

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/122 (1962)

G. Diambri, G. Ghigo: L'ELETTROSINCROTRONE: STRUMENTI  
PER LE MISURE MAGNETICHE.

Estratto dal: Nuovo Cimento, Suppl. 24, 129 (1962)

## CAPITOLO IV

### Strumenti per le misure magnetiche.

G. DIAMBRINI e G. GHIGO

#### 1. - Criteri generali.

Per garantire il funzionamento dell'elettrosincrotrone occorre misurare vari parametri del campo magnetico, per assicurarsi che essi si discostino il meno possibile dai valori teorici calcolati.

I parametri che devono essere sottoposti a misura sono essenzialmente:  
— il valore dell'indice di campo  $n = -(R/B_z)(dB_z/dR)$ ;  
— la superficie magnetica mediana, cioè il luogo dei punti per cui  $B_r = 0$ ;  
— le variazioni azimutali della componente verticale del campo magnetico.

Questi parametri devono essere conosciuti lungo tutto il ciclo di accelerazione.

I cicli di magnetizzazione che precedono l'istante di misura devono essere equivalenti a quello finale per quanto riguarda l'influenza dei campi residui e delle correnti parassite.

Queste esigenze hanno in sostanza condizionato la scelta degli strumenti di misura secondo i criteri seguenti.

A) *Misura dell'indice di campo.* - L'iniezione di elettroni di energia totale 2.5 MeV deve effettuarsi nel sincrotrone ad un campo magnetico di 23 G (\*). Perciò l'indice di campo richiesto, corrispondente ad un gradiente radiale di 0.038 G/cm, può venire facilmente alterato dalla presenza del campo residuo ( $\sim 10$  G) e da correnti parassite nel ferro delle testate e nella bobina. Questo fatto ha suggerito di realizzare uno strumento capace di eseguire una misura di  $n$  all'iniezione di campo magnetico dinamico, con il normale ciclo di eccitazione del magnete.

Questo strumento è stato realizzato raffinando la tecnica delle peaking-strips, ed ha permesso la misura di  $n$  con un errore  $\delta n = \pm 0.03$ .

---

(\*) Originariamente si era previsto di iniettare gli elettroni con un'energia cinetica di 2 MeV, corrispondente a 23 G. Attualmente l'iniezione avviene a 2.6 MeV, corrispondenti a 29 G.

Ai medi ed alti campi ( $500 \div 10\,000$  G) le correnti parassite e il campo residuo non hanno più influenza sull'indice di campo, il quale viene così a dipendere solamente dalla geometria del ferro (in particolare dei poli), e da effetti di saturazione magnetica in vicinanza del campo massimo. Questo fatto ha suggerito di realizzare uno strumento per la misura di  $n$  in campo statico, potendosi, in queste condizioni, ottenere una precisione più elevata. Lo strumento impiegato a questo scopo, un flussometro elettronico del tipo di Dicke, ha permesso di misurare  $n$  con un errore  $\delta n = \pm 0.006$ . Questo è stato ottenuto adottando un particolare metodo di misura, come viene spiegato nel seguito. Un altro strumento usato essenzialmente per studiare la forma del profilo polare del magnete, è stato realizzato col principio delle bobinette rotanti, ma in pratica ha dato prestazioni nettamente inferiori al flussometro, per ragioni insite nel principio di funzionamento. Infine la sonda differenziale a peaking-strips per il rilievo della s.m.m. (superficie magnetica mediana) ha permesso di condurre misure assolute di  $n$  fino a 1000 G e sempre in campo statico, riconducendole a una semplice misura di angolo. Questo è ovviamente possibile perchè  $n$  è una quantità adimensionale.

Si sono inoltre realizzati strumenti per la misura di  $n$  in campo dinamico a medi e alti campi, costituiti da bobine collegate a un integratore elettronico la cui uscita viene osservata all'oscillografo. Ma la loro precisione non è stata spinta oltre il livello usuale, e il loro impiego per la misura di  $n$  è rimasto limitato, per le ragioni sopra esposte. Invece sono stati utilizzati per misure della variazione azimutale di  $B_z$ .

*B) Misura della s.m.m.* - Per questa misura fino a 1000 G in campi statici è stata ideata e realizzata una sonda differenziale a peaking strips completamente originale, che ha permesso la determinazione della s.m.m. con un errore massimo di  $\pm 1.5$  mm. Essa ha permesso di allineare meccanicamente tutti i pacchi di lamierini del magnete prendendo come monitor finale della loro giusta posizione, non più riferimenti meccanici, ma la stessa s.m.m.

*C) Variazioni azimutali di  $B_z$ .* - Per queste misure si sono adottati gli strumenti usati nelle misure precedenti.

Una cura particolare è stata data anche alla realizzazione dei dispositivi meccanici di misura. I coordinatometri sono stati montati su carrelli che possono scorrere su un binario che circonda il sincrotrone (Fig. III.iv.1).

## 2. - Misure di $n$ a campo costante.

Per misurare l'indice  $n$  del campo magnetico nel traferro del magnete dell'elettrosincrotrone (e.s.) è necessario valutare separatamente le due grandezze  $\Delta B_z / \Delta r$  e  $B_z$ . Impiegando un flussometro elettronico [1] con una sensibilità

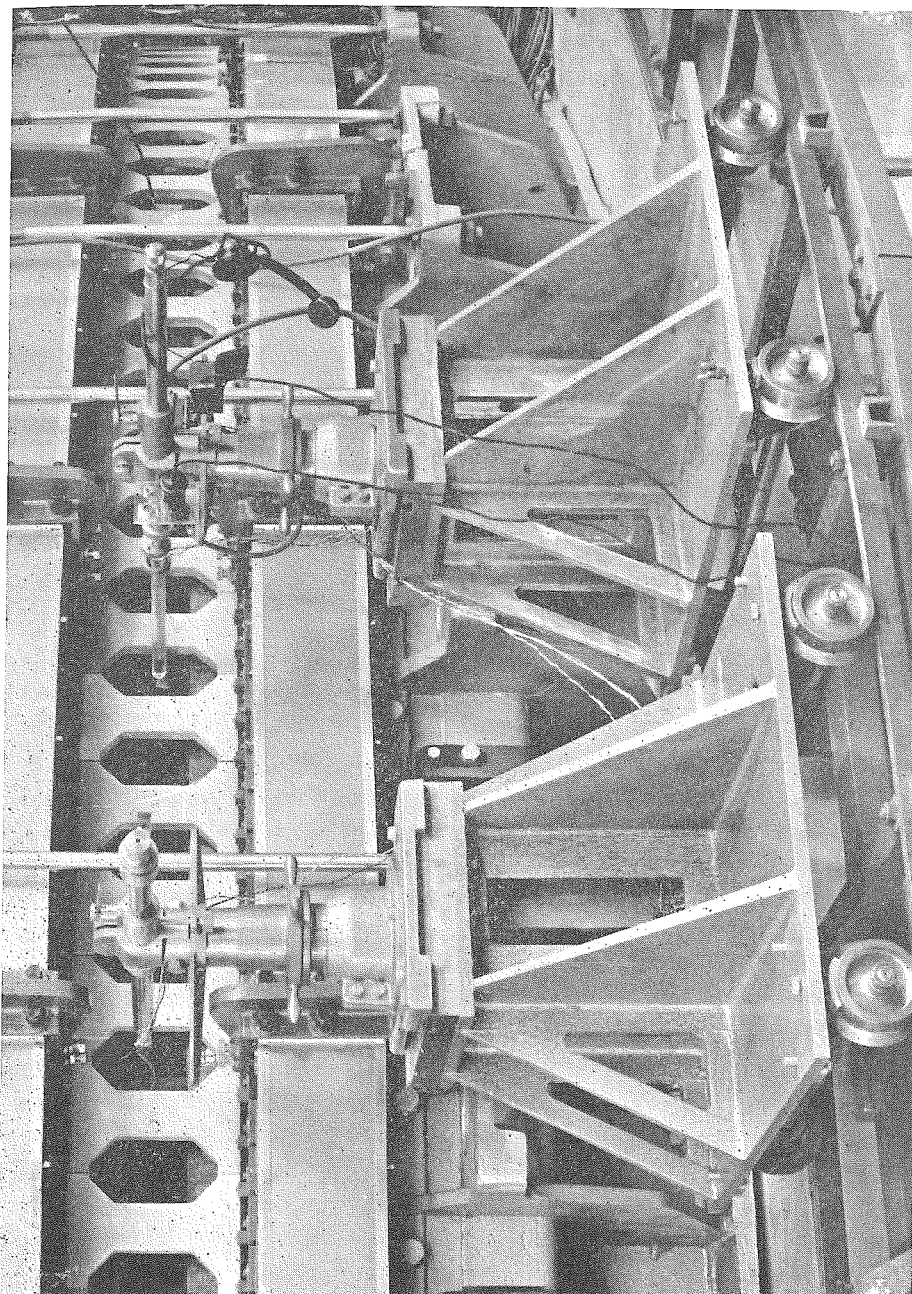


Fig. III.iv.1. - Disposizione di due coordinatometri per la misura di  $n$  in campo dinamico. I coordinatometri sono appoggiati su due carrelli scorrevoli su un binario che circonda interamente l'elettrosincrotrone.

massima di 50 Mx è possibile apprezzare queste due grandezze con precisione sufficiente, effettuando la misura per valori di  $B$  superiori a 1000 G. Dal momento che per effettuare misure di campo magnetico mediante questo tipo di flussometro è necessario conoscere il valore di 4 grandezze e cioè l'area-spire della bobina, il valore della resistenza e della capacità della costante di tempo e il valore della tensione di uscita, si è tentato di tarare prima di ogni misura l'apparecchio mediante un campo noto. Si pone la bobina con cui si vuole effettuare la misura al centro di un solenoide di cui sono note le spire per cm e mediante un reostato si fa variare la corrente nel solenoide, per cui si ha una variazione nota del campo magnetico. Considerando che è facilmente possibile conoscere il numero delle spire e la variazione di corrente al 5‰, la variazione di campo è nota all'1%. Per rendere più agevole la taratura la variazione di campo dovrà essere dello stesso ordine di grandezza della variazione del campo da misurare nel traferro, ad esempio nel caso  $\Delta r = 1$  cm e  $B = 1000$  G. In questo modo si ottiene che il flussometro con una determinata bobina è direttamente tarato in gauss per volt con una precisione dell'1%. L'area spire della bobina impiegata dovrà essere dell'ordine di 10000 cm<sup>2</sup> in quanto per  $\Delta r = 1$  cm e  $B = 1000$  G dovrà misurare una variazione di campo dell'ordine di 1 G e cioè una variazione di flusso dell'ordine di 10000 Mx. Questa corrisponde a una lettura di 2 V sul flussometro. Questa tensione di uscita è stata scelta per rendere dell'ordine del 5‰ l'errore dovuto al rumore di fondo dell'apparecchio, che è appunto contenuto entro 0.01 V. La misura di  $\Delta B/\Delta r$  si effettua spostando la bobina, con cui si è effettuata la taratura del flussometro, lungo la radiale di una quantità  $\Delta r$  mediante un apposito coordinatometro. L'errore introdotto nella valutazione di  $\Delta r$  è trascurabile in quanto per  $\Delta r = 1$  cm l'errore di 0.1 mm dà una precisione dell'1‰; è però importante controllare durante lo spostamento la planarità della bobina con una livella. In base alla consi-

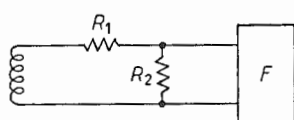


Fig. III.IV.2. - Partitore per la misura dell'indice di campo  $n$  mediante il flussometro di Dicke.

derazione precedente  $\Delta B$  può essere determinato entro il 2%, valore che si ottiene approssimativamente sommando i tre seguenti errori: errori di taratura 1%; errore di lettura dovuta al fondo 0.5%; errori accidentali 0.5%. La misura di  $B$  si effettua utilizzando la medesima bobina e la medesima taratura del flussometro. Si pone la bobina nel punto dove si vuol misurare  $B$  e la si allontana sufficientemente dal magnete applicando il segnale al flussometro tramite un partitore come

nella Fig. III.IV.2, in modo che il valore di  $B$  possa essere letto sulla medesima scala precedentemente tarata in gauss per volt. Il partitore può essere dimensionato in modo tale per cui per il valore di  $n$  voluto e un prefissato valore di  $\Delta r$ , le letture voltmetriche corrispondenti alla misura di  $\Delta B$  e di  $B$ , siano circa uguali. Dal momento che il partitore può essere costruito con resistenze note

all'1/10 000 la precisione di misura di  $B$  è ancora del  $\pm 1\%$ .  $B$  può essere inoltre misurato con la medesima precisione mediante il normale flussometro elettrodinamico e una bobina di area spire nota.

È importante osservare che per determinare l'indice  $n$  è sufficiente conoscere il valore del rapporto  $\Delta B/B$ , per cui detta  $V_1$  la lettura voltmetrica corrispondente a  $\Delta B$  e  $V_2$  la lettura corrispondente a  $B$  si ha

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{V_1}{V_2} \frac{R_2}{R_2 + R_1};$$

da questa si vede che il valore di questo rapporto è indipendente dalla taratura del flussometro, e pertanto l'errore è del  $\pm 1\%$ , cioè la somma dell'errore delle due letture voltmetriche allo 0.5%. Pertanto un valore di  $n$  dell'ordine di 0.6 sarà noto a meno di un  $\Delta n$  di  $\pm 0.006$ .

Per le misure in cui non era molto importante conoscere i valori assoluti ma essenzialmente i valori relativi di  $n$  si sono impiegate delle bobine rotanti [2]. Queste misure sono state effettuate essenzialmente sui modelli per il dimensionamento del polo ed in particolare per studiare la forma dei « tips » (forma dei poli agli estremi del traferro). La massima difficoltà tecnologica sta nel realizzare un sistema di contatti rotanti che presenti una resistenza bassa e costante. I migliori risultati sono stati ottenuti impiegando anelli di rame e spazzole formate di lamelle di bronzo fosforoso. Le bobinette erano connesse ad un sistema di misura a ponte in cui il sistema di azzeramento è fatto mediante un amplificatore ad alto guadagno ed un oscillografo come nei comuni ponti a corrente alternata. Per quanto la taratura delle bobine avvenisse in un campo rigorosamente uniforme generato da un magnete con poli perfettamente piani paralleli, le variazioni di resistenza dei contatti rotanti non hanno permesso di ottenere una elevata riproducibilità delle misure assolute.

### 3. - Sonda differenziale per la determinazione della superficie magnetica mediana in campo costante.

La descrizione particolareggiata di questa sonda differenziale a peaking strips è stata già pubblicata [3]. Ci limiteremo a richiamarne il principio di funzionamento e ad illustrarne il metodo di impiego e le caratteristiche costruttive finali.

Si abbiano due sottili fili ferromagnetici ad alta permeabilità, uguali, paralleli e rettilinei, soggetti ad un campo magnetico sinusoidale alternato di frequenza  $\nu \simeq 1000$  Hz, e con ampiezza  $H_a$  sufficiente a saturare il materiale ferromagnetico. Il campo in un filo sia in ogni istante uguale ed opposto a

quello agente sull'altro filo, e ciascuno di questi sia circondato nella sua regione centrale da una bobinetta (Fig. III.IV.3a). Allora ai capi di ciascuna bobinetta si potrà raccogliere una serie di impulsi di f.e.m. indotta di segno opposto.

Se si collegano le due bobinette in serie e nella stessa direzione di avvolgimento, la f.e.m. raccolta sarà circa nulla perchè si avrà così la somma di impulsi uguali, simultanei, ed opposti. Se ora si sottopongono i fili così eccitati ad un campo magnetico costante  $H_0 < H_a$  gli impulsi delle due bobinette si sposteranno nel tempo in senso opposto (Fig. III.IV.3b); così sorgerà un impulso differenza, ai capi delle bobinette connesse in serie, la cui ampiezza da picco a picco è, entro certi limiti, proporzionale al campo statico applicato. Se invece noi sottoponiamo un filo ad un campo statico uguale e opposto a quello agente sull'altro filo, gli spostamenti in tempo degli impulsi andranno nella stessa direzione, e all'uscita delle due bobinette in opposizione la f.e.m. indotta non subirà alcuna variazione (Fig. III.IV.3c), rimarrà cioè circa nulla.

La f.e.m. indotta sarà perciò una funzione della variabile « somma algebrica » dei campi magnetici statici cui i due fili sono sottoposti.

Quest'ultima disposizione risulta adatta a determinare la posizione della s.m.m. nell'intraferro di un sincrotrone a focalizzazione debole eccitato con corrente continua.

La s.m.m. è definita come il luogo dei punti in cui la componente radiale del campo è  $H_r(\theta, r, z_0) = 0$ , dove il sistema di coordinate cilindriche  $\theta, r, z$  ha asse verticale passante per il centro di curvatura di un quadrante del magnete. Assumeremo che la s.m.m. rappresenti la superficie di simmetria per le linee di campo, in modo che, se  $P(r, \theta, z_0)$  è un punto

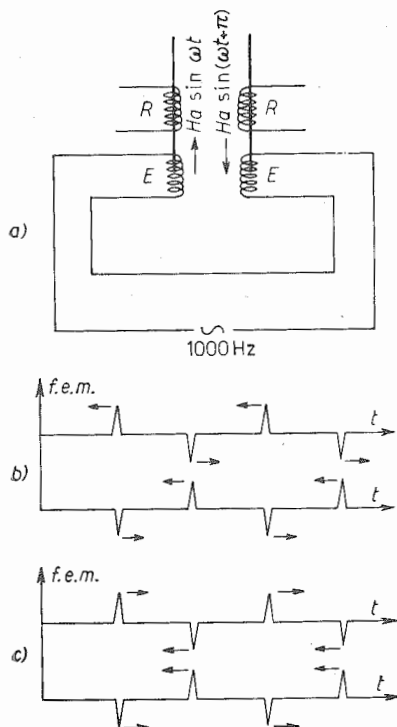


Fig. III.IV.3. - a) Disposizione schematica degli avvolgimenti nella sonda differenziale per la misura della s.m.m. in campo costante:  $E$  = avvolgimenti di eccitazione;  $R$  = avvolgimenti di rivelazione degli impulsi di f.e.m. indotta. b) Le frecce indicano lo spostamento lungo l'asse dei tempi degli impulsi raccolti ai capi di  $E$  quando i fili ferromagnetici sono sottoposti allo stesso campo costante. c) Come in b) ma ora il campo costante che agisce lungo un filo è uguale e contrario a quello agente sull'altro filo.

della s.m.m. si avrà

$$(III.IV.1) \quad H_r(\theta, r, z_0 + \Delta z) = -H_r(\theta, r, z_0 - \Delta z), \quad H_r(\theta, r, z_0) = 0;$$

cioè le componenti radiali in punti simmetrici rispetto alla s.m.m. sono uguali e opposte. Se ora si pongono i due fili orizzontali nell'intraferro, paralleli e alla distanza  $d$  tra loro, giacenti in un piano verticale passante per il centro del settore curvo, allora il dispositivo ci fornirà impulsi di f.e.m. minimi quando sarà verificata la condizione (III.IV.1), nella quale ora  $\Delta z = d/2$  e perciò  $H_r$ ,  $-H_r$  sono anche le componenti del campo lungo i fili. Considerando di spostare i due fili verticalmente di  $\Delta z$ , con un dispositivo meccanico perfetto che impedisca qualsiasi rotazione, si ha una corrispondente variazione della somma algebrica delle componenti lungo i fili:

$$\Delta H_r = \frac{2nB_z \Delta z}{R} = \frac{B_z}{3000} \Delta z.$$

Questo impone che per rilevare uno spostamento verticale della s.m.m. di  $\Delta z = 1$  mm in un campo di 30 G, occorre che l'impulso di f.e.m. indotta raccolto vari apprezzabilmente per una differenza

$$\Delta H_r \approx 0.01 \text{ G}.$$

Questa è circa la sensibilità massima raggiunta con l'impiego di fili lunghi qualche cm e del diametro di 0.025 mm di lega M1040 montati sulla sonda [3]. Questo impone un limite inferiore all'intervallo di campo magnetico nel quale la sensibilità di  $\Delta z = 1$  mm può essere ottenuta nella misura della s.m.m. Il limite superiore dell'intervallo è dato dal fatto che i fili sono soggetti ad un campo perpendicolare particolarmente intenso che tende a saturare trasversalmente il filo. Con il procedimento di tensione dei fili [3] e con i fili sopra detti, si è riusciti a fare ottime misure fino a 1000 G. Oltre questo valore di campo gli impulsi di f.e.m. vanno a zero.

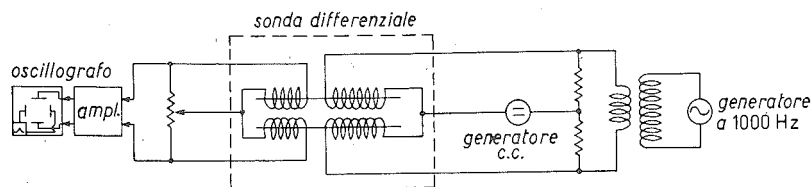


Fig. III.IV.4. - Schema elettrico del dispositivo per la misura della s.m.m.



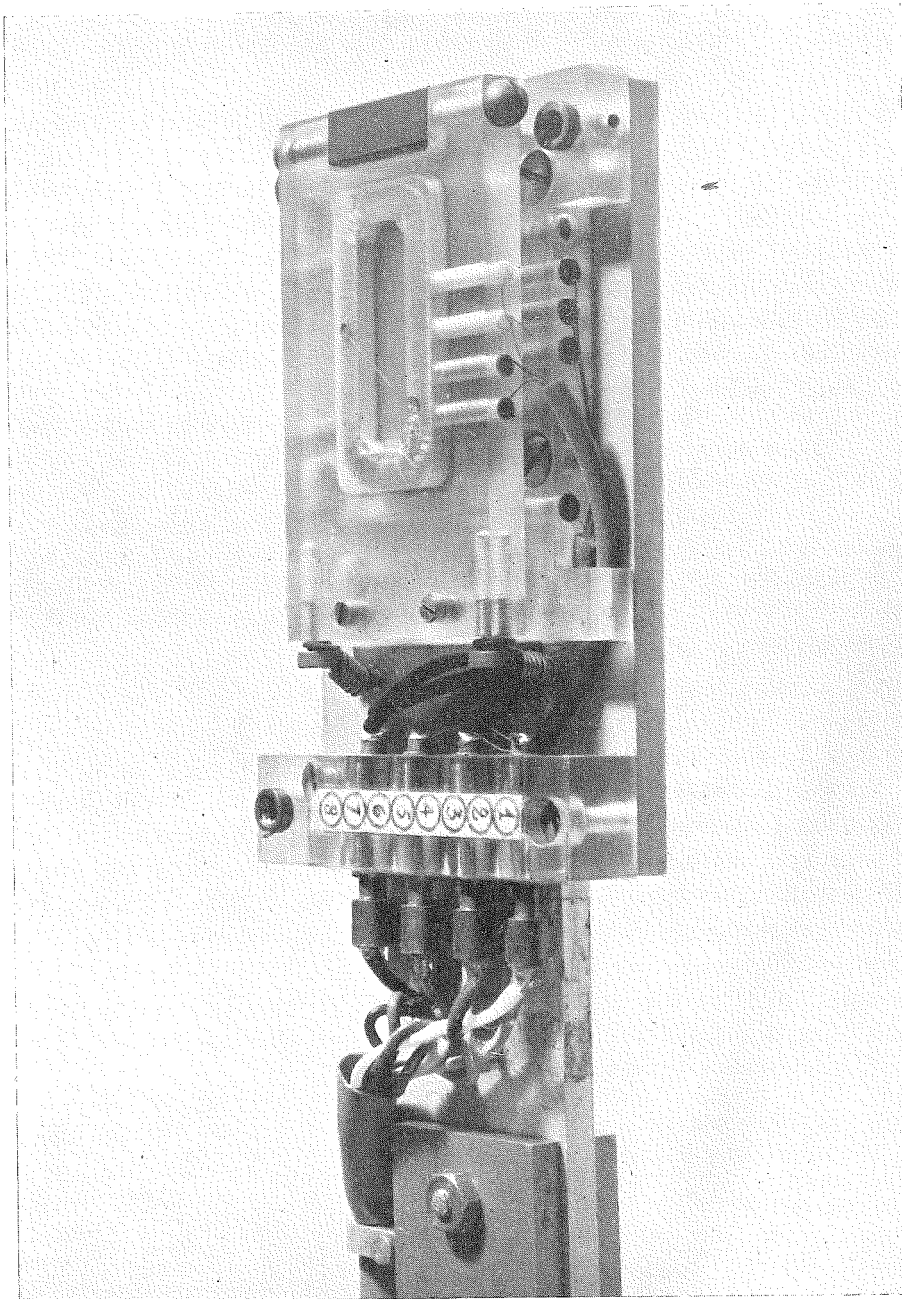


Fig. III.iv.5. — Sonda PMC/1 per la determinazione della s.m.m. Il punto inciso su plexiglass in corrispondenza di uno dei rami dell'avvolgimento toroidale indica il centro dell'estensione radiale del filo ferromagnetico lungo 2.5 cm.

Durante la misura i fili debbono restare paralleli al piano orizzontale entro un angolo

$$\theta \ll \frac{n \delta z}{R} = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ rad},$$

se vogliamo che l'errore introdotto nella misura sia  $\delta z \leq 1$  mm. Questo può essere facilmente controllato mediante un opportuno impiego di livelle a bolle d'aria.

Descriviamo ora la versione definitivamente perfezionata dell'apparecchio. Osservando lo schema di principio di Fig. III.IV.4 si vede che ciascun filo deve essere circondato da un avvolgimento pick-up e da un altro per fornire il campo di eccitazione sinusoidale. Il primo è costituito da un avvolgimento di 400 spire di filo di rame smaltato  $\varnothing = 0.05$  mm, avvolto su un tubicino di vetro riempito di araldite contenente il filo ferromagnetico M1040,  $\varnothing = 0.025$  mm. Il secondo è un avvolgimento toroidale rettangolare con filo  $\varnothing = 0.1$  mm, completamente chiuso per eliminare il flusso disperso ed ottenere una maggiore uniformità di campo a parità di ingombro radiale. Sono stati realizzati due modelli finali di sonda, PMC/1, PMC/2, per le misure di s.m.m. sul sincrotrone. Il modello PMC/1 è visibile in Fig. III.IV.5. Il punto inciso sul plexiglass e indicato dalla freccia indica il centro del filo ferromagnetico in corrispondenza del quale è avvolto l'avvolgimento pick-up. Il filo è lungo 4 cm per la sonda PMC/2, e 2.5 cm per la sonda PMC/1. Nelle due sonde il parallelismo dei fili ferromagnetici è ottenuto per rotazione del toro superiore attorno ad un asse orizzontale perpendicolare ai fili e per spostamento del toro inferiore a mezzo di viti incastrate nel sostegno di plexiglass inferiore.

Nello schema di principio del dispositivo elettronico (Fig. III.IV.4) si vede un oscillatore da 1000 Hz che invia una corrente di  $\sim 50 \text{ mA}_{\text{eff}}$  nei due avvolgimenti toroidali messi in serie e in opposizione. Dall'altro lato un amplificatore rapido con guadagno 100 trasmette ad un oscillografo gli impulsi-differenza prelevati ai capi delle bobinette pick-up poste in serie e in opposizione. Un partitore permette di uguagliare le ampiezze degli impulsi delle due bobinette. Il generatore di corrente continua permette di inviare una corrente continua variabile di pochi mA in verso tale da produrre nei due fili due campi uguali e nello stesso senso. Ciò è molto utile per introdurre uno sfasamento artificiale tra gli impulsi in modo da ottenere un impulso-differenza all'uscita della forma visibile in Fig. III.IV.6

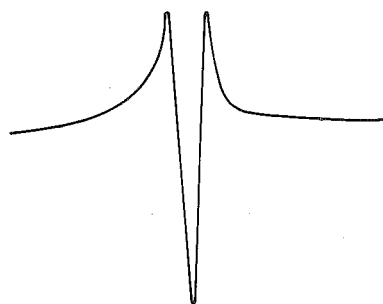


Fig. III.IV.6. - Forma dell'impulso risultante dalla sovrapposizione dei due impulsi opposti quando la sonda differenziale è sulla s.m.m.

quando la somma algebrica delle componenti lungo i fili è nulla. Questa forma è infatti ben riconoscibile, e uno spostamento anche di 1 mm dalla s.m.m. della sonda provoca una forte asimmetria nei due picchi.

Esponiamo qui il metodo di taratura usato per le misure finali in quanto questo costituisce la premessa essenziale per una corretta utilizzazione del dispositivo.

Occorre fare in modo che i due fili ferromagnetici della sonda siano orizzontali e paralleli, così che la componente di  $H$  lungo il filo coincida con la componente radiale  $H_r$  di detto campo. La sonda, sorretta dall'apposito coordinatometro, come mostrato dalla Fig. III.IV.7, è introdotta in un magnete campione che fornisce un campo magnetico verticale entro  $\pm 30''$ . Il magnete usato soddisfa questa condizione perchè le sue superfici polari parallele sono state rese orizzontali mediante livelle, e lo si è smagnetizzato accuratamente prima di portarlo al valore di campo di taratura. Questo valore deve essere uguale a quello per il quale è prevista la misura (cioè per  $(10^2 < H < 10^3)$  G) perchè la saturazione trasversale dei fili sia la stessa.

Una volta introdotta la sonda nell'intraferro del magnete con i fili approssimativamente orizzontali si osserva all'oscillografo l'impulso proveniente dal solo filo inferiore. Si ruota il braccio di sostegno della sonda fino a che gli impulsi non hanno più spostamenti lungo l'asse dei tempi quando si inverte il campo magnetico del magnete campione. La stessa operazione deve essere fatta per il filo superiore, agendo però solo sulle apposite viti inserite nel sostegno di plexiglass superiore mantenendo la direzione del braccio costante. Normalmente non è necessario eseguire altri movimenti perchè i due fili non formino angoli maggiori di  $1^\circ$  con il piano verticale per costruzione, e questo è tollerato. Si osservano ora all'oscillografo gli impulsi provenienti dagli avvolgimenti di induzione disposti in serie e nello stesso verso. Si regolano poi la corrente erogata del generatore in corrente continua e il potenziometro partitore di Fig. III.IV.4, finchè sullo schermo oscillografico compare un impulso differenziale di forma adatta a servire da riferimento durante le misure. Questa forma è del tipo di Fig. III.IV.6.

Si orientano ora fino all'equilibrio, e si fissano in questa posizione le due livelle a bolla d'aria solidali al braccio del coordinatometro. In tal modo la sonda può essere estratta dall'intraferro del magnete campione, introdotta in una finestra del magnete del sincrotrone (Fig. III.IV.8), e la mezzeria tra i due fili portata a coincidere con la posizione del p.g.m. (piano geometrico mediano) sull'orbita di equilibrio.

Il piano orizzontale passante per la mezzeria di questa finestra di riferimento viene assunto come p.g.m. del sincrotrone da cui si misureranno gli scostamenti assoluti della s.m.m. in tutte le altre finestre.

Ciò è stato fatto agevolmente traguardando un punto del coordinatometro con una livella ottica rotante in un piano rigorosamente orizzontale.

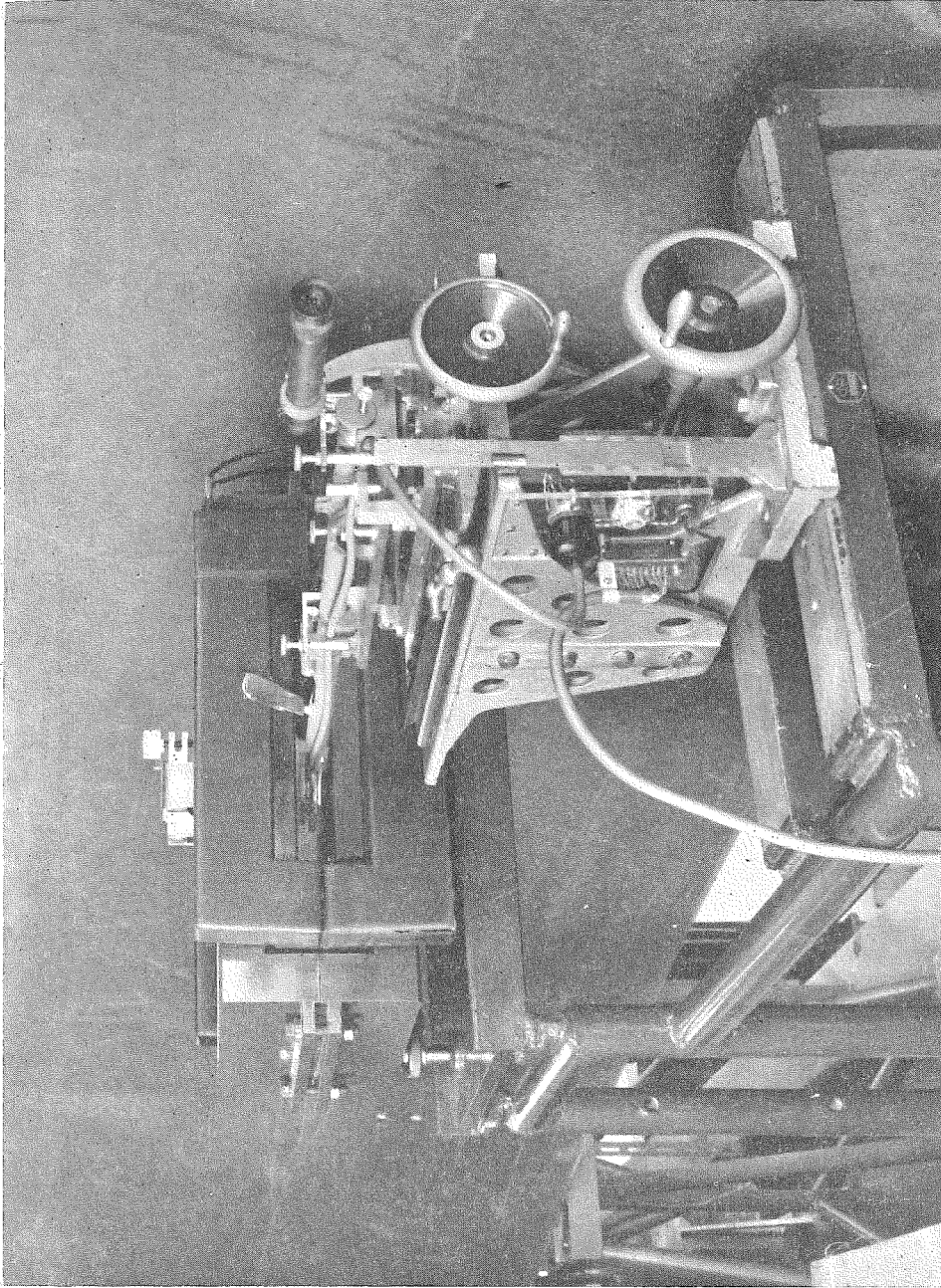


Fig. III.IV.7. - La sonda differenziale è introdotta tramite il relativo coordinatometro nell'intraferro di un magnete a campo costante. Con questa disposizione i due fili vengono resi paralleli e orizzontali entro  $2 \cdot 10^{-4}$  rad.

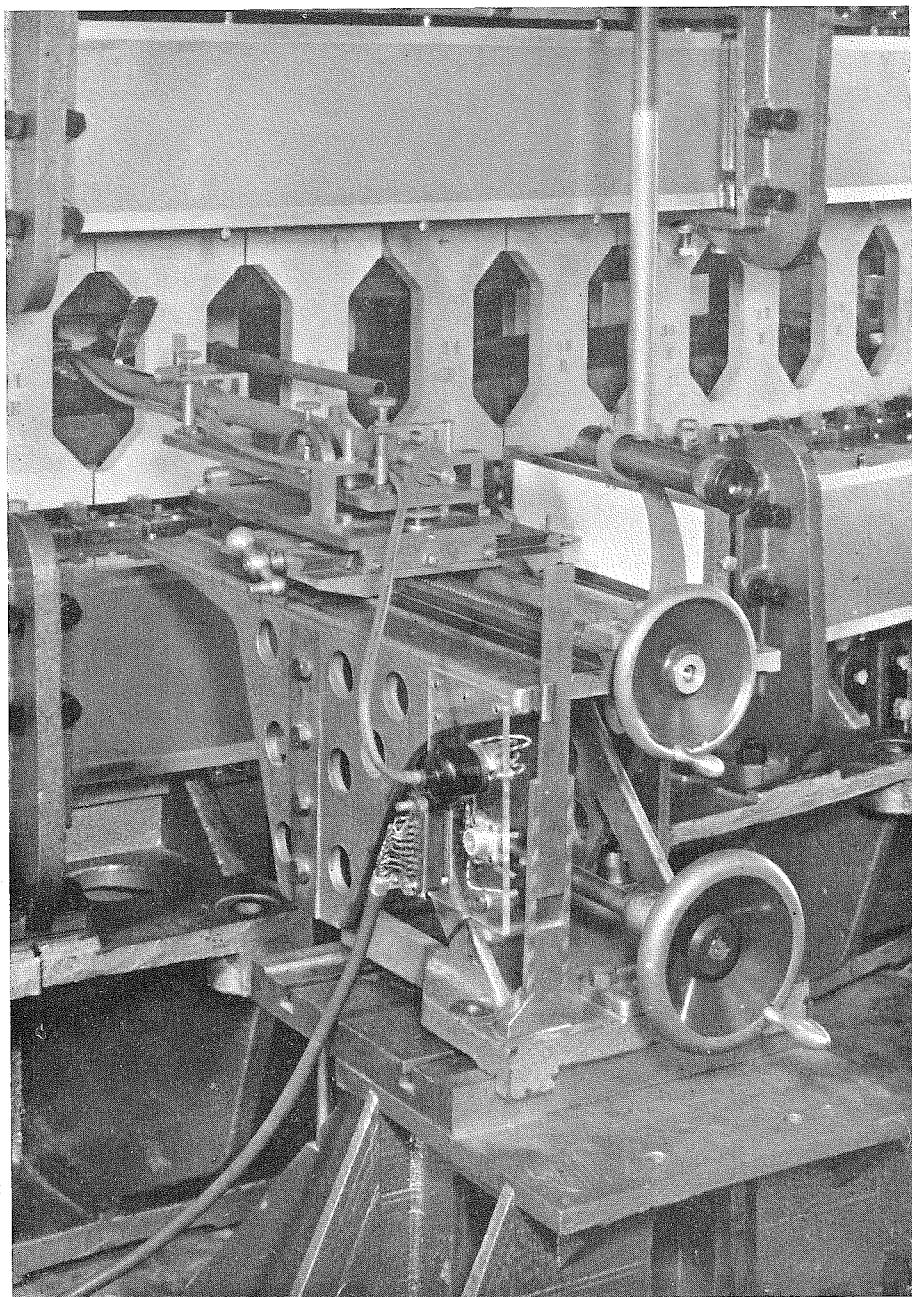


Fig. III.iv.8. - La sonda già allineata è introdotta con il suo coordinatometro in una finestra dell'intraferro dell'elettrosincrotrone.

Questo metodo rende la determinazione della s.m.m. indipendente dalla posizione della superficie dei poli.

L'efficacia di questa misura risulta più chiara considerando che se un blocco, pur avendo un campo magnetico perfetto, è ruotato, rispetto al blocco di riferimento di un angolo  $\alpha$  allora la posizione della s.m.m., risulta sollevata o abbassata della quantità:

$$\Delta z \simeq \frac{R}{n} \operatorname{tg} \alpha = 6\,000 \operatorname{tg} \alpha,$$

cioè basta una rotazione di  $\alpha=10^{-3}$  rad per ottenere uno spostamento  $\Delta z=6$  mm.

In effetti molti blocchi sono stati ruotati, mentre la sonda era in posizione nell'intraferro, per portare a coincidere la s.m.m. con il p.g.m. sopra definito.

Una stima di tutte le cause di errore porta a valutare che questo sia  $\delta z \pm 1.5$  mm, con una sensibilità di misura di 0.3 mm (per  $B_z = 500$  G).

#### 4. - Apparecchio per la misura di $n$ in campo dinamico all'iniezione con peaking-strips.

Descriviamo il principio della misura all'iniezione della quantità

$$n = - \frac{R}{B_z} \frac{\Delta B_z}{\Delta r}.$$

In Fig. III.IV.9 la linea retta 0 approssimi  $B_z(t)$  in un punto  $P_0$  del piano mediano dell'intraferro, mentre la linea 1 rappresenti l'andamento della funzione  $B_z(t)$  in un altro punto  $P_1$  del piano mediano.

La linea 1' rappresenti la funzione  $B_z(t)$  in un punto del piano mediano spostato radialmente di  $\Delta r = 1$  cm dal punto  $P_1$ .

Il principio del metodo è allora il seguente: una peaking strip polarizzata con un campo  $B_0 = 23$  G, posta verticalmente nel punto  $P_0$ , generi un impulso sovrapposto a quello proveniente da una seconda peaking strip polarizzata con un campo  $B_1 \approx 23$  G posta nel punto  $P_1$ . Movendo questa seconda p.s. di  $\Delta r$  l'impulso relativo ritarderà di  $\Delta t$ ,

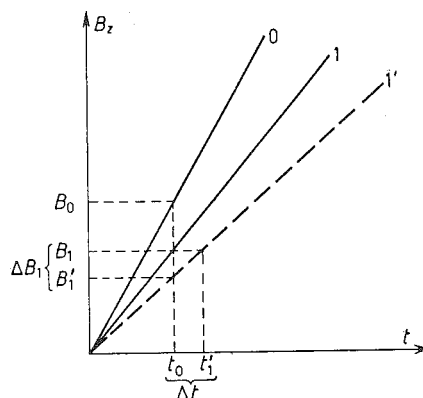


Fig. III.IV.9. - Schizzo illustrativo del metodo di misura di  $n$  all'iniezione con peaking strips. Le rette 0, 1, 1' rappresentano la funzione  $B_z(t)$  in diversi punti del p.g.m. dell'intraferro.

e la variazione  $\Delta B_1$  di polarizzazione necessaria a riottenere le sovrapposizioni darà il valore cercato del gradiente. La variazione aspettata sarà, per  $n = 0.6$ ,  $B_z = 23$  G e  $\Delta r = 1$  cm:

$$\Delta B_1 = \Delta B_z = B_z \frac{n}{R} \Delta r = \frac{B_z}{600} = 0.038 \text{ G}.$$

Per misurare questa al 3%, occorre una sensibilità  $\delta B_z = 0.001$  G.

Questa sensibilità può essere raggiunta ponendo i due impulsi in opposizione, e osservandoli all'oscillografo. Per questo occorre però preparare le

peaking strips con il metodo descritto [3]. Il metodo di misura più sopra illustrato è in realtà eccessivamente schematico.

Quando la peaking strip mobile si sposta di  $\Delta r$  il valore di  $\dot{B} = dB/dt$  cui è soggetta, varia perciò il suo campo coercitivo a causa delle correnti parassite e questo corrisponde ad una variazione del campo di polarizzazione  $B_1$ .

Questo implica un errore che è valutabile in base a misure e calcoli, come vedremo più avanti.

Il dispositivo utilizzato è schematizzato in Fig. III.IV.10. In questa figura 1 e 4 rappresentano gli avvolgimenti di bias grosso rispettivamente della peaking strip fissa e mobile.

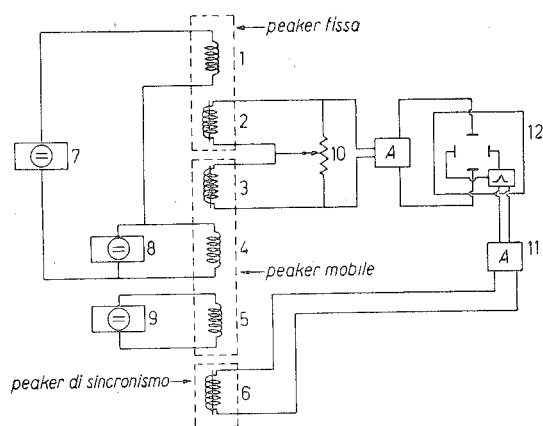


Fig. III.IV.10. - Schema elettrico del dispositivo per la misura di  $n$  all'iniezione in campo dinamico con peaking strips: 1) e 4) avvolgimenti di bias grosso; 2) e 3) avvolgimenti di rivelazione degli impulsi di f.e.m. indotta; 5) avvolgimento di bias fine; 6) peaking strip di sincronismo; 7-8-9) generatori di corrente continua stabilizzata all'1%; 12) oscillografo per l'osservazione della sovrapposizione degli impulsi.

Questi sono alimentati in serie dal generatore di corrente continua 7, in modo da generare due campi magnetici aventi lo stesso verso, opposto al campo del sincrotrone.

Generalmente il campo del sincrotrone non è lo stesso sulle due peaking strips. In un certo istante (Fig. III.IV.9), perciò, se i due campi polarizzanti sono uguali gli impulsi uscenti non saranno simultanei. Perciò l'avvolgimento 4 è alimentato anche da un generatore in corrente continua supplementare 8, che permette di ottenere la desiderata simultaneità. L'avvolgimento 5 della peaking strip mobile è alimentato dal generatore 9 ed è quello con cui si compie

la misura di  $\Delta B_z/\Delta r$ . I due avvolgimenti 2, 3, appartenenti rispettivamente alla peaker fissa e alla mobile, sono gli avvolgimenti di ricezione degli impulsi di f.e.m. indotta forniti dalle peaking strips, e sono collegati in serie-opposizione. Essi vanno tramite un partitore-mescolatore 10 e un amplificatore  $A$ , alle placche di deviazione verticale di un oscilloscopio 12 il cui asse orizzontale è comandato in sincronismo con l'impulso proveniente da una terza peaking strip 6 senza campo polarizzante.

In Fig. III.iv.11 è data la sezione di una peaking strip realizzata con il metodo descritto in 3.

Lo stesso dispositivo può servire per la misura di  $n$  in campo magnetico costante, semplicemente sovrapponendo alla corrente continua (c.c.) negli avvolgimenti di bias grosso una corrente sinusoidale di 1000 Hz. Il metodo di misura resta quello già descritto per il caso di campo dinamico. Unica differenza è che il valore del campo  $B_z$  sulla peaking strip mobile può essere determinato direttamente mandando lentamente a zero l'ampiezza della corrente alternata (c.a.) a 1000 Hz e aggiustando contemporaneamente il valore della corrente di bias in modo che gli impulsi restino simmetrici, cioè abbiano tutti la stessa distanza lungo l'asse dei tempi.

Discutiamo ora la sensibilità e l'errore ottenuti nella misura di  $n$  con questo metodo.

Con una peaking strip come quella mostrata in Fig. III.iv.11 la minima variazione di corrente di bias fine alla quale è sensibile l'impulso differenza è circa 0.01 mA corrispondente a 0.0012 G. Questo comporta una sensibilità in  $n$  di  $\sim 0.02$ .

Per quanto riguarda l'errore sistematico della misura, si ha intanto dalla definizione di  $n$

$$n = \frac{R \Delta B_z}{B_z \Delta r} = \frac{R}{K_{bg} I_{bg}} \frac{K_{bf} I_{bf}}{\Delta r},$$

dove  $I_{bf}$ ,  $K_{bf}$  = corrente e costante dell'avvolgimento di bias fine della peaking strip mobile;  $I_{bg}$ ,  $K_{bg}$  = corrente e costante dell'avvolgimento di bias grosso (generalmente della peaking strip fissa).

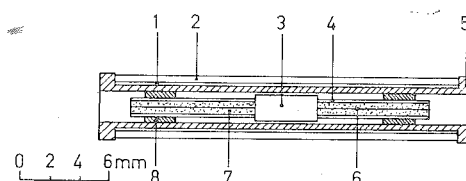


Fig. III.iv.11. - Sezione di una peaking strip. Il riempimento del tubicino di vetro con araldite è effettuato quando il filo è sottoposto a tensione, secondo il procedimento descritto in [1]; 1) avvolgimento bias fine (strato filo  $\varnothing = 0.08$  mm); 2) avvolgimento bias grosso (5 strati filo  $\varnothing = 0.08$  mm); 3) avvolgimento di ricezione (400 spire di filo  $\varnothing = 0.05$  mm); 4) tubicino di vetro (o ceramica); 5) tubo di plexiglas; 6) filo mumentale  $\varnothing = 0.025$  mm; 7) riempimento di araldite; 8) boccole di plexiglas di sostegno peaker.



L'errore sistematico massimo nella misura è dunque:

$$\frac{\delta n_s}{n} = \left( \frac{\delta R}{R} + \frac{\delta(\Delta R)}{\Delta R} \right) + \left( \frac{\delta K_{bg}}{K_{bg}} + \frac{\delta K_{bf}}{K_{bf}} \right) + \left( \frac{\delta I_{bf}}{I_{bf}} + \frac{\delta I_{bg}}{I_{bg}} \right).$$

Nella prima parentesi l'errore massimo è dato da

$$\frac{\delta(\Delta R)}{\Delta R} \approx 5\text{‰},$$

mentre l'altro termine è trascurabile.

Nella seconda parentesi compaiono gli errori nella determinazione delle costanti degli avvolgimenti. Con il metodo da noi impiegato, tale errore risulta essere in totale di circa 5‰, mentre l'errore nella conoscenza delle correnti è circa l'1%. Si ha dunque  $\delta n_s \approx n \cdot 0.02 = 0.012$ .

Questo errore potrebbe essere facilmente diminuito ma il suo valore è già piccolo rispetto agli altri, di cui ora parleremo.

Per quanto riguarda l'errore accidentale questo è dovuto essenzialmente alle fluttuazioni dell'alimentazione, in particolare alle fluttuazioni del valore di  $B_{neg}$  che fanno variare il  $B$  sulle peaking strips. Questo è tanto più piccolo quanto meglio è stabilizzato il valore di  $B_{neg}$  e quanto più grande è il numero di volte che una singola misura viene ripetuta.

Nel nostro caso l'errore quadratico medio accidentale può essere stimato:

$$\delta n_a = 0.015.$$

Perciò l'ordine di grandezza dell'errore totale è approssimativamente dato da

$$\delta n \sim \delta n_a + \delta n_s = 0.027.$$

Un'altra sorgente di errore nel metodo di misura è la variazione del campo coercitivo  $B_{cm}$  della peaking strip mobile dovuta alla variazione della velocità di salita del campo  $\dot{B} = dB/dt$  cui è soggetta, quando si sposta di  $\Delta r$ .

La funzione  $B_{cm} = f(\dot{B})$  è stata ottenuta sperimentalmente e il risultato è quello mostrato in Fig. III.IV.12.

Si usano i simboli:

$n_s = 0.60$  = valore di  $n$  «geometrico» a campi medi ( $\sim 1000$  G);

$n'$  = risultato della misura di  $n$  con le peaking strips;

$B_{cm}$  = campo coercitivo per la peaking strip mobile per il  $\dot{B}$  di misura;

$B_{cm}^*$  = intercetta sull'asse ordinata della curva di Fig. III.IV.12;

$B_m$  = campo di bias sulla peaker mobile;

$B_{ct}$  = campo coercitivo per la peaking strip fissa al  $\dot{B}$  di misura;

si può ricavare la seguente espressione per l'errore  $\delta n_c = n_c - n'$ :

$$\delta n_c = \frac{(B_{cm} - B_{cm}^*)n_s - B_{ct}n'}{B_m + B_{cm}}.$$

Assumendo

$$n = 0.6 \approx n_s \approx n',$$

$$B_{ct} \approx B_{cm},$$

l'errore diventa:

$$\delta n_c = -\frac{0.6 \cdot B_{cm}^*}{B_m + B_{cm}},$$

e diminuisce al diminuire di  $B_{cm}^*$ . Nel caso di  $\dot{B} = 0.25 \text{ G}/\mu\text{s}$ ,  $B_{cm}^* = 0.7 \text{ G}$  si ha  $\delta n_c = -0.016$ .

Questo errore può essere calcolato e sottratto per ogni misura.

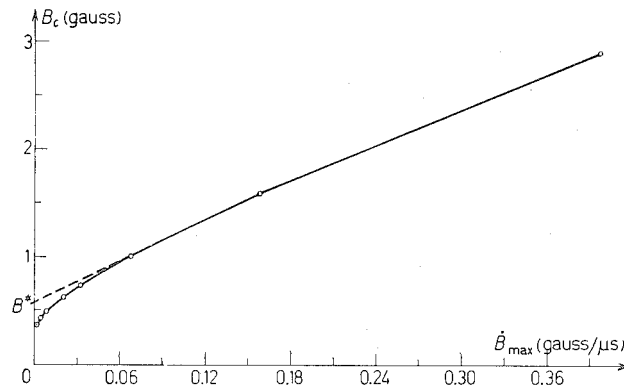


Fig. III.iv.12. - Curva sperimentale che dà il campo coercitivo della peaking strip in funzione della velocità di salita massima del campo cui è sottoposta.

Tuttavia questo non è stato fatto nei dati presentati nel Cap. VI di questa parte e perciò l'errore  $\delta n$  ivi riportato è

$$|\delta n| \approx |\delta n_a| + |\delta n_s| + |\delta n_c| = 0.05.$$

##### 5. - Cenno sugli strumenti per le misure di campo alternato.

Alcune misure effettuate sull'e.s. a campo alternato richiedono l'impiego di integratori elettronici in quanto si devono misurare segnali proporzionali a campi o differenze di campi mediante bobine. Misure di questo tipo sono

le variazioni azimutali di campo ad alti campi, le misure in alternata alle testate e le misure di  $n$  durante il ciclo di accelerazione. Quest'ultima misura non è stata sviluppata dopo aver constatato sui primi modelli che le misure di  $n$  ad alti campi in alternata erano uguali a quelle in continua ai campi corrispondenti. Dal momento che la frequenza della corrente di alimentazione del magnete è abbastanza elevata non si sono potuti sviluppare metodi di misura sufficientemente precisi con presentazione digitale dei dati. Si è seguito il più semplice metodo analogico riportando sull'asse  $x$  di un oscillografo la grandezza  $B$  proveniente dal segnale integrato di una bobina posta nel campo e sull'asse  $y$  la grandezza da misurare in funzione di  $B$ : di solito la differenza di campo tra due punti diversi del traferro. Onde evitare sfasamenti i due integratori debbono avere eguali costanti di tempo  $RC$  ed eguale amplificazione, in quanto nel caso di tensioni sinusoidali di frequenza  $\omega$  la d.d.p. all'uscita di un integratore elettronico è:

$$e_a = \frac{1}{RC} \int V \cos \omega t dt = \frac{V_0}{RC\omega} \sin(\omega t + \delta); \quad \text{tg } \delta = \frac{1}{RCA\omega};$$

in cui  $A$  è il valore del guadagno dell'amplificatore. Dal momento che gli amplificatori non mantengono costante nel tempo il valore del guadagno, prima di ogni misura è necessario tarare l'apparecchio. Per questo si collegano gli ingressi dei due integratori a un generatore di una tensione alternata approssimativamente eguale in frequenza e in ampiezza al segnale delle bobine, e si varia il guadagno di uno degli amplificatori fin quando sull'oscillografo compare una retta. L'istante  $t_0$  in cui  $B(t_0)$  è uguale a zero è segnato sull'oscillografo intensificando il pennello elettronico per una decina di microsecondi.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] R. H. DICKE: *Rev. Sci. Instr.*, **19**, 533 (1948).
- [2] C. CANARUTTO: *L'Elettrotecnica*, **43**, 364 (1956).
- [3] G. DIAMBRINI: *Nuovo Cimento*, **3**, 336 (1956).
- [4] G. DIAMBRINI: *Proc. CERN Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics*, vol. **1** (1956) p. 471.