LUIGI GONELLA
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione di Torino.
Istituto di Fisica dell'Università di Torino.

Il Laboratorio Sincrotrone dell'Università di Torino

ESTRATTO DA: « LA RICERCA SCIENTIFICA »
Anno 27° – N. 10 – Ottobre 1957

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
ROMA

Riassunto: Si descrive il laboratorio preparato dall'Università di Torino per l'installazione di un sincrotrone per elettroni da 100 MeV, con particolare riguardo ai criteri usati nel progettare le schermature di protezione dalle radiazioni ed i dispositivi di sicurezza.

Nell'Istituto di Fisica dell'Università di Torino, diretto dal Prof. G. Wataghin, è stato di recente appositamente allestito un laboratorio per ospitare un sincrotrone a doppio raggio da 100 MeV; il laboratorio è il primo del genere in Italia attrezzato per la ricerca fisica con acceleratori nel campo da 10 a 100 MeV.

L'opera è dovuta alla stretta collaborazione fra l'Università di Torino, il Consiglio Nazionale delle Ricerche e la Società FIAT; i piani sono stati elaborati congiuntamente dai membri dell'Istituto di Fisica e della Sezione Costruzioni e Impianti FIAT, diretta dall'ing. V. Bonadé-Bottino.

I lavori, iniziati durante la costruzione del sincrotrone da parte della S. A. Brown-Boveri, furono terminati nel 1955. In attesa della completa messa a punto della macchina, si è provvisoriamente installato, nel marzo 1956, un betatrone Brown-Boveri da 31 MeV, con cui si sono iniziate ricerche e collaudati i locali.

Piano del laboratorio.

L'istallazione di una macchina acceleratrice richiede uno spazio considerevole per la necessità di disporre di sale di irradiazione abbastanza grandi da ridurre a limiti tollerabili le radiazioni disperse. Dato che l'Istituto di Fisica non disponeva di locali adattabili, né risultava possibile eseguirne un ampliamento in superficie, e non essendo d'altra parte conveniente né economico costruire ex-novo un edificio in altra località, si è realizzato un laboratorio sotterraneo sfruttando l'area del giardino dell'Istituto. Tale soluzione ha reso disponibile una superficie di circa 800 m² in diretta comunicazione coll'Istituto, ed ha eliminato ogni problema di protezione dell'esterno dalle radiazioni. Si può ritenere che il maggior costo costruttivo dell'installazione sotterranea sia in buona parte compensato dal risparmio delle notevoli opere di schermatura altrimenti necessarie.

L'edificio, costruito su progetto del prof. G. Dardanelli, ha una superficie utile di 625 m² a m 5,30 sotto il livello della strada, ed ha richiesto uno scavo di circa 5400 m³ a circa 7 m di profondità. La disposizione dei locali è stata studiata col criterio di dividere nettamente gli ambienti pericolosi da quelli normalmente abitati e rendere possibile l'uso indipendente dei due raggi emessi dalla macchina in sensi opposti. Una barriera di protezione parallela all'asse dei raggi traversa infatti l'intero labo-

ratorio (vedi pianta in fig. 1) separando le sale « calde » e gli impianti ad alta tensione dal resto dei locali; la macchina acceleratrice è installata fra due Sale d'irradiazione, costruite della massima ampiezza possibile (fig. 2), sfruttando integralmente i 31 m disponibili, sale riservate esclusivamente alle apparecchiature da montarsi sul raggio. Dall'altra parte del muro di protezione due laboratori di misura, uno per raggio,

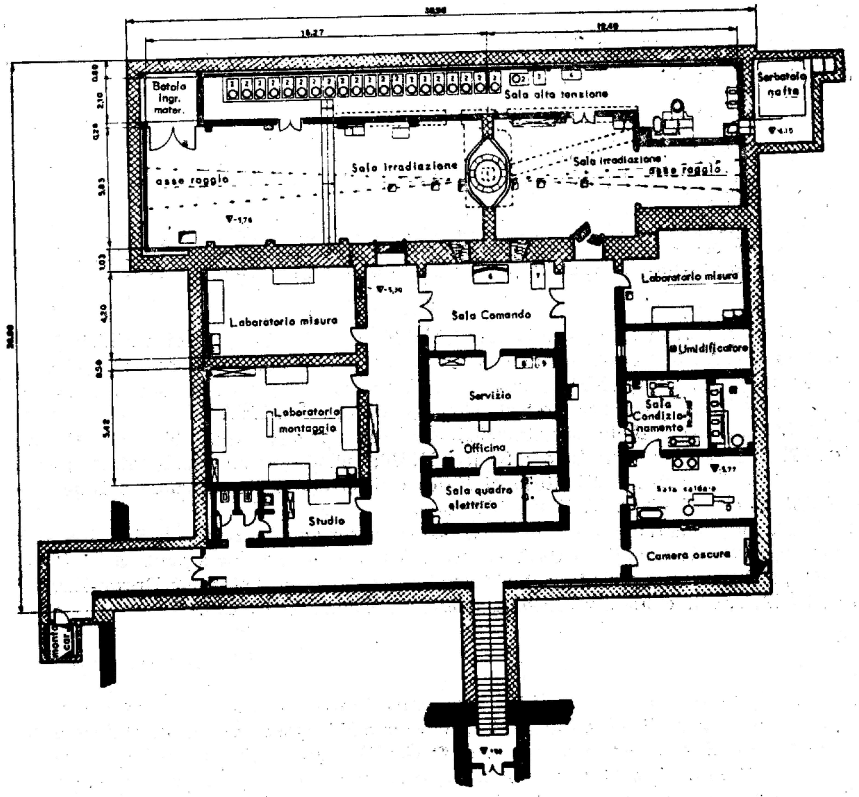

FIG. 1.

sono destinati ad ospitare gli apparecchi d'esperienza, e fra di essi nella Sala Comando sono concentrate le apparecchiature di controllo della macchina. Il laboratorio è completato da locali usati per i lavori di montaggio e dai locali di servizio; per le attrezzature generali si appoggia all'Istituto di fisica.

I materiali pesanti vengono scaricati direttamente in una delle Sale d'Irradiazione attraverso una botola: per la loro manovra sono installati un carro ponte da 2000 kg nelle Sale d'irradiazione ed uno da 1000 kg nella Sala Alta Tensione, in grado di coprirne tutta l'area. Tutti i cavi e le tubazioni sono alloggiati sotto il pavimento, in un vespaio alto m 1,30 esteso a quasi tutto l'edificio, il che ne rende agevole la posa in opera e l'ispezione.

L'energia elettrica è fornita a 380/220 V da una cabina indipendente da 300 kVA. Le opportune condizioni di temperatura ed umidità sono realizzate con un impianto d'aria condizionata che assicura circa 4 ricambi orari ai 1900 m³ ventilati; l'acqua di lavaggio necessaria è fornita da un pozzo scavato di fianco all'edificio. Si è provveduto a distribuire largamente ai vari locali correnti monofase, trifase e continua, prese di terra, aria compressa, acqua e gas.

La relativa ampiezza dei locali, la buona illuminazione e ventilazione, e l'ambientazione particolarmente curata rendono confortevoli le condizioni di vita e di lavoro nel laboratorio, come ha ormai dimostrato un anno e mezzo d'intensa attività.

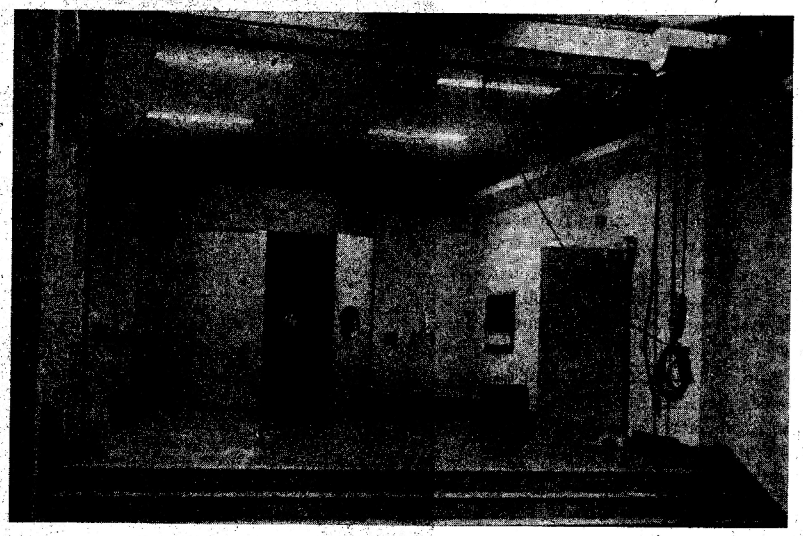

FIG. 2. – Sala d'irradiazione sinistra.

IL SINCROTRONE.

Il laboratorio è destinato all'installazione di un sincrotrone per elettroni costruito dalla S. A. Brown-Boveri nelle officine di Baden su progetto del Dr. R. Wideröe. L'acceleratore, peraltro di costituzione normale, produce due raggi indipendenti compiendo due cicli d'accelerazione in sensi opposti durante le successive semionde della corrente alternata di eccitazione del magnete, e permette quindi di svolgere contemporaneamente due diversi lavori (1).

La macchina, di costruzione molto compatta, montata su un basamento a ruote e coperta da una cappa di aspirazione d'aria, è racchiusa completamente da una schermatura in piombo, apribile su quattro battenti; il complesso, del peso di circa 16 t, poggia su di un apposito blocco di fondazione.

Il circuito magnetico è chiuso da 6 gioghi simmetrici su cui sono avvolte le bo-

(1) Dato che il tempo d'irradiazione vero e proprio è solo una piccola parte di quello necessario al completamento di una misura, si riesce a compiere un lavoro quasi doppio che con una macchina normale anche se in pratica non si possono utilizzare simultaneamente i due raggi.

bine di correzione del campo di guida. Il flusso per la fase di preaccelerazione magnetica è creato da un impulso di corrente su di un nucleo centrale, nel quale il flusso disperso del campo di guida viene cancellato da bobine inserie a quelle dell'eccitazione primaria.

Il ciclo d'accelerazione viene terminato bloccando il campo elettrico ad alta frequenza e lasciando spiralizzare gli elettroni verso l'interno, fino a convertirsi in radiazione elettromagnetica su di un bersaglio di tungsteno spesso (dell'ordine di 1 mm).

Le caratteristiche di massima sono le seguenti:

energia massima: 104 MeV;

intensità: si conta di ottenere un'intensità di raggi gamma dell'ordine di 5 mW/cm² à 1 m dal bersaglio;

raggio dell'orbita stabile: 0,29 m;

induzione massima sull'orbita stabile: 1,2 Wb/m²;

magnete: eccitato con tensione alternata sinusoidale a 6200 V-50 Hz; assorbe 810 A con un'energia di cresta di 16000 J;

iniezione: a mezzo di due cannoni elettronici facenti parte del tubo di accelerazione (uno per raggio) con catodi termoionici di alluminato di Bario impulsati a 40 kV;

preaccelerazione: a betatrone fino a circa 2 MeV;

accelerazione sincrona: a mezzo di un risonatore mezz'onda facente parte del tubo d'accelerazione, eccitato a 164,7 MHz da un generatore controllato a quarzo con stadio finale di 2 kW;

FIG. 3. – Sala Alta Tensione: banco di rifasamento.

tubo d'accelerazione: in pyrex, vuotato a 10^{-6} mm Hg e saldato; interno inaccessibile;

dimensioni: diametro fuori tutto 1745 mm; altezza totale 1850 mm;

peso: circa 7 t, di cui 4100 kg di ferro attivo e 950 kg di rame.

Il circuito di eccitazione ha una potenza reattiva di 5 MVAR, rifasata con una batteria di condensatori statici di complessivi 413 μF (fig. 3): l'insieme assorbe circa 43 kW forniti da un trasformatore da 110 kVA alimentato dalla rete del laboratorio. Il circuito è naturalmente molto sensibile alle variazioni di frequenza rete: per registrarne la risonanza sono installati condensatori a sezioni che permettono una regolazione di capacità del ± 2 % in scatti del 0,2 %, rendendo possibile il funzionamento in fase nel campo 49,5 – 50,5 Hz e, caricando al massimo il trasformatore di alimentazione, nel campo 49 – 51 Hz con un aumento di corrente del 156 %. Le variazioni di frequenza

non dovrebbero avere influenza sul ciclo d'accelerazione in quanto la sequenza dei tempi di iniezione, avviamento ed eccelerazione viene comandata direttamente dal valore del campo di guida: stabilizzando convenientemente i vari impulsi di comando si rende inutile l'installazione di un generatore di potenza a frequenza costante, che d'altra parte risulterebbe di costo molto notevole e di realizzazione piuttosto complessa a causa delle particolarità del circuito di avviamento a betatrone.

Gli strumenti di comando, regolazione, correzione e controllo (circa un centinaio) sono concentrati su di un tavolo in Sala Comando (fig. 4), a parte i relé di po-

FIG. 4. – Tavolo di comando.

tenza racchiusi in un apposito armadio di manovra e la strumentazione specifica del generatore d'alta frequenza; quest'ultimo, che richiede un controllo quasi continuo, è pure installato in Sala Comando. Il resto dell'apparecchiatura comprende i due circuiti generatori degli impulsi di iniezione degli elettroni e di correzione del campo all'inizio dell'accelerazione, ed il circuito generatore della coppia d'impulsi di corrente per l'avviamento a betatrone, oltre ai sistemi di raffreddamento e di sicurezza. Il consumo dell'apparecchiatura ausiliaria è di circa 25 kVA trifasi più circa 20 kVA monofasi.

INSTALLAZIONE DELL'ACCELERATORE.

Il raffreddamento della macchina è eseguito ad aria, aspirata da un ventilatore da 7000 m³/h. L'aria, prelevata dall'esterno e filtrata, prima di giungere al sincrotrone circola nella Sala Alta Tensione ventilando i condensatori ed i trasformatori, ed è quindi scaricata nel vespaio (*); un ventilatore d'aiuto spinge un flusso maggiore

(*) La buona ventilazione del vespaio così ottenuta è di grande aiuto nel preservare il laboratorio dall'umidità.

verso le parti centrali della macchina. L'interferenza fra il circuito di raffreddamento ed il circuito di condizionamento, provocata dalla mancanza di tenuta stagna della schermatura del sincrotrone e dalla presenza di botole per il passaggio di cavi al vespaio, non comporta inconvenienti di rilievo.

Per i collegamenti sono posati 180 conduttori (per complessivi 3000 m circa) fra cavi coassiali e multipli sotto piombo, correnti nel vespaio su mensoline d'alluminio (il cavo più lungo è di m 30). Per il parallelo dei condensatori ed i collegamenti di terra sono posati 220 kg di rame. Il sincrotrone e gli altri apparecchi ad alta tensione sono messi a terra ad una terra propria scavata di fianco al laboratorio.

Nello studio del sistema di sicurezza si è cercato di render minima la possibilità di incidenti e manovre sbagliate, pur consentendo la massima semplicità ed elasticità di funzionamento. Il controllo è centralizzato sul tavolo di comando, e non si può dare tensione ad alcun apparecchio se non dopo aver agito su di un interruttore di sicurezza a chiave. Tutti gli apparati ad alta tensione sono raccolti in un unico locale (di normale accesso solo attraverso le sale calde) munito dei normali dispositivi di sicurezza. Le manovre da compiere per mettere in funzione l'apparecchiatura si eseguiscono singolarmente a mano, ma la loro sequenza è coordinata da un sistema di relé ed interruttori di sicurezza: solo quando la sequenza sia correttamente completata e sia chiusa la porta della Sala d'Irradiazione interessata è possibile dar luogo all'emissione dei raggi; l'eventuale apertura della porta interrompe la radiazione senza che ne sia possibile il reinnesto se non per esplicita manovra dal tavolo di comando; nel caso di interruzione della tensione di rete l'intera apparecchiatura non può riprendere a funzionare se non ripetendo l'intera sequenza dal principio. È quindi praticamente impossibile avere emissione incontrollata di radiazioni.

L'emissione delle radiazioni, indipendente per ognuno dei due raggi, si ottiene dando tensione al corrispondente cannone elettronico d'iniezione mediante un interruttore a tempo predeterminato; il circuito è stato progettato in modo da rendere possibile eventualmente di comandare il raggio dai laboratori di misura, di bloccarlo con interruttori a pulsante, e di inserire un segnale acustico di allarme anticipato. In tutti i locali pericolosi e davanti ai loro ingressi si accendono lampade di segnalazione durante la irradiazione e lampade di preavviso quando manca una sola manovra a rendere pericoloso il locale.

È risultato che per alcune esperienze si deve tenere aperta la porta della sala calda durante l'irradiazione: per tale evenienza è stata montata una cellula fotoelettrica che blocca il raggio qualora si entri inavvertitamente nella sala, ed uno speciale segnale di pericolo nel corridoio.

I collegamenti fra gli apparecchi dei laboratori di misura ed i rivelatori posti sul raggio si effettuano normalmente attraverso il vespaio con cavi di 12-15 m; sono predisposte allo scopo tre botole in ogni Sala d'Irradiazione ed una in ogni laboratorio. Per collegamenti provvisori sono predisposti nel muro di schermatura due fori verso i laboratori di misura (scavati a filo di pavimento ed otturabili con tappi di piombo) che permettono di usare cavi di 10 m, e due serie di 6 fori scavati a labirinto verso la Sala Comando.

Come si è detto, in attesa della messa a punto del sincrotrone si è installato provvisoriamente un betatrone a doppio raggio da 31 MeV, pure di costruzione Brown-Boveri (fig. 5). Questo betatrone ha la stessa struttura elettromeccanica del sincrotrone, con dimensioni ridotte (raggio d'orbita 26 cm). Il magnete è eccitato alla stessa tensione (con assorbimento di 12 kW e 980 kVAR) e si usa lo stesso circuito di iniezione. Mancano naturalmente il circuito d'avviamento ed il circuito d'alta frequenza, mentre si ha invece uno specifico circuito per la terminazione del ciclo d'accelerazione (realizzata espandendo l'orbita stabile mediante un impulso di corrente che provoca

un aumento del flusso acceleratore ed una diminuzione del campo di guida). La macchina è di funzionamento molto stabile e sicuro e può dare un'intensità dell'ordine di 100 r/min misurati in plexiglass a 1 m dal bersaglio.

Per l'installazione si sono usate le apparecchiature ausiliarie previste per il sincrotrone (che risultano per lo più sovrabbondanti), effettuando le opportune modifiche

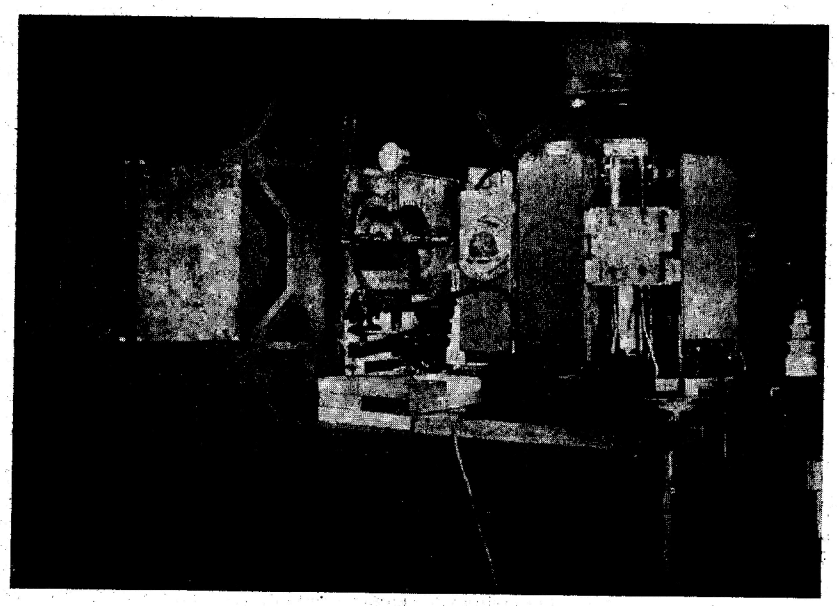

FIG. 5. – Il betatrone con schermatura aperta (in primo piano un apparecchio per l'esposizione di lastre nucleari).

al tavolo di comando ed al cablaggio. Per la buona funzionalità del laboratorio e l'accurata predisposizione del piano di lavoro e degli apparecchi ausiliari è stato possibile effettuare il montaggio e la completa messa a punto della macchina in soli 30 giorni lavorativi.

L'esperienza acquisita in un anno di lavoro col betatrone ha permesso di correggere alcune minori deficienze del laboratorio e ne ha messo in evidenza pregi e difetti; in complesso l'accoppiamento macchina-laboratorio si è rivelato molto soddisfacente: ne sono la migliore conferma le 1500 ore di effettiva irradiazione ed il proficuo lavoro scientifico svolto od in corso di svolgimento (3) sia da parte dell'Isti-

(3) Da parte dell'Istituto di Fisica dell'Università di Torino:
F. FERRERO, A. O. HANSON, et al., *Fast Photoneutrons from Bismuth*. « Nuovo Cimento », 4, 418 (1956). — F. FERRERO, L. GONELLA, et al., *Fast Neutron Component in Photonuclear Reactions*. Nuovo Cimento » 5, 242 (1957). — F. FERRERO, R. MALVANO, et al., *Camera di ionizzazione per raggi X fino a* 31 *MeV*. « Nuovo Cimento », 5, 510 (1957). — F. FERRERO, R. MALVANO, et al., *Evidence for a second Maximum in the Photoneutron Emission* (in pubblicazione). — F. FERRERO, A. O. HANSON, et al., *Photoprotons from* Mo^{100} (in pubblicazione). — S. DE BENEDETTI, U. FARINELLI, et al., *A short lived isomeric state of* Bi^{208} (in pubblicazione).

tuto di Fisica dell'Università di Torino che da membri delle Università di Catania, Firenze, Genova, Illinois, Pittsburgh, ecc.; si sono avuti fino a sei gruppi di misura montati contemporaneamente.

PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI.

La disposizione del laboratorio ha reso inutile la costruzione di barriere protettive primarie: i raggi primari vengono assorbiti dal terreno circostante a m 4,10 sotto il livello della strada – per le cantine degli edifici adiacenti ed il suolo pubblico si può contare su di un fattore d'attenuazione dell'ordine di 10^{40}.

Quanto alla schematura secondaria destinata a proteggere i locali di lavoro, non si poterono eseguire veri e propri calcoli di dimensionamento data l'impossibilità di prevedere a priori la distribuzione in direzione ed energia delle radiazioni disperse: il suo progetto si è quindi basato su analogie con laboratori simili e considerazioni generali. Le caratteristiche della macchina rendono la nostra installazione più simile a quella di betatroni per usi industriali od ospedalieri che non a quella di grossi acceleratori per ricerca; non è però possibile una diretta similitudine con le numerose installazioni a 31, 22 o 15 MeV data la differenza nello spettro della radiazione emessa e quindi di quella dispersa.

La radiazione dispersa è formata da diverse componenti che si possono così suddividere:

a) radiazione spuria prodotta nell'interno della macchina da elettroni che sfuggono al regolare ciclo d'accelerazione; viene generata in buona parte a bassa energia durante i primi giri d'orbita;

b) radiazione primaria dispersa, vale a dire radiazione che esce regolarmente dalla macchina ma non rimane compresa nel fascio utile. Quando si estragga il fascio di elettroni, l'entità della radiazione dispersa dipende anche dalla bontà della focalizzazione realizzata e può essere rilevante. Nel caso di una macchina a raggi gamma una notevole componente dispersa è data dagli elettroni che traversano il bersaglio senza completa conversione e vengono deviati dal campo magnetico disperso (con la relativa radiazione gamma prodotta per interazione col materiale della macchina stessa); la radiazione di bremsstrahlung esce dal bersaglio in un cono abbastanza stretto (nel betatrone da 31 MeV la semiapertura a metà intensità è di 3°30'); la sua componente dispersa più pericolosa, nel caso di una macchina a doppio raggio, è quella diretta all'indietro, che non può venire intercettata da alcuna schermatura e può raggiungere un'intensità dell'ordine dell'1 % del totale.

c) radiazione secondaria prodotta per interazione del fascio primario con materiali vari, particolarmente con le schermature di collimazione e le pareti della sala d'irradiazione;

d) neutroni prodotti per interazione delle radiazioni primaria e dispersa con materiali vari.

La prima cura fu posta nel ridurre al massimo il fondo di radiazione secondaria rendendo le Sale d'irradiazione le più ampie possibile: si è realizzata un'area complessiva di 152 m² (cubatura 580 m³) ed i raggi le attraversano a distanza di m 1,20 dal pavimento e m 2,92 dalle pareti laterali, con un percorso libero in aria di m 16,27 nella sala sinistra e m 12,40 nella destra.

Le radiazioni spurie sono già molto attenuate dalla struttura stessa della macchina: il 56 % della sua circonferenza è schermato dai gioghi del magnete, spessi 17 cm, fra i quali sono montati blocchi di piombo offrenti una analoga attenuazione; tutta la macchina è poi circondata da una fascia di piombo di 8 cm di spessore centrata all'altezza del raggio (con 78 cm d'altezza e col peso di 5470 kg), che lascia libera solo

una zona di circa 800 cm² per parte per l'uscita del raggio utile – la fascia è smontabile e la sua incastellatura prevede la possibilità di aggiungere altri 4 cm di materiale schermante.

La macchina è dislocata in modo che l'asse del raggio si trova fra il centro del magnete ed il muro di schermatura: in tal modo il fascio di elettroni non convertiti nel bersaglio viene deviato dal campo magnetico disperso in direzione opposta ai locali da proteggere.

Alcune misure effettuate a 31 MeV con un'esperienza montata sul raggio ed intensità di raggi gamma di circa 80 r/min misurati in plexiglass a 1 m (equivalenti a circa 0,8 mW/cm²) hanno dato i seguenti valori per l'intensità di radiazione dispersa misurata in aria:

a 1 m di fianco del raggio all'uscita dalla schermatura (cioè a circa 1 m dal bersaglio nella direzione del fascio primario) dell'ordine di 75 mr/h (la componente dispersa a bassa energia risulta quindi inferiore di un fattore circa 65000 all'intensità utile);

verso il fondo della sala quasi uniformemente dell'ordine di 10-15 mr/h;

alla superficie del muro di protezione al massimo dell'ordine di 30 mr/h;

nella sala opposta (radiazione dispersa all'indietro) dell'ordine di 600 mr/h a 1 m dal bersaglio sull'asse del raggio.

La barriera di protezione.

La protezione dei locali di lavoro è affidata ad un muro di calcestruzzo vibrato, dello spessore di 103 cm, in cui si aprono due porte protette e due finestre d'ispezione.

È difficile dare un valore plausibile al fattore di protezione offerto da tale schermatura, data la grande variabilità dei coefficienti d'attenuazione coll'energia e coi materiali; a titolo indicativo riportiamo in tab. 1 i fattori d'attenuazione offerti dai

Tabella 1.

Energia	Fattore d'attenuazione			
	muro	porta	finestra	schermatura macchina
22,8 MeV	158	19,5	7,1	26.600
2 MeV	50.000	72	250	16.000
1 MeV	4.400.000	425	2.300	1.440.000
di minima	155	17	6,3	3.050
attenuazione	(a 20 MeV)	(a 8 MeV)	(a 50 MeV)	(a 5 MeV)

vari componenti la schermatura a raggi gamma monoenergetici aventi le energie di 1 MeV, 2 MeV, l'energia media del fascio primario del sincrotrone (22,8 MeV) e l'energia per cui si ha la minima attenuazione.

Una « cifra di merito », di valore grossolanamente comparativo, per barriere di protezione parallele all'asse del raggio primario, potrebbe essere il prodotto della attenuazione offerta dal muro a raggi gamma aventi l'energia media dello spettro moltiplicata per il quadrato della distanza in metri dall'asse del raggio, mentre la superficie totale delle sale d'irradiazione, o la lunghezza del percorso libero del raggio,

possono essere indicative dell'entità delle radiazioni disperse presenti. Diamo in tab. 2 questi valori, calcolati per il nostro laboratorio e per alcune installazioni di betatroni Brown-Boveri da 31 MeV (tutti a doppio raggio) (4).

Le aperture da praticarsi nella barriera ne costituiscono naturalmente il punto debole: in una protezione da radiazioni disperse si può mantenere lo stesso fattore d'attenuazione su tutta la lunghezza della barriera solo usando sempre lo stesso materiale collo stesso spessore, il che imporrebbe la rinunzia alle finestre di ispezione e la costruzione di porte molto ingombranti e costose.

TABELLA 2.

Installazione	A (m²)	B (m)	C (m)	D	E
Berna – Inselspital	33,5	2,93	2,93	14.000	120
Karlsruhe – Politecnico	106	13	10,4	6.450	700
Lubiana – Istituto Fisico	69	7,5	5	1.630	41
Oslo – Norske Radiumhospital	47	5	4,45	4.540	90
Parigi – Institut des Hautes Etudes	58	4,85	3,15	2.050	20,5
Torino – Ospedale Molinette	48	5,63	5,18	1.110	30
Zurigo – Kantonspital	44	4,65	4,65	447	9,7
Laboratorio Sincrotrone	152	16,27	12,40	—	—
installazione a 31 MeV	—	—	—	6.840	1.050
installazione a 100 MeV	—	—	—	2.460	380

A = area complessiva delle due sale d'irradiazione.
B = lunghezza libera della sala maggiore.
C = lunghezza libera della sala minore.
D = cifra di merito 1 = attenuazione all'energia media del fascio utile × quadrato della distanza dei locali di lavoro dal fascio.
E = cifra di merito 2 = $D \times C^2/1.000$.

Si può tuttavia tollerare che il fattore di protezione delle porte sia notevolmente inferiore a quello del muro, in quanto il tempo di occupazione dei corridoi su cui le porte si aprono è molto minore di quello dei locali di lavoro. Le porte furono quindi costruite con uno spessore di 10 cm di ferro (due lastre di acciaio SM da 50 mm), e, per attenuare il flusso di neutroni provenienti dalla sala o prodotti nel ferro stesso, furono imbottite con 30 cm di legno, cui si aggiunsero in sede costruttiva 5 cm di paraffina ed 1 cm di acido borico in polvere. Si preferì il ferro al piombo per gli evidenti vantaggi costruttivi e per il fatto che, a parità di attenuazione per raggi gamma all'energia di soglia, il ferro produce fotoneutroni in meno per un fattore dell'ordine di 15 e con una soglia di circa 6 MeV più alta. Le porte si aprono su una luce di m 1,40 × 2,00 con due battenti facilmente manovrabili a mano del peso complessivo di 2,9 t (fig. 6).

Le finestre d'ispezione hanno lo stesso spessore del muro e sono costituite da una vasca di 357 l, piombata internamente a caldo, con vetri masticiati, riempita di acqua

(4) A. von ARX, *Mise en service de nouveaux bétatrons*, « Rev. Brown Boveri », **41**, 378 (1954).

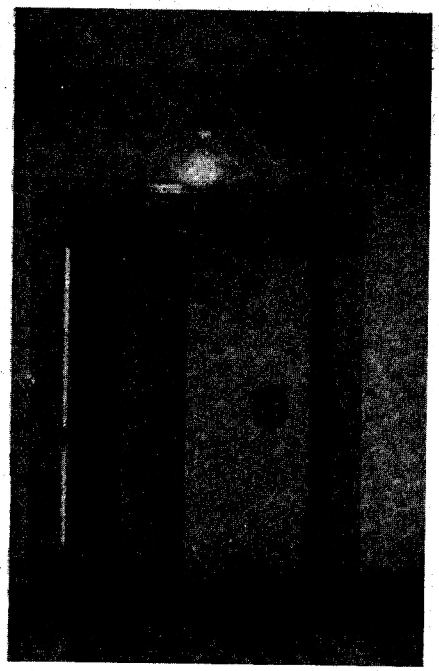

FIG. 6. – Porta protetta della sala d'irradiazione sinistra.

naturale; la rifrazione aumenta notevolmente il campo visivo, tanto che con un'apertura di circa un metro la sala è visibile per m 7,70 sull'asse del raggio (fig. 7). Il fatto che le finestre abbiano un fattore d'attenuazione notevolmente inferiore a quello del muro non desta preoccupazioni in quanto, per la loro posizione defilata rispetto al raggio, sono colpite per lo più da radiazioni spurie già molto attenuate dalla schermatura della macchina; in ogni caso è possibile aumentarne l'attenuazione fino da eguagliare quella del muro sciogliendo nell'acqua del cloruro di zinco che, se ben raffinato, non porta una sostanziale diminuzione di visibilità.

PROTEZIONE DEI NEUTRONI E RIDUZIONE DEL FONDO.

Particolare attenzione va prestata ai neutroni secondari prodotti dalle macchine acceleratrici, che possono essere più pericolosi della stessa radiazione ionizzante diffusa; il pericolo è reso più insidioso dalle intrinseche difficoltà che si riscontrano nella dosimetria dei neutroni veloci.

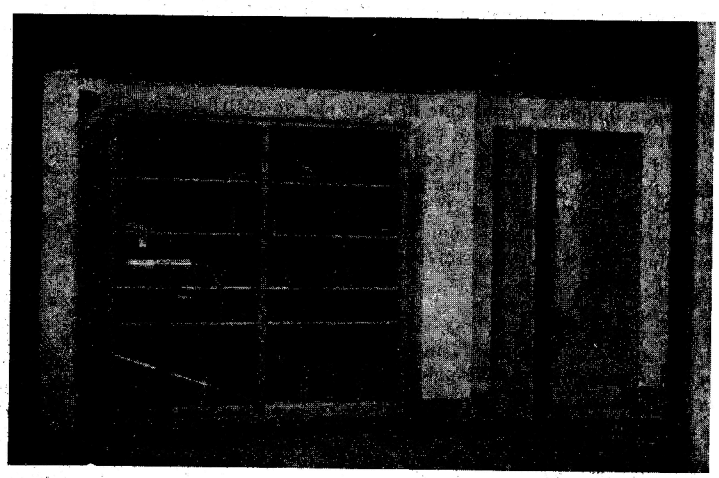

FIG. 7. – Sala d'irradiazione destra vista attraverso la finestra d'acqua d'ispezione.

Il flusso di neutroni prodotto da un betatrone come quello attualmente installato si può ritenere equivalente a quello di una sorgente di Ra-Be dell'ordine di 1 curie, ed è costituito per lo più da neutroni veloci con uno spettro avente energia massima dell'ordine di 5 MeV, energia più probabile dell'ordine di 0,7 MeV ed energia media dell'ordine di 1 MeV (5). La distribuzione in energia è tale che la dose corrispondente ad un flusso di 10^4 neutroni/cm²s si può ritenere sia dell'ordine di 1 rad/h; ad ogni modo per i calcoli di protezione si può assumere in approssimazione di sicurezza che lo spettro sia equivalente a quello dei neutroni di fissione.

Il fondo di neutroni nelle Sale d'Irradiazione può essere molto aumentato dai materiali montati sul raggio: un blocco di piombo investito da circa 10 r/min di raggi gamma a 31 MeV produce un flusso di neutroni dell'ordine di 10^8 neutroni/s (comparabile a quello di una sorgente di Ra-Be di una decina di curie); schermature di collimazione in piombo possono essere disposte lungo il percorso del raggio in ogni punto della sala: è quindi necessario che le porte d'accesso alle Sale d'Irradiazione siano costruite in modo da offrire una buona protezione contro i neutroni (la dose di neutroni sarebbe attenuata da 10 cm di ferro solo per un fattore dell'ordine di 1,3).

Non è possibile valutare con precisione l'efficacia delle schermature, date le difficoltà intrinseche del calcolo e l'incerta conoscenza delle caratteristiche del fondo di neutroni. Basandosi su dati empirici di diverse fonti e partendo da diverse plausibili assunzioni si possono stimare i seguenti valori per il fattore di protezione dei vari componenti la schermatura, tenuto il debito conto della diversa RBE per le varie energie:

	porte	finestre	muro
fattore di protezione:	10–70	2.000–15.000	o.d.g. 10.000
fattore di attenuazione per neutroni termici: circa . . .	12.10^6	5.10^{15}	2.10^6

Alcune interessanti esperienze non si potrebbero eseguire se non si riducesse decisamente il fondo di neutroni nella sala d'irradiazione. Di conseguenza si è provveduto a sbarrare completamente la Sala d'Irradiazione Sinistra (la più ampia) con un muro d'acqua, addossato alla macchina, di 60 cm di spessore, coperto da un pannello di 2 cm d'acido borico; il muro è costituito da cassoni in lamiera affiancati ad incastro in modo da poterlo facilmente smontare quando si debba avere pieno accesso alla macchina, e poggia su traversine di legno che ne distribuiscono il carico sul pavimento in ragione di 2000 kg/m²; l'insieme pesa a vuoto circa 1,5 t e porta 13 m³ d'acqua e 350 kg d'acido borico. Il cassone centrale ha un foro di 30 cm di diametro per il passaggio del raggio utile, riempito con un cilindro di collimazione formato da dischi di legno e di acido borico. Il fattore d'attenuazione calcolato è dell'ordine di 200, e le misure hanno mostrato come il fondo di neutroni è stato ridotto a meno dell'1 % del valore che si aveva prima della installazione.

Sicurezza del personale.

Sono sottoposti a pericolo d'irradiazione anche la Sala Alta Tensione con i locali di servizio adiacenti ed il vespaio sottostante alla zona irradiata; è inoltre pericolosa la permanenza (salvo che per breve tempo) in una delle Sale d'Irradiazione mentre si sta irradiando la sala opposta a causa del fondo di radiazione diffusa al-

(5) Misure effettuate sul betatrone Brown-Boveri del Politecnico di Karlsruhe, comunicazione privata.

l'indietro; il personale eventualmente presente in tali locali all'inizio dell'irradiazione è preavvisato del pericolo dalle luci di segnalazione, ed ha un buon margine di tempo per uscirne prima di ricevere il minimo danno (dalla Sala Alta Tensione si può bloccare l'irradiazione semplicemente aprendone una porta); non si è voluto asservire il raggio alla chiusura contemporanea di ambedue le porte delle sale calde per rendere più agevoli i lavori di allestimento delle esperienze.

Le radioattività indotte sono tanto deboli, ai livelli di irradiazione in gioco, da non suscitare alcun problema di sicurezza.

Nel complesso è molto improbabile l'eventualità di sovraesposizioni accidentali alle radiazioni del personale del laboratorio, i cui membri sono d'altra parte muniti di dosimetri personali del tipo a camera di ionizzazione che vengono controllati regolarmente. Con l'attuale installazione a 31 MeV la protezione si è rivelata del tutto sufficiente: le dosi di radiazione ricevute normalmente dal personale sono dell'ordine di grandezza delle variazioni nella scarica naturale dei dosimetri, e risultano inferiori a quelle che si possono ricevere lavorando con cura con apparecchi radiodiagnostici.

Un valore di orientamento per la dose di radiazione dispersa nelle Sale d'Irradiazione, nelle usuali condizioni di lavoro ad alta intensità a 31 MeV, si può stimare sulla base delle varie misure citate, dell'ordine di 1 rad/h (a 50 cm di fianco dell'asse del raggio al bordo della schermatura della macchina) cui contribuiscono per 1/3 la radiazione ionizzante (per lo più di bassa energia) e per 2/3 i neutroni veloci; i neutroni termici contribuiscono per pochi mrad/h. Tenendo conto dell'attenuazione geometrica, la dose nei locali di lavoro in una settimana di 40 ore risulta a priori notevolmente inferiore ai 0,3 rad tollerati dalle norme di sicurezza. L'intensità di radiazione ionizzante nei locali di lavoro è praticamente trascurabile e quindi difficile da misurare con precisione: in ogni caso la si può ritenere molto inferiore a 1 mr/h; è risultato possibile effettuare senza difficoltà misure di radioattività nei laboratori adiacenti alle sale calde durante il funzionamento della macchina.

Con l'installazione del sincrotrone da 100 MeV il fondo di radiazione potrà aumentare discretamente ed il suo spettro d'energia sarà diverso; le condizioni più sfavorevoli saranno prodotte dal funzionamento della macchina con fascio di elettroni esterno. Dai dati d'esperienza finora acquistati si può tuttavia ragionevolmente prevedere che le schermature predisposte saranno sufficienti a mantenere negli ambienti di lavoro un livello di radiazione inferiore ai limiti di tolleranza generalmente ammessi.

Torino, 29 luglio 1957.

RÉSUMÉ

Le Laboratoire Synchrotron de l'Université de Turin.

On décrit le laboratoire préparé par l'Université de Turin pour l'installation d'un synchrotron pour électrons à 100 MeV. On a surtout considéré les critériums suivis en projectant les écrans de protection contre les radiations et les dispositif de sûreté.

SUMMARY

The Synchrotron Laboratory of the Turin University.

A description is given of the laboratory provided by the University of Turin for a 100 MeV-electron-synchrotron, pointing out the features of the radiation shielding design and of the safety devices.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Synchrotron laboratorium der Universität Turin.

Man beschreibt das Laboratorium, das die Universität Turin zur Elektron-Synchrotronanlage von 100 MeV errichtet hat, mit besonderer Berücksichtigung der Merkmale, wodurch die Strahlungsabschirmungen und die Sicherheitsvorrichtungen gekennzeichnet werden.