

Ανιχνευτές σωματιδίων  
Αποκαλύπτουν το παρελθόν και το  
μέλλον του Σύμπαντος



*Μπαλή Νάντια*

*25/4/2012 - Αστρονομική Εταιρεία Πάτρας "Ωρίων"*



# Διάρθρωση της ομιλίας

- ✿ Πειράματα σωματιδιακής φυσικής - σύντομη εισαγωγή
- ✿ Αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με την ύλη
- ✿ Ανιχνευτές - περιγραφή
- ✿ Οι σημαντικότεροι σύγχρονοι ανιχνευτές
- ✿ Ανιχνευτές σκοτεινής ύλης



# Πειράματα σωματιδιακής φυσικής

## ✦ Σύγκρουση σωματιδίων

- ✦ για τη δημιουργία νέων σωματιδίων
- ✦ για την κατανόηση της δομής των μορίων κλπ.

## ✦ Σύγκρουση σωματιδίων υψηλής ενέργειας

- ✦ για να παραχθούν σωματίδια μεγαλύτερης μάζας
- ✦ για να μάθουμε τη δομή σε μικρές αποστάσεις (πολύ κοντά, από άτομο σε άτομο)



# Πειράματα σωματιδιακής φυσικής

- ✿ *Μελέτη της δομής μικρών διαστάσεων αντικειμένων*
  - ✿ *πρέπει να διερευνήσουμε σε μικρά μήκη κύματος άρα μεγάλες ορμές σωματιδίων*
  - ✿ *σχέση De Broglie  $\lambda = \frac{h}{p}$*
- ✿ *Στη σωματιδιακή φυσική το ισοζύγιο ενέργειας- μάζας παίζει ένα σημαντικό ρόλο στις “συγκρούσεις σωματιδίων”*
  - ✿ *Σχέση ενέργειας:  $E = K + mc^2 = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$*





# Πως στήνεται ένα πείραμα σωματιδιακής φυσικής;

✦ *Συστατικά της συνταγής:*

- ✦ *πηγή σωματιδίων*
- ✦ *επιταχυντής σωματιδίων*
- ✦ *ανιχνευτής*
- ✦ *πυροδοτητής*
- ✦ *σύστημα καταγραφής δεδομένων*
- ✦ ***ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ και ΠΟΛΛΑ ΛΕΦΤΑ!***





# Πως στήνεται ένα πείραμα σωματιδιακής φυσικής;

## ✿ Εκτέλεση συνταγής:

- ✿ παίρνουμε σωματίδια (πρωτόνια, αντιπρωτόνια κλπ)
- ✿ τα επιταχύνουμε
- ✿ τα “βάζουμε” να συγκρουστούν το ένα με το άλλο
- ✿ παρατηρούμε και καταγράφουμε τι συνέβη
- ✿ αναλύουμε τα δεδομένα



# Σχετικά με τις μονάδες

## ✦ Ενέργεια $eV$

η ηλεκτρονιοβόλτ = η κινητική

ενέργεια  $\gamma e^-$  όταν αυτό κινείται σε  
δυναμικό  $\gamma V$

$$1kWhr = 3.6 \times 10^6 \text{ Joules} = 2.25 \times 10^{25} eV$$

$$1.6eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules} = 2.1 \times 10^{-6} Ws$$

## ✦ Μάζα $eV/c^2$

$$1eV / c^2 = 1.78 \times 10^{-36} kg$$

$$\text{Μάζα ηλεκτρονίου} = 0.511 MeV / c^2$$

$$\text{Μάζα πρωτονίου} = 938 MeV / c^2$$

$$\text{Μάζα Νάντιας (50kg)} = 2.8 \times 10^{37} eV / c^2$$

## ✦ Ορμή $eV/c$ $1eV = 5.3 \times 10^{-28} kgm / s$

$$\text{Ορμή μπάλας μπάσκετ} = 5.29 kgm / s = 9.9 \times 10^{27} eV / c$$



# Γιατί δεν μπορούμε να δούμε τα άτομα;

- ✦ βλέπω = ανιχνεύω το φως που ανακλάται από την επιφάνεια του αντικειμένου που παρατηρώ
- ✦ φως=η/μ κύμα
- ✦ ορατό φως= η/μ κύμα 400nm(κυανό)-700nm(κόκκινο)
- ✦ διάμετρος του ατόμου:  $10^{-10} m$
- ✦ γενικεύοντας.. “βλέπω”=ανιχνεύω την επίδραση ενός αντικειμένου εξαιτίας της παρουσίας του στον χώρο





# Αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με την ύλη

## ✦ Ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

- ✦ διεγέρσεις/ιονισμοί
- ✦ ακτινοβολία Cherenkov
- ✦ φαινόμενο *bremsstrahlung*
- ✦ φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- ✦ φαινόμενο Compton
- ✦ παραγωγή ζεύγους



## ✦ Ισχυρές αλληλεπιδράσεις

- ✦ δευτερογενής παραγωγή αδρονίων
- ✦ αδρονικοί καταγισμοί



# Αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη

- ✿ Σωματίδια διερχόμενα μέσα από την ύλη
  - ✿ Τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες ή/και με τα  $e^-$
  - ✿ Αυτού του είδους η αλληλεπίδραση μπορεί να είναι ηλεκτρομαγνητικής, ασθενής ή ισχυρής φύσης, εξαρτάται από το είδος των σωματιδίων
- ✿ Πιθανές αλληλεπιδράσεις κατά τη διέλευση σωματιδίων διαμέσου της ύλης
  - ✿ διέγερση ατόμων μέσα στα μόρια ή  $e^-$  μέσα στα άτομα
  - ✿ ιονισμός  $e^-$  από το άτομο ή το μόριο
  - ✿ *positronium*- ζεύγος ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου



# Ανιχνευτές

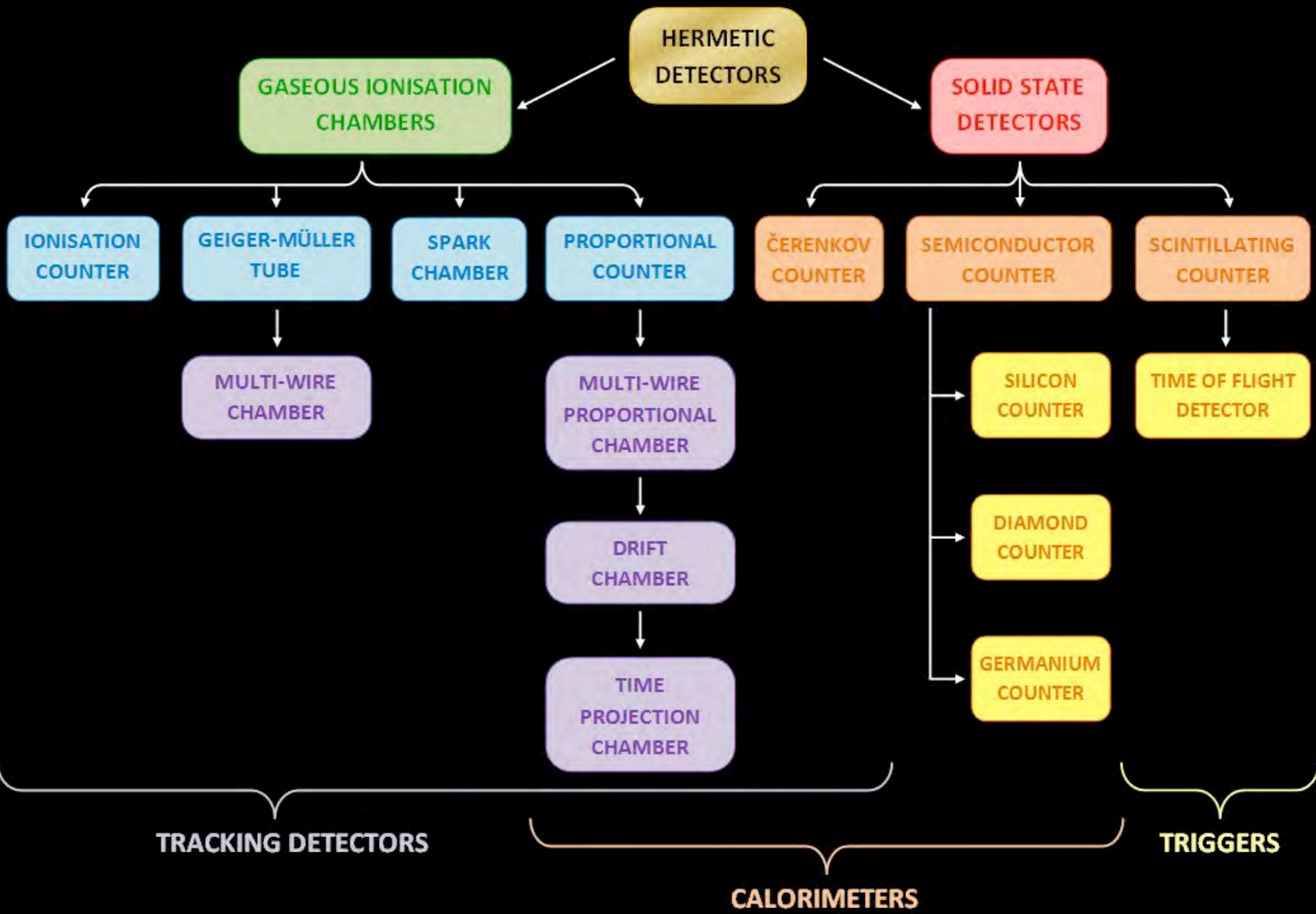
- ✿ **Ανιχνευτές:** Είναι συσκευές που μας επιτρέπουν να μετρήσουμε τα χαρακτηριστικά στοιχεία της ταυτότητας ενός σωματιδίου, ώστε να το αναγνωρίσουμε. Μετατρέπουν την αρχική άμεση επίδραση του σωματιδίου σε παρατηρήσιμο και καταγράψιμο σήμα (π.χ. ηλεκτρικό)
- ✿ **Παράδειγμα:** ο ανθρώπινος οφθαλμός είναι ανιχνευτής φωτονίων
- ✿ Το ότι “βλέπουμε” βασίζεται στο πείραμα σκέδασης του φωτός
  - ✿ η φωτεινή πηγή παράγει φωτόνια
  - ✿ τα φωτόνια προσκρούουν στο αντικείμενο-στόχος είτε απορροφούνται είτε ανακλώνται από την επιφάνεια
  - ✿ τα φωτόνια ανιχνεύονται από τους αισθητήρες - ραβδία και τα κονία
  - ✿ μεταφράζεται σε ηλεκτρικό - νευρικό παλμό
  - ✿ το σήμα μεταφέρεται στον εγκέφαλο



# Οι κυριότεροι τύποι ανιχνευτών

- ✦ *Ανιχνευτές χρόνου άφιξης*
- ✦ *Ανιχνευτές σπινθηρισμών*
- ✦ *Ανιχνευτές ημιαγωγών*
- ✦ *Θάλαμοι φυσαλίδων*
- ✦ *Ανιχνευτές Cherenkov*
- ✦ *Θάλαμοι καταιονισμού (καταιγισμού) ή θερμιδόμετρα*
- ✦ *Ανιχνευτές προβολής χρόνου TPC*







# Τι μπορούμε να μετρήσουμε σ'έναν ανιχνευτή;

- Σε ένα πείραμα ο χρόνος μέτρησης και η θέση των σωματιδίων είναι καθορισμένα  $E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2}$

$$\Delta T = \frac{L}{\beta_1} - \frac{L}{\beta_2} \quad \text{όπου: } \beta_2 = \frac{p_2}{E_2}, \quad \beta_1 = \frac{p_1}{E_1}$$

- Συνεπώς τα φυσικά μεγέθη που πρέπει να μελετηθούν είναι το τετραδιάνυσμα της ορμής  $p(x,y,z,t)$  του κάθε σωματιδίου, το σπιν, το φορτίο κλπ.
- Από αυτή τη σχέση αν μία μάζα είναι γνωστή υπολογίζεται η άλλη
- Αν υποθέσουμε ότι πρόκειται για σχετικιστικά σωματίια  $p_1=p_2=p$ , έτσι:

$$\Delta T = L \left( \frac{E_1}{p_1} - \frac{E_2}{p_2} \right) = L \frac{p_2 \sqrt{p_1^2 + m_1^2} - p_1 \sqrt{p_2^2 + m_2^2}}{p_2 \cdot p_1}, \quad \Delta T = \frac{L}{p} \frac{(m_1^2 - m_2^2)}{\sqrt{p_1^2 + m_1^2} + \sqrt{p_2^2 + m_2^2}} = \frac{L}{p} (m_1^2 - m_2^2)$$

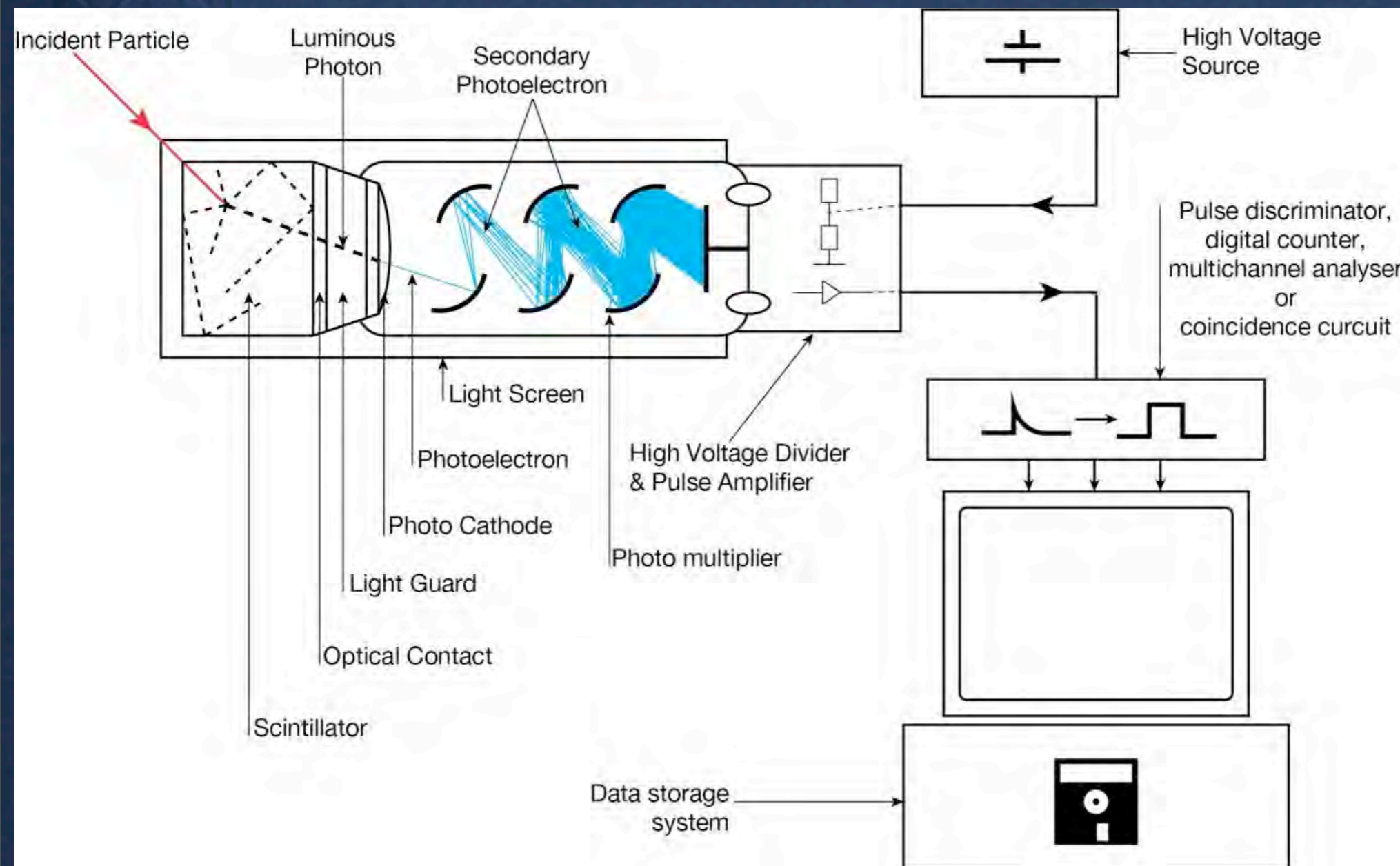
- Σε κανονικές μονάδες:  $\Delta T = \frac{L}{c} \frac{(m_1^2 - m_2^2)c^2}{2p^2}$



# Ανιχνευτές σπινθηρισμών

Βασική Αρχή  
λειτουργίας:

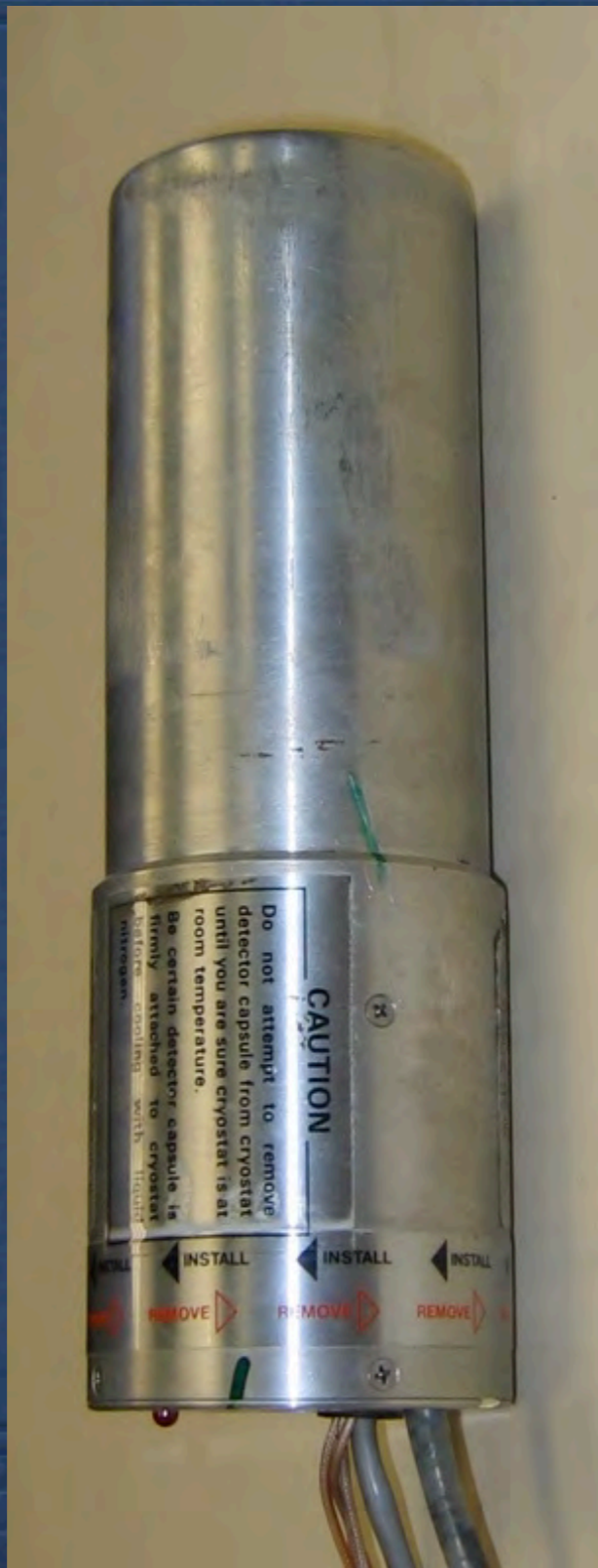
Όταν ένα φορτισμένο σωματίο περάσει μέσα από την ύλη διεγείρει τα άτομα και μόρια της ύλης, τα οποία κατά την αποδιέγερσή τους παράγουν ακτινοβολία (φθορισμός). Η ακτινοβολία μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρικό σήμα με τη βοήθεια κατάλληλων φωτοπολλαπλασιαστών.



Τυπικοί φωτοπολλαπλασιαστές περιέχουν μέχρι και 14 στάδια ενίσχυσης και πετυχαίνουν φωτοπολλαπλασιαστικούς παράγοντες μέχρι  $10^9$



# Ανιχνευτές ημιαγωγών



*Βασική αρχή λειτουργίας:*

*Φορτισμένο σωματίο διέρχεται εντός ενός υλικού. Το σωματίο ionίζει τα άτομα και τελικά παράγει ζεύγη ιόντων.*

- Ο αριθμός των ιόντων δίνεται από:*

$$n = E/W$$

*W: το έργο που απαιτείται για την παραγωγή ενός ζεύγους*

- Για τα ευγενή: He  $W=42 eV$*

$$Xe W=34eV$$

- Για τους ημιαγωγούς το έργο W είναι αρκετά μικρότερο*

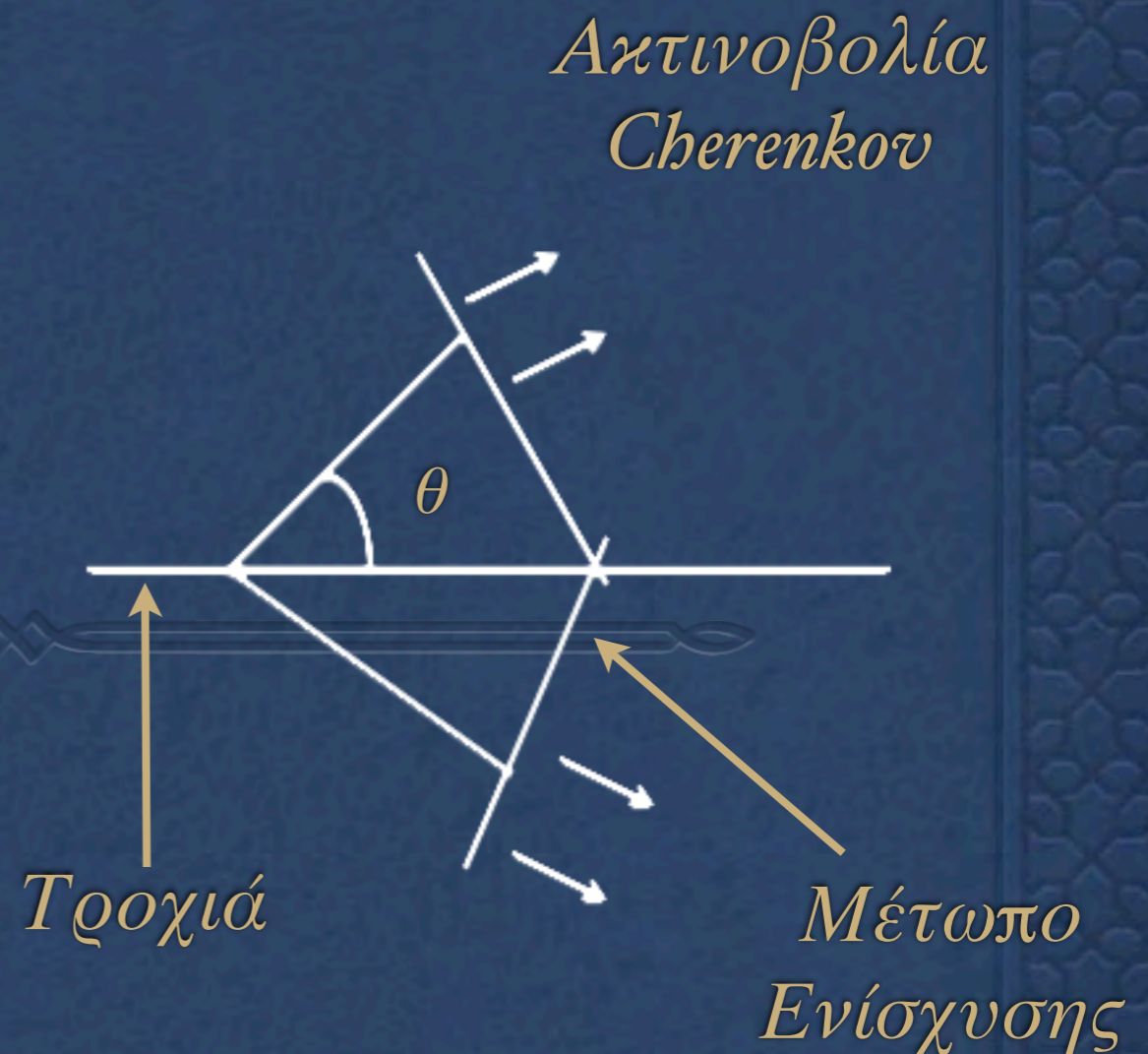
$$Ge W=2.9eV, Si W=3.5eV$$



# Ανιχνευτές Cherenkov

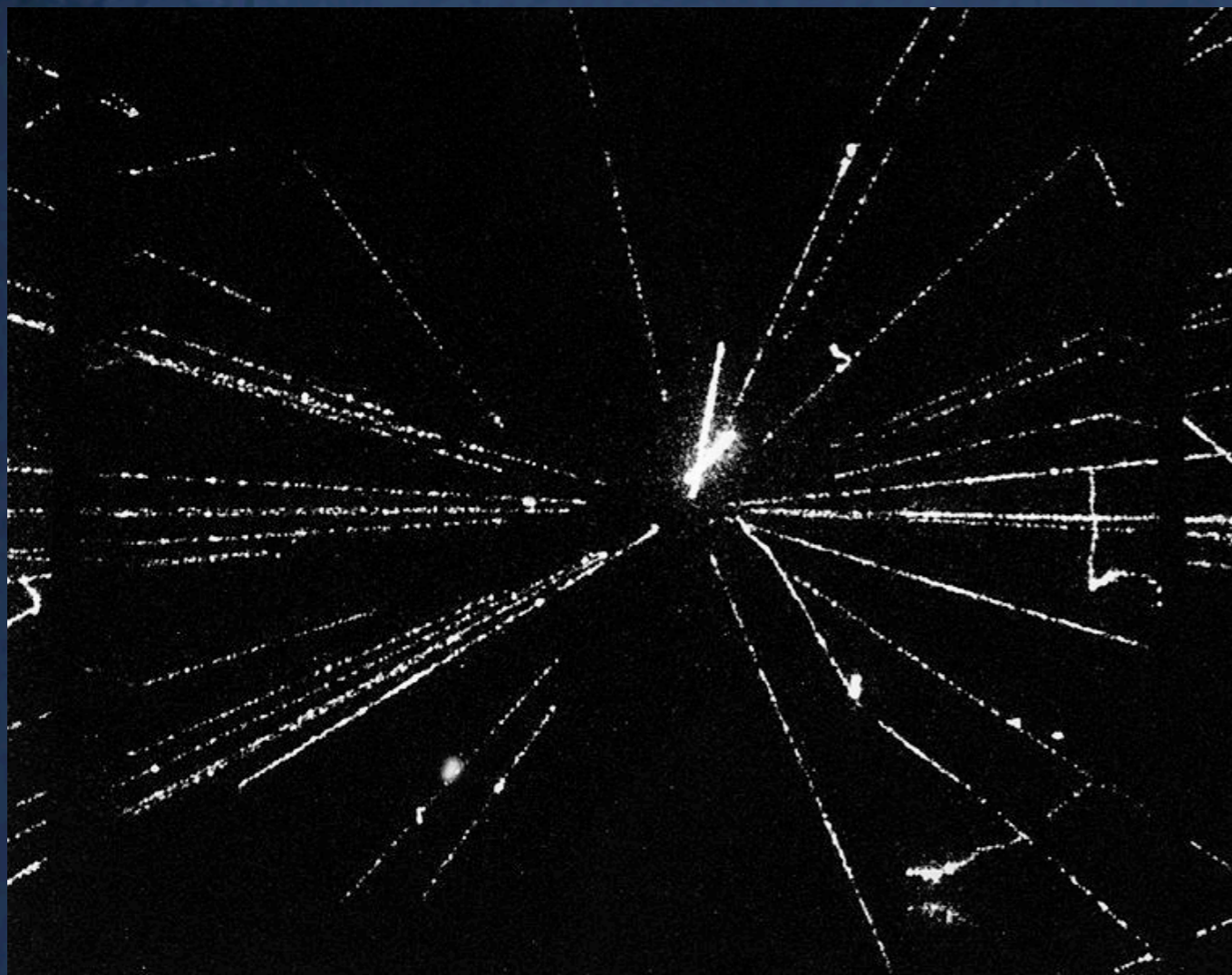
- Στηρίζονται πάνω στο φαινόμενο Cherenkov (1934), δηλαδή το φως το οποίο παράγεται όταν ένα σωματίο περνάει μέσα από ένα διηλεκτρικό μέσο κινούμενο με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός στο αντίστοιχο διηλεκτρικό.

- Σαν αποτέλεσμα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου των σωματιδίων, τα δίπολα του διηλεκτρικού διεγείρονται και πάλλονται εκπέμποντας η/μ ακτινοβολία





# Θάλαμος σπινθήρων



Σύγκρουση πρωτονίου-αντιπρωτονίου όπως αυτή καταγράφηκε από θάλαμο σπινθήρων σε πείρα στο Cern.

*Κύρια χαρακτηριστικά:*

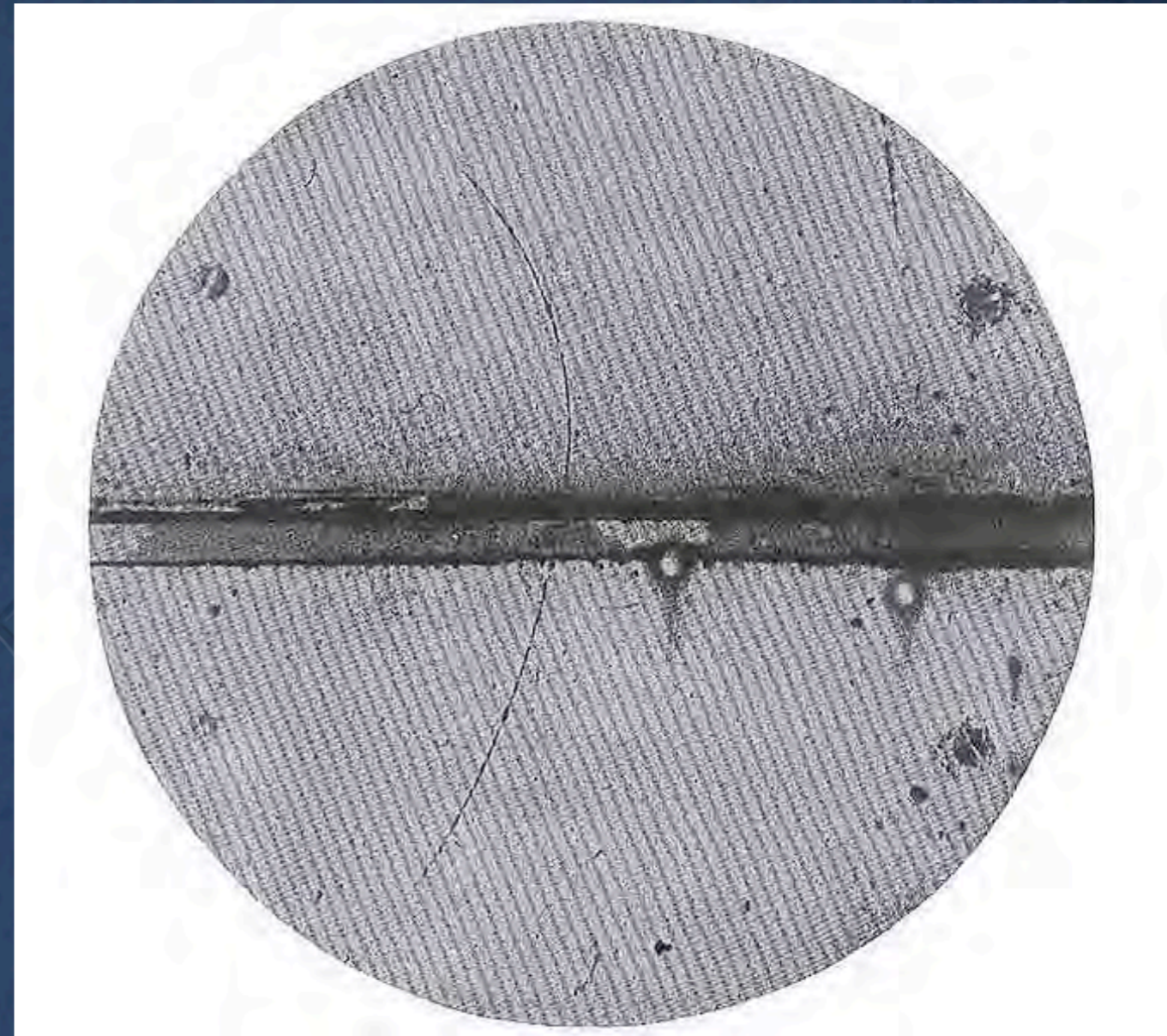
- Είναι μια συσκευή μέτρησης, η οποία αποτελείται από μια σειρά αγωγικών παράλληλων πλακών.
- Οι πλάκες με ζυγό αριθμό γειώνονται ενώ αυτές με μονό διατηρούνται σε υψηλό δυναμικό (10 kV).
- Τα διαστήματα μεταξύ των παράλληλων πλακών περιέχουν ευγενές αέριο σε ατμοσφαιρική πίεση.
- Όταν είναι φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται δια μέσου του θαλάμου, προξενείται ιοντισμός στο αέριο και έχουμε ως αποτέλεσμα μια μεγάλη ρίπη ηλεκτρικού ρεύματος



# Θάλαμοι νέφους ή θάλαμος Wilson

*Κύρια χαρακτηριστικά:*

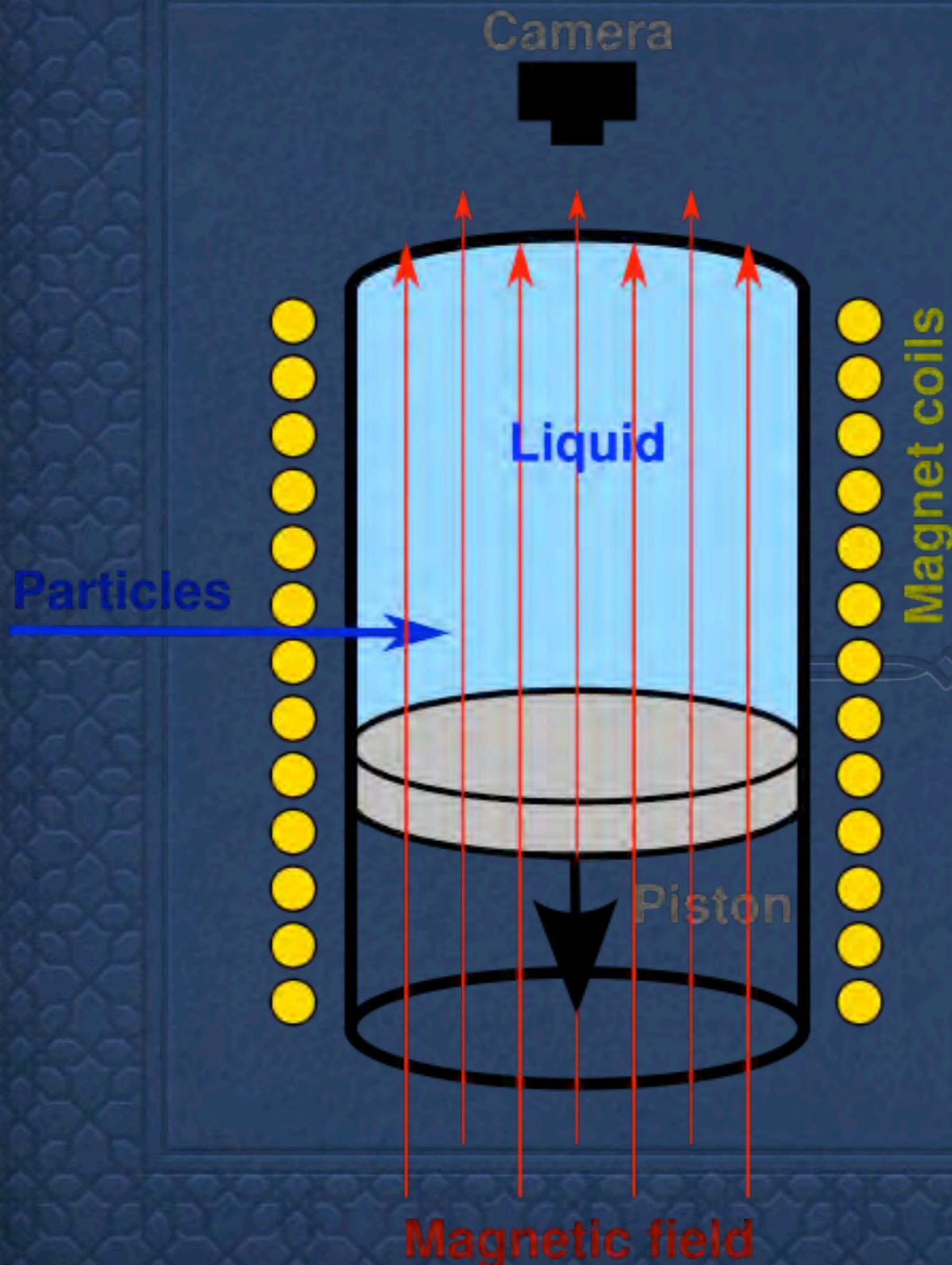
- *Περιέχει ένα αέριο το οποίο έχει υποστεί υπέρψυξη και βρίσκεται μόλις κάτω από το σημείο συμπύκνωσης του.*
- *Ένα ενεργητικό σωματίδιο που διέρχεται από το μέσο ιονίζει το αέριο σε όλο το μήκος της τροχιάς του.*
- *Η τροχιά μπορεί να φωτογραφηθεί (είναι ορατή με γυμνό μάτι).*



*Φωτογραφία από θάλαμο νέφους του πρώτου ποζιτρονίου που παρατηρήθηκε ποτέ*

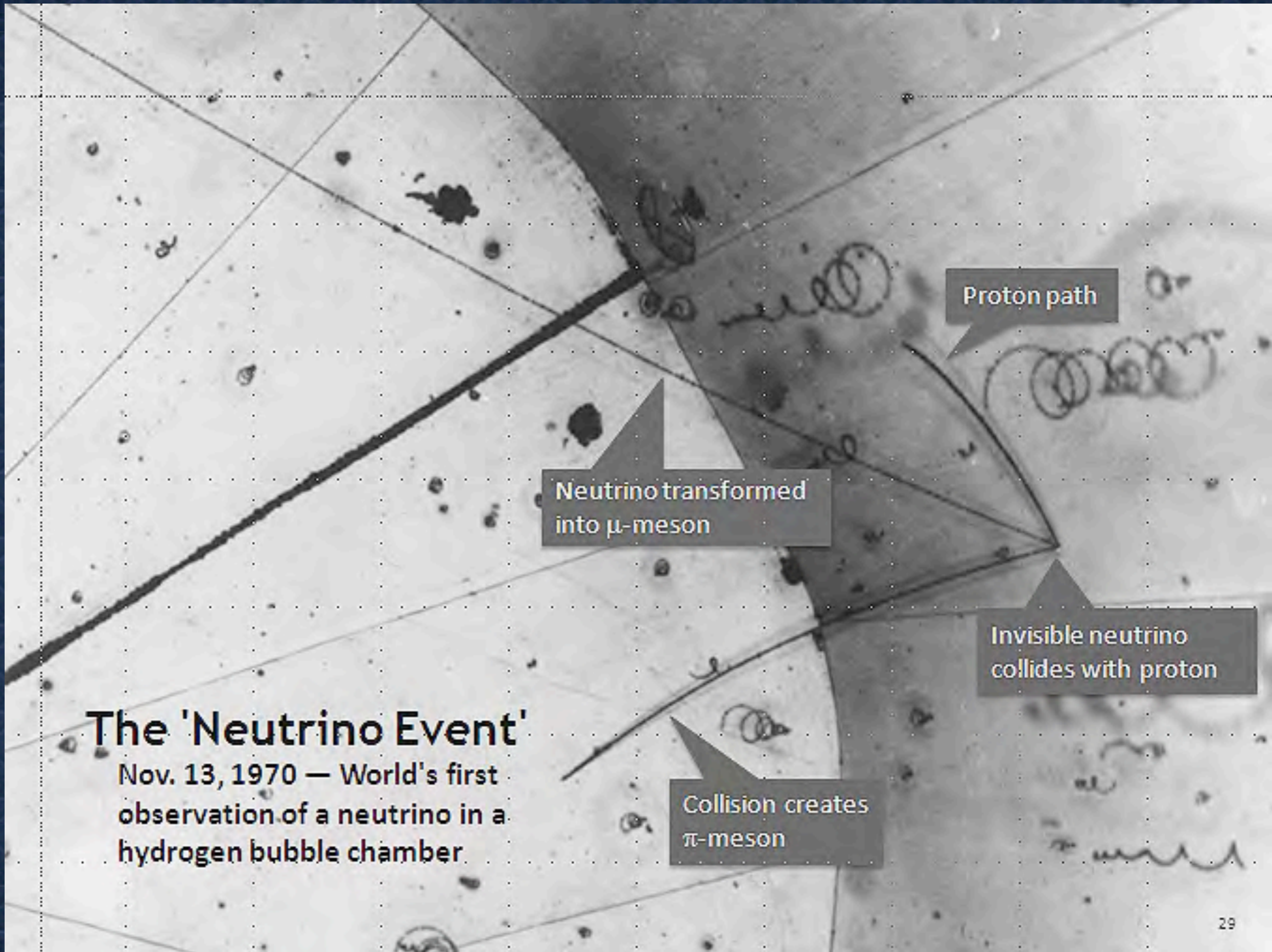


# Θάλαμος φυσαλίδων



Βασίζεται στην ίδια αρχή με τους προηγούμενους ανιχνευτές θαλάμους, τώρα όμως φωτογραφίζονται οι φυσαλίδες που δημιουργούνται κατά μήκος της τροχιάς ενός σωματιδίου, όταν αυτή είναι μέσα σε υπερθερμασμένο υγρό (υδρογόνο)





Proton path

Neutrino transformed into  $\mu$ -meson

Invisible neutrino collides with proton

Collision creates  $\pi$ -meson

# The 'Neutrino Event'

Nov. 13, 1970 — World's first observation of a neutrino in a hydrogen bubble chamber.



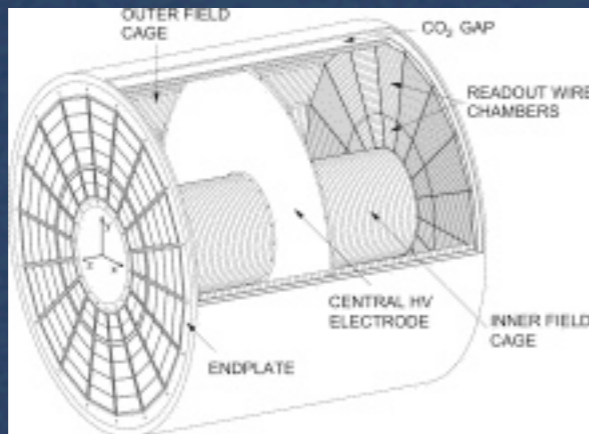
# Ανιχνευτές προβολής χρόνου ή TPC (Time Projection Counters)



*Χαρακτηριστικά λειτουργίας:*

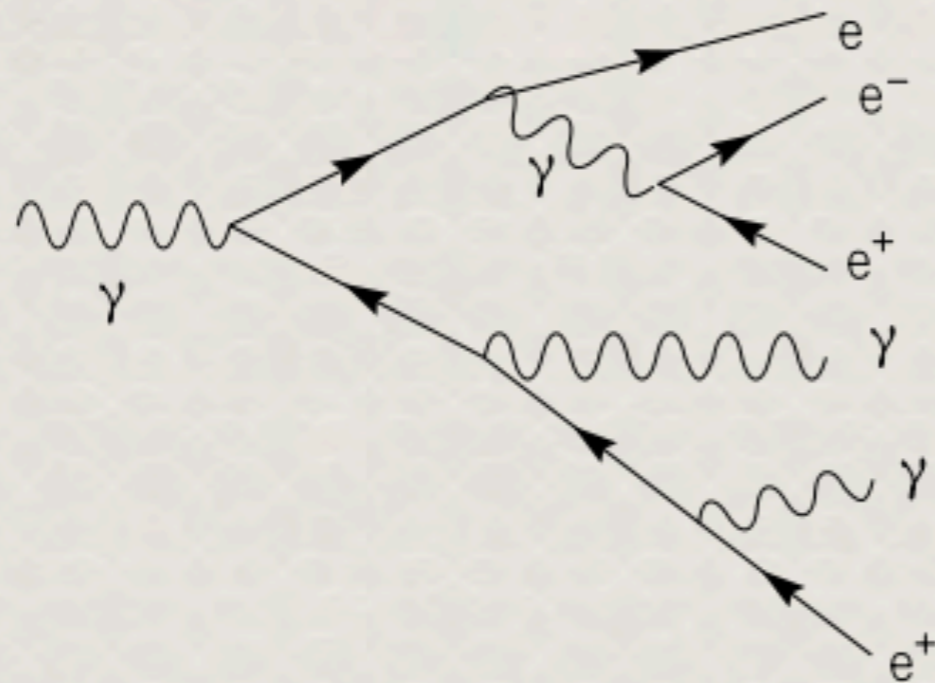
*Υπό την συνδυασμένη επίδραση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου τα  $e^-$  διαγράφουν ελικοειδή κίνηση με άξονα τον άξονα του κυλίνδρου.*

*Πρόκειται για τον ιδανικό ανιχνευτή, χρησιμοποιείται στα πειράματα υψηλών ενεργειών*





# Ανιχνευτές καταιγισμού και θερμιδόμετρα



- ✦ Το αρχικό σωματίο αλληλεπιδρά με την ύλη και παράγει δευτερογενή
- ✦ Τα δευτερογενή παράγουν τριτογενή
- ✦ Αυτοί οι ανιχνευτές που συλλέγουν την ολική ενέργεια λέγονται θερμιδόμετρα

- ✦ Αποτελεί έναν άμεσο τρόπο ανίχνευσης των ουδέτερων σωματιδίων
- ✦ Χωρίζονται σε ηλεκτρομαγνητικά θερμιδόμετρα και θερμιδόμετρα αδρονικών καταιονισμών



# Ηλεκτρομαγνητικά θερμιδόμετρα

- ✦ Καταγράφουν την συνολική ενέργεια που παράγεται από τον ιονισμό του μέσου από φωτόνια και ηλεκτρόνια
- ✦ Αποτέλεσμα συνδυασμού της ακτινοβολίας *Bremsstrahlung* και παραγωγής ζευγών  $e^-$  και  $e^+$

*Bremsstrahlung* ή Ακτινοβολία πέδησης:





# Θερμιδόμετρα αδρονικών καταιονισμών

- Η κύρια αντίδραση προκαλείται από μη ελαστικές πυρηνικές αντιδράσεις που οδηγούν σε δευτερογενή αδρόνια
- Το μήκος απορρόφησης είναι μεγαλύτερο από αυτό του η/μ θερμιδομέτρου
- Είναι σχεδιασμένα να μετρούνε σωματίδια που αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής πυρηνικής δύναμης



# Σύγχρονοι Ανιχνευτές

## ✦ Με επιταχυντές:

### ✦ Στο CERN

#### LHC

- CMS
- ATLAS
- ALICE
- LHCb

#### LEP

- Aleph[1]
- Delphi[2]
- L3
- Opal[3]

#### SPS

- The COMPASS Experiment
- Gargamelle
- NA49

### Στο Fermilab

#### Tevatron

- CDF
- D0

### Στο DESY

#### HERA

- H1
- HERA-B
- HERMES
- ZEUS

### Στο BNL

#### RHIC

- PHENIX
- Phobos (physics)
- STAR

### Στο SLAC

#### PeP-II

- BaBar

#### SLC

- SLD

### Στο Cornell

#### CESR

- CLEO
- CUSB

### Στο BINP

#### VEPP-2M και VEPP-2000

- ND
- SND
- CMD

#### VEPP-4

- KEDR

#### ■ Άλλοι

- MECO από UC Irvine

### Υπό κατασκευή:

#### ILC

- CALICE

### Χωρίς επιταχυντές:

- Super-Kamiokande
- AMANDA
- CMDS

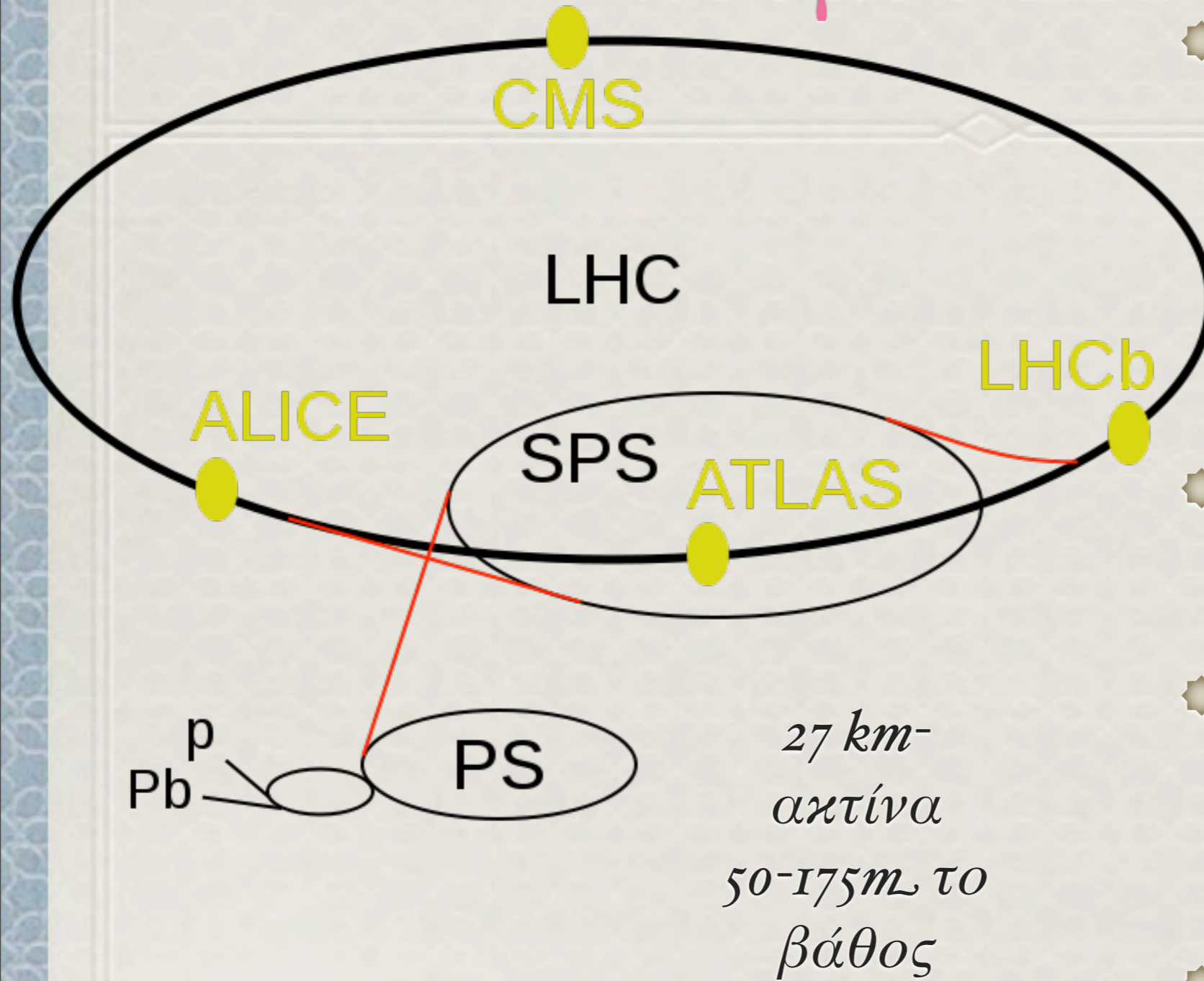


# Οι σημαντικότεροι σύγχρονοι ανιχνευτές

- ✦ *LHC : CMS, ATLAS*
- ✦ *SuperKamiocade*
- ✦ *Fermilab Tevatron*
- ✦ *Daya Bay*
- ✦ *CDMS (Berkeley)*

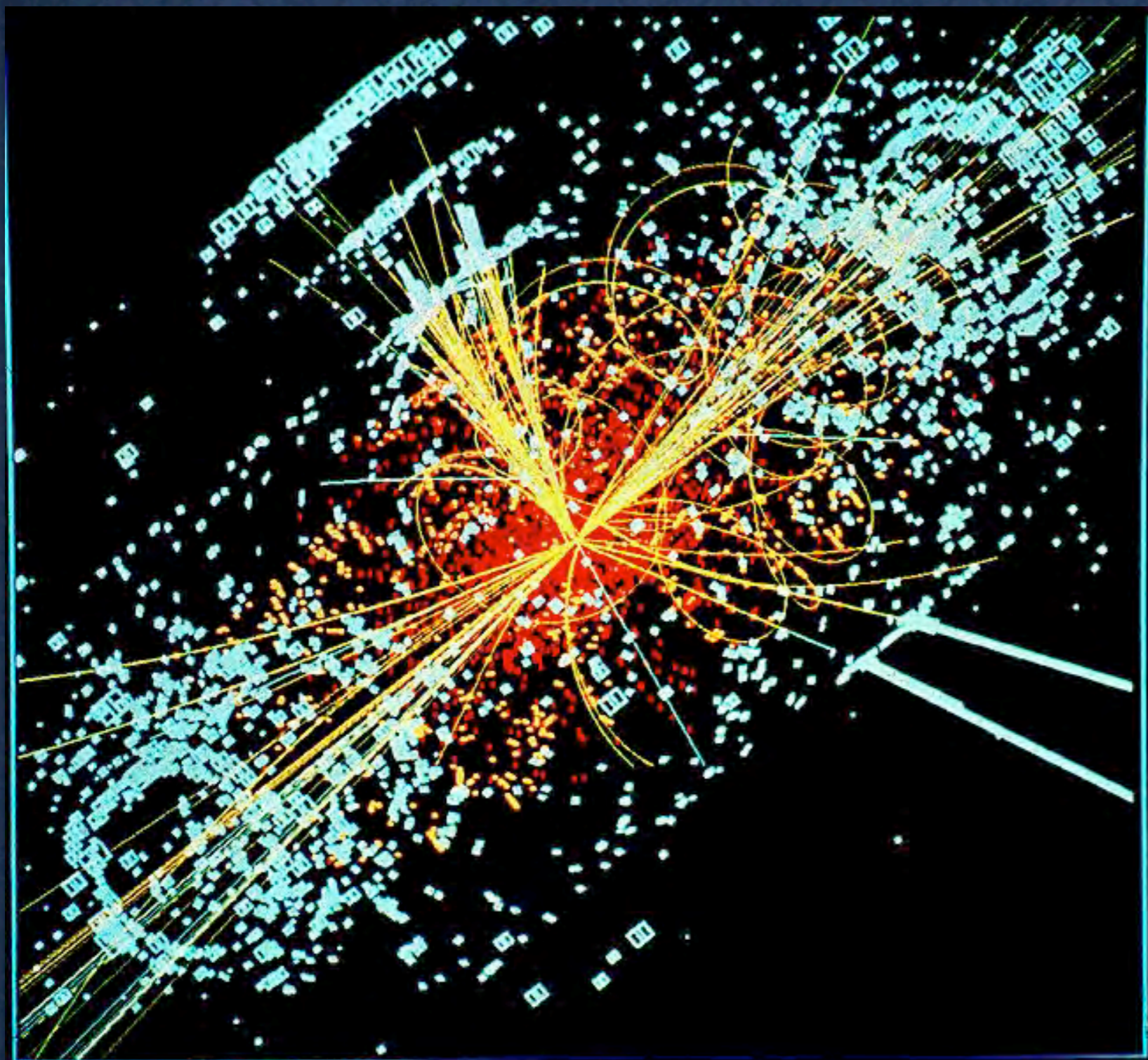


# Ο Μεγαλύτερος επιταχυντής του κόσμου LHC!



- ✦ Δοκιμάζουν την ισχύ της θεωρίας της υπερσυμμετρίας ως επέκταση του καθιερωμένου προτύπου
- ✦ Αναζητούν το μποζόνιο Higgs
- ✦ Αν υπάρχουν επιπλέον διαστάσεις στο σύμπαν-υπερχορδές
- ✦ Αναζητούν τη φύση της σκοτεινής ύλης





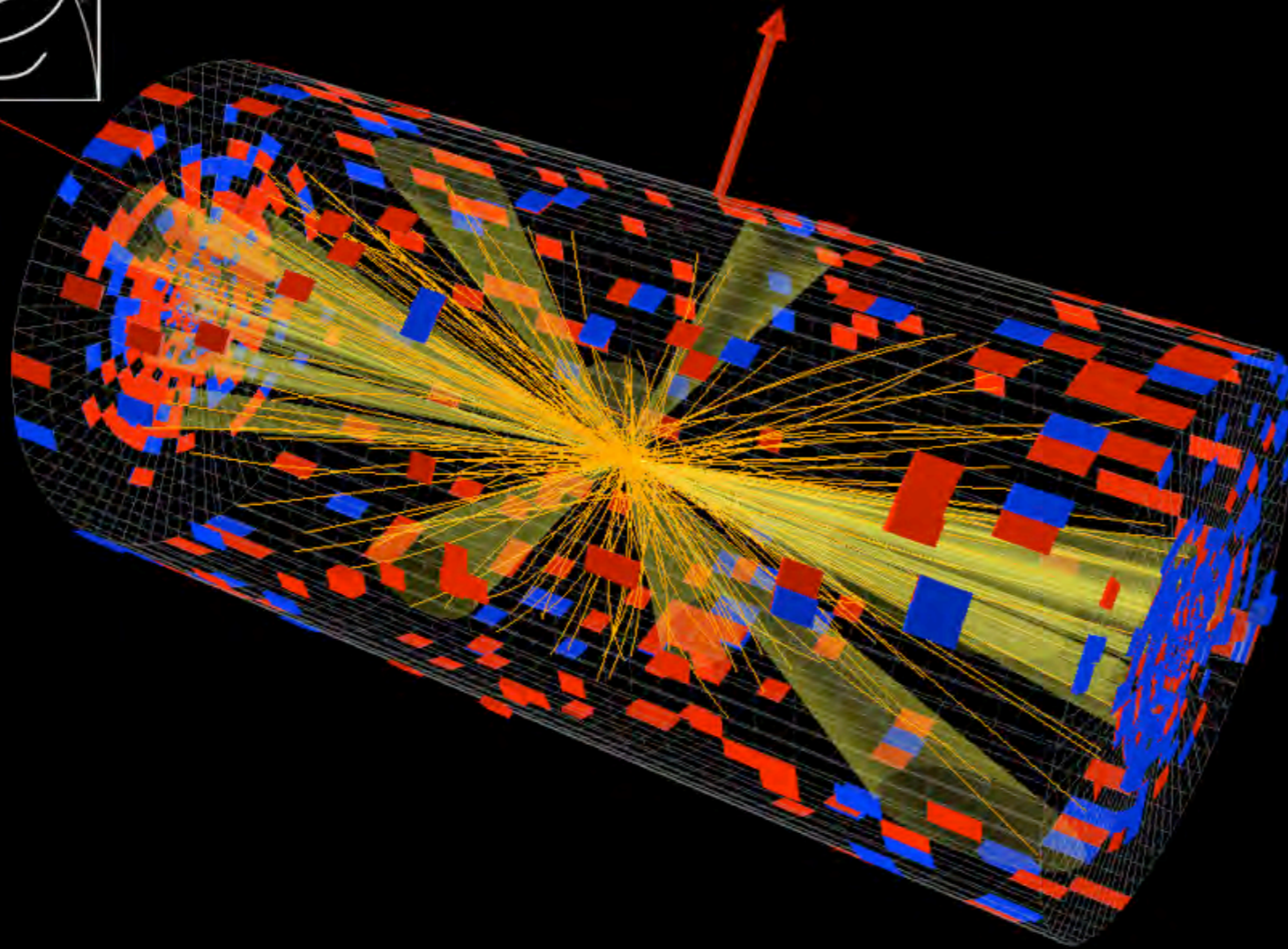
*Προσομοίωση  
του γεγονότος  
για την  
ανίχνευση του  
Higgs  
μποζονίου*



# CMS (@Cern)



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Thu Apr 5 01:18:00 2012 CEST  
Run/Event: 190389 / 107592030  
Lumi section: 138



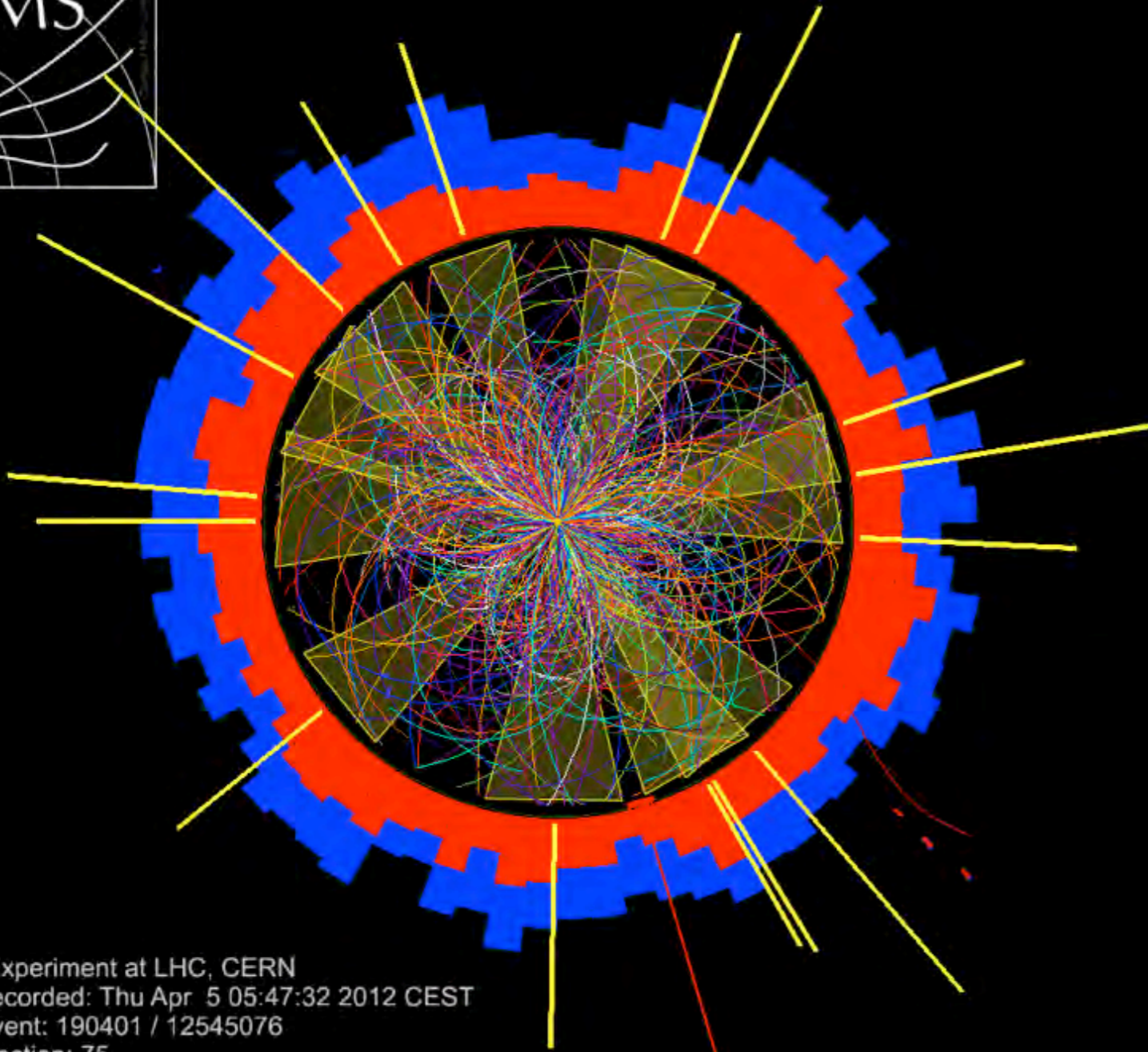
*Μελετά:*

- \* Ύπαρξη του μποζονίου Higgs*
- \* Πιθανά σωματίδια υποψήφια για την σκοτεινή ύλη*
- \* Επιπλέον διαστάσεις όσον αφορά τη δομή του σύμπαντος*

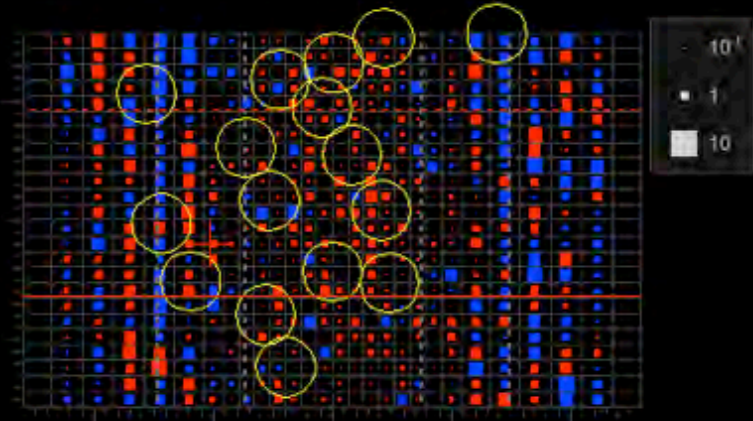




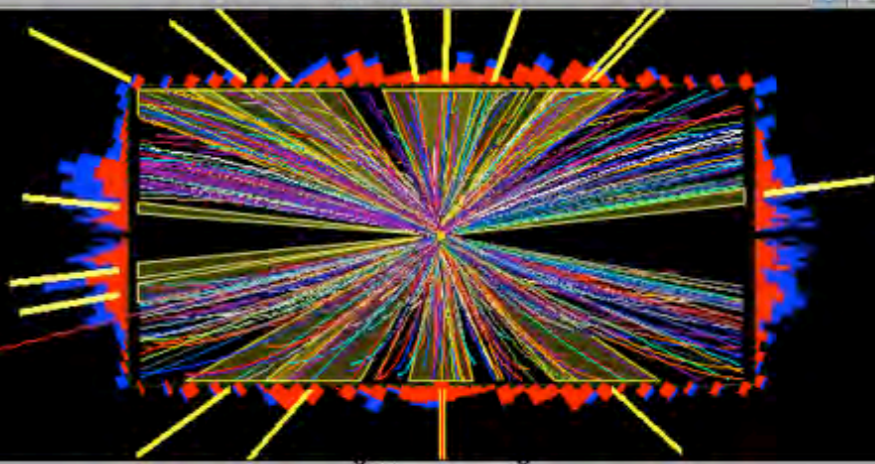
Rho Phi



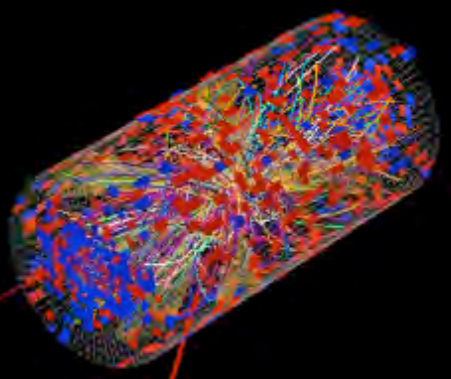
Lego



Rho Z



3D Tower



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Thu Apr 5 05:47:32 2012 CEST  
Run/Event: 190401 / 12545076  
Lumi section: 75  
Orbit/Crossing: 19495845 / 1347



# Περιγραφή του καθιερωμένου προτύπου και της υπερσυμμετρίας SUSY

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Quarks</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Leptons</b>	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson

Gauge Bosons

Τα στοιχώδη σωμάτια συνδέονται με τα υπερσυμμετρικά τους με  $\pm \frac{1}{2}$  του spin. Δηλαδή για κάθε είδος φερμιονίου αντιστοιχεί ένα μποζόνιο και αντίστροφα.

**φορείς αλληλεπιδράσεων**



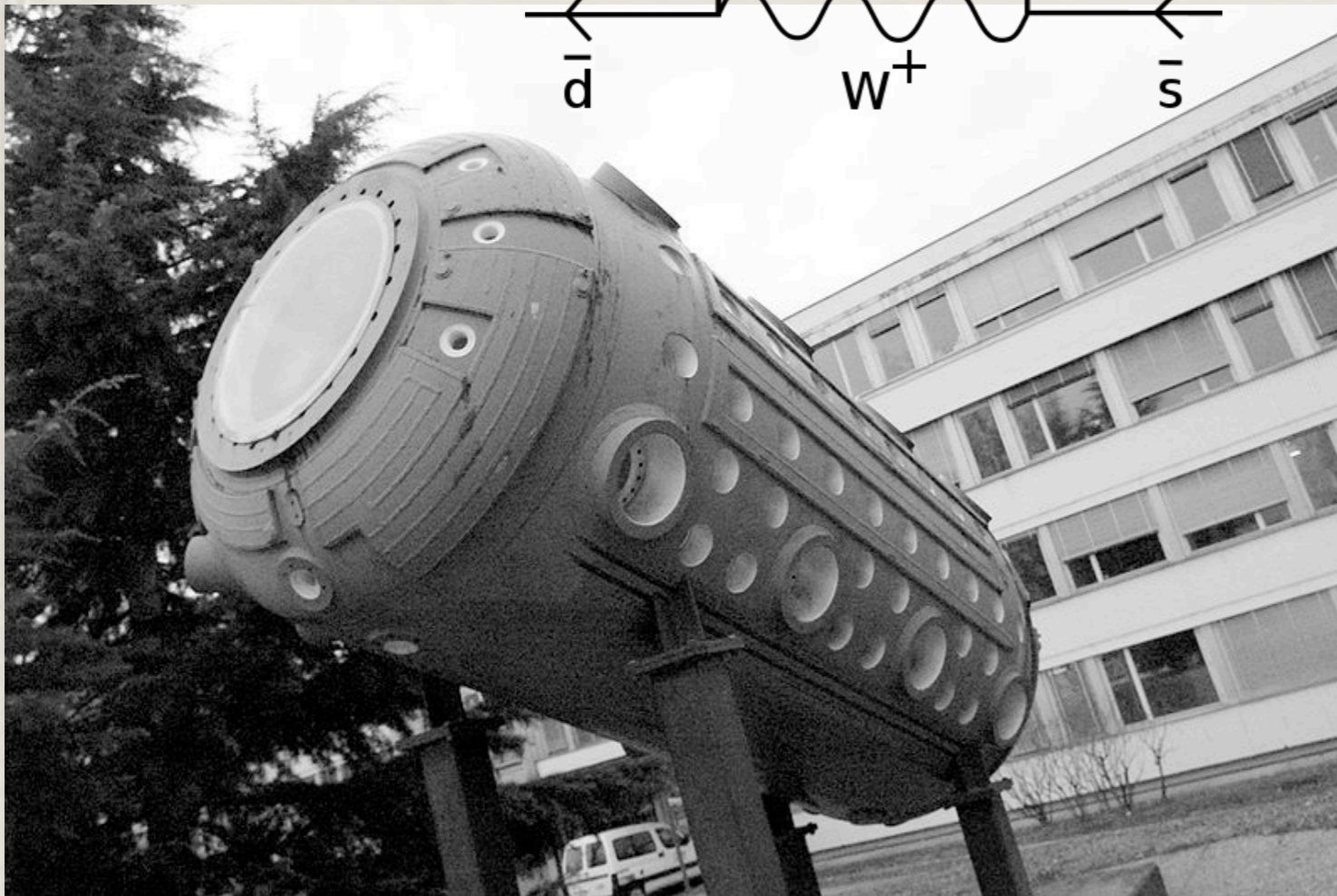
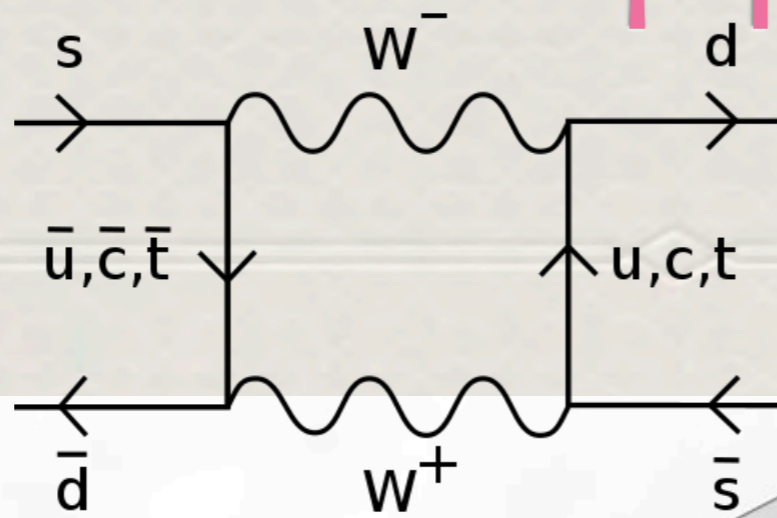
# Τενατρον-Fermilab Ανακάλυψη του top quark

- ✿ Το 2000 ανακάλυψη του ται νετρίνου
- ✿ Το 2007 ανακαλύφθηκε πειραματικά το top quark
- ✿ Καταγραφή των Σίγμα,  $E$  και  $B$  βαρυνίων





# Ανακάλυψη $W^+, W^-, Z$



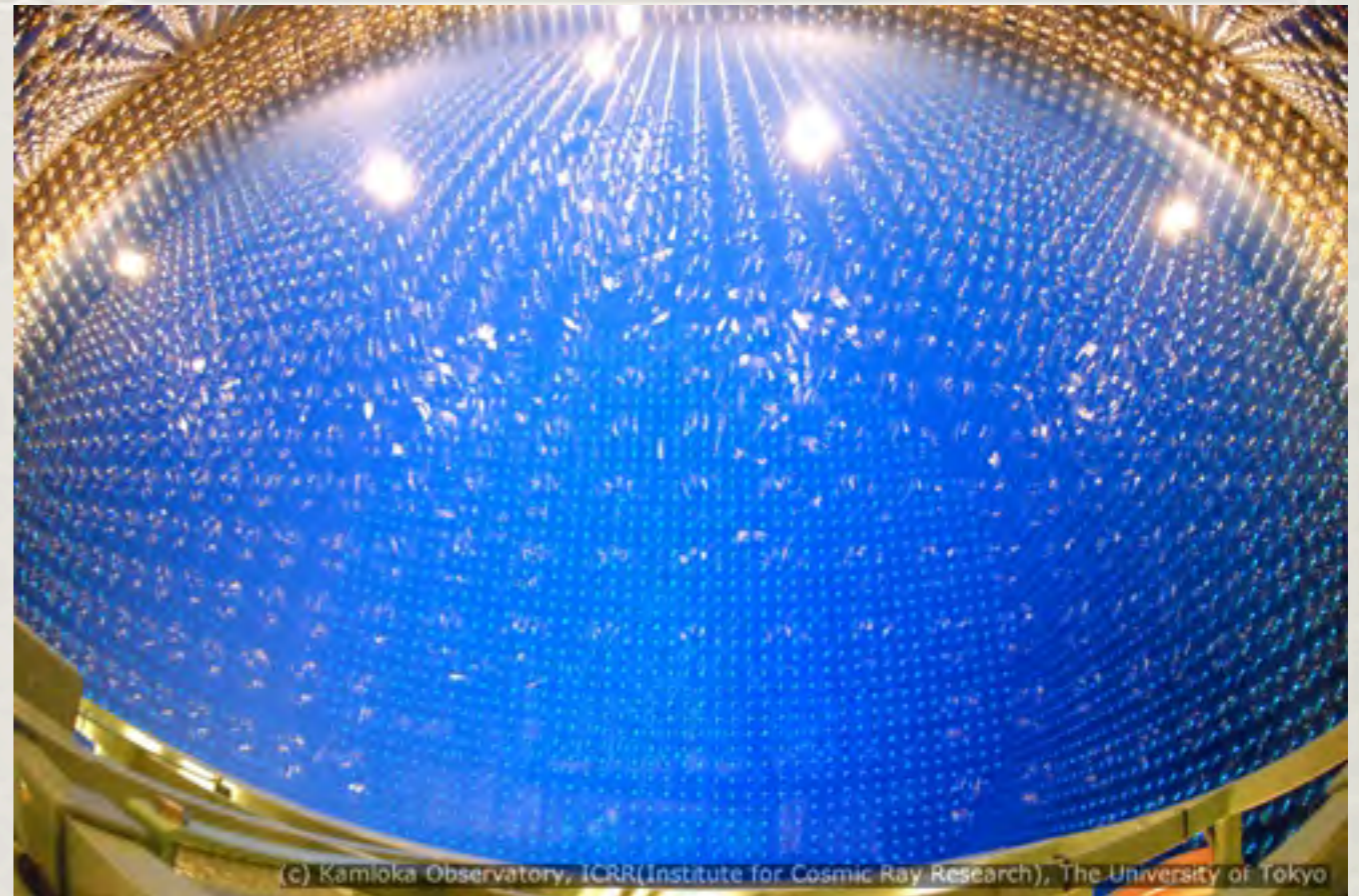
*Ανακάλυψη- 1973 στο Cern, Gargamelle detector*

- ✦ *Καθώς ένα νεutrino αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο ανταλλάσσουν ένα  $Z$  μποζόνιο*
- ✦ *Στο **SPS** το 1983 είχαν την πρώτη ένδειξη ύπαρξης του  $W$  μποζονίου*



# SuperKamiookande & Sudbury Neutrino Observatory

- ✦ *Ο ήλιος είναι πηγή ηλιακών νετρίνων 1988*
- ✦ *Το 1998 ανακαλύφθηκε η “ταλάντωση” νετρίνων*
- ✦ *Βραβείο Νόμπελ το 2002 στους Raymond Davis & Masatoshi Koshiba για τα supernova νετρίνο*



*Δεξαμενή 16m ύψος x 15.6 διάμετρος  
3000 τόνους νερού*



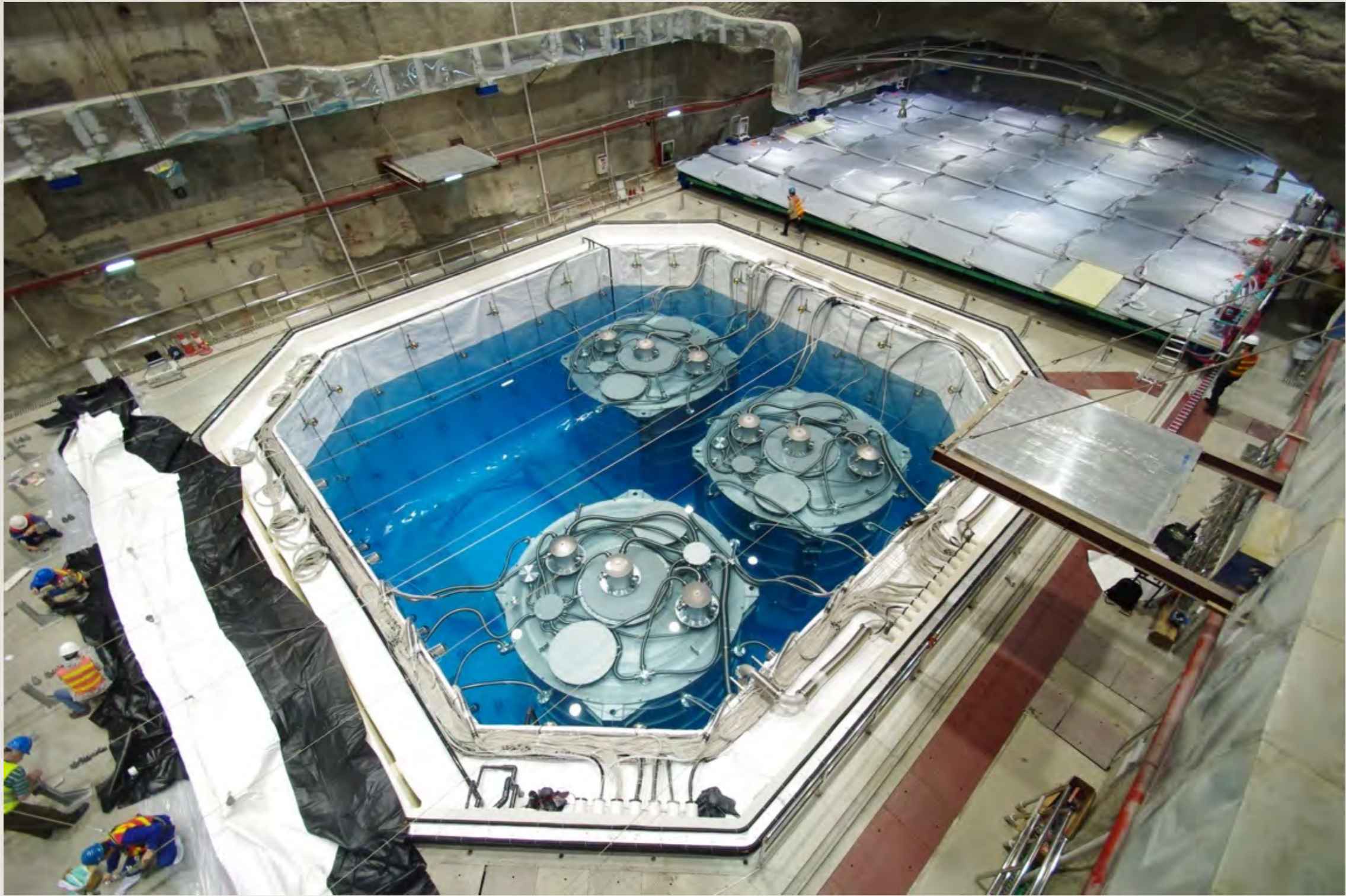
# Daya Bay Reactor - Πείραμα νετρίνων

- ✦ Οι 3 γεύσεις νετρίνων και τα αντίστοιχα αντισωματία τους ενώνονται
- ✦ Παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα ταλάντωσης
- ✦ Παρατηρήθηκε 6% —  
περισσότερη μείωση των  $\bar{\nu}_e$   
έναντι των  $\nu_e$





# *Daya Bay*

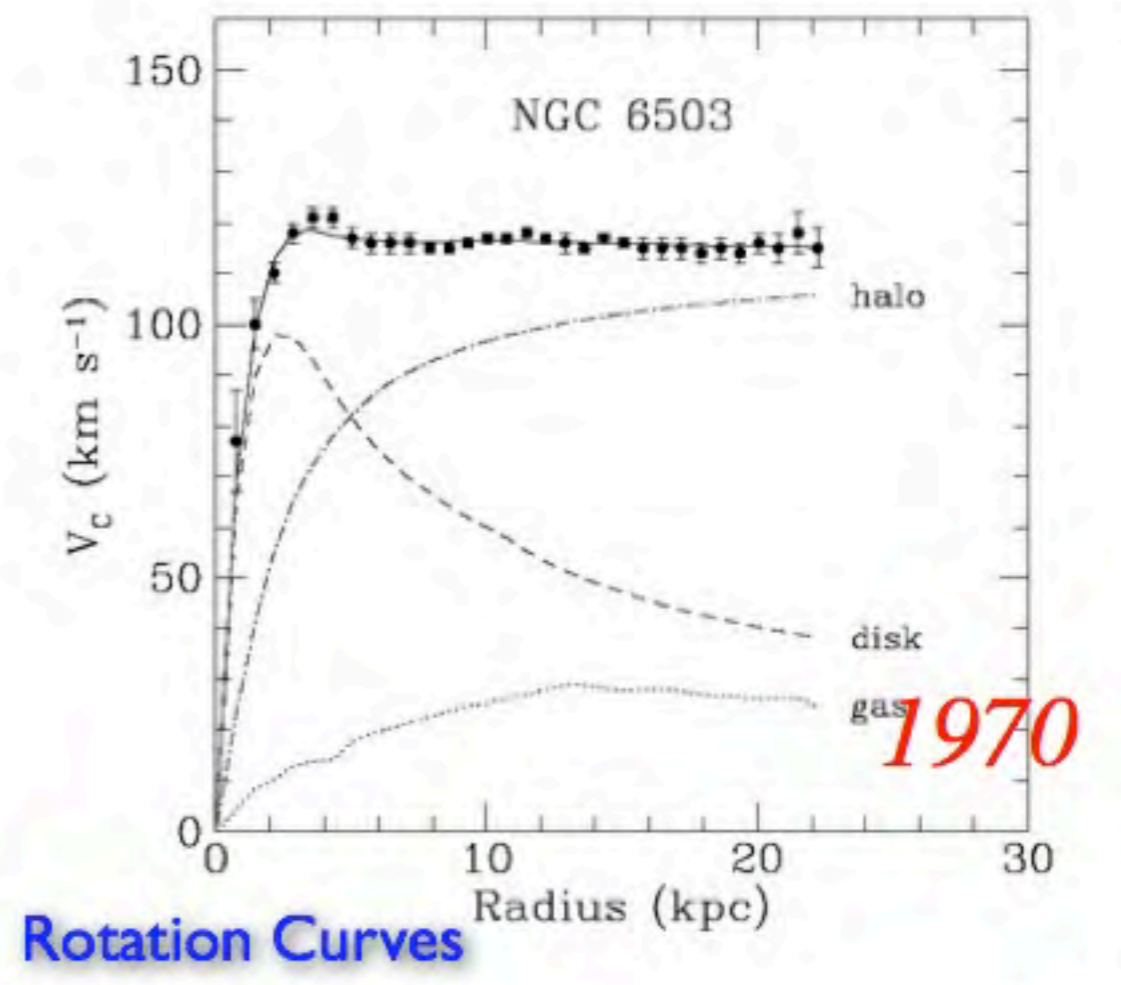




# CDMS (Cryogenic Dark Matter Search)- Αναζητώντας τη σκοτεινή ύλη

- ✿ *Η ύπαρξη σκοτεινής ύλης έχει θεωρητική βάση λόγω των βαρυτικών ενδείξεων που έχουν παρατηρηθεί στην κατανομή της ύλης- φαίνεται σαν να λείπει “μάζα”*
- ✿ *Υποθέτουμε πως η σκοτεινή ύλη αποτελείται από “εξωτικά” σωματίδια τα *WIMPs*(*Weakly Interacting Massive Particles*)*





*Ενδείξεις σκοτεινής ύλης*





*Ομάδα που ασχολείται με την ανίχνευση των  $Wimps$   
Πανεπιστήμιο *Berkeley**



# Τέλος



- ✦ <http://cdms.berkeley.edu/>
- ✦ <http://www-bdnew.fnal.gov/tevatron/>
- ✦ <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>
- ✦ <http://dayawane.ihep.ac.cn/twiki/bin/view/Public/>
- ✦ <http://public.web.cern.ch/public/>
- ✦ “Εισαγωγή στα στοιχειώδη σωμάτια και στην κοσμολογία” Ι.Δ.Βέργαδος, Η.Τριανταφυλλόπουλος