SUL FUNZIONAMENTO DEI CONTATORI DI GEIGER-MUELLER

C. FESTA

1. *Introduzione.* — Tra gli strumenti di indagine attualmente impiegati nelle ricerche di fisica sperimentale il «contatore» o «contacorpuscoli» ha una importanza che si può ben definire fondamentale. Costruito per la prima volta da Rutherford e Geiger ⁽¹⁾ nel 1908 questo strumento ha avuto una larga diffusione dopo che nel 1928 Geiger e Müller ⁽²⁾ hanno messo in evidenza i vantaggi risultanti dalla sua applicazione alle ricerche di fisica nucleare. Effettivamente basta rivolgere uno sguardo di insieme al vasto lavoro che nell'ultimo trentennio i fisici hanno compiuto in tale campo per riconoscere che una gran parte dei risultati conseguiti sono dovuti all'impiego del contatore. In particolare si può dire che attualmente non si effettua una esperienza sulla radioattività o sulla radiazione cosmica nella quale non si faccia uso sistematico dei contatori, eventualmente associati ad altri strumenti (camera di ionizzazione, camera di Wilson).

Tutto ciò giustifica la preoccupazione di conoscere nel modo più esatto possibile il funzionamento di uno strumento così largamente usato, preoccupazione che si riflette nella vasta serie di lavori pubblicati su tale argomento. Tuttavia il meccanismo di funzionamento dei contatori è rimasto praticamente sconosciuto fino a quando, nel 1940, C. G. Montgomery e D. D. Montgomery ⁽³⁾ hanno formulato una teoria che ha dato origine a numerose ricerche sperimentali. Le prime conferme sperimentali della teoria di Montgomery e Montgomery sono dovute a Ramsey e coll. ⁽⁴⁾. Delle successive ci occuperemo in questo lavoro che costituisce una rassegna e una discussione delle ricerche sui contatori, pubblicate dal 1940 ad oggi, avente lo scopo di realizzare un quadro — per quanto è possibile completo — delle attuali conoscenze sul funzionamento dei contatori.

2. *La scarica all'interno dei contatori.* — In assenza di particelle ionizzanti possiamo considerare il contatore come un condensatore cilindrico, immerso in un gas ad una certa pressione p . Si vede subito che se σ è il valore assoluto della carica per unità di lunghezza distri-

buita su i due elettrodi ed r la distanza di un punto qualunque dall'elettrodo centrale, il campo all'interno del condensatore è:

$$E = \frac{2\sigma}{r}$$

ossia è inversamente proporzionale ad r .

Supponiamo che ad un certo istante si produca almeno una coppia di ioni all'interno del contatore. Sotto l'azione del campo E , l'elettrone così formato si dirige verso il filo, subendo numerosi urti elastici e anelastici contro le molecole del gas. Purtuttavia i processi di urto che portano alla creazione di nuovi elettroni sono piuttosto rari finché non si giunge nella zona del contatore più prossima al filo, nella quale il campo è sufficientemente intenso. La formazione degli ioni infatti si verifica solamente quando la intensità del campo ha raggiunto un valore di soglia E_s tale che l'energia acquistata dall'elettrone fra due urti successivi superi in media la energia di ionizzazione.

Sia r_s la distanza dal filo alla quale il campo elettrico raggiunge il valore E_s : se il valore di questa distanza è tale che l'elettrone prima di raggiungere il filo deve subire ancora un considerevole numero di urti da parte degli atomi del gas, ciascuno degli ioni formati nei singoli processi di urto sarà in grado di produrre almeno un'altra coppia di ioni. Allora in un tempo estremamente breve il numero degli ioni si accresce in modo enorme e si produce una «valanga» di ioni positivi e di elettroni.

Questa valanga si forma (fig. 1) in prossimità del piano BC normale al filo, passante per il punto in cui è comparsa la coppia di ioni primaria. Sotto l'azione del campo elettrico gli elettroni si precipitano sul filo mentre gli ioni positivi sono attirati dal catodo. Quindi, rispetto alla lunghezza totale del contatore, il fenomeno è alquanto localizzato. In un tempo brevissimo,

Fig. 1

però, esso si estende a tutto il contatore con il seguente meccanismo: durante i processi di urto che portano alla formazione della valanga, viene emesso un numero considerevole di fotoni. Questi non essendo influenzati dal campo elettrico si diffondono per tutto il contatore. Lungo il loro cammino essi urtano contro le molecole del gas, libe-

rando elettroni, i quali, a loro volta, generano altre valanghe in altri punti del contatore, situati sempre in prossimità del filo dove il campo è convenientemente elevato.

A parità di campo elettrico, la velocità degli ioni positivi è almeno 1000 volte più piccola di quella degli elettroni. E' evidente perciò che gli elettroni si propagano lungo il filo e lo raggiungono assai prima che gli ioni positivi se ne siano allontanati sensibilmente. Conseguentemente gli elettroni lasciano dietro di sé una carica spaziale positiva, che circonda il filo come una guaina. Questa guaina positiva produce un abbassamento della intensità del campo elettrico attorno al filo cosicché, attenendosi a questa schematizzazione, si può prevedere che cessi la possibilità di formazione di nuove valanghe fino a che la guaina non si è convenientemente allontanata dal filo. In tal modo la scarica si interrompe. La porzione attiva della scarica è dunque ultimata quando il fenomeno si è propagato per tutta la lunghezza del filo.

Questo processo avviene in un tempo brevissimo in confronto a quello impiegato dalla guaina positiva per raggiungere il catodo. Effettivamente Alder, Baldinger, Huber e Metzger (*) hanno misurato la velocità di propagazione della guaina positiva lungo il filo trovando, in un contatore riempito con 6.4 cm³ di argon e 1.6 cm³ di alcool

$$v = (8.35 \pm 0.05) \cdot 10^6 \text{ cm sec}^{-1}$$

All'arrivo della guaina positiva sul catodo gli ioni possono estrarre elettroni da questo. In tal caso, se il campo fra i due elettrodi è sufficientemente intenso, ossia se in prossimità del filo è $E > E_*$, ciascun elettrone secondario è in grado di produrre una nuova valanga e quindi la scarica si rinnova più volte fino a che la emissione secondaria non si esaurisce. La scarica è in tal caso « multipla ». Se l'emissione secondaria manca o è comunque neutralizzata, la scarica è « singola ».

3. *Contatori a gas e contatori a gas poliatomico.* — In pratica il contatore è collegato con una sorgente di tensione V e una resistenza R (v. fig. 2 (*)). Al passaggio di una particella ionizzante corrisponde una variazione più o meno sensibile di potenziale ai due capi della

(*) La capacità C inserita in parallelo ad R è dovuta alla somma delle capacità verso terra del filo e dell'apparato registratore.

resistenza R . L'andamento di questa variazione o « impulso » di potenziale può essere osservato direttamente all'oscillografo. In tal modo si rivela la stretta dipendenza della forma dell'impulso dal valore di R e dal riempimento del contatore. In un contatore a gas l'im-

Fig. 2

pulso è del tipo di fig. 3a) se il valore di R è elevato, mentre per piccoli valori di R ha la forma di fig. 3b). Ma se al gas contenuto nel contatore si aggiunge una piccola quantità di vapori organici, l'impulso di poten-

ziale conserva l'andamento di fig. 3a) per valori comunque piccoli di R .

L'effetto dei vapori organici sul funzionamento dei contatori è stato osservato per la prima volta da Trost (⁶). Questi consiglia una miscela di 9 cm_{hg} di argon e 1 cm_{hg} di alcool come « optimum » per il riempimento dei contatori. Di solito questi contatori si dicono « veloci » in contrapposizione a quelli riempiti con un gas o con una miscela di gas, che sono chiamati « lenti ». In realtà tale denominazione non è esatta perché come dimostrano le fotografie ottenute al sineroscopio da Martelli e Santangelo (⁷) la salita dell'impulso nei contatori a gas è sensibilmente più rapida di quanto non lo sia in quelli riempiti con vapori organici. Altrettanto imprecisa è, come vedremo alla fine di questo paragrafo, quella di contatori « autospegnenti » e « non autospegnenti ». Nel corso di questa trattazione vedremo come sia conveniente basare unicamente sulla natura del riempimento la distinzione fra i due tipi di contatori. Perciò d'ora innanzi indicheremo con il nome di contatore « a gas poliatomico » tutti contatori riempiti con alcool, etere, ecc. e con il nome di contatori « a gas » tutti quelli riempiti con idrogeno, azoto, elio, argon, aria, ecc.

Fig. 3

Vediamo se il meccanismo di scarica esposto nel paragrafo precedente ci consente di interpretare in qualche modo le differenze esi-

stenti fra questi due tipi di contatori. Prima di far questo esaminiamo come varia il numero degli impulsi registrati dal contatore nell'unità di tempo in funzione della tensione ad esso applicata. Se riportiamo in ordinate il numero di impulsi nell'unità di tempo e in ascisse la tensione V , otterremo la fig. 4 che, per analogia con le caratteristiche delle valvole termoioniche, è chiamata « caratteristica del contatore ». Dall'esame della caratteristica risulta che la registrazione degli impulsi va crescendo gradualmente con il potenziale fino a che non si raggiunge un certo valore V_s . La porzione di curva che precede

Fig. 4

V_s si chiama « regione di moltiplicazione ». Oltre V_s il numero degli impulsi si mantiene sensibilmente costante. Al tratto di caratteristica corrispondente si dà il nome di « pianerottolo » o « regione di saturazione » o « regione di Geiger - Müller ». Evidentemente in questa regione vengono registrate pressoché tutte e sole le particelle che colpiscono il contatore. Tale considerazione è confermata dalla osservazione diretta degli im-

pulsi compiuta mediante l'oscillografo, la quale permette di constatare che all'inizio della caratteristica gli impulsi sono in media molto piccoli e fluttuano considerevolmente in grandezza. Le fluttuazioni vanno gradualmente riducendosi man mano che ci si avvicina a V_s mentre la grandezza media degli impulsi va aumentando. Il potenziale V_s viene generalmente indicato con il nome di potenziale di « soglia ».

L'ampiezza del pianerottolo dipende dalle caratteristiche costruttive e dalle costanti del circuito. Il pianerottolo è limitato superiormente dalla scarica continua, la quale nei contatori a gas compare per un potenziale:

$$V_M = V_{\min} + i_{\min} R,$$

dove $i_{\min}$ è la corrente della scarica continua, che di solito è dell'ordine del μA e $V_{\min}$ è il potenziale per il quale essa compare nel contatore quando R è uguale a zero.

La presenza di un gas poliatomico rende il pianerottolo indipendente dalle costanti del circuito; qualunque sia il valore di R le caratteristiche dei contatori a gas poliatomico sono fornite di pianerottoli estesi almeno un centinaio di volts. Secondo Montgomery e Montgomery (*) questa diversità di comportamento sta ad indicare che, mentre nei contatori a gas la differenza fra V_* e $V_{\min}$ è di pochi volts, nei contatori a gas poliatomico è considerevolmente maggiore.

Riprendiamo le considerazioni del paragrafo precedente: finché il filo è circondato dalla guaina positiva il suo potenziale rimane praticamente invariato. Il moto della guaina positiva verso il catodo produce un abbassamento del potenziale del filo a cui si oppone l'azione del circuito esterno tendente a riportare il contatore al potenziale di lavoro. Inizialmente l'effetto prodotto dal moto delle cariche positive prevale sul secondo, perciò il potenziale del filo si abbassa fino a che non si ristabilisce l'equilibrio fra l'azione della guaina e il circuito esterno. Allora il potenziale del filo raggiunge il suo valore minimo, al quale segue la ripresa. All'arrivo degli ioni positivi sul catodo il potenziale del filo ha assunto un valore che evidentemente dipende dalle costanti del circuito.

A chi esamina la caratteristica di un contatore, tenendo conto del meccanismo di scarica esposto nel paragrafo 2, appare evidente che, quando fra i due elettrodi si stabilisce una differenza di potenziale V_* ad una distanza dal filo dell'ordine di qualche cammino libero dell'elettrone il campo elettrico assume un valore E_* tale che una sola coppia di ioni è sufficiente ad innescare la valanga.

Supponiamo che quando gli ioni positivi raggiungono l'elettrodo esterno il potenziale del filo sia inferiore a V_* . In tal caso, anche se gli ioni positivi estraggono dalle pareti del contatore un numero considerevole di elettroni, questi non possono acquistare una energia sufficiente a produrre nuove valanghe, cosicché la scarica si mantiene ad un solo stadio. Invece se all'arrivo della guaina positiva il potenziale del filo si trova ad un valore maggiore o almeno uguale a V_* , la scarica si riproduce a meno che l'emissione secondaria non venga a mancare. Si comprende allora la funzione della resistenza R , che consiste appunto nell'impedire al potenziale del filo di superare il valore V_* prima che gli elettroni secondari abbiano raggiunto il filo.

In base a tali considerazioni si può definire $V_{\min}$ come il potenziale minimo al quale si forma un numero di ioni positivi sufficiente a rendere particolarmente elevata la probabilità di emissione da parte del catodo. Effettivamente Montgomery e Montgomery (*) facendo

uso dell'oscillografo catodico hanno riscontrato la presenza di ampie fluttuazioni della corrente $i_{\min}$ in un contatore riempito con argon (94%) e ossigeno (6%) alla pressione di 9 cmHg. Dalle loro osservazioni essi hanno arguito che la scarica cosiddetta « continua » è in realtà costituita da una serie di scariche multiple, in quanto è prodotta da successive emissioni di elettroni dal catodo. La elevata frequenza delle fluttuazioni, che non consente la loro rivelazione mediante uno strumento ordinario, è da attribuire al tempo relativamente brevissimo impiegato dagli ioni positivi per raggiungere il catodo.

Da quanto abbiamo esposto finora risulta che in un contatore a gas può sempre realizzarsi la scarica singola purché, in conseguenza del passaggio degli ioni positivi attraverso il contatore, il potenziale del filo si abbassi al di sotto del valore di soglia.

Lo « spegnimento interno » ossia la interruzione della ionizzazione per urto dovuta all'abbassamento del campo all'interno del contatore, in conseguenza del passaggio della carica spaziale positiva, si verifica in tutti i contatori, indipendentemente dal loro riempimento. La differenza fra i contatori a gas e quelli a gas poliatomico consiste unicamente nel fatto che nei primi può verificarsi una ripresa della scarica che non avviene mai nei secondi. Questo differente comportamento sarebbe dovuto alla assenza di elettroni secondari nei contatori a gas poliatomico.

4. *La funzione del gas poliatomico.* — Abbiamo visto che inizialmente la scarica è circoscritta ad una zona limitata rispetto alla lunghezza totale del contatore e solo in un secondo tempo essa si estende lungo l'intero contatore. Responsabili della propagazione della scarica sono i numerosi fotoni, generati durante i processi di urto che portano alla formazione delle singole valanghe.

La propagazione della scarica dipende in modo sensibile dal tipo di gas con cui il contatore è stato riempito. Nei contatori a gas poliatomico essa avviene nelle immediate adiacenze del filo, tanto è vero che un ostacolo, costituito, ad es., da una sferetta di vetro il cui raggio non è inferiore a 2 mm inserita nel filo è sufficiente ad arrestarla ⁽⁹⁾. Altrettanto non si può dire dei contatori a gas, nei quali la scarica si propaga indisturbata, oltre un ostacolo di questo genere.

La stretta dipendenza del fenomeno della localizzazione della scarica dalla concentrazione del gas poliatomico è stata messa in evidenza da Wilkening e Kanne ⁽¹⁰⁾ mentre, Rose e Korff ⁽¹¹⁾ hanno dimostrato con considerazioni completamente indipendenti dalle pre-

cedenti che la presenza del gas poliatomico riduce sensibilmente il numero dei fotoni presenti nel contatore. Sembrerebbe perciò che l'assorbimento dei fotoni sia molto più rilevante nei gas poliatomici che nei gas semplici ⁽¹²⁾.

Realmente i livelli di eccitazione delle molecole dei gas poliatomici adoperati nei contatori hanno generalmente la vita media per emissione di un fotone più lunga di quella per dissociazione, sicché è molto grande la probabilità che gli urti anelastici subiti dalle molecole poliatomiche durante la formazione della valanga e la successiva propagazione della scarica abbiano come ultimo risultato la dissociazione delle molecole anziché la produzione dei fotoni come avviene per gli atomi dei gas. Ma nei contatori a gas poliatomico quest'ultimo è il 10-20% del gas contenuto nel contatore: il rimanente è costituito da un gas semplice, aggiunto allo scopo di ottenere tutte le caratteristiche desiderate. Nella tabella I riportiamo le lunghezze d'onda delle principali righe di emissione dei gas semplici adoperati per riempire i contatori e nella tabella II le lunghezze d'onda delle bande d'assorbimento dei gas poliatomici più comuni ⁽¹³⁾. Dal confronto fra queste due tabelle risulta che in talune miscele di gas adoperate per il riempimento dei contatori le bande di assorbimento del gas poliatomico ricoprono le righe di emissione del gas aggiunto. Secondo Brown ⁽¹²⁾ questa osservazione chiarirebbe l'assorbimento dei fotoni osservato nei contatori a gas poliatomico.

Ma la proprietà più importante dei contatori a gas poliatomico è che in essi la scarica si mantiene singola indipendentemente dai valori delle costanti R e C del circuito esterno. La interpretazione delle proprietà di spegnimento dei gas poliatomici può dedursi da una rappresentazione schematica dei fenomeni che si verificano quando la guaina ionica arriva sul catodo ⁽¹⁴⁾. Quando uno ione si avvicina abbastanza intimamente ad una superficie metallica il suo campo di forze può interagire con quello di un elettrone contenuto entro il metallo in maniera da estrarne l'elettrone. Quest'ultimo si combina con lo ione dando origine a un atomo neutro, il quale, generalmente, si forma in uno stato eccitato perché la energia di ionizzazione dello ione è molto maggiore della energia necessaria per la estrazione di un elettrone. La energia di eccitazione dell'atomo è uguale alla differenza fra il potenziale di ionizzazione dell'atomo e il potenziale di estrazione del catodo. A questo punto ⁽¹⁵⁾ comincia la diversità di comportamento fra gli atomi di un gas e le molecole di un gas poliatomico.

TABELLA I

Gas	Potenziale di ionizzazione (V)	Livelli metastabili (V)	Lunghezza d'onda di emissione (Å)	Probabilità di formazione degli ioni negativi
Al	15,7	11,5	1048	—
He	24,5	19,7	854	—
Hg	10,4	5,43	1850	10^{-3}
Xe	12,1	8,27	1170	—
H ₂	15,4	—	—	10^{-5}
H	13,5	nessuno	1215	—
N ₂	15,5	6,27	—	—
N	14,5	2,37	1135	—
O ₂	12,5	5:3:9	—	10^{-4}
O	13,6	2:4:9	1302	—
CO ₂	14,4	5,6	—	10^{-4}

TABELLA II

Gas	Potenziale di ionizzazione (V)	Lunghezza d'onda d'assorbimento (Å)	Tipo dello spettro
CCl ₄	—	4600-2300	Bande
CH ₄	14,4	< 1450	Continuo
CH ₃ J	10,12	3600-2110	»
		2100-1215	Diffuso
C ₂ H ₅ OH	11,3	1633-1602	Bande
		1518	Diffuso
		< 700	Continuo

L'atomo di un gas (*H*, *He*) torna nel livello fondamentale emettendo la energia di eccitazione sotto forma di un fotone ultravioletto, il quale è in grado di estrarre almeno un fotoelettrone dal catodo (v. tab. I e III). Invece la energia di eccitazione delle molecole poliatomiche va spesa unicamente nella dissociazione della molecola. Così nei contatori a gas poliatomico viene evitata la emissione di elettroni secondari.

TABELLA III

Elemento	Al	Cu	Au	Ni	Pt	Ag
Potenziale di estrazione (eV)	4,56-3,57	4,5-4,1	4,82-4,73	5,01-4,12	6,3-4,4	4,73-3,85

Però se il fenomeno della scarica singola è dovuto unicamente ad una differenza di comportamento dei diversi tipi di molecola nei confronti della emissione secondaria, viene fatto di domandarsi per quale ragione una piccola aggiunta di vapori organici in un contatore a gas è sufficiente ad ottenere la comparsa della scarica singola. Korff e Present ⁽¹⁵⁾ rispondono a questa obiezione, osservando che di solito il gas poliatomico è accompagnato da gas il cui potenziale di ionizzazione è superiore a quello del gas poliatomico. In tali condizioni durante il cammino della guaina positiva verso il catodo, gli urti fra gli ioni positivi danno origine ad un passaggio di elettroni dagli ioni poliatomici a quelli gassosi, dimodoché sul catodo arriveranno in ultima analisi solo gli ioni poliatomici. Se il potenziale di ionizzazione del gas fosse inferiore a quello del gas poliatomico, il trasferimento dell'elettrone avverrebbe in senso inverso e la scarica all'interno del contatore sarebbe multipla, nonostante la presenza di un gas poliatomico. Realmente Korff e Present affermano di avere riscontrato che l'aggiunta di una minima quantità di xenon annullava il pianerottolo di un contatore a metano, il quale restava invece inalterato in presenza di una uguale quantità di argon (per i potenziali di ionizzazione di questi tre gas confronta le tabelle I e II).

La progressiva dissociazione delle molecole poliatomiche sarebbe responsabile di quel complesso di fenomeni, osservabile in tutti i contatori a gas poliatomico, e precisamente: 1) aumento della pendenza del pianerottolo dopo parecchie ore di conteggio; 2) ripresa della pendenza iniziale dopo 24 ore di riposo; 3) aumento progressivo del valore della tensione di soglia; 4) progressivo annullamento delle caratteristiche che garantiscono il funzionamento del contatore.

Effettivamente, se si considerano i risultati di una esperienza di Cummings e Bleakney ⁽¹⁶⁾ i quali, per mezzo di uno spettrografo di massa, hanno esaminato i prodotti della ionizzazione dell'alcool metilico ed etilico da parte di elettroni si può ammettere che l'uso prolungato di un contatore a gas poliatomico finisca, col trasformare quest'ultimo, in un contatore a gas.

I fenomeni 1), 2), 3), 4) sono stati verificati accuratamente da Spatz ⁽¹⁷⁾ il quale prevede, in base alla ipotesi della progressiva dissociazione delle molecole poliatomiche all'interno del contatore, che un contatore ad argon e alcool può registrare fino a 10^8 - 10^{10} impulsi prima di perdere le caratteristiche, mentre un contatore a metano può registrarne solo 10^7 - 10^8 , la qual cosa è in accordo con le osservazioni sperimentali.

Il deterioramento del contatore a gas poliatomico non è dovuto unicamente alla progressiva scomparsa delle molecole poliatomiche, ma anche — e principalmente — alla deposizione dei prodotti di dissociazione sul catodo. E' noto infatti che non è sufficiente rinnovare il riempimento di un contatore in completo stato di disfunzione per ripristinare tutte le sue caratteristiche di funzionamento, ma il più delle volte occorre lavare gli elettrodi con una opportuna soluzione. Molto probabilmente il lavaggio serve a liberare la superficie dal rivestimento formatosi in conseguenza della dissociazione molecolare. Effettivamente nei contatori riempiti con gas biatomici (p. es. alogeni), le cui molecole non sono soggette ad una dissociazione permanente, pur presentando proprietà di « spegnimento », non si è osservato questo tipo di deterioramento (¹⁸).

5. *La autoeccitazione del contatore.* — Insieme alla scarica continua va ricordato un altro fenomeno, che limita superiormente la estensione del pianerottolo. Si tratta della cosiddetta « autoeccitazione » del contatore per cui quest'ultimo può scaricarsi spontaneamente senza essere attraversato da particelle ionizzanti. Impulsi di questo genere si chiamano « spuri » e costituiscono un inconveniente piuttosto grave per il funzionamento del contatore. La presenza di un numero più o meno considerevole di impulsi spuri provoca una inclinazione più o meno pronunciata del pianerottolo del contatore. In pratica il pianerottolo non è mai perfettamente orizzontale, però, in un buon contatore, la inclinazione del pianerottolo è trascurabile.

L'autoeccitazione compare tanto nei contatori a gas come in quelli a gas poliatomico ma nei due tipi di contatori essa è originata da fenomeni differenti.

Nella guaina ionica del contatore a gas poliatomico permane sempre qualche ione del gas aggiunto perché il rendimento del processo di trasferimento dell'elettrone, ricordato nel paragrafo precedente, è circa il 90%. Sicché anche in questi contatori si verifica, sia pure in misura trascurabile, la emissione secondaria. Sono proprio questi elettroni la causa degli impulsi spuri osservati nei contatori a gas poliatomico, in quanto essi, arrivando nei pressi del filo quando la tensione del contatore è tornata al valore di lavoro, generano una nuova valanga senza che il contatore sia stato attraversato da una particella ionizzante. L'esperienza insegna che il 5-10% di un gas poliatomico è sufficiente ad ottenere il massimo trasferimento elettronico. I risultati ottenuti in queste condizioni sono più che soddisfacenti nella

massima parte delle esperienze. Se il carattere particolare di una esperienza richiede una ulteriore diminuzione di questo numero, sarà bene ricorrere ad un trattamento chimico della superficie del catodo, allo scopo di ridurre ulteriormente la emissione secondaria. I numerosi trattamenti proposti finora hanno però un carattere puramente empirico.

E' probabile che nei contatori a gas poliatomico si abbiano anche impulsi spurî dovuti ai prodotti della dissociazione molecolare, i quali, combinandosi con un elettrone delle pareti o del gas, formano uno ione negativo che raggiunge il filo quando il contatore è tornato alla tensione di lavoro.

Vi sono infine alcuni gas come, p. es., l'anidride carbonica, nei quali si verifica una formazione di ioni negativi sulle pareti anziché nel gas (¹⁹). La interazione fra ioni positivi e catodo è analoga a quella che si verifica nel gas semplice, tranne che l'elettrone, liberato dall'atomo eccitato, viene catturato dall'atomo stesso dando origine ad uno ione negativo.

Più numerosi sono i fenomeni che provocano la autoeccitazione dei contatori a gas.

Dalla tabella I risulta che la massima parte degli atomi dei gas con cui si riempiono i contatori può esistere in uno stato metastabile. Gli atomi metastabili, neutri, si muovono entro il contatore senza risentire l'azione del campo elettrico finché in un urto, generalmente contro le pareti, perdono la energia del livello metastabile. In conseguenza dell'urto può verificarsi la estrazione di un elettrone secondario dalle pareti. Però è sufficiente la presenza nel contatore di una piccola quantità di un gas, la cui energia di ionizzazione è inferiore a quella del livello metastabile, perché gli urti fra gli atomi dei due gas eliminino tutti gli atomi metastabili. Questo scopo si raggiunge in pratica con il mercurio dei manometri inseriti nel sistema adoperato per vuotare i contatori poiché il potenziale di ionizzazione del mercurio (v. tabella I) è inferiore a quello degli stati metastabili dei gas più comunemente usati nel riempimento dei contatori, e la concentrazione che si presenta in queste condizioni è sufficiente ad eliminarli. Allo stesso processo è dovuta la scomparsa degli atomi metastabili del gas aggiunto in un contatore a gas poliatomico (v. tabelle I e II).

Infine la autoeccitazione può anche esser prodotta dagli ioni negativi formati in modo analogo a quello che abbiamo descritto a

proposito dei gas poliatomici. Però questo fenomeno si verifica solo nei gas che presentano una considerevole affinità elettronica (^{1,3}).

6. *Il fenomeno del tempo morto.* — La velocità di conteggio è un requisito indispensabile per il buon funzionamento di un contatore, il quale deve essere posto in grado di registrare due particelle susseguentisi in un brevissimo intervallo di tempo. In altre parole bisogna ridurre al minimo il tempo τ che *separa due impulsi di uguale grandezza*.

Un contatore è in grado di registrare un impulso della grandezza del precedente non appena il potenziale del filo, abbassatosi durante il primo impulso, ritorna al potenziale di lavoro. Spetta al circuito esterno, il compito di riapplicare al contatore il potenziale di lavoro cosicché il tempo occorrente per l'attuazione di questo processo dipende dal prodotto RC .

Abbiamo visto che nei contatori a gas si realizza la scarica singola solo se all'arrivo degli ioni positivi sul catodo, il potenziale del filo si trova ancora al disotto del valore di soglia, dimodoché il tempo di ripresa del potenziale del filo deve, di necessità, essere rallentato. Tale condizione si realizza con valori di R non inferiori a $10^8 \omega$, ragione per cui il tempo τ è in questi contatori particolarmente lungo (dell'ordine di 10^{-2} sec).

Con i contatori a gas poliatomico, ci troviamo in condizioni totalmente diverse, in quanto la forma della scarica è in questi contatori indipendente dalle costanti del circuito. Il prodotto RC da cui dipende il tempo occorrente al circuito per ricaricarsi, può essere ridotto considerevolmente. Altrettanto non si può dire del tempo τ la cui riduzione oltre un certo limite è ostacolata dal meccanismo medesimo della scarica. Sappiamo infatti che, anche se il valore della costante RC è tale da consentire la riapplicazione del potenziale di lavoro prima che la guaina positiva si sia sensibilmente allontanata dal filo, la carica spaziale positiva mantiene il campo fra filo e guaina al disotto del valore E_s , ossia di quel valore del campo che, in assenza di carica spaziale, corrisponde al potenziale V_s . Come si è già rilevato nel paragrafo 3 la influenza della guaina positiva decresce man mano che quest'ultima si avvicina al catodo.

Corrispondentemente il campo fra filo e guaina cresce fino a raggiungere il valore E_s per una ben determinata posizione della carica spaziale positiva e ritorna al valore corrispondente al potenziale di lavoro solamente quando sono arrivati sul catodo gli ioni positivi.

Durante il tempo t_m impiegato dalla guaina positiva per arrivare alla distanza r_s dal filo (v. par. 2), il contatore si trova in uno stato di insensibilità nel senso che non è in grado di registrare le particelle ionizzanti, che eventualmente possono attraversarlo. La registrazione riprende durante il cammino della guaina positiva da r_s fino al catodo, cammino che avviene in un tempo t_r , detto « tempo di recupero ». Durante questo tempo però la grandezza degli impulsi non è costante e va crescendo gradualmente. Nel seguito di questo lavoro indicheremo t_m come il « tempo morto » ed adopereremo per τ la denominazione di « potere risolutivo » del contatore.

La distanza critica r_s e conseguentemente i tempi t_r e t_m possono calcolarsi abbastanza facilmente. t_r e t_m sono stati misurati sperimentalmente da Stever (²⁹) il quale ha ottenuto un valore di $0,62 \cdot 10^{-4}$ sec per t_m e di $4,3 \cdot 10^{-4}$ sec per t_r in un contatore di 1,43 cm di diametro, riempito con una miscela del 95% di argon e del 5% di xilolo ad una pressione di 13,4 cm_{Hg}. L'accordo del valore sperimentale di t_r con quello calcolato è ottimo mentre altrettanto non si può dire per quello di t_m . Molto probabilmente tale disaccordo va attribuito alle notevoli incertezze riguardo alla mobilità degli ioni nella miscela di riempimento. La esperienza di Stever mette inoltre in evidenza la dipendenza di t_m e t_r dalla pressione della miscela di riempimento. Come era prevedibile i tempi si abbreviano al diminuire della pressione.

Il potere risolutivo τ è stato misurato anche da Greisen e Nereson (³⁰) con un metodo completamente indipendente da quello di Stever. In un contatore con un diametro di 4,25 cm, riempito con una miscela del 91% di argon e 9% di alcool a 11 cm_{Hg} di pressione, questi autori hanno trovato per τ il valore di $(4,0 \pm 0,2) \times 10^{-4}$ sec in buon accordo con i risultati della esperienza di Stever.

7. *Il rendimento del contatore.* — Se il fenomeno per cui in un contatore si verifica una scarica senza che questo sia stato colpito da una particella ionizzante non è trascurabile, altrettanto si può dire del processo opposto: ossia ad ogni particella che attraversa il contatore non corrisponde sempre una scarica all'interno di questo. In altre parole il « rendimento » di un contatore, cioè la probabilità che questo registri tutte le particelle che lo colpiscono, è sempre minore di 1. Le cause della maggiore o minore inefficienza di un contatore sono essenzialmente tre, ossia una particella può attraversare il contatore senza essere registrata quando: 1) non genera nep-

pure una coppia di ioni; 2) gli ioni da essa formati nella zona in cui il campo è debole si ricombinano; 3) il contatore viene colpito mentre si trova in particolari condizioni di insensibilità, determinate dal passaggio della scarica.

Il numero di coppie di ioni che una particella può produrre sul suo cammino è proporzionale alla pressione. Perciò quando la pressione all'interno del contatore assume valori molto piccoli (inferiori a $10 \text{ cm}_{\text{Hg}}$) vi è una probabilità finita che non si producano coppie di ioni e quindi la particella non venga registrata. Naturalmente questa probabilità dipende anche dal cammino compiuto dalla particella entro il contatore e dalla ionizzazione specifica del gas contenuto in quest'ultimo. Precisamente se con j indichiamo il numero di coppie di ioni generate entro il contatore dalla particella incidente e con l il cammino medio della particella stessa all'interno del contatore, il rendimento è:

$$R = 1 - e^{-jl \frac{p}{p_0}}$$

dove p è la pressione del gas all'interno del contatore e p_0 la pressione atmosferica.

Dalla relazione soprascritta si deduce che in contatori di piccolo diametro, riempiti con un gas a ionizzazione specifica non troppo elevata, il rendimento deve dipendere dalla pressione del gas.

Martelli e Santangelo (⁷) hanno verificato tale dipendenza con un contatore di 1,9 cm di diametro riempito con idrogeno, in un intervallo di pressione compreso fra 0,7 e 7,7 cm_{Hg} . Naturalmente questa probabilità dipende anche dal cammino compiuto dalla particella e dalla ionizzazione specifica. Da una esperienza di Jänossy e Rochester (²¹) risulta che nei contatori a gas poliatomico la influenza della pressione sul rendimento è irrilevante.

Le pressioni alle quali generalmente si trovano i gas contenuti nei contatori rendono molto improbabile la ricombinazione degli ioni. Ma se i gas presenti nel contatore hanno una notevole affinità elettronica, questo fenomeno non è più trascurabile: per di più ad esso si aggiunge la cattura elettronica con conseguente formazione di ioni negativi pesanti. Anzi che dagli elettroni la valanga viene iniziata dagli ioni negativi al loro arrivo nelle vicinanze del filo. Ma questi ultimi hanno una velocità molto minore di quella degli elettroni, cosicché la scarica non accompagnerà il passaggio della particella ionizzante, ma lo seguirà con un ritardo abbastanza grande da poter essere misurato. Effettivamente Montgomery e collaboratori (²²) hanno

osservato che in un contatore riempito con il 94% di argon e il 6% di ossigeno le scariche si presentavano con un ritardo dell'ordine di qualche μ -sec, rispetto al passaggio della particella ionizzante. I ritardi agiscono sul rendimento del contatore diminuendone il valore in maniera tanto più sensibile quanto più elevato è il potere risolutivo del circuito con cui si effettua la misura del rendimento. La influenza dei ritardi sul rendimento è stata messa in evidenza da Rose e Ramsey (²³) mediante contatori riempiti con ossigeno alla pressione di 9 cm_{hg} e da Montgomery e Montgomery (²⁴) con un contatore contenente il 6% di ossigeno in presenza di argon alla pressione totale di 10,4 cm_{hg}. Tale influenza si dimostra maggiormente sensibile

nelle vicinanze dell'elettrodo esterno e dipende in maniera molto critica dal gas di riempimento.

In un contatore riempito con la miscela di Trost i processi 1) e 2) sembrerebbero a tutta prima assai rari, se non addirittura improbabili. Tuttavia poiché la probabilità per ciascuno di questi processi cresce con la distanza dal filo della traiettoria della particella incidente, si può prevedere che in prossimità delle pareti del contatore la loro influenza sul rendimento non possa più essere trascurata. Secondo Greisen e Nereson (²⁰) il rendimento di un contatore riempito con il 91% di argon e il 9% di alcool alla pressione di 11 cm_{hg} è del 99,8% per le particelle che attraversano la parte centrale del contatore; ma si riduce notevolmente per quelle particelle la cui traiettoria dista circa $\frac{1}{2}$ mm dalla parete esterna. Questo effetto agli estremi ha come risultato una riduzione del rendimento totale a circa il 99,7%.

La inefficienza del 0,18%, osservata quando ci si limita ad esaminare le particelle che attraversano la parte centrale del contatore, è dovuta solo all'evento 3) cioè sostanzialmente al fenomeno del tempo morto. Se τ è il potere risolutivo ed N il numero degli impulsi registrati dal contatore nella unità di tempo, la inefficienza è espressa dalla relazione $1 - e^{-N\tau}$ e può considerarsi praticamente uguale a $N\tau$ quando questo prodotto è molto inferiore a 1. Tale espressione consente la determinazione del potere risolutivo mediante una misura di rendimento. Abbiamo già ricordato nel paragrafo 5 la esperienza di Greisen e Nereson (¹⁹) nella quale è stato adottato questo metodo.

Da quanto abbiamo esposto finora risulta che la inefficienza di un contatore a gas poliatomico va attribuita praticamente al tempo

molto. Comunque anche l'influenza di questo sul rendimento non pare troppo rilevante se si considera l'elevato valore del rendimento di questi contatori. Notiamo infine che dalle misure di rendimento eseguite da numerosi autori ^(2a) si desume che anche nei contatori a gas semplice il rendimento non scende al disotto del 97% a meno che non ci si trovi in condizioni particolarmente favorevoli alla realizzazione dei due primi processi.

8. *Conclusioni.* — L'esame del funzionamento del contatore di Geiger-Müller induce dunque a concludere che la scelta del gas di riempimento ha una influenza essenziale sulle proprietà che caratterizzano il contatore.

E' ovvio che nella massima parte delle esperienze la miscela di Trost si dimostra sempre come la più conveniente sotto tutti i punti di vista (piccolo tempo morto, rendimento elevato ecc.). Però, se le particolari esigenze di una ricerca richiedono l'adozione di contatori a gas, questi funzionano altrettanto bene quanto quelli a gas poliatomico, purché si adoperi un opportuno sistema di spegnimento.

Ringrazio vivamente il prof. G. Bernardini per l'interesse con cui ha seguito questo lavoro.

Roma — Istituto Nazionale di Geofisica — Ottobre 1943.

RIASSUNTO

Si discutono le ricerche sui contatori effettuate dal 1940 ad oggi in maniera da ottenere un quadro per quanto è possibile chiaro e completo delle attuali conoscenze sul funzionamento di questi strumenti.

BIBLIOGRAFIA

- (1) E. RUTHERFORD and H. GEIGER, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A 81, 141, 1903.
- (2) H. GEIGER and W. MÜLLER, *Nature*, 16, 617, 1923. *Phys. Zs.*, 29, 339, 1928. *Phys. Zs.*, 30, 489, 1929.
- (3) C. G. MONTGOMERY and D. D. MONTGOMERY, *Phys. Rev.*, 57, 1030, 1940.
- (4) W. E. RAMSEY, *Phys. Rev.*, 57, 1022, 1940.
- W. E. RAMSEY and W. L. LEES, *Phys. Rev.*, 60, 411, 1941.
- W. E. RAMSEY and E. L. HUDSPETH, *Phys. Rev.*, 61, 95, 1942.
- (5) F. ALDER, E. BALDINGER, P. HUBER and F. METZGER, *Il. P. A.*, 20, 73, 1917.
- (6) A. TROST, *Zs. f. Phys.*, 105, 399, 1937.
- (7) G. MARTELLI e M. SANTANGELO, *N. Cimento* 6, 374, 1943.
- (8) C. G. MONTGOMERY and D. D. MONTGOMERY, *J. of Frank. Inst.*, 231, n. 6, 1941.

- (⁹) H. G. STEVER, *Phys. Rev.*, **61**, 38, 1912.
- (¹⁰) M. H. WILKENING and W. R. KANNE, *Phys. Rev.*, **62**, 531, 1942.
- (¹¹) M. H. ROSE and S. A. KORFF, *Phys. Rev.*, **59**, 851, 1911.
- (¹²) E. GREINER, *ZS. f. Phys.*, **81**, 513, 1933.
- (¹³) S. C. BROWN, *Nucleonics*, **2**, 10, 1917.
- (¹⁴) M. D. OLIPHANT e P. B. MOON, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, **127**, 388, 1930.
- (¹⁵) S. A. KORFF and PRESENT, *Phys. Rev.*, **65**, 271, 1915.
- (¹⁶) C. S. CUMMINGS and W. BLEAKNEY, *Phys. Rev.*, **58**, 787, 1940.
- (¹⁷) W. D. B. SPATZ, *Phys. Rev.*, **61**, 236, 1913.
- (¹⁸) R. D. PRESENT, *Phys. Rev.*, **72**, 243, 1917.
S. M. LIEBSON, *Phys. Rev.*, **72**, 181, 1917.
- (¹⁹) F. L. ARNOT, *Proc. of Roy Soc.*, **158**, 137, 1937.
- (²⁰) K. GREISEN and N. NERESON, *Phys. Rev.*, **62**, 316, 1912.
- (²¹) L. JÁNOSY and G. D. ROCHESTER, *Phys. Rev.*, **63**, 52, 1943.
- (²²) C. G. MONTGOMERY, W. E. RAMSEY, D. B. COWIE and D. D. MONTGOMERY, *Phys. Rev.*, **56**, 635, 1939.
- (²³) M. E. ROSE and W. E. RAMSEY, *Phys. Rev.*, **59**, 616, 1911.
- (²⁴) C. G. MONTGOMERY and D. D. MONTGOMERY, *Phys. Rev.*, **59**, 1045, 1911.
- (²⁵) J. C. STREET and R. H. WOODWARD, *Phys. Rev.*, **46**, 1029, 1934.
A. EHMERT and A. TROST, *Zs. f. Phys.*, **100**, 533, 1936.
F. R. SHONKA, *Phys. Rev.*, **55**, 21, 1939.