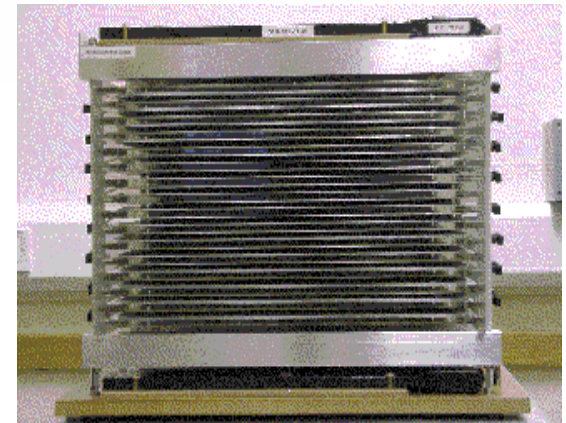
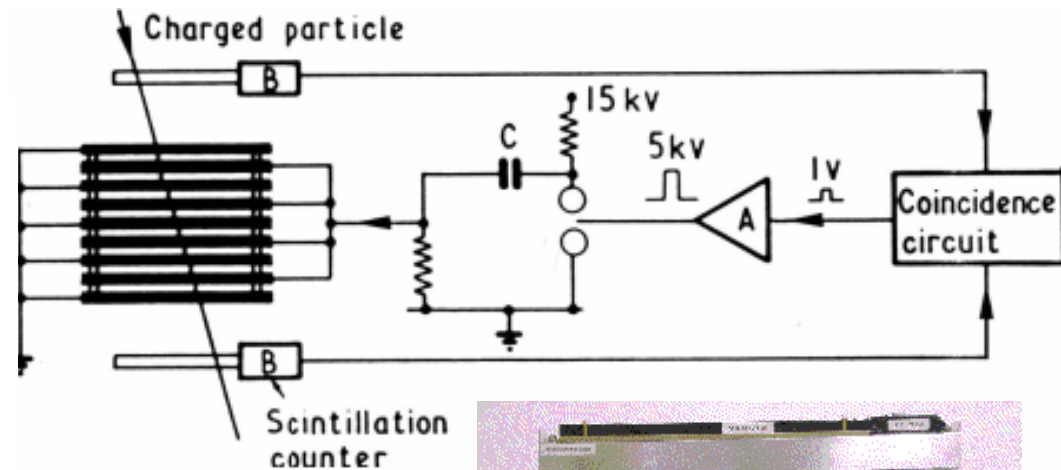
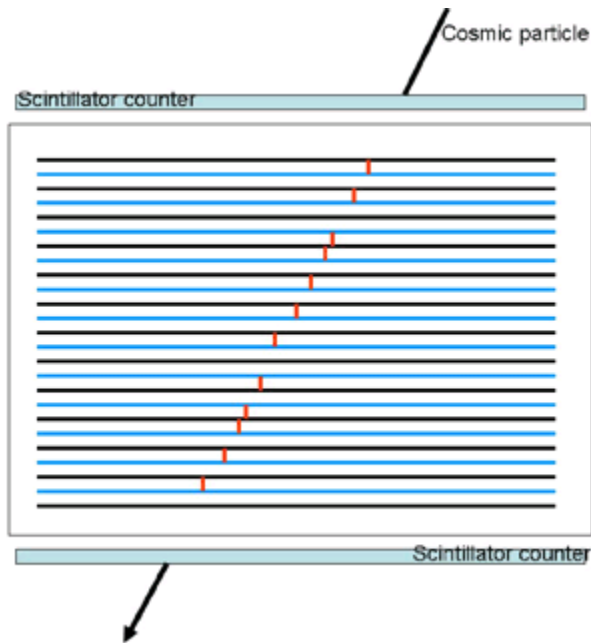


Θάλαμος Σπινθήρων (Spark Chamber)

- Ένας χώρος με μεταλλικούς σπλισμούς (ηλεκτρόδια) γεμάτο με ιδανικό αέριο, π.χ. Ar
- Φορτισμένο σωματίδιο ιονίζει το αέριο → δημιουργούνται ζεύγη e-ιόντων κατά μήκος της τροχιάς του
- Επίσης, καθώς περνάει το σωματίδιο από τους σπινθηριστές ενεργοποιούν την υψηλή τάση
- Εφαρμόζεται υψηλή τάση → ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργείται το φαινόμενο του καταιγισμού (χινοστιβάδα) και έχουμε δημιουργία πλάσματος κατά μήκος της τροχιάς ανάμεσα στα ηλεκτρόδια → άγεται το ρεύμα κατά μήκος της τροχιάς → προκαλείται εκφόρτιση → σπινθήρας.

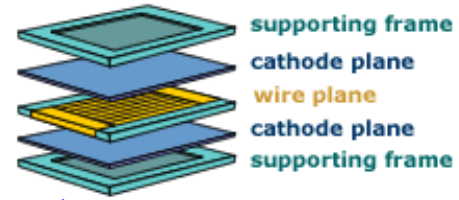


Θάλαμος Σπινθήρων (Spark Chamber)



MultiWire Proportional Chamber, MWPC

- Αποτελείται από δυο επίπεδες καθόδους μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται σε ίση απόσταση μια σειρά ανοδικών συρμάτων.

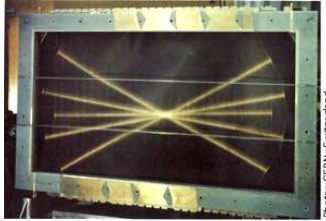


- Τυπικές τιμές: $d=2\text{ mm}$, $L=7 - 8\text{ mm}$,

D = διάμετρος σύρματος = $20 - 50\ \mu\text{m}$ (W+Au)

Αέριο: Ar (75%)+Ισοβουτάνιο(24.5%)+Freon(0.5%)

Ενίσχυση: $10^5 - 10^7$ @ $V_0=3.4-4.5\text{ kV}$, $C/L = 3.6\text{ pF/m}$



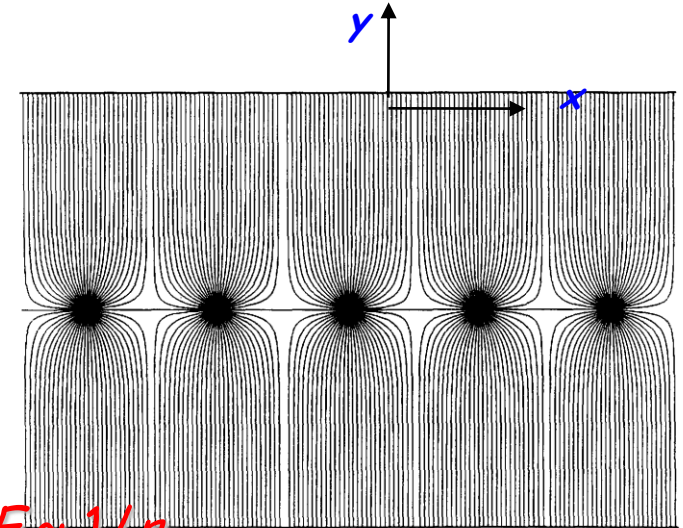
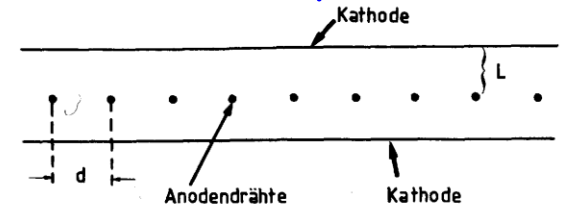
- Το δυναμικό του MWPC (στο όριο μηδενικής διαμέτρου του σύρματος ανόδου) στο χώρο μεταξύ ανόδων-καθόδου:

$$V(x,y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2\pi L}{d} - \ln \left(4 \sin^2 \frac{\pi x}{d} + 4 \sinh^2 \frac{\pi y}{d} \right) \right\}$$

- Αν $L \gg d \gg D$ η χωρητικότητα C ανόδου-καθόδου:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\pi L / x - \ln \pi D / d}$$

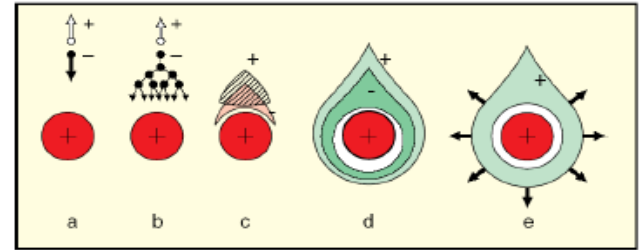
- Κοντά στα ανοδικά σύρματα: $E \sim 1/r$
(όπως με μονοσυρματικό απεριθμητή)



MultiWire Proportional Chamber, MWPC

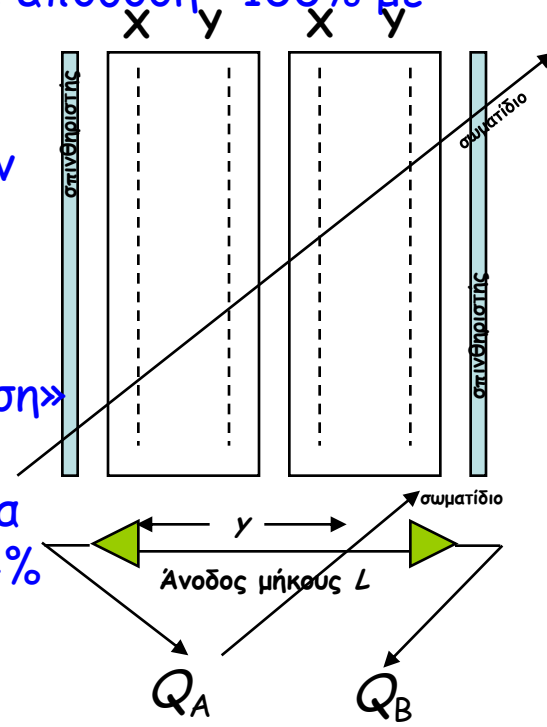
- Δευτερογενής ιοντισμός προκύπτει σε απόσταση μερικών διαμέτρων ανόδου από το σύρμα.
- Η εφαρμοζόμενη τάση στα ανοδικά σύρματα καθορίζεται από την αντίστοιχη ηλεκτροστατική δύναμη που πρέπει να είναι μικρότερη από την παραμένουσα δύναμη λόγω μηχανικής τάσης του σύρματος:

$$V_0 \leq \frac{d \sqrt{4\pi\epsilon_0 T}}{LC}$$



- Οι συνθήκες λειτουργίας των MWPC εξασφαλίζουν πάντοτε απόδοση ~100% με κατάλληλη υψηλή τάση.

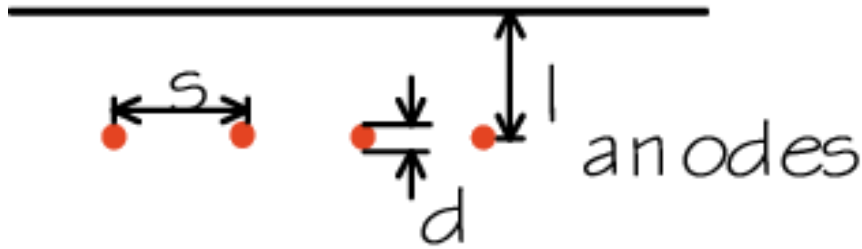
Η εγκάρσια διάταξη των ανόδων δίδουν πληροφορίες των δύο διαστάσεων για ένα σωματίδιο. Ο συνδυασμός 2 ή περισσότερων MWPC με X, Y ανόδους συνιστούν τηλεσκόπιο ανίχνευσης τροχιών φορτισμένων σωματιδίων.



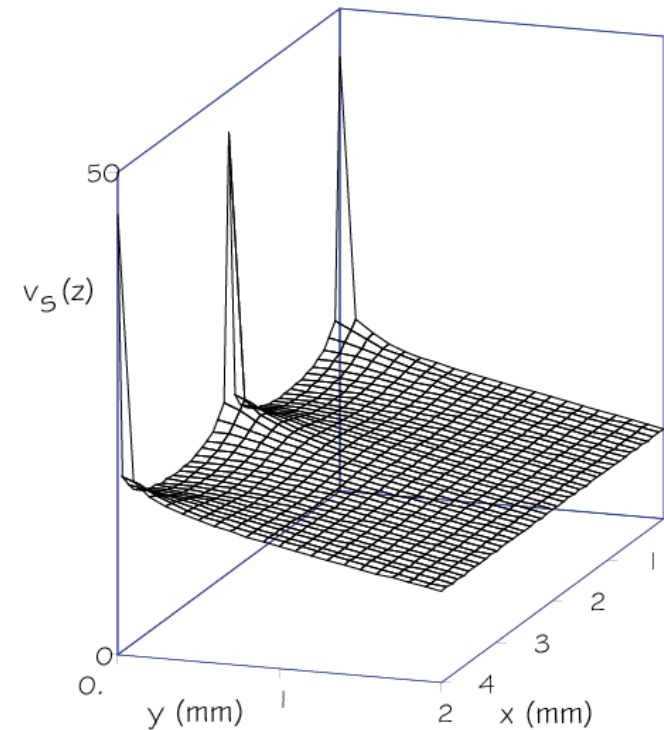
Με τη μέθοδο του διαιρέτη τάσης μπορούμε με «διπλή ανάγνωση» του κάθε σήματος να προσδιορίσουμε το σημείο διέλευσης του σωματιδίου από την άνοδο: $y/L = Q_A / (Q_A + Q_B)$, $Q_A, Q_B =$ φορτία που συλλέγονται στα A, Επιτυγχάνονται ακριβείς μετρήσεις 0,4% του μήκους L της ανόδου.

MultiWire Proportional Chamber, MWPC

cathode



cathode

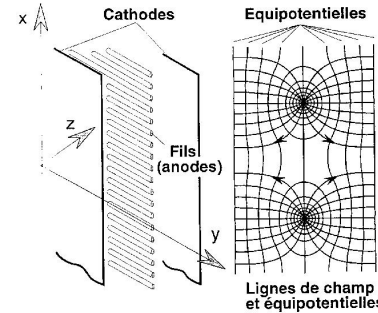


Τυπικοί παράμετροι:

$$l : 5 \text{ mm}$$

$$s : 2 - 4 \text{ mm}$$

$$d : 20 \mu\text{m}$$



$$V_s z \underset{d \rightarrow 0}{\approx} \frac{2\pi l}{s} - \ln \left\{ 4 \sin^2 \left(\frac{\pi x}{s} \right) + 4 \sinh^2 \left(\frac{\pi y}{s} \right) \right\}$$

$$Q = \frac{V_0}{\frac{2\pi l}{s} - 2 \ln \frac{\pi d}{s}} \quad \text{και} \quad E_0 = \frac{sV_0}{\frac{\pi d}{2} \left[1 - \frac{s}{\pi} \ln \frac{\pi d}{s} \right]}$$

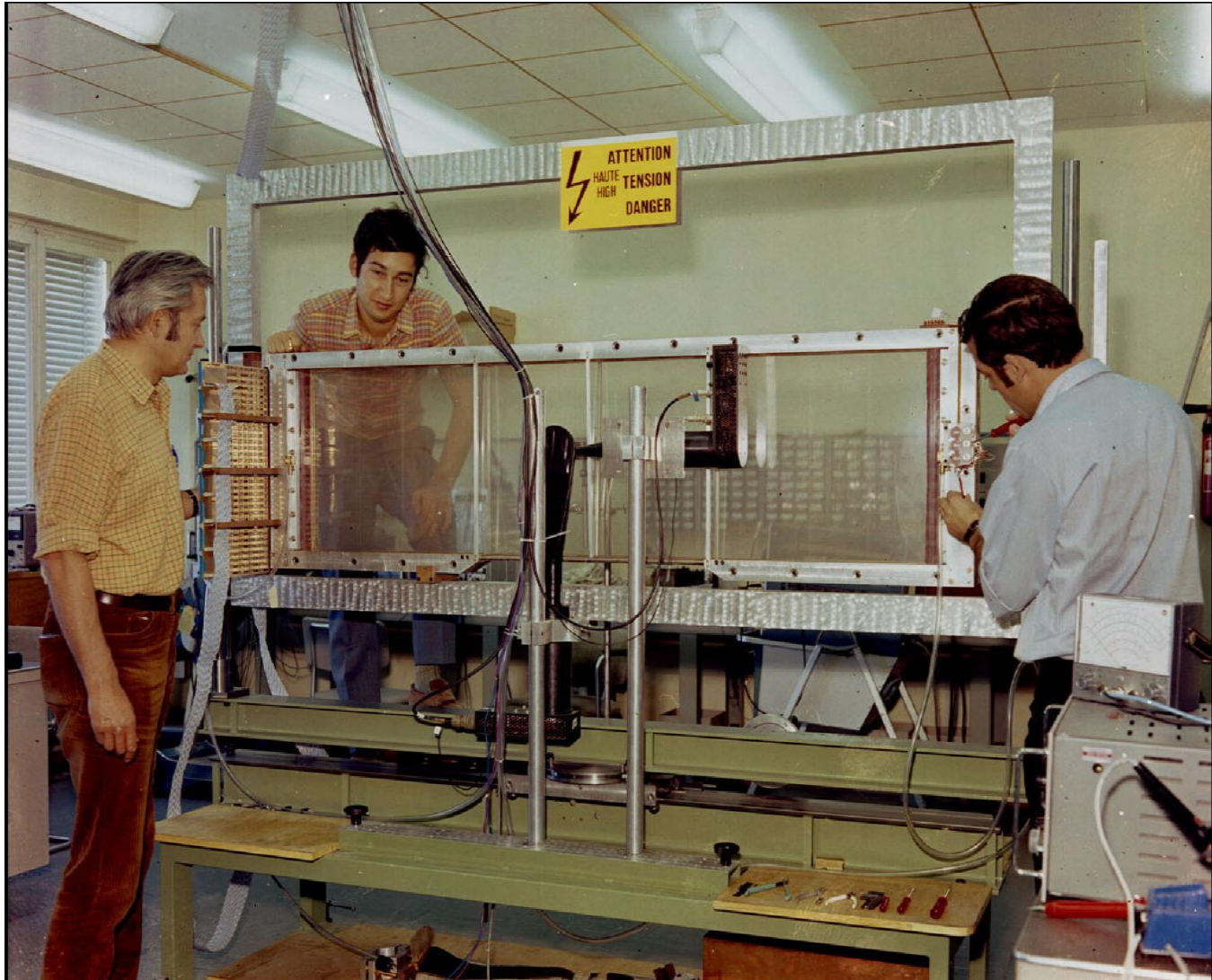
Οι θετικοί παλμοί που προκαλούνται από τα θετικά ιόντα στα γειτονικά σύρματα είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους αρνητικούς παλμούς που προκαλούνται ηλεκτροστατικά → το τελικό αποτέλεσμα θετικοί παλμοί.

Συνδυασμός MWPC με οριζόντια και εγκάρσια διάταξη των ανοδικών συρμάτων καθιστά ένα μοναδικό ανιχνευτικό εργαλείο με:

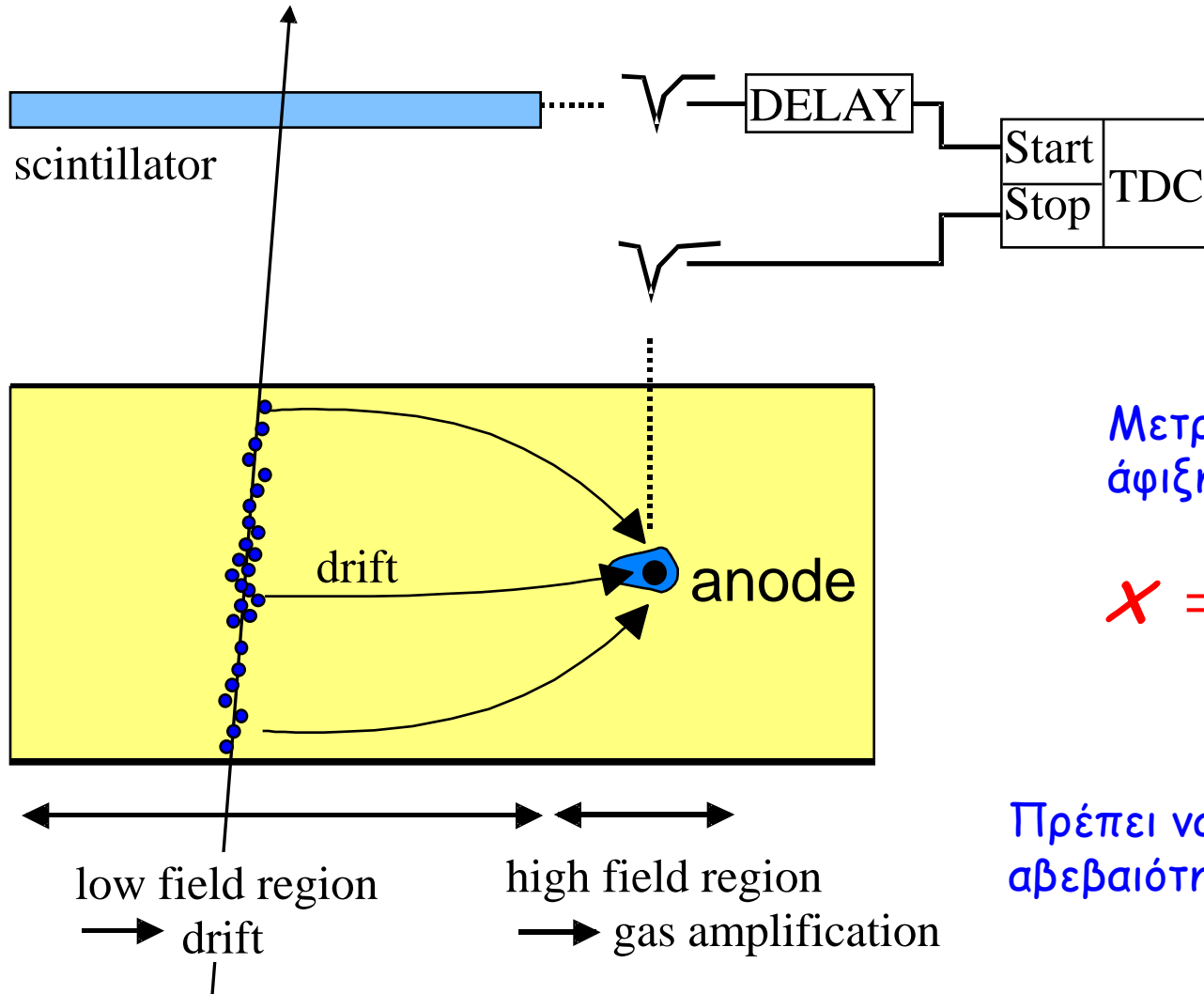
2-διάστατη χωρική διακριτική ικανότητα: $< 1 \text{ mm}$

χρονική διακριτική ικανότητα: $\sim 20 - 50 \text{ ms}$.

MultiWire Proportional Chamber, MWPC



Drift Chamber

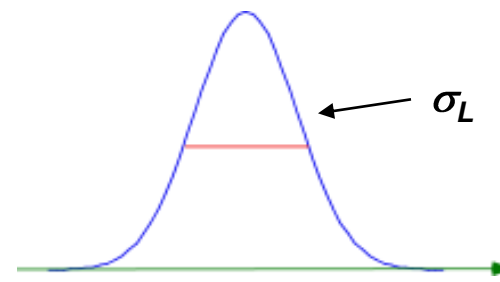
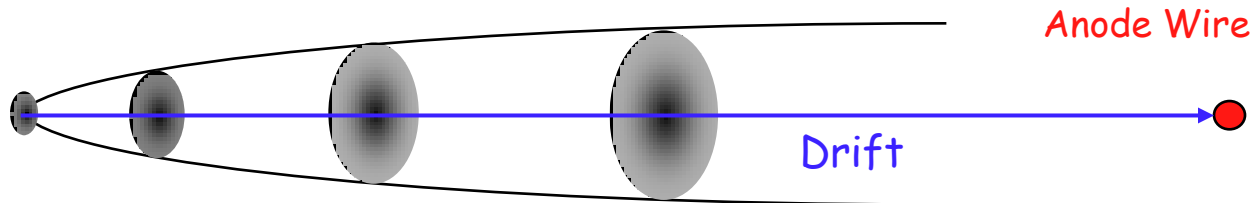
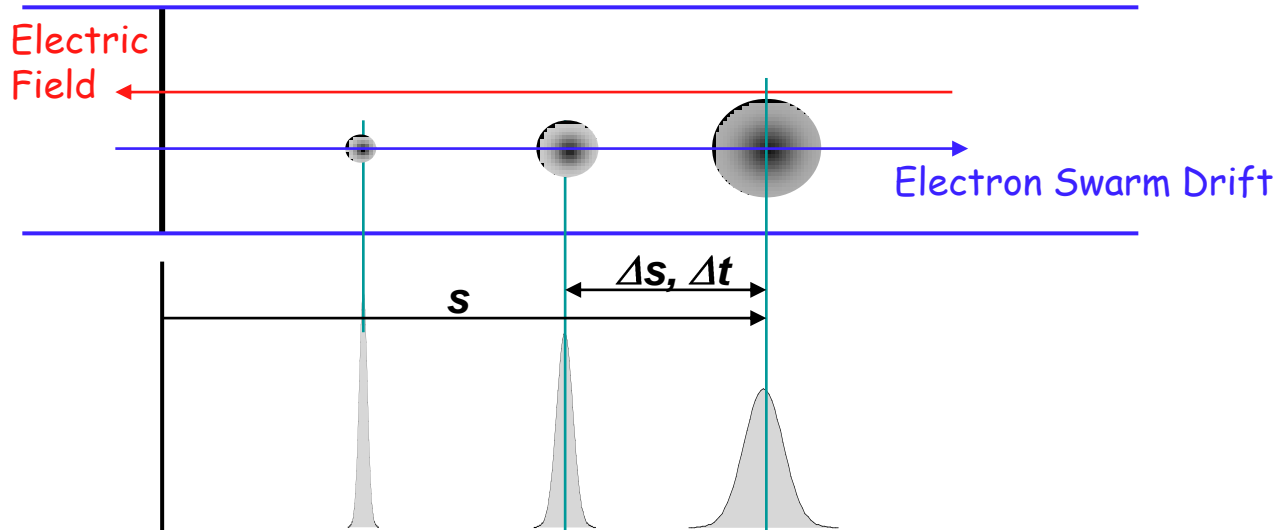


Μετράμε τον χρόνο
άφιξης στο σύρμα

$$x = v_d(t - t_0)$$

Πρέπει να λύσουμε την
αβεβαιότητα δεξιά - αριστερά

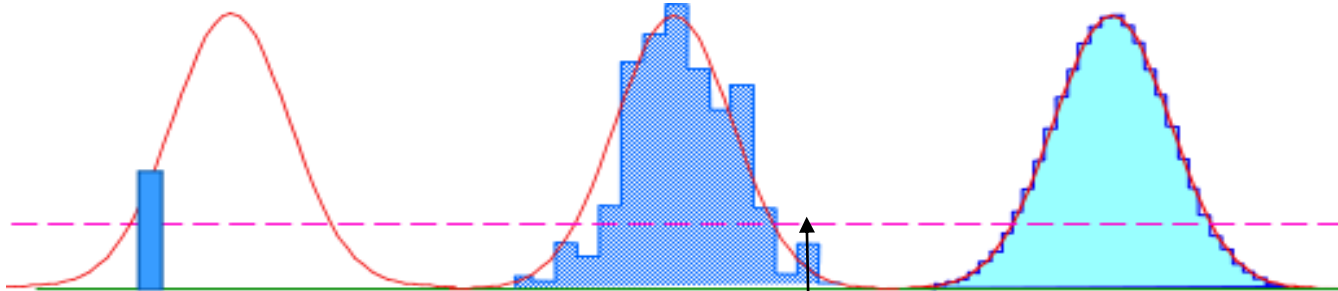
Drift Chamber



Single electron

Several electrons

Many electrons



Σφάλμα στο πρώτο ηλεκτρόνιο:

$$\sigma_1 \sim \frac{\pi}{2\sqrt{3\ln N}} \sigma_L$$

$$N=100 \quad \sigma_1 \sim 0.4 \sigma_L$$

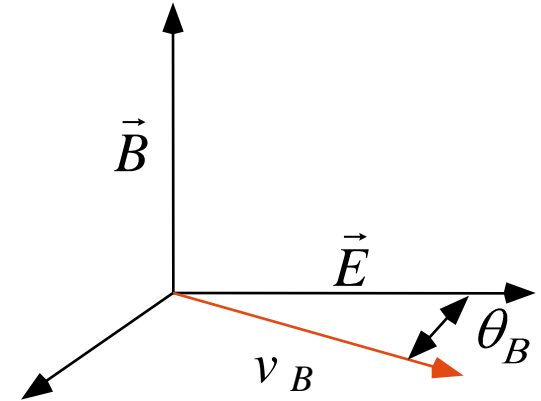
Detection threshold

Drift Chamber

$$\vec{E} \perp \vec{B}$$

$$\tan \theta_B = \omega \tau$$

$$v_B = v_0 \frac{1 + \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$



τ : μέσος χρόνος σύγκρουσης

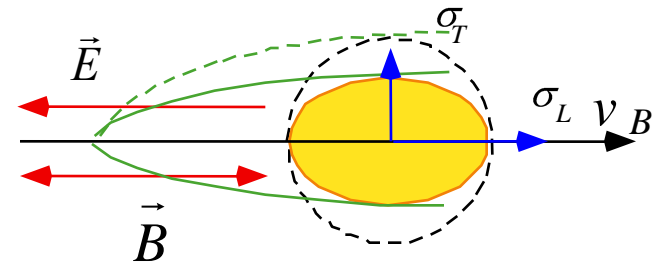
$\omega = eB/m$ Larmor frequency

$$\vec{E} \parallel \vec{B}$$

$$v_B = v_0$$

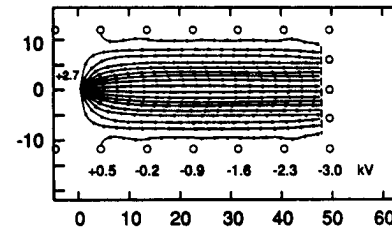
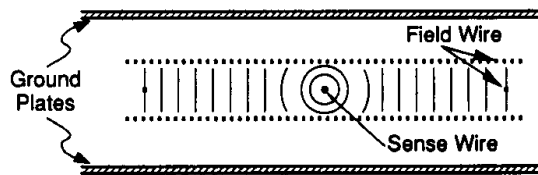
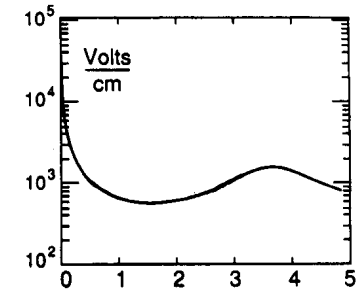
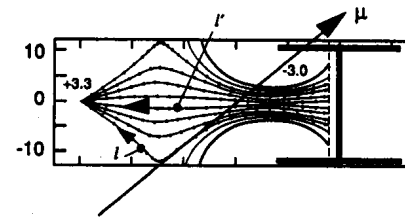
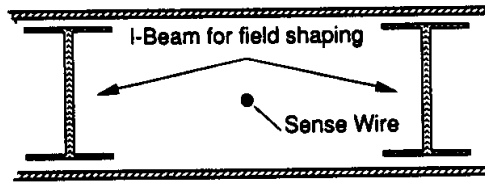
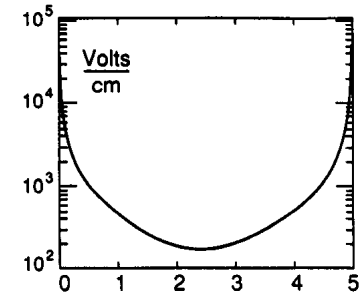
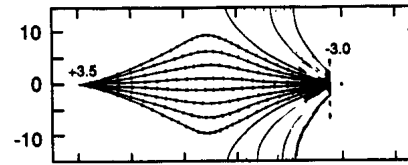
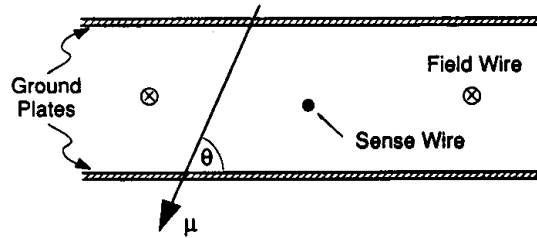
$$\sigma_L = \sigma_0$$

$$\sigma_T = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

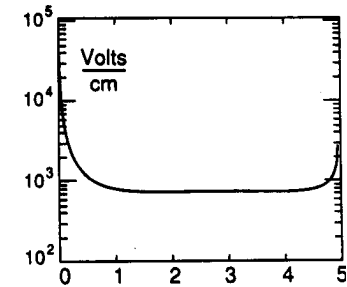


Drift Chamber

- Βέλτιστη γεωμετρία → σταθερό E-πεδίο
- Επιλογή "drift gases" με μικρή εξάρτηση $v_D(E) \rightarrow$ linear space - time relation $r(t)$



[mm]



[cm]

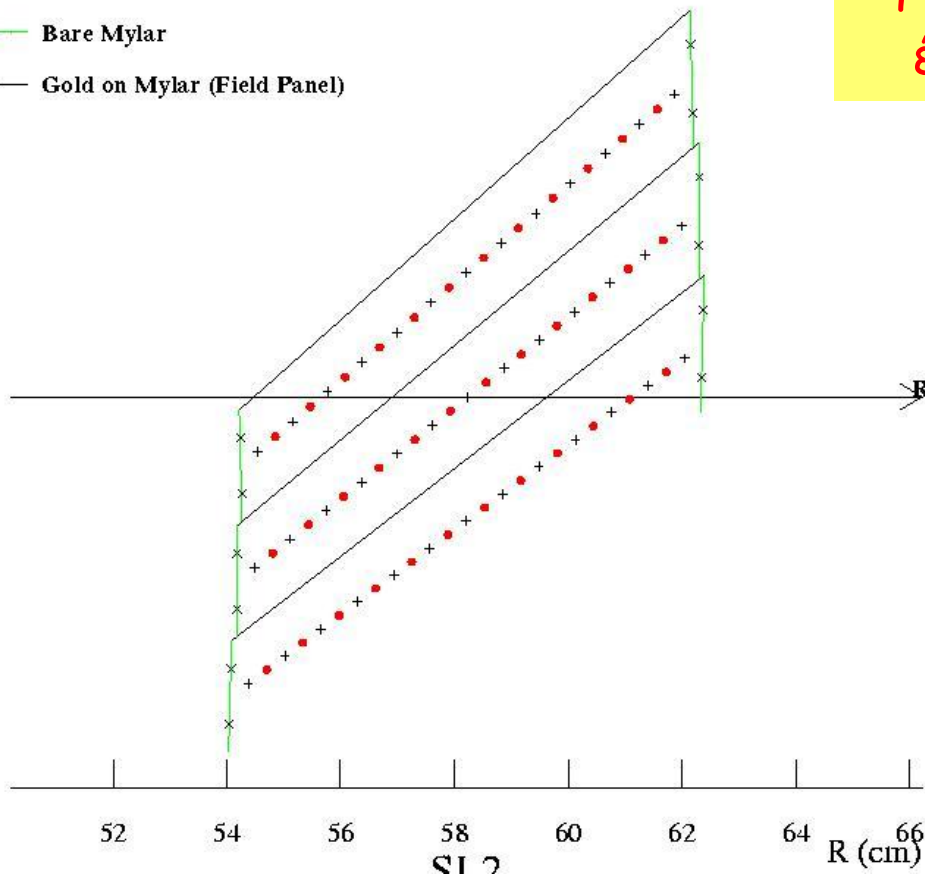
Large Area Drift Chamber

"open cell" drift chamber χρησιμοποιεί field και sense wires: field wires "σχηματίζουν" το ηλεκτρικό πεδίο, τα sense wires ανιχνεύουν το χρόνο άφιξης του παλμού.

× Shaper wires

— Bare Mylar

— Gold on Mylar (Field Panel)



Η εφαρμογή από το πείραμα CDF - τα έχουν κλίση εξαιτίας του $E \times B$ drift!



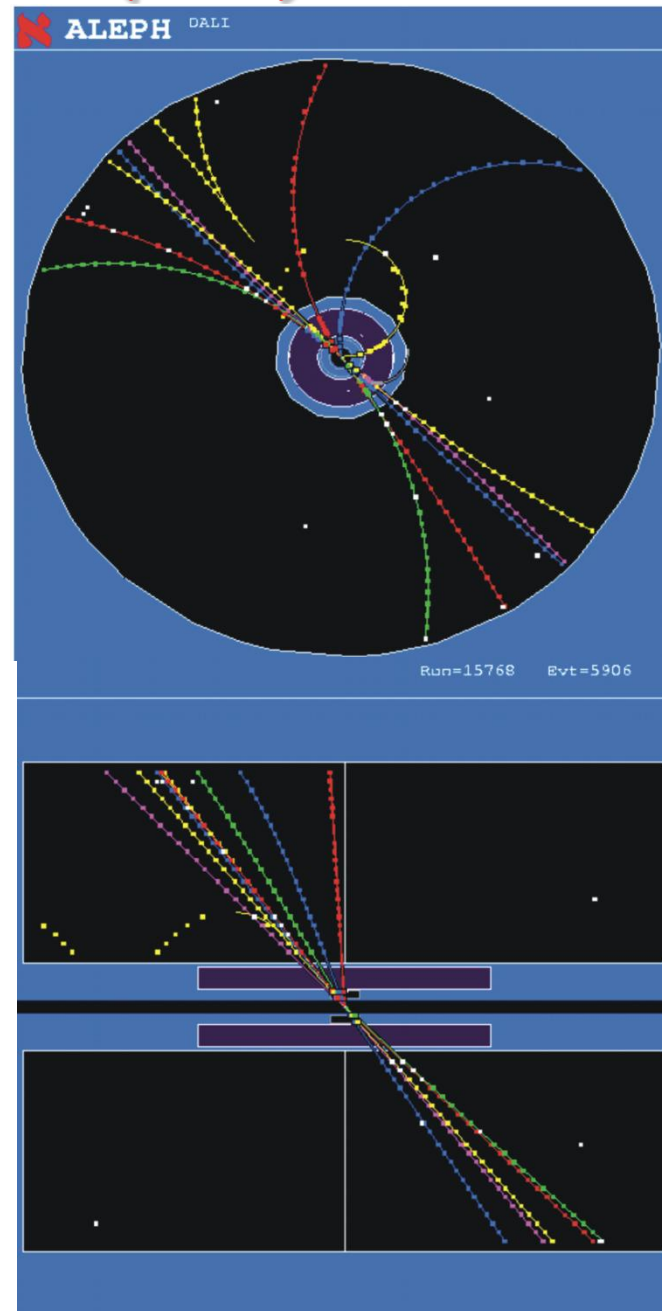
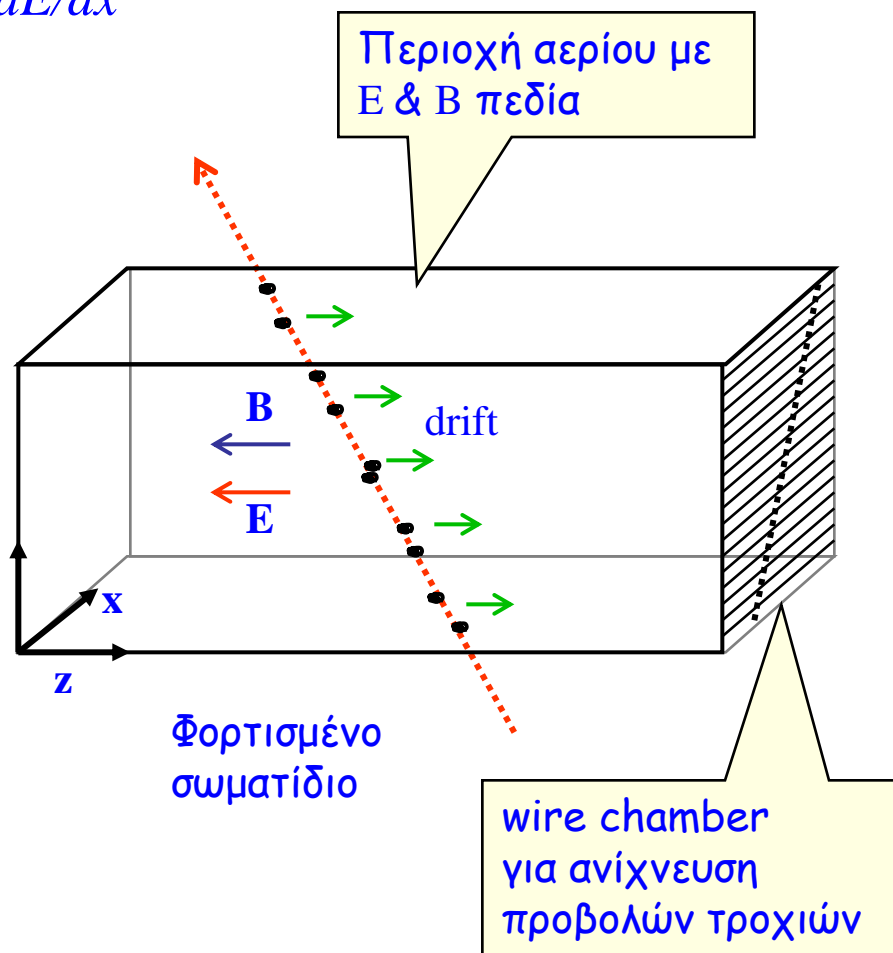
Time Projection Chambers (TPC)

Ανιχνευτής με μεγάλο όγκο. 3-D ανακατασκευή τροχιών

x-y από σύρματα και την κάθοδο MWPC

z από το drift time

dE/dx



Time Projection Chambers (TPC)

Βάζοντας $B \parallel E$ βελτιώνεται η διάχυση

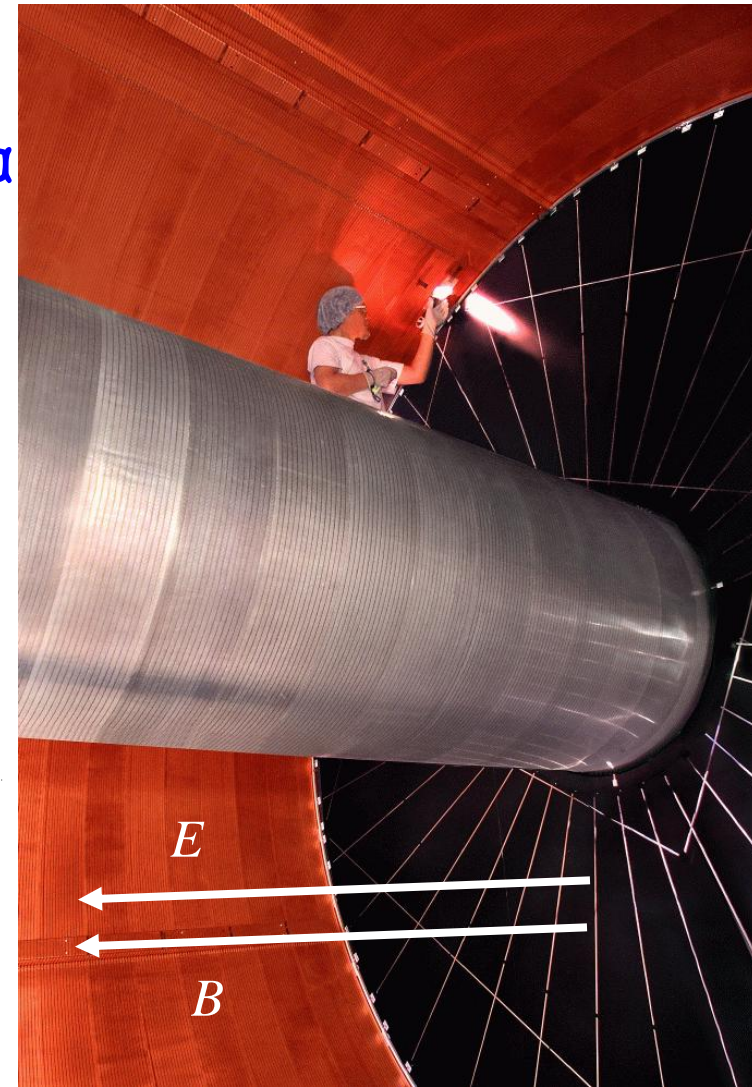
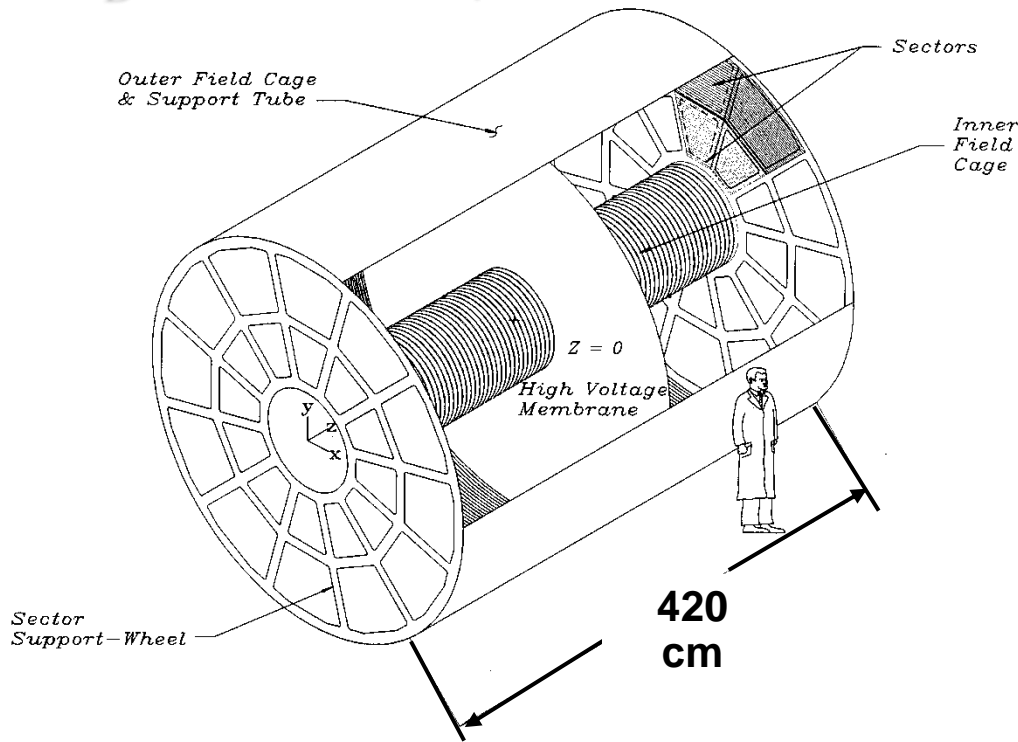
Drift length $\geq 1\text{m}$

Πρέπει να έχουμε ομογενή E και B πεδία

Space charge από τα ιόντα

"αργός" ανιχνευτής

$$t_D \sim 10 \rightarrow 100 \mu\text{s}$$



Time Projection Chambers (TPC)

Φορτίο χώρου (Space charge)

Πρόβλημα από τα θετικά ιόντα κινούνται προς την μεσαία μεμβράνη → gating

Gate open

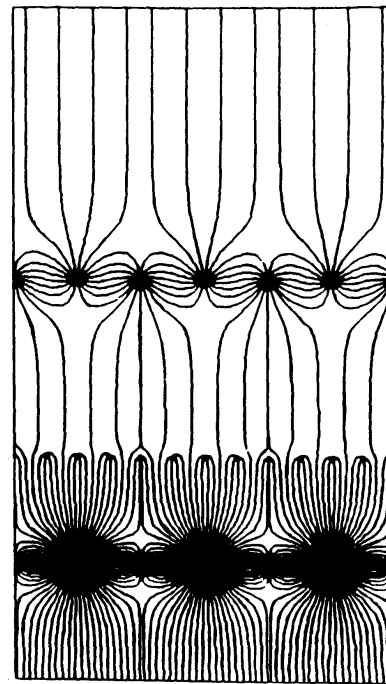
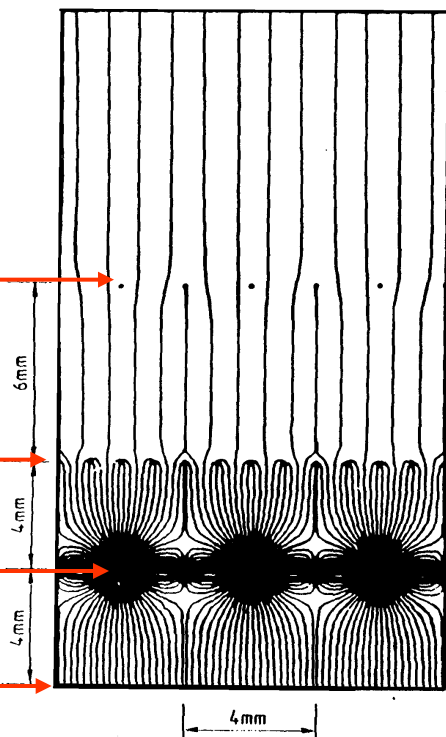
Gate closed

Gate wires

Cathode wires

Anode wires

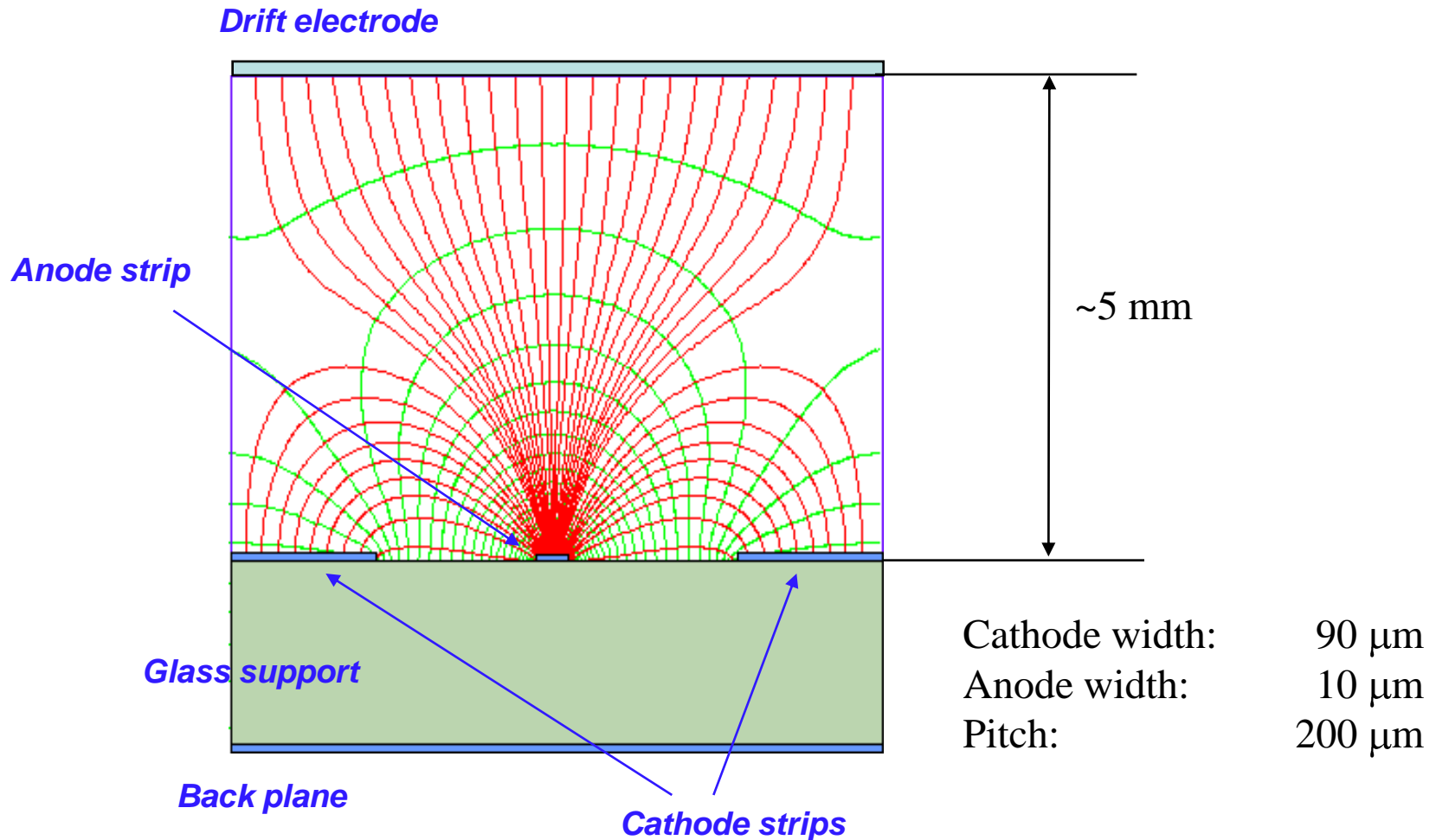
Cathode pads



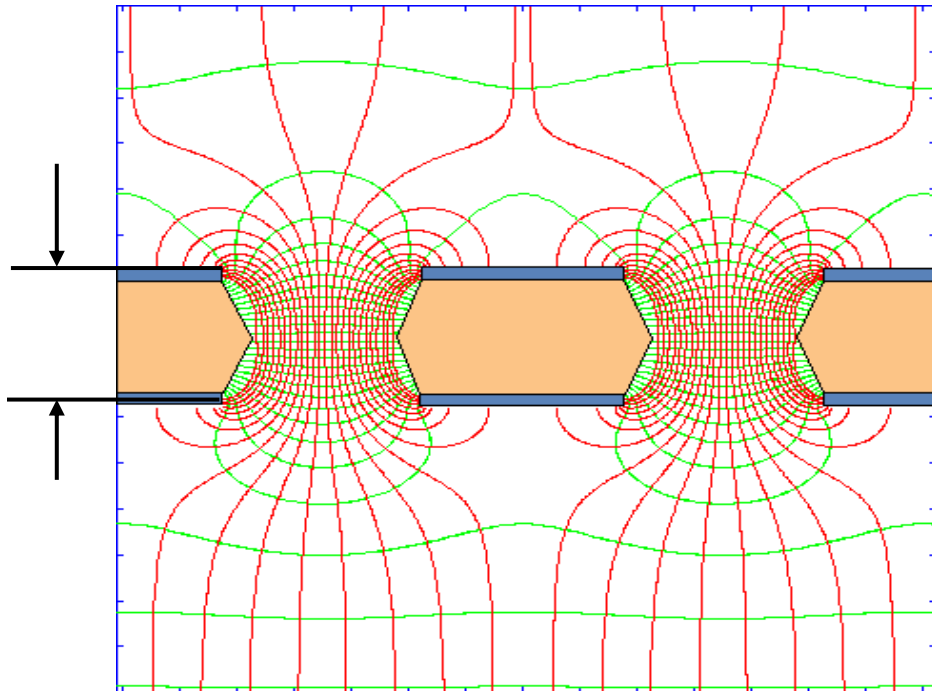
$$\Delta V_g = 150 \text{ V}$$

MICRO-STRIP GAS CHAMBER (MSGC)

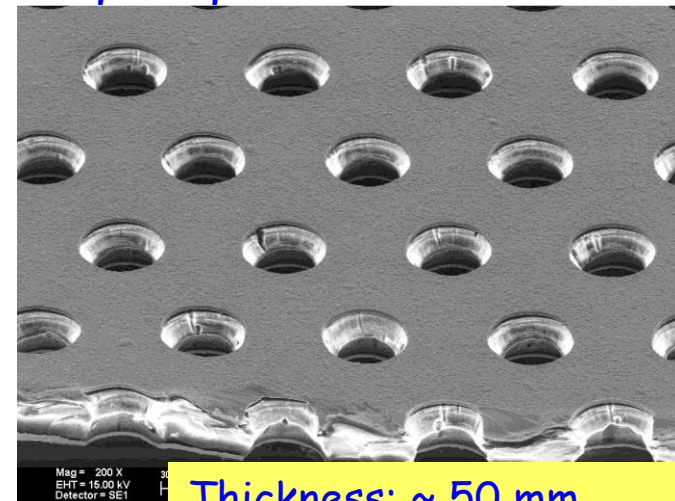
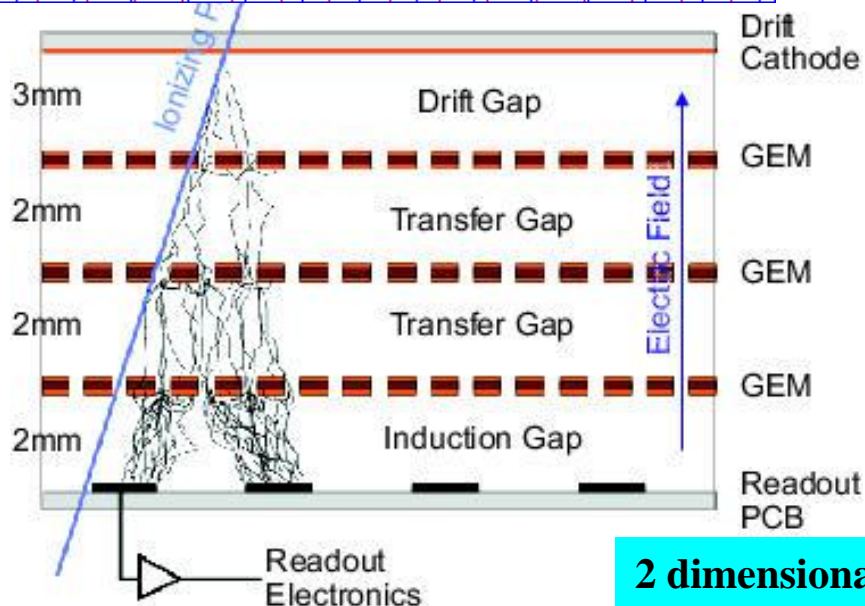
Λεπτές ταινίες ανόδου και καθόδου πάνω σε υλικό από μονωτή



Gas Electron Multiplier - GEM



Λεπτό φύλο επιμεταλλομένου πολυμερούς υλικού με μεγάλη πυκνότητα από τρύπες. Εφαρμόζοντας μια μεταβαλλόμενη τάση τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται στο πάνω μέρος ολισθαίνουν μέσα από τις τρύπες και πολλαπλασιάζονται σε καταιγίδα καθώς μεταφέρονται στην άλλη πλευρά. gains πάνω από 10^3 για τα περισσότερα αέρια.

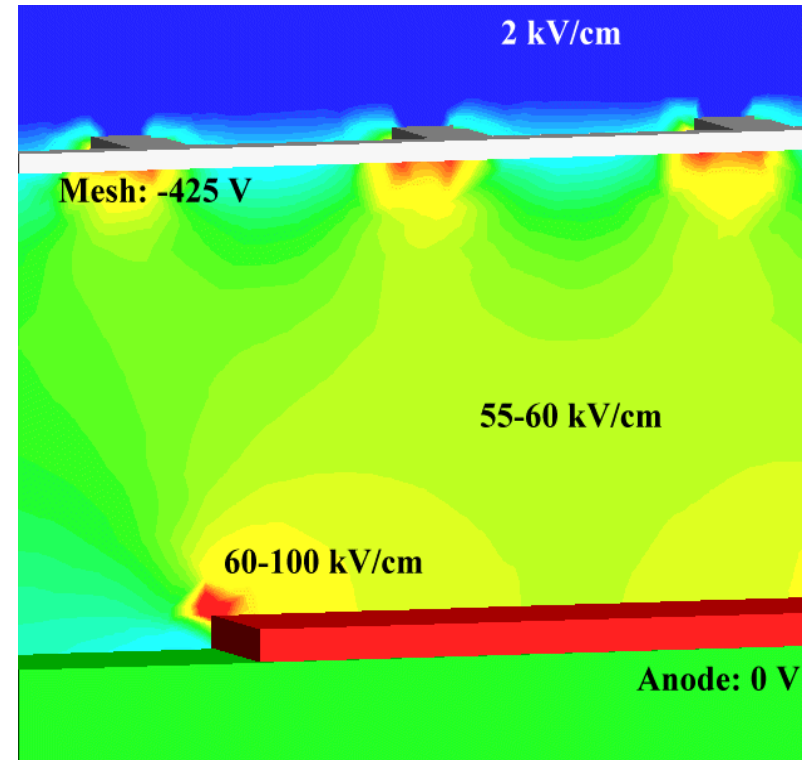
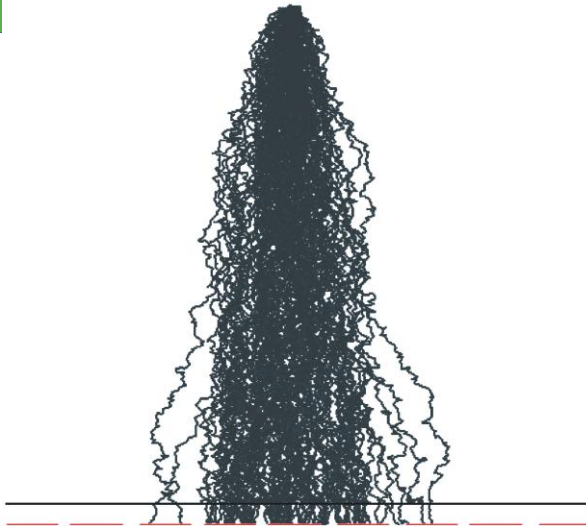
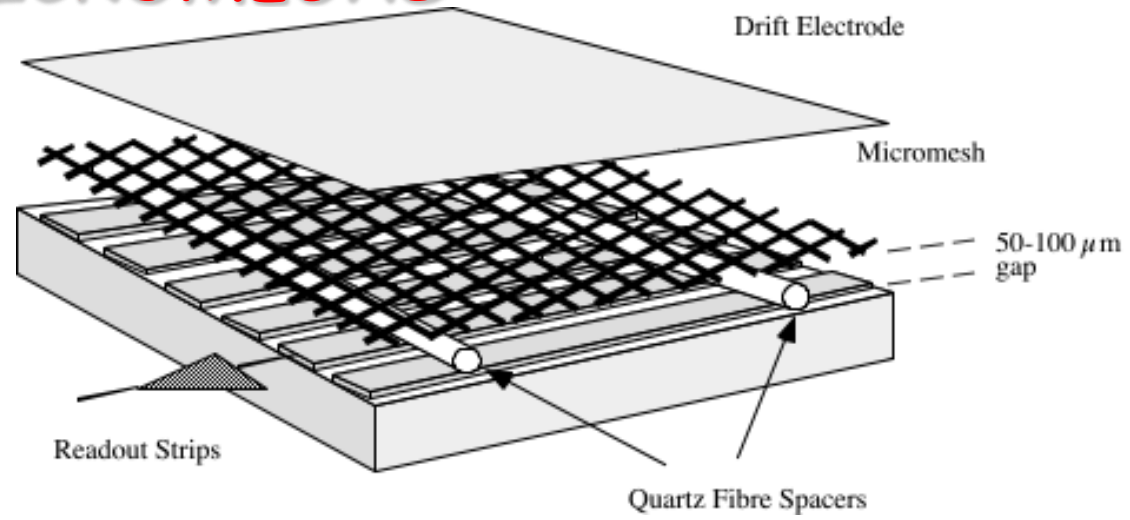
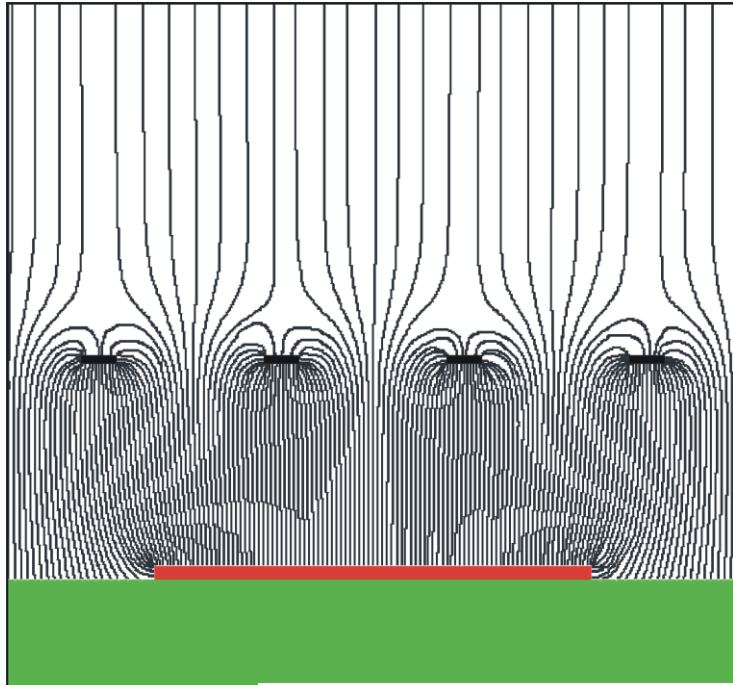


Thickness: ~ 50 μ m
DV: 400 - 600 V
Hole Diameter: ~ 70 μ m
Pitch: ~ 140 μ m

2 dimensional read-out

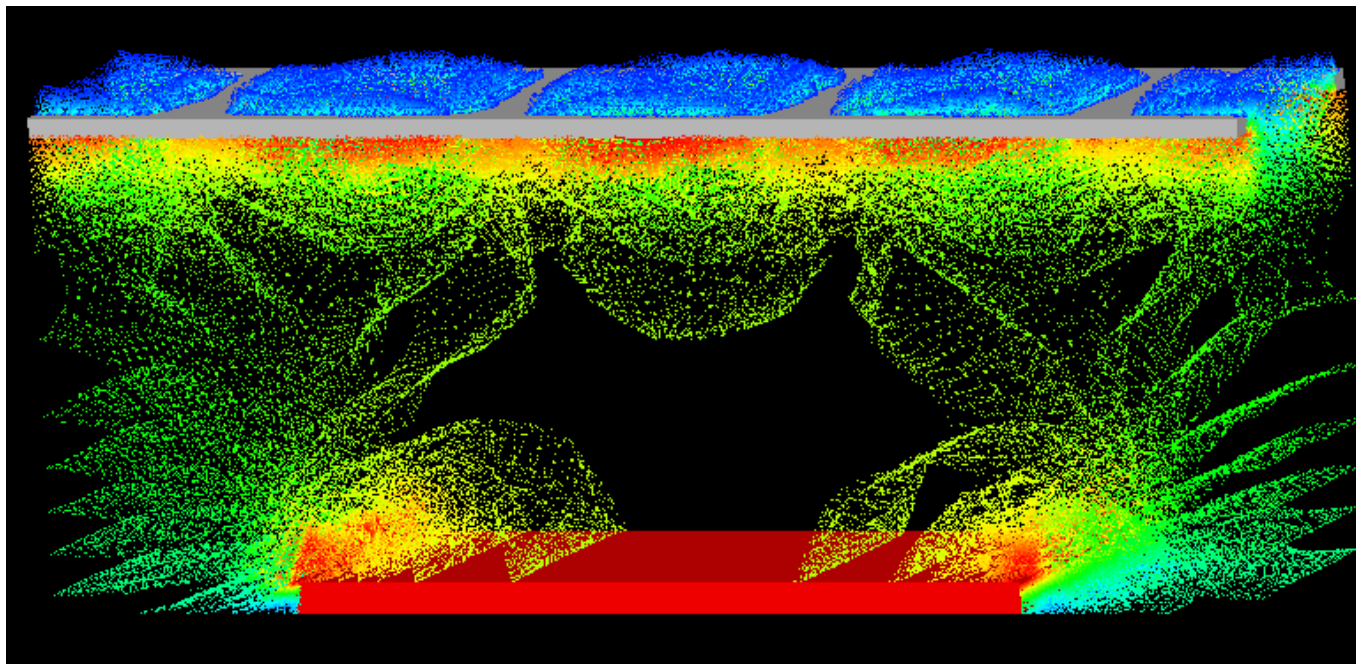
MICROMEAS

Thin-gap parallel plate chamber



MICROMEAS

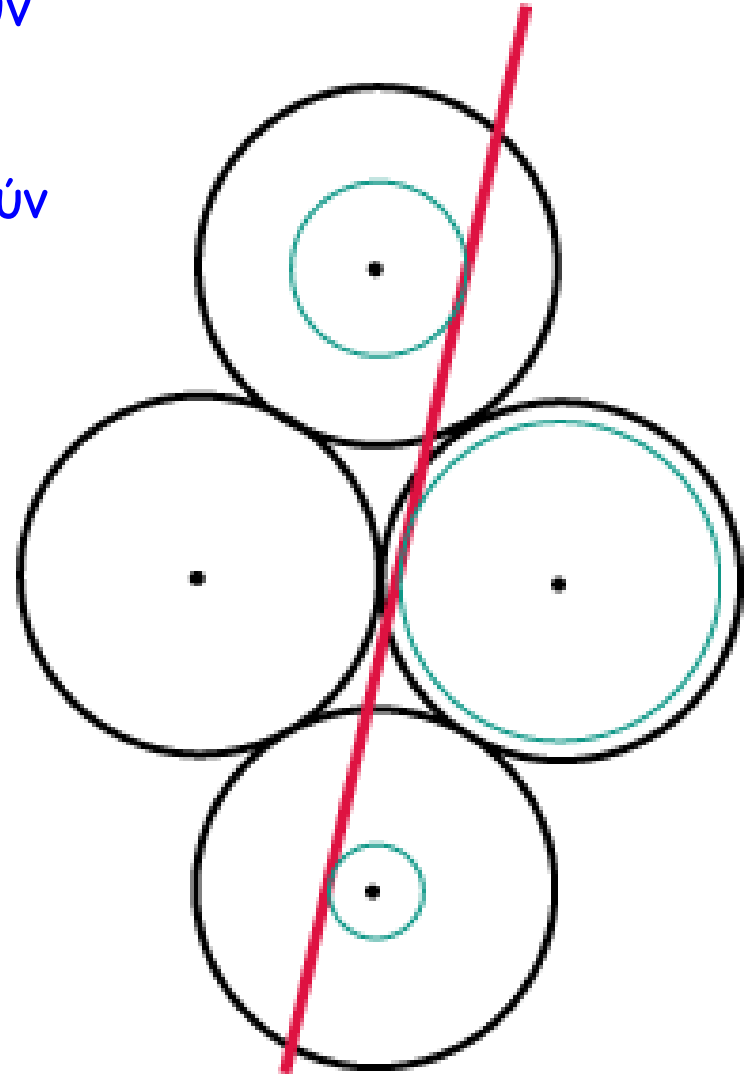
Micromegas 3D Simulations



- *Computation of field maps using 3D Finite Element Method. Software: Maxwell 3D Field Simulator[®] (Ansoft Corp.)*
- *Obtain gas transport parameters for operating gas with Monte Carlo simulation using imonte 4.5 (author: Steve Biagi).*
- *Input of field maps and gas parameters in detector simulation software Garfield (author: Rob Veenhof).*

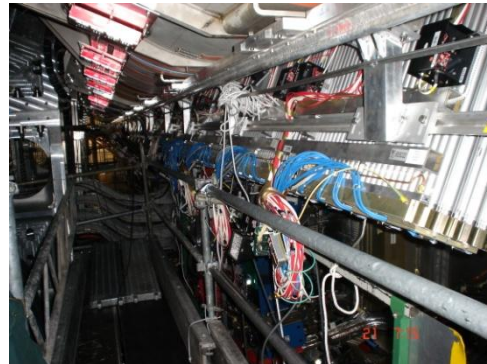
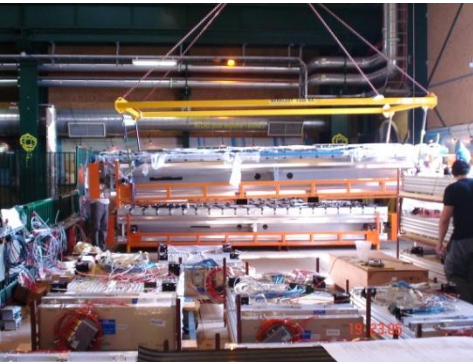
Ανιχνευτής Ολίσθησης ακριβείας (Precision Drift chamber)

- Αν στοιβάξουμε αρκετούς αναλογικούς απαριθμητές, μπορούμε να μετρήσουμε το χρόνο άφιξης των παλμών ιοντισμού.
- Βρίσκουμε τις επαπτόμενες που αντιστοιχούν στους κύκλους ολίσθησης.
- Βρίσκουμε χωρική διακριτική ικανότητα με ακρίβεια $\sim 100 \mu\text{m}$.
- **ΑΛΛΑ πολύ μεγάλη μάζα, πολύ υλικό!**

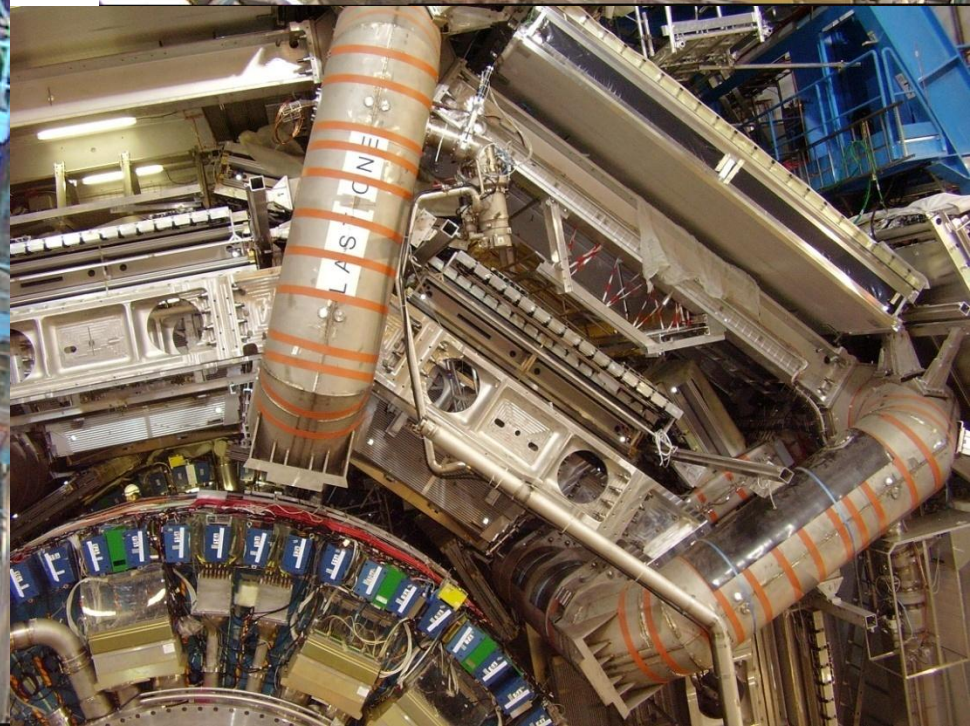
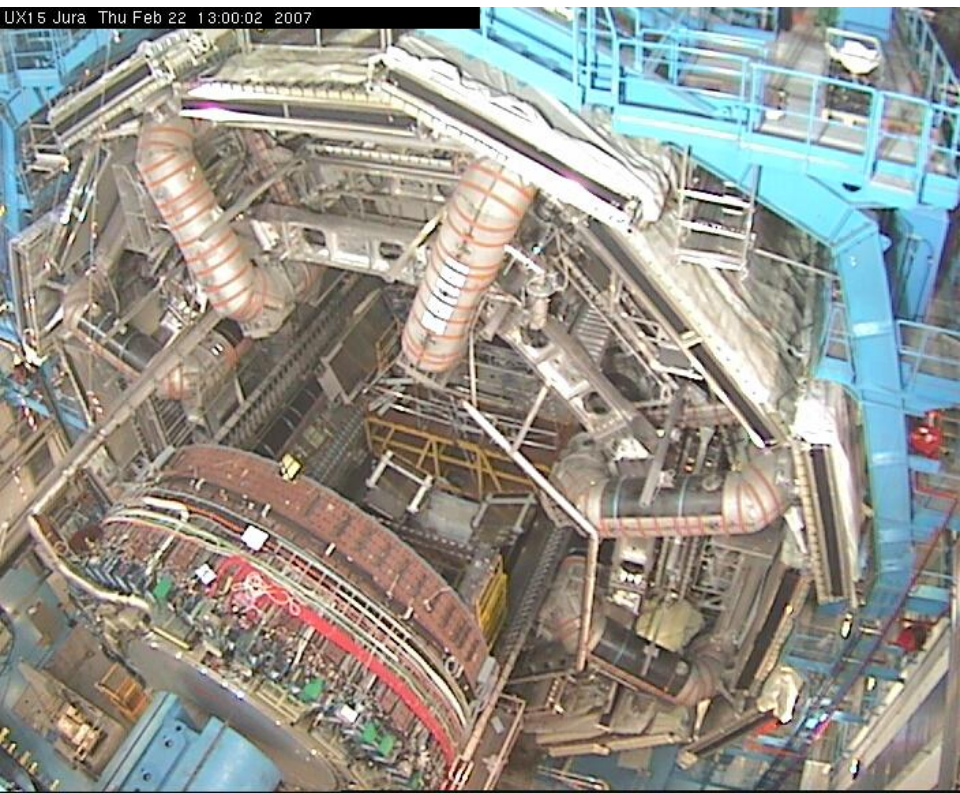


Πείραμα ATLAS - LHC

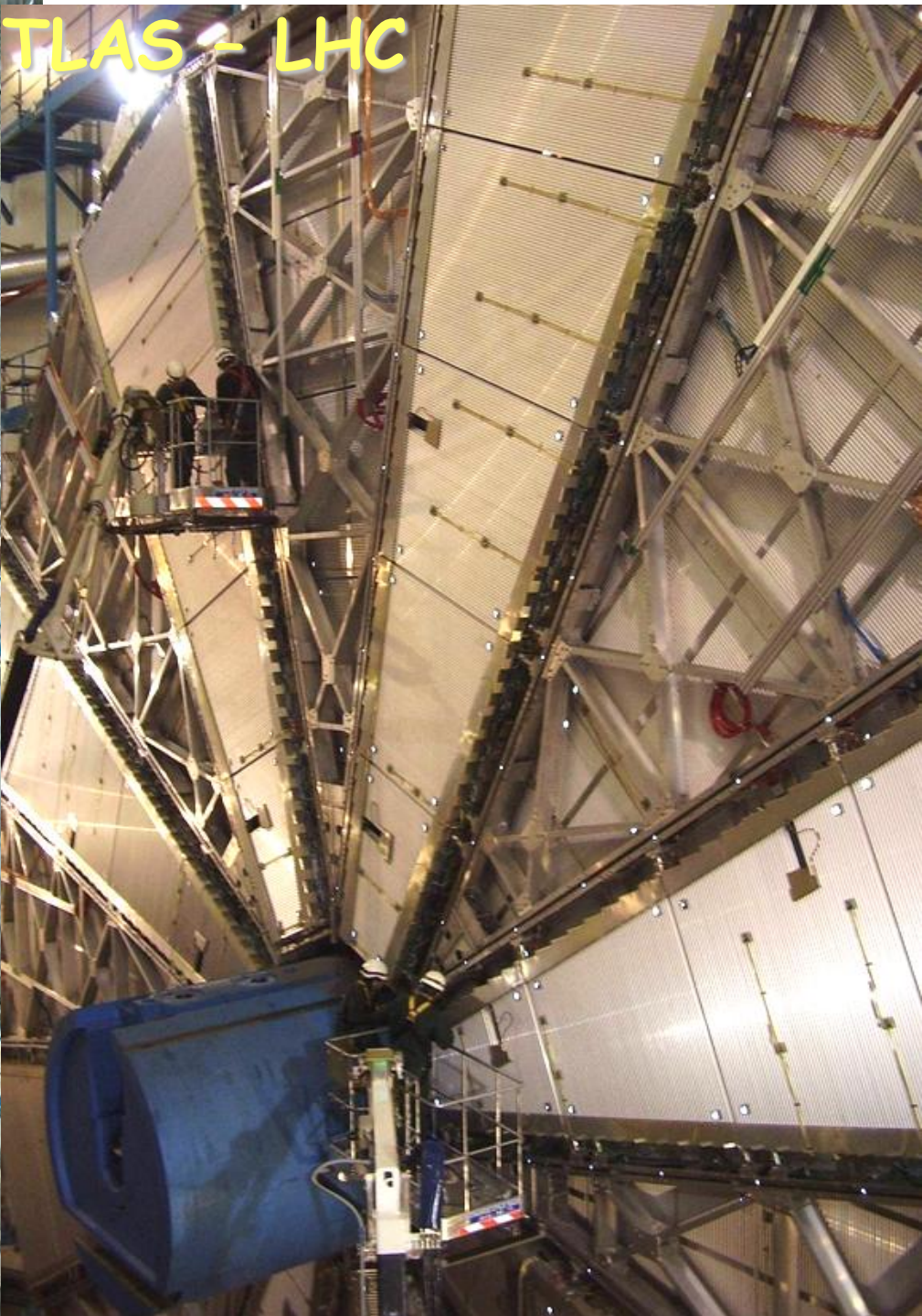
Monitored Drift Tubes



UX15 Jura Thu Feb 22 13:00:02 2007



Πείραμα ATLAS - LHC



Απαριθμητής Geiger-Müller

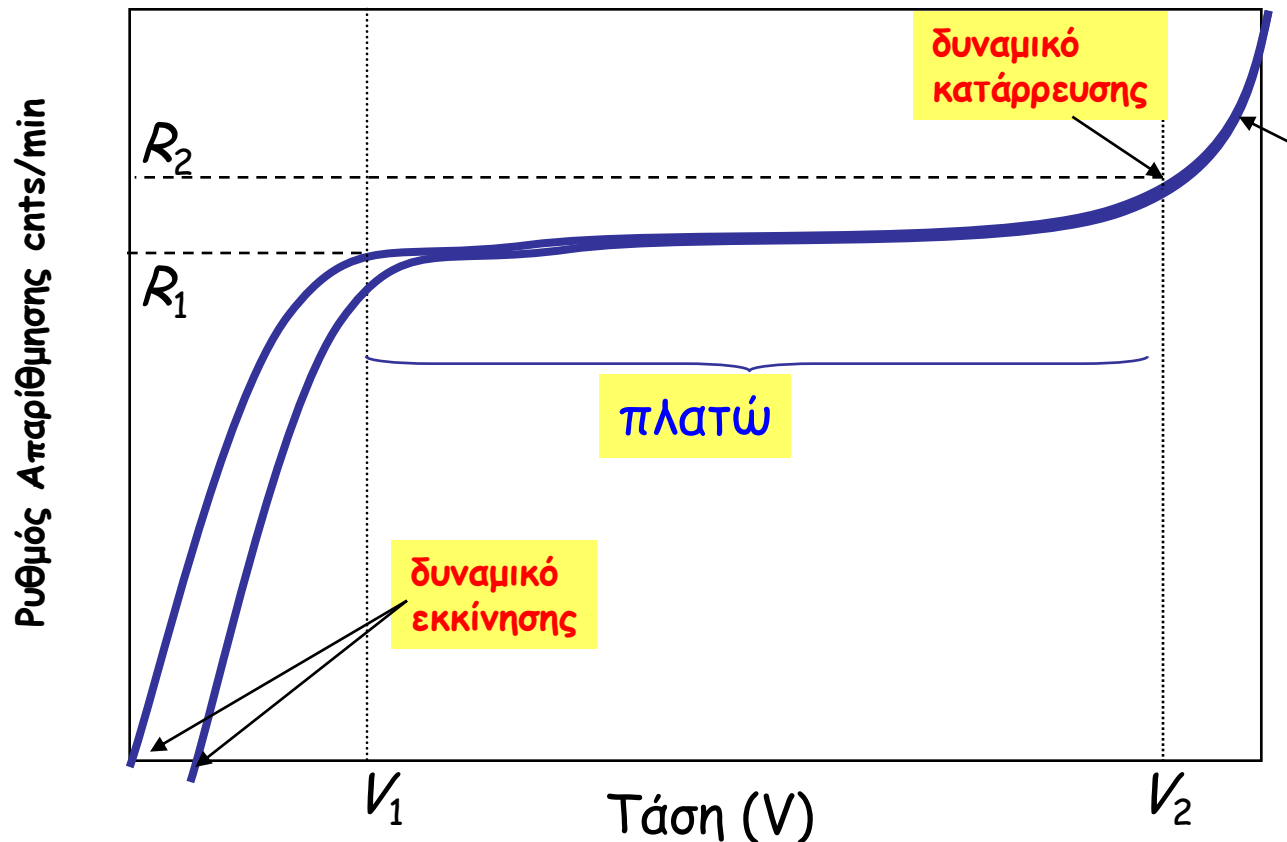
- Χαρακτηριστικά:
 - Θάλαμος ιονισμού, κυλινδρικός με άνοδο στον άξονα.
 - Κάθοδος μεταλλική, ή γυάλινη με μεταλλική εσωτερική επίστρωση.
 - Αέριο ευγενές (Ne ή Ar) με πρόσμιξη.
 - Έντονος δευτερογενής ιονισμός (φαιν. χιονοστιβάδας) ακόμα και από 1 ΜΟΝΟ ζεύγος ιόντων πρωτογενών.
 - Υψηλός νεκρός χρόνος (~ 1 ms).
- **Εφαρμογή:** Ηλεκτρόνιο με κινητική ενέργεια 0.5 MeV χάνει όλη του την ενέργεια μέσα στον ανιχνευτή. Αέριο He με μέση ενέργεια ιοντισμού 42 eV.
- Αριθμός παραγόμενων ζευγών e-ιόντων: $N = 0.5 \times 10^6 \text{ eV} / 42 \text{ eV} \sim 1200$,
- Για ένα τυπικό Geiger, η χωρητικότητα είναι $C = 10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ nF}$, οπότε η τάση σήματος είναι: $V = Q/C = Ne/C \sim 2 \times 10^{-6} \text{ V}$ (μικρό σήμα)
- ΑΛΛΑ λόγω του φαινομένου χιονοστιβάδας έχουμε $N \sim 10^{10}$ ζεύγη
→ $V \sim 1.6 \text{ V}$ (μεγάλο σήμα!).

Απαριθμητής Geiger-Müller

- Αν ο G-M περιέχει καθαρό αέριο, μπορούν να συμβούν εκφορτίσεις:
 - άφιξη θετικών ιόντων στην κάθοδο και εκπομπή ηλεκτρονίων που προκαλούν νέα εκφόρτιση.
 - διαφοράς ενέργειας ιόντος και έργο εξόδου καθόδου, με αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίου και εν συνέχεια φωτοηλεκτρονίου.
- Η αποφυγή των πολλαπλών εκφορτίσεων:
- Κατάλληλο εξωτερικό κύκλωμα μεγάλης αντίστασης φόρτου $\sim 10^8 \Omega$. Μειονέκτημα ο μεγάλος νεκρός χρόνος του ανιχνευτή ($\sim 1 \text{ ms}$).
- Αυτοαπόσβεση με την προσθήκη στο ευγενές αέριο $\text{CH}_3 \text{ CH}_2\text{OH}$ ή αλογόνου αερίου.
- Ιόντα Ar ιοντίζουν μόρια αλκοόλης \rightarrow ιόντα αλκοόλης προς κάθοδο.
- Περιορισμένος χρόνος ζωής μίγματος $\sim 10^{10}$ κρούσεις.
- Ιοντισμός αλογόνων που οδεύουν στην κάθοδο. ΔΕΝ υπάρχει περιορισμός, τα διασπασμένα άτομα αλογόνου επανασυνδέονται. Χρήση ανιχνευτή με υψηλά δυναμικά και λήψη παλμών μέχρι 10 V.

Απαριθμητής Geiger-Müller

- Στη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του απαριθμητή GM το «πλατώ» είναι ανεξάρτητο του είδους της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.
- Περιοχή λειτουργίας GM: $V_1 - V_2$
- Σημείο λειτουργίας GM: 50-70% του πλατώ
- Κλίση του πλατώ: $100(R_1 - R_2) / R_1 \times 100 / (V_1 - V_2) \%$



Δυναμικό εκκίνησης: αυτό που δίνει τον ελάχιστο παλμό να περάσει το κατώφλι του διευκρινιστή. Εξαρτάται από τον τύπο του σωματιδίου.

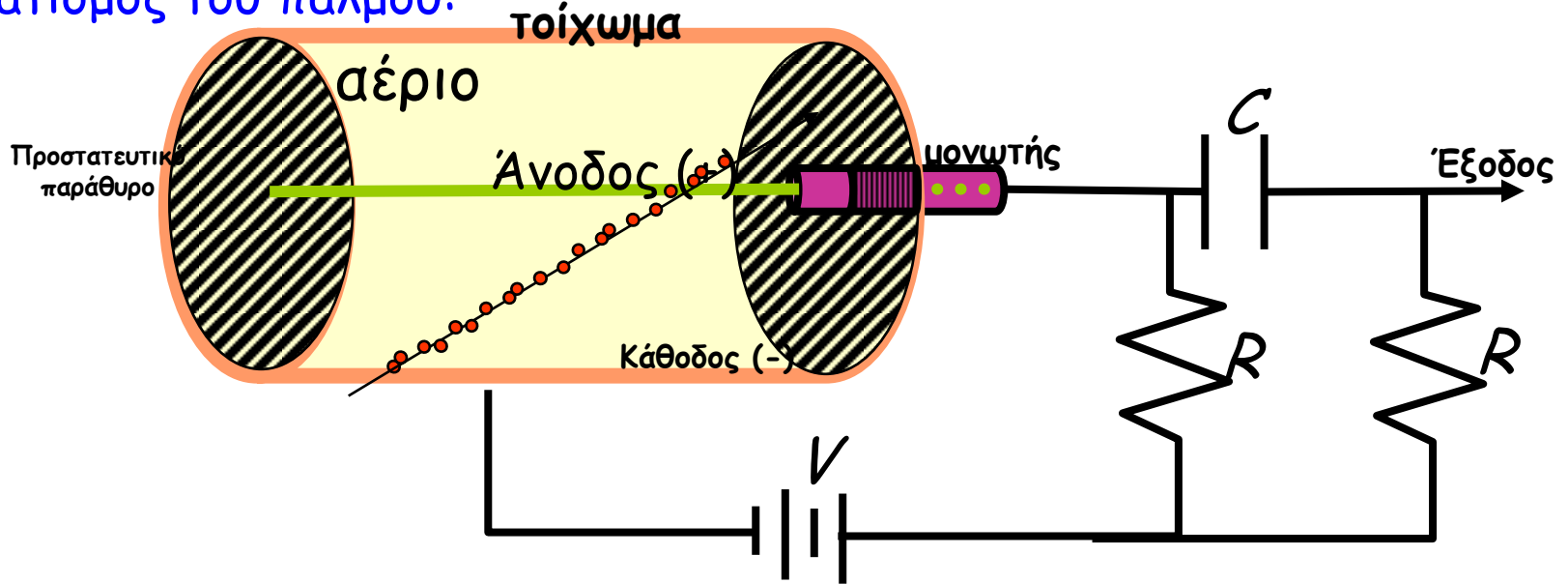
Νεκρός χρόνος GM:
 $\tau \sim 400 \mu\text{s}$

Διόρθωση μετρούμενου χρόνου:

$$R = \frac{R_0}{1 - \tau R_0}$$

Απαριθμητής Geiger-Müller

Σχηματισμός του παλμού:



Ο παλμός του σήματος εξόδου οφείλεται στην επαγωγή φορτίων λόγω της κίνησης των θετικών ιόντων και των ηλεκτρονίων κατά την ολίσθησή τους, παρά στην καθαυτού της συλλογής των φορτίων.

Για κυλινδρικό αναλογικό απαριθμητή:

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon r}, \quad V(r) = -\frac{CV_0}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r}{a}\right), \quad C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln b/a}$$

Ηλεκτρικό πεδίο

Ηλεκτρικό Δυναμικό

Χωρητικότητα /μονάδα μήκους

Απαριθμητής Geiger-Müller

Αν q φορτίο σε απόσταση r από την άνοδο:

Δυναμική ενέργεια φορτίου: $E = qV(r)$, και αν το φορτίο μετακινείται κατά dr :

$$dE = q \frac{dV}{dr} dr$$

Για πυκνωτή με χωρητικότητα C , η ηλεκτροστατική ενέργεια είναι:

$$E = \frac{1}{2} \ell C V_0^2 \quad \ell = \text{μήκος του κυλίνδρου}$$

Ταχεία κίνηση φορτίων \rightarrow $\Delta E N$ αλλάζει η εξωτερική παροχή \rightarrow κλειστό κύκλωμα \rightarrow ενέργεια διατηρείται:

$$dE = \ell C V_0 dV = q \frac{dV(r)}{dr} dr \Rightarrow dV = \frac{q}{\ell C V_0} \frac{dV(r)}{dr} dr$$

Εμφάνιση παλμού dV που επάγεται κατά μήκος των ηλεκτροδίων από τη μετακίνηση του φορτίου.

Θεωρούμε πολλαπλασιασμό φορτίου σε απόσταση r' από την άνοδο, μετά την εμφάνιση πρωτογενούς ιοντίζοντος γεγονότος:

Απαριθμητής Geiger-Müller

Συνολική επαγόμενη τάση λόγω ηλεκτρονίων:

$$V^- = -\frac{q}{\ell C V_o} \int_{a+r'}^a \frac{dV}{dr} dr = -\frac{q}{2\pi\epsilon\ell} \ln\left(\frac{a+r'}{a}\right)$$

Συνολική επαγόμενη τάση λόγω θετικών ιόντων:

$$V^+ = \frac{q}{\ell C V_o} \int_{a+r'}^b \frac{dV}{dr} dr = -\frac{q}{2\pi\epsilon\ell} \ln\left(\frac{b}{a+r'}\right)$$

Συνολική τάση:

$$V = V^+ + V^- = -\frac{q}{\ell C'}, \quad \frac{V^-}{V^+} = \frac{\ln(a+r')/a}{\ln b/(a+r')}$$

Περιοχή πολλαπλασιασμού φορτίων (~μερικές ακτίνες ανόδου) προκύπτει ότι η συνεισφορά των ηλεκτρονίων είναι μικρή εν σχέσει με αυτής των θετικών ιόντων, στο σχηματισμό του παλμού.

Παράδειγμα: $a=10 \mu\text{m}$, $b=10 \mu\text{m}$, $r'=1 \mu\text{m} \rightarrow V^- < 1\% V^+$

→ Το επαγόμενο σήμα οφείλεται κυρίως στην κίνηση των θετικών φορτίων και η κίνηση των ηλεκτρονίων μπορεί να **αγνοηθεί**.

Απαριθμητής Geiger-Müller

Χρόνος ανάπτυξης παλμού:

$$V(t) = \int_{r(0)}^{r(t)} \frac{dV}{dr} dr = -\frac{q}{2\pi\epsilon\ell} \ln\left(\frac{r(t)}{a}\right)$$

Από τη σχέση της κινητικότητας θα έχουμε:

$$\mu = \frac{v}{E} \Rightarrow \frac{dr}{dt} = \mu E(r) = \frac{\mu C V_0}{\pi\epsilon} \frac{1}{r} \Rightarrow r dr = \frac{\mu C V_0}{\pi\epsilon} dt$$

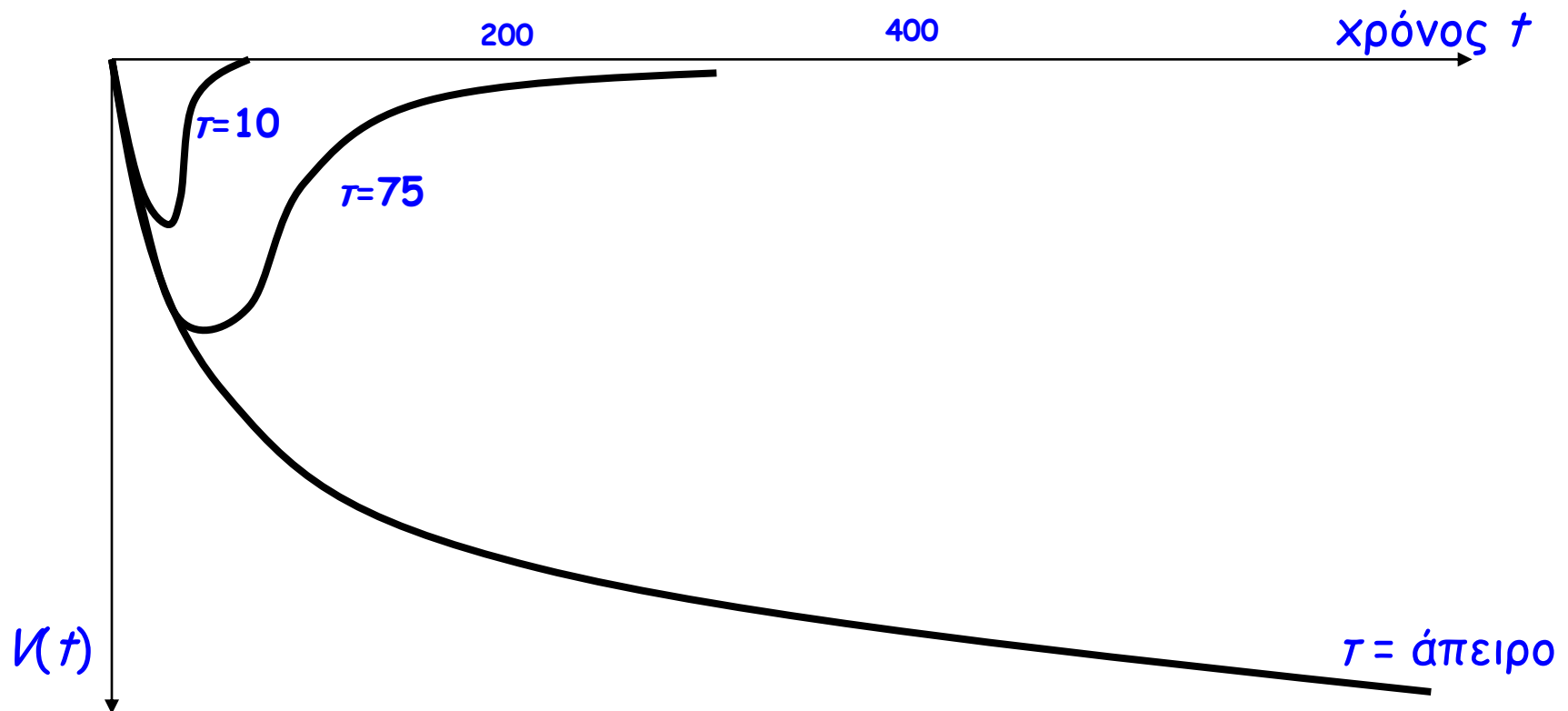
Εφόσον όλα τα θετικά ιόντα προέρχονται από την κοντινή περιοχή της ανόδου, τότε $r(0)=0$, οπότε:

$$\Rightarrow r(t) = \left[a^2 + \frac{\mu C V_0}{\pi\epsilon} t \right]^{1/2}$$

Απαριθμητής Geiger-Müller

$$V(t) = -\frac{q}{4\pi\epsilon l} \ln\left(1 + \frac{\mu\epsilon V_0}{\pi\epsilon a^2} t\right) = -\frac{q}{4\pi\epsilon l} \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right),$$

$$t_0 = \frac{\pi\epsilon}{\mu C V_0}, \quad \text{ολικός χρόνος ολίσθησης: } T = t_0 (b^2 - a^2)$$



Απαριθμητής Geiger-Müller

Ο παλμός συνήθως «κόβεται» από ένα κύκλωμα διαφόρισης RC με σταθερά χρόνου τ και τούτο διότι ΔΕΝ είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ολόκληρο το παραγόμενο σήμα παλμού.

Η διαφόριση του σήματος μικραίνει τη διάρκεια του παλμού. Μόνο το ταχύτερο τμήμα του χρόνου ανόδου (rising time) χρησιμοποιείται περαιτέρω.

Ο χρόνος πτώσης (fall time) του παλμού ποικίλλει ανάλογα με τη σταθερά χρόνου τ του διαφοριστή, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα.

Σχέση μεταξύ dead time, recovery time & resolving time

