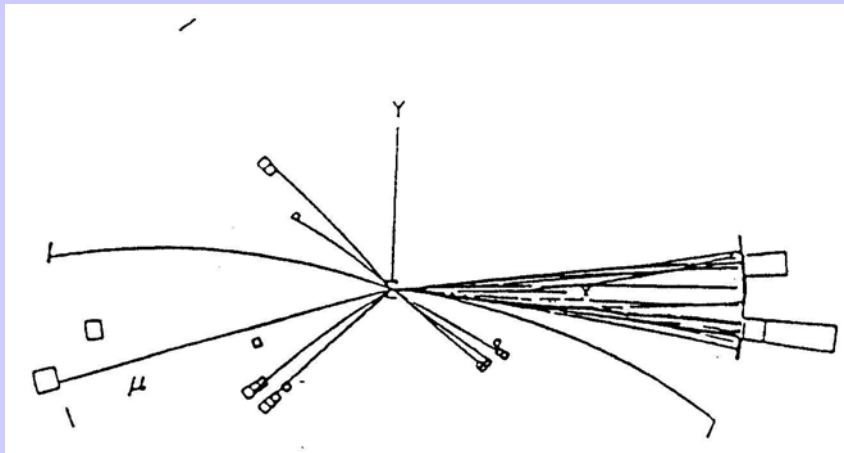


Pomiar torów cząstek

- **Cel**
 - **Pomiar wierzchołków oddziaływań**
 - pomiar czasów życia
 - preselekcja oddziaływań wybranej klasy
 - **Badanie topologii przypadków**
 - krotności
 - rozkłady kątowe
 - Jety
 - **Pomiar pędów (ładunku)**
 - spektrometry magnetyczne
 - **Pomoc w identyfikacji cząstek (e , μ , γ)**
 - liczniki Czerenkowa
 - kalorymetry
 - spektrometry mionów

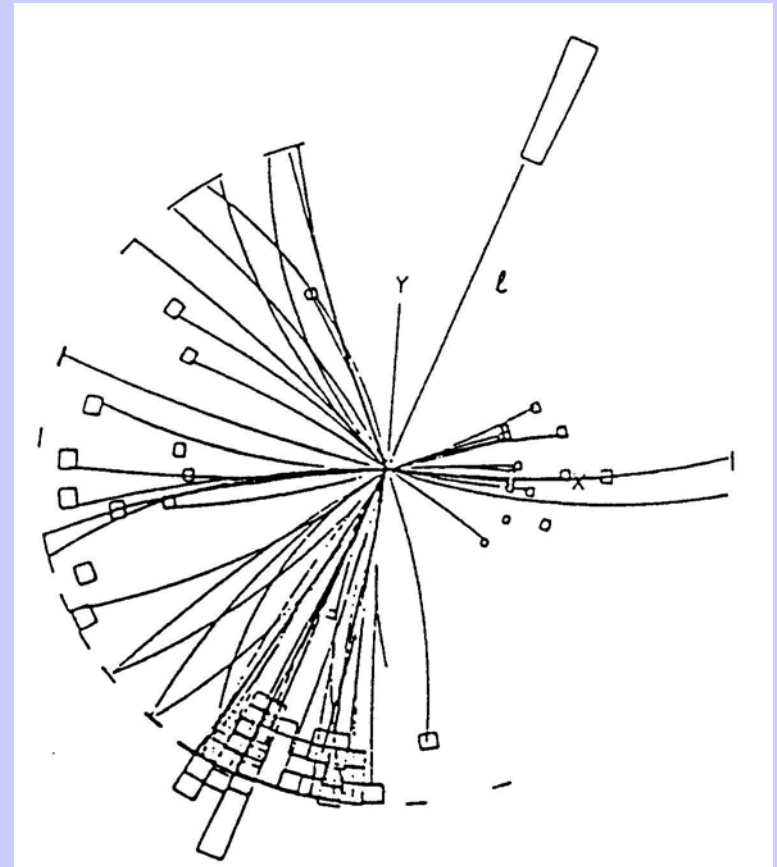
Topologia przypadków

- Różne topologie przypadków rozpadu cząstki Higgsa (z wiodącym leptonem)



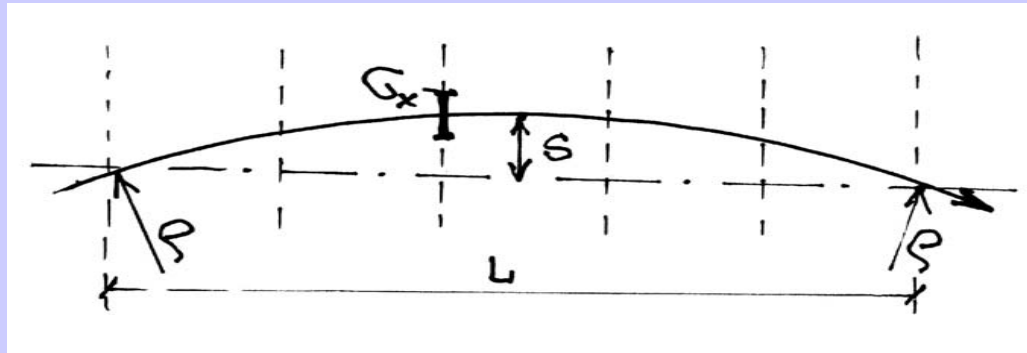
- Higgs $\rightarrow$ WW

- Mixed EW-QCD Higgs



Pomiar pędów cząstek

- Pomiar zakrzywienia w polu magnetycznym



$$p = 0.3 \cdot B \cdot \rho$$

$$\rho = L^2 / 8s$$

$$p = 0.3 \cdot B \cdot L^2 / 8s$$

$$|\delta p / p| = \sqrt{A_N \cdot \sigma_x / L^2 \cdot p / 0.3 B}$$

$$A_N = 720 / (N + 5)$$

GeV/c

B – natężenie pola magnet. w T

ρ - promień krzywizny toru w m

s – ugięcie toru (sagitta)

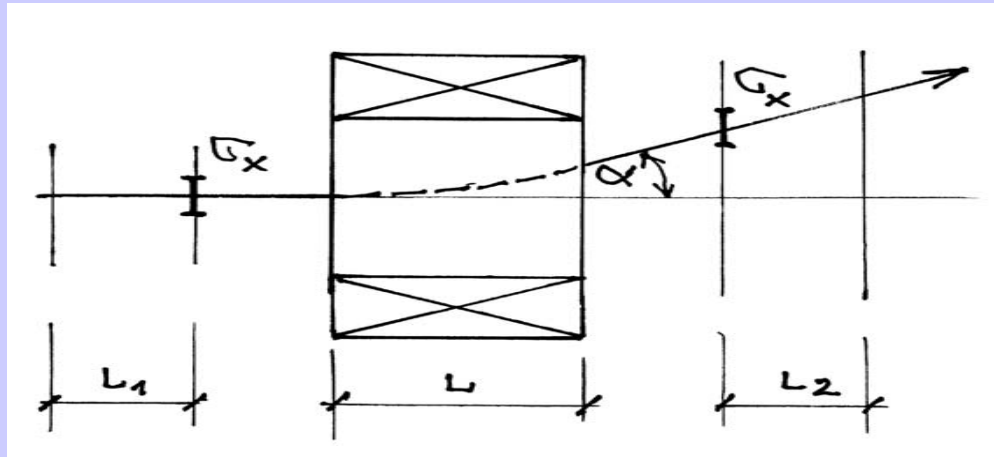
dokładność pomiaru pędu

σ_x – dokładność pomiaru współrzędnej toru
dla dużej ilości punktów pomiarowych

dla $p = 1$ GeV/c, $B = 1$ T, $L = 1$ m, $\sigma_x = 200$ μ m, $N = 10$, $dp/p_{\text{meas}} \approx 0.5\%$

Pomiar pędów cząstek

- Zdolność rozdzielcza spektrometru magnetycznego



$$\Delta p/p = -p \cdot \Delta \alpha / e \cdot B \cdot L$$

$$\Delta \alpha = \sigma_x \cdot \sqrt{1/L_1^2 + 1/L_2^2}$$

- Rozpraszanie wielokrotne (Coulombowskie)

$$\Theta_0 = 13.6 \text{ MeV} / \beta c p \cdot z \cdot \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

z – ładunek cząstki

x/X_0 – grubość mat. w długościach rad.

$$dp/p_{MS} \approx 0.05/B \cdot \beta \cdot \sqrt{X_0 \cdot L} \quad \text{w Ar dla } B=1\text{T}, L=1\text{m}, dp/p_{MS} \approx 0.5\%$$

Detektory gazowe

Zjawiska w gazach

- jonizacja pierwotna i wtórna
- ruch elektronów i jonów w polu elektrycznym
- wzmacnienie gazowe i wyładowania w gazie
- kształtowanie się impulsu elektrycznego

Komory proporcjonalne i dryfowe

- komory proporcjonalne
- komory dryfowe

Komory projekcji czasowej

Komory mikropaskowe

Komory o małej odległości anoda-katoda

Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Jonizacja pierwotna i wtórna

- Straty na jonizację

$$dE/dx \sim z^2/\beta^2 \cdot [\ln \beta^2 \gamma^2/I^2 - \delta(\gamma)]$$

$$\beta\gamma = p/Mc$$

I – średni potencjał jonizacji

$$I \approx 16 (Z_{\text{med}})^{0.9} \text{ eV}, I_H \approx 13.5 \text{ eV}$$

- Ilość powstałych par jonów

$$n_{\text{całk}} = \Delta E/w_i$$

w_i – energia potrzebna na wyprodukowanie pary jonów

- Dla mieszanin

$$n_{\text{całk}} = \sum \Delta E_j/w_j \cdot p_j$$

p_j – zawartość parcjalna składników

Detektory gazowe

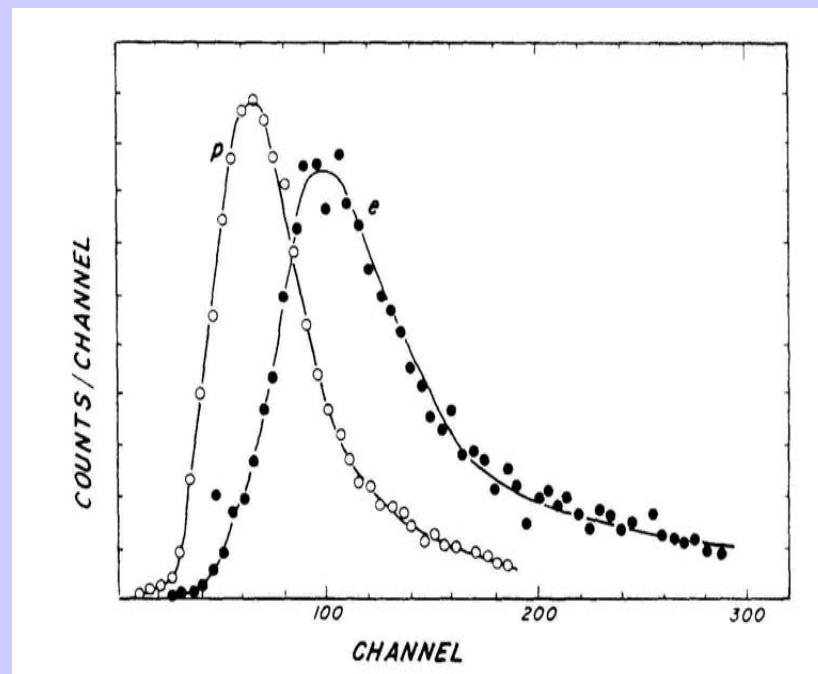
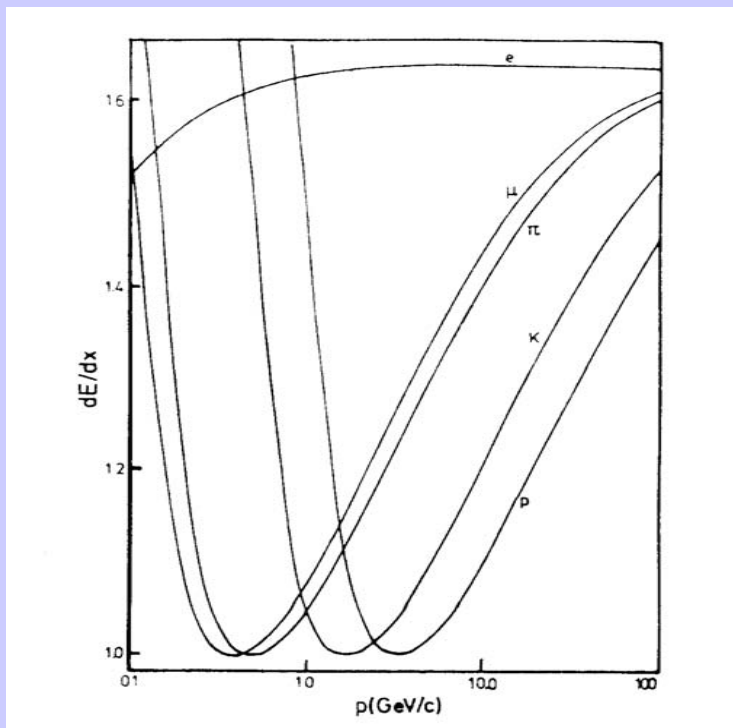
- zjawiska w gazach -

Straty na jonizację – cząstki naładowane

najbardziej prawdopodobne dE/dx Ar +10% CH₄

$dE/dx_{\min} \approx 2 \text{ MeV g/cm}^2$ dla $\beta\gamma \approx 3$ p – 3 GeV/c, e – 2 GeV/c

rozkład Landau'a



Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Jonizacja pierwotna i całkowita

Gaz		dE/dx (eV/cm)	I (eV)	w _i j _p (eV) (par/cm)	n _p (par/cm)	
H ₂		360	21.8	37	4	10
He	320	41.8	41	8	8	
Ne	750	13.7	36			
Ar		2440	18.8	26	29	86
BF ₃		3300		44		
Xe		3570		22		
CO ₂		1500		34	34	44
C ₄ H ₁₀		5300		31	46	171

Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Absorbcja kwantów gamma

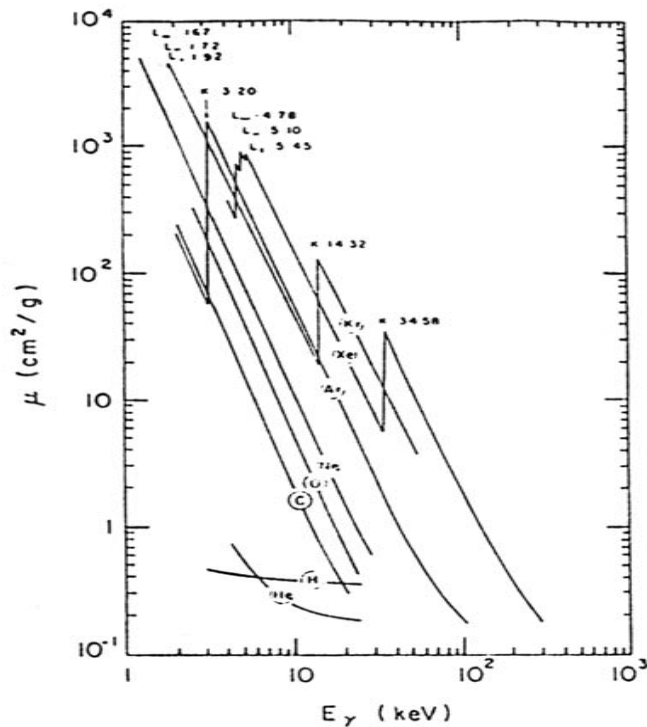


Fig. 11 Absorption coefficient versus energy of photons, in several gases used in proportional counters. Carbon is included, to allow the calculation of absorption in hydrocarbons. The figure has been drawn using the tabulations of Ref. 13.

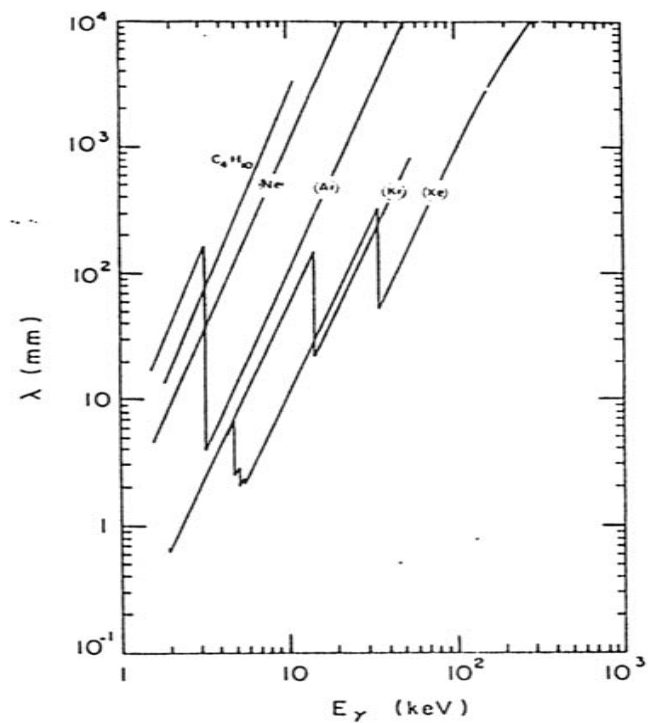
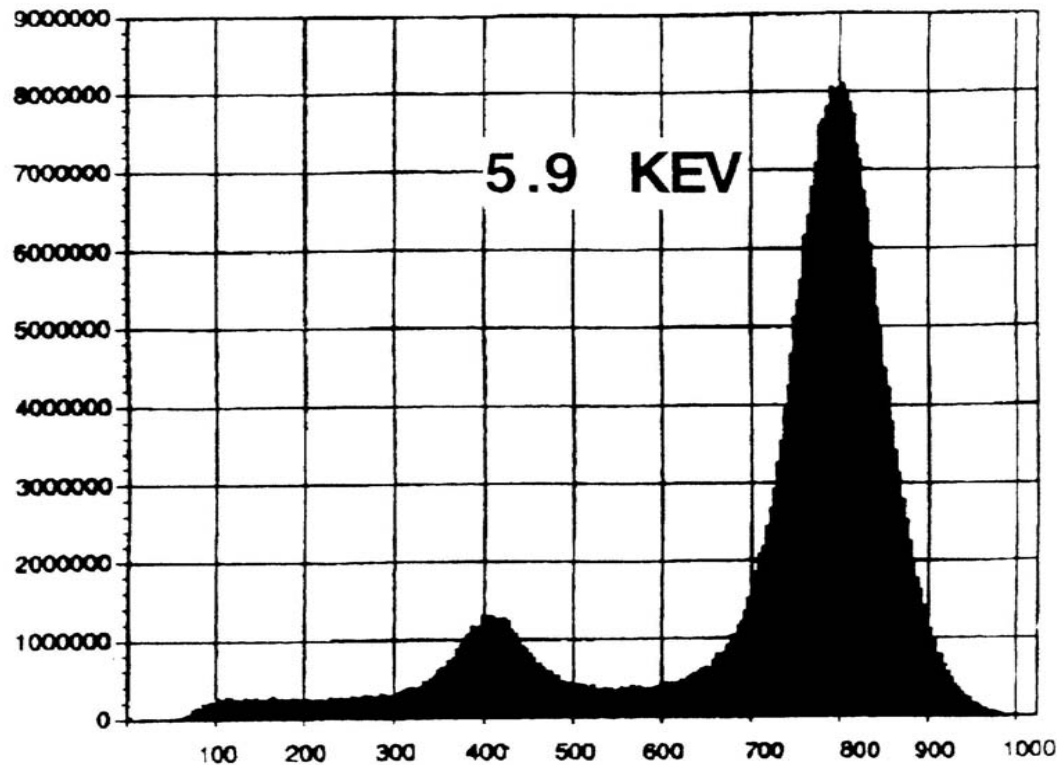


Fig. 12 Mean free path for absorption in several gases at normal conditions, for photons of energy E_γ (from the tabulation in Ref. 13)

Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Absorbcja kwantów gamma



Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Jonizacja pierwotna - statystyka (Poisson)

- **Prawdopodobieństwo pojawienia się k - elektronów przy średniej n ($n=n_p$)**

$$P_k^n = (n_k/k!).e^{-n}$$

np. dla Ar+30% Isobutan $n_p = 34$ par/cm; niewydajność

$$P_0^{34} \approx 10^{-15} = 1-\varepsilon$$

ale dla 1 mm

$$P_0^{3.4} \approx 3.3\% = 1-\varepsilon$$

- **Prawdopodobieństwo znalezienia pary jonów w odległości x**

$$P_i = n.e^{-n.x}$$

daje informację o rozkładzie czasowym

Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Jonizacja pierwotna – elektrony δ

- Elektrony z dużym przekazem pędu
 - Powodują dalszą jonizację – duży sygnał (rozkład Landau'a)
 - Rozmywają informację o pierwotnym torze – zasięg, sygnał

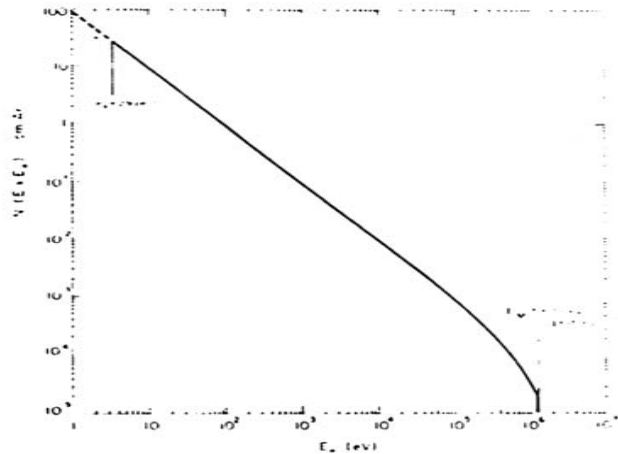


Fig. 4 Computed number of δ electrons ejected at an energy larger than or equal to E_0 , as a function of E_0 , in 1 cm of argon at normal conditions. The average number of primary ionizing collisions (29 per cm) and the maximum allowed energy transfer for 1 GeV/c protons are shown.

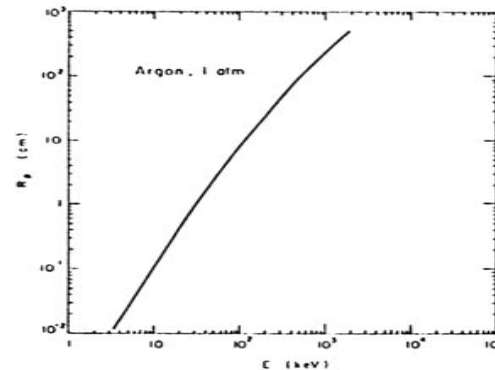


Fig. 5 Range of electrons in argon, at normal conditions as a function of energy, deduced from measurement in light materials.

Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Dryf elektronów i jonów w polu elektrycznym

- Ruchliwość

- $\mu = v/E$

- v – prędkość dryfu, E – natężenie pola elektrycznego

- dla jonów μ rzędu $1-10 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$; v rośnie liniowo z E

- dla elektronów μ rzędu $10^3-10^4 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$; nieliniowa zależność od E
– nasycenie

- Dryf w polu magnetycznym

- $E \parallel H \rightarrow v \parallel E$

- $E \perp H \rightarrow \text{tg } \alpha_H = 2vH/E$

- α_H – kąt Lorenz'a (w gazach może być znaczny)

- Dyfuzja

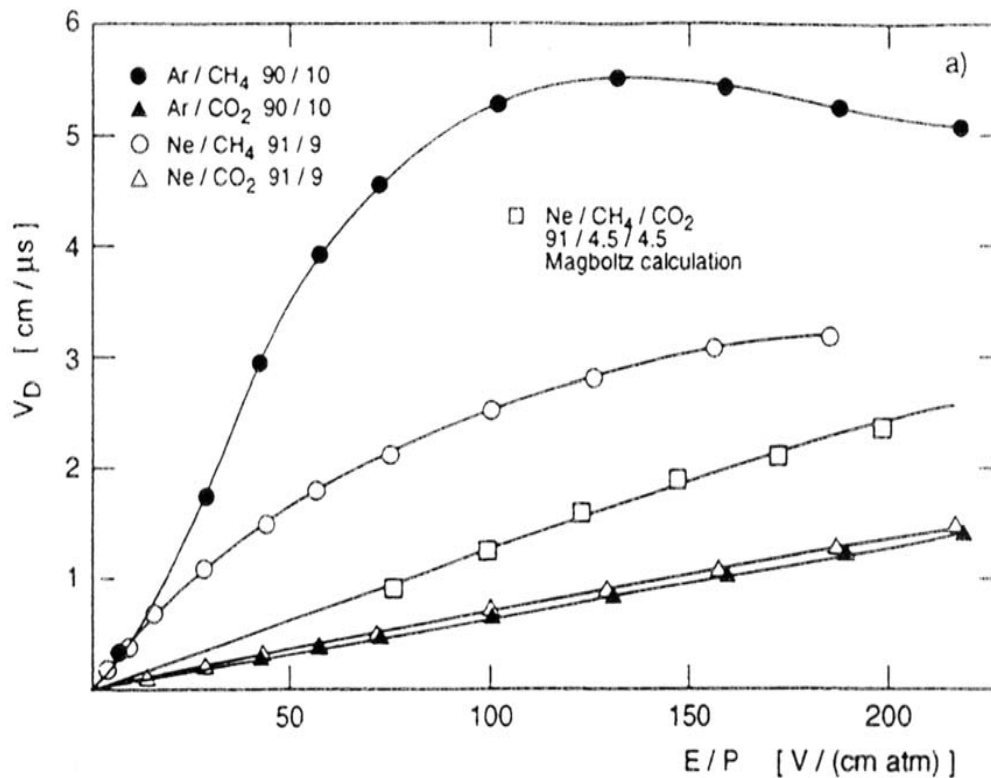
- $\sigma_x = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D/v}$

- D - współczynnik dyfuzji zależny od E/p

Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

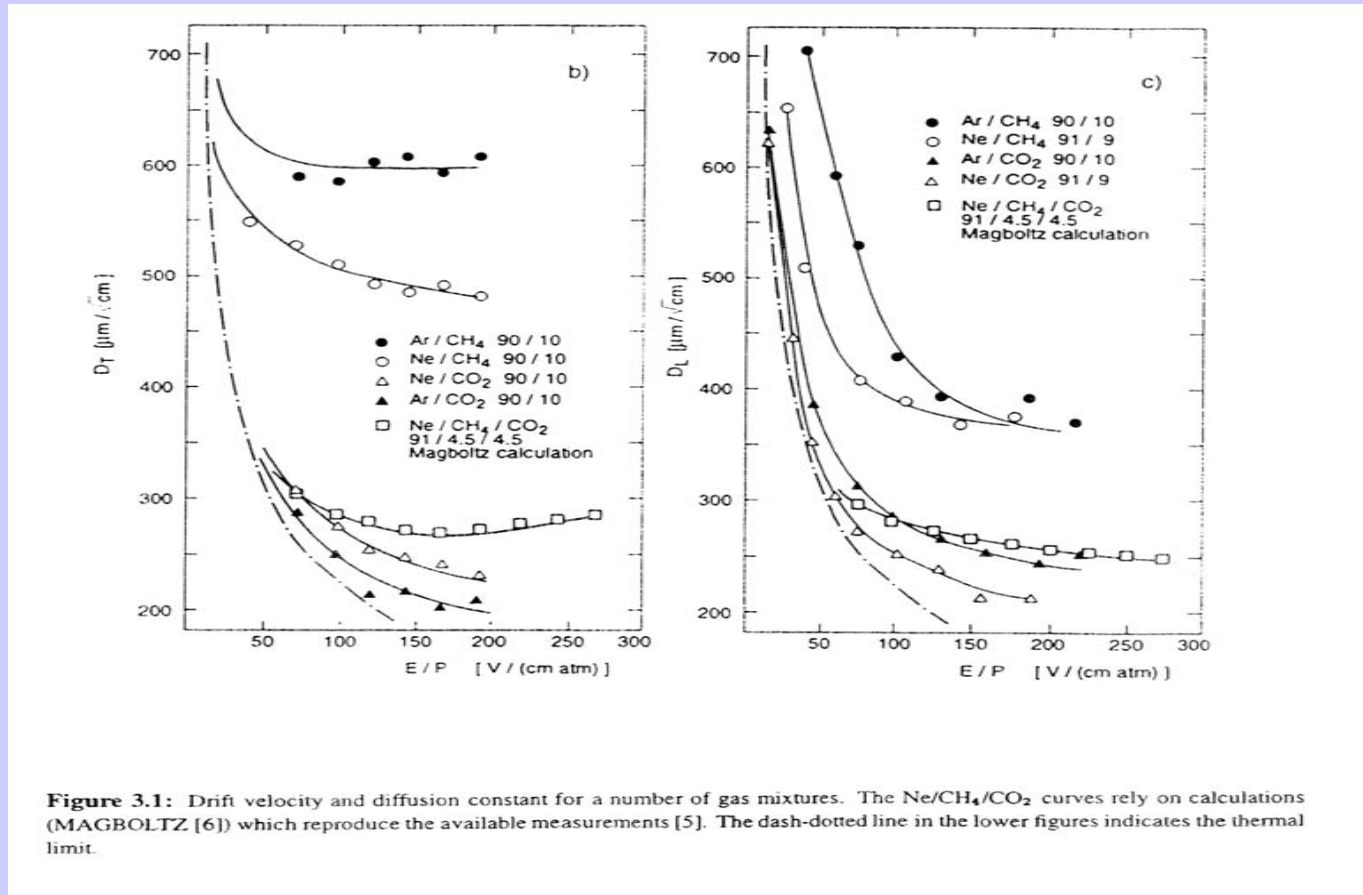
Dryf elektronów i jonów w polu elektrycznym



Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Dryf elektronów i jonów w polu elektrycznym



Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Wzmocnienie gazowe

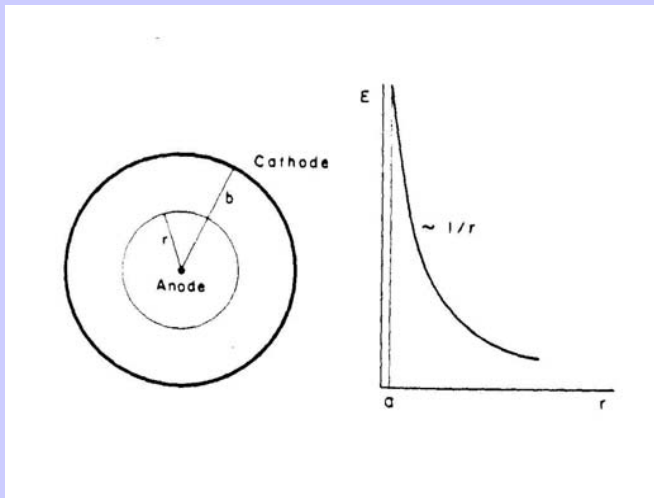
- Powielanie jonizacji w silnych polach elektrycznych
- Jeśli pierwotnie n_0 par jonów to po x cm
 - $N = n_0 e^{\alpha \cdot x}$
 - α - pierwszy współczynnik Townsend'a (liczba par jonów wyprodukowana przez 1 elektron na drodze 1 cm)
 - $1/\alpha$ - średnia droga swobodna
- Współczynnik wzmocnienia gazowego
 - $M = n/n_0 = e^{\alpha \cdot x}$
 $\alpha = f(E/p)$
 - W liczniku cylindrycznym, gdzie $\alpha = \alpha(x)$
 $M = \exp \left[\int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx \right]$
 - Przy dużych $n \cdot M$ (lokalnie $n \cdot M > 10^6$) obserwuje się efekt ładunku przestrzennego i redukcję współczynnika wzmocnienia gazowego

Detektory gazowe

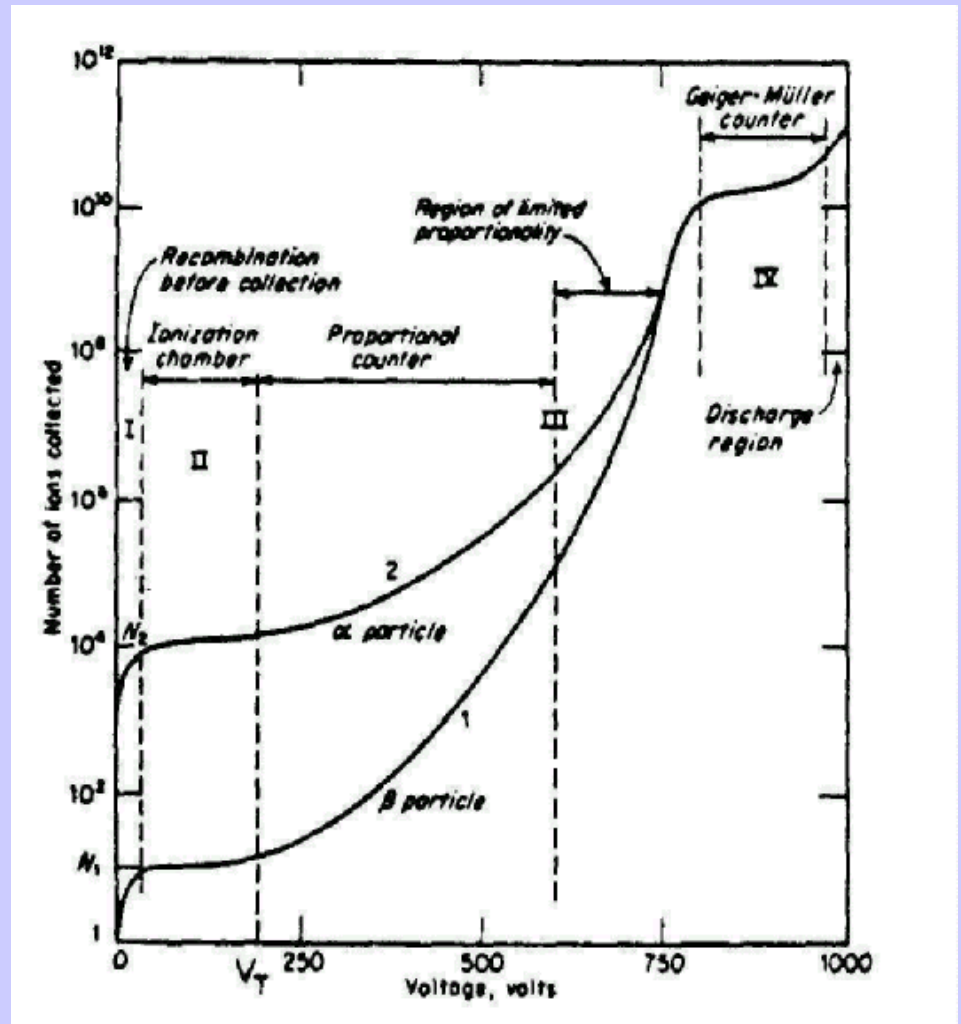
- zjawiska w gazach -

Wzmocnienie gazowe

Pole elektryczne
w cylindrycznym liczniku



$$E(r) = CV_0 / 2\pi\epsilon_0 \cdot 1/r$$



Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

Wyładowania „streamerowe”, Geigera-Mullera i iskrowe

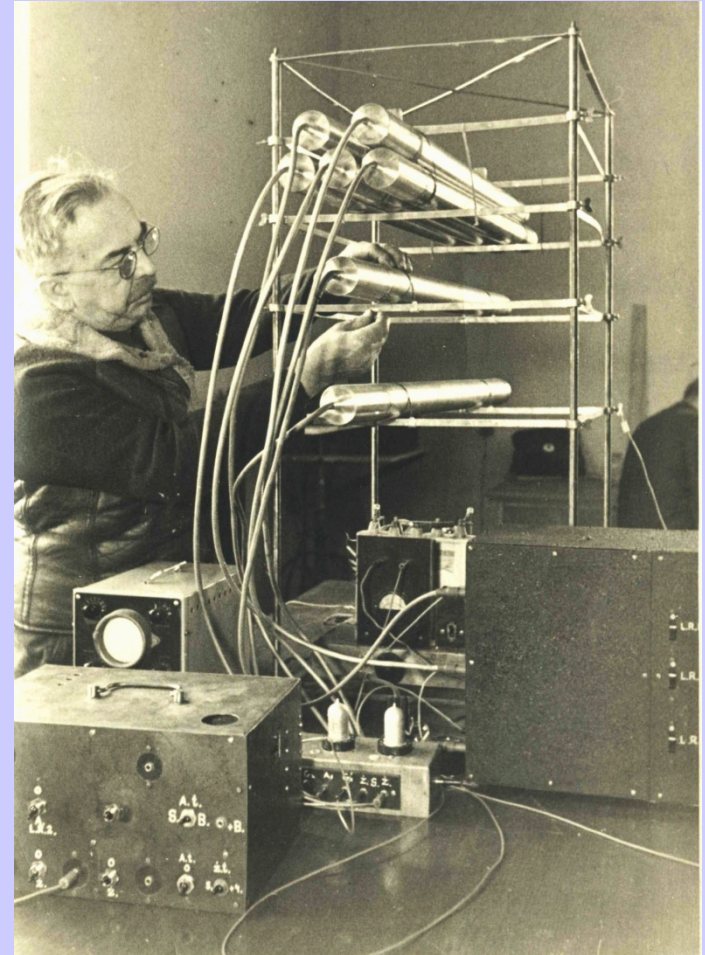
- **Rozwój lawiny nie tylko poprzez zderzenia elektronów, ale i poprzez fotony**
 - „streamery” rozwijają się w przypadku gdy silne pole elektryczne rozciąga się na większym obszarze przy anodzie, a mieszanina ma dobre własności „gaszące” (C_2H_6 , C_4H_{10})
 - przy jeszcze silniejszych polach wyładowanie rozchodzi się wzdłuż drutu anodowego – reżim G-M
 - wyładowanie iskrowe rozwija się między anodą i katodą w geometrii płaskiej
- **Ograniczanie wyładowań**
 - Domieszka składnika gaszącego
 - Rozdzielenie obszarów jonizacji i wzmocnienia
 - Ekranowanie
 - Dobór materiału katody (fotoefekt)

Detektory gazowe

- liczniki Geigera-Mullera-

Rozwój w latach 1940-60

- **Liczniki cylindryczne o dużych średnicach**
 - Zastosowanie domieszek („brudów”) gaszących wyładowanie
- **Wykorzystanie w badaniach promieniowania kosmicznego**
 - Hodoskopy licznikowe
 - Rzadkie zdarzenia
 - Duży sygnał



Detektory gazowe

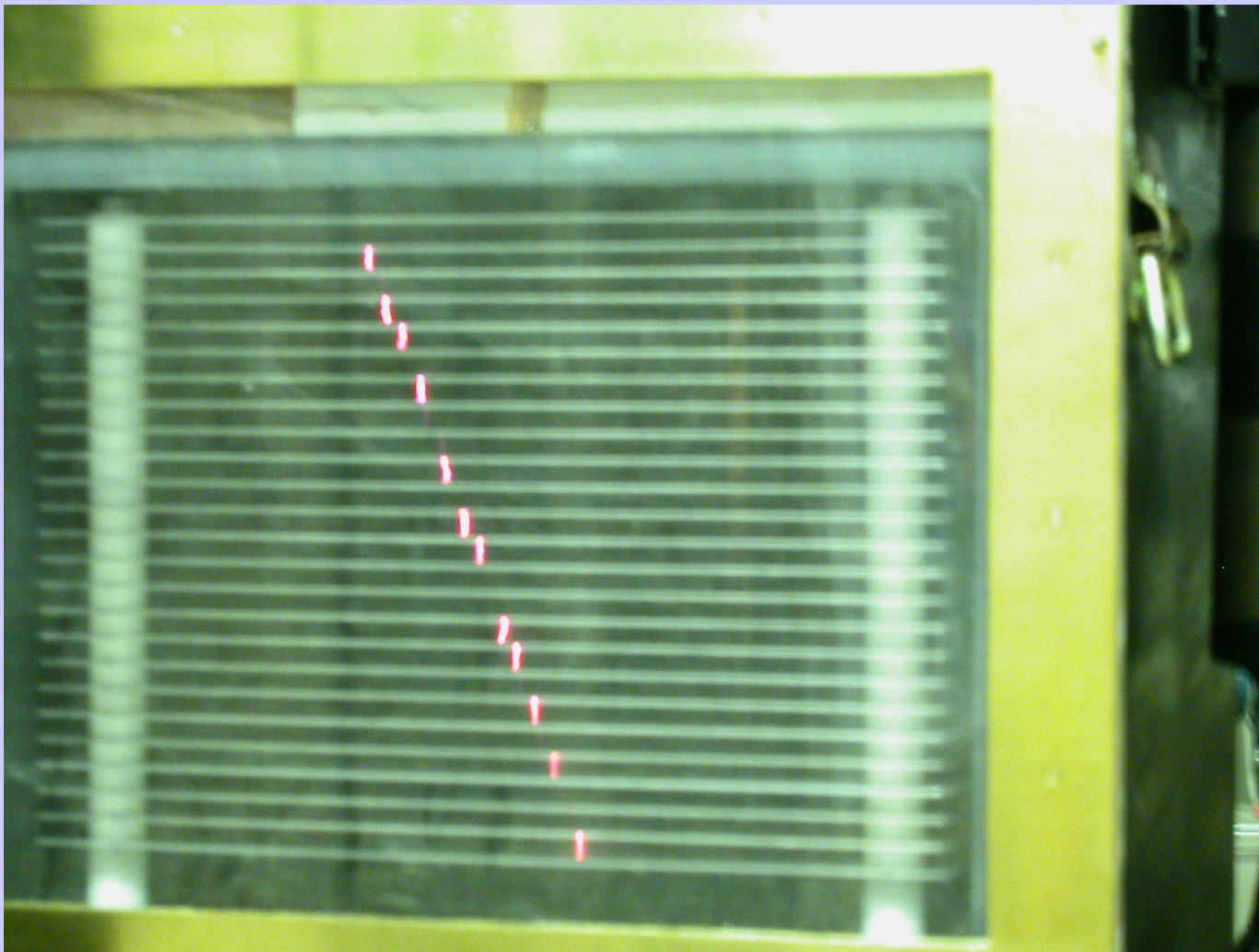
- komory iskrowe-

Rozwój w latach 1960-1970

- Pozwalały na rejestracje tylko wybranych przypadków („trygger”)
- Początkowo iskry były filmowane, w dalszej kolejności zastosowano odczyt „bezfilmowy”:
 - akustyczny
 - magnetyczny
 - magnetostrykcyjny
 - pojemnościowy
- **Wady tych komór:**
 - stosunkowo długi czas martwy (wyładowanie iskrowe kreuje bardzo dużą ilość jonów, które wymagają neutralizacji)

Detektory gazowe

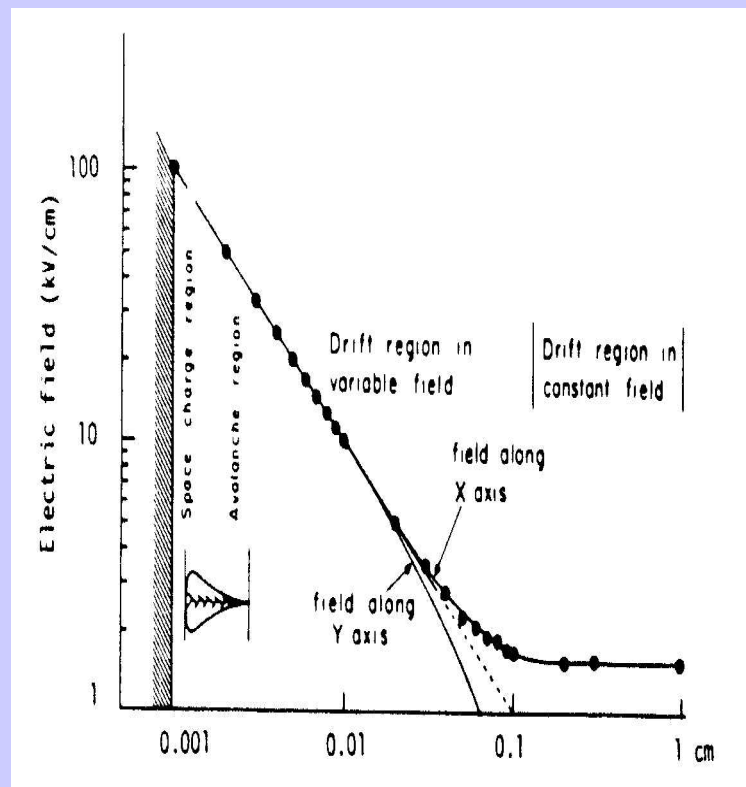
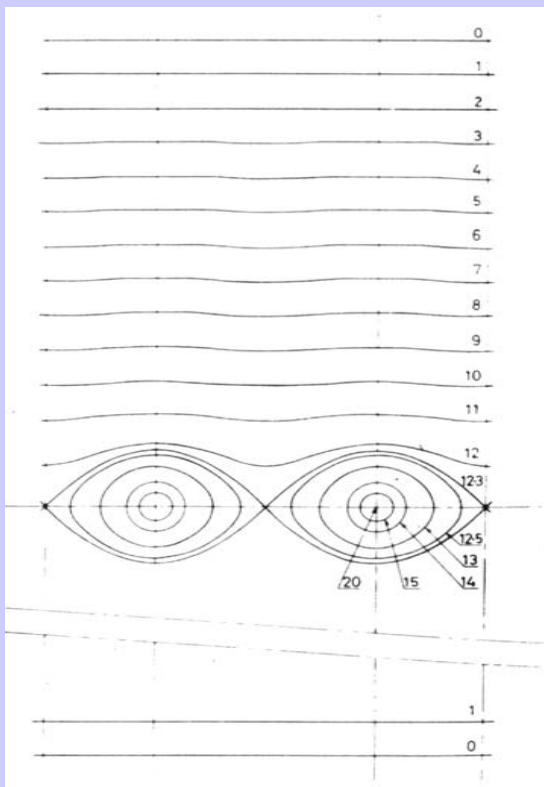
- komory iskrowe-



Detektory gazowe

- zjawiska w gazach -

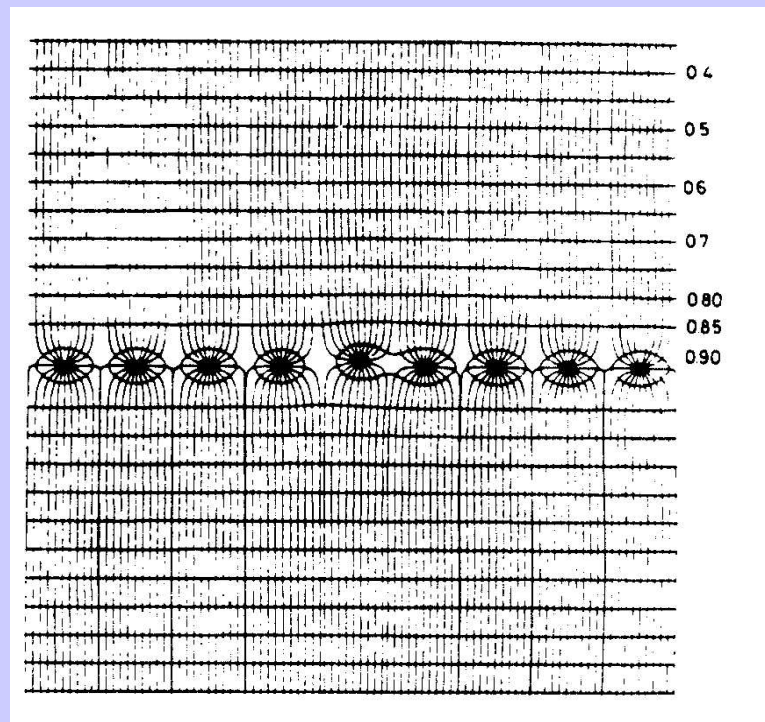
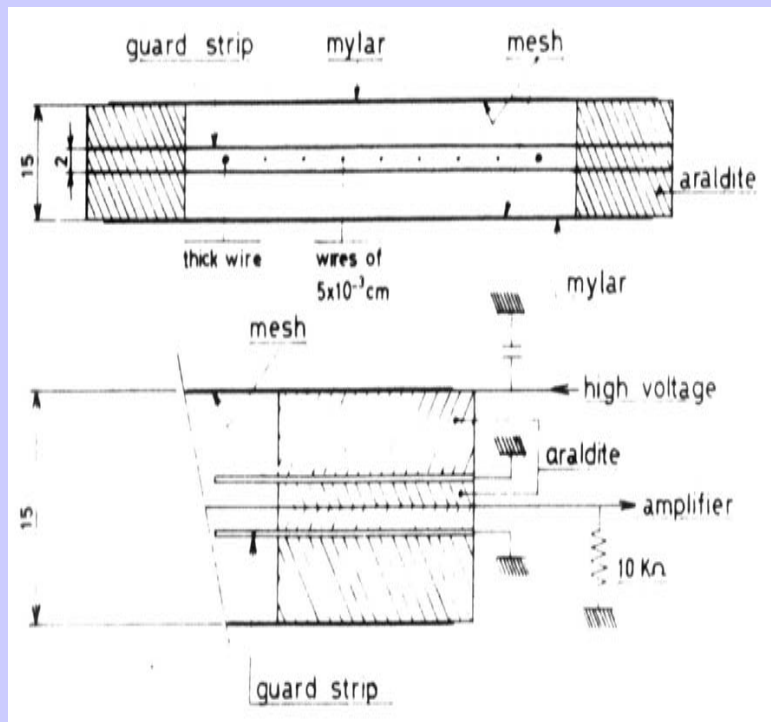
Wzmocnienie gazowe w liczniku cylindrycznym i w komorze proporcjonalnej



Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

Wzmocnienie gazowe w liczniku cylindrycznym i w komorze proporcjonalnej

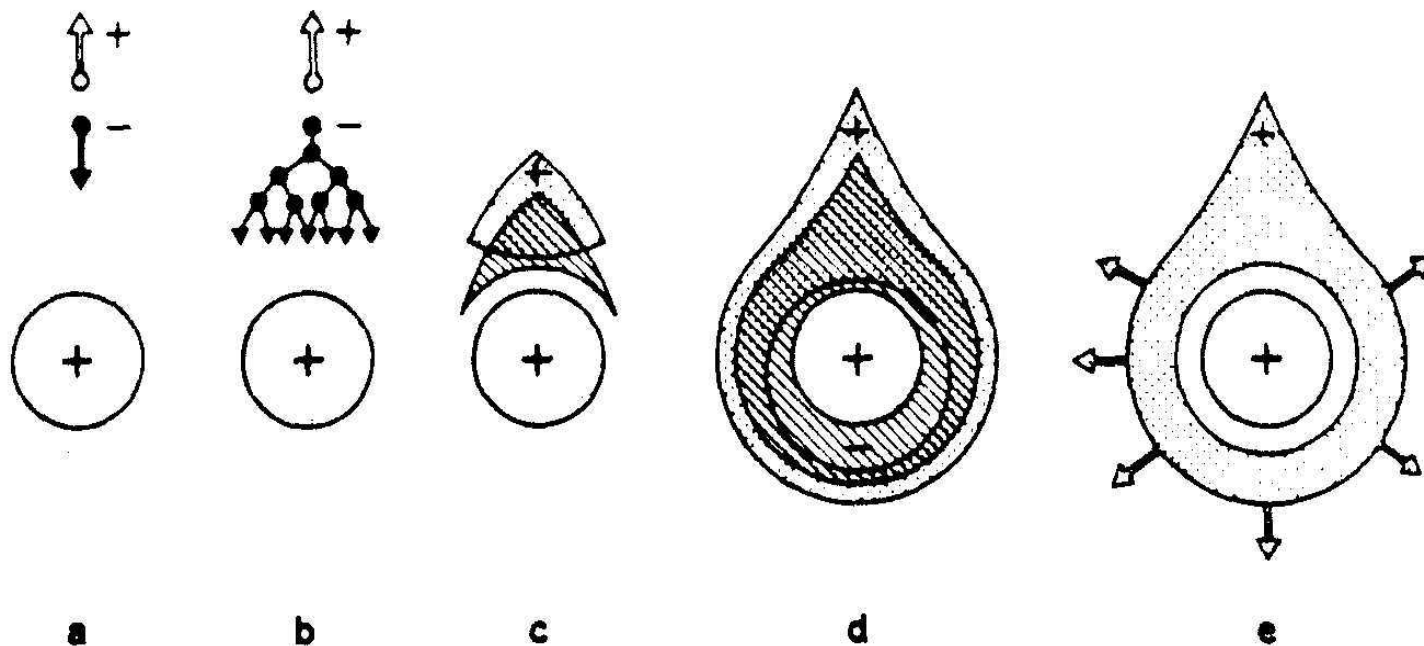


Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

Kształtowanie się impulsu elektrycznego

Pictorial, temporal development



Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

Kształtowanie się impulsu elektrycznego

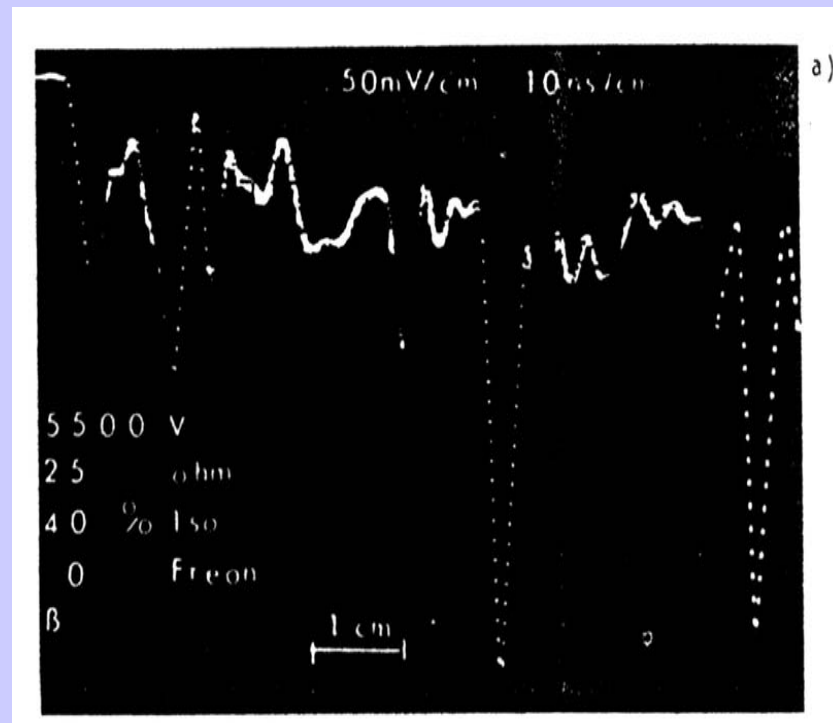
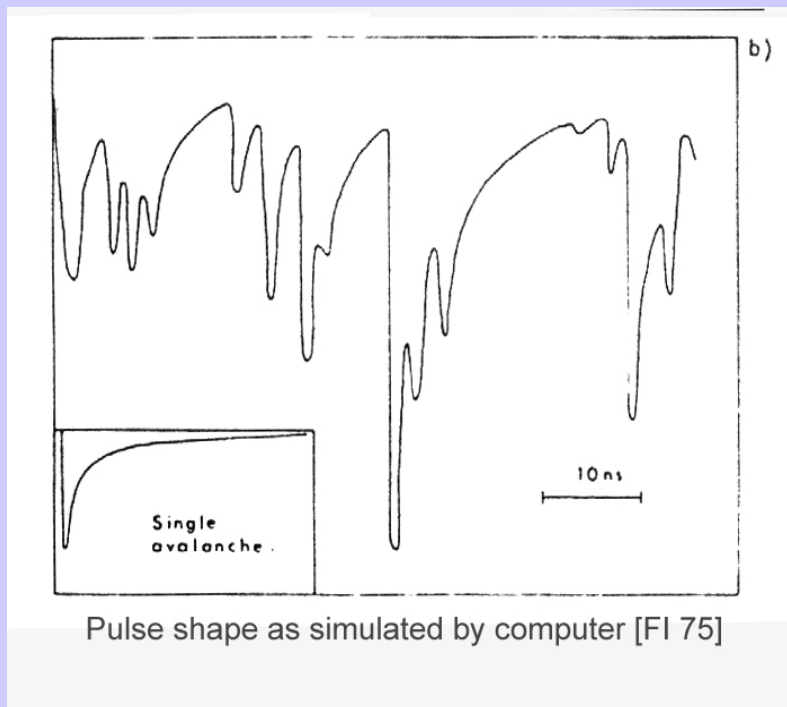
- Dla licznika cylindrycznego
 - $dv = Q/ICV_o \cdot dv/dr dr$
 - $V_{\text{(elektronów)}} = \int_a^{a+\lambda} dV = -Q/2\pi\epsilon_o l \cdot \ln(a+\lambda)/a$
 - $V_{\text{(jonów)}} = \int_{a+\lambda}^b dV = -Q/2\pi\epsilon_o l \cdot \ln b/(a+\lambda)$
 - λ - odległość od anody, gdzie powstaje lawina, $\lambda \approx 1\mu\text{m}$
 - a – promień anody licznika (drutu), $a \approx 10\mu\text{m}$
 - b – promień katody (cylindra), $b \approx 10\text{mm}$
 - $V_{\text{(elektronów)}}/V_{\text{(jonów)}} \approx 0.01$
- Sygnał jest wynikiem ruchu jonów dodatnich
 - $v^+(t) = -Q/4\pi\epsilon_o l \cdot \ln(1+t/t_o)$
- W komorze proporcjonalnej
 - $i(t) = q \cdot Q/V \cdot t_o/(t + t_o)$
 - $t_o \approx 1.8\text{ns}$ dla Ar (zależy od geometrii, napięcia, rodzaju gazu)
- Sygnały są niewielkie, a ich odczyt jest możliwy dzięki zastosowaniu wzmacniaczy na każdej elektrodzie

Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

Impuls elektryczny z komory proporcjonalnej

- Impulsy prądowe (na małym oporniku)

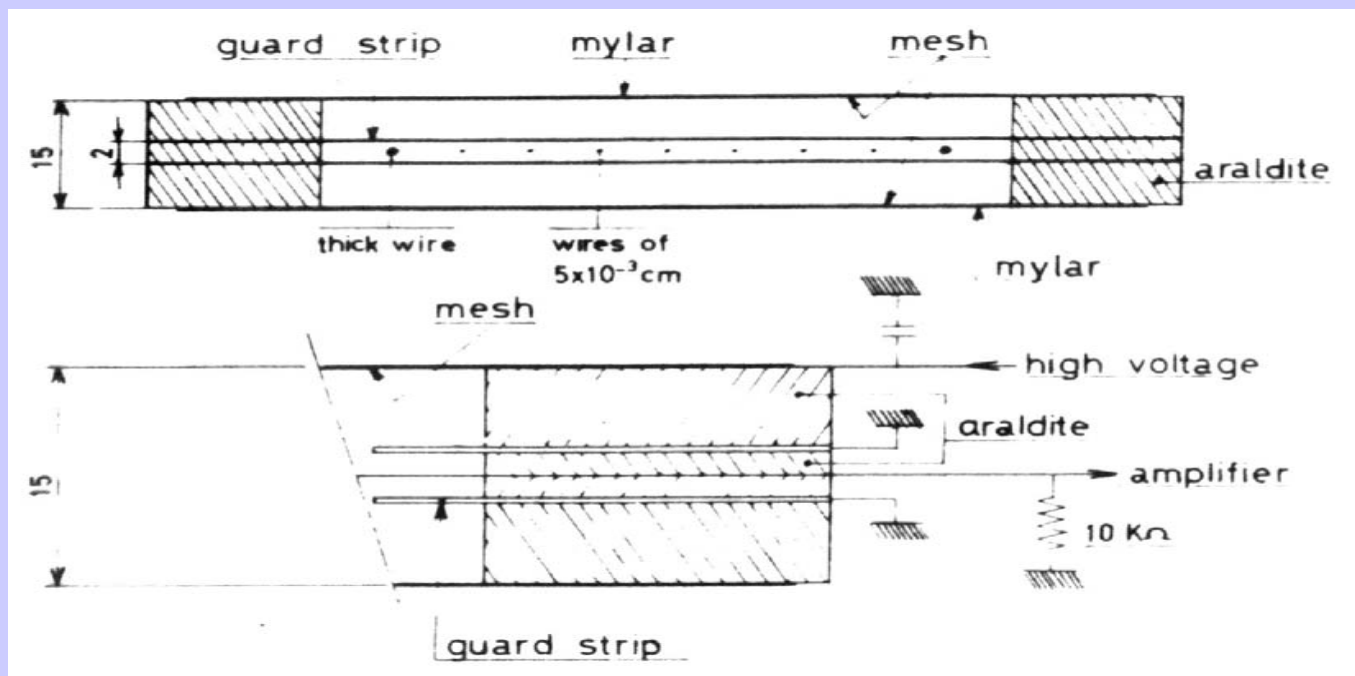


- Długie „ogony” są wynikiem małej mobilności jonów

Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

Pierwsze komory proporcjonalne



Mimo iż „proporcjonalne” to były stosowane głównie do pomiaru trajektorii cząstek

Przestrzenna zdolność rozdzielcza

$$\sigma_x = s/\sqrt{12}$$

- gdzie s jest odstępem między anodami

Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

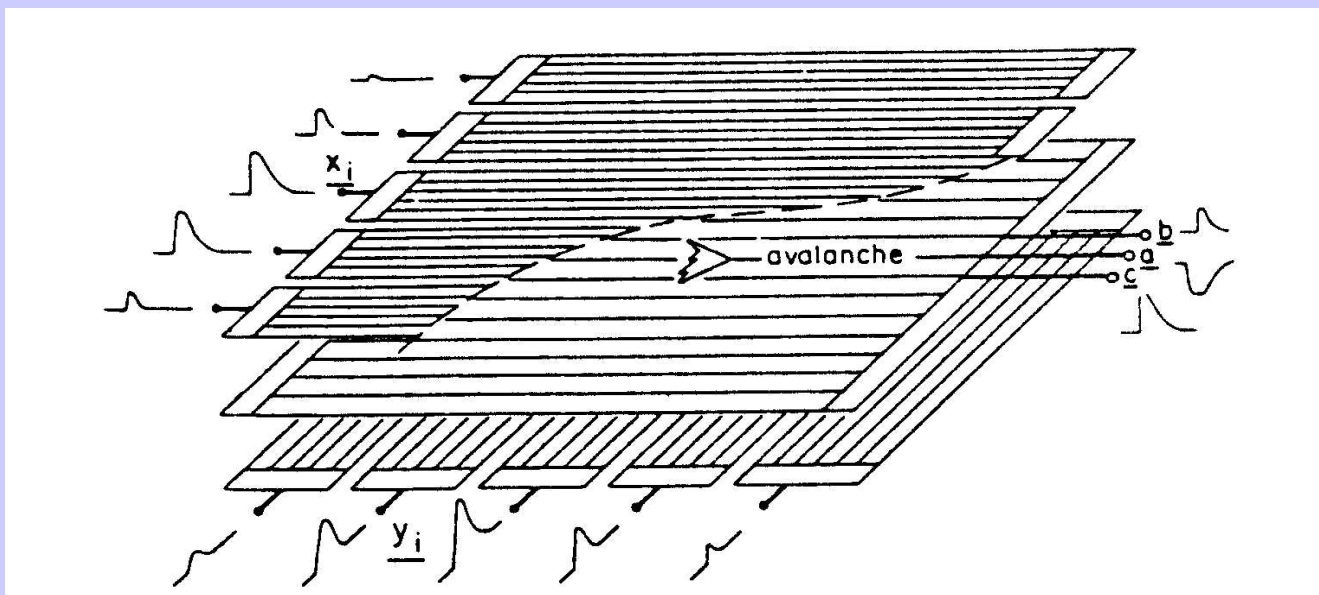
Pierwsze komory proporcjonalne w Polsce (IFJ Kraków)



Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

Komory z odczytem katodowym



Ładunki indukują się na anodzie i katodzie

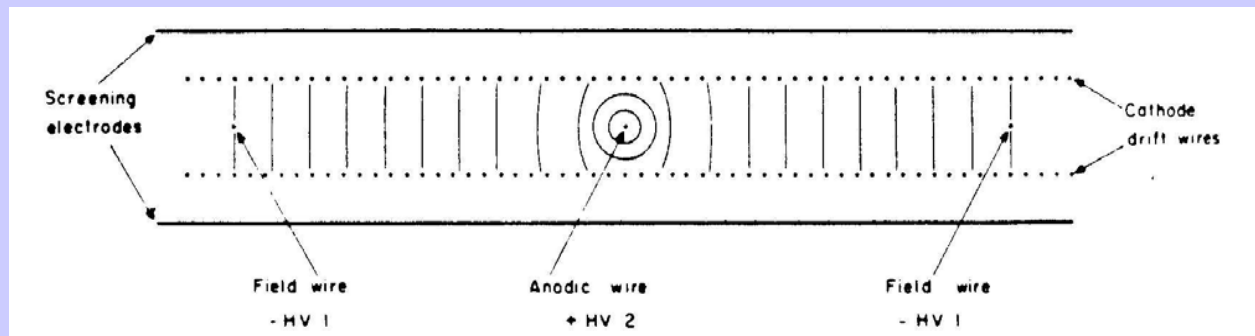
- Ładunek na anodzie ma swój odpowiednik na otaczających elektrodach
- Rozkład ładunku na katodzie ma szerokość proporcjonalną do odstępów anoda-katoda
- Przy katodzie dzielonej na „paski”, miejsce powstania lawiny można zrekonstruować metodą „ważenia” analogowych sygnałów

Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

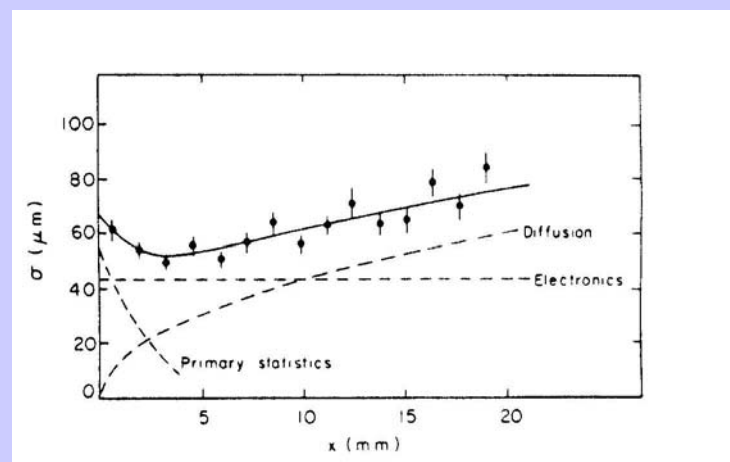
Komory dryfowe

Konstrukcja



Dokładność

- fluktuacje statystyczne
- dyfuzja
- parametry elektroniki



Detektory gazowe

- wielodrutowa komora proporcjonalna-

Wydajność komór i ich szумы

