

Dráhové detektory nabitých častíc

Základ prednášky:

H.-C. Schultz-Coulon, J. Stachel: The Physics of Particle Detectors

<http://www.kip.uni-heidelberg.de/~coulon/Lectures/Detectors/>

Ďalšia literatúra k štúdiu:

K. Kleinknecht: Particle detectors

<http://gruppo3.ca.infn.it/defalco/fisica/kleinknecht.pdf>

K. Kleinknecht, Detectors for Particle Radiation, kniha

R. Bock, A. Vasilescu: Particle Data Briefbook

<http://www.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook/>

Eduard Kladiva, OSF ÚEF SAV, kladiva@saske.sk

Bethe-Blochova funkcia

energetické straty častice na jednotku dráhy v jednotkách hustoty

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] [\cdot \rho]$$

density

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$

$$N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$$

[Avogadro's number]

$$T_{\max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 / (1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2)$$

[Max. energy transfer in single collision]

$$r_e = e^2 / 4\pi \epsilon_0 m_e c^2 = 2.8 \text{ fm}$$

[Classical electron radius]

$$m_e = 511 \text{ keV}$$

[Electron mass]

z : Charge of incident particle

M : Mass of incident particle

$$\beta = v/c$$

[Velocity]

Z : Charge number of medium

A : Atomic mass of medium

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

[Lorentz factor]

I : Mean excitation energy of medium

δ : Density correction [transv. extension of electric field]

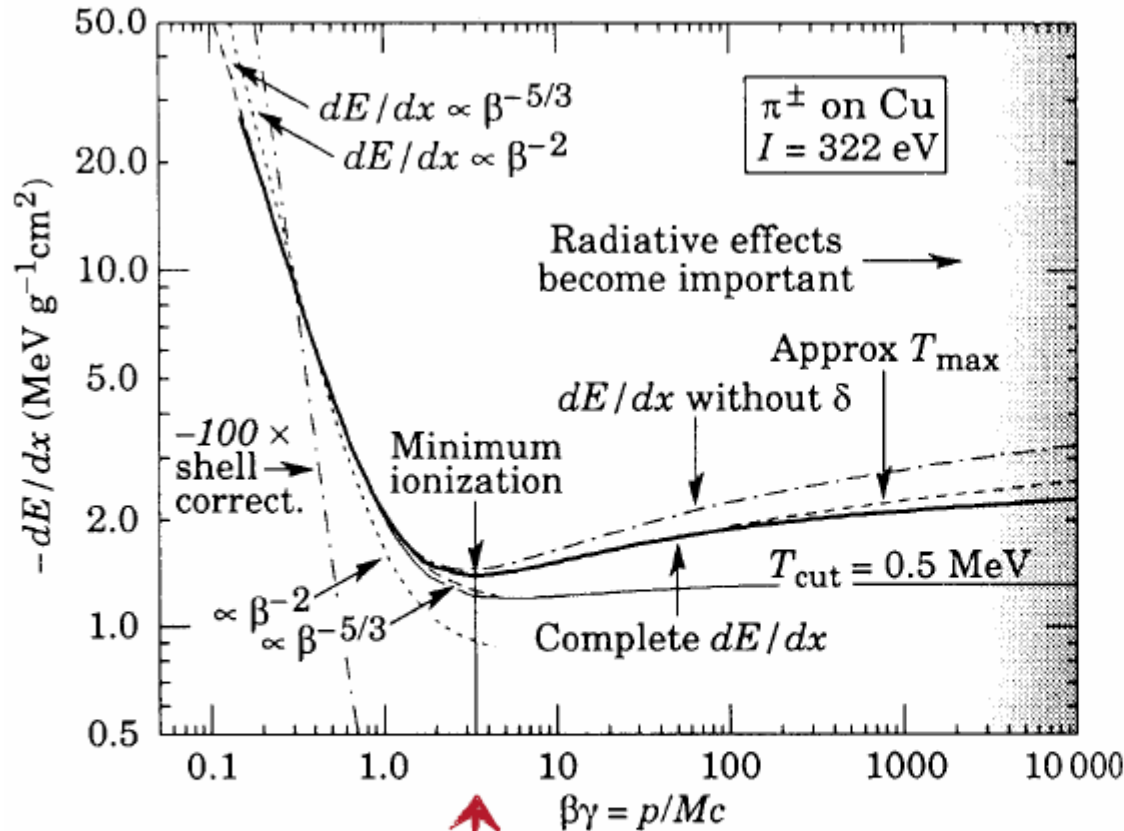
Validity:

$$.05 < \beta\gamma < 500$$

$$M > m_\mu$$

Energetické straty nabitej častice iónizáciou

MIP = minimálne ionizujúce častice



$\beta\gamma = 3-4$

Minimum ionizing particles (MIP): $\beta\gamma = 3-4$

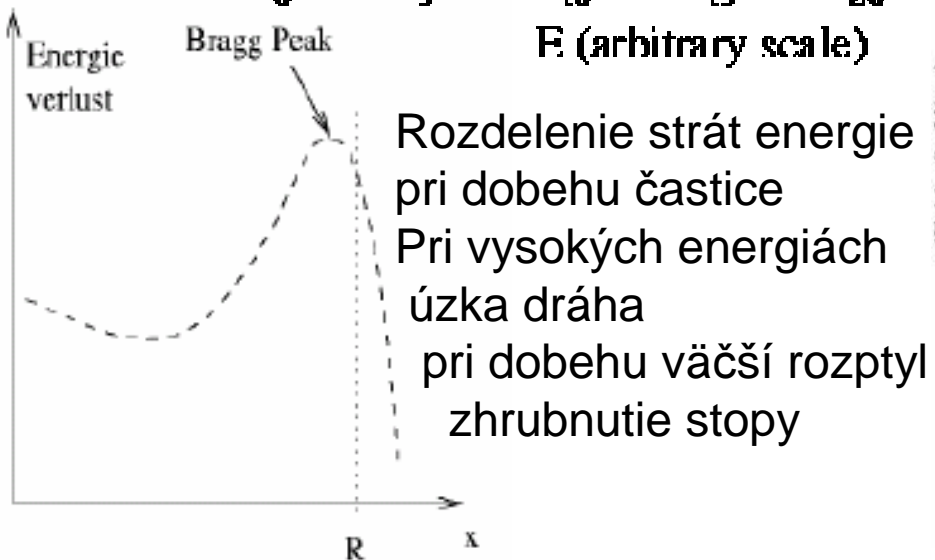
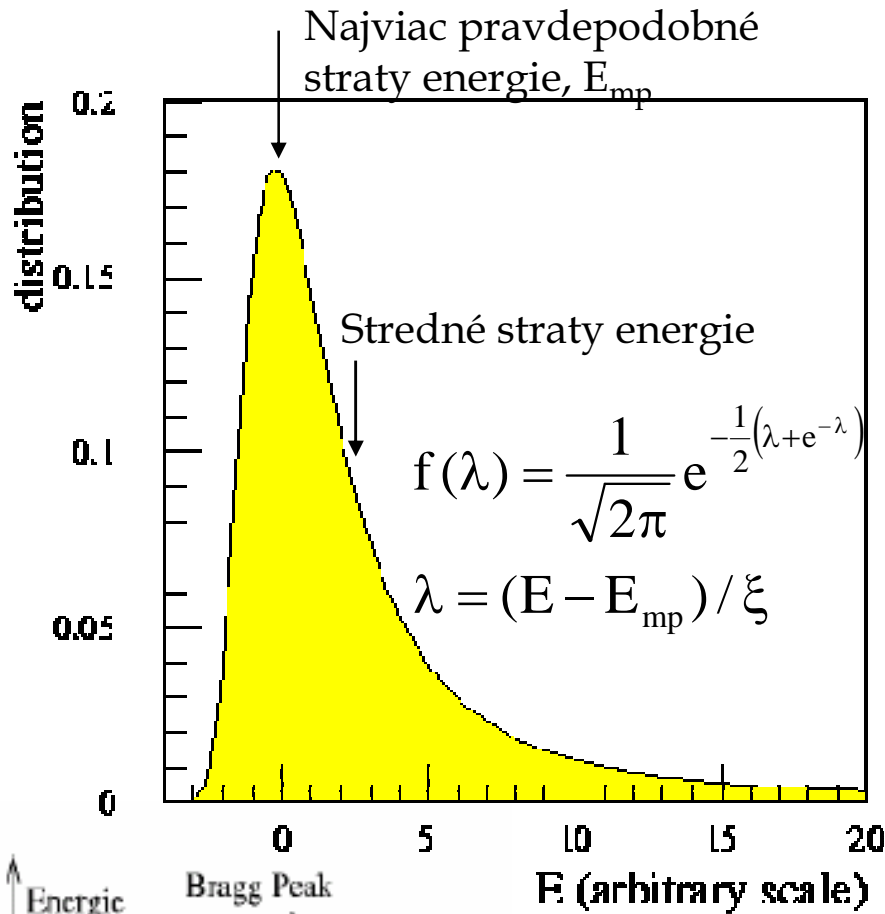
dE/dx falls $\sim \beta^{-2}$; kinematic factor
[precise dependence: $\sim \beta^{-5/3}$]

dE/dx rises $\sim \ln(\beta\gamma)^2$; relativistic rise
[rel. extension of transversal E-field]

Saturation at large $(\beta\gamma)$ due to density effect (correction δ)
[polarization of medium]

Units: $\text{MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$

MIP loses $\sim 13 \text{ MeV/cm}$
[density of copper: 8.94 g/cm^3]



Bethe-Blochova formula = stredné straty

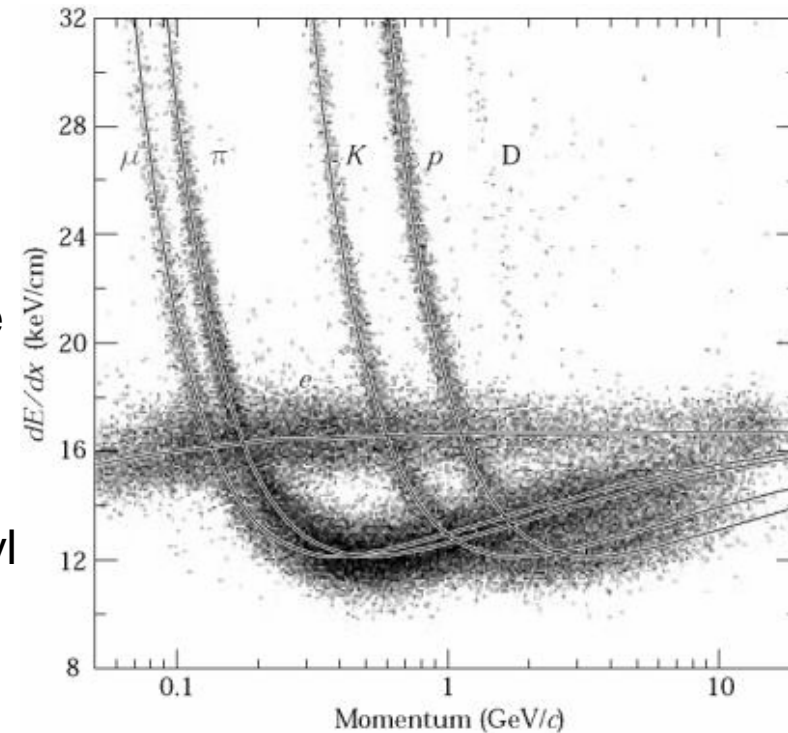
Pravdepodobnosť strát energie pozdĺž dráhy

Rozdelenie Landau

– nesymetrické

– chvost pre veľké energie (delta elektróny)

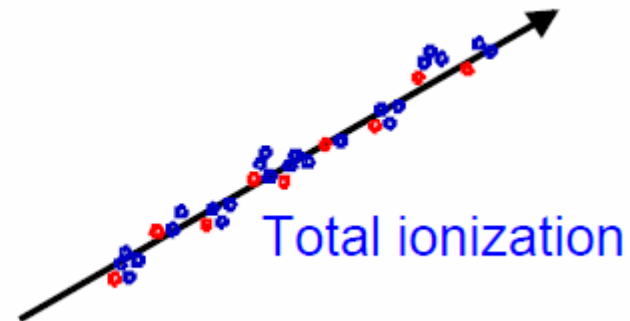
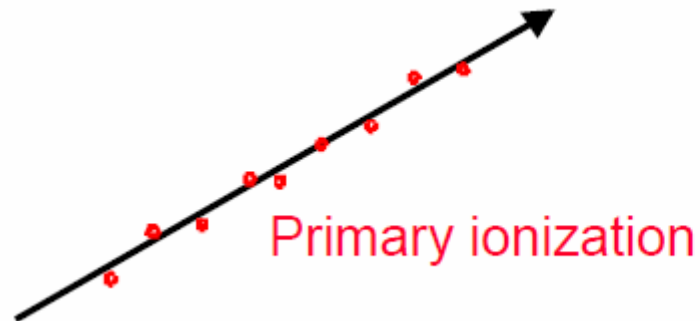
Stredné straty energie pre rôzne častice v závislosti od momentu častice



• Počet produkovaných e^-

primárných N_p – vytvárajú klastery (zhluky)

sekundárných N_T – vytvárajú náboj v detektore



- Primárne elektróny produkuje priamo častica, sekundárne elektróny produkujú primárne elektróny
- $N_T = (dE/dx)/W$; kde W závisí na látke (stredná energia produkcie páru elektrón - ión)
- Určené empiricky
 - $N_p \sim 30$ na 1 cm dráhy v plyne (Ar, CO_2), 44 pre Xe
 - $N_T \sim 94$ na 1 cm v Ar, CO_2 , 307 v Xe
 - $N_e \sim 25,000$ pre 300 μm kremíku

Počet primárnych elektrónov pre rôzne plyny

$$N_T = 3 - 4 * N_p$$

Šum zosilňovača »1000 e- (ENC) !
 Preto nie je snadné detektovať náboj rádovo stovky elektrónov
 Ionizačné komory, kalorimetre registrujú veľké množstvo častíc
 Dráhové detektory využívajú plynové zosilnenie

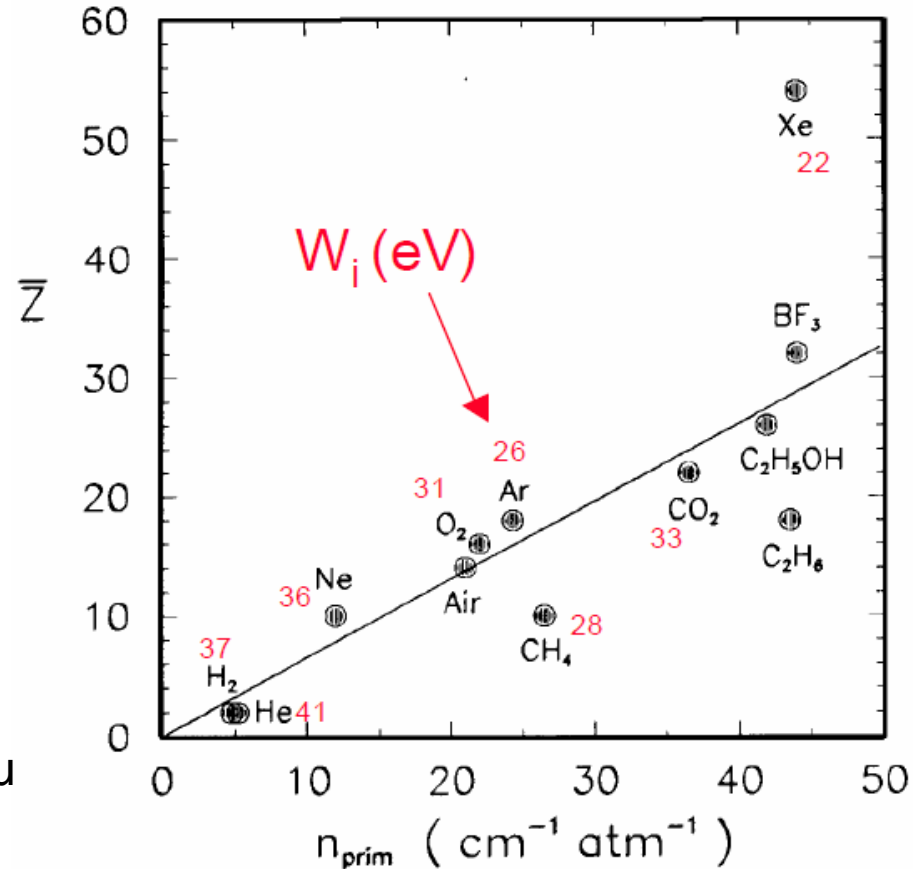
Tabuľka hodnôt pre niektoré plyny

Z = atómové číslo

E_i = stredný potenciál ionizácie

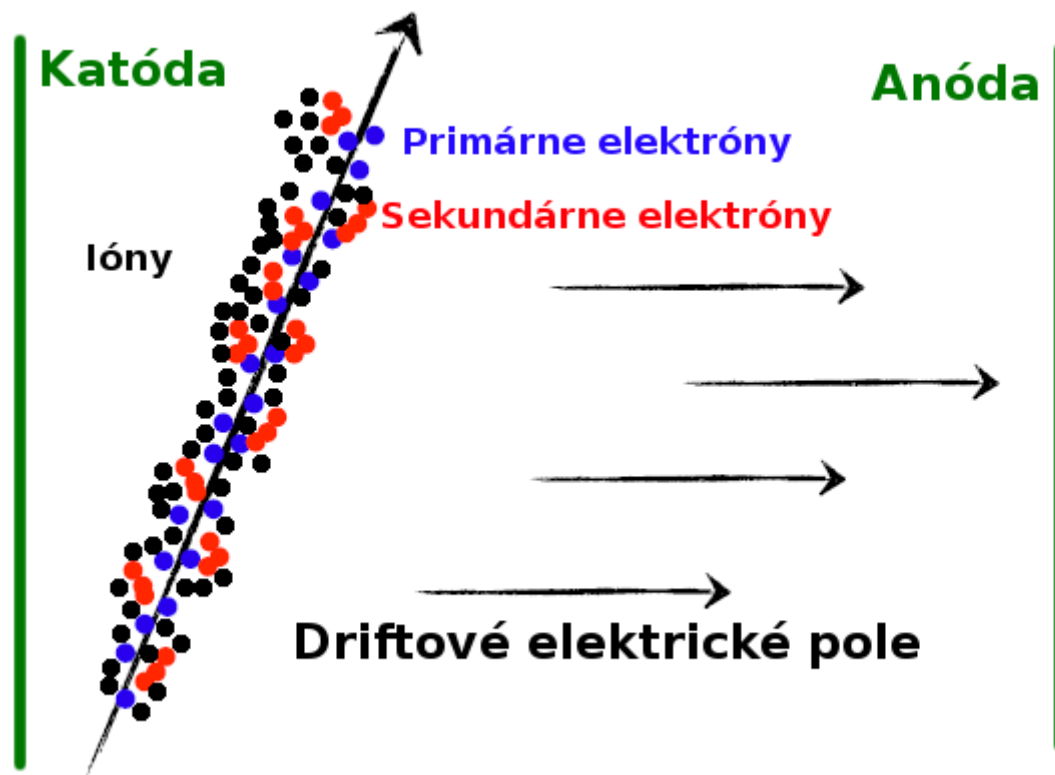
W_i = stredná energia produkcie páru

dE/dx = stredné straty energie



Gas	$\langle Z \rangle$	ρ [g/cm ³]	E_i [eV]	W_i [eV]	dE/dx [keV/cm]	n_p [cm ⁻¹]	n_T [cm ⁻¹]
He	2	$1.66 \cdot 10^{-4}$	24.6	41	0.32	5.9	7.8
Ar	18	$1.66 \cdot 10^{-3}$	15.8	27	2.44	29.4	94
CH ₄	19	$6.7 \cdot 10^{-4}$	13.1	28	1.48	18	53
C ₄ H ₁₀	34	$2.42 \cdot 10^{-3}$	10.6	23	4.50	46	195

Princíp činnosti ionizačného detektora nabitých častíc



Primárne a sekundárne elektróny po termalizácii driftujú v elektrickom poli k anóde, ióny smerujú ku katóde pomalšie.

Oblak náboja sa vplyvom difúzie rozširuje => zhoršenie priestorového rozlíšenia

Čas, za ktorý sa zozbiera náboj na elektródach = doba driftu

Drift nosičov náboja v elektrickom poli

ovplyvňuje intenzita elektrického poľa a mobilita (pohyblivosť) nosičov náboja

Ion mobility:

With external electric field: ions obtain velocity v_D in addition to thermal motion; on average ions move along field lines of electric field E ...

Kinetic energy:

$$\langle T_{\text{ion}}(E \neq 0) \rangle = \langle T_{\text{ion}}(\text{Therm.}) \rangle = \frac{3}{2}kT$$

Temperature
sorry ...

approximately equal to thermal energy, as the (heavy) ions lose typically half their energy when colliding with the non-ionized gas atoms.

Drift velocity v_D develops only from one interaction to another ...

Assuming $v_D(t=0)=0$ and collision time τ yields:

$$\vec{v} = \vec{a} \cdot \tau = \frac{e\vec{E}}{M} \cdot \tau$$
$$\vec{v}_D = \langle \vec{v} \rangle = \frac{1}{2}\vec{v} = \frac{e|\vec{E}|}{2M} \cdot \tau = \mu_+ |\vec{E}|$$

$\tau = \lambda(T_{\text{kin}})/v_{\text{therm.}} = \text{const.}$
since T_{kin} essentially thermal,
and $v_{\text{therm.}}$ thus constant ...

Drift velocity v_D for ions
proportional to E !

μ_+ : ion mobility e.g. $\mu_+=0.61 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ for C_4H_{10}

[$E = 1 \text{ kV/cm}$; typical drift distances = few cm \rightarrow typical ion drift time = few ms]

Pohyblivosť elektrónov v elektrickom poli

závisí od typu plynu – horúci (hot) alebo chladný (cold) plyn

Electron mobility: $\vec{v}_D = \mu \vec{E}$
[B = 0]

Compare:

Electrons: v_D of order cm/ μ s
Ions: v_D of order cm/ms

Consider two situations:

$T_{\text{kin,e}} \gg kT$

gas atoms have only a few low-lying energy levels such that electrons can lose little energy in collisions [hot gases]

$\lambda(T_e) \sim \lambda(E)$ and $\mu \sim \tau \sim 1/\sigma(E)$ μ not constant!
[if $\lambda \sim 1/E$; $v_D = \text{const}$]

Electrons accelerated in E-field until sufficient energy is reached ...
Higher E-field yields smaller mean free path \rightarrow constant v_D possible ...
[Example: $v_D = 3 - 5$ cm/ μ s for 90% Ar/10% CH₄]

$T_{\text{kin,e}} \approx kT$

gas atoms have many low-lying energy levels such that electrons lose all energy they gain between collisions [cold gases]

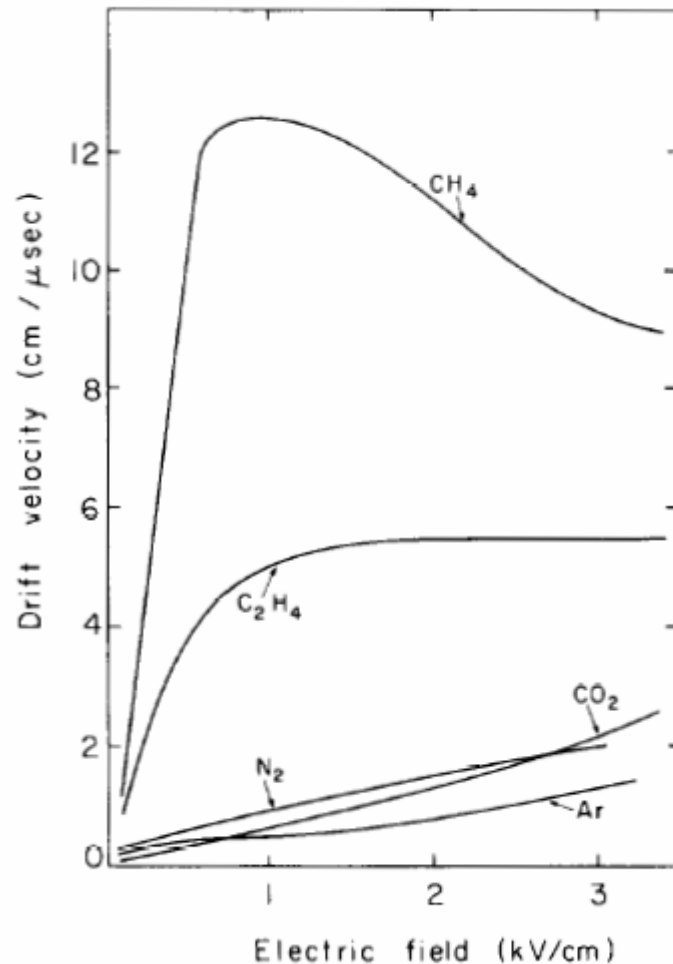
$\mu \approx \text{const.}$ and $v_D \propto E$

Similar to situation with ions ...

[Example: $\mu = 7 \cdot 10^{-3}$ cm²/ μ s V for 90% Ne/10% CO₂; $v_D = 2$ cm/ μ s @ 300 V/cm]

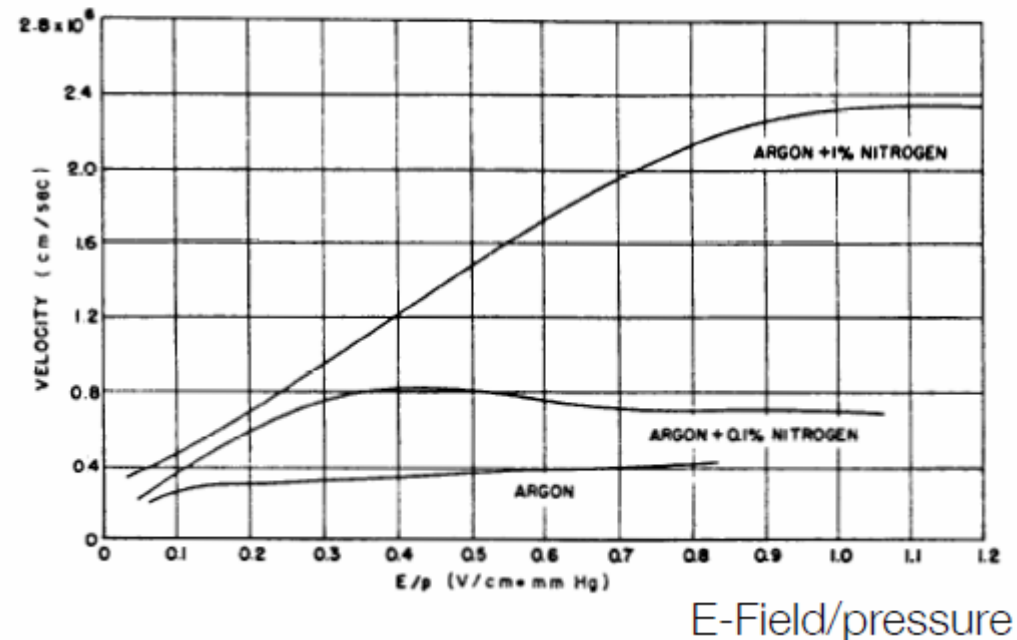
Rýchlosť driftu elektrónov v elektrickom poli

ovplyvňuje vhodná zmes plynov,
optimálna rýchlosť driftu je vysoká a konštantná pri rôznych intenzitách
stabilná pri rôznej teplote, tlaku a rôznej koncentrácii zložiek zmesi



Drift velocity of electrons
in several gases at normal conditions

Use gas mixture to obtain constant v_D
Important for applications using drift time to get
spatial information



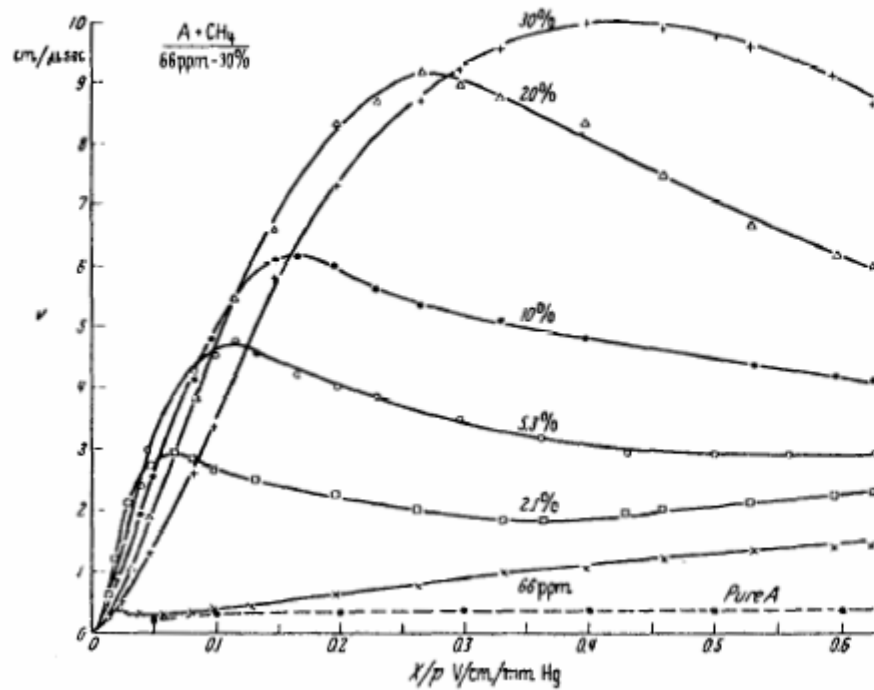
E-Field/pressure

Rýchlosť driftu elektrónov v elektrickom poli v zmesi

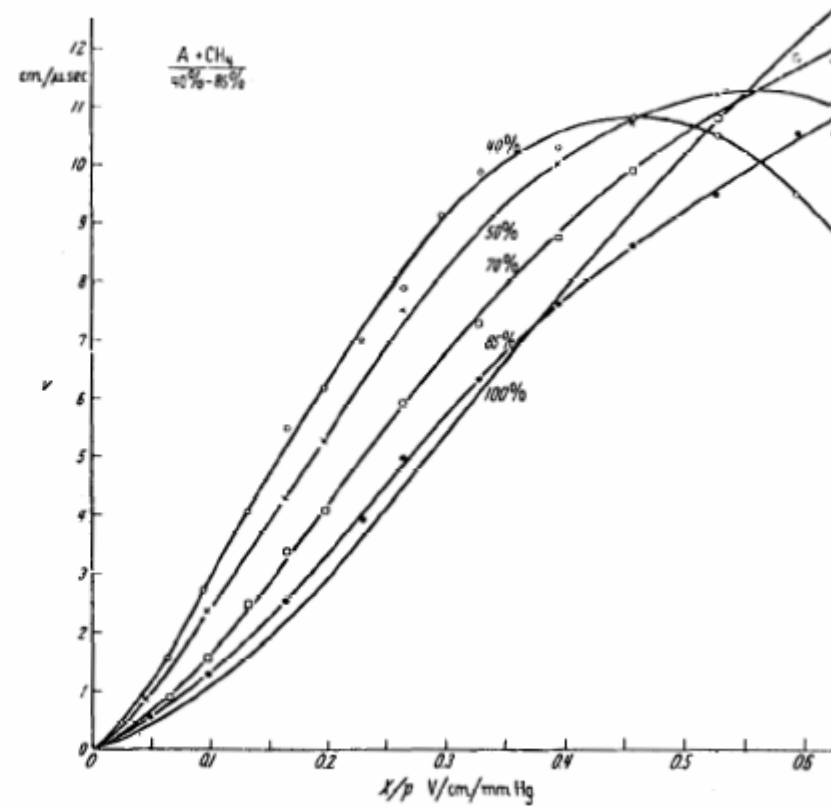
Zmes Argón a metán pri rôznej koncentrácii zhášajúcej prímеси (metánu)

Drift velocity v_D

Drift velocity v_D



E-Field/pressure



E-Field/pressure

Difúzia oblaku náboja počas driftu

Rozdelenie koncentrácie náboja – Gaussova krivka

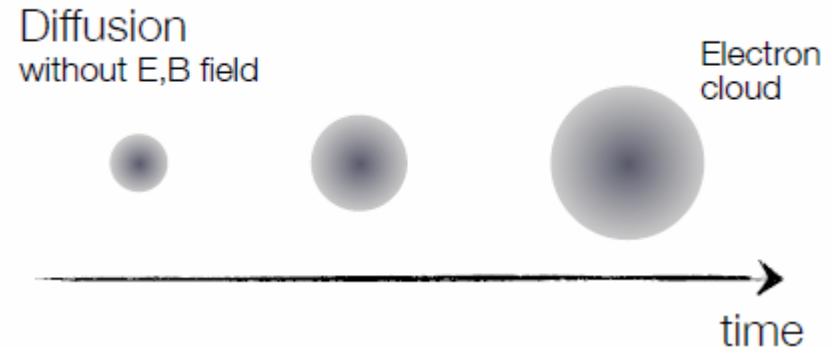
Difúzia prebieha v pozdĺžnom aj priečnom smere k smeru driftu

Diffusion

Case 1: Thermal motion
[E = B = 0]

Ensemble of electrons ...

- τ : time between collisions
- λ : mean free path
- \bar{v} : average thermal velocity; $\bar{v} = \lambda/\tau$



Diffusion coefficient without field: $D_0 = \frac{\lambda_0^2}{\tau} = \frac{2\langle T \rangle}{m} \tau = \bar{v}^2 \tau$ with $\langle T \rangle = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$

Isotropy:

$$D_{0,L} = \frac{1}{3} \frac{\lambda_0^2}{\tau} = \frac{1}{3} \bar{v}^2 \tau$$

Longitudinal
Diffusion Coefficient

$$D_{0,T} = \frac{2}{3} \frac{\lambda_0^2}{\tau} = \frac{2}{3} \bar{v}^2 \tau$$

Transverse
Diffusion Coefficient

$$\bar{v} = \lambda/\tau$$

- T : Kin. energy of e⁻
- \bar{v} : average thermal velocity

Charge cloud extension
after time t:

$$\sigma(t) = \sqrt{D_0 2t}$$

D_0 = koeficient difúzie bez magnetického poľa, B=0

σ_x, σ_y – priečna difúzia, σ_L – pozdĺžna difúzia

$$\sigma_x(t) = \sigma_y(t) = \sigma_z(t) = \sqrt{1/3 D_0 2t}$$

$$\sigma_L(t) = \sqrt{1/3 D_0 2t} \quad \text{and} \quad \sigma_T(t) = \sqrt{2/3 D_0 2t}$$

Difúzia oblaku náboja v magnetickom poli

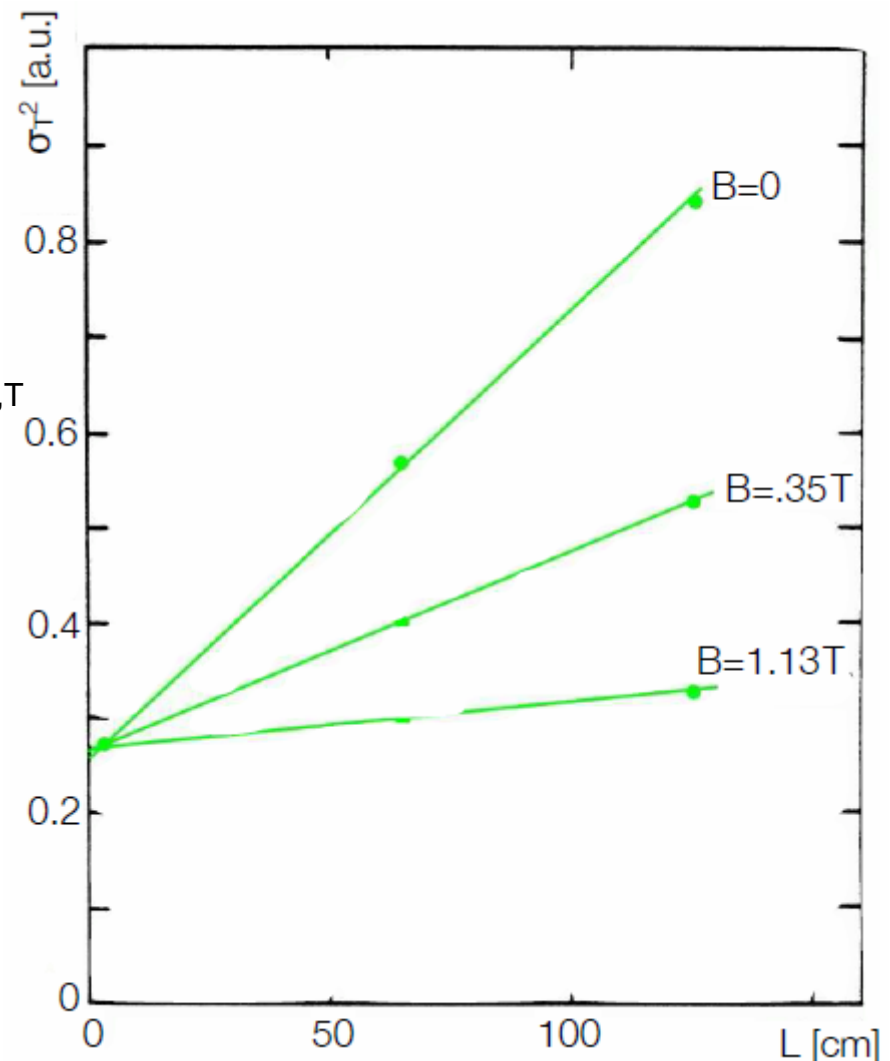
Rozdelenie koncentrácie náboja – Gaussova krivka
Difúzia prebieha v pozdĺžnom aj priečnom smere k smeru driftu

Magnetické pole v smere driftu
na pozdĺžnu difúziu nemá vplyv.

Na priečny pohyb elektrónov pôsobí
Lorentzova sila, ktorá ich zakrúti nazad,
čím redukuje koeficient difúzie $D_T(B) \ll D_{0,T}$

Pre magnetické pole vysokej intenzity
napr. Ar/CH₄, $B=1.5\text{ T} \rightarrow D_T = D_{0,T}/50$

Pre konkrétnu konfiguráciu detektora
sa priebeh elektrických siločár,
difúzia a drift v magnetickom poli rátajú
numericky alebo modelujú programami
napr. Garfield, Magboltz



Stráty náboja počas driftu

rekombinácia e⁻ v priestorovom náboji (pri vysokých intenzitách toku častíc)
záchyt elektrónov v elektronegatívnych plynoch (prímesy, nečistoty, O₂, Cl₂)

Electrons maybe lost during drift ...

Possible processes:

i. recombination of ions and electrons

Depends on number of charge carriers
and recombination coefficient ...

Generally not important ...

Recombination rate:

$$\Lambda = p_r \cdot n^+ n^-$$

→ Recombination
coefficient $\approx 10^{-7}$ cm³/s

ii. electron attachment

Electro-negative gases bind electrons; e.g.: O₂, Freon, Cl₂, SF₆ ...

Attachment coefficient h strongly energy dependent ("Ramsauer effect") ...

Example O₂: $h = 10^{-4}$

Collisions of electron per second: 10^{11}

Typical drift time of electron: 10^{-6} s

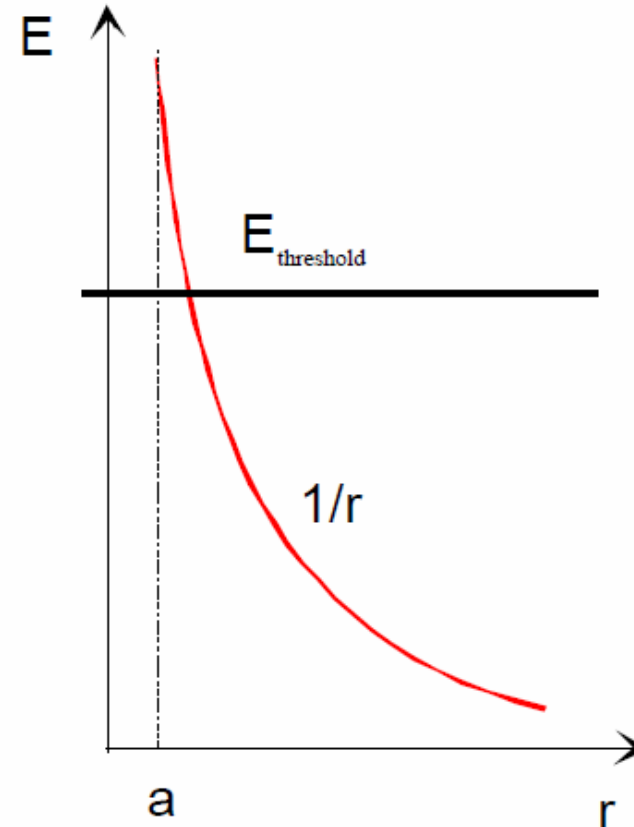
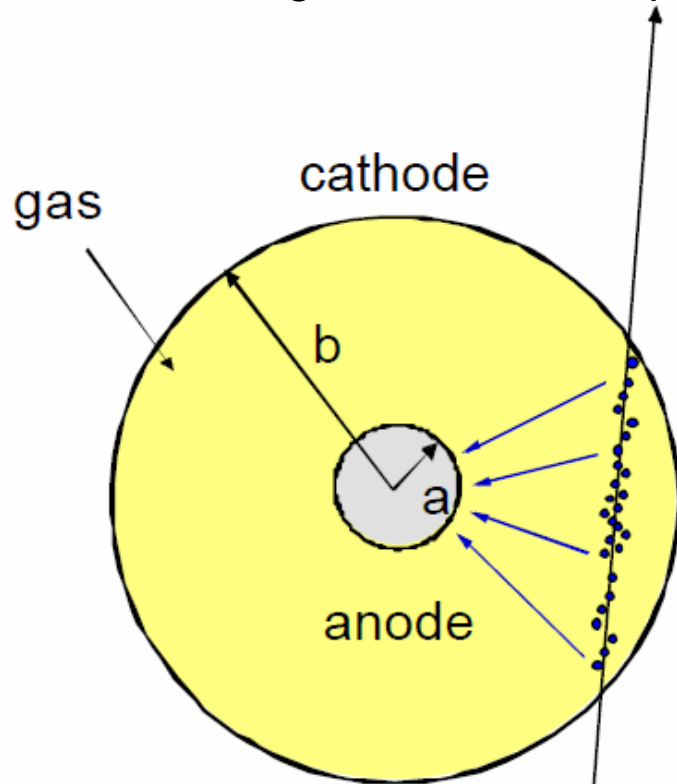
Fraction lost: $X_{\text{loss}} = 10^{-4} 10^{11} \text{ s}^{-1} 10^{-6} \text{ s} \cdot p = 10p$

$X_{\text{loss}} < 1\% \rightarrow p < 10^{-3}$, i.e. less than 1 ‰ admixture

Oxygen should
be kept out

Cylindricky symetrické usporiadanie elektród

Valcová katóda okolo anódového vlákna (drôtu) produkuje nehomogénne elektrické pole => plynové zosilnenie



$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{a}$$

C = capacitance / unit length

Plynové zosilnenie náboja – lavínové množenie

V silnom elektrickom poli získa elektrón počas voľnej dráhy dostatok energie na sekundárnu ionizáciu = vyrazenie ďalšieho elektrónu z atómu

Large electric field yields large kinetic energy of electrons ...

→ Avalanche formation

Larger mobility of electrons results in liquid drop like avalanche with electrons near head ...

Mean free path: λ_{ion}
[for a secondary ionization]

Probability of an ionization per unit path length: $\alpha = 1/\lambda_{ion}$ [1st Townsend coefficient]

$$dn = n \cdot \alpha dx \quad n(x) = \text{electrons at location } x$$

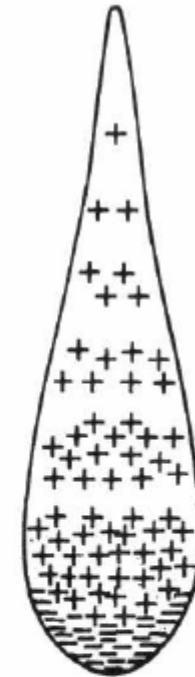
$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

Gain:

$$G = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \quad \text{and more general for } \alpha = \alpha(x): \quad G = \frac{n}{n_0} = \exp \left[\int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx \right]$$

[Raether limit: $G \approx 10^8$; $\alpha x = 20$; then sparking sets in ...]

Townsend avalanche



Drop-like shape of an avalanche
Left: cloud chamber picture
Right: schematic view

Elektrický tok v plynoch

V závislosti od intenzity elektrického poľa dochádza k množeniu elektrónov v plyne – podľa intenzity el. poľa 4 základné režimy – ionizační, proporcionálny, omezený proporcionálny (strímrový) a Geiger-Mullerov.

Ionization mode:

full charge collection
no multiplication; gain ≈ 1

Proportional mode:

multiplication of ionization
signal proportional to ionization
measurement of dE/dx
secondary avalanches need quenching;
gain $\approx 10^4 - 10^5$

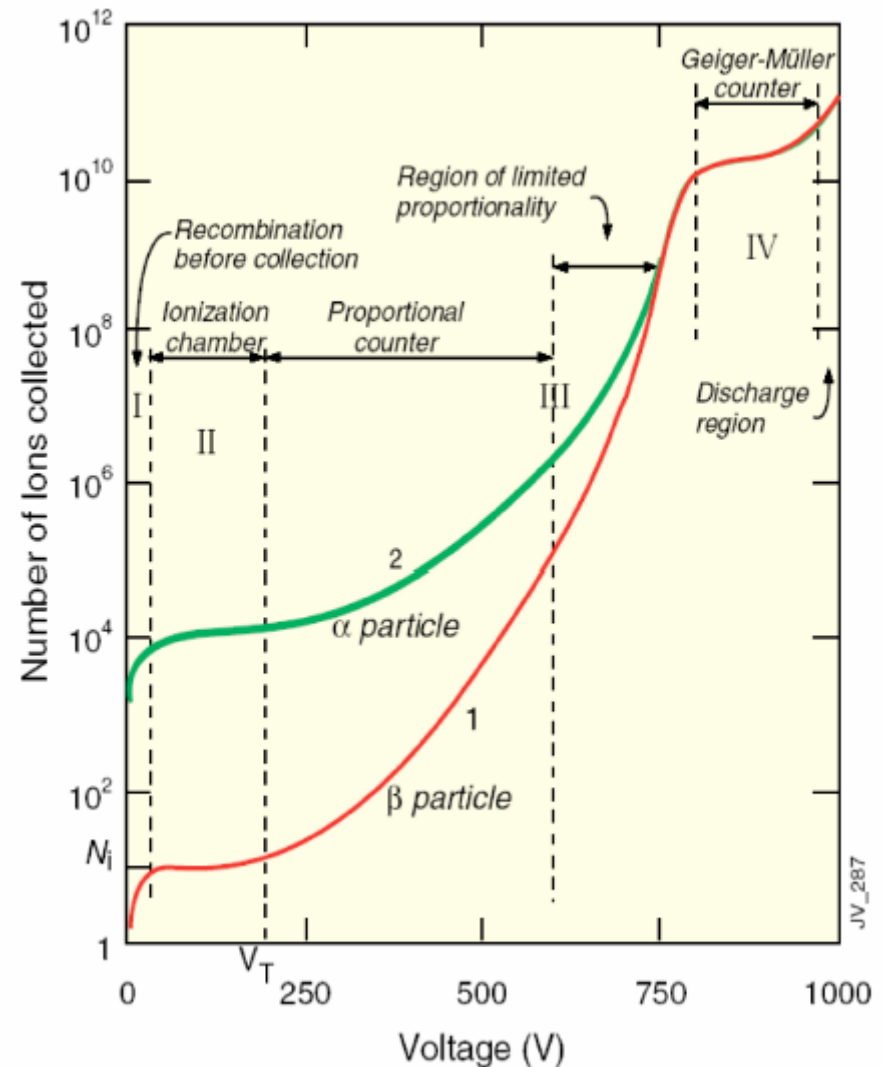
Limited proportional mode:

[saturated, streamer]

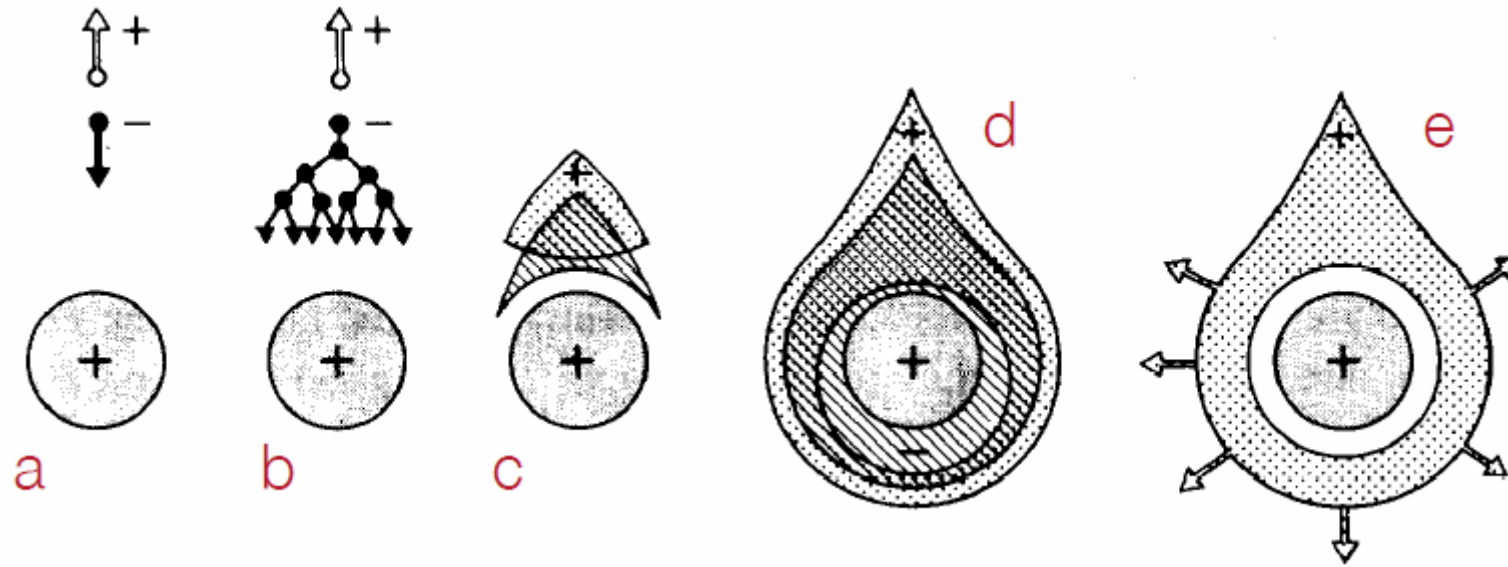
strong photoemission
requires strong quenchers or pulsed HV;
gain $\approx 10^{10}$

Geiger mode:

massive photoemission;
full length of the anode wire affected;
discharge stopped by HV cut



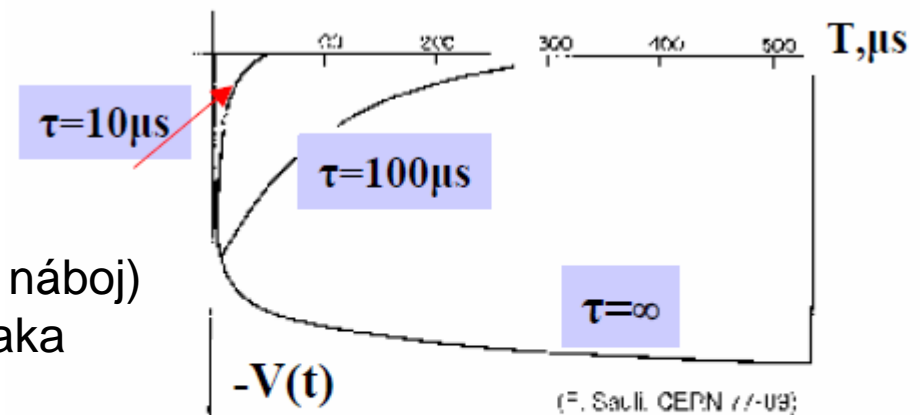
Časový rozvoj lavíny okolo anódového vlákna



Lavína sa vytvorí v priebehu cca 1 ns a oblasti len niekoľko priemerov vlákna

Elektróny sa zberajú na anóde,
 ióny driftujú pomalu (vytvárajú priestorový náboj)
 Signál sa indukuje na katóde aj anóde vďaka
 pohybu nábojov (prúd)

Dĺžka signálu je daná dobou zberu iónov a
 Charakteristikami elektronického obvodu,
 Strmosť čela rýchlosťou pohybu elektrónov.



$$\tau = R C$$

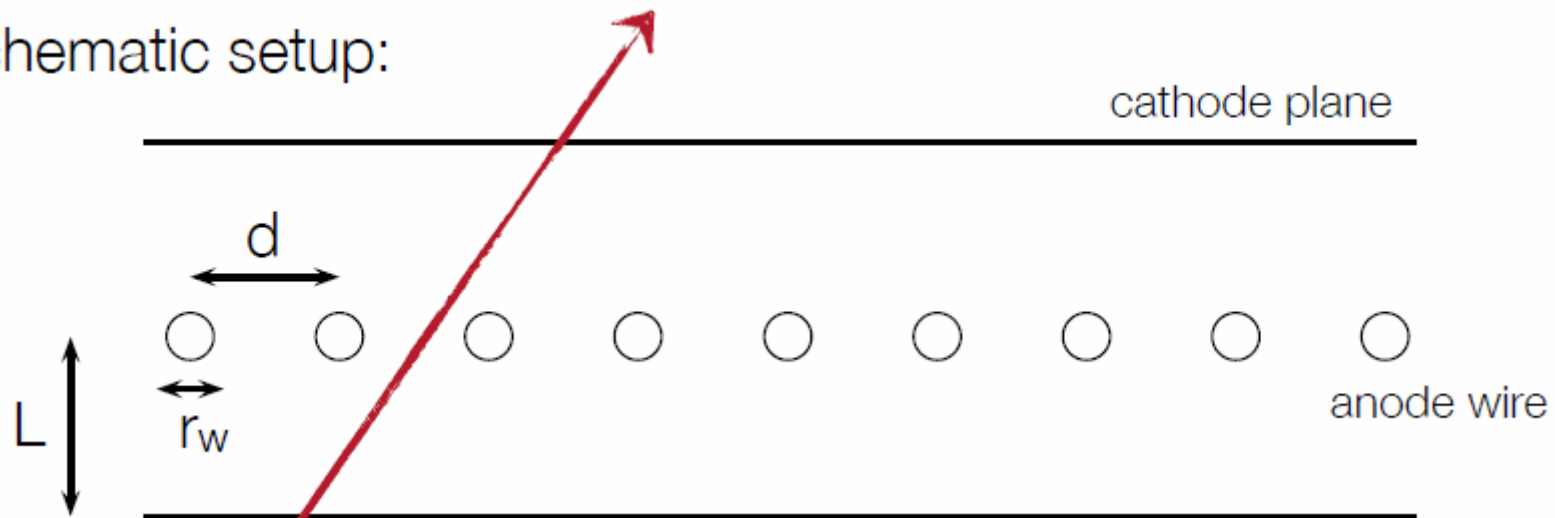
R - odpor

Väčšina plynových detektorov je založená na princípu proporcionálnej komory

- Mnohohrätové proporcionální komory (MWPC)
- Driftové komory
- Slámové, stéblové trubky (straw tubes)
- Katodové stripové nebo padové komory
- Časové projekční komory(TPC)
- Mikro-stripové plynové komory(MSGC)

Mnohoválnová proporcionálna komora (MWPC)

Schematic setup:



Parameters:

$$d = 2 - 4 \text{ mm}$$

$$r_w = 20 - 25 \text{ } \mu\text{m}$$

$$L = 3 - 6 \text{ mm}$$

$$U_0 = \text{several kV}$$

$$\text{Total area: } O(\text{m}^2)$$

Features:

Tracking of charged particles

Some PID capabilities via dE/dx

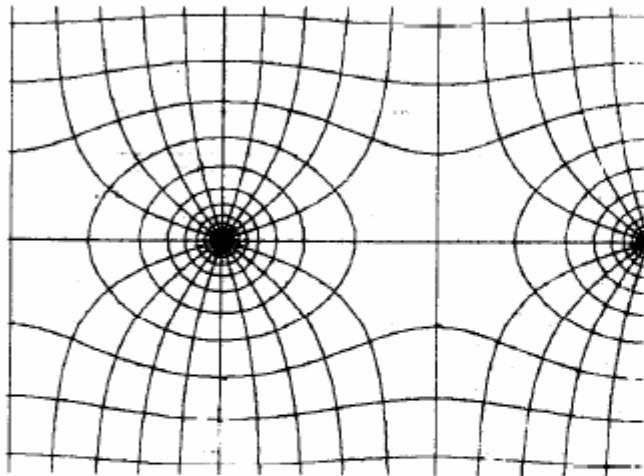
Large area coverage

High rate capabilities

particle track

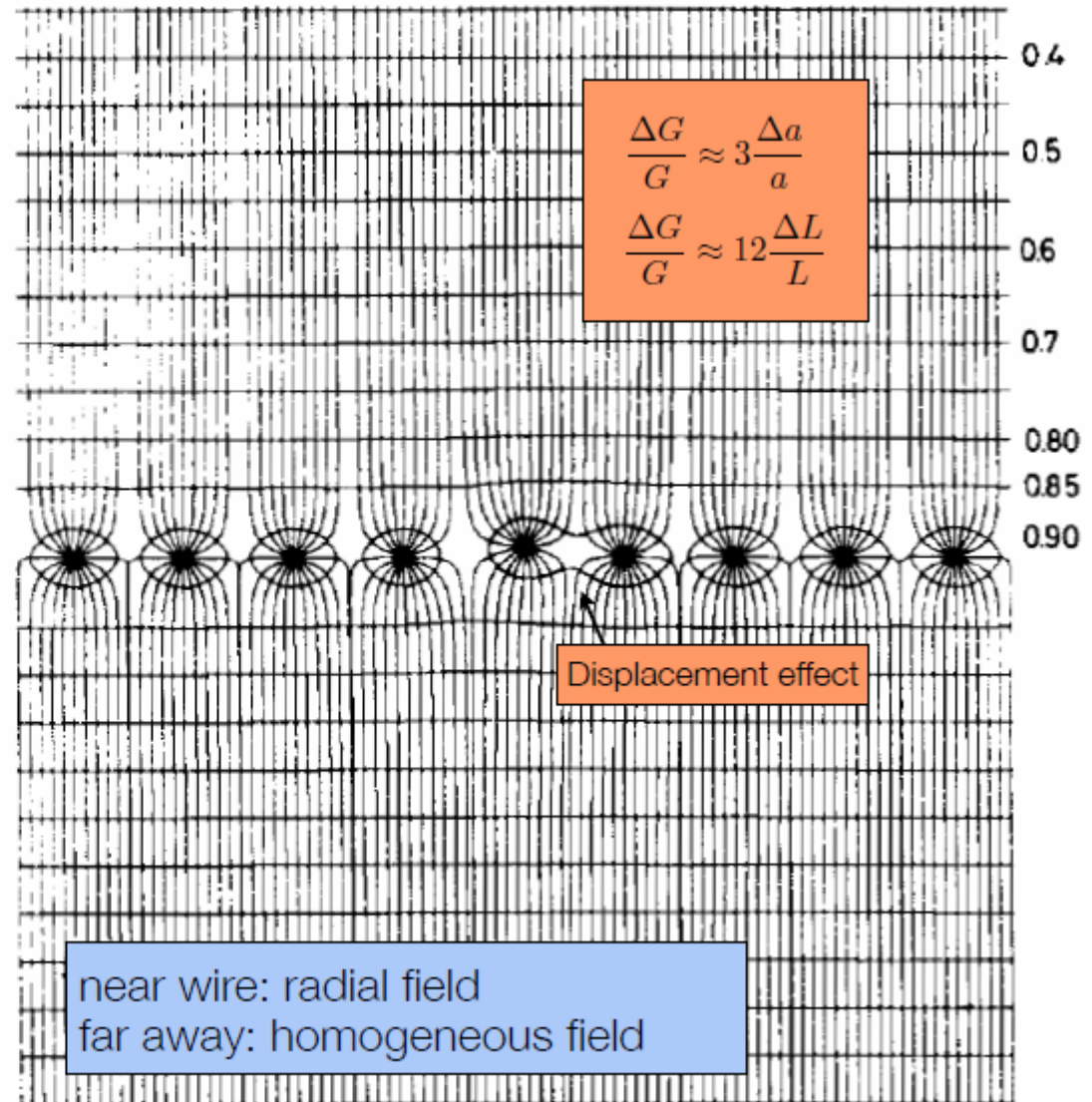
Mnohoválnová proporcionálna komora (MWPC)

Electric field lines
and equipotentials



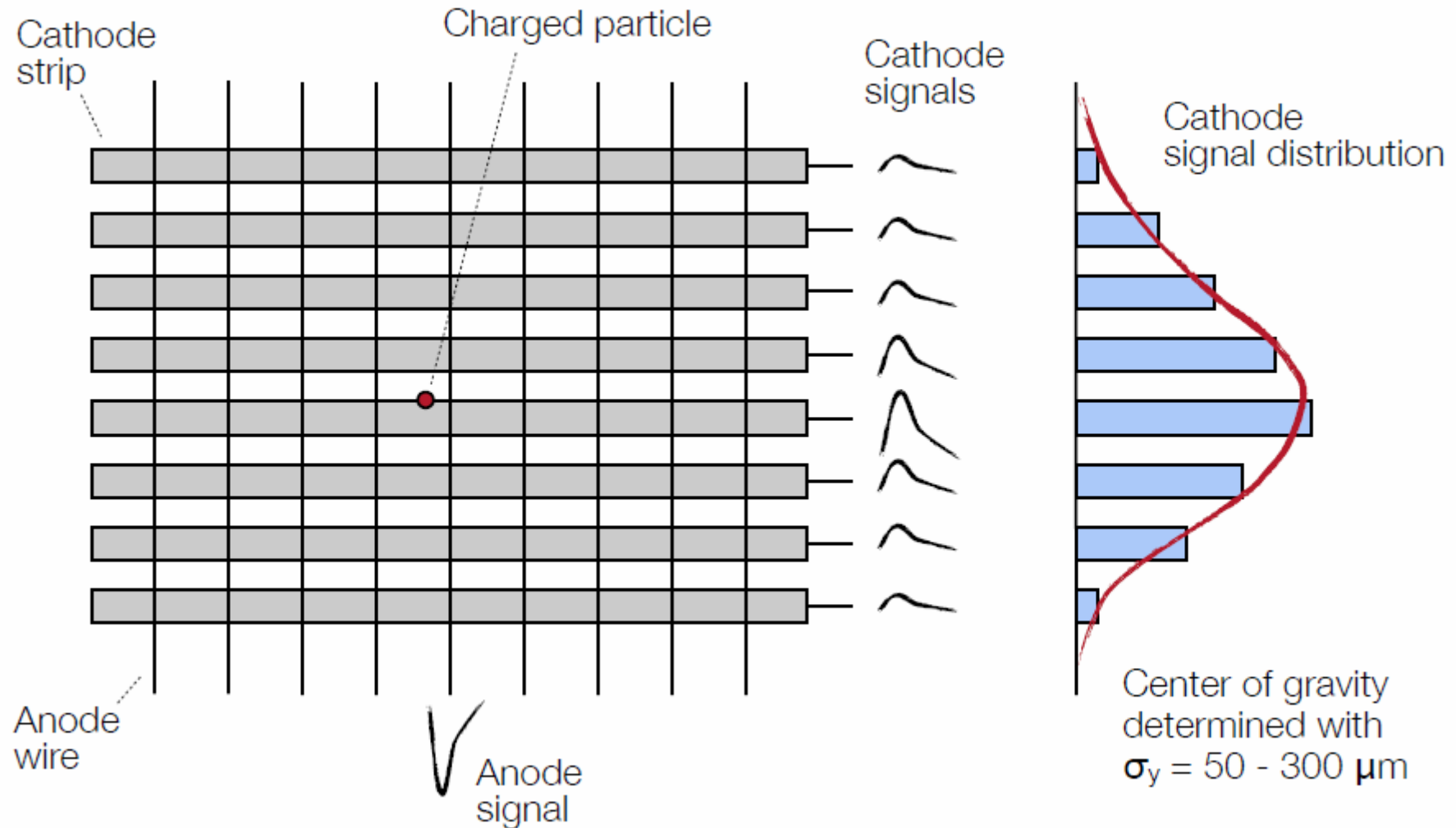
Small wire displacements
reduce field quality ...

Need high mechanical precision
both for geometry and wire tension ...
[electrostatics and gravitation; wire sag]

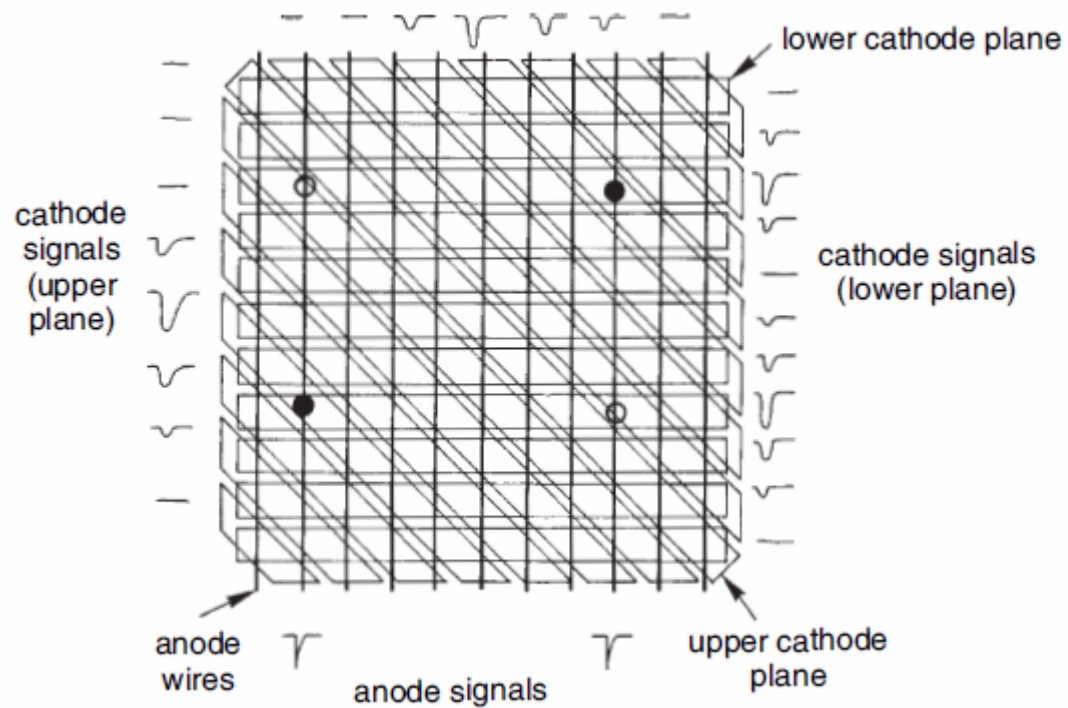


Mnohovláknová proporcionálna komora (MWPC)

Čítanie druhej súradnice pomocou segmentovaných katód pásy (strípy) alebo štvorúholníky (pady)



Katódové čítanie – vznik falošných (zrkadlových signálov)



Cathode readout yields:

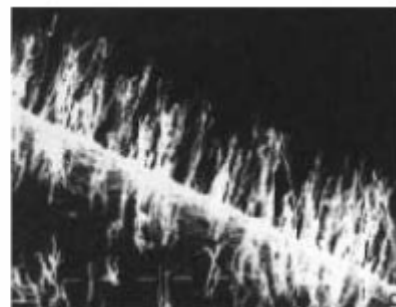
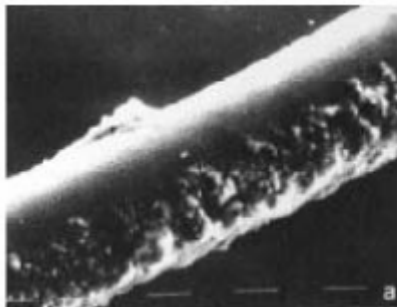
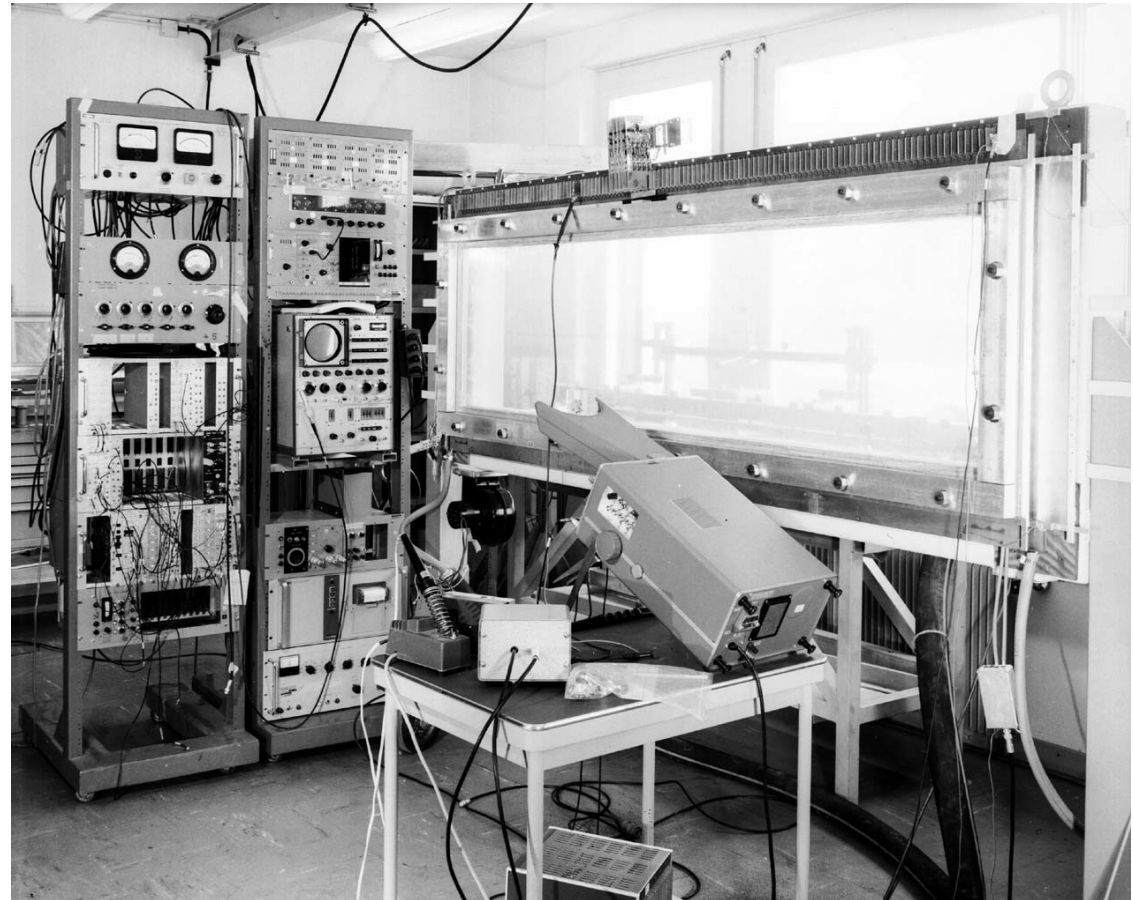
2-dim. information
true 2d: use pads ...

high spatial resolution
due to center of gravity reconstruction

resolving ambiguities
using second strip pattern or pads

Can wires be avoided?

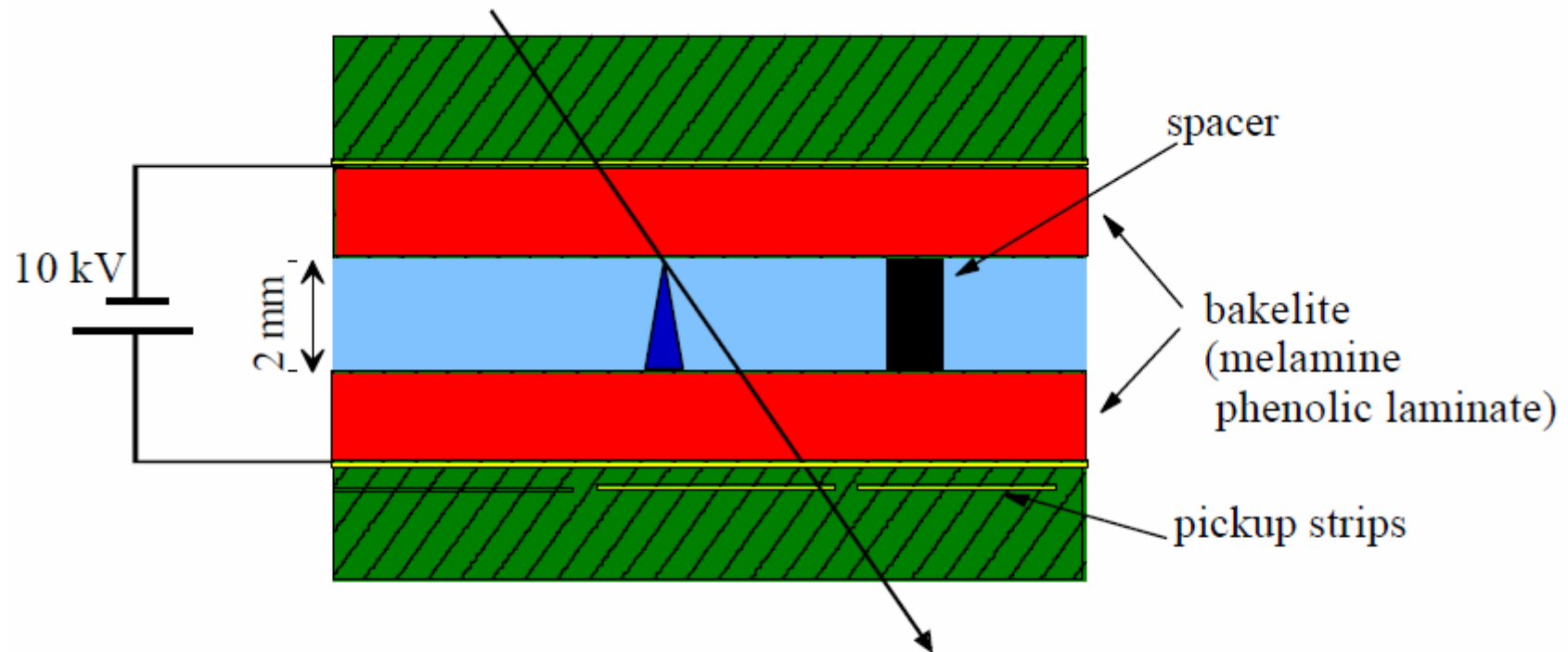
Mnohovláknová proporcionálna komora pre spektrometer sekundárnych častíc



Starnutie plynových komôr
Usadzovanie polymérov vytvorených
štiepením organických prímiesí
Príklad usadenín na anodových vláknach
= izolácia vlákna, nižšia efektívnosť

Resistive Plate Chamber

komora na odporových doskách, bez vlákien
pracuje v obmedzenom proporcionálnom režimu



Gas: $C_2F_4H_2$, (C_2F_5H) + few % isobutane

(ATLAS, A. Di Ciaccio, NIM A 384 (1996) 222)

Driftová komora

Informácia o mieste preletu častice z doby driftu potrebuje spúšťačí impuls = čas preletu častice

Measure drift time t_D
[need to know t_0 ; fast scintillator, beam timing]

Determine location of original ionization:

$$x = x_0 \pm v_D \cdot t_D$$

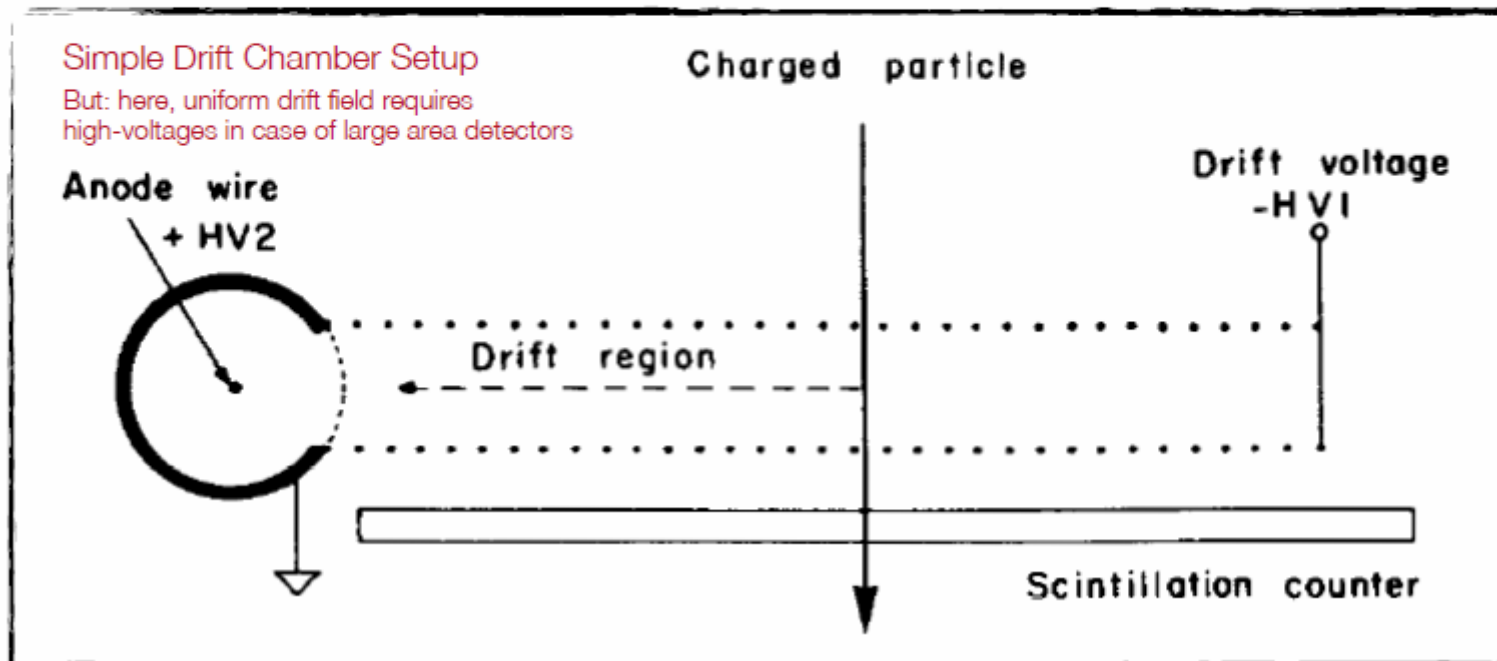
$$y = y_0 \pm v_D \cdot t_D$$

If drift velocity changes along path:

$$x = \int_0^{t_D} v_D dt$$

In any case:

Need well-defined drift field ...



Driftová komora

Formovanie homogénneho elektrického poľa pomocou série presných odporov

Principle of an adjustable field multi-wire drift chamber

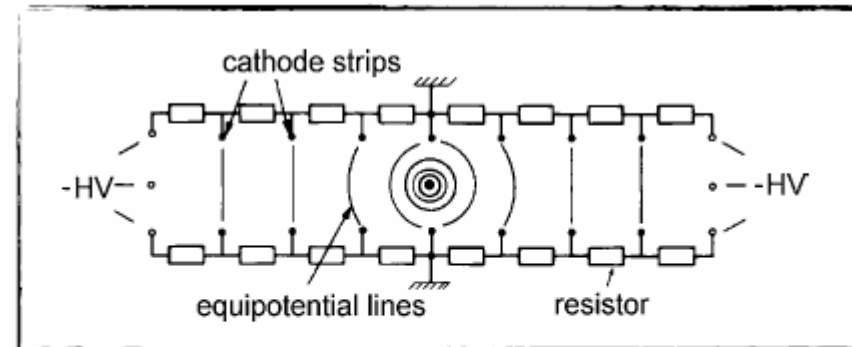
Introduction of voltage divider via cathode wire planes ...

Features:

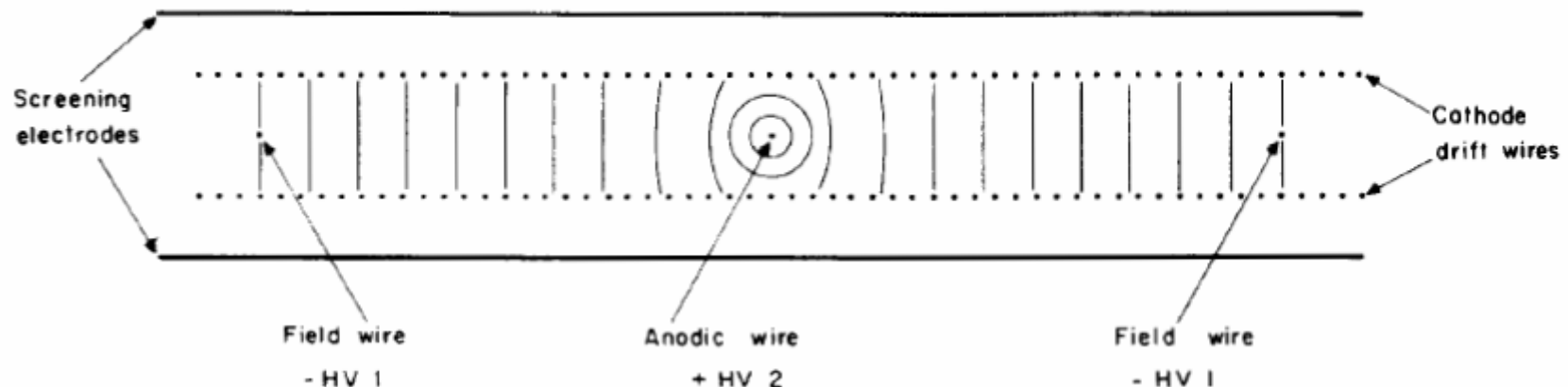
very few (or only one) anode wires

space point resolution limited by mechanical accuracy
[for large chambers: $\sigma \approx 200 \mu\text{m}$]

But: hit density needs to be low.

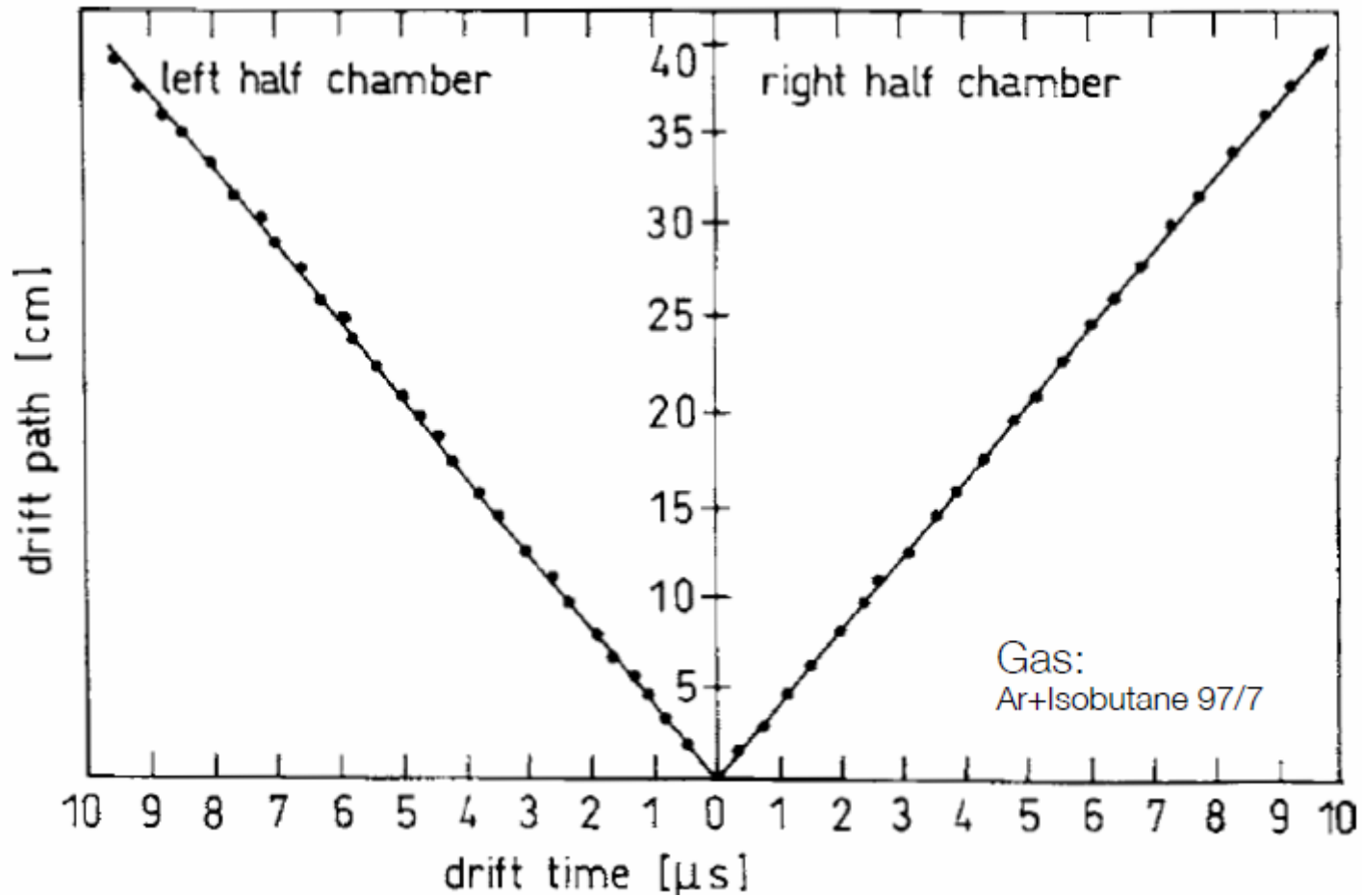


Schematics of voltage divider chain



Driftová komora

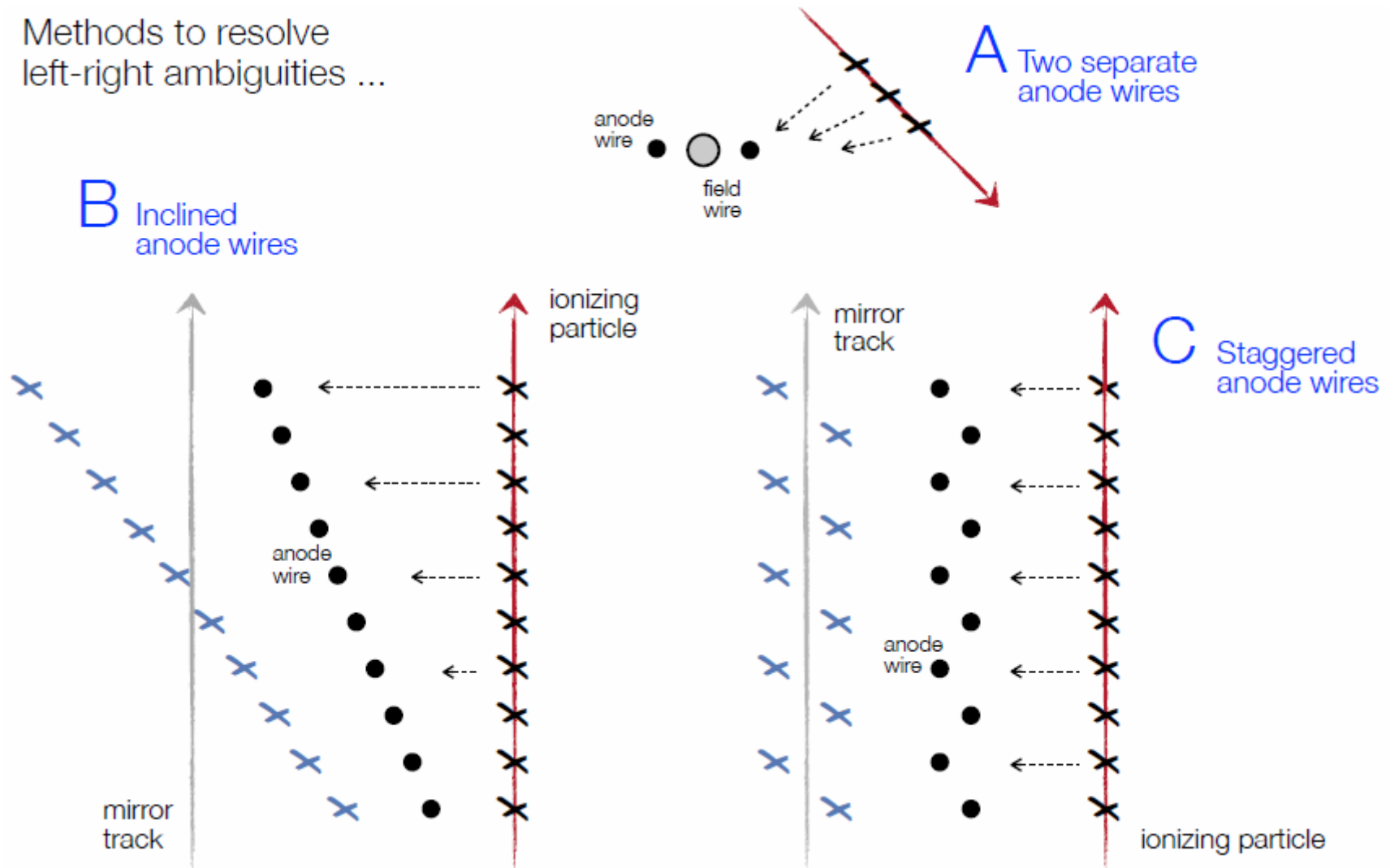
Kalibračná krivka – závislosť doby driftu od vzdialenosti
v symetrickej komore - pravoľavá nejednoznačnosť



Driftová komora

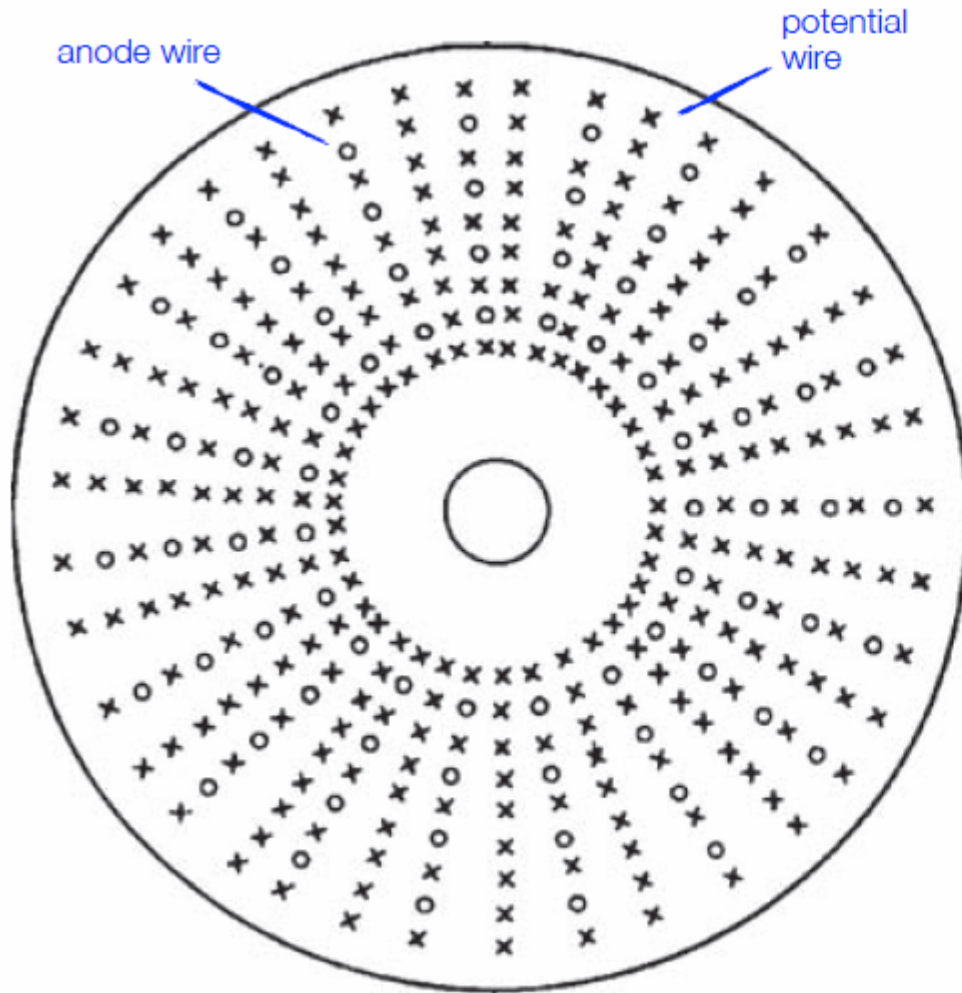
Zpôsoby odstránenia pravoľavej nejednoznačnosti

Methods to resolve left-right ambiguities ...



Driftová komora

Cylindrické usporiadanie elektród pred osovo symetrické experimenty



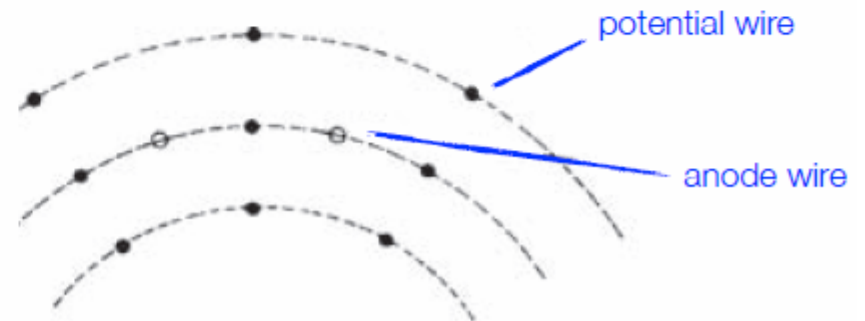
Application:

Collider experiments
[cylindrical wire arrangement needed]

Characteristica:

Cylindrical symmetry
Open drift cell geometry

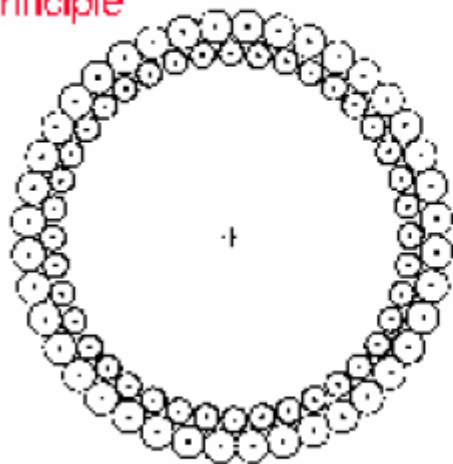
Require: Simple space-time relation
given by E,B field and drift cell geometry



Stéblové (straw tubes) detektory

Straw tubes: Thin cylindrical cathode, 1 anode wire

principle



Example: DELPHI Inner detector

5 layers with 192 tubes each

tube \varnothing 0.9 cm, 2 m long,

wall thickness 30 μm (Al coated polyester)

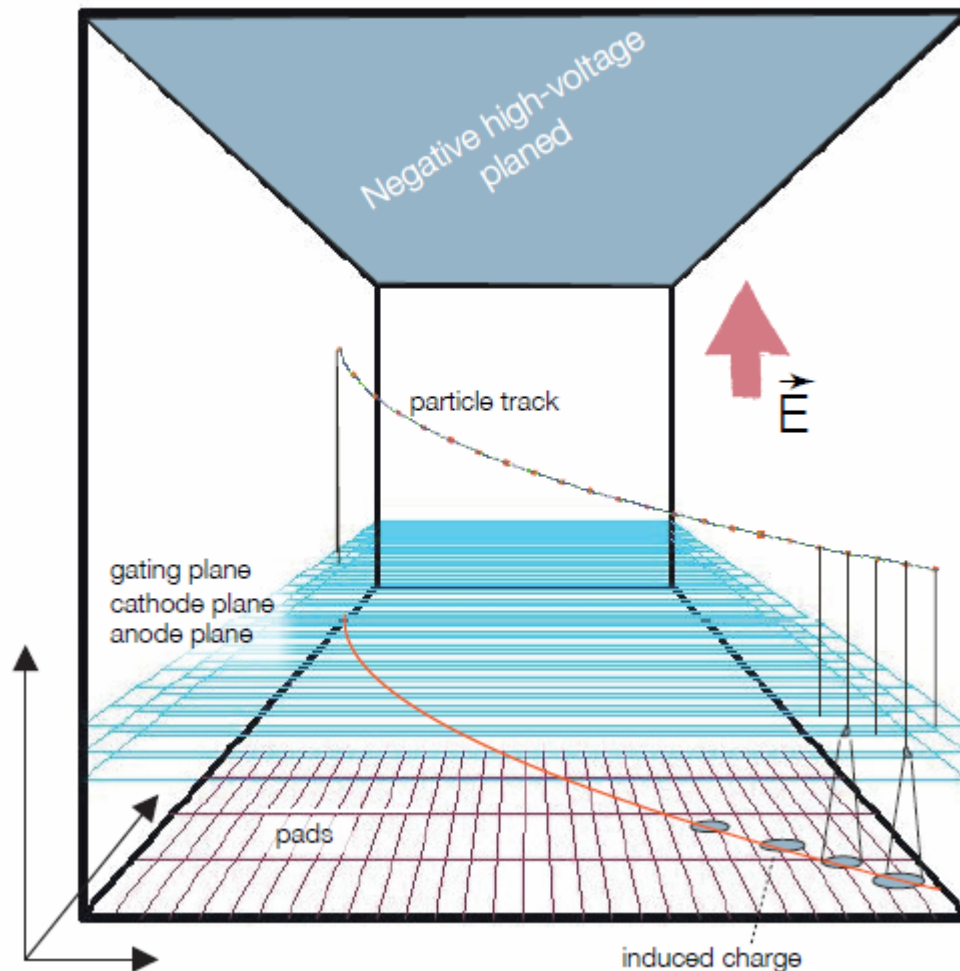
wire \varnothing 40 μm

Intrinsic resolution ca. 50 μm

Používají se jako vrcholové detektory
(také v mg.polích, krátká vzdálenost driftu).

TPC - časovo projekčná komora

Time projection chamber – 3D zobrazenie umožňuje kombináciu driftovej komory a dvojdimenzionálnych mnohovláknových proporcionálnych komôr



Advantages:

Complete track within one detector yields good momentum resolution

Relative few, short wires (MWPC only)

Good particle ID via dE/dx

Drift parallel to B suppresses transverse diffusion by factors 10 to 100

Challenges:

Long drift time; limited rate capability [attachment, diffusion ...]

Large volume [precision]

Large voltages [discharges]

Large data volume ...

Extreme load at high luminosity; gating grid opened for triggered events only ...

Typical resolution:

z : mm; x : 150 - 300 μm ; y : mm

dE/dx : 5 - 10%

ALICE TPC:

Length: 5 meter

Radius: 2.5 meter

Gas volume: 88 m³

Total drift time: 92 μs

High voltage: 100 kV

End-cap detectors: 32 m²

Readout pads: 557568

159 samples radially

1000 samples in time

Gas: Ne/CO₂/N₂ (90-10-5)

Low diffusion (cold gas)

Gain: > 10⁴

Diffusion: $\sigma_t = 250 \mu\text{m}$

Resolution: $\sigma \approx 0.2 \text{ mm}$

$\sigma_p/p \sim 1\% p$; $\epsilon \sim 97\%$

$\sigma_{dE/dx}/(dE/dx) \sim 6\%$

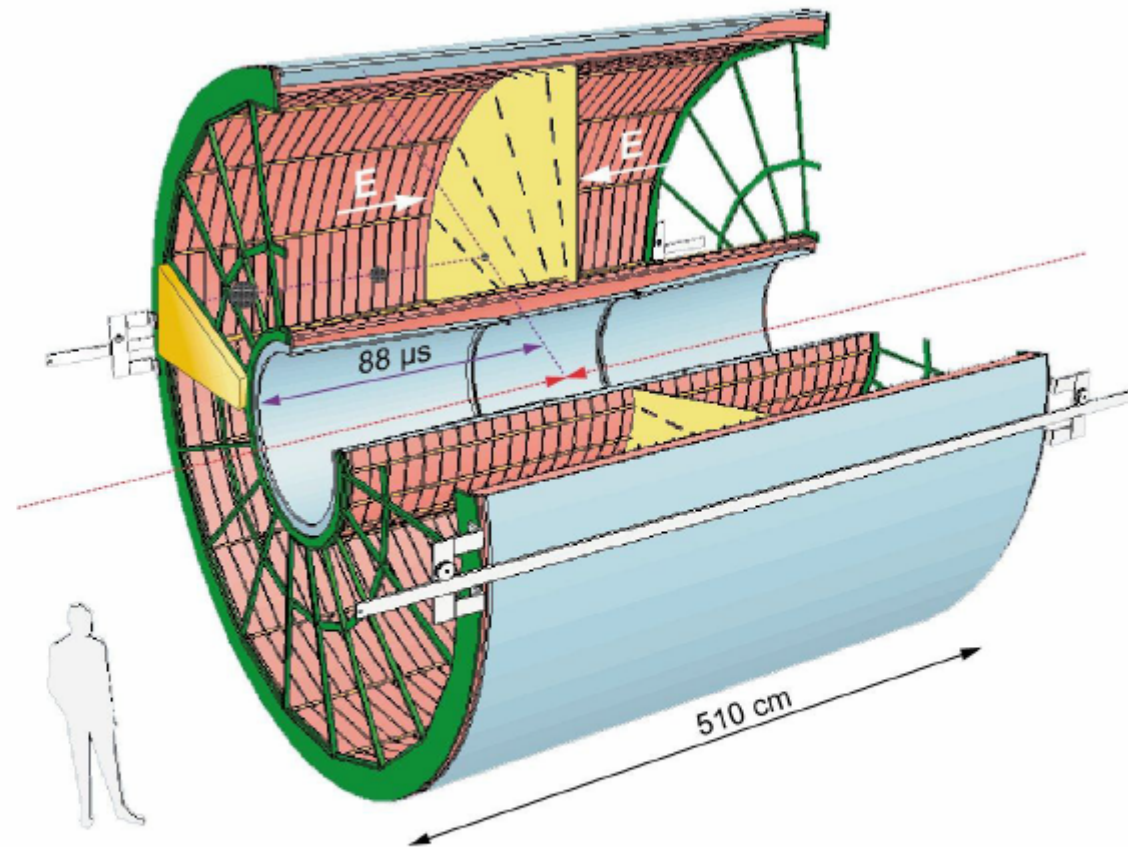
Magnetic field: 0.5 T

Pad size: 5x7.5 mm² (inner)

6x15 mm² (outer)

Temperature control: 0.1 K

[also resistors ...]



Material: Cylinder build from composite material of airline industry ($X_{\alpha} \sim 3\%$)

