

Salvatore Sutera

IL PRIMO CICLOTRONE ITALIANO*

Il ciclotrone di Milano

Tra il 1960 e il 1965, presso l'Istituto di Scienze Fisiche dell'Università degli Studi di Milano venne progettato e realizzato il primo ciclotrone italiano. Esso apparteneva alla categoria dei ciclotroni a frequenza fissa, a campo azimutale variabile (A.V.F.) ed era del tipo di focalizzazione forte alla Thomas.

Un apposito capannone ed altri edifici furono costruiti per ospitare la macchina e i laboratori di ricerca. La direzione dei lavori fu affidata al prof. Guido Tagliaferri¹ coadiuvato dal prof. C. Succi; vi presero parte, tra gli altri, E. Acerbi, F. Resmini, G. Pavanati, A. Luccio.

La macchina ha funzionato fino agli inizi degli anni '80 ed è stata successivamente smantellata quando venne avviata la realizzazione del ciclotrone superconduttore a Segrate.

Presso il Museo della Scienza e della Tecnica di Milano è conservato il modello in scala 1:5 del ciclotrone. Esso fu a suo tempo realizzato, in particolare, per studiare la più opportuna ed economica forma dei magneti atti a garantire il campo necessario.

Perché un ciclotrone a Milano?

Nel secondo dopoguerra i fisici italiani avvertirono la necessità di costruire macchine acceleratrici a fini di ricerca nel campo delle particelle.

Dopo lunghe discussioni si realizzarono due macchine: una a Frascati – il sincrotrone da 1000 Mev – destinata alla fisica delle alte energie e una a Milano, il ciclotrone da 45 Mev – destinata alla fisica delle basse energie.

Mentre la costruzione della macchina di Frascati fu finanziata dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, la macchina di Milano fu realizzata con finanziamenti locali provenienti da aziende e dal Comune di Milano.

È interessante sottolineare la grande disponibilità del mondo imprenditoriale lombardo a finanziare attività di ricerca di base, senza immediate ricadute tecnologiche. Evidentemente si era creato un clima favorevole alla ricerca scientifica come fattore di progresso ed è all'interno di questa strategia che possiamo collocare anche l'interesse che il mondo industriale dimostrò per la realizzazione del primo museo scientifico-tecnico italiano, il Museo Leonardo da Vinci.

L'interesse delle imprese lombarde per la costruzione del ciclotrone non fu dovuto solo al mecenatismo di qualche illuminato industriale, ma vide la partecipazione attiva della loro organizzazione – l'Assolombarda – nel coordinare le varie imprese che parteciparono all'iniziativa: Pirelli fornì i cavi e gli avvolgimenti, la Tosi il trasferimento del magnete, e così via, per un equivalente in materiale che copriva circa i 2/3 del costo della macchina stessa.

L'altro terzo dei finanziamenti venne fornito dalle strutture pubbliche (Comune di Milano, Ministero

* Pubblicato in *Atti del XVII Congresso nazionale di Storia della fisica e dell'astronomia*, Centro Volta, Villa Olmo, Como, 22-25 maggio 1997, a cura di Pasquale Tucci, Milano, Istituto di Fisica generale e applicata, Sezione di Storia della fisica, 1997. Si ringrazia l'autore per averne autorizzato la riproduzione.

¹ Il fisico e storico della scienza Guido Tagliaferri (1920-2000), allora professore di Radioattività presso la nuova sede dell'Istituto di Scienze Fisiche dell'Università degli Studi di Milano in via Celoria, dove fu costruito l'edificio del ciclotrone [n.d.r.].

della Pubblica Istruzione, CNR).

Personale dell'INFN lavorò all'assemblaggio delle varie parti della macchina e l'Università di Milano contribuì con la costruzione dell'edificio che ospitava la macchina e i laboratori. In seguito, l'INFN finanziò la costruzione del magnete analizzatore.

Animatore delle attività di progettazione e dei rapporti con il mondo industriale fu Polvani².

La caratteristica innovativa della macchina progettata a Milano consisteva nell'impiego di un campo magnetico a focalizzazione forte che consentiva il superamento del limite relativistico che si incontra nell'accelerazione dei protoni con i ciclotroni tradizionali.

Nella progettazione del ciclotrone di Milano valutazioni di carattere tecnico ed economico portarono a fissare l'energia del ciclotrone intorno ai 45 Mev per protoni, con una corrente interna al fascio di qualche decina di microampère. Successivamente la macchina venne usata limitando l'intensità di fascio, ma con la possibilità di variarne l'energia.

Per soddisfare l'esigenza di accelerare non solo protoni, ma anche altre particelle (alfa in particolare), il gruppo dei progettisti escogitò una modalità di intervento sulla struttura che determinava il campo magnetico progettandola in modo che si potessero cambiare solo le parti delle "scarpe polari" affacciate verso il traferro.

Particolari del ciclotrone di Milano

Uso di un modellino per lo studio del campo magnetico: i parametri per la costruzione del ciclotrone A.V.F. di Milano per protoni da 45 Mev furono determinati mediante una serie di studi eseguiti su un modello di elettromagnete in scala 1:5. Questi studi permisero di:

- a) sviluppare un metodo di correlazione del profilo polare;
- b) stabilire le proprietà di focalizzazione del campo stesso;
- c) procedere al dimensionamento definitivo delle espansioni dell'elettromagnete.

La struttura generale del modello fu determinata in modo che fosse il più possibile simile a quella dell'elettromagnete della macchina, per far sì che oltre agli studi delle configurazioni di campo, si potessero valutare anche le difficoltà di montaggio e di assemblamento delle parti.

Il diametro polare dell'elettromagnete modello fu fissato in 31 cm. L'eccitazione dell'elettromagnete era ottenuta per mezzo di due bobine, fissate ai traversoni, avvolte con 840 spire ciascuna di piattina di rame smaltato da 2x6 mm² di sezione.

Ogni bobina era costituita da 14 gallette di 60 spire ciascuna; tra le gallette, accoppiate a due a due, erano interposte delle lastre di rame a forma anulare, raffreddate, lungo i contorni interni ed esterni, con circolazione d'acqua: il tutto era serrato da due anelli piani di duralluminio trattenuti da tiranti di acciaio inossidabile.

L'elettromagnete era alimentato da un gruppo rotante che erogava una potenza massima di 10 KV alla tensione di 220V.

Il modello si rivelò fondamentale per studiare il comportamento della macchina e per determinare le scelte economiche necessarie alla realizzazione definitiva del ciclotrone. In maniera specifica esso servì a determinare con buona precisione il campo magnetico azimutale ed il sistema di avvolgimento.

Realizzazione

Gli studi del modellino permisero di passare alla fase di realizzazione.

Struttura dell'elettromagnete: classica, a doppio C, con due poli cilindrici.

Per semplificare i problemi di approntamento dei materiali, trasporto ed installazione, si ricorse a una

² Giovanni Polvani (1892-1970), dal 1929 professore di Fisica sperimentale all'Università degli Studi di Milano e dal 1960 al 1965 presidente del CNR (n.d.r.).

struttura composta, benché ciò comportasse un maggior impegno nello studio dei problemi tecnici. Le lavorazioni meccaniche furono eseguite dalle Officine Meccaniche Franco Tosi di Legnano; le operazioni di montaggio dell'elettromagnete furono eseguite presso il capannone del ciclotrone a partire dal gennaio 1963 e furono completate nell'aprile dello stesso anno.

Avvolgimenti d'eccitazione: erano costituiti da due bobine da 594 spire ciascuna, da un tubo di rame avente una sezione totale di 16x24 mm ed un foro di 6x14 mm isolato con quattro strati di carta per uno spessore complessivo di 0.6 mm.

L'avvolgimento di ciascuna bobina fu realizzato sovrapponendo 18 gallette, ciascuna di 33 spire, lunghe circa 250 m. La resistenza elettrica di ciascuna bobina risultò di 0,325 ohm, il peso di 15 tonnellate (11,8 di rame, il resto acciaio, alluminio e materiale isolante).

Per le operazioni di costruzione delle bobine furono impiegate 5.300 ore lavorative. Le bobine, per essere trasportate, richiesero l'impiego di un carro con pianale basso; per economizzare sulle spese di questo tipo di trasporto si scelse la trazione animale.

Eccitazione dell'elettromagnete: veniva ottenuta per mezzo di un gruppo convertitore rotante da 200 KW che erogava una corrente massima di 500 A.

Impianto di raffreddamento: era necessario per raffreddare le bobine percorse da corrente. Veniva utilizzata acqua distillata demineralizzata messa in circolazione da una pompa da circa 1 KW. L'acqua veniva raffreddata per mezzo di uno scambiatore di calore.

Sorgente: era costituita da una piccola camera all'interno della quale veniva immesso dell'idrogeno. Un filamento, reso incandescente, emetteva elettroni i quali, attirati da una placca a tensione positiva, riuscivano a ionizzare l'idrogeno fino a renderlo quasi un plasma creando così protoni e anche ioni d'idrogeno (due elettroni e un protone). Il rapporto tre protoni e ioni negativi è dell'ordine di 1/100.

Nella cameretta c'era una fessura di fronte alla quale si trovava la faccia del D³ che era soggetta, alternativamente, ad una tensione positiva e negativa. Questo fatto faceva sì che le particelle, sia protoni sia ioni negativi, venissero entrambe estratte e accelerate (in direzioni opposte). Era necessario quindi fermare uno dei due fasci, per questo si ricorreva ad un dispositivo chiamato "puller".

Nel ciclotrone di Milano inizialmente si acceleravano solo protoni, ma ben presto si preferì accelerare ioni negativi, che pur avendo un rapporto di produzione negativo rispetto ai protoni (1/100), permettevano di avere un fascio di particelle a energia variabile.

Generatore (R. F.): è il sistema che fornisce la tensione acceleratrice all'elettrodo acceleratore.

Il Dee costituisce l'elemento terminale di una struttura a sbalzo, che fa parte di una cavità risonante in quarto d'onda, realizzata ricoprendo con lamiera di rame un telaio di duralluminio. Era costituito da un generatore costruito dalla Società Marconi Italiana. Assorbiva una potenza di 250 KW erogando una potenza massima a radiofrequenza di 120 KW e poteva essere sintonizzato su ogni frequenza compresa fra 6 e 30 Mhz (milioni di hertz).

La tensione acceleratrice che si prevedeva di applicare tra il D e il finto D (dummy D) era di 70KV (quella di lavoro effettivamente utilizzata sarà stata intorno ai 40KV).

La bocca del D aveva una larghezza di 162 cm, un'altezza di 36 mm, salvo nella parte centrale dove per circa 20 cm era alta 60 cm. Ad una distanza di 40 mm dalle labbra del D era stato sistemato il "dummy D", posto a massa.

Questa soluzione, adottata in altri ciclotroni, presenta dei vantaggi da un punto di vista tecnico (estrazione), a discapito di una perdita di potenza e quindi di energia finale delle particelle.

³ I D (o Dees) – così chiamati perché a forma di una D maiuscola, – sono i due elettrodi metallici cavi con cui in un ciclotrone si genera un campo elettrico ad alta frequenza per accelerare le particelle cariche [n. d. r.]

Il trasferimento d'energia dal generatore alla cavità era ottenuto per mezzo di un trasformatore d'impedenza del tipo a "balun" che adattava l'impedenza del generatore stesso a quella della cavità. La realizzazione del sistema R. F. era stata preceduta da studi di fattibilità eseguiti su due modelli di cavità risonante in scala 1:1.

Utilizzazione: nel primo periodo di lavoro lo spazio per le esperienze era molto limitato, successivamente vennero predisposte due vie principali: una per il fascio analizzato, l'altra per quello normale.

Il fascio veniva incanalato attraverso dei magneti (quadrupoli) verso le camere di esperienza.

Per problemi di protezione sia il ciclotrone sia le singole camere d'esperienza venivano racchiuse in blocchi di calcestruzzo.

Prime esperienze: risalgono al 1967 e riguardavano lo studio sulla cattura di elettroni di alcuni gas (O_2 ; N_2 , Ar) con protoni di energia comprese tra i 33 e 38 MeV e le reazioni del tipo (p, α) allo scopo di determinare le sezioni d'urto in reazioni del tipo ${}^9Be(p, \alpha) Li$; ${}^{12}C(p, \alpha) {}^9B$; oppure ${}^{16}O(p, \alpha) N^{13}$.

In quel periodo, la macchina che accelerava protoni di energia max di 45 MeV era disponibile solo parzialmente per le esperienze, sia l'apparecchiatura per il trasporto del fascio sia l'area sperimentale erano collocate in spazi molto ridotti (a 9 metri dal ciclotrone).

Successivamente, intorno al 1972, entrava in funzione la nuova area sperimentale. Intanto veniva migliorata la funzionalità della macchina; veniva creato anche il "gruppo utenti del ciclotrone" a cui faranno riferimento molte sezioni dell'I.N.F.N. (Pavia, Padova, Catania, Legnano, etc.). Infine, i ricercatori di Milano, oltre a proseguire esperienze di fisica "pura" mettevano a punto nuove linee di ricerca applicata.

Estrazione: inizialmente i protoni venivano estratti tramite un estraattore elettrostatico e potevano essere estratti solo alla fine dell'orbita. La loro energia era fissa e dipendeva dal numero di accelerate che avevano fatto. Oltre all'impossibilità di avere particelle ad energia variabile, l'estraattore elettrostatico poneva seri problemi di funzionamento e questo metodo fu presto abbandonato,

Si passò quindi all'estrazione per "stripping". Vennero perciò accelerati gli ioni negativi che venivano fatti urtare contro una targhetta d'alluminio spostabile lungo il piano delle orbite delle particelle. Quando queste cozzavano contro la targhetta, gli H perdevano i due elettroni, trasformandosi in protoni che riuscivano a passare; essendo di carica negativa opposta invertivano il senso di rotazione uscendo così dal D e incanalandosi verso gli apparati sperimentali.

L'energia dei protoni estratti dipende ovviamente dal raggio dell'orbita a cui si effettua lo stripping. Il procedimento consente di variare l'energia dei protoni estratti: basta muovere la targhetta portandola nella posizione corrispondente all'energia desiderata.

L'estrazione del fascio avveniva sempre nel dummy D, ossia nel secondo D che era costituito solo dalle labbra del D:

Il ciclotrone A.V.F. e la ricerca applicata

I settori di ricerca di carattere applicativo nei quali si sono evidenziati le maggiori applicazioni del ciclotrone A.V.F. di Milano, riferite agli anni '70/'75, possono essere così sintetizzate:

- 1) *Chimica nucleare*: studio degli effetti delle radiazioni su reazioni chimiche di tipo classico.
- 2) *Biologia*: studi degli effetti biologici delle radiazioni.
- 3) *Medicina*: applicazioni mediche a carattere diagnostico con produzione di radioisotopi (in particolare Pb; I).
- 4) *Industria*: analisi non distruttive per attivazione nucleare con misure degli spettri di raggi X eccitati da protoni e analisi di campioni d'aria o acqua allo scopo di determinarvi tracce di inquinanti (metalli tipo il Pb).

L'efficacia e l'interesse di questo metodo derivano dalla disponibilità di nuovi rivelatori al Si (Li) che avendo risoluzioni per raggi x di 150-250 eV rendono possibili misure rapide e precise degli spettri di emissione. Analisi di questo genere permettono di determinare materiali pesanti con elevata sensibilità, sensibilità non raggiungibile con altri metodi.

Dal ciclotrone A.V.F. al ciclotrone superconduttore

Fin dalla metà degli anni settanta i responsabili del Laboratorio Ciclotrone di Milano si posero il problema di proteggere e realizzare un nuovo tipo di ciclotrone che fosse in grado di accelerare non solo particelle leggere, ma tutti gli ioni compresi nella tavola periodica degli elementi.

Animatore di questo progetto fu il Prof. Resmini che aveva partecipato a tutte le precedenti fasi di realizzazione del ciclotrone A.V.F. di Milano⁴.

La possibilità di disporre di proiettili con energie che vanno dai 100 MeV/nucleone per ioni leggeri (deutoni, alfa, etc.) a 20 MeV/nucleone per ioni pesanti (oro, piombo, uranio, etc.) apre nuove possibilità per alcune ricerche fisiche.

Il superconduttore si differenziava dal precedente per l'elevatissimo campo magnetico, fino a 50 kgauss, raggiungibile appunto con bobine superconduttrici, bobine con un cavo metallico in un materiale speciale, leghe di niobo-titanio in matrice di rame. Quando sono immerse in un bagno di elio liquido alla temperatura di 4.2 K° (-269 gradi centigradi) esse presentano una resistenza nulla al passaggio della corrente elettrica (da cui il nome).

Conclusioni

La costruzione del ciclotrone di Milano rappresentò un momento importante per le esperienze che ne seguirono e per l'opportunità che ebbe la comunità scientifica italiana di poter costruire una macchina capace di accelerare, per la prima volta in Italia, protoni ad energia relativistica.

Forse non tutte le potenzialità della macchina vennero sfruttate, ma sicuramente il ciclotrone di Milano servì a far crescere professionalmente una schiera di progettisti e di tecnici che riversarono in altri settori e su altre macchine l'esperienza maturata a Milano.

La costruzione del ciclotrone venne vissuta con grande spirito di gruppo dai tecnici INFN e dal personale dell'Università.

La comunità scientifica milanese ebbe forza e determinazione a perseguire il progetto di una macchina acceleratrice e realizzò questo suo progetto perseguendo rapporti di collaborazione con Assolombarda ed il mondo produttivo lombardo al quale chiese di collaborare offrendo garanzie di serietà scientifica per ciò che poteva nascere dalla realizzazione della macchina e dal suo utilizzo.

Un po' di anni prima (1947-1953) in un contesto culturale diverso, ma simile per alcune analogie, l'ing. Guido Ucelli ed un gruppo di industriali lombardi, con l'appoggio e l'entusiasmo del Comune di Milano e del Ministero della Pubblica Istruzione riuscivano a realizzare sempre a Milano, il primo grande Museo dedicato alla storia della Scienza e della Tecnica dove attualmente è custodito il modello del ciclotrone qui presentato.

[24 luglio 2026]

⁴ Francesco Resmini (1938-1984) ideatore del primo ciclotrone superconduttore europeo, realizzato a Segrate (Milano) presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata dell'I.N.F.N. e dal 1994 ospitato nei suoi Laboratori Nazionali del Sud a Catania.