro esame riassunto in Tab. I, incontriamo il gigante tra i sincrotroni per elettroni funzionanti oggi nel mondo. Esso è il sincrotrone dell'Istituto di Tecnologia di California (Caltech), anch'esso del tipo di fig. 1c. Questo elettrosincrotrone ha cominciato a rendere, cioè a dare risultati sperimentali ai fisici nucleari, proprio quest'estate mentre BERNARDINI ed io eravamo sul luogo. È un sincrotrone con una strana storia, che in un certo senso fa bene sperare per queste macchine. Infatti il sincrotrone di Caltech è stato realizzato con un magnete che in realtà era stato costruito come modello, in scala 1 : 4, dell'enorme magnete per il protosincrotrone di Berkeley (il quale è in costruzione e sarà pronto per la fine dell'anno o per l'inizio dell'anno venturo). Di conseguenza questo elettrosincrotrone è stato fatto usando un magnete in molti riguardi sproporzionato, e cioè eccessivo per dimensioni e per peso. Il magnete è diverso da quello di ogni altro sincrotrone per elettroni, in quanto che non è costruito in lamierino sottile ma in lamiera spessa (circa 1 cm), come normalmente si costruiscono le macchine per protoni, e non è eccitato con un banco di condensatori, ma con un grande generatore connesso ad un volano. È questo un sincrotrone dove l'economia tra ferro e rame non è la soluzione migliore, ed il campo magnetico massimo non è limitato dalla

(4) H. R. CRANE: *Phys. Rev.*, **69**, 542 (1946).

saturazione del ferro, ma piuttosto dalla potenza di eccitazione, poichè infatti si arriva ad un campo massimo dell'ordine di 5 000 gauss. Col sincrotrone di Caltech si è arrivati sino ad ora a portare gli elettroni a 500 MeV di energia o poco più, e questo è il record attuale tra gli elettrosincrotroni. Ebbene, è interessante osservare che questo elettrosincrotrone non convenzionale è forse, e senza forse, l'elettrosincrotrone che oggi funziona meglio nel mondo. Le ragioni di questo sono l'alto livello tecnico e l'entusiasmo con cui si lavora a Caltech, ma si può anche dire che questo risultato fa bene sperare nella latitudine di scelta che si presenta nella realizzazione di una macchina nucleare.

2.3. - Passiamo ora, sempre nel quadro delle macchine già funzionanti, ai protosincrotroni. Se il sincrotrone di Caltech è il massimo acceleratore di elettroni, il gigante di tutte le macchine nucleari funzionanti è il protosincrotrone di Brookhaven (cfr. Tab. I).

Il protosincrotrone di Brookhaven (\*) meriterebbe un discorso piuttosto lungo, e francamente ammirativo. Questa macchina, che funziona ormai da quasi un anno, ed ha cominciato a dare proprio ora risultati di enorme interesse, rappresenta, rispetto a tutte le macchine precedenti, un atto di maggior perfezione tecnica, di maggiore economia, e di maggior coraggio. La maggiore perfezione tecnica vi è in ogni particolare; nella precisione e dotazione dei servizi, ma soprattutto nella accuratezza con la quale si sono compiute le misure fondamentali che garantiscono il successo di una macchina, ed essenzialmente le misure di campo magnetico. Gli ingegneri ed i fisici costruttori sapevano che stavano costruendo una macchina difficile e che avrebbe dovuto funzionare in condizioni di lavoro più severe delle altre, e pertanto hanno misurato ogni cosa, con un vero e proprio istituto di misure, curato in ogni particolare. È noto, come dicono i fisici costruttori, che una macchina nucleare non può valere più del suo magnete, e quindi ogni sforzo è stato dedicato a questo magnete. Si sono misurate la componente verticale e la componente orizzontale del campo magnetico nella posizione dell'orbita stabile ed intorno ad essa; si è misurato con gran cura il campo magnetico anche all'esterno della ciambella; si è misurato il campo magnetico lungo le sezioni diritte; ed ognuna di queste misure è stata fatta con precisione maggiore che nei sincrotroni precedenti. Si è lavorato quindi molto ed a lungo sulle misure magnetiche, cioè almeno per un anno, ma questo tempo è stato ampiamente riguadagnato se si pensa che soltanto poche settimane dopo i primi tentativi i protoni già erano accelerati sino ad energie di circa un centinaio di milioni di elettron-volt.

Nel nostro viaggio negli Stati Uniti di quest'estate abbiamo trascorso alcuni giorni a Brookhaven, presso il cosmotrone, più di quanto non comportasse

(\*) *Review of Scientific Instruments*, 24, n. 9 (Settembre 1953). Questo numero è interamente dedicato al «cosmotrone», come vien detta questa macchina.

il fatto che questa macchina era per protoni e non per elettroni, e quindi non aveva quei particolari che più specificamente a noi occorrono, e che altre macchine invece hanno, e proprio per cogliere i punti fondamentali ed i particolari più interessanti di questa elevatissima perfezione tecnica con la quale a Brookhaven si è lavorato. Noi crediamo di poter dire che se noi sapremo misurare le grandezze con le quali avremo a che fare, come le hanno misurate a Brookhaven, la nostra macchina funzionerà.

Il cosmotrone di Brookhaven rappresenta anche una economia. Infatti le dimensioni dell'intraferro del sincrotrone sono relativamente più piccole di quelle di qualunque altra macchina. Se si fosse dovuto realizzare il cosmotrone usando le stesse ampiezze di intraferro relative che si sono usate per le macchine nucleari precedenti, il cosmotrone, già enorme, sarebbe stato ancora più grande e con un peso almeno triplo o quadruplo, ed avrebbe richiesto una energia per l'eccitazione del magnete almeno doppia.

Ed infine questa macchina rappresenta un atto di coraggio. Basti pensare che quasi contemporaneamente al cosmotrone di Brookhaven presso il Radiation Laboratory di Berkeley si iniziò la costruzione di un sincrotrone per protoni ancora più grande, ma con un'ampiezza di intraferro assolutamente enorme. L'ordine logico delle cose era di costruire prima questo sincrotrone a grande intraferro di Berkeley, e soltanto se questo avesse funzionato di costruire il cosmotrone di Brookhaven ad intraferro più piccolo. Nel corso di questi anni, e per varie ragioni, la precedenza si è invertita, sicchè noi osserviamo questo fatto curioso, che la macchina più coraggiosa e più difficile ha funzionato prima, e forse molto tempo prima, dell'altra.

2.4. - Quanto abbiamo detto sin qui riguarda i sincrotroni funzionanti e che anzi già stanno dando risultati nucleari, cui fra poco accenneremo, di notevolissimo interesse. Ma parliamo un poco dei progetti e delle macchine in costruzione nel mondo, quindi parliamo ora dell'elettrosincrotrone presso il quale BERNARDINI ed io ci siamo fermati più a lungo nel nostro viaggio negli Stati Uniti, e sul quale è molto puntata la nostra attenzione: è questo l'elettrosincrotrone da 1200 milioni di elettron-volt che si sta costruendo attualmente all'Università di Cornell. Il prof. WILSON ne è il principale progettista ed il maggiore responsabile.

In fig. 2a e 2b è data la sezione di questo sincrotrone, mentre in fig. 2c è data una vista dall'alto. Come si vede, questa macchina è del tipo di fig. 1b, ed è la macchina per elettroni di massimo raggio sino ad ora costruita.

Subito si nota che questo è un sincrotrone molto audace, ed anche economico, relativamente ancor più economico, ad esempio, del cosmotrone di Brookhaven. Dalla Tab. I si vede che questo sincrotrone da 1200 MeV peserà meno di quello già esistente e funzionante alla Cornell University, da 300 MeV.

Infatti, come appare ancora dalla Tab. I, è la prima volta che si osa un'apertura relativa tanto piccola in una macchina nucleare.

Per meglio visualizzare la questione delle aperture relative, abbiamo rappresentato in fig. 3 la sezione di alcune macchine nucleari, assumendo per

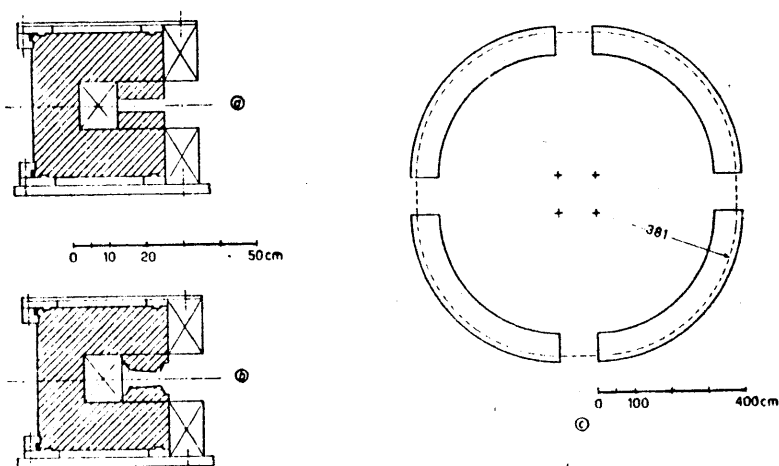


Fig. 2. - Schizzo di massima rappresentante il magnete del sincrotrone dell'Università di Cornell da 1200 MeV. In *a*) è data la sezione per il caso a foceggiamento debole ( $n = .6$ ). In *b*) è data la sezione per il caso a foceggiamento forte ( $n = \pm 21$ ). In *c*) è la vista del magnete dall'alto.

ciascuna quale unità di misura il suo raggio: una macchina nucleare più «audace» di un'altra, nel senso ora detto, appare quindi con un intraferro (gap) più piccolo dell'altra. Il confronto dato in fig. 3 è solo indicativo: in realtà l'«ammettenza» (admittance) di un sincrotrone non dipende solo dalla sua ampiezza relativa, ma anche dalle sue dimensioni assolute.

Il sincrotrone da 1200 MeV della Cornell University raggiungerà un costo confrontabile, se pure un poco maggiore, con i fondi che attualmente abbiamo a disposizione. Noi non possiamo permetterci attualmente in Italia, di osare quanto WILSON con questo suo sincrotrone estremamente economico sta osando e questo per la nostra minore esperienza tecnica, e per il carattere di unicità della nostra impresa; ma naturalmente se questo sincrotrone funzionerà, noi potremo partire da una base di fatto che ci permetterà una notevole economia anche se il nostro progetto potrà differire da quello dell'Università di Cornell in vari particolari.

Quando, in quest'ultimo Luglio, BERNARDINI ed io siamo stati alla Cornell University, si erano iniziate le prime prove per fare circolare gli elettroni nell'intraferro del magnete almeno per i primi giri. Come è noto questi sono i primi passi per ottenere il fascio accelerato, ed i passi successivi sono poi l'accelerare gli

elettroni iniettati e via via spingersi sino ad energie sempre più alte, sin che si raggiunge l'energia massima di funzionamento della macchina. Queste prime prove, estremamente interessanti per noi, sono state fatte con idee chiare, ma di corsa, con furia, con una filosofia diversa da quella che normalmente si impiega nella sperimentazione complessa. Una tecnica molto interessante, per così dire, dell'attacco diretto e senza molti complimenti del problema, pronti se mai a ripiegare o rimeditare se questo primo attacco non ha suc-

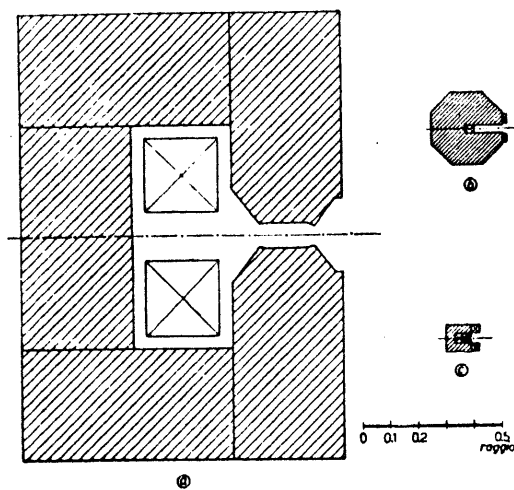


Fig. 3. Sezioni dei magneti di alcuni sincrotroni esistenti o in funzione. Ciascuno di questi magneti è stato disegnato prendendo ad unità di misura il suo raggio dell'orbita di equilibrio, e quindi tutti i magneti hanno nella figura lo stesso raggio. La figura permette di stimare in prima approssimazione l'« audacia » con la quale si è scelta la dimensione dell'intraferro. (La figura è solo indicativa, perchè in realtà il rendimento di una di queste macchine — a parità di apertura relativa — dipende anche dalle dimensioni assolute dell'intraferro e dalla energia di iniezione). I magneti rappresentati sono: in *a*) il magnete del 300 Cornell (cfr. Tab. I); in *b*) il magnete del 3500 Cosmotron (cfr. Tab. I); in *c*) il magnete del 1200 Cornell (cfr. Tab. I).

cesso. L'attacco era in corso quando io sono ripartito, e non seppimo prima di alcuni mesi dell'esito di questa macchina.

Ma non debbo dimenticare una informazione, di carattere fondamentale. Questo sincrotrone in preparazione a Cornell presenta, rispetto ai precedenti, alcuni vantaggi notevolissimi; tra questi la semplicità di montaggio e di verifica, e la possibilità di cambiare i poli che si affacciano sulla ciambella. Questa possibilità è stata suggerita dal recente progresso nello studio della focalizzazione delle orbite elettroniche o cioè dall'invenzione del foceggiamento forte. Infatti i poli del sincrotrone di Cornell sono facilmente sostituibili ed è possibile passare dai poli convenzionali a foceggiamento debole, ai poli a foceggiamento forte. Il foceggiamento forte dei poli che WILSON ha adesso posto in opera è un foceggiamento forte per un valore relativamente basso di  $n$ , intorno a 21. Esso non è quindi un foceggiamento forte a gradiente molto spinto, quale quello che si è pensato, o forse si può dire sognato, nei primi lavori sul foceggiamento forte, quando si è parlato di indici del campo (che si indicano con  $n$ ) di parecchie centinaia o migliaia. Il prof. WILSON è pronto

a tornare al focheggiamento debole con nuovi poli, se questo tentativo con poli a focheggiamento forte non avrà successo.

Altri centri ed altri paesi stanno pensando di raggiungere il miliardo di elettron-volt con elettrosincrotroni. Citiamo il programma di profonde modifiche, o diciamo addirittura di ricostruzione, che ha il Caltech nei riguardi del proprio sincrotrone funzionante a 500 MeV, quello del quale abbiamo parlato prima. Infatti si progetta di inserire dei poli entro l'attuale cavità. Con questo la regione utile del campo verrà di molto ridotta, ma si potrà raggiungere un campo molto più elevato, di circa 10 000 gauss, anziché gli attuali 5 000, e si potrà quindi arrivare ad almeno un miliardo di elettron-volt.

Un altro sincrotrone per elettroni da un migliaio di MeV, ma il cui progetto è molto meno avanzato, è allo studio nella Svezia. A Stoccolma si sta studiando un sincrotrone che impieghi decisamente, diciamo in modo irreversibile, se reversibile era la maniera del prof. WILSON di Cornell, i criteri del focheggiamento forte.

Eccoci dunque anche noi nel pieno di quella discussione o quasi polemica, che oggi si sta facendo in tutto il mondo tra focheggiamento debole e focheggiamento forte (?). Naturalmente si è discusso molto di ciò, in questi mesi, sia direttamente con gli scopritori del focheggiamento forte, ai quali siamo debitori di molti suggerimenti, che con altri esperti di macchine nucleari. Possiamo dire che in generale si pensa che il focheggiamento forte non sia molto conveniente per macchine di raggio relativamente piccolo, per esempio sotto i cinque metri, quali gli elettrosincrotroni esistenti o in progetto. Infatti in questo caso il valore dell'indice  $n$  non può essere elevato (difficilmente può essere  $n > 50$ ) ed il focheggiamento debole resta allora validamente in gara, poiché può riuscire a compensare le più ampie oscillazioni di betatrone con la minore sensibilità alle imperfezioni del magnete. D'altra parte vi è in corso l'esperimento del sincrotrone a focheggiamento forte dell'Università di Cornell, e tra pochi mesi avremo una risposta sperimentale su questa difficile questione.

In quanto a noi, poi, possiamo dire, in conclusione, che ancora non abbiamo deciso quale focheggiamento usare: ma che la scelta cadrà sulla focalizzazione forte solo se essa apparirà sicuramente conveniente, altrimenti potremmo esporci ad un rischio non necessario in vista di un vantaggio non notevole e non sicuro. Naturalmente è sempre un po' triste e non persuade mai del tutto il rinunciare ad una direzione di lavoro molto promettente se pure un po' confusa, in favore delle idee vecchie, che come spesso accade sono le idee più chiare. Si comprendono quindi le attuali incertezze della nostra Sezione.

(?) E. D. COURANT, M. S. LIVINGSTONE and H. S. SNYDER: *Phys. Rev.*, **88**, 1190 (1952).

Terminata questa rapida scorsa dei sincrotroni esistenti, parliamo ora un poco del nostro progetto, inquadrandolo nella attività mondiale delle macchine nucleari delle quali si è cercato di fronteggiare la situazione attuale.

### 3. - Attività della Sezione Acceleratore per la definizione del progetto.

3.1. - Dopo i viaggi in Inghilterra e negli Stati Uniti noi abbiamo gli elementi fondamentali per esaminare il nostro progetto e giustificare la nostra scelta.

Cominciamo dalla questione fondamentale: perchè un elettrosincrotrone, e non ad esempio un acceleratore lineare o un protosincrotrone? Noi possiamo dividere le macchine nucleari in macchine per protoni e macchine per elettroni. Le macchine per protoni sono, a parità di energia e di intensità, più pesanti e molto più costose delle macchine per elettroni: poichè a tutt'oggi la Fisica degli elettroni veloci e dei loro fotoni non è meno interessante della Fisica dei protoni, il Consiglio Direttivo dell'I.N.F.N., in base ad una stima anche approssimativa dei costi, ha ritenuto di scegliere una macchina per elettroni di alta energia. Questa ragione, economica, è stata preponderante nel restringere la nostra scelta alle macchine per elettroni. D'altronde accenneremo nel seguito alla Fisica estremamente interessante che si sta facendo con i fotoni.

Ed eccoci allora alla questione subordinata alla prima: gli elettroni di alta energia si possono ottenere con acceleratori lineari<sup>(\*)</sup> (prof. PANOFSKY, Università di Stanford, California), oppure con sincrotroni per elettroni. Perchè scegliere un elettrosincrotrone invece di un acceleratore lineare? Quali sono i vantaggi e le difficoltà per l'uno e per l'altro?

La massima energia sino ad ora raggiunta con gli acceleratori lineari è circa 400 MeV; la massima energia raggiunta con gli elettrosincrotroni (all'Istituto Tecnologico di California, come si è detto) è di circa 500 MeV. I due tipi di macchine per elettroni hanno prestazioni notevolmente diverse: accenniamo qui alle fondamentali differenze di impiego nel campo delle alte energia ( $> 400$  MeV).

a) Il fascio di elettroni uscente da un acceleratore lineare è meglio collimato che quello che si può sperare di ottenere da un elettrosincrotrone. Se occorre un fascio rettilineo, questo fascio è di gran lunga più intenso e preciso in un acceleratore lineare.

b) Il fiotto di elettroni (o fotoni) uscente da un acceleratore lineare ha una durata di pochi microsecondi; invece nell'elettrosincrotrone (ad esempio in quello di Caltech dianzi citato) il fiotto può durare 5000 microsecondi o

(\*) *Annual Review of Nuclear Science*, 1, 199-206 (1952).

anche più. Questo permette negli elettrosincrotroni una sperimentazione con rivelatori del tipo delle coincidenze dei contatori che diviene molto più difficile con gli acceleratori lineari.

e) La fatica di manutenzione di un acceleratore lineare è maggiore (negli Stati Uniti) che la corrispondente fatica per un elettrosincrotrone. Le difficoltà tecniche per costruire un acceleratore lineare sono molto maggiori di quelle per ottenere un elettrosincrotrone, specialmente in vista delle estrema cura e specializzazione per la realizzazione dei klystron, necessari agli acceleratori lineari.

L'esame di questi fatti fondamentali porta alla conclusione che gli acceleratori lineari sono più adatti degli elettrosincrotroni per le ricerche che si vogliono compiere usando direttamente il fascio di elettroni. Ricordiamo in proposito le brillanti esperienze in corso di PANOFSKY e HOFSTADTER sulle interazioni nucleo-elettrone.

Invece è ancora da preferire sotto molti riguardi l'elettrosincrotrone nelle interazioni foto-nucleari, soprattutto per quanto si è detto in *b)*, e perchè è possibile ottenere anche dagli elettrosincrotroni un fascio di fotoni ben collimato. Quanto sopra vale bene inteso sino ad energie dell'ordine dei 1000-1500 MeV. Se si vanno a considerare energie molto maggiori (non ancora in vista per gli elettroni nè negli Stati Uniti, nè in Europa), allora è da prevedere da un certo punto in poi la superiorità degli acceleratori lineari, poichè in essi le perdite per irraggiamento durante l'accelerazione sono quasi trascurabili, mentre come è noto queste perdite diventano imponenti nelle macchine circolari per elettroni.

Per quanto riguarda le difficoltà di realizzazione in Italia dell'una o dell'altra macchina si può osservare quanto segue. In un elettrosincrotrone il magnete costituisce il pezzo di massimo impegno, e si richiede per esso una industria di costruzioni elettromeccaniche di elevatissima capacità. In un acceleratore lineare i problemi fondamentali sono di elettronica, ed anzi di elettronica di altissimo rango: basti dire che all'Università di Stanford, PANOFSKY impiega quali generatori di campo elettromagnetico dodici klystron ciascuno di 20 Megawatt di picco, e che la vita media di ognuno di questi klystron sino ad ora raggiunta è soltanto di 1000 ore, dopo di che il klystron torna all'officina per quasi un mese. Ora è da dire che in Italia l'elettronica non è purtroppo altrettanto avanzata che l'elettromeccanica; ed è perciò che alla fine del nostro viaggio, e dopo aver visitato l'uno e l'altro tipo di macchine, con i laboratori annessi, siamo arrivati alla conclusione che oggi in Italia è da preferirsi la costruzione di un elettrosincrotrone. Questa decisione a posteriori concorda con la decisione raggiunta nel Marzo '53 dall'I.N.F.N. È da dire che essa rientra anche nella categoria delle decisioni da prendersi per non restare fermi, e se si vuole evitare di costruire in un tempo infinito una macchina infinita-



mente bella. Non è detto, a tutt'oggi, che la decisione opposta, cioè di costruire un acceleratore lineare, sarebbe un netto errore. Parliamo dunque del nostro sincrotrone.

3.2. - Dopo il primo periodo di preparazione culturale e di studio noi abbiamo iniziato, nell'Aprile 1953, il progetto per un elettrosincrotrone da 600 MeV. Questa energia era circa la massima compatibile con i fondi a nostra disposizione.

Con questa energia avremmo potuto, ad esempio, esplorare le interazioni fotone-nucleone a lunghezze d'onda minori di quelle sino ad ora raggiunte, là dove le sezioni d'urto per fotoproduzione di mesoni sembrano calare con un ritmo ancora ignoto. Avremmo anche potuto estendere quel confronto tra i processi di diffusione mesone-nucleone (che si studiano con i protosincrotroni e i sincrociclotroni), ed i processi di fotoproduzione, un confronto che sta tanto contribuendo a chiarire la struttura dei campi nucleari (\*).

Questo progetto non era neppure allora, nelle nostre intenzioni, definitivo, ma ci era necessario anche per appoggiare su basi solide i nostri problemi, e per iniziare il dialogo con la nostra industria, per stabilire tra l'altro se essa era all'altezza delle difficoltà prevedibili.

I dati fondamentali relativi al nostro sincrotrone da 600 MeV sono riportati in Tab. II, colonna (2); un disegno di massima è dato in fig. 4. Come si vede abbiamo tenuto dimensioni piuttosto generose, diciamo di sicurezza, per quanto riguarda raggio dell'orbita e peso del magnete. Il tipo è a ciambella esterna (fig. 1b), come ad esempio il cosmotrone di Brookhaven e l'elettrosincrotrone di Cornell, affinché, tra gli altri vantaggi, più comoda possa risultare l'estrazione del fascio.

Come si vede in Tab. II il nostro sincrotrone è del tipo a foccheggiamento debole: infatti, sin che il raggio si aggira sui due metri, e l'energia è ancora notevolmente al di sotto di un GeV, noi riteniamo che il foccheggiamento debole sia senz'altro il più conveniente. Ma, come diremo tra poco, è per noi enormemente conveniente raggiungere i 1000 MeV, e noi speriamo di abbandonare il modello scuola da 600 MeV del quale sto parlando, per sostituirlo con uno di maggiore energia.

I nostri studi per il modello da 600 MeV verranno illustrati in altra Sezione del Congresso. Ricordo soltanto che la posizione dei conduttori e la forma del C (fig. 4), sono state precisate con uno studio sui modelli in vasca elettrolitica; le dimensioni della ciambella sono state scelte dopo lo studio teorico dell'iniezione fatto dal gruppo teorico del prof. PERSICO.

Questo progetto da 600 MeV è stato portato da noi nel nostro viaggio, ed è stato discusso con gli esperti in macchine nucleari degli Stati Uniti. Ebbene,

(\*) R. E. MARSHAK: *Meson Physics* (New York, 1952).

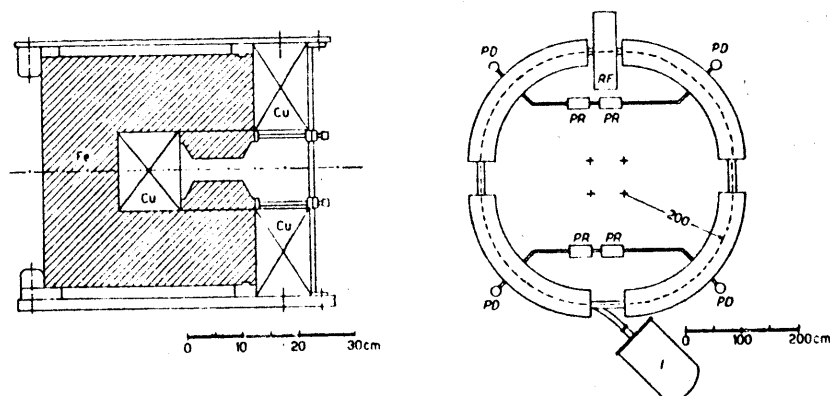


Fig. 4. - Sezione e vista dall'alto (disegno di larga massima) dell'elettrosincrotrone da 900 MeV progettato dalla Sezione Acceleratore (cfr. tab. II, col. (2)). Simboli: Fe--ferro; Cu--rame; RF--cavità rientrante a radiofrequenza; I--iniettore; PD--pompe a diffusione; PR--pompe rotative.

BERNARDINI ed io riteniamo di poter dire<sup>3</sup> che il progetto svolto dai nostri diversi gruppi di lavoro ha sostenuto bene la prova: questo esame ha quindi aumentato la nostra fiducia.

Abbiamo con noi una serie di disegni, e potremo illustrare questo progetto di massima a chi lo volesse.

Ora, come dicevo, il viaggio negli Stati Uniti ci ha portati alla conclusione che è estremamente conveniente per noi raggiungere una energia maggiore di 600 MeV, e dell'ordine invece di 1000 MeV: la quale è quasi una energia limite agli elettrosincrotroni convenzionali per via delle perdite per irraggiamento. Preferiamo quindi illustrare qui nel seguito le ragioni di questa nuova esigenza, cominciando, per giustificarla, con il tratteggiare la situazione attuale delle ricerche fotonucleari presso i grandi sincrotroni.

#### 4. - Ricerche in corso negli Stati Uniti, e ragioni per alzare l'energia del nostro elettrosincrotrone da 600 a 1000 MeV.

4.1. - Il problema più importante al quale gli elettrosincrotroni si stanno dedicando è quello della produzione di mesoni nell'urto fotone-nucleone, ed in particolare nell'urto fotone-idrogeno. In quest'ultimo tipo d'urto è possibile, tra l'altro, fare un bilancio completo dei momenti e delle energie, e quindi valutare le sezioni d'urto con la massima informazione diretta.

Ricordiamo qui tra le altre le esperienze di fotoproduzione di mesoni  $\pi$  a energie basse, prossime all'energia di soglia, e le esperienze di fotoproduzione

ad alta energia recentemente inaugurate all'Istituto di Tecnologia di California con il sincrotrone da 500 MeV.

4.2. - Le esperienze a bassa energia sono in corso con gli elettrosincrotroni di 300-350 MeV e con il grande betatrone di Urbana (Università dell'Illinois) da 330 MeV. Scopo primo di queste ricerche è di dare la sezione d'urto differenziale per l'urto fotone-nucleone. Questa è una ricerca semplice concettualmente, ma sperimentalmente molto delicata, per le particolari cure occorrenti nella definizione dell'energia del fascio di fotoni, della forma e posizione del diffusore, e per la difficoltà di raccogliere una statistica abbondante. È evidente inoltre il vantaggio, anzi la necessità, di lavorare con idrogeno leggero e pesante quale bersaglio dei fotoni: ma solo pochi Istituti dispongono sinora di idrogeno e deuterio liquido.

La sezione d'urto di produzione di mesoni carichi da fotoni di 200-270 MeV è allo studio all'Università di Cornell, con una tecnica che impiega un grosso magnete deflettore e rivela i mesoni per mezzo di contatori. Alla stessa Università si studia la fotoproduzione di mesoni  $\pi$  neutri nell'urto fotone-deuterio.

Alla Università dell'Illinois, con il grande betatrone da 300 MeV, si sta studiando la fotoproduzione dei mesoni da idrogeno cercando di restare il più possibile prossimi alla soglia di produzione (160-190 MeV). La tecnica usata è di rivelare i mesoni prodotti in idrogeno liquido con lastre nucleari esposte in posizioni diverse, in modo da ricavare in una sola esposizione al fascio di fotoni il valore della sezione d'urto a diversi angoli.

I risultati di queste ricerche a bassa energia non sono a tutt'oggi completi, ed ancora sono da prevedere anni di accurato lavoro. Comunque appare già chiaro che a bassissime energie (160-190 MeV) è nettamente prevalente il contributo dell'onda *S*. Inoltre, se si fa un'analisi per multipoli dell'interazione fotone-nucleone, la dipendenza dall'energia dei fotoni e la distribuzione angolare indicano che il fotomesone è prodotto con un assorbimento di dipolo elettrico (BERNARDINI e GOLDWASSER).

A energie leggermente maggiori (200-270 MeV) la fotoproduzione si descrive tenendo conto anche dell'onda *P*: è attualmente in discussione se nello stato *P* si osserva l'effetto di quel livello di risonanza di momento angolare  $3/2$  e spin isotopico  $3/2$  che è stato suggerito dalle esperienze di diffusione dei mesoni  $\pi$ .

L'urto fotone-idrogeno e l'urto fotone-deuterio dovranno tra l'altro fornire ai teorici i mezzi per una trattazione almeno fenomenologica delle interazioni fotone-protone e fotone-neutrone. Accanto a questi urti, altri sono allo studio, di fotoni di bassa energia contro nuclei diversi, elio, litio, e poi su su salendo fino ai grossi nuclei statistici. Tra gli scopi di tali ricerche vi è, fondamentale, quello di indagare sulla struttura dei nuclei, e di mettere alla prova diverse ipotesi: ad esempio quella che i nucleoni nel nucleo sono, preferenzialmente, legati in gruppi di due, ciascun gruppo essendo una sorta di pseudo-deutone. Natural-

mente queste ricerche sulla struttura nucleare sono di elevato interesse a varie energie, anche sotto la soglia di produzione dei mesoni, ed anche se si studiano fotointerazioni senza emissione di mesoni, come ad esempio si fa all'Università dell'Illinois nella fotodisintegrazione dell'elio.

4.3 - Le esperienze ad alta energia (e cioè con fotoni da 400-500 MeV) sono in corso all'Istituto di Tecnologia di California (Caltech), il quale è il solo istituto che disponga, come abbiamo detto, di un « fascio » di fotoni di tanta energia.

I ricercatori di Caltech stanno affrontando la fotoproduzione di mesoni in idrogeno con due eleganti tecniche diverse tra loro. In una disposizione sperimentale essi impiegano un'ampia camera contenente idrogeno ad alta pressione nella quale sono prodotti i mesoni; questi mesoni sono analizzati con un grande elettromagnete, e vengono contati con due larghi contatori a scintillazione liquidi, posti in una regione focale del magnete. In un'altra disposizione essi impiegano semplicemente dei telescopi di contatori. I mesoni sono prodotti ancora in idrogeno e la loro energia è ricavata misurando la ionizzazione su un percorso fisso. L'energia del mesone e l'angolo di produzione determinano l'energia del fotone produttore. Le due disposizioni sono circa equivalenti nei riguardi della definizione dell'energia del fotone.

Scopo di queste ricerche è l'ottenere la sezione d'urto fotone-nucleo a diverse energie, dalla soglia sino a fotoni di almeno 470 MeV. Il problema è di estremo interesse: infatti si può dire che è completamente inesplorata la regione delle interazioni fotonucleari al di sopra dei 300 MeV, tranne che per le dubbie interazioni dei raggi cosmici. Come è noto, è da prevedere che la sezione d'urto aumenti con l'energia sino ad un massimo ad una certa distanza dalla soglia, e poi cali: le esperienze di Caltech cercano tra l'altro l'esistenza di quel massimo e la sua dipendenza dalla quantità di moto dei mesoni prodotti. Ebbene, i risultati sino ad ora ottenuti sembrano indicare l'esistenza di un massimo della sezione d'urto totale di fotoproduzione a circa 300 MeV; oltre i 300 MeV la sezione d'urto cala rapidamente, ed è meno della metà del massimo a 450 MeV. L'esistenza di un massimo si conferma anche nell'andamento delle sezioni d'urto differenziali; esso sembra in generale più pronunciato per mesoni emessi sotto un angolo elevato, più piatto per mesoni emessi in avanti. Naturalmente non si può ancora dire se questo è l'unico massimo, e se questo è il massimo dei massimi.

Questi risultati ad alta energia, pur incompleti, appaiono a prima vista di difficile interpretazione teorica, anche perchè ad alcune centinaia di MeV dalla soglia mesonica diviene importante il contributo di stati di momento angolare elevato. Il loro interesse è ancora aumentato dal fatto che sarà finalmente possibile porre a confronto con questi risultati di Caltech i risultati

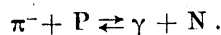
sulla diffusione dei mesoni (esperienze con il sincrociclotrone di Chicago) di 100-200 MeV <sup>(10)</sup>.

4.4. - Ma, come si è detto, l'energia di 500 MeV appare particolarmente « difficile », ed abbiamo trovato chiaro in tutti i ricercatori impegnati in queste ricerche il desiderio di andare ad energie più elevate.

Infatti è piuttosto diffusa l'opinione che le difficoltà interpretative siano dovute ad una forte interazione, più o meno diretta, tra i mesoni  $\pi$ ; quindi per energie elevate, dove sono interessati più mesoni simultaneamente, non è più possibile una trattazione del problema con le equazioni lineari del tipo elettrodinamico. Convien pertanto portarsi in una regione di più alta energia, nella quale i mesoni interessati nell'urto abbiano una notevole probabilità di comparire in stati reali, sicchè sia possibile misurare partitamente l'andamento del processo nucleare.

Questo significa anche andare nella regione di energia ove si possono produrre i mesoni pesanti. Se, come è ormai accertato, il mesone  $\tau$  disintegra in tre mesoni  $\pi$ , questa è la più semplice formazione di più mesoni  $\pi$  che appaia allo stato reale, almeno tra quelle sicuramente accertate. La soglia di produzione dei mesoni  $\tau$  si trova a circa 620 MeV, e siccome non è possibile lavorare proprio sulla soglia, e si deve tener conto del grande sparpagliamento in energia dei fotoni, si conclude che per essere in condizioni di studiare la produzione dei mesoni  $\tau$  diviene necessario il disporre di un sincrotrone da circa 1000 MeV.

L'invito a superare con il nostro sincrotrone l'energia di 600 MeV ci viene anche dalle esperienze sull'urto dei mesoni  $\pi$  contro i nuclei atomici, quali sono attualmente in svolgimento con il cosmotrone di Brookhaven. È noto come l'interazione fotone-nucleone con produzione dei mesoni e l'urto mesone-nucleone siano fenomeni in stretta relazione tra loro. È possibile infatti, almeno in parte dei casi, descrivere i due fenomeni considerando uno stato intermedio nel quale un quanto è stato assorbito (nel primo caso un fotone, nell'altro un mesone) ed uno stato finale nel quale si ha emissione di un mesone  $\pi$ . C'è un caso anzi nel quale i due processi sono l'uno l'inverso dell'altro: l'uno è l'urto mesone-nucleone con cattura del mesone  $\pi$  ed emissione di un quanto  $\gamma$ , l'altro è la normale fotoproduzione dei mesoni  $\pi$ : due reazioni che possiamo scrivere nel modo seguente:



Ebbene, questa possibilità permette di legare le modalità dell'un processo all'altro una volta che si siano fatte alcune ipotesi abbastanza generali sulle

<sup>(10)</sup> H. L. ANDERSON, E. FERMI, R. MARTIN and D. E. NAGLE: *Phys. Rev.*, **91**, 155 (1953).

forze mesoniche, e quindi lo studio sperimentale parallelo dei due processi può servire ad indicarci il sentiero giusto nella attuale selva del formalismo.

Questo studio parallelo si fa attualmente partendo dalla soglia di produzione dei mesoni, ove esso è particolarmente semplice poichè sono interessati soltanto stati di basso momento angolare, sino alla massima energia consentita dall'elettrosincrotrone di Caltech e dal sincrociclotrone di Chicago.

Ma su questa strada si sta progredendo, e, con il cosmotrone di Brookhaven, i fisici sono ormai in grado di studiare l'urto mesone-nucleo sino a 1000 MeV; ne viene quindi la convenienza e l'urgenza di disporre di un fascio di fotoni di almeno 1000 MeV, per studiare la fotoproduzione dei mesoni ad energie dello stesso ordine.

Questo studio e confronto sarà tanto più interessante e necessario in quanto che le sezioni d'urto mesone-nucleone ad alta energia presentano un andamento piuttosto inatteso: pare ad esempio che la sezione d'urto totale  $\sigma(\pi^-, p)$  presenti un secondo massimo oltre i 700 MeV, e che invece la sezione d'urto totale  $\sigma(\pi^+, p)$  sia molto minore della precedente a quella energia.

A questo proposito è da dire che un elemento importantissimo, nella riuscita di un elettrosincrotrone, è l'intensità del fascio di elettroni finale: ebbene, dato l'andamento delle sezioni d'urto di diffusione dei mesoni ora detto, non si può escludere che la sezione di fotoproduzione, che è molto bassa verso i 450 MeV (Caltech), possa risalire sino a valori che permettano lo studio diretto del fascio mesonico anche con gli elettrosincrotroni.

Come è noto questo studio è possibile attualmente soltanto con le macchine che accelerano protoni. Il non precluderci questa pur incerta possibilità può essere un'altra ragione per desiderare un elettrosincrotrone da 1000 MeV anzichè da 600 come era stato deciso all'inizio del nostro progetto.

Ed infine non dimentichiamo che un altro argomento a favore dei 1000 MeV, oltre questi, un po' vaghi, sin'ora detti, è che tra pochi anni due elettrosincrotroni da 1000 MeV saranno in funzione negli Stati Uniti: quello descritto dell'Università di Cornell, e quello rifatto di Caltech. È vero che la Fisica nucleare non si fa solo con la corsa alle alte energie, ma è certo che non è bene rinunciare in partenza alle ampie possibilità di ricerca che si offrono in regioni nuove, se ciò non è necessario.

4.5. - Ma quali sarebbero per noi le conseguenze tecniche ed economiche di un cambiamento di energia da 600 a 1000 MeV?

Quanto possiamo oggi dire è solo approssimativo, e ci vorrà qualche mese per definire il progetto di un elettrosincrotrone da un GeV. Faremo qui soltanto alcune osservazioni.

Un elettrosincrotrone da 1000 MeV non presenta difficoltà nettamente maggiori che uno da 600 se non in alcune parti, quale, ad esempio, l'accelerazione a radio frequenza per le aumentate perdite di energia degli elettroni

per irraggiamento. In Tab. II, osservando i dati della seconda e terza colonna, è possibile fare il confronto tra la macchina da 600 MeV, e le dimensioni corrispondenti (approssimative) per un elettrosincrotrone da 1 000 MeV. Analogo confronto può farsi esaminando le fig. 4 e 5. Come si vede, maggiore deve essere

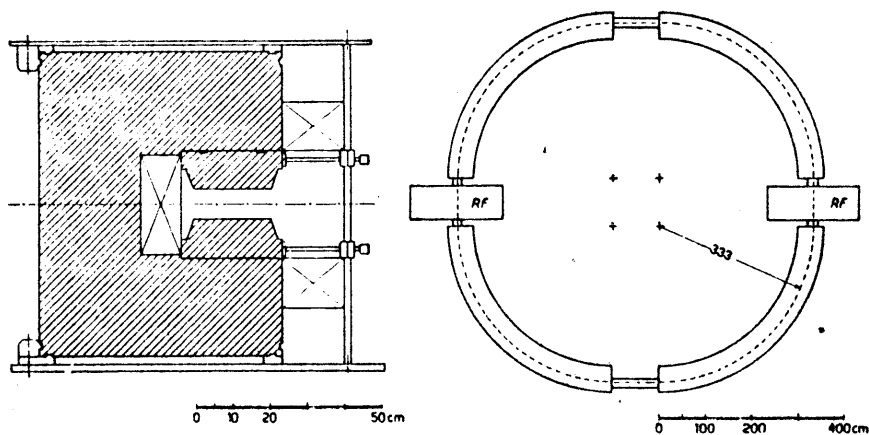


Fig. 5. - Sezione e vista dall'alto (disegno solo approssimativo) dell'elettrosincrotrone da 1000 MeV considerato in tab. II, col. (3).

il magnete da 1000 MeV e per raggio e per dimensioni dell'intraferro. Questo impone un maggiore impianto per l'eccitazione del magnete, e suggerisce un iniettore di energia maggiore, per non iniettare ad un campo magnetico troppo basso. Inoltre dovranno essere aumentate le dimensioni dell'edificio che conterrà l'elettrosincrotrone.

Si può quindi affermare che il passaggio da 600 a 1000 MeV è più un problema economico che un problema tecnico. A questo proposito osserviamo ancora che in linea di massima non ci sembra da escludere, per quanto sia ancora da studiare attentamente, una soluzione del tipo seguente. Si costruisce un elettrosincrotrone per 600 MeV che abbia un magnete delle dimensioni indicate in Tab. II, da 1000 MeV; per tenere gli elettroni da 600 MeV questo magnete sarà eccitato sino ad un valore del campo che è solo i  $3/5$  del campo occorrente per raggiungere i 1000 MeV. Questo elettrosincrotrone da 600 MeV non verrebbe probabilmente a costare molto di più di quello prima descritto (Tab. II, col. (2)); ma vi è il notevole vantaggio che quando vorremo e potremo aumentare l'energia degli elettroni da 600 MeV sino a 1000 MeV, potremo usare lo stesso magnete, e si tratterà essenzialmente di aumentare la potenza dell'eccitazione e quella del sistema a radio frequenza. È una soluzione intermedia, questa, e forse con tutti gli inconvenienti, anche psicologici, ed essa connessi, ma che ci sembra tuttora degna di considerazione.

TABELLA II.

Dati di massima ricavati dai progetti in corso di studio presso la Sezione Acceleratore dell'I.N.F.N.

Nella 2ª colonna sono riportati i dati di massima per un progetto di un elettrosincrotrone da 600 MeV. Nella colonna 3ª quelli per un elettrosincrotrone da 1000 MeV.

Macchina	da 600 MeV	da 1000 MeV
<b>Caratteristiche</b>		
<i>Magnete:</i>		
tipo . . . . .	cfr. fig. 4	cfr. fig. 5
peso ferro (tonnellate) . . . . .	15	90
peso rame (tonnellate) . . . . .	3,5	12
induzione massima (Wb/m <sup>2</sup> ) . . . . .	1	1
indice <i>n</i> del campo . . . . .	0,58	0,6
raggio della traiettoria (m). . . . .	2,00	3,33
altezza interferro (cm) . . . . .	5	8
larghezza intraferro (cm) . . . . .	12	21
numero settori magnete . . . . .	4	4
lunghezza sezioni diritte (m) . . . . .	0,6	1
<i>Eccitazione:</i>		
impulsi al secondo . . . . .	10	25
tipo . . . . .	alternata	alternata + c.c.
energia massima del campo magnetico nell'intraferro (Joule) . . . . .	6 · 10 <sup>4</sup>	2,5 · 10 <sup>5</sup>
<i>Vuoto:</i>		
pompe a diffusione . . . . .	4 da 500 l/s	4 da 2000 l/s
pompe rotative . . . . .	4	4
materiale ciambella . . . . .	pyrex	pyrex
spessore ciambella (mm) . . . . .	~ 8	~ 10
<i>Tipo di foccheggiamento</i> . . . . .	debole	debole
<i>Radio frequenza:</i>		
tipo di oscillatore RF . . . . .	eccitato ad amplificat. rientrante	eccitato ad amplificat. rientrante
tipo di cavità acceleratrice . . . . .	rientrante	rientrante
numero di cavità risonanti . . . . .	1	2
ordine della armonica di funzionamento . . . . .	4 <sup>o</sup>	4 <sup>o</sup>
frequenza massima (MHz) . . . . .	80	48,1
<i>Iniettore:</i>		
tipo . . . . .	trasformat. d'impulsi	Van de Graaff
energia (keV) . . . . .	1000	2000
<i>Energia massima (MeV)</i> . . . . .	600	1000



##### 5. - Riassunto e conclusione.

Riassumendo, noi abbiamo voluto esporre l'attività del gruppo di studio istituito per la costruzione di un elettrosincrotrone. Il gruppo ha lavorato alla preparazione di un progetto per un elettrosincrotrone da 600 MeV, e di esso si presentano in questo Congresso le caratteristiche generali. Il progetto non è certo ancora completo (non vi è stato tra l'altro tempo sufficiente) ma già ci permette di concludere che la nostra industria in Italia è in grado di realizzare la macchina che verrà progettata.

Comunque, un altro voleva essere lo scopo di questa relazione, e cioè quello di impostare il problema e discutere nuovamente le nostre decisioni generali in base all'esperienza recentemente acquisita nei nostri scambi con l'estero e nei nostri viaggi negli Stati Uniti.

Utilizzando tutte queste informazioni, noi siamo arrivati ancora alla conclusione che un elettrosincrotrone è la macchina nucleare più conveniente per l'Italia, ma che l'energia scelta di 600 MeV è relativamente bassa, in quanto ci tiene al di sotto della soglia di appagione di alcuni fondamentali processi nucleari, e non permette di estendere alla regione dei 600-1000 MeV il confronto tra la fotoproduzione dei mesoni e la diffusione dei mesoni: il quale confronto è di grande interesse e di guida alle ricerche nucleari.

Pertanto noi ci auguriamo vivamente che sia possibile trovare in Italia i mezzi per portare il nostro elettrosincrotrone da 600 a 1000 MeV.