

ガスを用いた電離検出器

電離箱，比例計数管，GM管

電離検出器 作動媒体 ガス

- 入射放射線による
ガスの電離

- 電子・イオン対による電圧誘起

- 電離数 $N=E/w$

- 統計誤差 $1/\sqrt{N}$

- ファノ因子

$$F = 0.1 - 0.4$$

- エネルギー分解能

表 5.1 種々のガスに対するイオン対当りのエネルギー消費の値 (W値)^a

ガ ス	イオン対当りのW値 (eV)	
	高 速 電 子	アルファ粒子
A	26.4	26.3
He	41.3	42.7
H ₂	36.5	36.4
N ₂	34.8	36.4
Air	33.8	35.1
O ₂	30.8	32.2
CH ₄	27.3	29.1

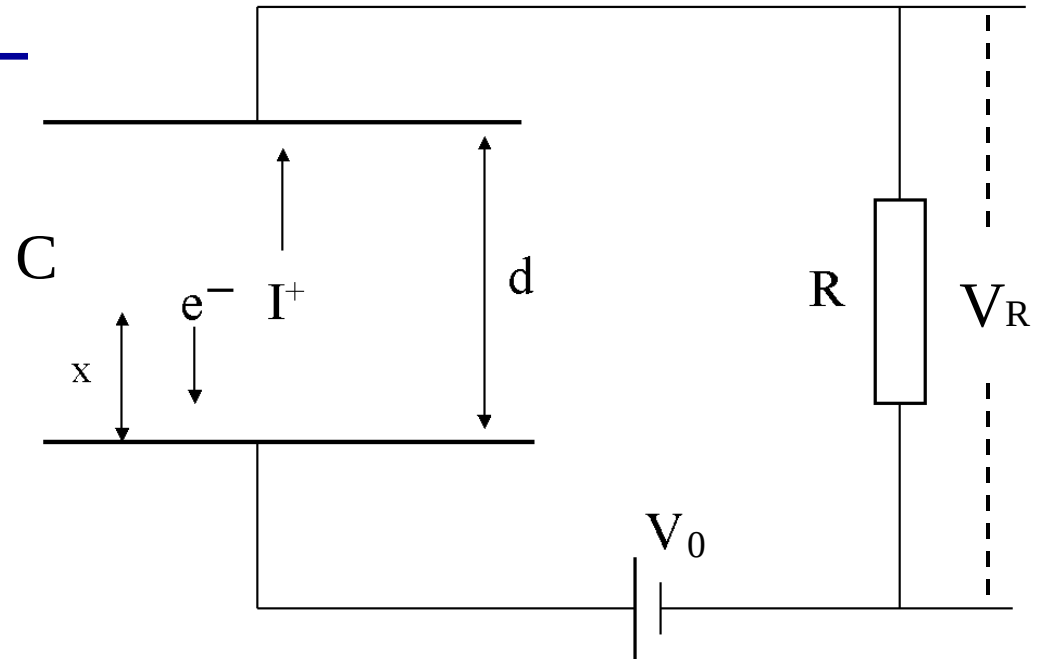
a. ICRU Report 31, "Average Energy Required to Produce an Ion Pair," International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, DC, 1979 からのデータ

$$R = 2.35\sqrt{F/N}$$

電離箱 (Ionization Chamber)

電子・イオン対生成と電荷収集

- 放射線のエネルギー
→ 電子・イオン対



- 電気エネルギー

– $t < 0$ で $E = CV_0^2/2$

– $t > 0$ で $E = CV^2/2 + eFv^+t + eFv^-t$

F : 電場の強さ,

v^+, v^- : イオンと電子の速さ

電子，イオンの位置と誘起電圧

- エネルギー保存則から

$$CV_0^2/2 = CV^2/2 + eFv^+t + eFv^-t$$

$$C(V_0 + V)(V_0 - V)/2 = eV_0(v^+ + v^-)t/d$$

$$V_R = e(v^+ + v^-)t/Cd \quad V_R = V_0 - V$$

- 電荷誘起量:電子とイオンの移動距離に比例

$$\Delta Q^- = e \Delta x^-/d, \quad \Delta Q^+ = e \Delta x^+/d$$

$$V^-(t) = ev^-t/Cd \quad (t < x/v^-), \quad V^+(t) = ev^+t/Cd \quad (t < (d-x)/v^+)$$

- 電荷収集時間→電子を利用すると高速
- 電子・イオン対が生成された点に依存

Quiz 3

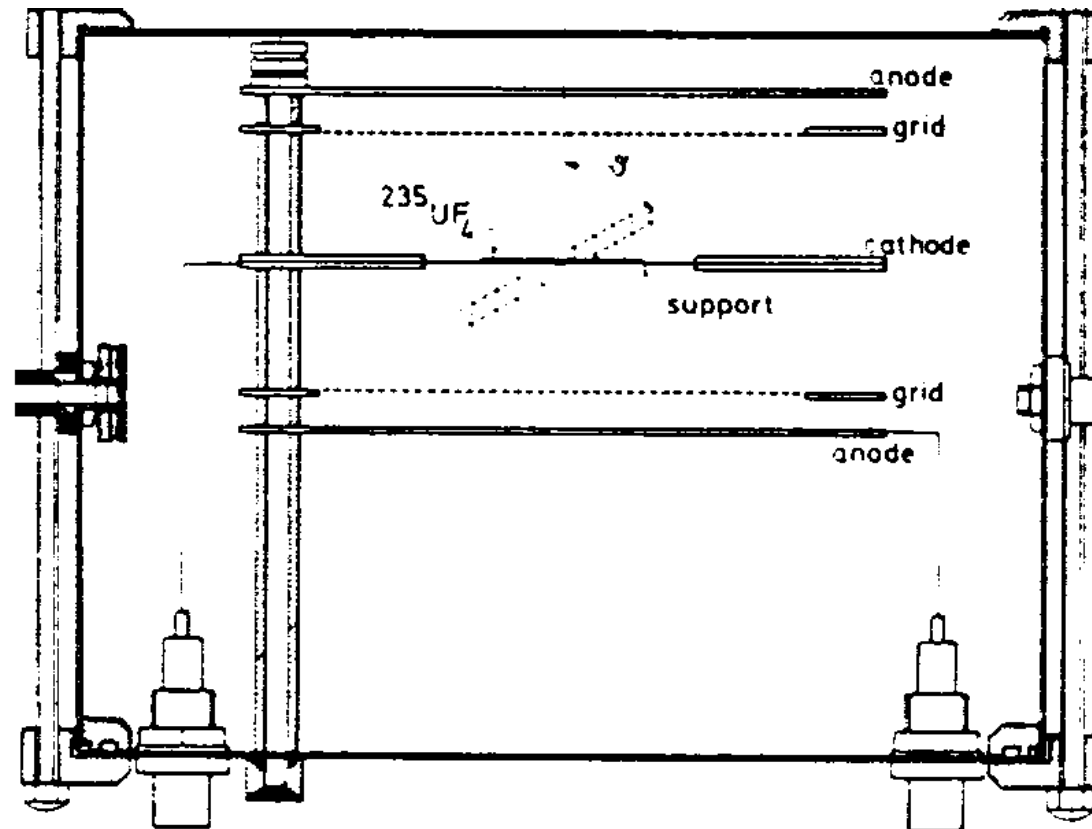
- 150pFの静電容量を持つ平行平板型電離箱を電子敏感モードで動作させるとする.

電極間の間隔を5cmとした場合，陽極から2cmの場所に生成された1000個の電子・イオン対によって生成されるパルス波高を計算せよ.

格子付き電離箱

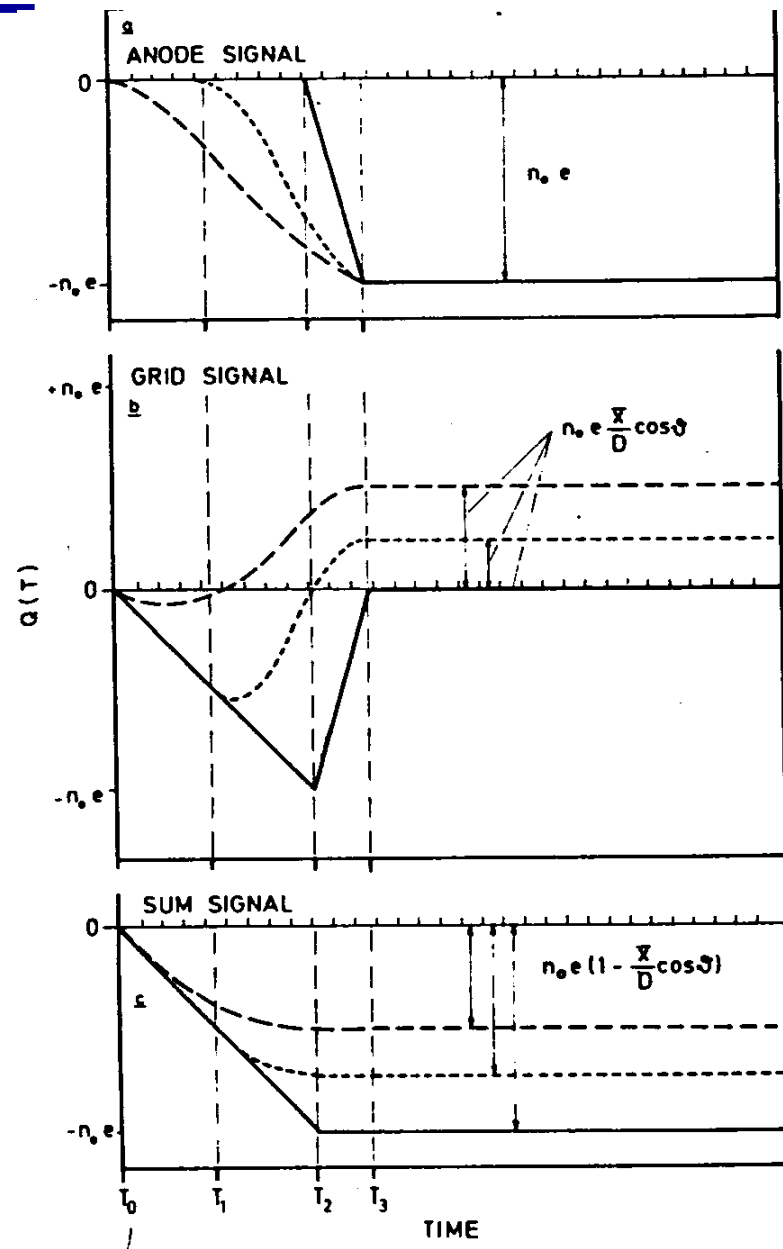
(Gridded Ionization Chamber)

- 電子による電荷誘起
- 電子・イオン対の生成点に依存しない
- 核分裂片測定の場合，放出角度の測定も可能



Report 2

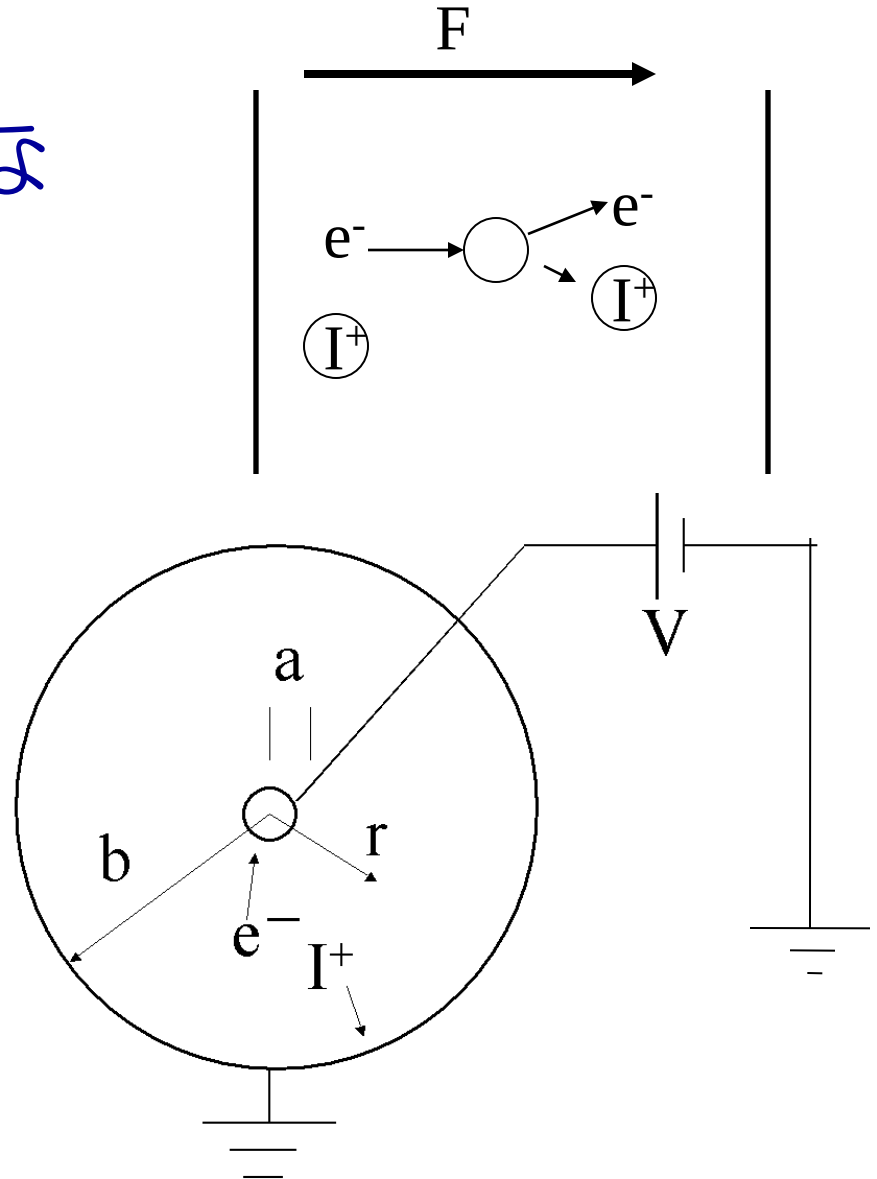
- グリッドチェンバの陰極に付着した ^{252}Cf から自発核分裂片が放出された。この自発核分裂片が生成した電子・イオン対の重心位置を x_0 、放出角度を θ 、陰極-グリッド間の距離を D として、陽極、グリッドに誘起される電荷量およびそれらの加算量を時間の関数として図に示せ。放出角として、 $\cos \theta$ が0, 0.5, 1の場合を考えよ。
- C.Buts-Jorgensen, et al., Nucl. Instrum. Meth., A258(1987)209.



比例計数管(Proportional Counter)

- 電離箱では測定できない放射線に対して
 - 低EのX線, 中性子
- ガス増幅を利用
 - 強い電場
 - 円筒-芯線電極
- 電場の強さ

$$F(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)}$$



Quiz 4

- 陽極線の半径が0.002cm, 陰極内面の半径が2cmの比例計数管に2000Vの電圧を掛けた. 電場の強さが 10^6V/m の場合にガス増幅が起こるとする. ガス増幅が起こる領域の体積は, 計数管全体の何パーセントに相当するか.
- 電子・イオン対が点 $r_0 (=0.5 \text{cm})$ で生成された場合, ガス増幅が起こる領域へ電子が到達する時間を求めよ. ただし, 電子の速度は,

$$v = \mu F / p, \mu = 10^{-1} \text{m}^2 / \text{Vs}, p = 1 \text{atm}$$

とする.

ガス増幅

- 増幅率M

- N:ひとつの電子が加速されて作る自由電子数
- δ :なだれの中のひとつの自由電子が作る光子数

$$M = N + \delta N^2 + \delta^2 N^3 + \dots = \frac{N}{1 - \delta N}$$

- $\delta N \ll 1$ 加速電子による増幅
- $\delta N < 1$ $M \gg N$
- $\delta N \rightarrow 1$ 自由放電

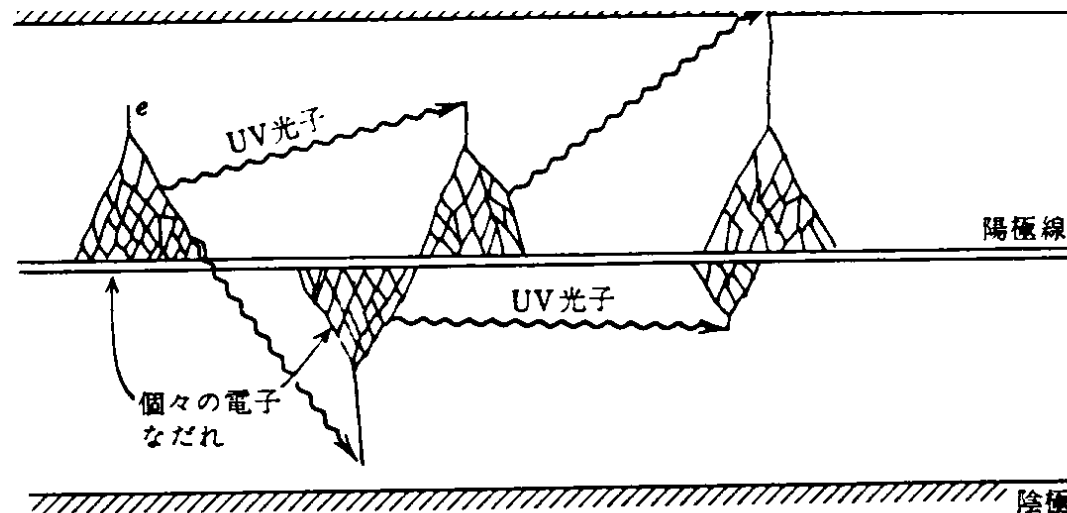


図 7.1 電子なだれが追加されてガイガー放電を起こす機構

様々なガスによる増幅Diethornの式

$$\ln M = \frac{V \ln 2}{\Delta V \ln(b/a)} \left[\ln \frac{V}{pa \ln(b/a)} - \ln K \right]$$

- M:ガス増幅率
- V:印加電圧
- a:陽極半径
- b:陰極半径
- p:ガス圧力
- ΔV :次の電離まで電子が移動する電位差
- K:増幅が起こる最低値
– $\Delta V, K$:ガスの固有値

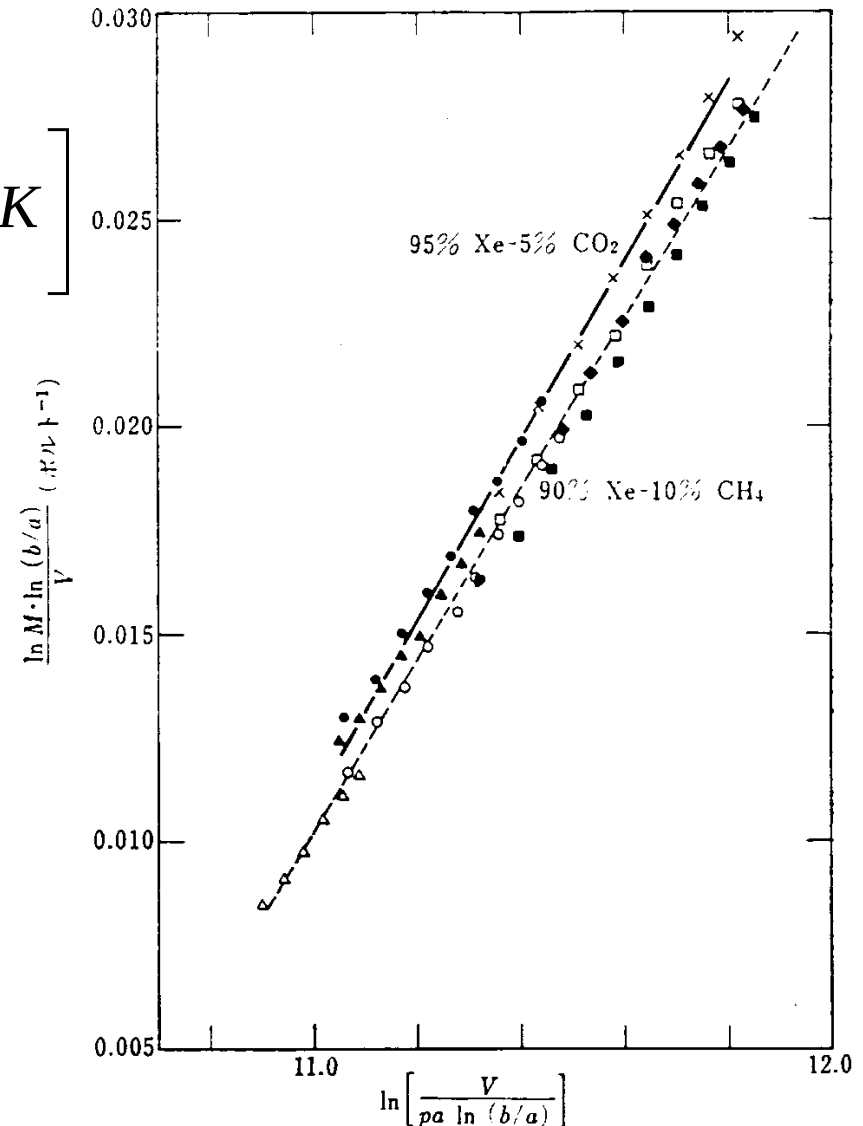


図6.9 図6.6に示したものと同じデータのダイソープロット. 式(6.8)に示されるように, 同じガスを用いた計数管のすべてに対して, $[\ln M \cdot \ln(b/a)/V]$ 対 $\ln[V/pa \ln(b/a)]$ は, 傾斜 $(\ln 2 / \Delta V)$ と切片 $-(\ln 2)(\ln K) / \Delta V$ を持つ直線上に乗る (Hendricks³²⁾ による)

Quiz 5

- 良い信号対雑音比性能を得るには10mVの最小入力パルス波高が必要な電圧敏感型前置増幅器がある. 50keVのX線を測定する場合, 200pFの静電容量を持つアルゴン入り比例計数管に必要なガス増幅率を求めよ. W値26.2eV.
- 中心ワイヤ半径が25 μ m, 陰極半径が25mm, 印加電圧1000Vの円筒型計数管がある. 電子が1mm移動した際にヘリウムガスを電離するのに十分なエネルギーを得ることができる計数管中心からの距離を求めよ. W値24.6eV.

Report 3

- P-10ガス1気圧を満たした陽極半径0.003cm, 陰極半径1.0cmの比例計数管がある. 下表のDiethornパラメータを用いて, ガス増幅率を1000とする電圧を求めよ.
- 同じ電圧で, 陽極半径を2倍にした場合, 増幅率の変化はどのようなになるか. また, 陽極半径を変えずに陰極半径を2倍にした場合, 増幅率の変化はどのようなになるか.

表 6.1 比例ガス用ダイソーンパラメータ (式 (6.8) 参照)

混 合 ガ ス	$K \times 10^{-4}$ (V/(cm·atm))	ΔV (eV)
90%Ar, 10%CH ₄ [P-10]	4.8	23.6
95%Ar, 5%CH ₄ [P-5]	4.5	21.8
100%CH ₄ (methane)	6.9	36.5
100% C ₃ H ₈ (propane)	10.0	29.5
96%He, 4%isobutane	1.48	27.6
75%Ar, 15%Xe, 10%CO ₂	5.1	20.2
69.4%Ar, 19.9%Xe, 10.7%CH ₄	5.45	20.3
64.6%Ar, 24.7%Xe, 10.7%Co ₂	6.0	18.3
90%Xe, 10%CH ₄	3.62	33.9
95%Xe, 5%CO ₂	3.66	31.4

エネルギー分解能

- 放射線によって比例計数管内に生成される電荷Q

$$- Q = n_0 e M \quad n_0 : \text{イオン対数} \quad M = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} A_i \quad \text{平均増幅率}$$

$$\left(\frac{\sigma_Q}{Q} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{n_0}}{n_0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_M}{M} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{n_0}}{n_0} \right)^2 + \frac{1}{n_0} \left(\frac{\sigma_A}{A} \right)^2 \quad (\sigma_M^2 = \frac{1}{n_0} \sigma_A^2)$$

$$\sigma_{n_0}^2 = F n_0 \quad \left(\sigma_{n_0} / n_0 \right)^2 = F / n_0 \quad F : 0.1 \sim 0.2.$$

$$\left(\sigma_A / A \right)^2 = 1/A + b \sim b. \quad b \sim 0.5.$$

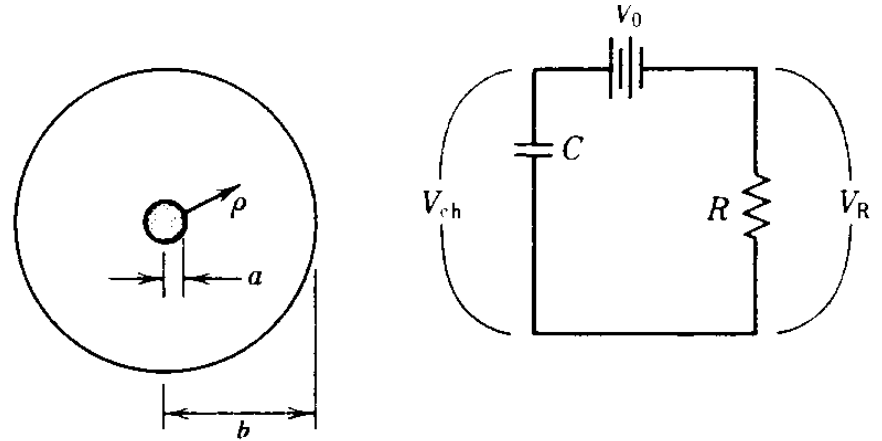
$$\sigma_Q / Q = \left\{ (F + b) / n_0 \right\}^{1/2} = \left\{ W(F + b) / E \right\}^{1/2}$$

信号パルスの時間特性

- 吸収エネルギー

$$\frac{dE}{dr} = e \cdot \frac{V_0}{r \ln(b/a)}$$

- 電子, イオンが吸収するエネルギー



1個のなだれによって誘起されるパルス波形を導くのに用いた円筒体系の断面図を左に示す。右は信号が発達してゆくのを示す等価回路であり、ここで C は検出器と付属回路の静電容量、 V_R は負荷抵抗 R に発生する信号電圧、 V_{ch} は検出器両端に残る電圧を表わしている。

$$E^- = - \int_{a+\rho}^a \frac{dE}{dr} dr = eV_0 \frac{\ln\{(a+\rho)/a\}}{\ln(b/a)}$$

$$E^-/E^+ : a=25\mu\text{m}, b=1\text{cm}, \rho=3\mu\text{m} \text{ で } 0.019$$

$$E^+ = \int_{a+\rho}^b \frac{dE}{dr} dr = eV_0 \frac{\ln\{b/(a+\rho)\}}{\ln(b/a)}$$

$$E^- + E^+ = eV_0$$

弾道欠損

イオンによる時刻 t までの吸収エネルギー

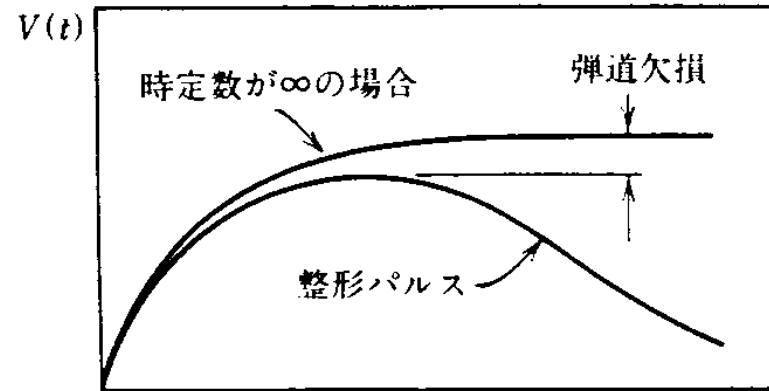
$$E^+(t) = eV_0 \frac{\ln\{r(t)/(a + \rho)\}}{\ln(b/a)}$$

時刻 t におけるイオンの位置

$$r(t) = \left\{ 2 \frac{\mu}{p} \frac{V_0 t}{\ln(b/a)} + a^2 \right\}$$

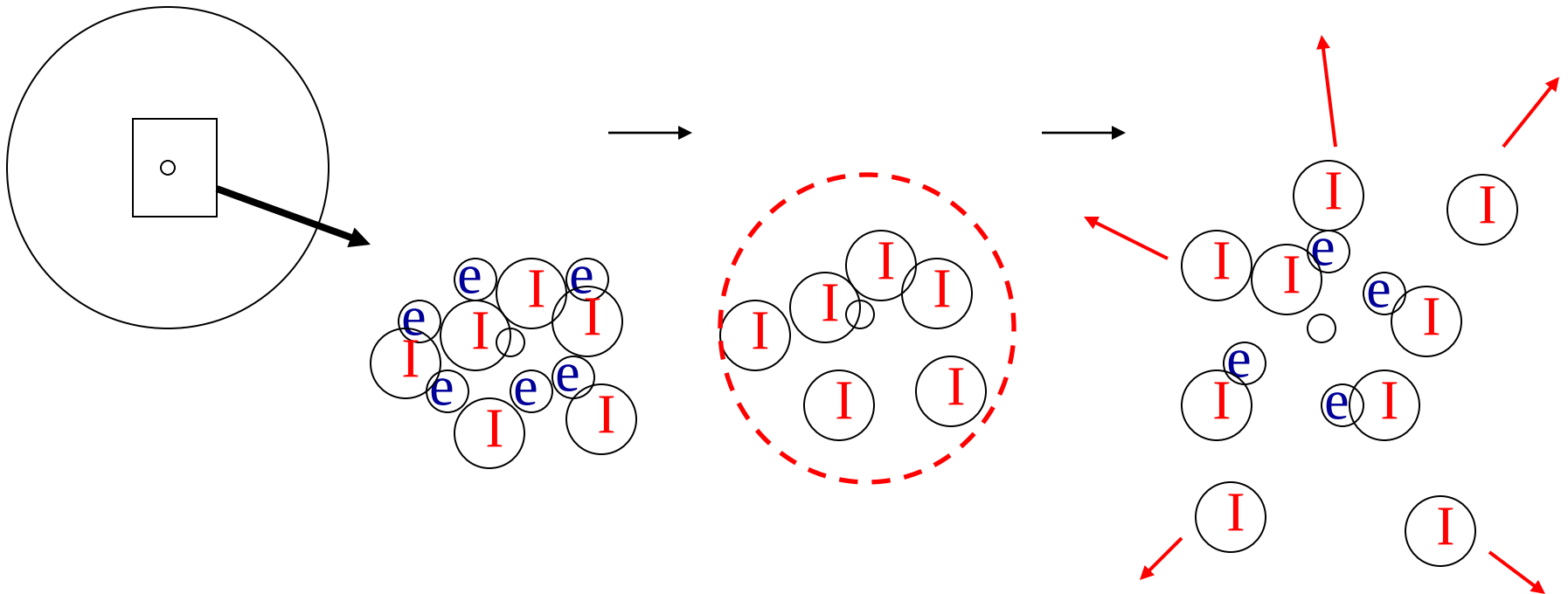
信号パルス

$$V_R(t) = \frac{e}{C \ln(b/a)} \ln \left\{ \frac{2\mu V_0 t}{a^2 p \ln(b/a)} + 1 \right\}^{1/2}$$



Geiger-Mueller計数管

- 出力波高が放射線のエネルギーに依存しない
 - 放射線の数，計数率を測定する



GM管の特性

- 不感時間, 分解時間, 回復時間

- 数え落とし

- 分解時間 τ (s)

- 1秒当たりの計数 n (個)

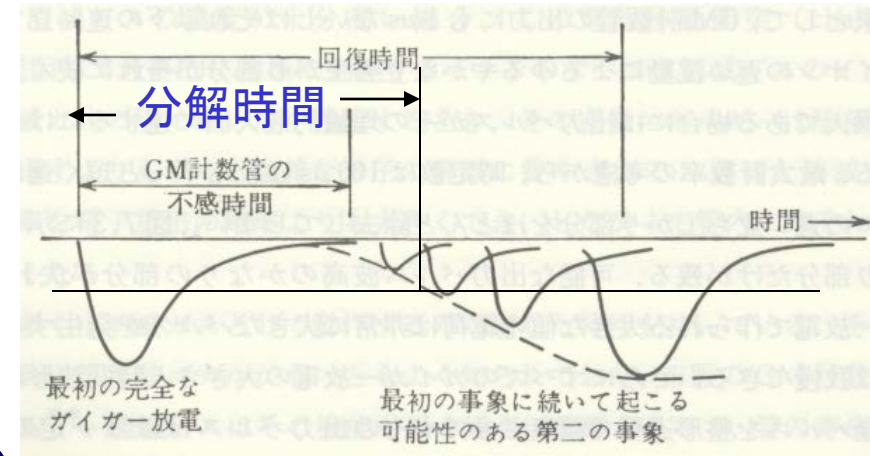
- 時間 $n\tau$ の間, 動作しない

- 正味の動作時間 $1-n\tau$

- 計数 $n=n_0(1-n\tau)$

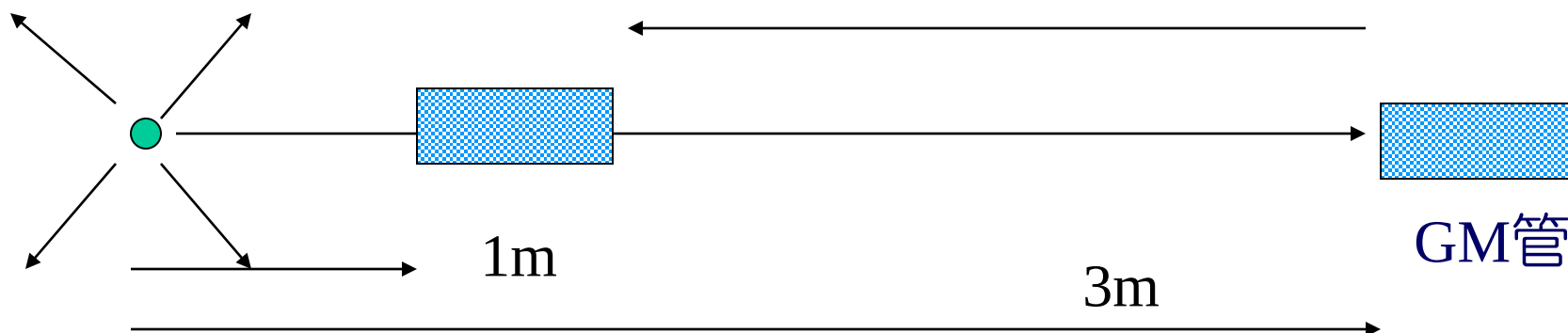
- 入射放射線数

- 分解時間: $100\mu\text{s}$ 程度



$$n_0 = \frac{n}{1 - n\tau}$$

- ある密封点線源から3.0m離れた所にGMサーベイメータをおいて測定し，毎秒100カウン트의計数率を得た．1.0mのところで測定すると，予想される計数率は，いくらか．ただし，このGM計数管の分解時間は $100\mu\text{s}$ とする．



- 100カウント毎秒での数え落としの確率は、 $100 \times 100 \times 10^{-6} = 10^{-2}$ であり、無視できる。
- 真の計数率 n_0 は、距離の2乗に反比例するので、1mの位置での n_0 は $n_0 = 100\text{cps} \times 3^2 / 1^2 = 900\text{cps}$
- 実際の計数率を n 、分解時間を τ とすると、 $n_0 = n / (1 - n\tau)$,
 $900 = n / (1 - n \times 100 \times 10^{-6})$
- $n = 826$

