

LNf - 63/3

22.1.1963.

A. Bonanni, G. Sacerdoti: LA MISURA DI ALTI CAMPI MAGNETICI
MEDIANTE L'EFFETTO FARADAY. -

Nota interna n. 182.

Laboratori Nazionali di Frascati del C.N.E.N.
Servizio Documentazione

LNF-63/3

Nota interna: n°182

22 Gennaio 1963

(x)

A. Bonanni e G. Sacerdoti

LA MISURA DI ALTI CAMPI MAGNETICI MEDIANTE L'EFFETTO FARADAY

1. - Introduzione

E' noto che in molte ricerche di fisica nucleare e dello stato solido si impiegano alti campi magnetici, dell'ordine di diverse decine di Wb/m^2 . Campi così alti non si possono in pratica generare con magneti statici, perchè la potenza elettrica richiesta sarebbe dell'ordine di qualche decina di MW e si andrebbe incontro a grosse difficoltà tecniche specie per l'impianto di raffreddamento del magnete e l'ancoraggio meccanico delle bobine. Si ricorre perciò comunemente a campi magnetici pulsati, in quanto le esperienze che richiedono l'impiego di campi molto intensi, si possono condurre anche disponendo di campi intermittenti di breve durata.

E' questo il caso dello studio dell'effetto Hall, degli effetti magneto-termo-elettrici e di quelli di magnetostrizione, dell'effetto de Haas-Van Alphen e delle misure delle risonanze di ciclotrone, delle magneto-resistenze, della saturazione dell'Effetto Faraday ecc.

La maggiore difficoltà della misura del campo magnetico transitorio rispetto a quella di un campo statico, e la presenza di correnti parassite nei provini su cui si fanno le misure sono spesso cause evidenti di imprecisione in questo tipo di ricerche.

Purtroppo però allo stato attuale della tecnica non vi sono altri sistemi economicamente accettabili per produrre alti

(x) - Attualmente presso la Soc. Laben di Milano.

(x) campi magnetici ed effettuare ricerche di questo tipo.

Oltre che nelle esperienze di fisica dello stato solido citate, gli alti campi magnetici sono utili nella fisica del plasma e nelle ricerche di fisica nucleare come nella tecnica di rivelazione mediante "emulsioni nucleari".

Come è noto⁽¹⁾ queste ultime sono costituite da particolari emulsioni che rimangono impressionate per la ionizzazione provocata dalla particella carica di passaggio: è possibile vedere la traiettoria di particelle aventi carica elettrica (protoni, elettroni, mesoni, ecc.).

Il valore del campo magnetico per permettere di valutare il momento della particella, con la precisione del 10% per cui vi è cioè un rapporto 10 fra la deflessione magnetica e le deviazioni subite per le forze coulombiane locali esercitate dai nuclei presenti nelle emulsioni è⁽²⁾

(1)

$$H = \frac{10}{K, \beta v l}$$

dove H è espresso in Asp/m, $\beta = v/c$ è il rapporto fra la velocità della particella e quella della luce e l è la lunghezza del tratto di traiettoria in m. K costante di diffusione coulombiana (in pratica di valori compresi tra 10^{-2} e 10^{-1} m).

I campi magnetici pulsati si generano di preferenza scaricando un banco di condensatori di energia conveniente (da qualche decina a qualche migliaio di K Joule) su una bobina di poche spire, costituente il magnete, o direttamente o tramite un trasformatore di impulsi (in ferro o in aria) di costruzione speciale.⁽³⁾

La scelta di un sistema o dell'altro dipende dal tempo di scarica desiderato e dalle caratteristiche del banco di condensatori.

Negli impianti già costruiti la durata della scarica varia da qualche μ sec a qualche msec e il volume racchiuso dal magnete da qualche cm^3 fino a $2 \cdot 3 \text{ dm}^3$. I campi da 10 Wb/m^2 a 30 Wb/m^2 .

(x) - Allo stato attuale della tecnica i magneti superconduttori ecriogenici possono essere impiegati utilmente per ottenere campi massimi compresi tra 5 e 10 Wb/m^2 .

2. - La misura dei campi magnetici pulsati

I metodi che si impiegano per la misura dei campi magnetici pulsati sono in generale i seguenti^(4,5):

- a) Misura con bobina di pickup e integratore
- b) Misura con sonda di Hall
- c) Misura mediante l'effetto Faraday.

La precisione che si raggiunge è inferiore a quella che si può realizzare nella misura di campi statici (fino a una parte su 10^6 con i magnetometri N.M.R.).

La precisione richiesta in questo genere di misure è generalmente dell'ordine dell'1-2% e in generale uno qualunque dei metodi citati consente di raggiungere precisioni di tale ordine.

Per scariche molto rapide però (dell'ordine di pochi μ sec), i metodi a) e b) possono presentare qualche difficoltà, a causa della presenza di tensioni indotte nel caso di misure eseguite con sonda di Hall e per le difficoltà pratiche che presenta l'integrazione di forme d'onde molto rapide. L'effetto Faraday sembra invece adatto anche alla misura di campi magnetici molto rapidi, dato che l'inerzia del fenomeno è generalmente inferiore a 10^{-8} sec.

Il metodo di misura dei campi magnetici pulsati mediante l'effetto Faraday verrà descritto in dettaglio nei paragrafi che seguono.

3. - L'effetto Faraday

E' noto che un raggio di luce, polarizzata linearmente, che attraversa un mezzo materiale immerso in un campo magnetico, subisce una rotazione del proprio piano di polarizzazione proporzionale all'integrale del campo magnetico lungo il percorso e del raggio (effetto Faraday).

$$(2) \quad \theta = V \int \vec{B} \times d\vec{l}$$

La costante V (costante di Verdet) dipende, oltre che dalla natura del mezzo, dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda della luce impiegata.

La relazione (2) è esatta per le sostanze diamagnetiche, mentre è solo approssimata per le sostanze paramagnetiche, per le quali la dipendenza della rotazione θ dall'intensità del campo magnetico è lineare solo in prima approssimazione. I termini di grado superiori al primo sono però generalmente trascurabili a temperatura ambiente e per campi magnetici inferiori a qualche centinaio di Wb/m^2 .

A bassa temperatura la relazione (2) deve essere sostituita con una relazione più complicata, anche per campi magnetici di qualche Wb/m^2 . La dipendenza della costante di Verdet dall'intensità del campo magnetico per le sostanze paramagnetiche dà luogo ad un fenomeno di saturazione dell'effetto Faraday rilevabile praticamente però solo a temperature molto basse, dell'ordine di qualche $^\circ\text{K}$.

Quando il campo magnetico è uniforme e naturalmente sono trascurabili gli effetti di saturazione, la relazione (2) può essere sostituita con la (3)

$$(3) \quad \theta = V l B_e$$

dove B_e è la componente di B lungo la direzione di propagazione della luce.

Una teoria soddisfacente dell'effetto Faraday esiste solo per i gas in cui gli atomi e le molecole possono considerarsi come entità se stanti; l'estensione ai solidi di tale teoria è possibile solo in via approssimata⁽⁶⁾.

Il fenomeno è stato oggetto di trattazioni classiche e quantistiche (Rosenfeld, Serber, Ladenbury, Van Uleck⁽⁷⁾ e altri).

In termini di meccanica ondulatoria classica, la rotazione del piano di polarizzazione della luce incidente dipende dall'azione esplicita del campo magnetico sul moto impresso agli elettroni del campo elettrico di un'onda luminosa polarizzata circolarmente.

Da tale azione deriva una accelerazione o una decelerazione del moto degli elettroni, secondo che la polarizzazione sia sinistra o destra rispetto all'orientazione del momento orbitale dell'elettrone che dipende dalla presenza del campo magnetico.⁽¹⁰⁾ In conseguenza di ciò, anche un mezzo naturalmente non birifrangente, presenta indici di rifrazione diversi per la luce polarizzata circolarmente sinistra (us) o destra (ud) quando è sottoposto a un campo magnetico non ortogonale alla direzione della luce.

Si perviene⁽¹⁰⁾ alla seguente espressione approssimata della differenza fra i due indici di rifrazione

$$(4) \quad n_d - n_s \approx \frac{(n^2 - 1)^2}{n} \frac{E_0 \mu_0 B \omega}{N e}$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo in assenza di campo magnetico e alla lunghezza d'onda della luce impiegata, ω la

pulsazione dell'onda incidente, N il numero di oscillatori elettronici per unità di volume e B l'intensità del vettore spostamento magnetico impresso.

La rotazione θ che subisce il piano di polarizzazione di un'onda polarizzata linearmente attraverso un tratto l di una sostanza birifrangente (naturale o artificiale) è pari a metà della differenza di fase $\Delta\varphi$ impressa ai vettori campo elettrico di due onde polarizzate circolarmente sinistra e destra, nelle quali si può decomporre l'onda polarizzata linearmente.

Poichè tale differenza di fase è legata alla differenza di cammino ottico dalla relazione

$$(5) \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_d - n_s) l$$

si deduce per la rotazione del piano di polarizzazione la espressione

$$(6) \quad \theta = \left[\pi \frac{(n^2 - 1)^2}{n} \frac{\omega \mu_0 \epsilon_0}{\lambda N e} \right] B l$$

formalmente identica alla legge di Verdet.

La relazione (6) può dare utili informazioni di carattere qualitativo sulla natura della costante di Verdet.

Si può dedurre ad esempio che tale costante è funzione della lunghezza d'onda della luce impiegata e cresce al diminuire di λ . Questa circostanza è generalmente confermata dai risultati sperimentali. Per esempio nel caso del CS_2 (8) a temperatura ambiente la costante di Verdet passa dal valore $V=6.85$ gradi/(Wb/m² x cm) per $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ a $V=64.2$ gradi/(Wb/m² x cm) per $\lambda = 2700 \text{ \AA}$.

Dalla (6) si può dedurre ancora la dipendenza di V dalla temperatura, espressa dal termine N che è funzione crescente della temperatura. I risultati sperimentali confermano questa circostanza come può dedursi dalla tabella I, nella quale sono riportati alcuni valori della costante di Verdet per il CS_2 e per l'acqua che sono le due sostanze di impiego più comune.

Il solfuro di carbonio è una sostanza particolarmente adatta per la realizzazione di sonde per dispositivi di misura (8) (9) Esso presenta un'ottima trasparenza in tutto lo spettro visibile (fattore di assorbimento inferiore a $2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$) e buona trasparenza anche nell'ultravioletto remoto (270 \AA).

La costante di Verdet è sufficientemente elevata ($V=7.16$ gradi/Wb/m² x cm a 18°C e per $\lambda = 5893 \text{ \AA}$).

(x)
TABELLA I

Mezzo ottico	Lunghezza d'onda (\AA)	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Costante Verdet gradi/(Wb/m ² xcm)
CS ₂	5893	35°	6.85
		60°	6.31
H ₂ O	5893	0°	2.185
		80°	2.120

Il solo inconveniente che presenta questa sostanza è, trattandosi di un liquido, la necessità di contenerlo in un recipiente a pareti lavorate otticamente.

Per questa ragione il CS₂ sembra particolarmente indicato per i dispositivi di misura che operano con radiazioni ultraviolette, dove la sua buona trasparenza lo rende praticamente insostituibile.

Per l'impiego con la luce del sodio sembra più conveniente il flint pesante, che presenta a tale lunghezza d'onda una costante di Verdet più alta ($V=10,13$ gradi/Wb/m²xcm a 19° e $\lambda = 5893 \text{\AA}$)⁽⁺⁾ e ottima trasparenza (>99.9% per sonde di 1 cm di lunghezza), non richiede ovviamente contenitore e permette di realizzare una riflessione multipla del fascio di luce entro la sonda con conseguente aumento di sensibilità del metodo.

(x) - Valori tratti da: "Handbook of Physics and Chemistry" (1961)

(+) - Questo valore si riferisce alla fusione SFA della Jender Gloswerk Schatt.

Come si è ricordato precedentemente l'effetto Faraday è un fenomeno lineare per tutte le sostanze con ottima approssimazione solo per campi magnetici non troppo alti e per temperature non troppo basse (7, 8, 12).

Nel caso di sostanze paramagnetiche, che, come è noto, sono le sole che presentino un fenomeno di saturazione (12), le i limiti di linearità dipendono naturalmente dalla natura del mezzo. Bequerel e de Hass hanno osservato che per sali di terre rare non si avevano divergenze dalla linearità superiori al 3% quando risultava $\frac{BH}{kT} \leq 0.3$ dove H è il campo magnetico, K la costante di Boltzmann, T la temperatura assoluta e B il magnetone di Bohr (12).

Per questa ragione a temperatura ambiente sarà impossibile osservare la non linearità entro il 3% dell'effetto Faraday con campi inferiori a 100 Wb/m^2 . Al contrario a temperatura dell'ordine di 4.2°K sarà sufficiente un valore dello spostamento magnetico di circa 2 Wb/m^2 per osservare una sensibile divergenza della linearità.

Un ultimo parametro importante nell'applicazione dell'effetto Faraday alla misura di campi magnetici pulsati è costituito dall'inerzia del fenomeno.

Il ritardo della rotazione rispetto all'applicazione del campo magnetico è generalmente inferiore a $5 \mu\text{sec}$ (11) ed è quindi trascurabile rispetto alla durata dei campi pulsati e più rapidi ($\sim 10 \mu\text{sec}$).

4.2- Applicazione dell'effetto Faraday alla misura di campi magnetici.

Un dispositivo per la misura di campi magnetici, statici o transitori, è nelle sue linee generali facile da concepire.

Infatti dalla misura della rotazione del piano di polarizzazione di un fascio di luce, che abbia attraversato una sonda di lunghezza l e costituita con un materiale avente costante di Verdet V, si può risalire al valore incognito del campo magnetico B nel quale è immersa la sonda; se si suppone il campo magnetico parallelo alla dimensione della luce e uniforme su tutta la lunghezza della sonda, si ha

$$\theta = VBl \quad (7)$$

I procedimenti di misura differiscono soltanto nel metodo impiegato nella determinazione della rotazione θ .

Nel caso di campi magnetici statici questa determinazione si può eseguire mediante uno qualunque dei procedimenti di uso corrente in polarimetria (15) (13).

Nel caso dei campi magnetici pulsati interessa determinare il valore massimo della rotazione θ , correlato mediante la (7) al valore massimo del campo magnetico.

G. Raoult (1947)⁽¹⁵⁾ ha ricondotto questa misura ad una misura statica impiegando una sorgente di luce pulsata, sincronizzata con il valore massimo del campo magnetico.

Questo metodo è adatto solo quando il campo pulsato si ripete con una frequenza non troppo bassa (per esempio 50c/sec come un dispositivo di Raoult) e quando il campo stesso si mantiene al suo valore di picco, con approssimazione adeguata, per un tempo non inferiore a circa 1 μ -sec.

J. Maleky (e altri, 1957)⁽¹⁴⁾ ha ideato un procedimento per la misura della rotazione massima in condizioni transitorie, mediante registrazione oscillografica.

Il campo magnetico misurato da Maleky era di $\sim 10 \text{ Wb/m}^2$ e come sostanza ottica furono impiegati il CS_2 e il CCl_4 . La rotazione massima del piano di planizzazione, ottenuta con il CS_2 fu di $\sim 320^\circ$.

Nelle prove sperimentali, descritte nelle pagine seguenti, si è impiegato un procedimento che può essere considerato come direttamente derivato da quello di Maleky.

Si è inoltre constatata la possibilità di impiegare un metodo di rivelazione numerico, con il quale il valore del campo magnetico viene fornito direttamente e con precisione e sensibilità soddisfacenti, quando il campo stesso sia dell'ordine di $20 \div 30 \text{ Wb/m}^2$ e venga generato in un volume di qualche centinaio di cm^3 , potendosi in questo caso adoperare sonde di lunghezza relativamente grande ($7 \div 10 \text{ cm}$).

Impiegando una sonda in flint pesante, di lunghezza 10 cm, e facendo passare la luce due volte nella stessa sonda (avanti e indietro fig.1) si ottiene una rotazione massima θ_M , per $B=30 \text{ Wb/m}^2$

$$\theta_M = 2 \cdot 1 \text{ VB} = 6080^\circ$$

Adottando lo schema ottico di fig.2, con due fotomoltiplicatori sui quali viene inviata metà della luce che emerge dalla sonda, dopo averla fatta passare attraverso due diversi Polaroids, con i piani di trasmissione sfasati di 45° , si possono rilevare, attraverso la successione di massimi e minimi dei segnali raccolti sulle placche di tali fotomoltiplicatori, frazioni della rotazione totale pari a 90° .

I circuiti di rivelazione conterranno due formatori di impulsi, pilotati dai segnali raccolti sulle placche dei fototubi e capaci di dare un impulso in corrispondenza ad ogni

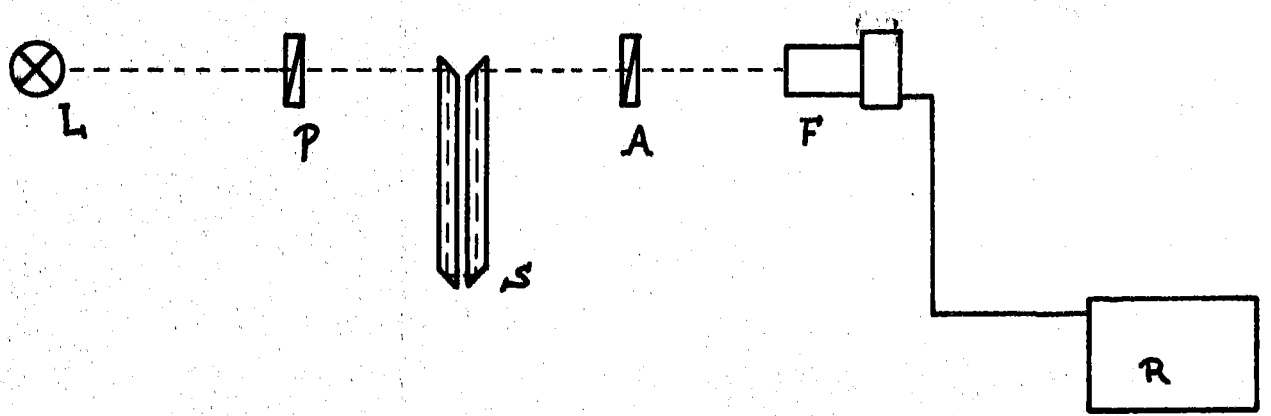


Fig. 1

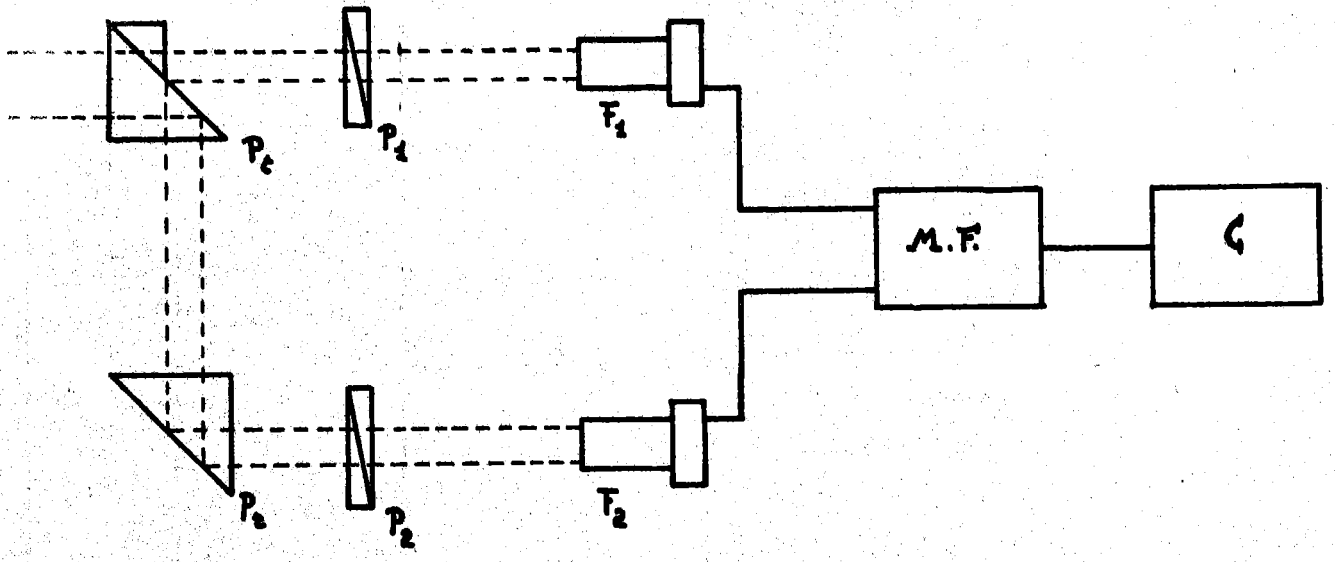


Fig. 2

massimo di detti segnali, un miscelatore, per sommare i due treni di impulsi così ottenuti e un contatore elettronico.

La sensibilità di questo metodo, con il valore di θ_M dato dalla (7) risulta

$$(9) \quad \sigma = \frac{90}{\theta_M} = 14.5\%$$

e il potere risolutivo è dato da

$$(10) \quad S = \frac{B}{N} = 0.45 \text{ Wb/m}^2$$

dove $N = \theta_M/90 = 68$ è il numero di impulsi che si ottiene all'uscita del miscelatore.

5. - Dispositivo sperimentale

Il metodo di misura di campi magnetici che ora descriveremo è derivato concettualmente come già abbiamo detto da quello sviluppato da Malecky.

Le innovazioni introdotte riguardano la scelta della sostanza ottica e il dispositivo ottico.

Le misure preliminari sono state eseguite su un piccolo magnete pulsato costituito da una bobina di 220 spire (induttanza 0.75 mH) sulla quale si scaricava un banco di condensatori da 3 KJ (capacità 2160 μ F).

Si è ottenuto un campo magnetico massimo di circa 2.4 Wb/m² della durata di msec dedotto analiticamente e successivamente misurato con una bobina e integratore elettronico).

In fig. 3 è rappresentato il dispositivo sperimentale e in fig. 4 l'andamento della corrente nella bobina.

Le misure mediante l'effetto Faraday sono state eseguite prima con una sonda semplice (fig.5) e successivamente con una sonda duplice (fig.6).

La lunghezza della sonda semplice (in flint pesante SF4) era di 10 cm.

La luce emergente dalla sonda viene divisa in due fasci parziali mediante un prisma a tetto. Ciascun fascio viene fatto passare attraverso un polaroid analizzatore e quindi inviato sul fotocatodo di un fotomoltiplicatore RCA 1617.

All'uscita di un fotomoltiplicatore si ottiene il segnale riportato in fig.7.

I due polaroids analizzatori sono sfasati (di 90°) e dei segnali raccolti sulle placche dei due fototubi viene fatta la differenza mediante un amplificatore bilanciato. Il segnale differenza è riportato in fig.8.

La rotazione massima del piano di polarizzazione è data, con i simboli di fig.8 e da (14)

(11)
$$\theta_M = \pi + \arcsin \sqrt{\frac{h}{hM}} = 215^{\circ}40'$$
 (11)

Il campo magnetico mediato sulla lunghezza della sonda (l=10 cm) è quindi

(12)
$$\overline{B_M} = \frac{\theta_M}{eV} = 213 \text{ Wb/m}^2$$
 (12)

La sonda duplice impiegata nelle misure successive aveva una lunghezza di 15+15 cm. I segnali ottenuti all'uscita dei due fotomoltiplicatori sono riportati in fig.9 e la loro differenza in fig. 10.

La rotazione massima è risultata in questo caso, con i simboli di fig. 10

(13)
$$\theta_M = \frac{3}{2} \pi + \arcsin \sqrt{\frac{h}{hM}} = 520^{\circ}$$
 (13)

e l'induzione magnetica mediata sulla lunghezza della sonda

(14)
$$B_M = 1.71 \text{ Wb/m}^2 (+)$$
 (14)

Si osservi che in questo caso, i due analizzatori sono sfasati di 90°, a differenza di quanto proposto per il dispositivo di misura di tipo numerico.

In questo caso infatti, l'introduzione di due fotomoltiplicatori operanti in opposizione ha solo lo scopo di attenuare gli effetti delle variazioni accidentali di flusso luminoso emesso dalla lampada.

(+) - I valori (12) e (14) del campo magnetico non discorrono fra loro e con il valore di 2.4 Wb/m² dedotto analiticamente, perchè quest'ultimo rappresenta il valore massimo al centro del magnete e i valori (12) e (14) sono mediati su due lunghezze assiali diverse.

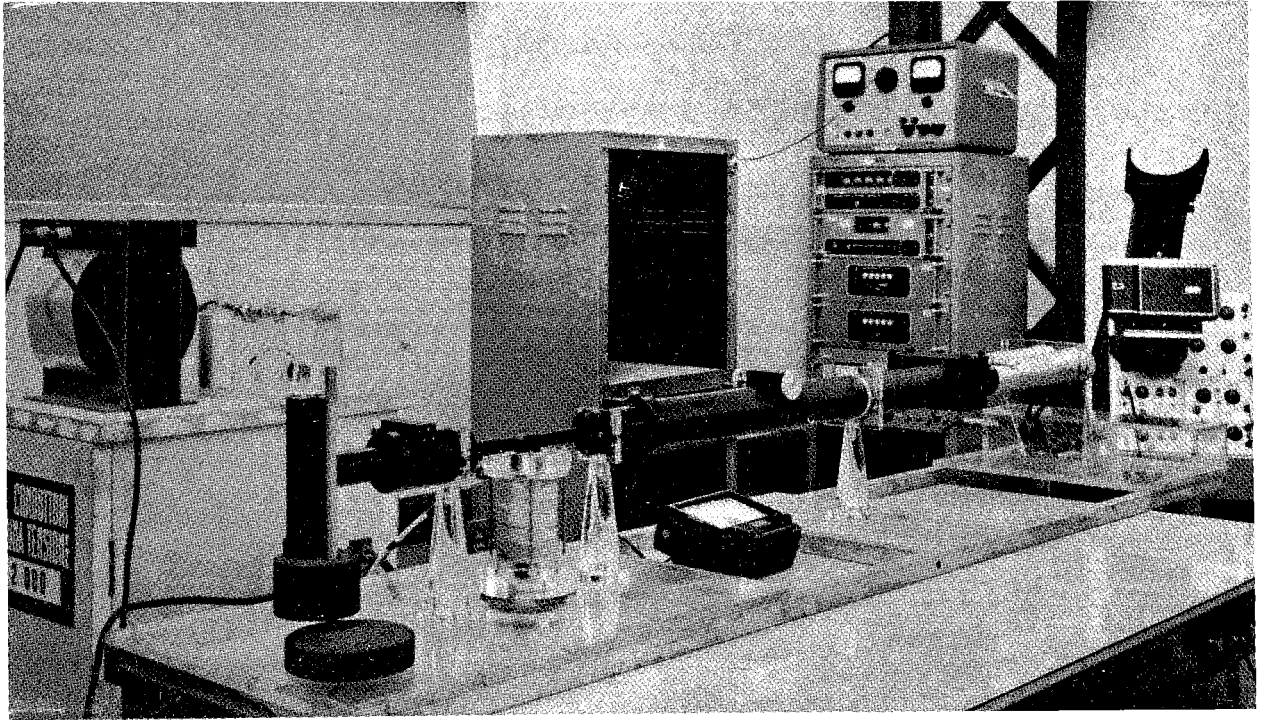


FIG. 3

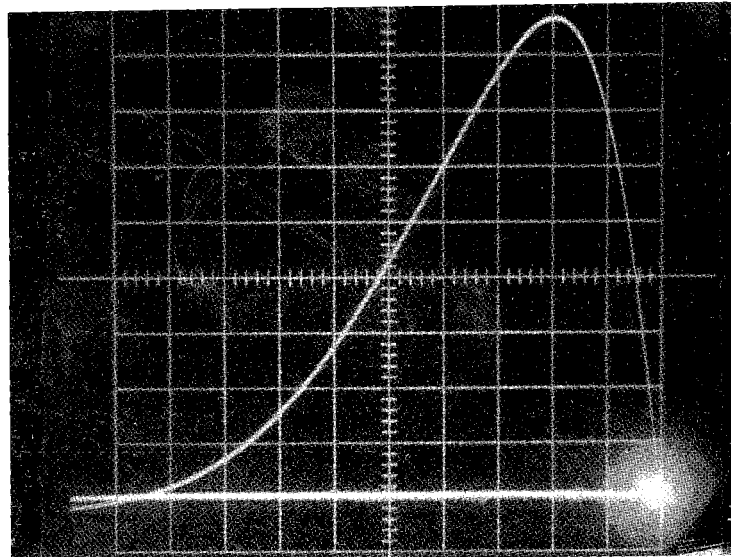


FIG. 4

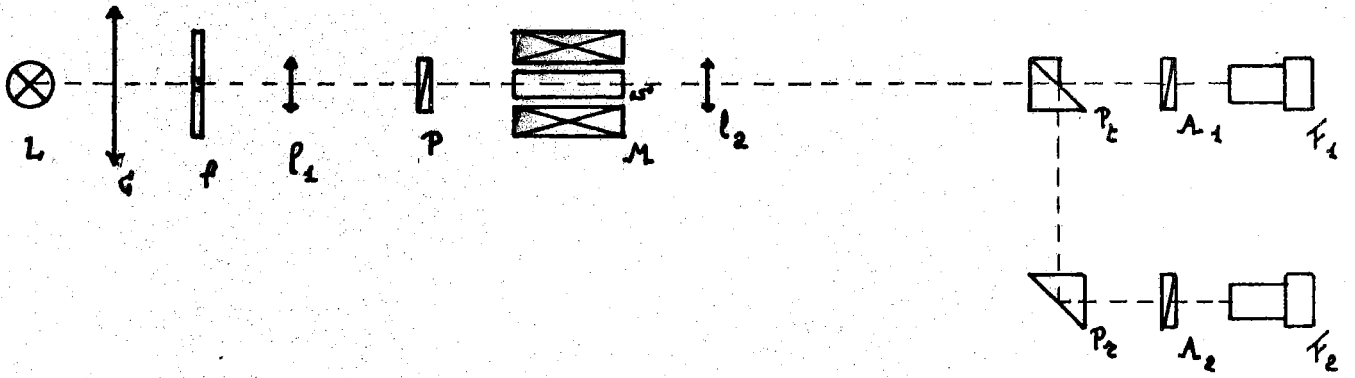


Fig. 5

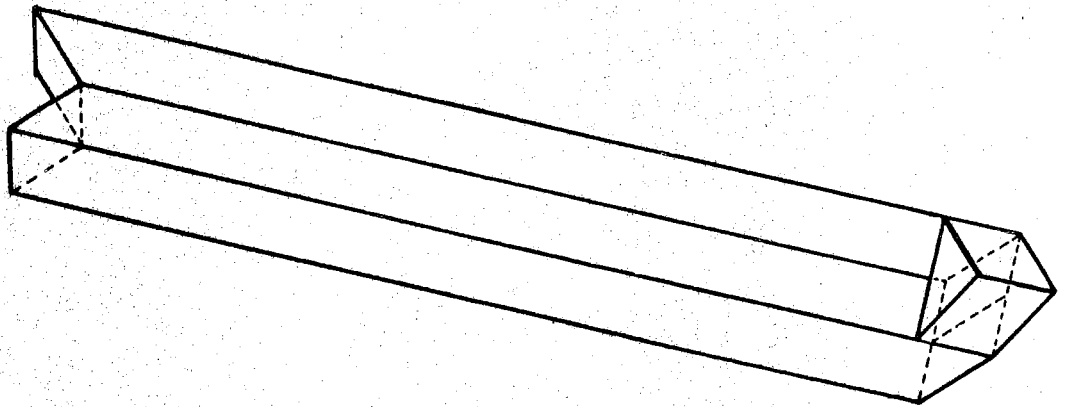


Fig. 6

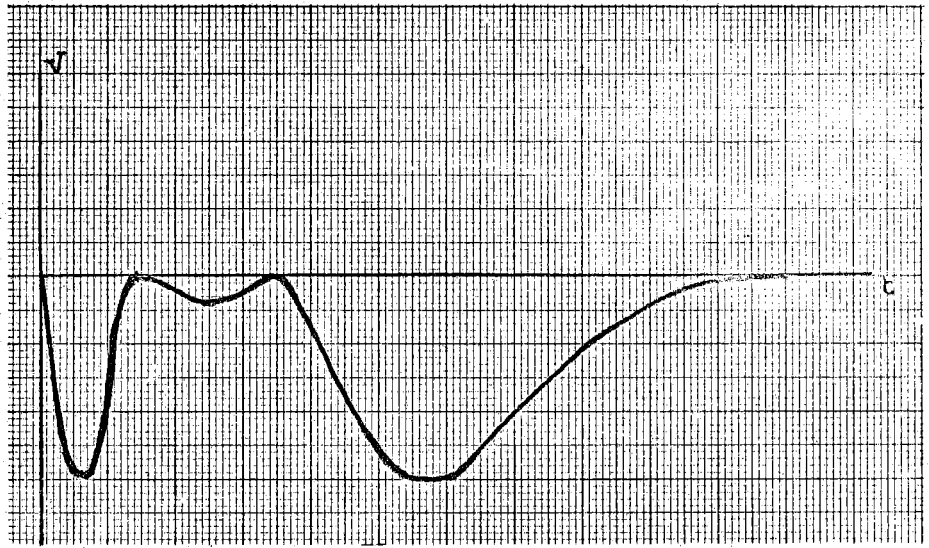


Fig. 7

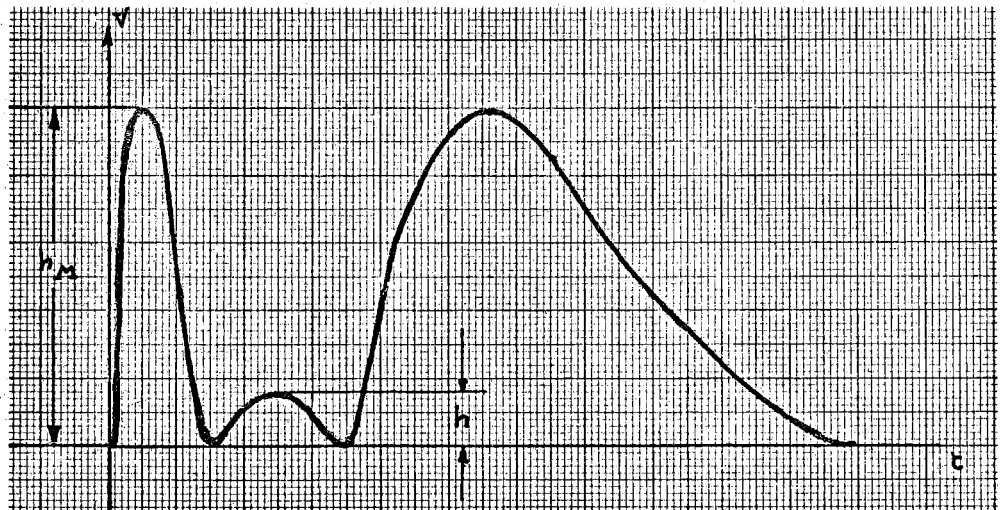


Fig. 8

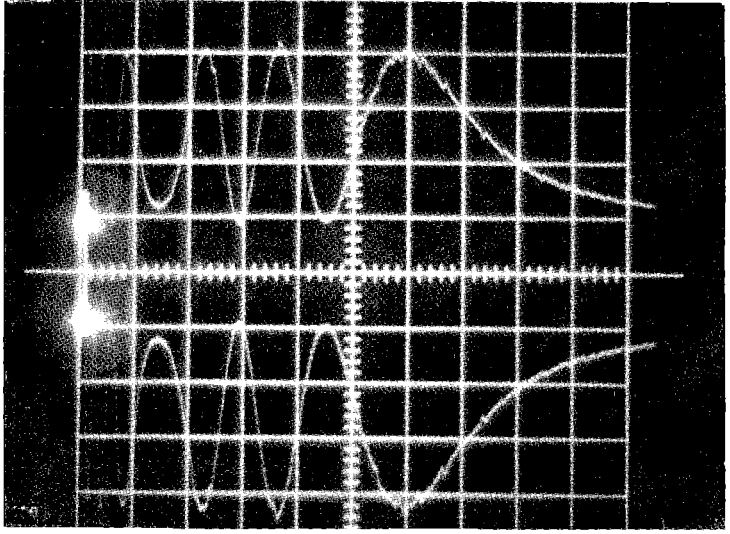


FIG. 9

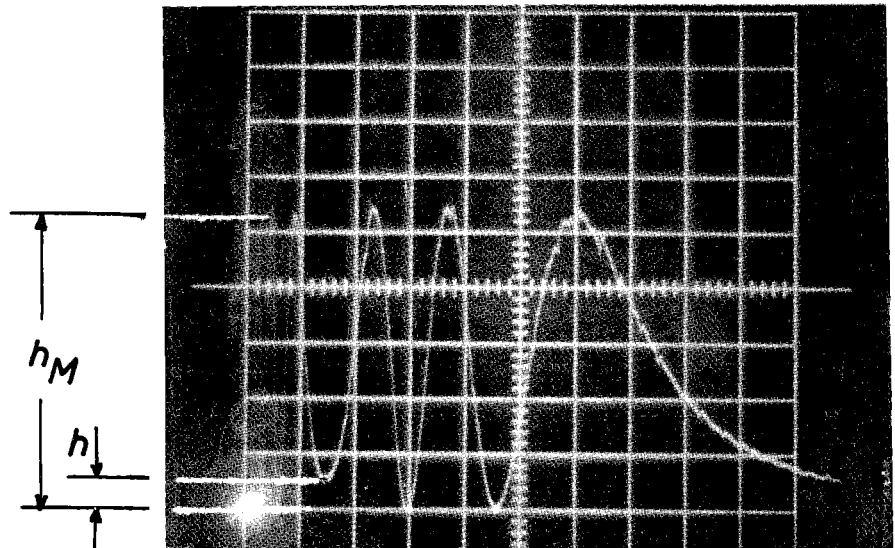


FIG. 10

6. - Discussione del metodo

L'impiego del flint pesante, come sostanza ottica, sembra particolarmente raccomandabile. Non soltanto perchè ha una costante di Verdet più elevata, il che permette di aumentare la precisione delle misure del 30% a parità di tutte le altre condizioni. L'impiego di una sonda in vetro infatti, oltre ad eliminare il problema delle pareti del contenitore, permette di risolvere in modo particolarmente semplice il problema della riflessione duplice del fascio di luce entro la sonda.

L'impiego di una sonda duplice è ovviamente vantaggioso ai fini della sensibilità del metodo, perchè permette di avere rotazioni doppie e parità di lunghezza assiale del provino.

L'effetto sulla precisione delle misure può essere un po' meno sensibile, perchè la necessità di adoperare una sonda con una sezione trasversale più estesa, fa sì che siano maggiormente sentiti gli effetti della disuniformità radiale del campo magnetico.

Il problema della riflessione del fascio di luce dentro la sonda comporta qualche difficoltà, perchè si lavora con luce polarizzata linearmente che ha nel tempo una orientazione variabile rispetto al piano di incidenza relativo alle superfici di riflessione. (x)

E' noto⁽⁸⁾ che le due componenti del raggio di luce, polarizzate l'una sul piano di incidenza e l'altra nel piano normale, vengono riflesse con una differenza di fase che dipende dall'angolo di incidenza e dall'indice di rifrazione del mezzo. In conseguenza di ciò un raggio di luce polarizzato secondo una giacitura arbitraria, acquista, dopo una riflessione totale, una polarizzazione ellittica. Questo fenomeno se non compensato falserebbe le misure eseguite mediante l'effetto Faraday. Per questa ragione si è impiegato un tipo di sonda duplice compensata (fig. 11) nel quale si sono fatte subire al fascio di luce 4 riflessioni totali (invece di due) scelte in modo che le componenti di polarizzazione parallela e normale al piano di incidenza si scambiassero le funzioni in ogni coppia di superficie riflettenti.

In questo modo lo spostamento fra tali componenti risulta perfettamente compensato e la luce emergente dalla sonda è in ogni istante tutta polarizzata linearmente.

(x) - Dato che la riflessione si effettua a metà del percorso ottico del fascio di luce, l'orientazione del piano di polarizzazione varia nel tempo proporzionalmente all'intensità del campo magnetico pulsato.

Per quanto riguarda il dispositivo di rivelazione, si è osservato in pratica che l'impiego di due fotomoltiplicatori, operanti in un circuito differenziale, permetterà di lavorare con sorgenti di luce anche non eccessivamente stabilizzate.

7. - Conclusioni

Le prove sperimentali descritte nei paragrafi precedenti dimostrano la possibilità di realizzare uno strumento per la misura su base digitale di alti campi pulsati mediante l'effetto Faraday.

La sensibilità delle misure è proporzionale al valore del campo magnetico da misurare e il potere risolutivo è dell'ordine di $0,22 \text{ Wb/m}^2$ per impulso.

L'inconveniente del metodo consiste nel fatto che il valore del campo magnetico misurato risulta mediato in uno spazio piuttosto grande.

Comunque dal valor medio del campo lungo la sonda si può risalire al valore massimo nel punto medio dell'asse del magnete o per via analitica o determinando una volta per tutte l'andamento del campo lungo l'asse della bobina.

La precisione delle misure che si possono eseguire con il metodo descritto è dello stesso ordine della sensibilità, purché si conosca la temperatura della sonda durante la misura e la legge di variazione della costante di Verdet con la temperatura stessa.

8. - Ringraziamenti

Ringraziamo il p.i. R. Bruzese Gargia che ha curato la realizzazione dell'apparecchiatura sperimentale.

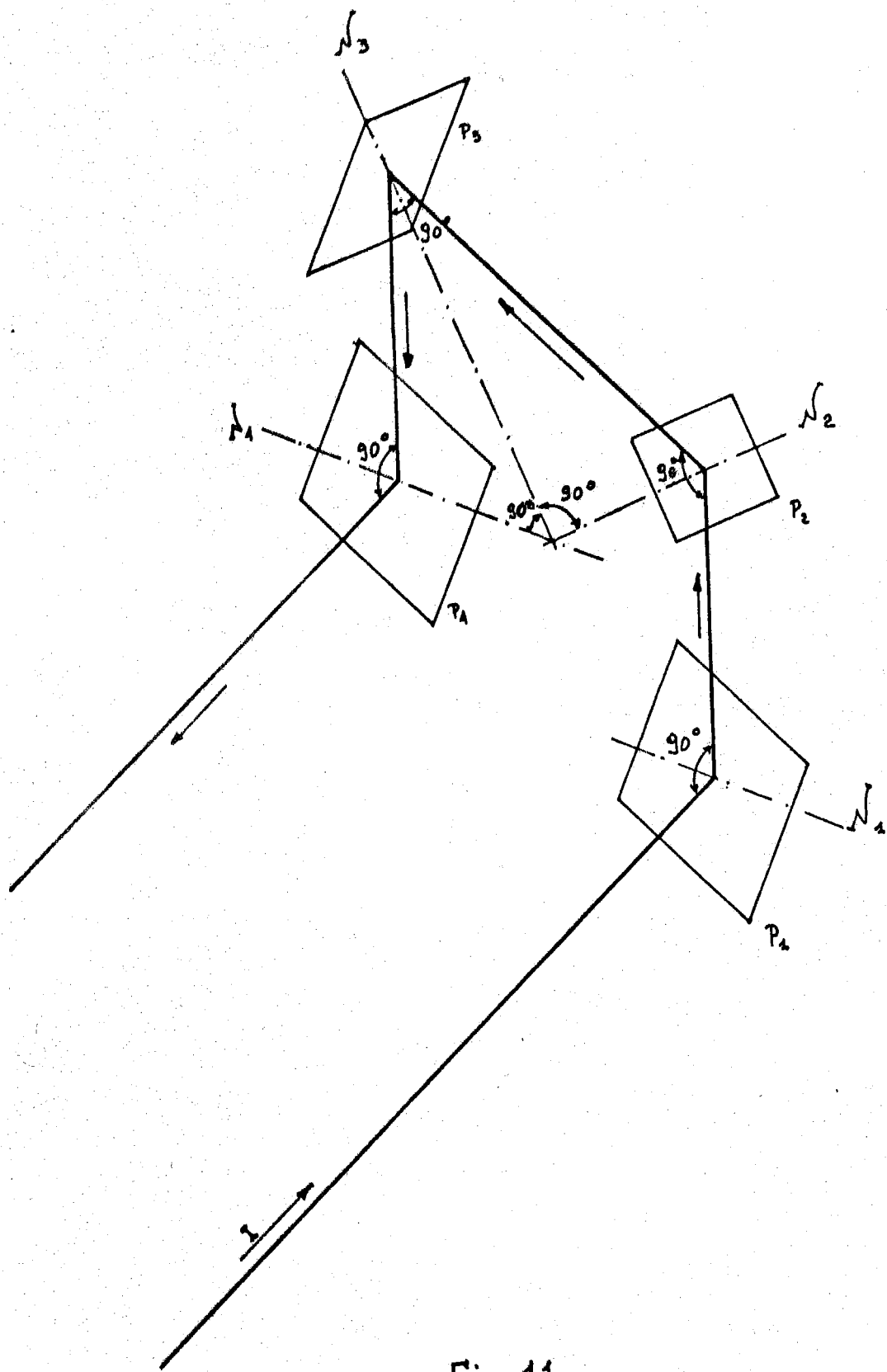


Fig. 11

Bibliografia

- 1) P. Demers: Ionographie, les Emulsion Nucleaires (Les Presses Universitaire, Montreal, 1958)
- 2) C.F. Powell, P.H. Fowler and D.H. Perkins: The Study of Elementary Particles by the Photographie Method (Pergamon Press, London, 1959)
- 3) H.P. Furth: Pulsed magnet - Proc. of the International Conference of High Magnetic Fields (T. Willey and Sous, New York, 1961), pag. 235
- 4) P. Grivet: High Field Magnetometry - Proc. of the International Conference of High Magnetic Fields (T. Willey and Sous, New York, 1961) pag. 54
- 5) R. Gabillard: Mesure Absolue de Champs Magnetiques en Regime Dynamics - CERN PS/RGb 9 (1957)
- 6) Schutz: Handbuch der Experimental Physik, XII - 1, Magneto Optik
- 7) J.H. Van Vleck: The Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities (Oxford University Press, Oxford, 1959)
- 8) C.L. Andrews: Optics of the Electromagnetic Spectrum (Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1960)
- 9) De Malleman: Rotatory Power of CS₂ - Compt, rend. 236, 648 (1953)
- 10) B. Rossi: Optics (Addison - Werley, Reading, 1957)
- 11) International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology (McGraw Hill, New York, 1929) Vol. VI, pag. 434
- 12) J. Becquerel and W.J. De Haas Z. Physik 52, 678 (1929); Z. Physik 57, 11 (1929)
- 13) F. Hock: Use of the Faraday Effect for the Measurement of Magnetic Fields - Z. angew. Physik 6, 151 (1954)
- 14) J. Malecky, M. Surma and J. Gibalewicz: Measurement of the Intensity of Transient Magnetic Fields by the F.E. - Acta Phys. Polon. 16, 151 (1954)
- 15) G. Raoult: Production of Intense Magnetic Fields by Impulses. Application to Phenomena of Rotary Polarization and Magnetic Birifrangence - Ann. Phys. Paris 4, 369 (1949)
- 16) J. Becquerel and W.J. De Haas - Leiden Communications 20, Suppl. 74a, pag.1