

L'amplificatore di Fermi

Francesco Guerra¹ e Nadia Robotti²

....

¹ *Dipartimento di Fisica
Università di Roma "La Sapienza"
& Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Roma*

² *Dipartimento di Fisica
Università di Genova
& Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Genova*

^{1,2} *Centro Fermi, Roma*

*Congresso della Società Italiana di Fisica,
Roma, settembre 2015*

Enrico Fermi scopre che i neutroni possono indurre radioattività artificiale sull'alluminio il 20 marzo 1934, intorno alle due del pomeriggio, dopo una nottata febbrile dedicata alla messa a punto finale del contatore e dell'amplificatore, e a ripetute misure di fondo. La sorgente radon-berillio gli era stata fornita in mattinata.

Successivamente scopre anche la radioattività indotta sul fluoro. Questi risultati sono comunicati alla comunità scientifica con una lettera alla Ricerca Scientifica, datata 25 marzo 1934.

dell'ordine di 1 parte su 5000 parti, cioè di una molecola di acqua pesante su circa 5500 molecole di acqua normale.

Concentrazioni dello stesso ordine di grandezza sono state trovate in alcune delle citate celle per elettrolisi.

Dei particolari di questa esperienza e delle altre tuttora in corso verrà data dal Dr. Lucchi relazione sulla « Gazzetta Chimica Italiana ».

Prof. O. SCARPA

Laboratorio di Elettrochimica e di Chimica-Fisica
del R. Politecnico di Milano.

Radioattività indotta da bombardamento di neutroni

Desidero riferire in questa lettera sopra alcune esperienze destinate ad accertare se un bombardamento di neutroni non determini dei fenomeni di radioattività susseguente analoghi a quelli osservati dai coniugi Joliot con bombardamento di particelle α .

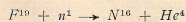
Il dispositivo che ho usato è il seguente: La sorgente di neutroni è costituita da un tubetto di vetro contenente polvere di berillio ed emanazione. Usando circa 50 millicurie di emanazione, che mi sono stati forniti dal prof. G. C. Trabacchi che qui desidero ringraziare vivissimamente, si possono così ottenere oltre 100.000 neutroni al secondo, misti naturalmente a una intensissima radiazione γ , che però non dà alcun disturbo per esperienze di questo genere. Dei cilindretti contenenti l'elemento in esame sono sottoposti per un tempo variabile da alcuni minuti ad alcune ore alle radiazioni di questa sorgente.

Essi vengono poi rapidamente disposti attorno ad un contatore a filo, la cui parete esterna è formata da una foglia d'alluminio di spessore di circa 0,2 mm, tale quindi da permettere l'ingresso di eventuali raggi β nel contatore. Fino ad ora l'esperienza ha dato esito positivo per due elementi:

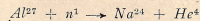
ALLUMINIO. — Un cilindretto di alluminio irradiato dai neutroni per un paio d'ore e posto successivamente attorno al contatore determina nei primi minuti un aumento assai considerevole degli impulsi, che crescono di 30 o 40 al minuto. L'effetto decresce col tempo riducendosi a metà in circa 12 minuti.

FLUORO. — Il fluoruro di calcio, irradiato per pochi minuti e portato poi assai rapidamente accanto al contatore determina nei primi momenti un aumento del numero degli impulsi. L'effetto si smorza rapidamente, riducendosi a metà in circa 10 secondi.

Una possibile interpretazione di questi fenomeni è la seguente. Il fluoro, bombardato coi neutroni, si disintegra emettendo particelle α . La reazione nucleare è probabilmente:



Si formerebbe così un azoto di peso 16 che, emettendo successivamente una particella β può trasformarsi in O^{16} . Una simile interpretazione potrebbe aversi per l'alluminio, conformemente alla possibile reazione nucleare:



Il Na^{24} così formato sarebbe un nuovo elemento radioattivo e si trasformerebbe in Ca^{24} con emissione di una particella β .

Se queste interpretazioni sono corrette, si avrebbe qui la formazione artificiale di elementi radioattivi che emettono normali particelle β , a differenza di quelli trovati dai Joliot che emettono invece positroni. In particolare nel caso dell'azoto si avrebbero due isotopi radioattivi: N^{15} , trovato dai Joliot, che emettendo un positrone si trasforma in C^{15} ; ed N^{16} che, emettendo un elettrone si trasforma in O^{16} .

Sono in corso esperienze per estendere l'esame ad altri elementi e per studiare meglio le particolarità del fenomeno.

Roma, 25 marzo 1934-XII.

ENRICO FERMI

Nei giorni successivi accerta la radioattività indotta in numerosi altri elementi. Progressivamente sono coinvolti nella ricerca anche Oscar D'Agostino, Edoardo Amaldi, Emilio Segrè, Franco Rasetti. I risultati di questa prima fase della ricerca sono riassunti in un lavoro pubblicato sulla prestigiosa rivista *Proceedings of the Royal Society* (London), inviato per la pubblicazione nel luglio 1934. Su circa 60 elementi provati, circa 40 mostrano radioattività indotta.

Dopo la ripresa estiva, anche Bruno Pontecorvo viene associato alle ricerche. Il 20

ottobre dello stesso anno Fermi fa la scoperta da lui considerata forse la più importante della sua vita. Filtrando i neutroni con strati di paraffina o di acqua, sostanze fortemente idrogenate che rallentano per urti i neutroni, si ha un enorme incremento della radioattività indotta in molti elementi pesanti.

In questo modo, la radioattività indotta da neutroni si apre ad importanti risvolti applicativi, per esempio per la produzione su larga scala di particolari nuclidi radioattivi da usare

per le cure mediche, oppure come traccianti per studiare le reazioni chimiche e le catene metaboliche.

Immediatamente, viene richiesto un brevetto di privativa industriale, prima in Italia, ma subito esteso alle nazioni più importanti, Francia, Inghilterra, Olanda, Germania, Stati Uniti, Canada.



REGISTRO 194 NUM. D'ORDINE 148

MINISTERO DELLE CORPORAZIONI

Ufficio della Proprietà Intellettuale

L'anno 1934, il giorno ventisei del mese di ottobre
alle ore 19,15 il Sig. Ing. Letterio Labocetta p. s. dei sigg.

Enrico Fermi, Edoardo Amaldi, cesar d'Agostino,
Bruno Pontecorvo, Franco Rasetti, Emilio Segre,
Giulio Cesare Ceracchi

ha presentato a me sottoscritto:

Roma

1. Domanda di attestato di Priv. Ind.

per un trovato avente per titolo:

Metodo per accrescere il rendimento dei
procedimenti per la produzione di radioattività
artificiale mediante il bombardamento
con neutroni.

2. Descrizione in triplo.

3. Disegno — tavol — in triplo

4. Lettera d'incarico

5. Vaglia N. 14 della Tassa pagata in L. 380 del 26.10.34 x11.

6. Marca da bollo da L. 5,00.

7.

8.

La domanda, la descrizione e i disegni sono stati firmati dal

Per la scoperta della radioattività artificiale indotta da neutroni, e degli effetti dei neutroni lenti, ad Enrico Fermi viene assegnato il premio Nobel per la Fisica nel 1938. Si tratta di un premio Nobel tutto italiano.

La scoperta di Fermi del marzo 1934 è sconcertante. Al riguardo è per esempio significativo quanto Otto Robert Frisch racconta molti anni dopo: “Io ricordo che la mia reazione e probabilmente anche di molti altri fu che quello di Fermi era un esperimento privo di senso, perchè i neutroni erano molto

meno numerosi delle particelle alfa” (Physics Today, 1967).

In realtà Fermi è capace di utilizzare tutti i più efficaci accorgimenti sperimentali, relativi a tutte le componenti della sua strumentazione, dalle sorgenti di neutroni, ai contatori Geiger-Müller, agli amplificatori, alla geometria dei campioni da irraggiare e su cui misurare la radioattività indotta. Inoltre è guidato dalla sua teoria del decadimento beta.

Il suo è un successo della volontà e dell'immaginazione creativa.

È possibile seguire con tutti i dettagli la fase della scoperta del marzo 1934, a causa dell'esistenza di un quaderno di laboratorio di Enrico Fermi, da noi localizzato in un posto imprevedibile: il fondo archivistico della Biblioteca dell'Istituto Tecnico per Geometri "Oscar D'Agostino" in Avellino (ora accorpato nell'Istituto Superiore "De Sanctis - D'Agostino").

ISTITUTO TECNICO PER GEOMETRI
"D. DI ACCOSTO"
AVELLINO

Scat. N. 3.B
Pac. N. 1.d
No. N. ②

De Technische- en Algemeene Winkhandel
H. S.T.A.M.
Plantage Middenlaan 100-101, Multigracht
AMSTERDAM - Telefoon 51371

Il quaderno di Fermi è rimasto per decenni tra le carte di Oscar D'Agostino, il radiochimico suo collaboratore, originario di Avellino. Dopo la scomparsa di D'Agostino, avvenuta nel 1975, un Istituto Tecnico di Avellino è stato intitolato al suo nome, e una Fondazione è stata costituita. La vedova, sig.ra Sofia Melograni, ha donato tutte le carte del marito alla Fondazione.

Il quaderno Irpino è stato utilizzato prima da Fermi, per 16 pagine numerate con cifre cerchiare, per alcuni calcoli relativi alla sua

teoria del decadimento beta. Viene calcolata la probabilità che un elettrone emesso dal nucleo sia catturato in un orbitale atomico, ottenendo un valore trascurabile. Ecco per esempio la pagina Qf15 di questo lato del quaderno

(15)

Termine 1s relativistico

$$\begin{cases} F = fr^s e^{-\lambda r} \\ G = r^s e^{-\lambda r} \end{cases} \quad s = \sqrt{1 - \gamma^2} - 1 \quad \gamma = 2/137$$

$$f = -\frac{s}{r}$$

$$\lambda = \frac{mc^2 \gamma^2}{Ze^2}$$

$$\tilde{\Psi} \Psi = \frac{(e\lambda)^{3+2s}}{4\pi \Gamma(3+2s)} r^{2s} e^{-2\lambda r}$$

Probabilità di transizione in cui la particella β viene legata in una orbita k

$$P = \frac{8\pi^3 g^2}{h^4} \left| \int v_m^* u_n d\tau \right|^2 \frac{p_0^2}{c} \tilde{\Psi}_3 \Psi_3$$

Trattando l'elettrone k non relativisticamente e assumendo che il neutrino emesso abbia energia quasi eguale risulta

$$P = \frac{2048\pi^{12} g^2 m^5 e^{14}}{c^3 h^4} Z^7 \left| \int v_m^* u_n d\tau \right|^2$$

$$P \sim 10^{-20} Z^7 \left| \quad \right|^2$$

Poi Fermi rovescia il quaderno e vi inizia a registrare, per 141 pagine numerate, tutte le sue operazioni per la messa a punto dei contatori e dell'amplificatore, le misure della radiazione di fondo, e le misure sui campioni irradiati. Vediamo qui la prima pagina del quaderno rovesciato

Contatore Al 3/10 (I) ~~V = 1240~~ batterie

t V = 12 batterie (impulsi div 2 scarse)

0 1096

10' 1495 399

18'15" 1803

terminato 100,
fianchi fondo

Contatore grosso di ottone, interamente terminato V = 1360 covv.
ora. 2 impulsi 1787

al minuto $14,9 \pm 0,3$

Stesso contatore e terminato V = 1320 covv.

50' impulsi 769

al minuto $15,4 \pm 0,5$

Contatore Al 3/10 parzialmente terminato V = 1220 covv

10' 9462

0' 9108

354

tot: V = 1240

10' 10011

0' 9527

484

Il quaderno è una miniera incredibile di informazioni, e permette una ricostruzione in tutti i dettagli della fase della scoperta, che finora era stata affidata alle descrizioni date da testimonianze orali, spesso contraddittorie, e comunque basate sui ricordi degli interessati, spesso soggetti a involontari aggiustamenti nel tempo.

Sul carattere e l'attendibilità delle ricostruzioni basate sulla memoria dei protagonisti, è importante ricordare quanto Edoardo Amaldi lucidamente osserva in una lettera a Emilio

Segrè del 5 luglio 1965, in un contesto in cui i due, all'epoca della elaborazione della biografia di Ettore Majorana da parte di Amaldi, si erano trovati in disaccordo a proposito della ricostruzione del noto asserito episodio in cui Majorana controlla se la tabella delle funzioni atomiche costruita da Fermi è corretta. Scrive Amaldi: *Ma anche per me sono ricordi buoni ma non sicuri nel senso che la mia mente (al pari della tua) li può avere rielaborati successivamente in maniera incosciente.*

Nella nostra monografia edita dalla SIF

Francesco Guerra - Nadia Robotti

Enrico Fermi e i suoi neutroni:

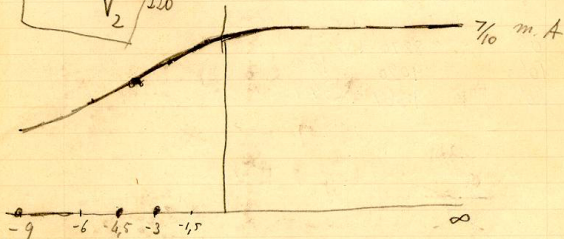
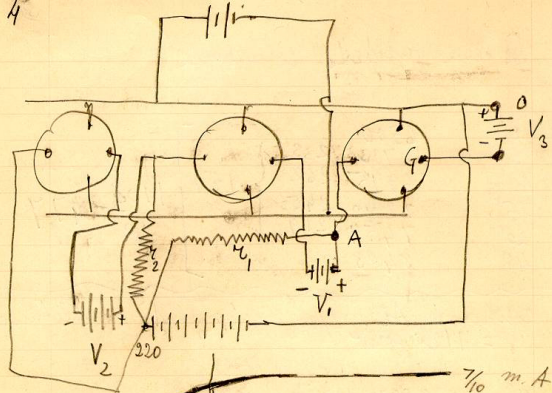
storia di una scoperta attraverso il ritrovamento del quaderno irpino

noi abbiamo riportato un'analisi dettagliata della strumentazione usata da Fermi, e delle procedure di laboratorio relative alla scoperta.

Vogliamo qui, in particolare, fare un rapido cenno all'amplificatore usato da Fermi per trasformare il segnale, prodotto dal passaggio di una particella beta nel contatore Geiger-Müller e corrispondente a una caduta di tensione, in una variazione di corrente nell'ultimo stadio capace di fare scattare un numeratore telefonico.

A pagina Q4, troviamo disegnato un circuito amplificatore a tre valvole (ripetuto a pagina Q6).

4



Condizioni di buon funzionamento

$$V_1 = 72$$

$$V_2 = 99$$

$$V_3 = 4,5 \quad I = 48 \text{ mA}$$

$$V_3 = 9 \quad I = 0 \text{ mA}$$

Si tratta di un circuito molto sofisticato, con accoppiamenti diretti tra i vari stadi realizzati con batterie, V_1 e V_2 , senza condensatori. Questo tipo di accoppiamento era stato propugnato per esempio da Gustav Ortner e Georg Stetter nel 1929, per l'amplificazione di segnali transienti, in una forma detta "Gleichstromverstärkung" ("amplificazione di corrente diretta"), che è *identica* a quella poi adottata da Fermi.

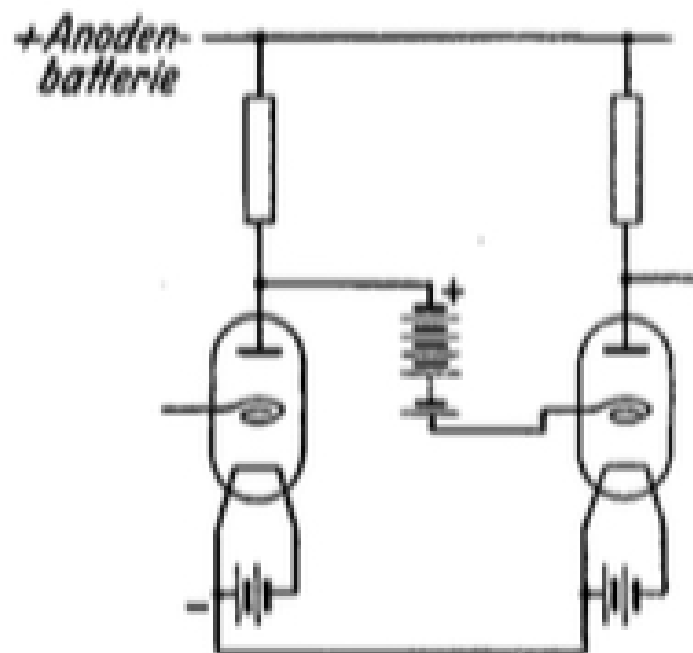


Fig. 10.
Gleichstromverstärkung.

All'epoca i circuiti amplificatori ad accoppiamento diretto erano anche utilizzati negli esperimenti di elettrofisiologia, dove era necessario amplificare senza distorsioni piccole tensioni di origine fisiologica.

Questi circuiti sono anche molto attuali, richiesti dagli appassionati di alta fedeltà, per la loro capacità di essere molto efficaci e fedeli nell'amplificazione delle basse frequenze.

Dai documenti contabili dell'Istituto di Fisica di Roma risulta che negli anni precedenti erano stati acquisiti alcuni "amplificatori a tre

stadi di bassa frequenza per cellule fotoelettriche". Fermi potrebbe avere adattato uno di questi come amplificatore del segnale dei suoi contatori.

La messa a punto di questi dispositivi è molto delicata. Dopo alcuni tentativi, Fermi ottiene "condizioni di buon funzionamento" per tensioni di accoppiamento diretto sulle griglie pari rispettivamente a $V_1 = 72 \text{ V}$ e $V_2 = 99 \text{ V}$. In queste condizioni, una variazione del segnale di ingresso sulla griglia G della prima valvola (a destra), da $V_3 = -9$

V a $V_3 = -4.5$ V, faceva variare la corrente di placca dell'ultima valvola (a sinistra) da $I = 0$ mA a $I = 48$ mA, sufficienti ad azionare un numeratore telefonico.

Per avere una idea della forza documentativa del quaderno, si consideri che dai calcoli riportati nella pagina successiva (pagina Q5), che danno le condizioni di lavoro dell'amplificatore, misurate e calcolate, si può inferire che il valore della resistenza r_1 attraverso cui è alimentata la placca della prima valvola (a destra) è di 500.000 Ω .

Nelle pagine immediatamente successive, Fermi procede a connettere il contatore di Geiger-Müller, alimentato dall'alta tensione, all'amplificatore. Da una naturale interpretazione del circuito a pagina Q15 sembra che anche questo collegamento sia fatto in modo diretto, collegando il filo centrale del contatore direttamente alla griglia della prima valvola, senza l'intermediazione di un condensatore. Una batteria provvede alla corretta polarizzazione di griglia.

0' 2200
 91' 3780 1580 senza nulla

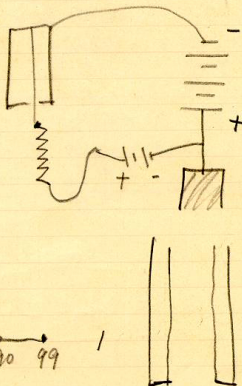
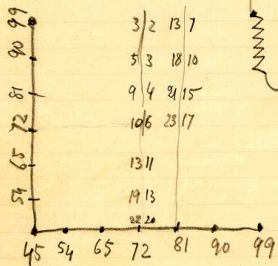
0' 4000
 47' 4675
 Con offone e allum

~~Calcolatore AL 1~~

~~0' 7400
 10' 7431
 21' 7452
 30 7477~~

~~0' 0
 22' 162~~

$$\frac{529 - 350}{20'} = \frac{179}{20} \approx 9$$



Se il contatore subisce una scarica la griglia subisce una brusca variazione di potenziale che viene successivamente amplificata, attivando infine il numeratore telefonico. Fermi fa altri tentativi per trovare le condizioni ottimali di funzionamento, anche in funzione del potenziale applicato al contatore.

Nella notte del 20 marzo, Fermi è coinvolto in misure della radiazione di fondo, e nella messa a punto finale del contatore e dell'amplificatore. In mattinata gli viene fornita la

sorgente di neutroni, e Fermi comincia ad irraggiare prima il platino, senza successo, e poi l'alluminio, con pieno successo. Le pagine 17-18-19 documentano l'attività frenetica di Fermi. Si noti l'ora registrata all'inizio di pagina 18: le 5^h57'. A pagina 19 si ottiene la radioattività indotta sull'alluminio, registrata freddamente, senza alcun commento.

0' 2600
 20' 2781
 23' 2808

$181/20 = 9,05$
 $\frac{208}{23} = 9,04$

0'	3400	0'	3700
24'	3335	3'	3790
30'	3398		
48'	3575		
0'	4001		
24'	4201		
30'	4239		
25p	5390		

Condizioni di funzionamento
 Tensione 800 + 60 + 100
 Ampiezza degli impulsi ~ 7 div. elettrometro
 (48,5 - 41,5)

amplificatore $V_1 = 72 - 4,5$
 $V_2 = 36 - 4,5$

0' 5400

18

$557' \overline{) 0' 6500}$
 $67' 7080$

~~$94' 35' \overline{) 0' 7200}$~~
~~39~~ ~~Con KLL~~ 5' 143
~~29~~
~~27~~

~~Con PT~~
 ~~$94' 35' \overline{) 0' 7500}$~~

Con PT

0'	8400	$57/6 = 9,5$	} $\frac{291}{30} = 9,7$
6'	8457	$51/6 = 8,5$	
12'	8508	$60/6 = 10,0$	
18'	8568	$74/7 = 10,9$	
25'	8644	$57/5 = 11,4$	
30'	8691	$86/5 = 13,2$	
35'	8757		

Brachisto 15'

0'	8933	$32/3$	63
3'	8955		
5'	86		
10'	9029		

low Al

$$\left. \begin{array}{l} 0' \quad 9200 \\ 20' \quad 9414 \\ 30' \quad 9514 \end{array} \right\} \frac{314}{30} = 10,5$$

0	9750	
1'	67 17	} 82
2'	85 18	
3'	95 10	
4'	98 12 17	
5'	32 20	} 74
6'	46 14	
7'	57 11	
8'	76 19	
9'	90 14	} 59
10'	99 06 16	
11'	19 13	
12'	31 12	
13'	43 12	} 57
14'	55 12	
15'	65 10	
16'	77 12	
17'	92 15	} 47
18'	99 7	
19'	100 08 9	
20'	32 14	
21'	33 11	} 47
22'	41 8	
23'	51 10	
24'	59 8	
25'	69 10	

304		
11	7	} 57
35	14	
39	14	
47	8	
61	14	} 60
79	18	
88	9	
401	13	
11	10	} 56
21	10	
29	8	
38	9	
55	18 12	
67	12	
77	10	

Le metodologie seguite da Fermi, nella loro efficace semplicità, gli permettono di pervenire a risultati di assoluto rilievo internazionale, pur avendo a disposizione mezzi molto modesti, tra i quali abbiamo visto l'amplificatore, esistenti all'epoca a via Panisperna. Da questo punto di vista, il percorso di Fermi fornisce una lezione universale, e completamente attuale. Il raggiungimento di risultati importantissimi con mezzi molto modesti costituisce il trionfo dell'intelligenza e della creatività. Una lezione su cui meditare.