

IMPIANTI E APPARECCHIATURE

Il funzionamento della camera a ionizzazione ad aria libera dell'Istituto Superiore di Sanità

GUIDO MISSONI e LUCIO PUGLIANI

Laboratori di Fisica

Riassunto. — Viene descritto il funzionamento e vengono riportate le caratteristiche di una camera standard ad aria libera, disegnata e costruita nei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità. Sono descritti tutti i procedimenti per determinare i fattori correttivi necessari per una esatta determinazione della esposizione, sono riportate le misure relative alle caratteristiche del fascio a raggi X, ai fattori correttivi relativi all'assorbimento e alle variazioni di temperatura e umidità. Infine viene data una espressione della esposizione in termini di tutti i parametri misurati.

Summary (*The free air ionization chamber of the Istituto Superiore di Sanità*). — A free air chamber, intended to be a primary standard for the measurement of the exposure to X rays, has been designed and built at the Physics Laboratory of the Istituto Superiore di Sanità (CHIOZZOTTO, 1962). In this work all the procedures adopted to carry out a precise measurement with this instrument are reported. The characteristics of the X-ray beam, such as the H.V.L. in copper (Fig. 4) and the homogeneity coefficient, and the intensity distribution in the beam have been measured. The exposure-distance relationship (Fig. 5) has been verified and all the correcting factors relating to absorption, temperature and humidity changes, saturation and field distortions have been determined. The capacity of the condensers where the ionization is collected has been measured and a check of the performance of the circuit used to measure the tension at which they get charged has been carried out. Finally an expression of the exposure in terms of all the measured parameters is given.

INTRODUZIONE

Dato lo sviluppo e l'estensione che oggi ha assunto l'impiego delle radiazioni ionizzanti è necessario che un laboratorio nazionale affronti lo studio di una completa attrezzatura dosimetrica. Il problema cui ci si riferisce

è quello della costruzione e messa a punto degli standard primari, cioè di quegli strumenti che permettono la misura diretta della radiazione in accordo con le definizioni delle fondamentali grandezze dosimetriche internazionali accettate.

In questo lavoro ci si limita al caso delle radiazioni elettromagnetiche di bassa energia compresa fra 50 keV e 300 keV.

Il funzionamento di una camera standard ad aria libera è basato sulla misura della carica ionica prodotta dagli elettroni generati dalla radiazione incidente su un dato volume d'aria contenuto nella camera; è quindi necessario per un corretto funzionamento determinare con precisione tutti gli errori fatti nella misura della carica ionica, del volume di aria con cui il fascio interagisce e del volume di raccolta, ed inoltre introdurre tutte le correzioni dovute alla non perfetta corrispondenza fra le reali condizioni sperimentali e le condizioni ideali di misura implicate nella definizione di esposizione. Perché uno standard primario possa permettere la taratura di uno standard secondario con la precisione dell'1 % è necessario che l'errore complessivo sulla misura della esposizione fornita dallo standard primario non superi lo 0,5 %. Scopo di questo lavoro è quello di illustrare il funzionamento di uno strumento di questo tipo, di riassumere in forma concisa tutti i procedimenti messi in atto per la determinazione di fattori correttivi e di presentare i risultati ottenuti.

DESCRIZIONE DELLA CAMERA AD ARIA LIBERA DELL'ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ

La camera a ionizzazione ad aria libera impiegata come standard primario nei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità è stata progettata da CHIOZZOTTO (1962).

L'apparecchio, il cui schema è riprodotto in Fig. 1, è del tipo ad elettrodi piani e paralleli ed è costituito dai seguenti elementi:

- a) complesso degli elettrodi (1, 2, 3);
- b) sistema di barre per l'omogeneizzazione del campo elettrico (4);
- c) schermatura (5) e diaframma (6).

Complesso degli elettrodi.

Il complesso degli elettrodi è costituito da un elettrodo ad alta tensione (1), da un elettrodo raccoglitore (3) e da due elettrodi di guardia (2). Sia questi ultimi che l'elettrodo raccoglitore sono stati ricavati da zone contigue della stessa lastra di alluminio al fine di rendere minime eventuali differenze tra i potenziali di estrazione degli elettroni.

Sistema di barre per la omogeneizzazione del campo elettrico.

Questo sistema è formato da una serie di telai montati uno vicino all'altro, ciascuno dei quali è costituito da quattro tratti di barra a T, disposti con l'asta del T verso l'interno del telaio stesso. A ciascun telaio è applicata una opportuna tensione mediante un partitore resistivo.

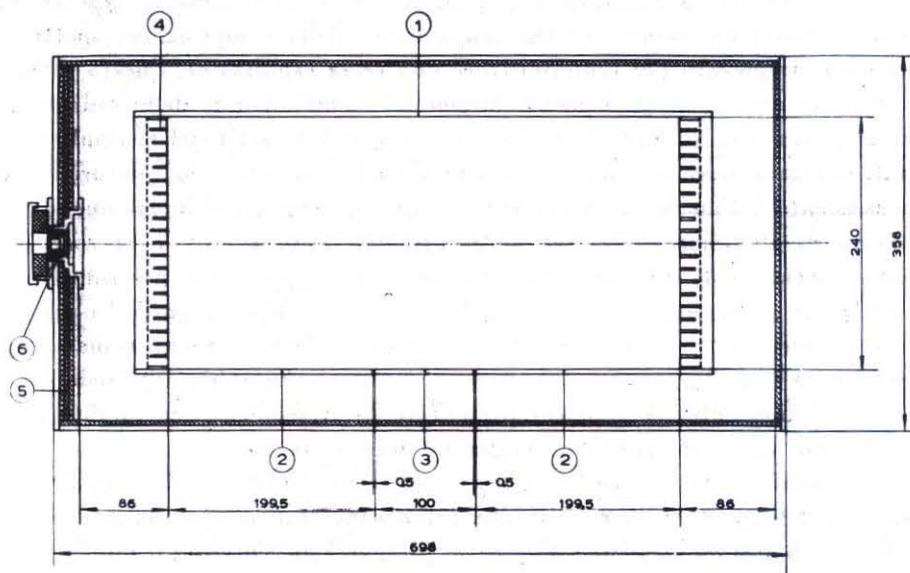


Fig. 1. — Schema della camera standard (dimensioni in mm). 1) elettrodo A.T.; 2) elettrodi di guardia; 3) elettrodo raccoglitore; 4) sistema di barre per l'omogeneizzazione del campo elettrico; 5) schermatura; 6) diaframma.

È ovvio però che tale sistema non può essere utilizzato anche nelle zone nelle quali il fascio di raggi X entra ed esce dalla camera standard. In tali zone le barre sono state tagliate e sostituite da barre cave, ricavate da un lamierino di alluminio sottile riprodotte la geometria dell'asta del T.

Schermatura e diaframma.

La schermatura della camera è formata da un involucro parallelepipedo di anticorodal, che sostiene lastre tutte di piombo di 5 mm di spessore ad eccezione di quella frontale che è di 15 mm di piombo. Questa parete porta una ghiera di ottone dove è alloggiato il diaframma d'ingresso della camera. Il diaframma ha un foro del diametro di 10 mm. L'area di questo diaframma deve essere esattamente conosciuta perchè essa è uno dei fattori che determinano il volume di aria con cui il fascio interagisce.

LA «QUALITÀ» DEL FASCIO DI RAGGI X

La sorgente del fascio di raggi X impiegato per eseguire misure con la camera standard è costituita (CHIOZZOTTO, 1962) da un tubo del tipo usato in terapia con prestazioni massime di 250 kV e 14 mA e un filtraggio intrinseco equivalente a 4,5 mm di alluminio. La macchia focale ha dimensioni di $(6,1 \times 6,1)$ mm².

Nell'eseguire la taratura di un dosimetro è necessario specificare in qualche modo un parametro che tenga conto della composizione spettrale del fascio impiegato per somministrare una certa esposizione, questo perché la risposta dei dosimetri dipende, in generale, dalle energie della radiazione cui sono esposti. Nel caso di un fascio di raggi X i parametri normalmente usati per questo scopo sono la tensione applicata al tubo e lo spessore di dimezzamento del fascio in un opportuno materiale. Spesso si fa uso anche del coefficiente di omogeneità, che è definito dal rapporto fra lo spessore di dimezzamento e lo spessore che ad esso occorre aggiungere per ridurre la esposizione in un punto del fascio al 25 %; questo ultimo prende il nome di secondo spessore di dimezzamento. Per una radiazione monocromatica il coefficiente di omogeneità è = 1, mentre due fasci che abbiano distribuzioni spettrali molto diverse possono presentare lo stesso spessore di dimezzamento, ma un coefficiente di omogeneità molto diverso.

Le misure degli spessori di dimezzamento sono state eseguite con filtri di rame di densità 8,79 g/cm³. Gli assorbitori sono stati posti a contatto della parete del diaframma che limita il fascio di raggi X uscente dal tubo. È stato impiegato come strumento di misura dell'esposizione una camera a cavità Victoreen, modello 70/5. I risultati ottenuti sono illustrati nelle Fig. 2 e 3

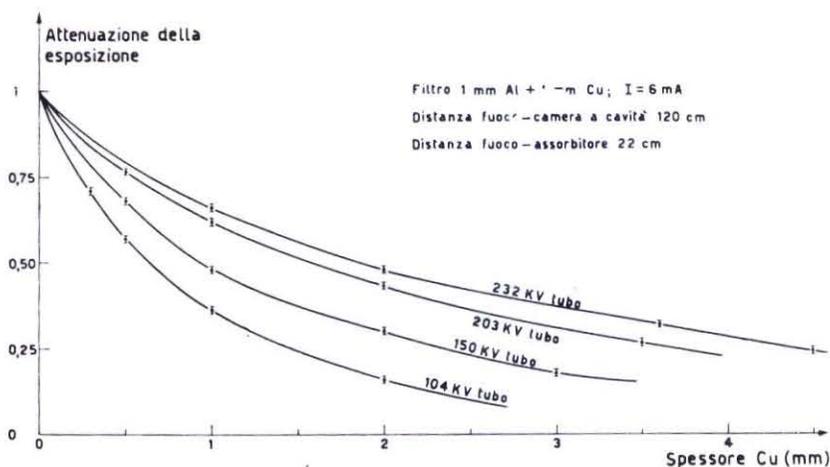


Fig. 2. — Curve di assorbimento in Cu (mm); viene data l'attenuazione della dose di esposizione in funzione dello spessore di rame, con un filtro iniziale di 1 mm Al + 1 mm Cu.

in cui sono riportate le curve di assorbimento dal primo al secondo spessore di dimezzamento per diversi valori della tensione applicata al tubo.

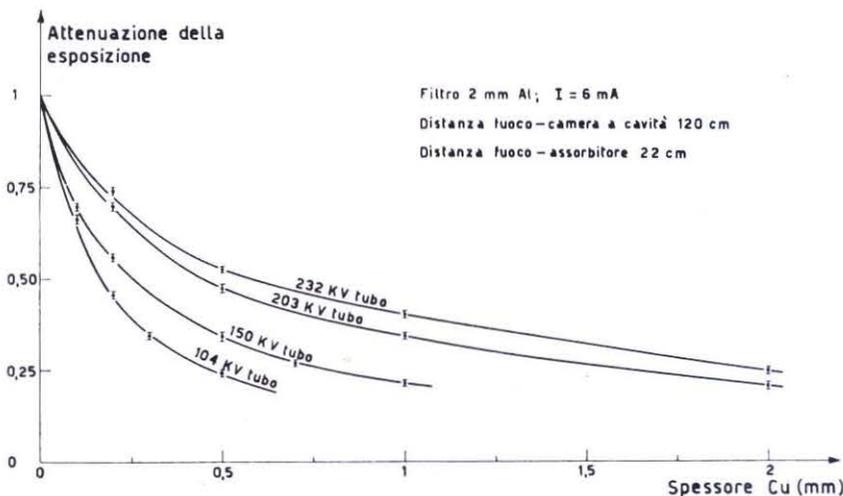


Fig. 3. — Curve di assorbimento in Cu (mm); viene data l'attenuazione della dose di esposizione in funzione dello spessore di rame con un filtro iniziale di 2 mm Al.

In Fig. 4 invece è riportata la curva che per ogni valore dello spessore di dimezzamento in rame fornisce l'energia equivalente del fascio. La equivalenza è stabilita con quella radiazione monoenergetica che presenta lo stesso spessore di dimezzamento del fascio.

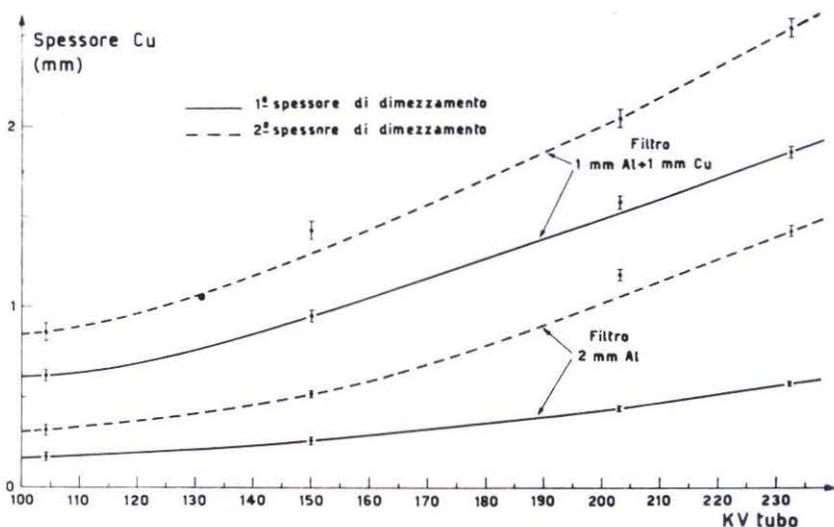


Fig. 4. — Spessore di dimezzamento del fascio in rame in funzione dell'energia equivalente del fascio.

GEOMETRIA DEL SISTEMA DI MISURE, ALLINEAMENTO DELLA CAMERA STANDARD E VALIDITÀ DELLA LEGGE DELL'INVERSO DEL QUADRATO DELLE DISTANZE

Per determinare la esposizione in un punto del fascio mediante la camera standard è importante definire esattamente il volume di aria investito dalla radiazione. È stato dimostrato da TAYLOR (1930) che questo volume è dato dal prodotto dell'area del diaframma d'ingresso per la lunghezza dell'elettrodo raccoglitore, se è soddisfatta la condizione che l'intensità del fascio sia costante sull'area del diaframma e se il coseno dell'angolo formato dall'asse del fascio con i raggi più divergenti permessi dal sistema dei diaframmi limitatori non è minore di 0,9975. Per il nostro sistema di misura questa seconda condizione è soddisfatta purché il diaframma della camera standard si trovi ad una distanza maggiore di 35 cm dal diaframma che limita il fascio. Occorre tuttavia assicurarsi che esista una zona centrale del fascio in cui l'intensità sia costante e che l'area del diaframma d'ingresso e l'asse del fascio dei raggi X coincidano perfettamente (WYCKOFF & ATTIX, 1957).

Per controllare questo allineamento e allo stesso tempo determinare l'estensione della zona centrale del fascio in cui questo presenta intensità costante si è proceduto nel seguente modo. Per mezzo di un livello a cannocchiale, l'asse del diaframma che limita il fascio è stato disposto orizzontale e parallelo alle rotaie che sostengono la camera standard, Successivamente sempre con l'ausilio del livello si è disposto su questo asse un film radiografico contenuto in uno *chassis* il cui centro è materializzato da una crociera di fili di tungsteno. Disponendo questo *chassis* a diverse distanze dal fuoco del tubo, lungo l'asse della camera, e regolando l'esposizione in modo da ottenere dei film non saturi, si può rilevare la distribuzione della intensità del fascio e controllare il suo allineamento con l'asse della camera standard. Eseguendo infatti delle densitometrie dei film si mette in evidenza una zona centrale di uniforme intensità del fascio e dalla posizione dell'ombra lasciata dalla crociera si può giudicare l'allineamento con tutta la precisione richiesta.

Dalle analisi condotte da TAYLOR (1930) per la determinazione del volume sensibile della camera standard risulta anche che, se si verifica la circostanza che l'area della macchia focale è minore dell'area proiettata sul piano che la contiene dai raggi più divergenti ammessi dal sistema di diaframmi, e purché sia sempre soddisfatta la suddetta condizione sul coseno dell'angolo di apertura, allora la sorgente di raggi X si può considerare puntiforme e localizzata dove essa materialmente si trova, cioè sull'anticatodo. Ne consegue che la legge dell'inverso del quadrato delle distanze deve essere applicata considerando la distanza fra questo punto ed il diaframma della camera standard. Quando viceversa, data la posizione relativa della camera stan-

dard e del diaframma fisso di collimazione del fascio, accade che l'area proiettata sul piano focale sia minore della effettiva estensione della macchia focale, allora la sorgente di raggi X si può considerare localizzata sul diaframma di collimazione e quindi le distanze devono essere misurate da questo punto e non dall'anticatodo. Ciò è dimostrato chiaramente in Fig. 5 dove è

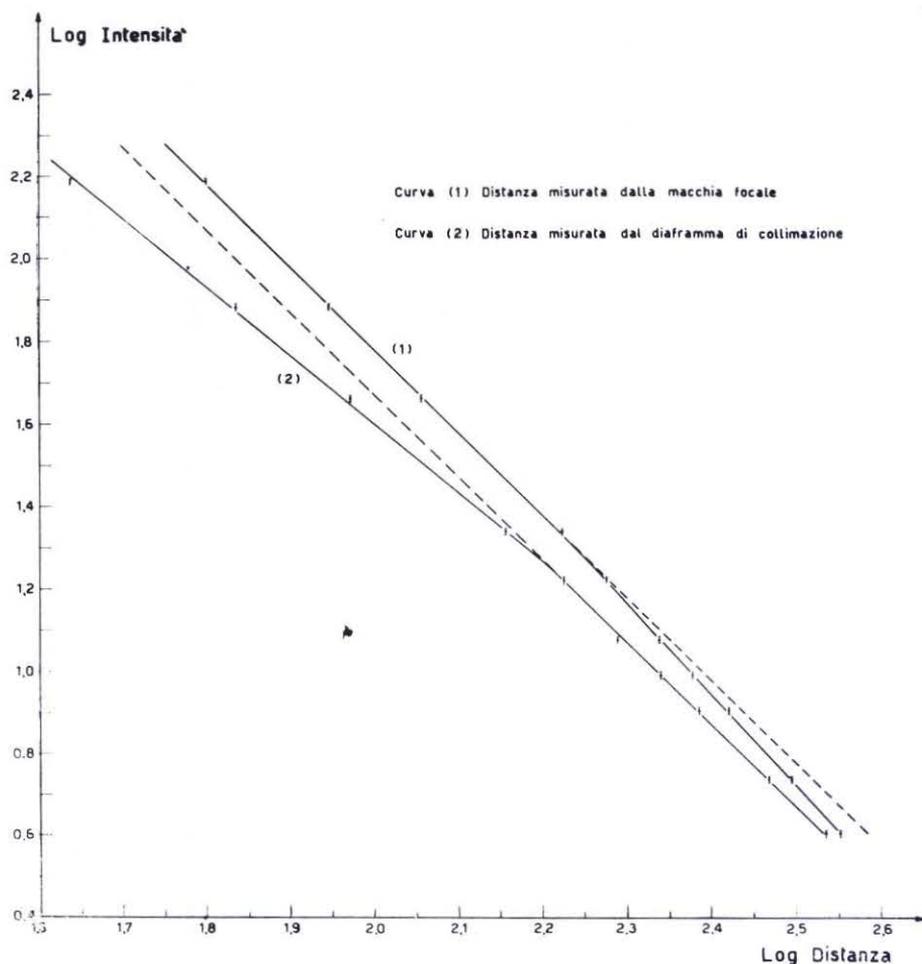


Fig. 5. — Logaritmo dell'esposizione misurata con la camera standard, in funzione del logaritmo delle distanze. La curva (1) si riferisce alle distanze misurate a partire dal fuoco del tubo e la curva (2) alle distanze misurate a partire dal diaframma di limitazione del fascio.

riportato il logaritmo dell'esposizione misurata con la camera standard, in funzione del logaritmo della distanza. La curva 1 si riferisce alle distanze misurate a partire dal fuoco del tubo e la curva 2 alle distanze misurate a

partire dal diaframma di limitazione del fascio. Si vede chiaramente che i punti sperimentali sono bene interpolati da una retta nel caso della curva 1 fino a distanze di circa 190 cm dalle macchie focali, per la curva 2 per distanze superiori a questa. Date le dimensioni dei diaframmi e l'estensione delle macchie focali, questa distanza critica corrisponde bene alla situazione su descritta, in cui l'area proiettata dai raggi di massima divergenza sul piano contenente la macchia focale corrisponde alla dimensione della macchia focale stessa.

MONITORAGGIO DEL FASCIO DI RAGGI X

Per eseguire con un fascio di raggi X misure della dose di esposizione che abbiano precisione migliore dello 0,5 % è necessario non solo che l'intero apparato di misure sia stabile entro questi limiti, ma che anche le caratteristiche del fascio soddisfino questa condizione. La intensità e la distribuzione spettrale del fascio dipendono dalla tensione applicata al tubo e dalla corrente che vi fluisce; queste grandezze quindi dovrebbero rimanere costanti nel tempo con un alto grado di precisione. Anche per l'applicazione del metodo di tarature per sostituzione si richiede che la esposizione in un punto del fascio rimanga costante per tutto il tempo della misura, o che almeno se ne possa conoscere la variazione.

Il tubo che genera il fascio di raggi X necessario per il funzionamento della camera standard dispone di alcuni apparati che assicurano una certa stabilità di funzionamento, ciò nonostante, una volta fissata la condizione di lavoro, la tensione e la corrente del tubo non risultano sufficientemente stabili per gli scopi previsti. Il modo normalmente adottato per risolvere tutti questi problemi è quello di disporre, in posizione fissa sul fascio, una piccola camera a ionizzazione ad aria libera (Fig. 6). Il segnale di risposta della camera monitor e della camera standard devono dipendere nello stesso modo dalla energia e dalla intensità del fascio di raggi X, cosicché ogni variazione avvertita dall'uno strumento sia avvisata anche dall'altro, durante il tempo necessario per la taratura di un dosimetro.

CORREZIONE PER L'ASSORBIMENTO DEL FASCIO

L'esposizione misurata con la camera standard può essere riferita a quel punto del fascio coincidente con il centro del diaframma d'ingresso dello strumento (TAYLOR, 1930), se è trascurabile l'assorbimento del fascio nel tragitto fra il diaframma stesso ed il centro del volume di raccolta della camera. Nel nostro caso questo percorso comporta l'attraversamento di 35,3 cm di aria e di due sottili fogli di alluminio, opportunamente profilati, disposti attraverso l'apertura d'ingresso nella camera standard e facenti parte del sistema di elettrodi destinati a render omogeneo il campo elettrico all'interno

della camera stessa. L'attenuazione del fascio in questi due materiali non ha un valore fisso, ma dipende dalla sua composizione spettrale e quindi dalle condizioni di lavoro, ivi compresa la distanza che il fascio ha percorso in

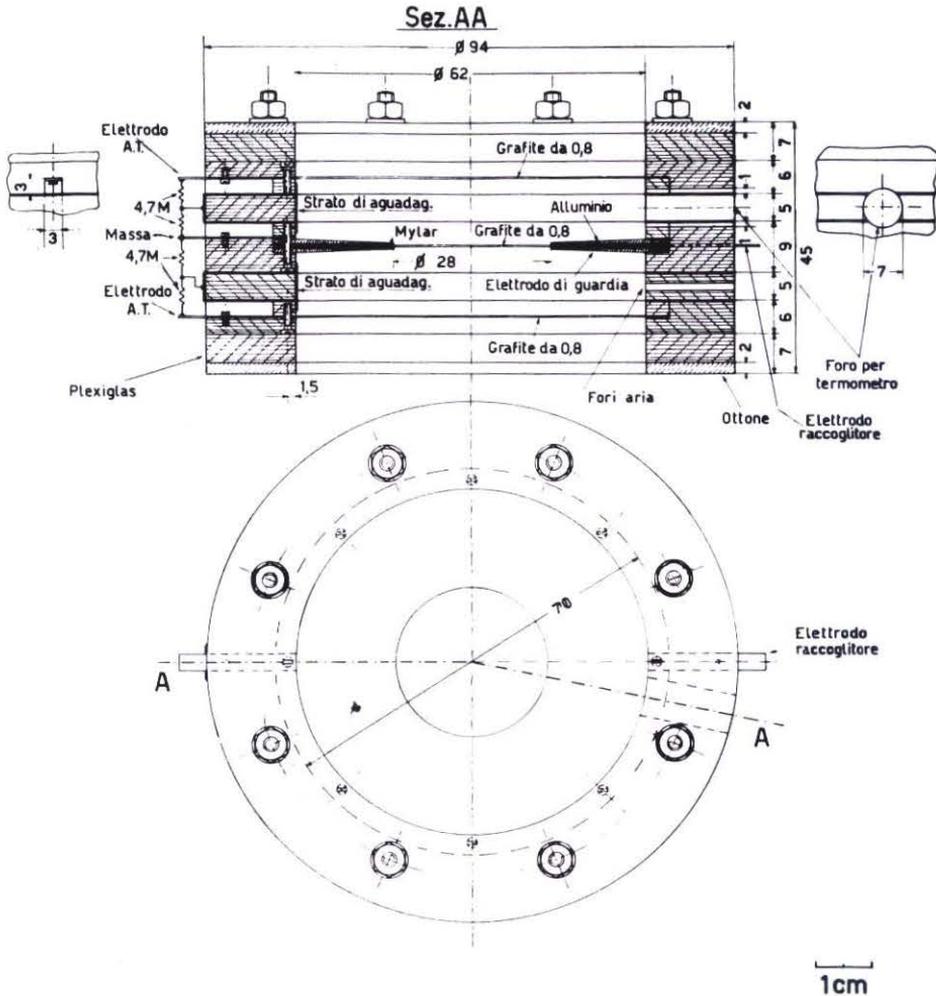


Fig. 6. — Sezione verticale e sezione orizzontale della camera monitor (dimensioni in mm).

aria prima di entrare nella camera standard. Si sono perciò eseguite una serie di determinazioni dirette del fattore di attenuazione in diverse condizioni di lavoro così da poter poi ricavare, per interpolazione, il fattore correttivo adatto per ogni circostanza. Dai valori di tali coefficienti correttivi si può stimare che l'errore residuo sulla determinazione della esposizione non superi lo 0,1 %.

CORREZIONE PER LE PERDITE DOVUTE ALLA RICOMBINAZIONE IONICA

La prima cosa di cui ci si deve preoccupare dal punto di vista della misura della carica ionica prodotta nella camera a ionizzazione ad aria libera, è che non ci siano sensibili perdite di carica per ricombinazione. Di ciò ci si accerta, come è ben noto, determinando la curva di saturazione della camera. Nel caso di uno strumento come questo, destinato a servire come standard primario, la corrente di saturazione non deve presentare, al disopra di certi valori, variazioni maggiori di qualche 0,1 %. I valori della tensione per cui si ha saturazione dipendono dalle dimensioni della camera, dalla sezione del diaframma di ingresso che definisce il fascio e dalla intensità d'esposizione da questo generata nel volume di raccolta della camera. Nel nostro caso la dose è stata misurata applicando tensioni crescenti comprese fra 500 V e 10.000 V, con un fascio generato sotto la tensione di 206 kV, una corrente di 5 mA e un filtraggio di 1 mm Al + 1 mm Cu. Il risultato è illustrato in Fig. 7, grafico a e b, in cui è riportato il valore della dose sia in funzione della tensione applicata sia del suo inverso.

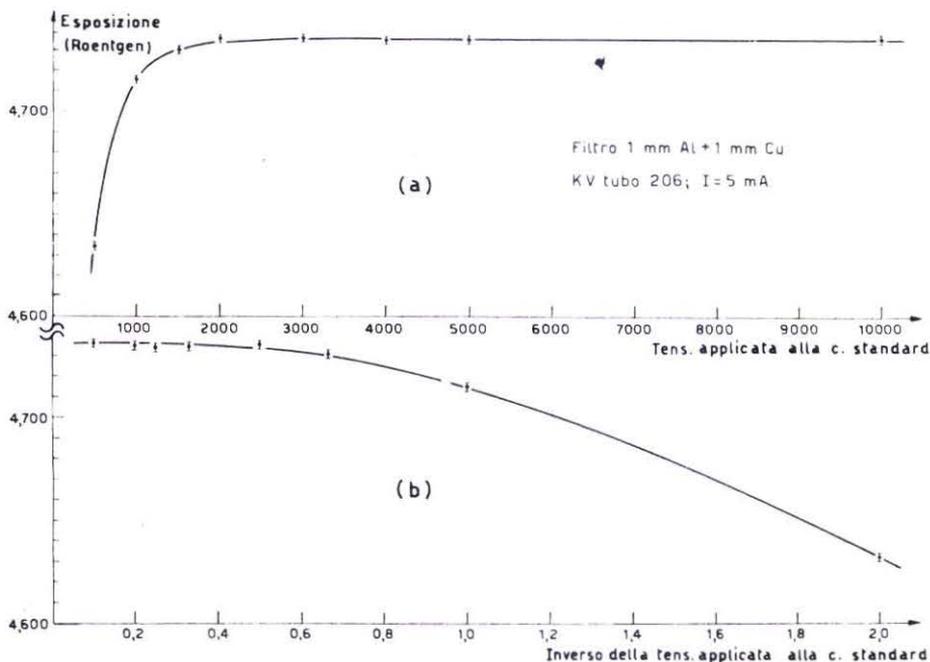


Fig. 7. — Curve di saturazione della camera standard in funzione della tensione, tra 500 V e 10.000 V. Con un fascio generato sotto la tensione di 206 kV, con la corrente di 5 mA, e con un filtraggio di 1 mm Al + 1 mm Cu. Nel grafico (a) è riportato il valore dell'esposizione (in roentgen) in funzione della tensione applicata (in volt); nel grafico (b) è riportato il valore dell'esposizione (in roentgen) in funzione dell'inverso della tensione (in volt⁻¹).

A queste curve si può applicare il criterio riportato da WYCKOFF & ATTIX (1957) per determinare il fattore correttivo. Esso consiste semplicemente nel determinare il valore della dose estrapolata per tensione infinita e, in base a questo, apportare la correzione per la effettiva tensione di lavoro. Nel nostro caso il valore estrapolato coincide, entro gli errori di misura (0,04 %), con la dose misurata sia a 5000 che a 2500 V. Si può quindi ritenere che alla tensione di lavoro scelta, 5000 volt, corrispondente ad un campo di 250 V/cm, non ci siano sostanziali perdite per ricombinazione.

CORREZIONI PER LE DIMENSIONI FINITE DELLA CAMERA

Un altro errore nelle misure della carica è conseguenza del fatto che gli elettroni liberati nelle interazioni delle radiazioni con l'aria possono raggiungere le pareti della camera prima di esaurire la loro energia cinetica in ionizzazione. Questa perdita di carica è però in parte compensata da un'altra causa di ionizzazione, che, viceversa, non dovrebbe essere presente secondo la definizione di esposizione, e non dovrebbe quindi contribuire alla carica totale raccolta. Si tratta della ionizzazione prodotta dagli elettroni generati all'interno della camera dai raggi X diffusi per effetto Compton, ovvero dai fotoni di fluorescenza dell'ossigeno e dell'azoto ionizzati nelle interazioni primarie con il fascio di raggi X. Il calcolo dei fattori di correzione per questi errori è fatto sulla base dei dati corretti riportati nel lavoro di WYCKOFF & ATTIX (1957). La perdita dovuta ad elettroni che arrivano a contatto con le pareti può essere stimata pari al $-0,45\%$ considerando un fascio generato sotto la tensione di 250 kV, con un filtraggio intrinseco di 3 mm di Al e un filtraggio aggiuntivo di 1 mm Al + 1 mm Cu. Nelle stesse condizioni il contributo dovuto ai fotoni Compton è stimato circa $+0,435\%$. Per cui i due effetti si compensano l'un l'altro quasi completamente e si può stimare che l'errore residuo complessivo non superi lo $0,015\%$.

CORREZIONI PER LE VARIAZIONI DI TEMPERATURA, PRESSIONE ED UMIDITÀ DELL'ARIA

Una corretta misura dell'esposizione richiede che l'aria all'interno della camera standard sia secca ed in condizioni normali di temperatura e pressione.

Variazioni da questa condizione, che non sono mai soddisfatte in pratica, debbono essere corrette considerando che un cambiamento della densità dell'aria e della quantità di vapor di acqua in essa contenuto, comporta una variazione della densità elettronica, dei poteri frenanti e della energia necessaria a produrre una coppia di ioni nel mezzo.

Il fattore correttivo, per cui va moltiplicato il valore dell'esposizione misurato, è dato dal rapporto fra il numero totale di ioni prodotti per unità

di volume in aria secca, in condizioni normali di temperatura e pressione, ed il numero di ioni prodotto in aria nelle effettive condizioni di umidità, temperatura e pressione a cui si opera. Il numero di ioni prodotto per unità di volume d'aria è, a sua volta, dato dal rapporto fra l'energia impartita dalla radiazione agli elettroni veloci prodotti in un cm^3 d'aria e l'energia necessaria per produrre una coppia di ioni. Questi due termini, numero ed energia degli elettroni prodotti per unità di volume ed energia per coppia di ioni, dipendono oltre che dalla composizione dell'aria anche dall'energia della radiazione elettromagnetica incidente.

Il problema delle correzioni che stiamo esaminando è discusso in un lavoro di BARNARD, ASTON & MARSH (1960) da cui si possono ricavare le formule adatte per i coefficienti correttivi. Se in un primo momento si trascura l'effetto della presenza di vapor d'acqua nell'aria e si tien conto solamente delle variazioni di densità, il fattore correttivo è espresso dal termine:

$$A = \frac{d}{d^0} = \left(\frac{273,15}{273,15 + t^0} \cdot \frac{P}{760} \right)^{-1}$$

in cui d e d^0 sono le densità dell'aria nelle diverse condizioni su accennate. Se viceversa si considera la presenza del vapore d'acqua, il cui effetto è — come s'è detto — di cambiare la composizione del mezzo con cui la radiazione interagisce alterando i valori della densità elettronica, del potere frenante e dell'energia necessaria per formare una coppia di ioni, allora bisogna prendere in considerazione l'energia media delle radiazioni incidenti, per decidere se il fenomeno predominante nel determinare il valore della esposizione è la diffusione dei raggi X del fascio per effetto Compton o l'assorbimento per effetto fotoelettrico.

La differenza pratica che corrisponde a questi due casi è che: nel primo la sezione d'urto per totale assorbimento dell'energia è pressoché indipendente dall'energia dei fotoni, nell'intervallo fra 0,2 e 2 MeV, e tale quindi risulta il fattore correttivo; nel secondo caso invece la sezione d'urto di assorbimento è fortemente dipendente dall'energia dei raggi X e quindi, per ogni valore di tale energia, occorre stimare il valore adatto del coefficiente correttivo. Per energie dei raggi X maggiori di 150 keV il rapporto σ_a/τ fra i coefficienti d'assorbimento della radiazione per scattering e per effetto fotoelettrico, è maggiore di 10. Quindi in questo campo di energie l'effetto Compton è predominante ed esso solo va considerato nel calcolo suddetto. Viceversa per energie dei raggi X minori di 35 keV il rapporto τ/σ_a è maggiore di 10 e quindi in queste condizioni il calcolo va fatto considerando solamente l'effetto fotoelettrico.

Per energia di circa 60 keV i due coefficienti si equivalgono. Nel caso qui considerato, attribuendo al fascio una energia equivalente sulla base dei

valori degli spessori di dimezzamento in rame, si vede che l'intervallo di energia interessato si estende da circa 30 keV a circa 100 keV e quindi che in esso prevale l'effetto fotoelettrico, con un rapporto del coefficiente di assorbimento per tale effetto rispetto a quello per effetto Compton, che varia da circa 10 ad 1. Le formule dei coefficienti correttivi da adottarsi nei due casi sono derivate dal suddetto lavoro di BARNARD, ASTON & MARSH (1960) e valgono, nel caso in cui sia predominante l'effetto Compton ($E > 150$ keV):

$$B = 0,2103768 \frac{F}{760} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t^{\circ}}$$

in cui F rappresenta la pressione parziale del vapore di acqua e t° la temperatura in gradi centigradi. Nel caso in cui anche l'effetto fotoelettrico giochi un ruolo importante, il fattore correttivo vale

$$C = \left[1 - \frac{0,8038}{1,2930} M \right] \frac{F}{760} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t^{\circ}}$$

in cui M è il termine dipendente dall'energia e che tiene conto del valore dei coefficienti di assorbimento. Il valore di M, dato dai suddetti Autori, è riportato nel grafico di Fig. 8 in funzione dello spessore di dimezzamento del fascio in rame. I fattori correttivi per l'umidità dell'aria vanno sottratti a

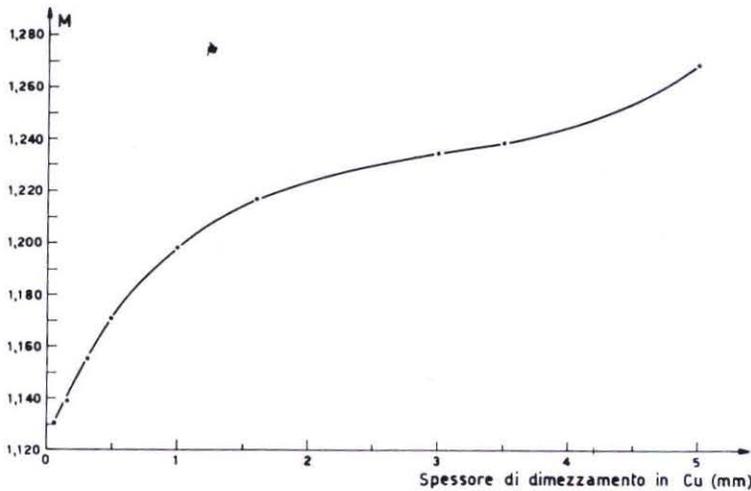


Fig. 8. — Andamento di M in funzione dello spessore di dimezzamento in Cu; dove M è il termine, dipendente dall'energia della radiazione elettromagnetica incidente, che appare nell'espressione dei fattori correttivi dovuti a variazioni di temperatura, pressione ed umidità dell'aria nella camera (BARNARD, ASTON & MARSH, 1960).

quello che rende conto della sola variazione di densità, così che il termine correttivo completo vale:

$$F = A - B \left\{ \left| \frac{273,15}{273,15 + t^0} \cdot \frac{P}{760} \right| - 0,2103768 \frac{F}{760} \frac{273,15}{273,15 + t^0} \right\}^{-1}$$

nel primo caso sopra considerato, ovvero:

$$F = A - C = \left\{ \left| \frac{273,15}{273,15 + t^0} \cdot \frac{P}{760} \right| - \left[\left(1 - \frac{0,8038}{1,2930} \cdot M \right) \left(\frac{F}{760} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t^0} \right) \right] \right\}^{-1}$$

nel secondo caso, che è quello in cui generalmente ci si trova lavorando con la camera standard.

I valori numerici di questi fattori, relativi ad un vasto intervallo di temperatura, pressione e spessori di dimezzamento, sono stati calcolati con il calcolatore elettronico IBM 7040 dei Laboratori di Fisica e sistemati in tabelle di rapida consultazione. Data la precisione di lettura degli strumenti impiegati per le misure di temperatura, pressione ed umidità e l'approssimazione dei calcoli numerici, si può stimare che l'errore residuo sulla misura dell'esposizione, dopo aver apportato la correzione sopra descritta, sia $\pm 0,1\%$.

ERRORE DOVUTO ALL'APPARATO DI MISURA DELLA CARICA IONICA

Per concludere l'analisi degli errori di misura della carica ionica occorre ancora considerare le prestazioni dell'apparecchio impiegato per la sua misura.

Come detto nel testo di CHIOZZOTTO (1962), il metodo di misura consiste nell'accumulare in un condensatore di capacità nota la carica generata nella camera standard, e quindi nel misurare, con molta precisione, la tensione di carica. Di fatto la raccolta della carica ionica viene fatta per mezzo di un elettrometro a corda vibrante, tipo Cary mod. 31, che offre il sostanziale vantaggio di mantenere il potenziale dell'elettrodo di raccolta ad un valore molto prossimo allo zero durante tutte le misure. La carica raccolta da questo strumento viene quindi trasferita, mediante il circuito di compensazione, nel condensatore di capacità nota. La tensione che si stabilisce fra le armature di questo è quindi misurata con un circuito potenziometrico. I dettagli del funzionamento di questo sistema sono illustrati in CHIOZZOTTO (1962) e gli schemi del circuito sono qui riportati per comodità nelle Figg. 9 e 10.

Poiché interessa una misura assoluta della carica raccolta, occorre conoscere con molta precisione sia il valore della capacità del condensatore su cui essa viene accumulata, sia la tensione di carica. I condensatori impiegati sono del tipo in aria e sono costituiti da due serie di piastrine intercalate. L'insieme delle armature è contenuto in un recipiente metallico di forma

cilindrica che fa da schermo elettrostatico e che porta le bocche di connessione. Nei due condensatori normalmente usati il rapporto del numero delle piastrine è di uno a quattro per cui ci si attende che anche il rapporto della loro capacità sia tale. Nel misurare queste capacità si è cercato di riprodurre le condizioni in cui i condensatori vengono realmente impiegati nel

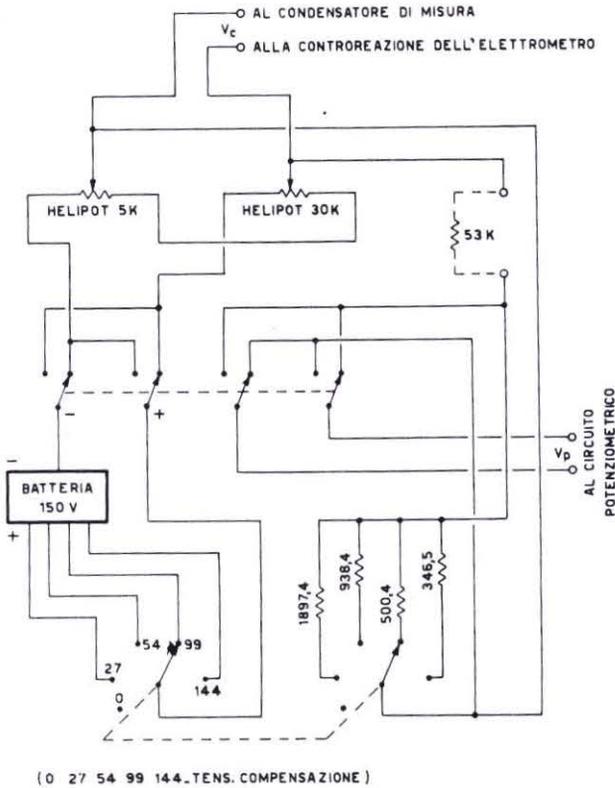


Fig. 9. — Schema elettrico del circuito di compensazione della tensione di carica della camera standard (CHIOZZOTTO, 1962).

circuito di compensazione della camera standard, eseguendo cioè le misure in continua e disponendo lo schermo dei condensatori a massa. Si è fatto uso del circuito illustrato in Fig. 11 in cui la carica dei due condensatori in serie è regolata in modo da mantenere a potenziale zero le armature in comune. Si è proceduto quindi con un metodo di sostituzione, lasciando cioè fisso uno dei due condensatori e mantenendo a zero il potenziale del punto centrale del ponte quando sull'altro braccio è inserito una volta il parallelo del condensatore incognito e di uno campione, e successivamente solo il condensatore campione, la cui capacità è stata opportunamente variata. In questo modo si può misurare la capacità incognita per differenze fra le due letture

fornite dal condensatore campione. Si trova in questo modo: $C_1 = (109,29 \pm 0,5)$ pF, $C_2 = (446,18 \pm 1,2)$ pF, il cui rapporto è $= 4,083 \pm 0,035$. Il condensatore campione ha una capacità variabile compresa in un intervallo fra 30 pF e 580 pF. Per avere un controllo di questi valori si è proceduto alla misura del rapporto delle capacità nel seguente modo. Si è impartita

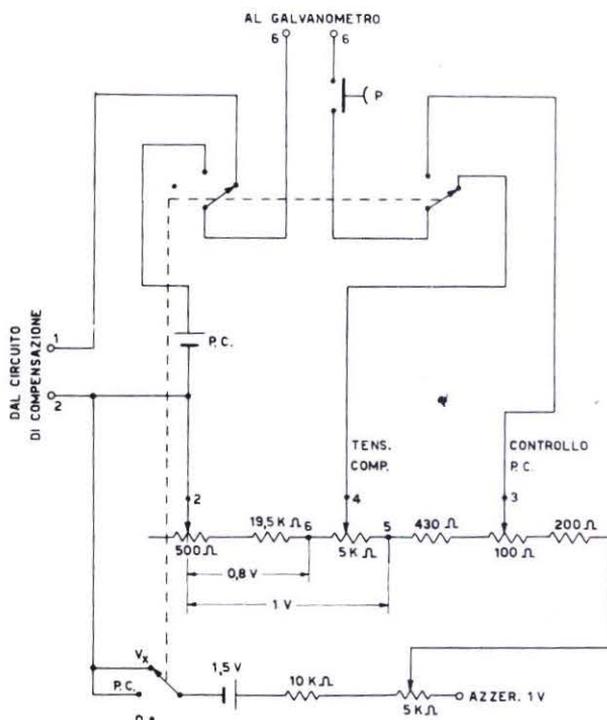


Fig. 10. — Schema elettrico del circuito potenziometrico per la misura della tensione di carica della camera standard (CHIOZZOTTO, 1962). Nella taratura bisogna controllare che il rapporto delle tensioni fra i punti 2 e 6 e i punti 5 e 6 sia 4,000.

la stessa carica ai due condensatori, successivamente montati nel circuito di compensazione, misurando la stessa dose con la camera standard. La riproducibilità della dose è stata controllata con la camera monitor connessa al circuito potenziometrico della camera standard. Il rapporto delle tensioni di carica fornisce direttamente il rapporto della capacità che è risultato pari a $4,081 \pm 0,02$. Questo valore è in buon accordo con quello ricavato precedentemente dalla misura diretta della capacità dei condensatori della camera standard. I suddetti valori saranno quindi impiegati per il calcolo della esposizione.

La misura della tensione a cui risulta caricato il condensatore al termine della misura è un poco più elaborato e richiede il controllo di un numero maggiore di parametri. Dall'analisi degli schemi riportati in Fig. 9 si vede che tale tensione è data da $V_c = V_p (1 + R_5/R_1)$, dove V_c è la tensione ai capi del circuito di compensazione, V_p è la tensione all'ingresso del circuito

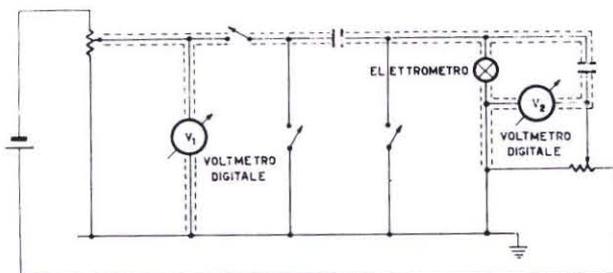


Fig. 11. — Schema elettrico del circuito per la taratura della capacità della camera standard.

potenziometrico, e R_1 è una qualsiasi delle quattro resistenze presenti nel circuito di compensazione. La misura di V_p viene fatta con il circuito potenziometrico in base all'ipotesi che (CHIOZZORRO, 1962) fra il cursore del reostato 2 (Fig. 10) ed il punto 5 vi sia la differenza di potenziale di 1 volt e che fra i punti 5 e 6 tale differenza sia 0,2 volt. In conclusione, il funzionamento del sistema di misura è basato: sulla conoscenza del rapporto delle resistenze R_5/R_1 , sulle linearità del potenziometro 4 e sul corretto aggiustamento del circuito potenziometrico. Tutti questi parametri sono di facile ed immediato controllo mediante misure di resistenze eseguite con un ponte e successivamente controllate, dopo il montaggio, mediante un voltmetro digitale a cinque cifre; i valori ottenuti sono i seguenti:

$$R_5 = 53 \text{ K } \Omega \text{ (cassetta di resistenza campione della General Radio Co., Camb., Mass.)}$$

$$R_1 = 1897,4 \text{ } \Omega \quad R_2 = 938,4 \text{ } \Omega \quad R_3 = 500,4 \text{ } \Omega \quad R_4 = 346,5 \text{ } \Omega$$

con errori dell'ordine dello 0,1 %.

La linearità dell'*helipot* che costituisce il potenziometro n. 4 è stata controllata e trovata rispondente entro lo 0,1 %. Complessivamente quindi si può affermare che la misura della tensione viene fatta con un errore relativo che non supera lo 0,2 %.

ERRORE DOVUTO ALLA DISTORSIONE DEL CAMPO ELETTRICO

Nell'ipotesi che il fascio di raggi X si trovi in equilibrio elettronico con l'aria della camera standard e che le linee di forza del campo elettrostatico stabilito fra l'elettrodo ad alta tensione e l'elettrodo raccoglitore non siano

distorte, il volume di raccolta è definito dalla superficie di questo ultimo elettrodo per la dimensione della camera nella direzione normale ad esso.

È infatti da questo volume che proviene la carica raccolta sull'elettrodo raccoglitore, ed essa, dato l'equilibrio elettronico, equivale alla carica liberata dagli elettroni, prodotti nella interazione del fascio con il volume d'aria definito dalla sezione del diaframma, per la lunghezza dell'elettrodo raccoglitore stesso. Per ottenere che queste condizioni siano il più possibile verificate si sono adottati nella costruzione della camera tutti gli accorgimenti necessari.

Ciò nonostante c'è ancora una piccola distorsione delle linee di forza del campo elettrico dovuta al fatto che, in corrispondenza dei fori per l'ingresso e l'uscita del fascio di raggi X della camera, la schermatura elettrostatica, costituita da un sistema di barrette di alluminio mantenute ad opportuno potenziale, è interrotta.

Poiché la scatola in cui la camera a ionizzazione è alloggiata e che porta il diaframma d'ingresso e le schermature è messa a massa, proprio in corrispondenza del piano mediano della camera, lungo il percorso del fascio, si verifica una distorsione delle superficie equipotenziali. L'effetto di questa distorsione del campo elettrico sul volume di raccolta, e quindi sul valore della carica e della dose misurata, si può mettere in evidenza eseguendo due volte le misure; la prima con la scatola esterna a massa, come d'uso, e la seconda con la scatola esterna portata alla stessa tensione dell'elettrodo ad alta tensione.

Generalmente si assume che le variazioni del volume di raccolta dovute alle distorsioni in queste due diverse condizioni siano simmetriche così che il valore corretto della dose si ottiene dalla media dei due valori misurati nel modo suddetto: essi di norma scartano tra loro di alcune unità in 10^{-3} . Di fatto disponendo la carcassa esterna a diverse tensioni intermedie fra lo zero e l'alta tensione applicata all'elettrodo della camera standard, si può verificare che in questo caso la dipendenza della esposizione dalla tensione esterna è lineare con sufficiente approssimazione. È quindi corretto calcolare il valore vero eseguendo la media fra i valori della esposizione misurati in condizioni estreme; il fattore correttivo che si trova in questo modo vale 1,00109.

Per eliminare del tutto l'inconveniente della distorsione si è pensato di ristabilire completamente lo schermaggio elettrostatico anche in corrispondenza dei fori d'ingresso e d'uscita del fascio. Ciò è stato fatto disponendo sui fori medesimi dei sottili fogli di mylar (8μ) ricoperti di grafite, in modo che essi continuassero la forma delle barrette di alluminio impiegate per rendere omogeneo il campo interno alla camera standard. In questo modo (Fig. 12) l'esposizione misurata non risente più della tensione applicata

alla carcassa esterna e viene eliminato ogni errore dovuto a distorsione residua. Tuttavia la esposizione misurata deve essere corretta per l'assorbimento dovuto al mylar interposto fra il diagramma d'ingresso e il volume

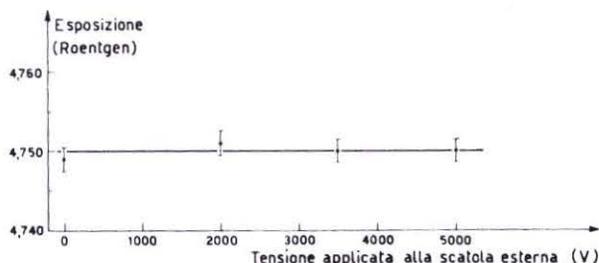


Fig. 12. — Misure dell'andamento della dose di esposizione in funzione della tensione applicata alla scatola.

di misura. Per far ciò si è determinata (Fig. 13) con la stessa camera standard la curva di assorbimento del fascio in questo materiale, da cui si può ricavare, estrapolando a spessore nullo, un fattore correttivo da applicare al

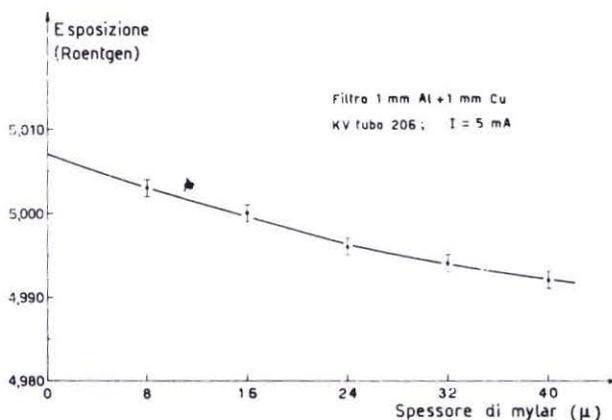


Fig. 13. — Curva di assorbimento del fascio ottenuta disponendo dei sottili fogli di mylar crescenti all'ingresso del fascio stesso.

valore della esposizione misurato. L'assorbimento del mylar ammonta allo 0,1 % della dose misurata, con una tensione del tubo di 200 kV e con un filtraggio di 1 mm Al + 1 mm Cu. Tuttavia le misure normalmente vengono fatte senza applicare le pareti di mylar in quanto ciò impedisce l'allineamento dei dosimetri per mezzo del livello a cannocchiale. Occorre pertanto determinare un fattore correttivo che permetta di passare dal valore misurato in queste ultime condizioni a quello corretto. Tale fattore è ovviamente

dato dal rapporto fra l'esposizione misurata in assenza di distorsione del campo e quella misurata quando questa distorsione è presente.

Da una serie di misure eseguite a questo scopo risulta che K_f , correzione causata dalla distorsione residua del campo elettrico è = 1,0042, si vede così che la dose misurata in presenza di distorsione di campo è errata per difetto dello 0,42 %. Viceversa il fattore correttivo precedentemente determinato, partendo da valori di esposizione misurati con la carcassa posta una volta a massa ed una volta ad alta tensione, diviene = 1,00109, che corrisponde ad un errore per difetto dello 0,11 %. La differenza nella correzione apportata alla dose seguendo questi due criteri ammonta quindi a circa lo 0,3 %. Dato che il valore della esposizione, quando si è stabilita una buona schermatura, è del tutto indipendente dalla tensione applicata alla carcassa, si ritiene per questo che il fattore correttivo ricavato in condizioni di completo schermaggio sia da preferirsi.

Un'altra ragione di distorsione del campo, e di alterazione del volume di raccolta, è da ricercarsi nelle piccole differenze di potenziale che si possono stabilire fra i bordi dell'elettrodo collettore ed i bordi degli elettrodi di guardia, a causa di diversi potenziali di estrazione. Si è provveduto a minimizzare anche questo possibile errore che può essere messo in evidenza cambiando la polarità dell'elettrodo ad alta tensione. Nel presente caso esso è risultato nullo entro gli errori di misura della esposizione.

Per quanto riguarda invece la complanarità dell'elettrodo raccoglitore e degli elettrodi di guardia, non ci sono prove funzionali da fare e ci si assicura di ciò solo sulla base di un controllo meccanico.

Infine, si è proceduto al controllo della simmetria della camera standard lungo la direzione del fascio, simmetria che potrebbe essere alterata dal non perfetto parallelismo dell'elettrodo ad alta tensione e del sistema degli elettrodi di guardia e di raccolta. Si è proceduto a misurare la esposizione prima in condizioni normali e poi invertendo la camera standard all'interno della carcassa. Il fascio a raggi X non è alterato in nulla da questa manovra, poiché il diaframma rimane fisso con la carcassa. Di fatto, le due esposizioni misurate coincidono entro gli errori di misura che sono dell'ordine dello 0,1 %.

ESPRESSIONE FINALE DELLA DOSE DI ESPOSIZIONE IN FUNZIONE DEI PARAMETRI MISURATI

In base ai valori delle grandezze misurate con la camera standard si può dare la seguente espressione del valore dell'esposizione (CHIOZZOTTO, 1962):

$$E = 2,998 \times 10^9 \frac{C \cdot V}{A \cdot L} \cdot \frac{1}{F} \cdot K,$$

dove:

C è il valore della capacità montata nel circuito di compensazione espressa in Farad.

V è la tensione carica di tale capacità, espressa in volt.

A è l'area del diaframma della camera standard, espressa in cm^2 .

L è la lunghezza del volume di raccolta espressa in cm.

F è il fattore correttivo per variazioni di temperatura pressione ed umidità.

K è un fattore correttivo adimensionale che tiene conto di tutti gli errori di misura precedentemente illustrati.

Il fattore correttivo K si può pensare come prodotto dei termini correttivi relativi ai vari tipi di errori considerati. Si può porre cioè (CHIOZZOTTO, 1962):

$$K = K_f \cdot K_e \cdot K_{sc} \cdot K_s \cdot K_l \cdot K_p \cdot K_a \cdot K_b \cdot$$

dove:

K_f è la correzione causata da distorsione residua del campo elettrico;

K_e è la correzione che tiene conto delle perdite di ioni causate da insufficienti dimensioni della camera;

K_{sc} è la correzione per l'aumento di ionizzazione causato da elettroni di origine diversa da quella a cui la definizione di Roentgen si riferisce;

K_s è la correzione per perdite di ionizzazione causate da regime di saturazione non perfetto;

K_l è la correzione per ionizzazione causata da radiazione che penetra attraverso la schermatura della camera;

K_p è la correzione per ionizzazione causata da radiazione che entra nella camera attraverso i bordi del diaframma;

K_a è la correzione per l'attenuazione del fascio in aria, nel percorso tra il piano di definizione del diaframma ed il centro della zona di formazione degli ioni;

K_b è la correzione per l'attenuazione del fascio nelle barrette di alluminio predisposte per la omogeneizzazione del campo elettrico.

In base a quanto detto, si può assumere che $K_s = K_l = K_p = 1$. I termini correttivi K_e e K_{sc} si compensano a vicenda così che il loro prodotto vale 1. Il termine K_f risulta pari a 1,0042.

Infine i termini K_a e K_b sono da ricavarsi dai grafici delle misure 5, 6, 7. In tali grafici è dato il decremento percentuale della dose dovuta allo assorbimento dei mezzi considerati.

Per una data condizione di lavoro, detto $d\%$ il decremento complessivo dovuto all'aria e all'alluminio, i fattori correttivi K_a e K_b assumeranno il valore $K_a \cdot K_b = 1 + d\%$.

In conclusione, il fattore K avrà l'espressione $K = 1,0042 (1 + d\%)$ e la esposizione sarà espressa dalla formula:

$$D = \alpha \frac{V}{F} (1 + d\%) \cdot$$

Per un dato diaframma della camera standard e per un dato condensatore montato nel circuito di compensazione, la costante α acquista un valore definito. Nelle normali condizioni di lavoro (area del diaframma = 0,7734 cm²) i valori di questa costante sono :

$$\alpha_1 = 0,0423 \text{ per il condensatore di capacit\`a } C_1 = 109,29$$

$$\alpha_2 = 0,1728 \text{ per il condensatore di capacit\`a } C_3 = 446,18$$

5 novembre 1966.

BIBLIOGRAFIA

- BARNARD, G. P., G. H. ASTON & A. R. S. MARSH, 1960. *Effect of Variations in the Ambient Air on the Calculation and Use of Ionization Dosimeters*. Her Majesty's Stationery Office, London.
- CHIOZZOTTO, M., 1962. La camera a ionizzazione ad aria libera dell'Istituto Superiore di Sanità. *Rapporti Lab. Fisica Ist. Super. Sanità*, ISS 62/9 e ISS 62/10.
- TAYLOR, C. S., 1930. The Precise Measurement on X-Ray Dosage. *Radiology*, **14**, 372.
- WYCKOFF, H. O. & F. H. ATTIX, 1957. *Design of Free-Air Ionization Chambers*. National Bureau of Standards, Handbook, 64.

Il Centro di Analisi di Fotogrammi dei Laboratori di Fisica

PAOLO SALVADORI

Laboratori di Fisica

Riassunto. — Vengono brevemente descritte le apparecchiature di cui dispone il Centro di Analisi dei Fotogrammi da alcuni anni in funzione presso i Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità: si tratta di tre tavoli di misura, 2 polari e 1 mangiaspago, corredati di proiettori per i film e della strumentazione meccanico-elettronica necessaria per trasferire i risultati delle misure ai sistemi di registrazione, oltre che di alcuni meccanismi ausiliari.

Con i tavoli descritti sono state portate a termine diverse serie di misure, in connessione sia con esperienze presso macchine acceleratrici, sia anche con l'analisi di particolari curve di interesse biofisico. La precisione di misura raggiungibile è elevata, come risulta da prove effettuate su film di camera a diffusione, e di cui è riportato, a titolo di esempio, l'esito.

Summary (*The Film Analysis Center in the Laboratory of Physics*). — Because of the importance of Photogram Analysis in Experimental Physics, a Film Analysis Center for bubble chambers, diffusion chambers and spark chambers has been operating at the Physics Laboratory of the Istituto Superiore di Sanità for several years.

This Center has three scanning tables, of the polar (Fig. 1) and elliptical type, equipped with film-projectors, typewriters, punch-units and digitizers. Many parts of these apparatuses were built at the workshop of the Physics Laboratory and set up by the technicians of the Laboratory.

Using the scanning tables described above many measurements were done in the field of high-energy particle physics and, recently, in biophysics, when curves, obtained with the ultracentrifuge technique, were analyzed.

The measurement accuracy of the scanning tables was tested, and very good results were obtained (Figs. 2-4).

Nella Fisica rivestono grande importanza i rivelatori che permettono di segnalare il passaggio di particelle, e spesso di risalire anche a caratteristiche più precise, quali la loro velocità, energia, massa, carica, ecc. Parti-

colare interesse negli ultimi anni è stato riservato a tre tipi di rivelatori del tipo visivo, in cui, cioè, si riescono a visualizzare opportunamente le tracce delle particelle che li attraversano: camere a diffusione, camere a bolle e camere a scintille, le prime due abbastanza simili per struttura, per principio di funzionamento e per caratteristiche di rivelazione, l'ultima sostanzialmente differente e ormai estremamente diffusa per le sue molteplici applicazioni.

Per fissare nel tempo, o, come si dice, per memorizzare le tracce delle particelle che hanno attraversato le camere a diffusione e a bolle e il tipo più semplice di camere a scintille, si ricorre al metodo classico, quello fotografico, che consente di ritrarre le tracce visualizzate, e in un tempo successivo di analizzarle per ricavarne il massimo possibile di informazione. Naturalmente la tecnica fotografica deve essere di elevata precisione, e non può limitarsi all'impiego di un'unica macchina da presa per camera: bisogna tenere conto, infatti, che le tracce delle particelle nelle camere hanno diversi possibili orientamenti nello spazio, e che fotografandole si determinano soltanto le loro proiezioni nel piano della superficie sensibile del film (a meno del fattore di ingrandimento). Se perciò si vuole risalire alla conoscenza effettiva della traccia è necessario disporre di almeno due fotografie di essa, contemporanee ma da due posizioni diverse, in modo che si possa effettuare quella che si chiama la ricostruzione spaziale della traccia, in base alle sue proiezioni su due diversi piani. In particolare nelle camere a bolle si utilizzano quasi sempre tre cineprese, per potere ricostruire gli eventi con maggiore precisione.

Una volta in possesso delle fotografie degli eventi, bisogna ricavare da queste le informazioni utili: bisogna, cioè, fare quella che si chiama l'analisi o *scanning* dei fotogrammi, che consiste in una prima ricerca, fra tutte le fotografie prese, di quelle in cui compaiono gli eventi interessanti, e quindi nella rilevazione degli elementi determinanti di tali eventi. Esistono metodi più o meno automatici di analisi dei fotogrammi, ma in tutti è essenziale la presenza di un « tavolo di misura ». Naturalmente il sistema completo di rivelazione risulta tanto più efficace quanto più è automatizzato, e la presenza in un calcolatore è praticamente indispensabile, se non altro per permettere la ricostruzione spaziale degli eventi, che risulta in genere alquanto laboriosa. Un calcolatore consente poi molte altre applicazioni, e permette di sfruttare al massimo le informazioni fornite dai fotogrammi e anche, data la rapidità dell'elaborazione, di intervenire spesso ancora al livello della ripresa fotografica, mentre l'esperimento è in corso, per apportarvi eventuali modifiche.

Presso i Laboratori di Fisica è in funzione ormai da alcuni anni un centro di analisi dei fotogrammi di camere a bolle, a diffusione e a scintille. Tale centro dispone di tre tavoli di misura; a ciascuno di essi è connessa una tripletta di proiettori Prevost che permette di proiettare e quindi di misurare

le tracce nei film ripresi dalle diverse macchine che guardano le camere, e quindi di fare, come si è detto, una ricostruzione spaziale dell'evento. Le triplette di proiettori possono muoversi su di un'unica trave in acciaio solida al soffitto della stanza di misura. Ogni tavolo è poi corredato di una elettronica e di un sistema di stampante e/o perforatrice, che permette di memorizzare le misure effettuate sui fotogrammi; le misure perforate su nastro vengono quindi fatte passare nel calcolatore IBM 610, che con un opportuno programma le elabora in modo che esse possano venire successivamente perforate automaticamente su scheda ed essere immesse nell'elaboratore 7040.

Dei tre tavoli due sono del tipo a coordinate polari, mentre il terzo è un cosiddetto « mangiaspago ».

I due tavoli polari, che sono in funzione dalla fine del 1963, non differiscono fra di loro che in alcune piccole caratteristiche. Entrambi sono stati costruiti su disegni del CERN (ove questo tipo di tavoli è stato realizzato per la prima volta presso il gruppo diretto dal prof. G. Fidecaro), ma mentre il primo è stato acquistato da una Ditta esterna, la OMAN di Trieste, l'altro è stato completamente costruito presso l'officina meccanica dei Laboratori di Fisica. Il loro nome deriva dal fatto che con essi si misurano le coordinate polari (e cioè il modulo del raggio vettore e l'angolo polare) dei punti in esame, rispetto a un'origine che approssimativamente coincide con il centro dei tavoli stessi, e che comunque si può conoscere esattamente.

Lo schema di principio del tavolo polare è riportato in Fig. 1: l'anello *c* ruota intorno all'asse verticale del tavolo, e porta una fenditura lungo la

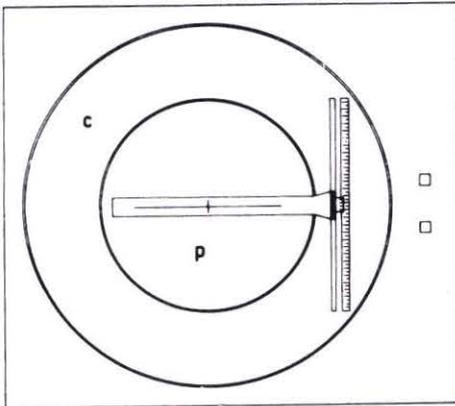


Fig. 1. — Rappresentazione schematica del piano di misura di un tavolo polare: *c* è l'anello che ruota intorno all'asse del tavolo, mentre il cerchio *p*, che è fisso, contiene la regione di misura. È anche visibile, sulla destra, la riga graduata: lungo questa scorre un nonio, solidale con la riga di misura trasparente al cui centro è inciso un reticolo.

quale può scorrere la riga di misura; al centro di questa è tracciato un reticolo, che all'atto della misura viene sovrapposto al punto in esame. Lungo la fenditura è riportato un righello metallico con divisioni di 1 mm, mentre la riga di misura è dotata di nonio decimale. Il campo di misura è rappresen-

tato da una regione circolare di diametro 50 cm interna alla regione p. È chiaro che per portare a sovrapporre il reticolo a un qualunque punto contenuto nella regione di misura bisogna muovere sia la riga di misura sia la corona circolare c : per ogni punto si può sovrapporre il reticolo in due modi diversi, corrispondenti a una differenza di rotazione della corona c di 180° , e a posizioni del reticolo simmetriche rispetto all'origine del sistema di coordinate polari. Le possibilità di rotazione della corona c sono limitate da un apposito blocco a un giro a mezzo (540°). Sotto il piano di misura (in alluminio rivestito di vernice sintetica bianca opaca) si trovano i due digitizzatori, cioè quegli apparecchi elettro-meccanici che permettono di associare a ciascun punto misurato una coppia di numeri che, in opportune unità di misura, danno le coordinate del punto stesso. Uno dei digitizzatori è legato al movimento rotatorio della corona c , e quindi alla coordinata angolo polare, mentre l'altro è connesso al movimento della riga di misura, e perciò alla coordinata raggio vettore. Sul tavolo sono poi riportati due punti di riferimento, che consentono da un lato di controllare periodicamente la riproducibilità delle misure, e quindi il corretto funzionamento del tavolo nel suo complesso, e dall'altro di ricavare le costanti di riferimento attraverso le quali si risale alle unità di misura dei vettori e degli angoli polari, e quindi dai numeri forniti dai digitizzatori ai valori effettivi delle coordinate polari (per esempio in cm e gradi).

Fra digitizzatori e stampanti, rappresentate queste ultime da telescriventi Olivetti che stampano su rullo e perforano su banda di carta i numeri « letti » dai digitizzatori, vi è l'elettronica in senso stretto, cioè quell'apparecchiatura che consente di tradurre e trasferire effettivamente la lettura dei digitizzatori all'apparecchiatura memorizzatrice. Tenuto conto che, quando anche i due tavoli lavorino in parallelo, tuttavia una parte del tempo di misura viene impiegato dall'operatore nella ricerca degli eventi da misurare e nel sovrapporre ai diversi punti il reticolo, non si è ritenuto necessario fin ora avere una elettronica per ciascun tavolo, ma si è invece ricorsi a un sistema di relè che permette a ciascuno dei tavoli di utilizzare l'elettronica comune nel tempo che essa non è utilizzata dall'altro. Ciascun tavolo è poi dotato di un pannello di comando a interruttori e pulsanti, che permette l'accensione dei singoli proiettori e lo scorrimento, nei due sensi, dei film davanti agli obiettivi dei rispettivi proiettori, separatamente o contemporaneamente. Un altro pulsante posto sul tavolo alla sinistra dell'operatore dà inizio all'operazione di stampa. La velocità di scorrimento è regolabile con un comando inserito nel pannello di alimentazione dei proiettori, mentre l'elettronica, insieme alla telescrivente, è posta su di un rack di fianco al posto di misura. Un sistema di leve con giunti cardanici permette, poi, di effettuare a mano piccoli scorrimenti dei film, in modo da posizionarli nel modo migliore. I tre proiettori, che consentono il montaggio di film di 35,

50 e 70 mm, hanno gli obbiettivi orientati in modo da utilizzare per la proiezione dei film la stessa regione di tavolo.

Se i tavoli polari sono particolarmente indicati per misure di eventi in camere a scintille (ma si ottengono ottimi risultati anche per le altre camere), i « mangiaspago » sono stati costruiti in particolare per le misure di eventi in camere a diffusione e a bolle. Il mangiaspago in dotazione ai Laboratori di Fisica risale alla fine del 1964, ed è costituito da pezzi di diversa origine; il tavolo, parte dell'elettronica e il sistema di controllo delle misure sono stati costruiti presso i Laboratori, i proiettori sono della Prevost, il misuratore delle coordinate è della Koriska, e infine l'elettronica restante è in parte della Laben (doppio contatore decimale reversibile) e in parte della Bull (perforatore di nastro).

Per misurare dei punti con un sistema mangiaspago si sovrappone ad essi un reticolo, incorporato in un visore che è libero di scorrere sul piano di

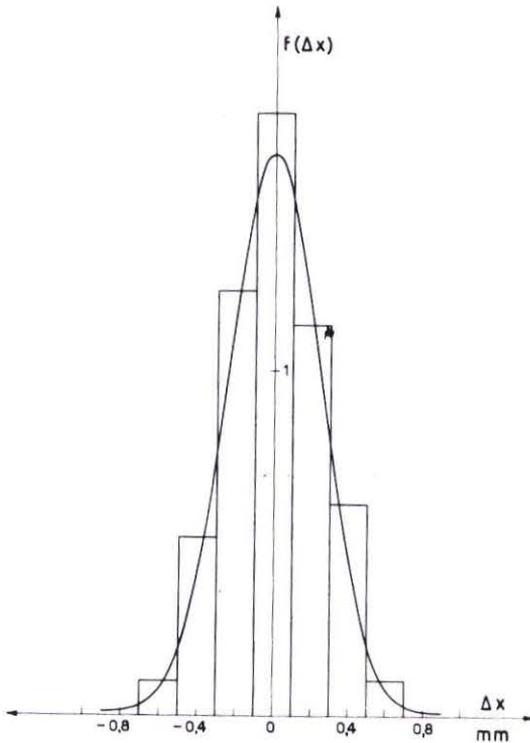


Fig. 2. — Istogramma degli scarti intorno al valore medio per la coordinata x di un punto, misurato 50 volte con un tavolo polare e ricostruito nello spazio con un programma di calcolo. La distribuzione risulta gaussiana, come si vede dalla curva a tratto pieno sovrapposta all'istogramma e opportunamente normalizzata. Il valore dello scarto quadratico medio è $\mu_x = 0,245$ mm.

misura ed è connesso, tramite due cavetti scorrevoli, a due digitizzatori posti fuori dello stesso piano: in questo modo di associano a ciascun punto di misura le due distanze di esso da due punti fissi, e cioè si misurano le coordinate in un sistema di coordinate ellittiche. Le misure dei digitizzatori ven-

gono tradotte in numero tramite l'elettronica Laben, e quindi memorizzate perforandole su nastro con un perforatore Bull, tramite una matrice di trasformazione costruita presso i Laboratori. Vi è, tuttavia, anche la possibilità di perforare direttamente i dati forniti dall'elettronica Laben su scheda.

Nei mangiaspago è necessario che i digitizzatori e i proiettori siano solidali, e perciò i primi sono stati fissati stabilmente alla parete della stanza al cui soffitto sono solidali i secondi. Viceversa non è necessario che il tavolo di misura sia solidale con digitizzatori e proiettori, purché si disponga di un punto di riferimento e controllo che lo sia; date le notevoli dimensioni del piano del tavolo (di legno indeformabile ricoperto di formica bianca, delle dimensioni di $150 \times 100 \text{ cm}^2$), ci si è voluti lasciare la possibilità di muoverlo per avvicinarlo eventualmente alla parete, e perciò non lo si è fissato in una posizione determinata della stanza; anziché utilizzare una squadretta metallica fissata al tavolo, che non sarebbe solidale ai digitizzatori e ai proiettori, si usa quindi come riferimento un puntino luminoso del diametro di circa 1 mm, che viene proiettato sul tavolo di misura da un sistema ottico solidale con i proiettori e collocato in prossimità di essi. Anche il tavolo del mangia-

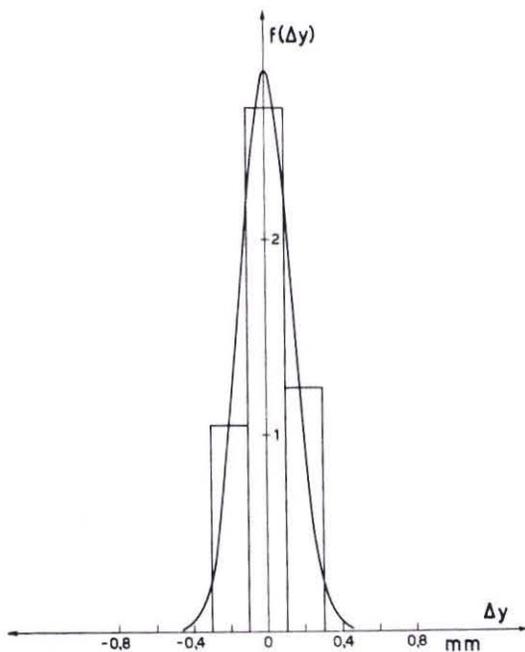


Fig. 3. — Istogramma degli scarti intorno al valore medio per la coordinata y di un punto misurato 50 volte con un tavolo polare e ricostruito nello spazio con un programma di calcolo. Come per la Fig. 2 la distribuzione risulta gaussiana. Il valore dello scarto quadratico medio è $\mu_y = 0,138 \text{ mm}$.

spago è dotato dei comandi di cui si è parlato a proposito dei tavoli polari. Il mangiaspago consente una frequenza di conteggio di 10 kHz: ciò significa che il visore non va mosso con velocità maggiore di 50 cm/s: la velocità massima di perforazione, legata alle caratteristiche del Bull, è di ~ 25 caratteri/s.

Nonostante la scarsità del personale, i tavoli di misura in dotazione ai Laboratori di Fisica sono stati ampiamente collaudati in questi anni: sono stati misurati eventi in camere a bolle, in camere a scintille e in camere a diffusione, sia su film forniti dal CERN, in una collaborazione con l'Istituto di Fisica di Roma e con l'Istituto di Fisica di Trieste e con il CERN (AMALDI, *et al.*, 1965), sia anche su film esposti dal personale stesso dei Laboratori in camera a diffusione presso l'Elettrosincrotrone di Frascati (CORTELLESSA & SALVADORI, 1964). Misure che consentono di conoscere la precisione dei tavoli sono state effettuate con un programma di ricostruzione per camere a diffusione (SALVADORI, 1966); quel che si è fatto è stato di misurare 50 volte lo stesso evento in un fotogramma, sia muovendo il fotogramma stesso rispetto al tavolo, sia ripetendo la misura nella stessa posizione; si sono quindi analizzate tutte le misure con il programma di ricostruzione spaziale, ricavando una distribuzione di valori per le coordinate dei punti misurati. Nelle Figg. 2, 3, 4 sono riportati i risultati relativi alle coordinate x , y , z del punto

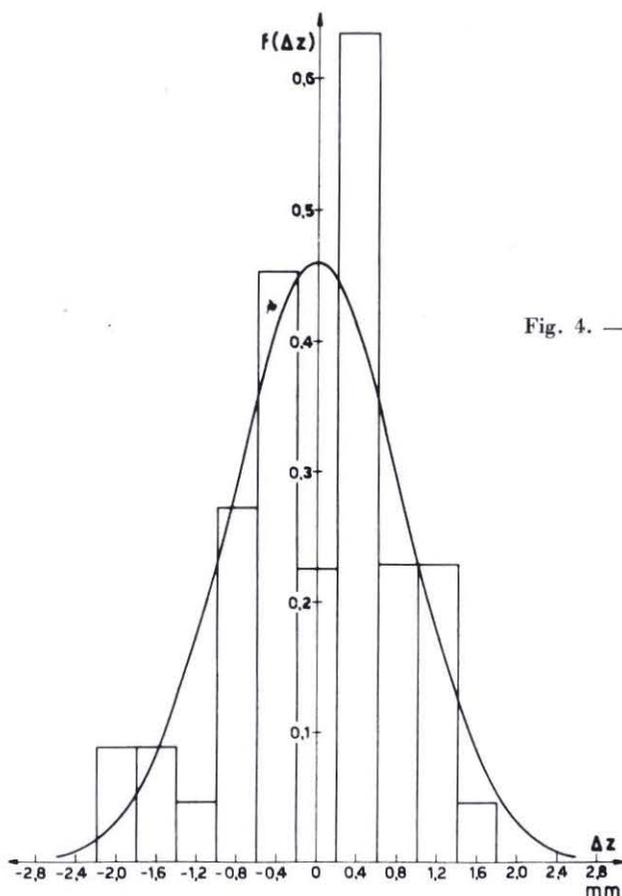


Fig. 4. — Istogramma degli scarti intorno al valore medio per la coordinata z del punto di cui alle figure 2 e 3, e ricostruito nello spazio con un programma di calcolo. Come per le figure 2 e 3 la distribuzione risulta gaussiana. Il valore dello scarto quadratico medio è $\mu_z = 0,874$ mm.

origine dell'evento (inizio di traccia); la distribuzione degli scarti intorno al valore medio è gaussiana, e i valori degli scarti quadratici medi risultano: $\mu_x = 0,245$ mm; $\mu_y = 0,138$ mm; $\mu_z = 0,874$ mm. Tali valori sono ottimi, dello stesso ordine, se non migliori, di quelli ricavati in altri laboratori che conducono lo stesso genere di misure.

In questi ultimi tempi, infine, i tavoli di misura hanno trovato un'ulteriore applicazione nell'ambito della biofisica, e precisamente nell'analisi di curve di densità ricavate con l'impiego dell'ultracentrifuga analitica.

Alla realizzazione del Centro di Analisi dei Fotogrammi hanno collaborato i professori Ugo Amaldi e Giorgio Cortellessa e hanno apportato il loro contributo tecnico i signori Attilio Corradini, Riccardo Crateri, Giuseppe Di Nunzio, Corindo Felici, Fortunato Graziosi, Paolo Gricia, Antonino Saffiotti e Antonio Vallone. Il signor Antonino Saffiotti ha anche curato il buon funzionamento dei tavoli, e ha collaborato alla realizzazione e alla elaborazione delle misure.

17 ottobre 1966.

BIBLIOGRAFIA

- AMALDI, U., Jr., B. CONFORTO, G. FIDECARO, H. STEINER, G. BARONI, R. BIZZARRI, P. GUIDONI, V. ROSSI, G. BRAUTTI, E. CASTELLI, M. CESCHIA, L. CHERSOVANI & M. SESSA, 1965. *Rapporti Ist. Nazl. Fis. Nucl.* INFN/AE-65/2.
- CORTELESSA, G. & P. SALVADORI, 1964. *Rapporti Lab. Fisica Ist. Super. Sanità*, ISS 64/46.
- SALVADORI, P., 1966. *Rapporti Lab. Fisica Ist. Super. Sanità*, ISS 66/11, ISS 66/12, ISS 66/13, ISS 66/14.