

ENRICO FERMI

Accademico d'Italia

## PROSPETTIVE DI APPLICAZIONI DELLA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE (\*).

Lo studio dei fenomeni radioattivi ebbe origine circa quaranta anni or sono con la scoperta di Becquerel delle radiazioni emesse dai sali di uranio. Subito dopo la prima scoperta fu un succedersi di fondamentali ricerche sulla natura delle nuove radiazioni e sulle proprietà chimiche degli elementi che le emettono. Queste ricerche sono legate principalmente ai nomi dei coniugi Curie, scopritori del radio, e di Ernesto Rutherford. Per opera di questi pionieri degli studi radioattivi fu precisata la natura fisica dei raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  e fu riconosciuta l'esistenza di vere e proprie famiglie di elementi radioattivi che vengono generati uno dall'altro per successive disintegrazioni.

Le nuove radiazioni scoperte dovevano ben presto dimostrarsi di eccezionale interesse scientifico non solo quale oggetto di studio in sè, ma anche come metodo potentissimo per investigare la struttura dell'atomo. Infatti le particelle  $\alpha$ , data la grande energia di cui sono dotate, attraversano gli atomi che incontrano sul loro percorso; essendo cariche elettricamente esse permettono così di studiare le caratteristiche del campo elettrico nell'interno degli atomi e di dedurne la distribuzione delle cariche elettriche interatomiche.

Nel 1913 Rutherford riassumeva i risultati delle sue classiche ricerche condotte con questo metodo nel modello di atomo a sistema planetario che da lui porta il nome. Il nucleo carico di elettricità positiva occupa in questo modello una posizione centrale analoga a quella del sole nel sistema planetario; mentre gli elettroni negativi corrispondono ai pianeti e si avvolgono in orbite più o meno complesse attorno al nucleo. Nello stesso anno Bohr dava i criteri fondamentali per la descrizione dei movimenti e delle proprietà di questo infinitesimo sistema

(\*) Lezione tenuta nell'Istituto di Sanità Pubblica il 29 aprile 1938-XVI.

planetario originando così quella teoria dell'atomo che, attraverso una elaborazione durata circa un ventennio, permette oggi di intendere fin nei dettagli le proprietà dei sistemi atomici e molecolari arrestandosi solo dove la complessità dei problemi matematici rende troppo complicata la discussione quantitativa dei fenomeni.

Questo rapido sviluppo degli studi sopra la struttura dell'atomo determinò forse un certo rallentamento nell'interesse dei fisici per i fenomeni che hanno sede nel nucleo atomico. La situazione determinatasi può trovare un riscontro in un analogo sviluppo degli studi di astronomia. Anche in questa scienza l'interesse si rivolse dapprima al calcolo del moto dei pianeti attorno al sole che i metodi della meccanica celeste permisero di seguire fin nei più minuti dettagli. Solo in un secondo tempo, dopo che il moto dei pianeti fu completamente descritto e compreso, gli astronomi rivolsero la loro attenzione alle proprietà interne del sole considerato non solamente come centro di attrazione per i pianeti, ma come oggetto di studio in sè.

Accadde analogamente nella fisica che il rallentarsi dell'interesse per problemi relativi al moto e alle proprietà del sistema di elettroni che circonda il nucleo positivo che si determinò quando almeno i problemi fondamentali in questo campo ebbero trovata soddisfacente soluzione, determinò un intensificarsi degli studi sopra la struttura interna del nucleo studi che, nel paragone astronomico, corrispondono a quelli della fisica solare e della astrofisica.

I fenomeni radioattivi sono la forma più appariscente dei fenomeni nucleari; si è riconosciuto infatti da tempo che le radiazioni  $\alpha$  e  $\beta$  vengono originate da specie di esplosioni durante le quali i nuclei degli elementi più pesanti perdono alcune delle loro particelle trasmutandosi in nuclei meno complessi.

L'intensificarsi degli studi di fisica nucleare al quale abbiamo ora accennato, fu facilitato poi dagli enormi progressi che, dal tempo della prima scoperta, erano stati frattanto compiuti dalla tecnica per l'osservazione delle radiazioni radioattive. Si pensi che i primi studi sulle proprietà dei raggi  $\alpha$  erano in gran parte eseguiti con lo spintariscopio e cioè con un piccolo schermo fluorescente sul quale lo sperimentatore osservava al microscopio le minutissime scintilline prodotte dall'urto di una particella  $\alpha$  contro lo schermo. Le osservazioni venivano eseguite tal-

volta per lunghe ore nella più assoluta oscurità, richiedendo una attenzione continua e faticosissima da parte dell'osservatore. Oggi possiamo invece osservare e rendere percettibile all'uditorio e contare automaticamente l'arrivo di una sola particella  $\alpha$  o  $\beta$  mediante un apparecchio semplicissimo, il contatore, di cui qui mostro un esemplare in funzione (fig. 1).

Esso è costituito da un tubetto di alluminio, lungo pochi centimetri e grosso come il coperchio di una penna stilografica, chiuso ermeticamente; lungo l'asse vi è un filo metallico teso fra due tappi isolanti: il tubetto è portato, per mezzo di una batteria di pile, ad un potenziale di un migliaio di volt rispetto a terra; il filo è in comunicazione con un amplificatore ed è connesso con la terra attraverso una resistenza estremamente elevata.

Se un raggio  $\beta$ , ad es., attraversa questo apparecchio, gli ioni che esso produce nel suo passaggio innescano una microscopica scarica sul filo; la scarica si spegne subito ma l'amplificatore riceve da essa un impulso che viene fortemente amplificato; tanto che un numeratore, del genere di quelli usati per contare le conversazioni telefoniche, lo registra facendo scattare un numero. Contemporaneamente il fenomeno è reso visibile all'uditorio dalla accensione di una lampada a neon che manda un lampo di luce rossastra.

Se io avvicino al contatore una sostanza radioattiva, anche assai debole, si sentono subito i battiti del numeratore, accompagnati dai lampi della lampada al neon.

Si pensi che ciascun impulso corrisponde in questo caso al passaggio di un solo elettrone attraverso il contatore.

Quando io tolgo la sostanza radioattiva, i colpi frequenti cessano, ma ogni tanto si sente tuttavia un impulso: esso è dovuto alle radiazioni cosmiche, che non è possibile schermare efficacemente dato il loro alto potere penetrante e che costituiscono una specie di fondo rispetto al quale non è difficile distinguere quello che è dovuto alle radiazioni delle sostanze in studio.

Un altro potente mezzo di indagine è stata la camera di Wilson, nella quale — sfruttando il fatto che gli ioni presenti in una massa di aria satura di vapor d'acqua diventano centri di condensazione del vapore — si possono vedere e fotografare le scie di particelle  $\alpha$  e  $\beta$  che l'attraversano.

I nuclei delle sostanze radioattive si disintegrano spontaneamente per modo che dall'esame di questo fenomeno si possono trarre indirettamente alcune conclusioni sulla loro struttura interna. E' ben noto però che gli agenti fisici e chimici ordinari non hanno alcuna influenza sulle

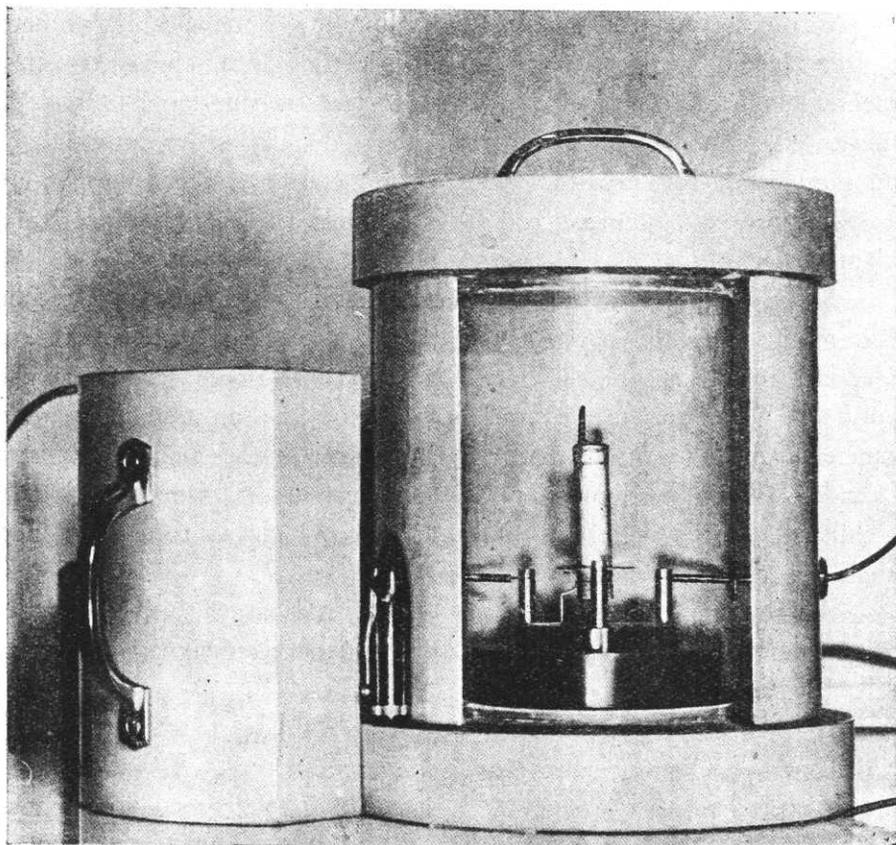


FIG. 1. - Contatore con involucro di protezione in piombo.

modalità della disintegrazione radioattiva; di modo che il fisico deve limitarsi ad osservare ciò che accade senza poter produrre o variare i fenomeni a seconda delle necessità della sua ricerca. Di qui numerosi tentativi diretti a trovare procedimenti per produrre artificialmente fenomeni nucleari con la possibilità di poterne cambiare le condizioni in modo da facilitare lo studio.

Il primo ad ottenere risultati concreti in questo campo fu ancora il Rutherford che nell'anno 1919 inaugurò la tecnica dei cosiddetti « bom-

bardamenti nucleari». Essa consiste nel lanciare contro un nucleo un proiettile dotato di una energia relativamente enorme quale ci è dato da quelle stesse particelle  $\alpha$  che vengono emesse spontaneamente con velocità grandissime nelle disintegrazioni radioattive. Se una di queste particelle colpisce il nucleo di un elemento leggero essa arriva a modificarne la struttura provocando una « reazione nucleare ».

Il caso che una particella  $\alpha$  colpisca un nucleo in questi bombardamenti è tuttavia estremamente raro; e ciò non solo per la estrema piccolezza del bersaglio ma anche perchè il nucleo da colpire è carico di elettricità positiva al pari della particella  $\alpha$  che costituisce il proiettile; e quindi il bersaglio respinge il proiettile. Per queste ragioni nei primi esperimenti gli effetti del bombardamento poterono essere constatati soltanto in pochi casi e attraverso a difficoltà sperimentali grandissime. Ma già queste prime osservazioni permisero di constatare che in seguito al bombardamento avvenivano delle vere e proprie catastrofi nucleari tali da trasformare il nucleo colpito nel nucleo di un elemento diverso da quello originario.

In molti casi il nuovo nucleo prodotto per effetto della disintegrazione è identico ad uno dei nuclei di qualcuno degli elementi chimici esistenti in natura; per molti anni anzi si ritenne che ciò accadesse di regola. La dimostrazione che talvolta le cose vanno in modo differente fu portata soltanto nel 1933 grazie ai lavori di Joliot e di sua moglie Irene Curie. Essi scoprirono che nel bombardamento con particelle  $\alpha$  di alcuni elementi leggeri venivano a prodursi degli elementi dotati di proprietà radioattive analoghe a quelle degli elementi radioattivi naturali; i nuovi elementi radioattivi così prodotti però non coincidevano con nessuno degli elementi radioattivi naturali dai quali differiscono sia per le proprietà chimiche poichè si tratta di solito di elementi leggeri (alluminio, azoto, silicio), mentre le sostanze radioattive naturali sono tutte rappresentate da elementi pesanti, sia anche per la natura delle particelle emesse e per i periodi di disintegrazione.

Con queste scoperte ebbero inizio gli studi sopra la produzione artificiale di nuovi elementi radioattivi. Abbiamo detto un momento fa che la principale ragione per cui è bassa l'efficienza dei bombardamenti con particelle  $\alpha$  consiste nel fatto che il nucleo bersaglio e la particella proiettile sono entrambi carichi di elettricità positiva e quindi si respingono

con forze relativamente enormi. Per questa ragione pensai esser conveniente sostituire come proiettile alle particelle  $\alpha$ , una particella elettricamente neutra e cioè il neutrone. Le sorgenti di neutroni da me usate erano costituite da piccoli tubetti di vetro riempiti di polvere di berillio (fig. 2) e di emanazione di radio, che mi vennero generosamente preparati dal Laboratorio di Fisica di questo Istituto di Sanità. Sono ben lieto di questa occasione per ringraziare pubblicamente l'Istituto di Sanità e in particolare i proff. Marotta e Trabacchi per questa preziosa collaborazione che mi ha reso possibili le ricerche in questo campo.

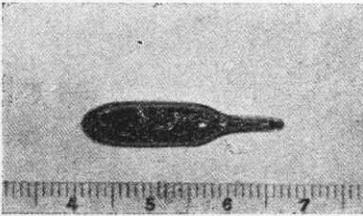


FIG. 2. - Sorgente di neutroni.

Il successo si delineò fin dalle prime esperienze e si poterono subito ottenere sostanze radioattive artificiali in quantità facilmente misurabili. Si riscontrò subito anche che non solo gli elementi leggeri,

ma la maggioranza degli atomi, qualunque sia il loro peso atomico, possono venire disintegrati dai neutroni. Perfino l'uranio, il più pesante degli elementi, dà origine, sotto l'azione del bombardamento neutronico, ad una serie di corpi radioattivi artificiali diversi da quelli che se ne ottengono per disintegrazione naturale. Tra di essi si trovano almeno due nuovi elementi chimici, l'ausonio e l'esperio, aventi numero atomico più grande di tutti gli elementi conosciuti in natura.

Prima di dimostrare con una facile esperienza come la radioattività artificiale possa effettivamente venire prodotta, accennerò ad un semplice artificio che rende assai più efficace il bombardamento neutronico.

Nel 1935 fu osservato nel nostro Laboratorio un fenomeno che permette di aumentare notevolissimamente il rendimento della produzione di sostanze radioattive artificiali con neutroni. I neutroni vengono emessi dalle sorgenti con velocità grandissime; vi è però un modo estremamente semplice per rallentarli in seguito. Esso consiste nel circondare la sorgente da cui escono i neutroni, con una grossa massa di paraffina o di acqua o in genere di una sostanza contenente molto idrogeno. I neutroni colpiscono gli atomi di idrogeno e ad ogni urto cedono ad essi una buona parte della loro energia così che, dopo una ventina di urti, la loro energia è ridotta a meno di un decimilionesimo dell'energia iniziale. Questi neu-

troni lenti seguitano a vagare nell'interno dell'acqua o della paraffina ed hanno così una elevata probabilità di colpire i nuclei della sostanza da trasformare.

L'efficienza dei neutroni lenti per produrre sostanze radioattive artificiali è in molti casi enormemente maggiore di quella dei neutroni veloci; e l'esaltazione delle attivazioni che si possono così ottenere arriva ad essere di un centinaio di volte.

Questi fenomeni si possono dimostrare sperimentalmente in modo facile. Come elemento del quale produrre la radioattività artificiale sceglieremo il rodio; oltre a dare effetti di notevole intensità, esso presenta il vantaggio di produrre elementi radioattivi di vita molto breve; per modo che basta un breve periodo di irradiazione per mostrare il fenomeno.

La sorgente di neutroni, preparata come ho già detto, si trova alla distanza di una decina di metri dal contatore; una massa di piombo interposta impedisce che i raggi  $\gamma$  (che vengono emessi dalla sorgente insieme ai neutroni) raggiungano il contatore mascherando il fenomeno che mostrerò.

La laminetta di rodio che, avvicinata al contatore prima della attivazione, non produce su di esso nessun effetto, viene ora avvicinata alla sorgente di neutroni, la quale è stata a sua volta collocata nell'interno di un grosso blocco di paraffina allo scopo di rallentare i neutroni col procedimento che ho sopra descritto. Trascorso un paio di minuti riprendiamo la laminetta di rodio e avviciniamola di nuovo al contatore. Il gran numero di impulsi, bene udibili in tutta la sala, rivela la radioattività acquistata dal rodio.

Come ho detto questa attivazione è di durata effimera; man mano che il tempo passa la sua intensità diminuisce e tra una diecina di minuti sarà scomparsa del tutto.

Altre sostanze, a differenza del rodio, richiedono bensì un tempo più lungo per essere irradiate; però la loro radioattività dura un tempo più lungo che può essere di ore, di giorni o anche di mesi. Così per es. il radiosodio ha una vita media di 15 ore, il radioarsenico di circa un giorno, uno dei radioiridi di circa due mesi, ecc.

Esperienze del tipo che ho descritto hanno permesso di formarsi un quadro relativamente completo del meccanismo di produzione dei corpi

radioattivi artificiali. Tuttavia il numero di neutroni che si possono ottenere dalle sorgenti che vi ho mostrato, è relativamente molto piccolo (dell'ordine di dieci milioni al secondo). Ne segue che le quantità di elementi radioattivi che si possono produrre con esse, pur essendo sufficienti al loro studio data la estrema delicatezza dei mezzi di osservazione,

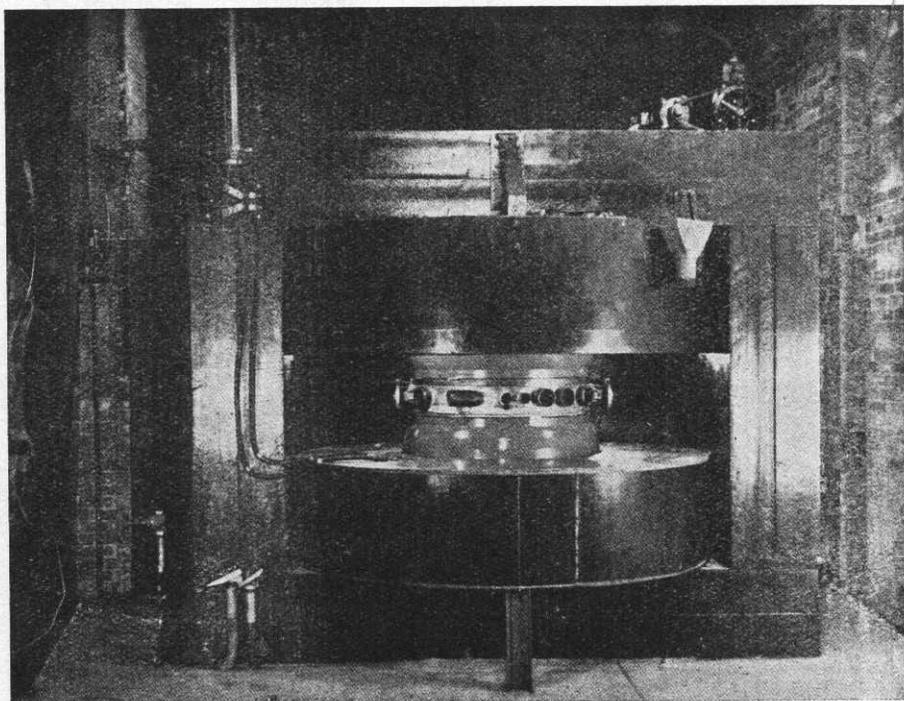


FIG. 3. - Ciclotrone.

non sarebbero però bastanti per la maggior parte delle applicazioni di carattere pratico.

Sorge così il problema di realizzare sorgenti di neutroni di intensità enormemente maggiore. Questo scopo si può raggiungere sostituendo alle sostanze radioattive naturali, quali sorgenti di particelle per effettuare i bombardamenti atomici, degli ioni di opportune sostanze ai quali viene impressa la grande energia necessaria per mezzo di una forte differenza di potenziale.

Due vie sono state finora seguite per imprimere agli ioni le enormi velocità occorrenti. Una è quella impiegata nell'apparecchio, del quale

faccio vedere una fotografia (fig. 3) e che si chiama « ciclotrone »: in esso si impiega un artificio assai ingegnoso: gli ioni vengono lanciati in un campo magnetico tra i poli di un enorme elettromagnete: essi sono deviati dal campo magnetico in una traiettoria a spirale e pertanto attraversano un gran numero di volte un certo piano diametrale, dove incontrano un forte salto di potenziale, dal quale vengono accelerati. Questa differenza di potenziale cambia sincronicamente con ritmo opportuno; in modo che, sebbene essa sia di poche decine di migliaia di volt, ad ogni mezzo giro degli ioni, essa imprime una nuova accelerazione, che, sommandosi alle precedenti, fa sì che, alla fine della spirale, gli ioni hanno assunto una velocità come se si fossero mossi in un tubo alle cui estremità fosse applicata una differenza di potenziale di vari milioni di volt. Incontrando una piastra di berillio essi producono la reazione nucleare che genera i neutroni.

Un'altro metodo è quello di accelerare gli ioni in un tubo di scarica convenientemente lungo, il quale abbia, ad es., un estremo a terra e l'altro estremo ad un potenziale di almeno un milione di volt.

L'impianto in corso di costruzione in questo Istituto è stato progettato in questa seconda forma.

Nella fotografia del progetto, che ora si proietta (fig. 4), si può vedere il generatore dell'alta tensione, costituito da un insieme di grossi condensatori e di lampade raddrizzatrici che hanno la funzione di decuplicare all'incirca la tensione iniziale di centomila volt prodotta da un trasformatore.

Il generatore alimenta la parte superiore del tubo di scarica. Questo grosso corpo isolato da terra da colonne di isolatori di porcellana, contiene la sorgente di ioni, che in questo caso saranno di idrogeno pesante, e tutti i servizi elettrici ad essa inerenti.

L'energia arriva a questa specie di piccola centrale elettrica a mezzo di una cinghia isolante che mette in movimento un alternatore.

L'estremo inferiore del tubo, che riceve il fascio di ioni accelerati, si trova in una cabina sottoposta alla camera che contiene gli apparecchi e porta la piastra di berillio da cui sono ottenuti i neutroni.

Tale parte del tubo è immersa in una grande vasca d'acqua contenente in soluzione l'elemento sul quale si vuole agire.

Dopo la irradiazione, la soluzione viene portata nel laboratorio chimico, dove subisce le necessarie operazioni di concentrazione, che, in generale, sono assai semplici e rapide.

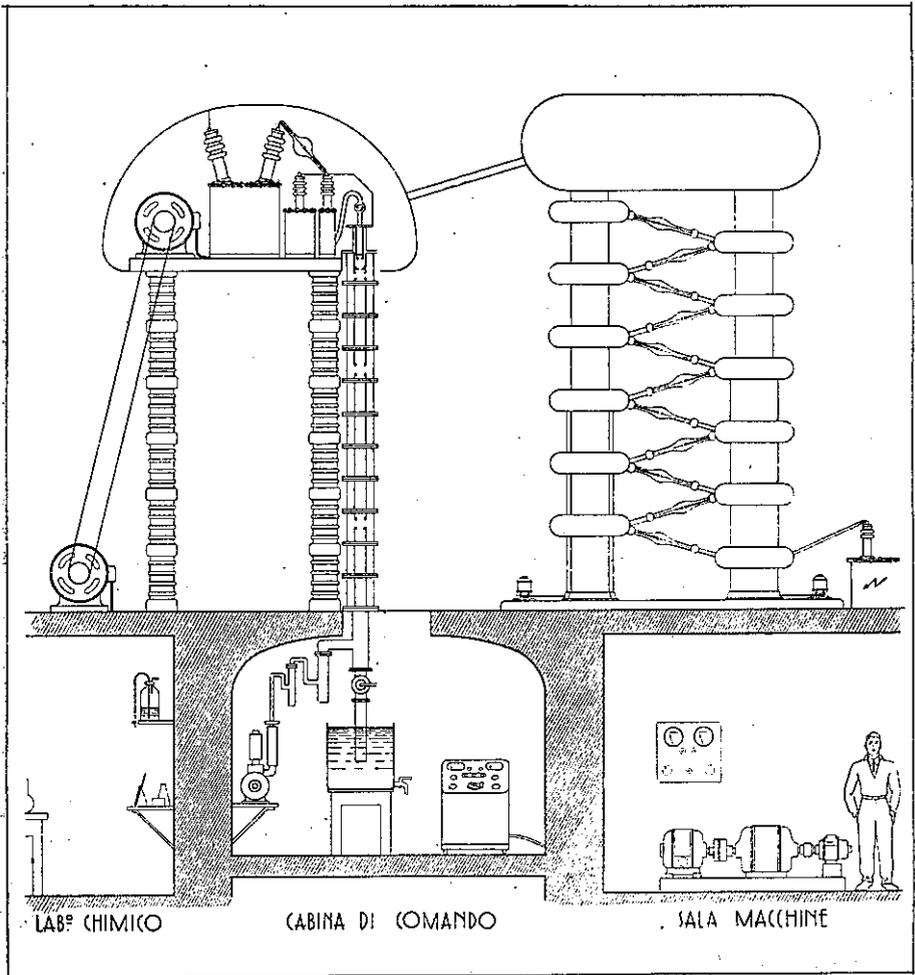


FIG. 4. - Impianto dell'Istituto di Sanità Pubblica.

I fenomeni di radioattività artificiale che si potranno ottenere da questa installazione sono gli stessi che si producono con le sorgenti di emanazione più berillio, usate nelle prime esperienze; ma, naturalmente, cambia l'ordine di grandezza del numero dei neutroni prodotti, e quindi quello delle sostanze che si possono preparare.

Con sorgenti di emanazione più berillio, anche se contengono come quelle che io ho sempre impiegato, la emanazione ricavata da un grammo di radio, le sostanze prodotte sono sempre in quantità tale che per apprezzarle occorre il contatore, o almeno una sensibile camera di ionizzazione. Con un apparecchio come quello che si sta montando qui non è esagerato prevedere che dalla placca di berillio vengano emessi neutroni come se vi fosse una sorgente delle solite, nella quale si fosse messa la emanazione di qualche chilogrammo di radio: si capisce quindi che è legittimo sperare che si possano preparare giornalmente, sostanze radioattive di attività equivalente a quella di qualche grammo di radio.

Prima di terminare questa conferenza, mi piace accennare brevemente a quelle che si prevedono fra le più importanti applicazioni delle sostanze radioattive artificiali.

E' da prevedere senz'altro che le sostanze radioattive artificiali troveranno un impiego terapeutico analogo a quello delle sostanze radioattive naturali. Per questo scopo potranno probabilmente venire sfruttate le possibilità offerte dalla grande varietà di elementi radioattivi che si possono produrre artificialmente e che permetteranno di porre le sostanze attive in forme chimiche che possano essere adatte al raggiungimento di determinati effetti.

Ma anche indipendentemente da queste possibilità, l'uso delle sostanze radioattive artificiali in quantità rilevanti, renderà possibili, io spero, anche molte interessanti ricerche nel campo della biologia e della chimica, usando i radioelementi come « indicatori ». Consideriamo per esempio il radiofosforo; esso è chimicamente identico al normale fosforo, del quale è isotopo. D'altra parte le sue proprietà radioattive permettono di riconoscerne la presenza e di dosarne la quantità col semplice uso di una camera di ionizzazione. Mescolando quindi fosforo radioattivo al fosforo contenuto negli alimenti, si può seguire il comportamento di questo elemento in un essere vivente come è stato già dimostrato dalle belle ricerche iniziate da Hevesy a Copenhagen e proseguite da Segrè e Artom a Palermo. Il comportamento sia biologico che chimico di molti elementi potrà così venire seguito durante lo svolgimento dei processi chimici o vitali con sole misure di radioattività effettuate dall'esterno senza alterare o disturbare comunque i processi in atto. Io ritengo che ricerche di questo genere troveranno un ambiente particolarmente adatto

in questo Istituto di Sanità ove sono riuniti, accanto al laboratorio di Fisica che produrrà le sostanze radioattive artificiali anche dei laboratori, ottimamente e modernamente attrezzati di Chimica, Biologia e di Batteriologia.

Mi sia pertanto concesso di concludere questa conferenza con la espressione della speranza che i progetti in corso permetteranno di realizzare qui in una forma costruttiva quella collaborazione tra Fisica, Chimica e Biologia che è così frequentemente auspicata dai cultori di tutte e tre queste scienze; le quali, pur avendo nomi diversi ed essendo per una necessaria divisione del lavoro coltivate da persone diverse non sono in realtà altro che capitoli della unica grande scienza della natura.

