

Στοιχειώδη σωματίδια:

Ανίχνευση

Φώτης Πτωχός & Halil Saka
Πανεπιστήμιο Κύπρου

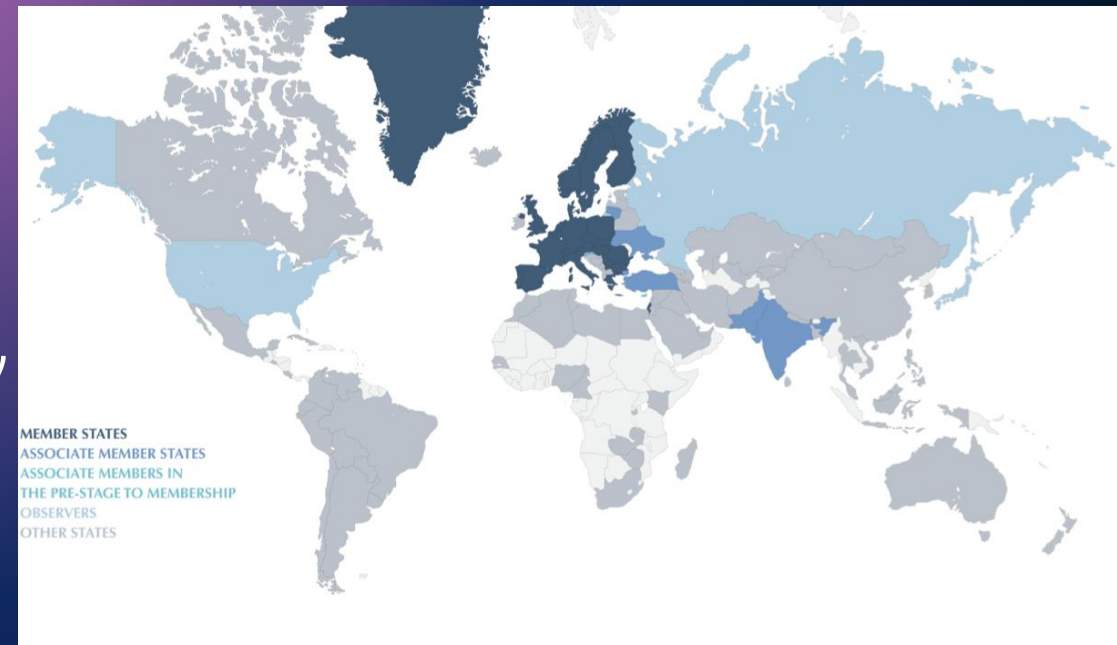


CERN:

European Council for Nuclear Research
(Conseil Européen pour la Research Nucléaire)

Με την πάροδο των χρόνων, η κατανόησή μας για την ύλη είναι πολύ πιο βαθιά από την κατανόηση του πυρήνα, και η βασική περιοχή έρευνας του CERN είναι πλέον **η σωματιδιακή φυσική**. Για το λόγο αυτό το CERN αποτελεί πλέον το **Ευρωπαϊκό Εργαστήριο για Σωματιδιακή Φυσική**

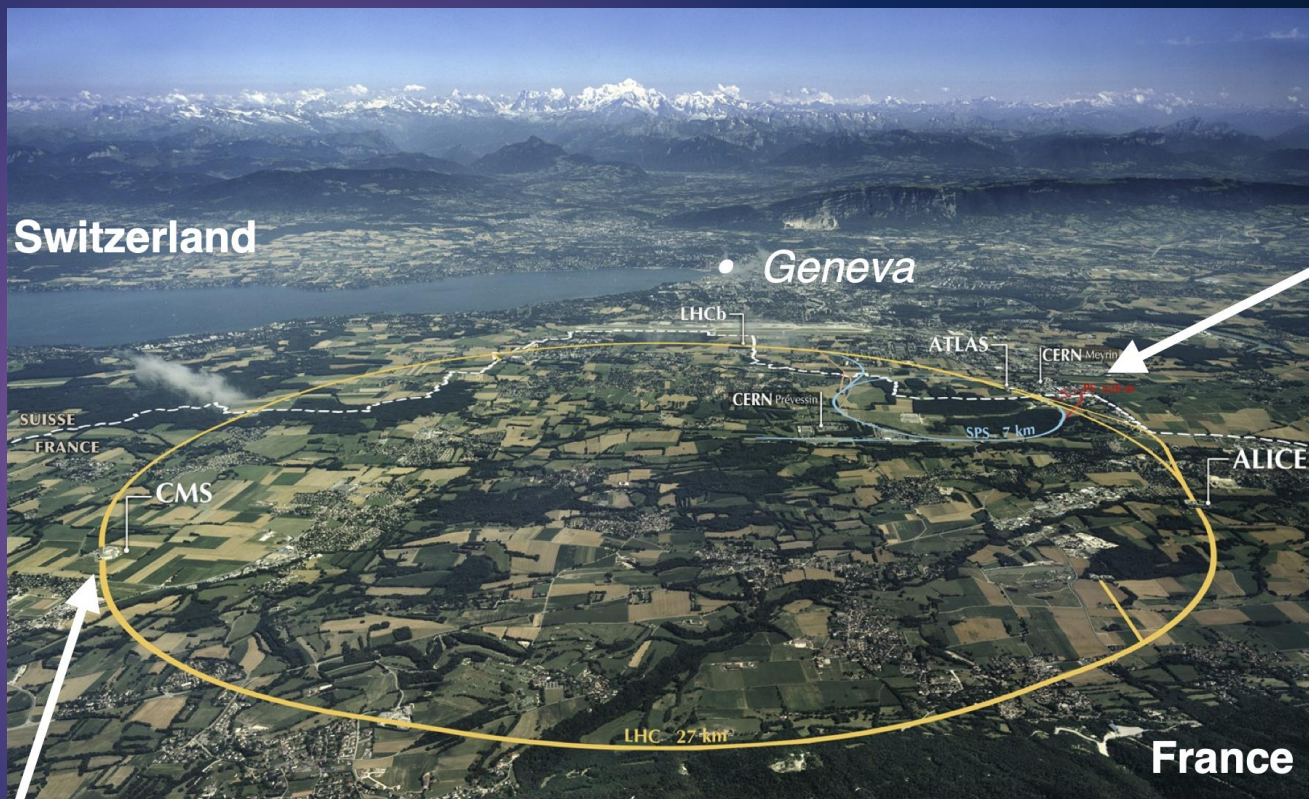
Από το 2008, στο CERN λειτουργεί ο **Large Hadron Collider LHC**, και τα πειράματα (**ανιχνευτές**) στον επιταχυντή αυτόν ανάμεσα στα οποία και ο ανιχνευτής **CMS**



LHC:

Ο μεγάλος συγκρουστήρας αδρονίων (Large Hadron collider) είναι ένας επιταχυντής και συγκρουστήρας που επιταχύνει πρωτόνια (ή ιόντα) σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός

Βρίσκεται σε βάθος περίπου 100μ από την επιφάνεια του εδάφους και αποτελείται από ένα δακτυλίδι περιφέρειας 27km με υπεραγωγίμους μαγνήτες.



Ανιχνευτής CMS

CERN
κύριο
εργαστήριο

Δύο δέσμες πρωτονίων κινούνται στο δακτυλίδι αυτό σε αντίθετες κατευθύνσεις

Ανιχνευτές σωματιδίων:

Τα σωματίδια είναι εξαιρετικά μικρά και ζουν πολύ μικρό χρονικό διάστημα → Αδύνατη η άμεση παρατήρησή τους

Μπορούμε όμως να τα παρατηρήσουμε **έμμεσα** μέσω των αλληλεπιδράσεών τους με το υλικό του ανιχνευτή

Κάθε τύπος σωματιδίου αφήνει **χαρακτηριστικό** σήμα στον ανιχνευτή

Τι θέλουμε να γνωρίζουμε?

- ❑ Ταυτότητα σωματιδίων
- ❑ Που παράγονται και που διασπώνται

Για να ανακατασκευάσουμε ένα σωματίδιο, ο ανιχνευτής μας θα πρέπει να μπορεί να μας δώσει πληροφορία για το **φορτίο**, την **μάζα**, την **ενέργεια** και **ορμή** των σωματιδίων



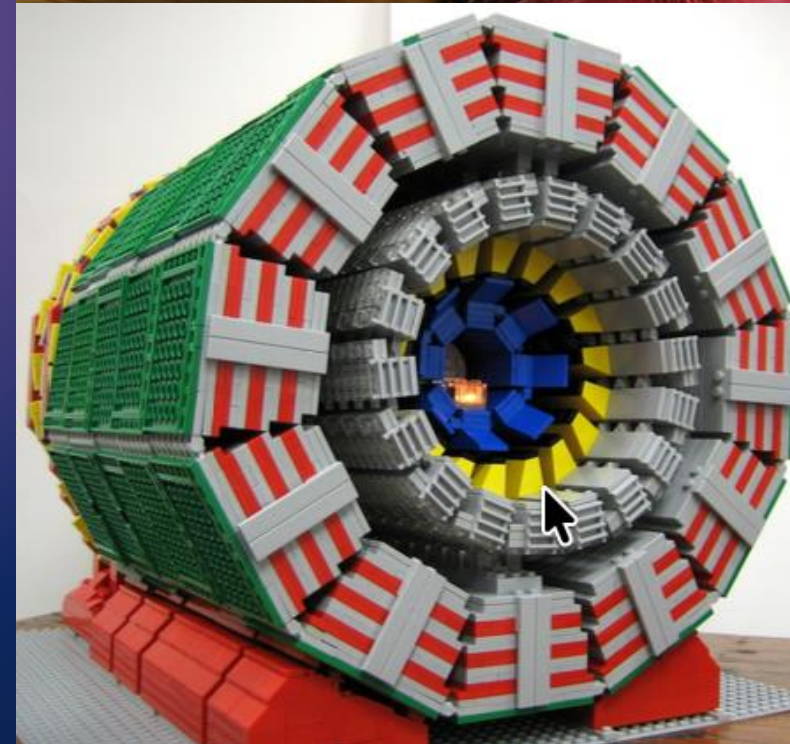
Ανιχνευτές σωματιδίων:

Δύο βασικοί τύποι ανιχνευτών:

- ❑ Καταγραφέας τροχιών ➡ Προσδιορισμός ορμής/φορτίου
- ❑ Καλορίμετρο (θερμιδόμετρο) ➡ Προσδιορισμός ενέργειας

Δεν υπάρχει ανιχνευτής που να μπορεί να δώσει αυτές τις πληροφορίες :

- ❑ Για την μέτρηση της ορμής και φορτίου θα πρέπει το σωματίδιο να διασχίσει αρκετά μεγάλη απόσταση μέσα σε μαγνητικό πεδίο και να μετρήσουμε την καμπύλωση του χωρίς να σταματήσει
 - Ελαφρύ υλικό με μικρό ατομικό αριθμό για να μην υπάρχουν πολλές δευτερογενείς αλληλεπιδράσεις
- ❑ Για την μέτρηση της ενέργειας του σωματιδίου, θα πρέπει το υλικό του ανιχνευτή να έχει μεγάλο ατομικό αριθμό ώστε το σωματίδιο να αλληλεπιδράσει με το ατομικό φορτίο και να χάσει ενέργεια μέχρι να σταματήσει μέσα στον ανιχνευτή.



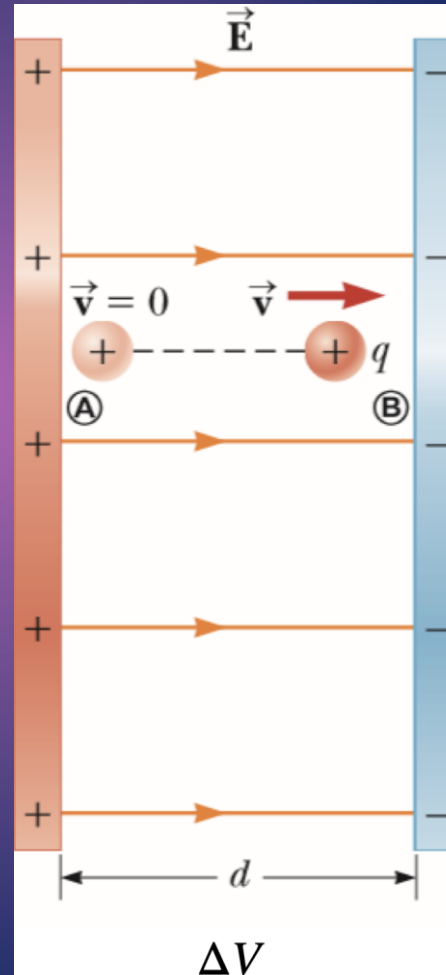
Η δύναμη Lorentz

$$\vec{F}_{Lorentz} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_{ηλεκτρική} = q\vec{E} = m\vec{a}$$

$$U_{δυναμική} = q \Delta V$$

$$E_{κινητική} = \frac{1}{2}mv^2$$



Η δύναμη Lorentz

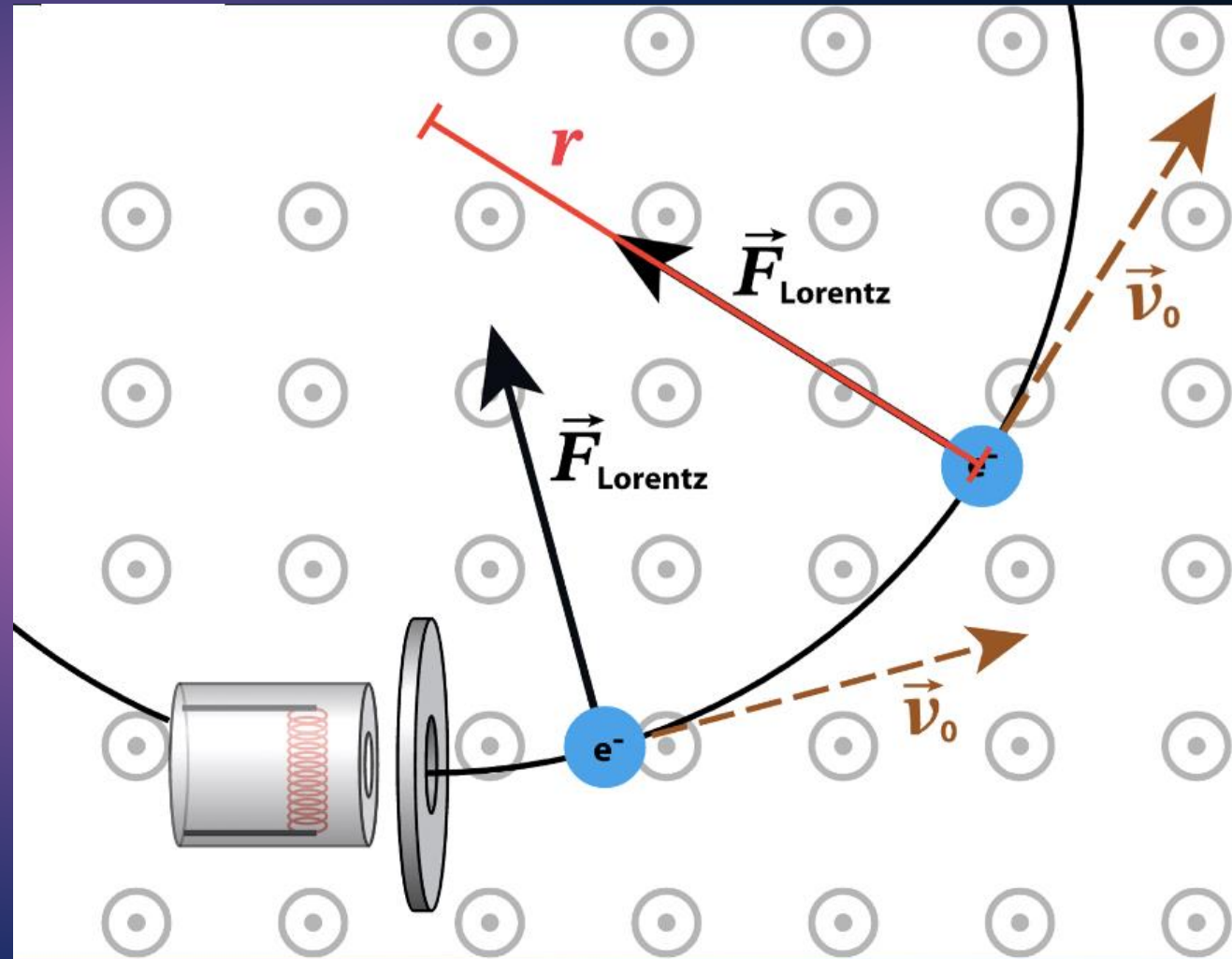
$$\vec{F}_{Lorentz} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Η μαγνητική δύναμη παίζει τον ρόλο της κεντρομόλου δύναμης

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

Η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς είναι:

$$R = \frac{mv}{qB} \Rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

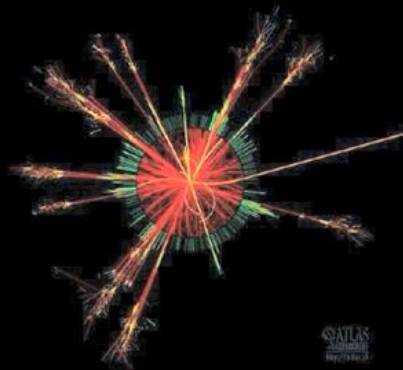


Παραγωγή νέων σωματιδίων από p-p συγκρούσεις

<https://www.youtube.com/watch?v=7HpQGR1gjXk>

Proton-proton Collision in the ATLAS Experiment

Z particle production



Παραγωγή Higgs σωματιδίου από p-p συγκρούσεις

<https://youtu.be/wZpfHzlhuzg>

Proton-proton Collision in the ATLAS Experiment

Production of the Higgs particle decaying to two Z^0 particles


ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



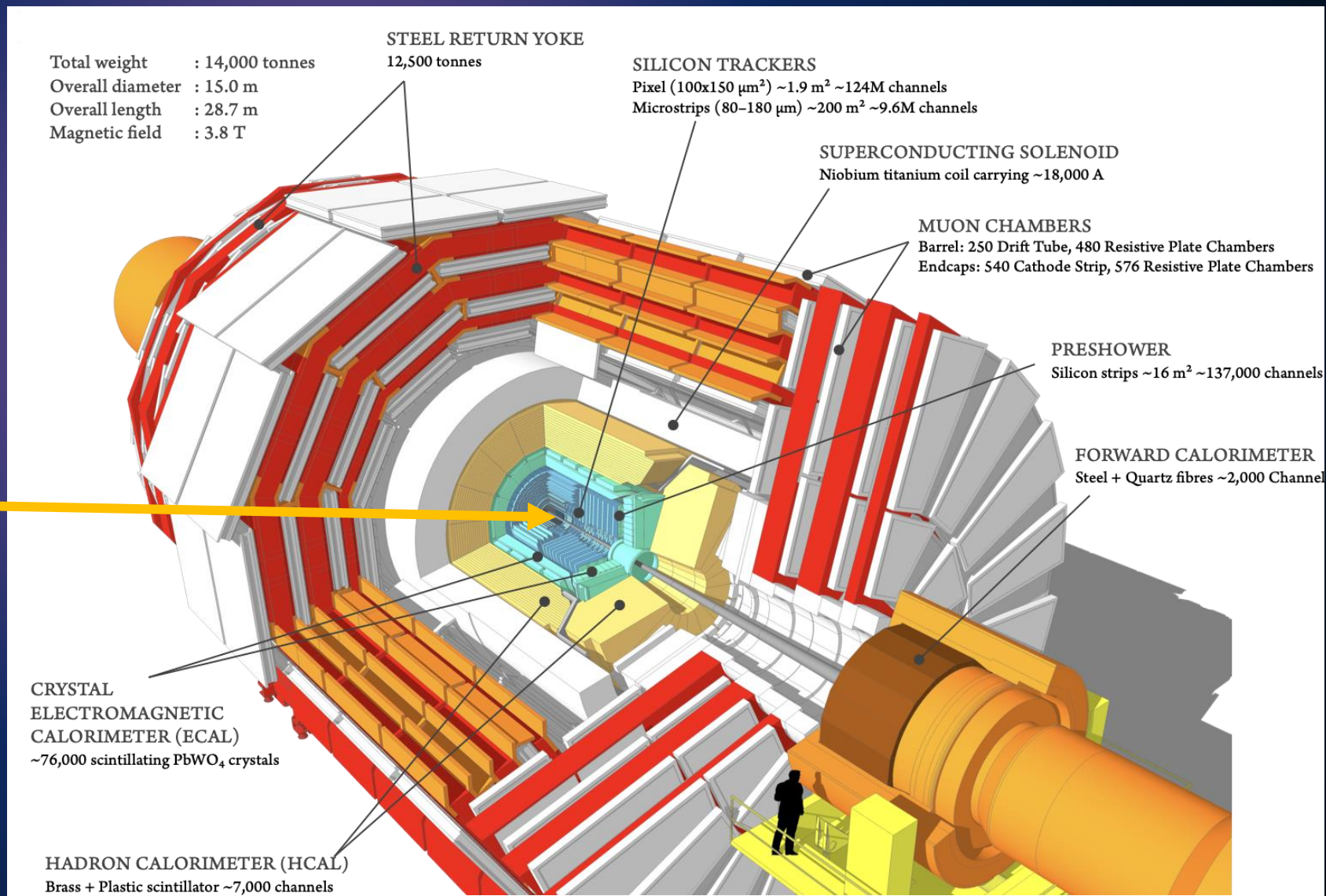

CMS
EXPERIMENT

Τι είναι ο ανιχνευτής CMS

Compact Muon Solenoid (CMS) είναι ένας ανιχνευτής για μελέτη όλων των ειδών της φυσικής του LHC

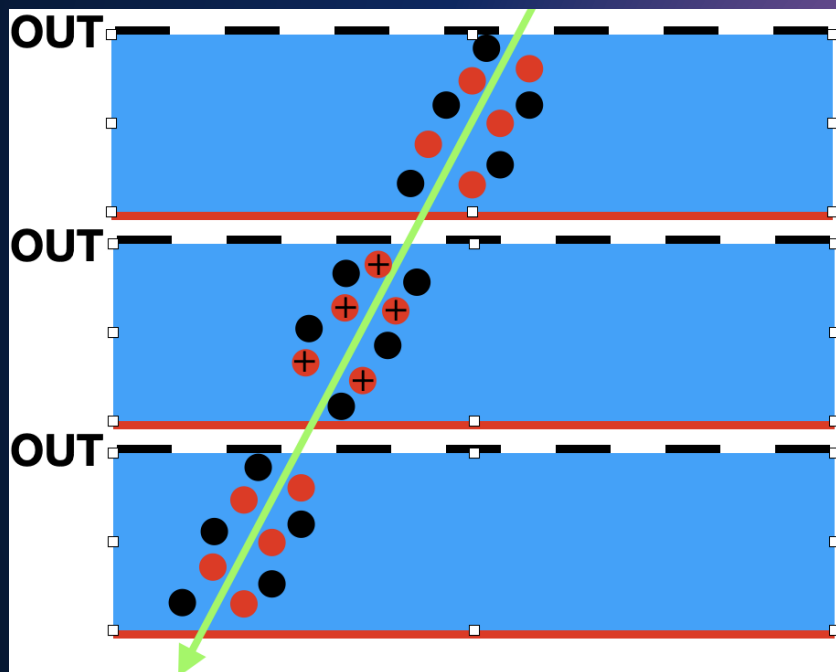
Ένας από τους 4 ανιχνευτές πειράματα του LHC

Τα πρωτόνια έρχονται σε σύγκρουση στο κέντρο του



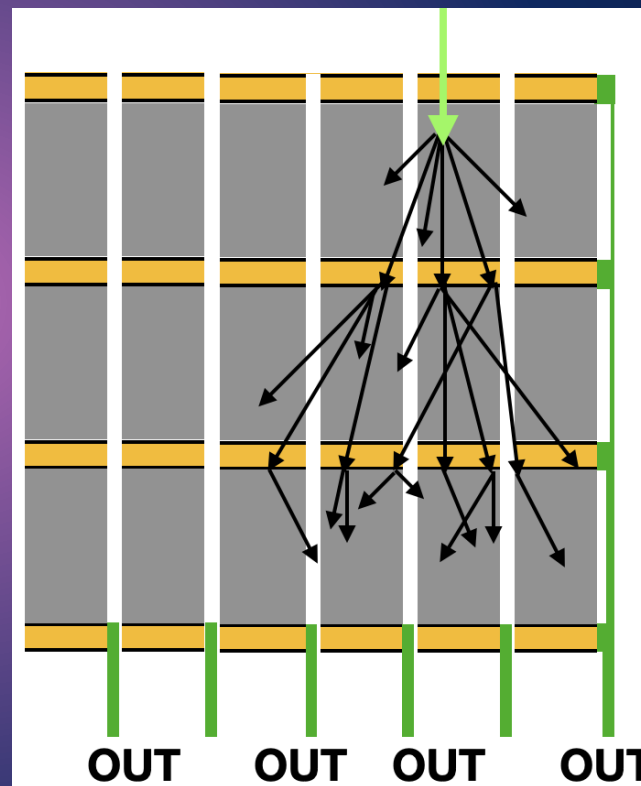
Ανιχνευτές σωματιδίων: Ανιχνευτής τροχιών vs Καλορίμετρο

Ένας τυπικός ανιχνευτής τροχιών



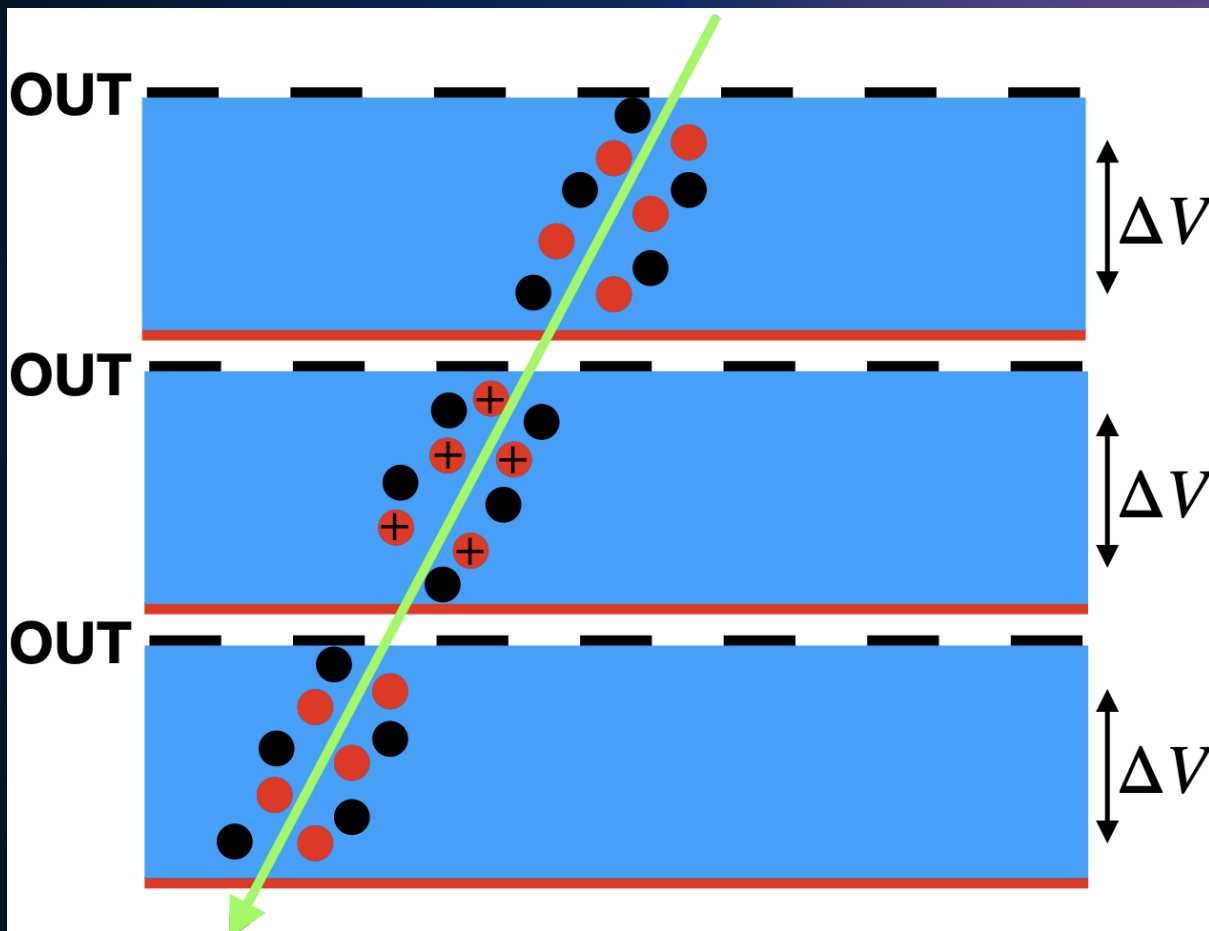
Πράσινο: Διερχόμενο φορτισμένο σωματίδιο

Ένα τυπικό καλορίμετρο



Πράσινο: Εισερχόμενο σωματίδιο

Ανιχνευτής τροχιών



Το σωματίδιο εισέρχεται και εξέρχεται

Συνηθισμένη απόσταση των υλικών $\sim 100\mu\text{m} - 1\text{mm}$

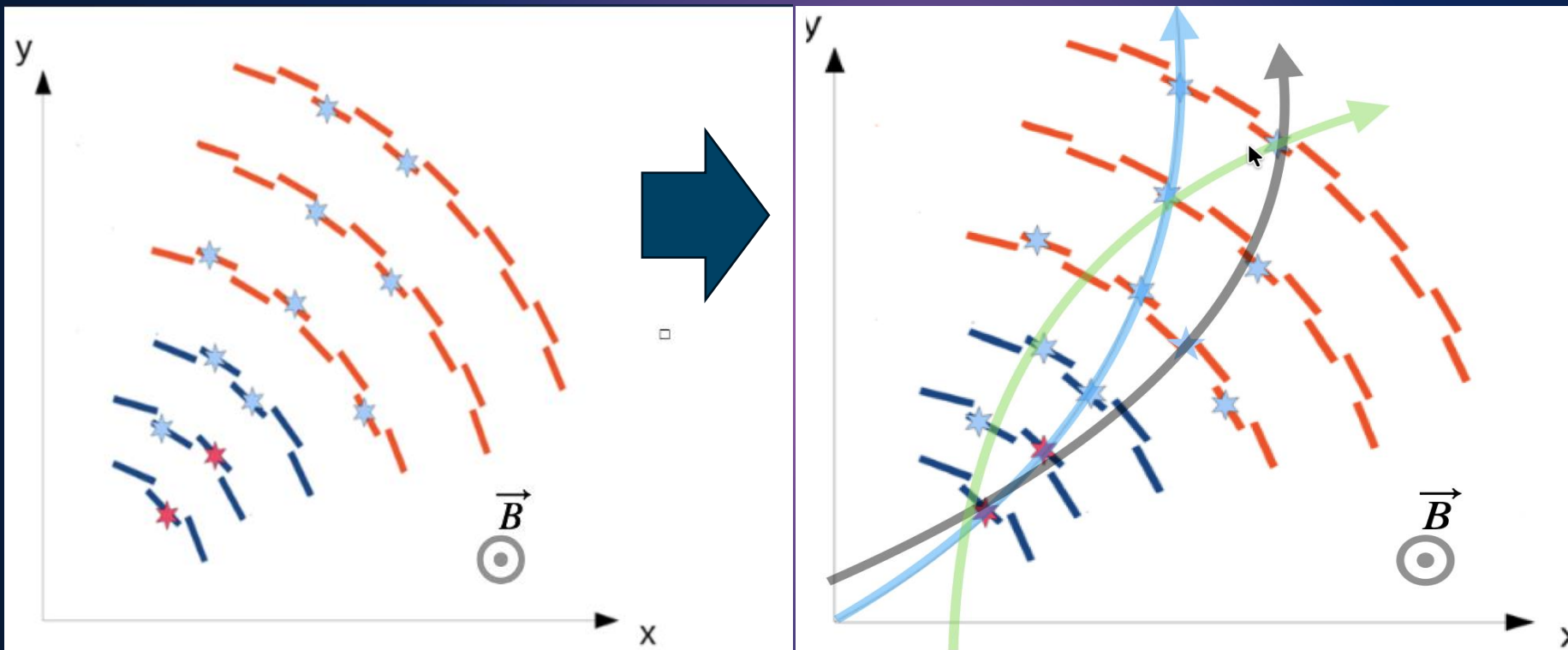
Συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται
πυρίτιο, ευγενή αέρια κλπ

Φορτισμένα σωματίδια μόνο:
πρέπει να ιονιστεί το υλικό του ανιχνευτή

Έξοδος (output): ηλεκτρικό σήμα

Ιονισμός: διαχωρισμός ηλεκτρονίου από το άτομο

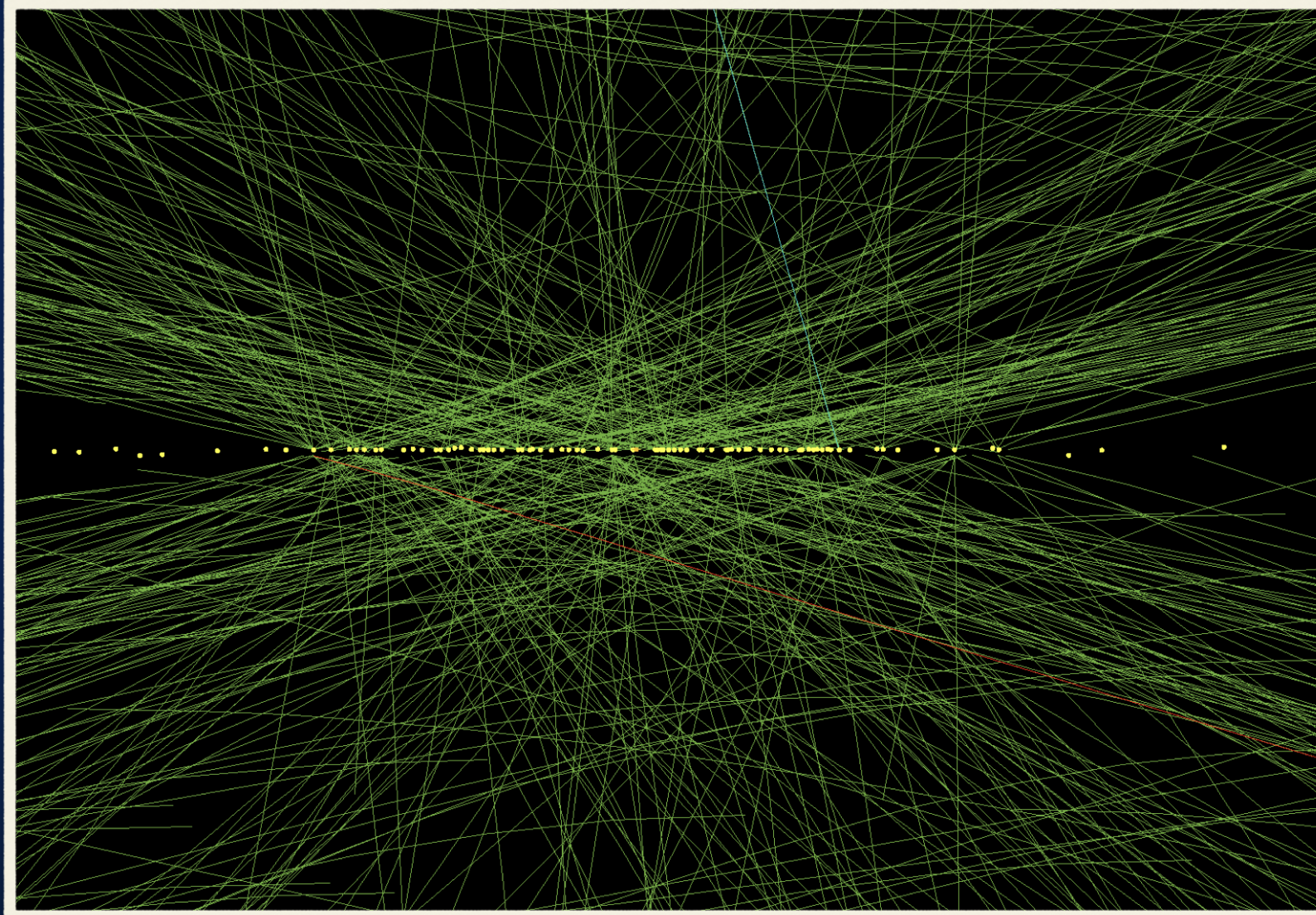
Ανιχνευτής τροχιών: σύνδεση των ηλεκτρικών σημάτων



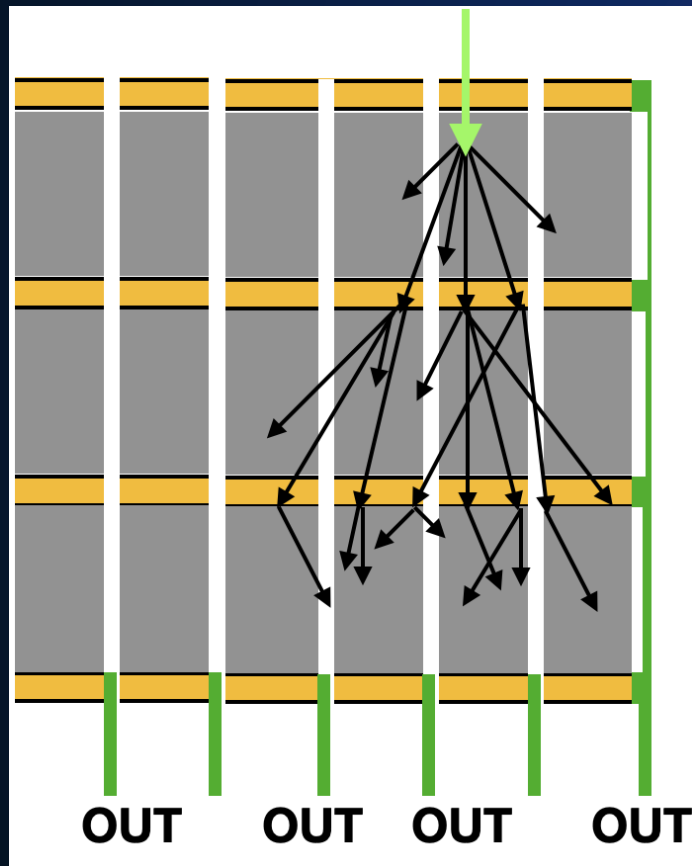
Κάθε σταυρός δηλώνει «σήμα» στο αντίστοιχο στρώμα του ανιχνευτή τροχιών

Ποια από τις καμπύλες είναι η σωστή?

Τροχιές σε συγκρούσεις στον LHC



Καλορίμετρο



Το εισερχόμενο σωματίδιο απορροφάται πλήρως

Τυπικές διαστάσεις 2 – 20 cm

Συνηθισμένα υλικά: σπινθηριστές και υλικά υψηλής πυκνότητας, σίδηρο, μόλυβδος κλπ

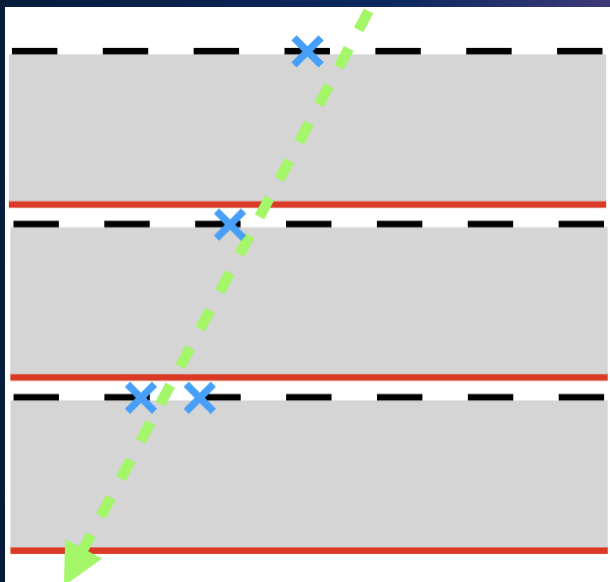
Φορτισμένα και μη φορτισμένα σωματίδια: Θα πρέπει να αλληλεπιδράσουν με το υλικό της μεγάλης πυκνότητας.

Έξοδος: φως που μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα

Σπινθηρισμός: η εκπομπή φωτός συγκεκριμένης συχνότητας όταν έχουμε αποδιέγερση ηλεκτρονίου σθένους

Ανιχνευτές σωματιδίων: Ανιχνευτής τροχιών vs Καλορίμετρο

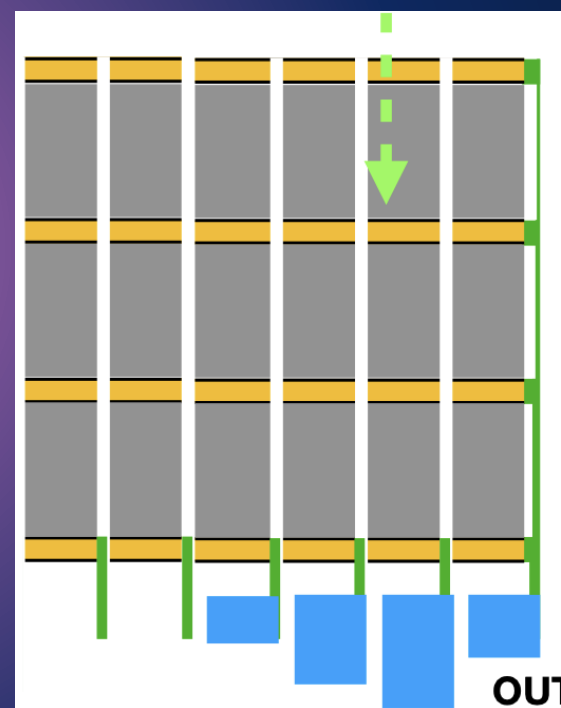
Τυπικός ανιχνευτής τροχιών



Μπλε: Πληροφορία ανάγνωσης του ανιχνευτή

Επόμενο στόχος: Σύνδεση των «σημάτων»

Τυπικό καλορίμετρο

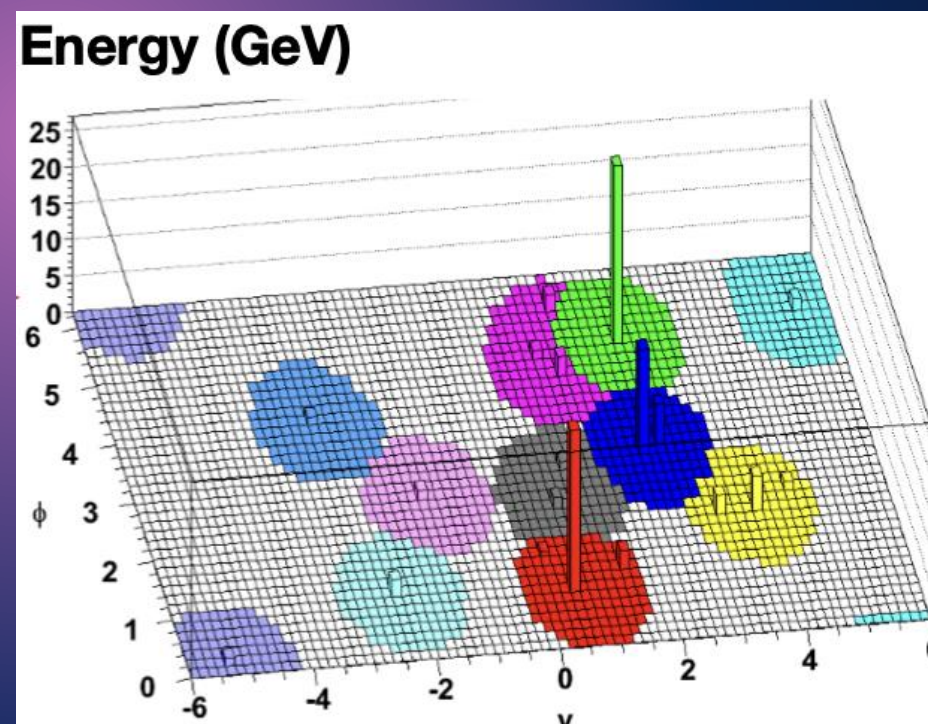
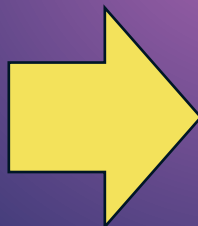
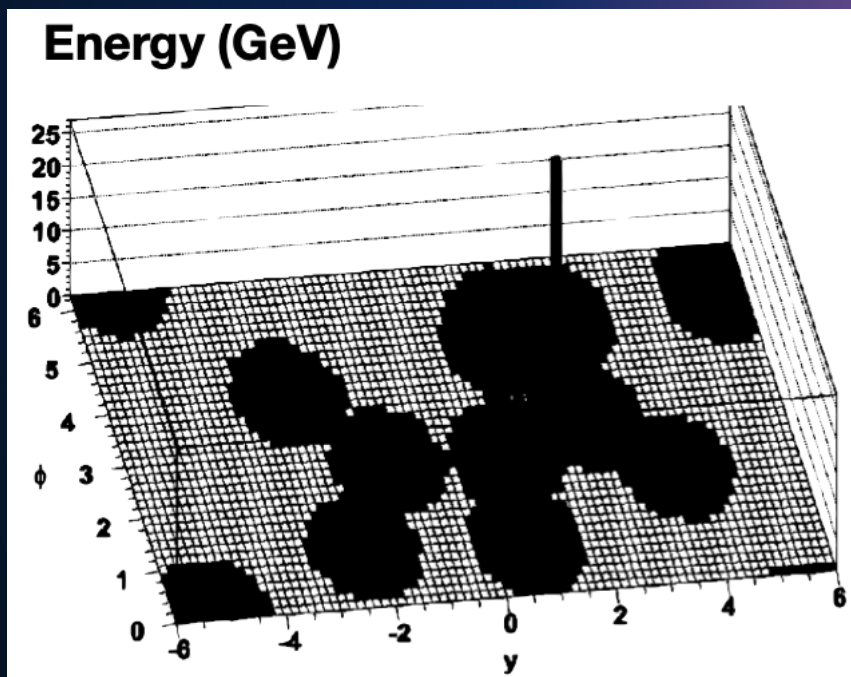


Μπλε: Πληροφορία ανάγνωσης του ανιχνευτή

Επόμενο στόχος: Ομαδοποίηση των «σημάτων»

Ανιχνευτές σωματιδίων: Ομαδοποίηση των σημάτων

Απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη προσπάθεια και κόπος για να ξεχωρίσει και να ταυτοποιηθεί το παρατηρούμενο σήμα σε έναν ανιχνευτή. Η διαδικασία ονομάζεται επαναδόμηση (reconstruction)



Είναι σωστή η ομαδοποίηση που έγινε?

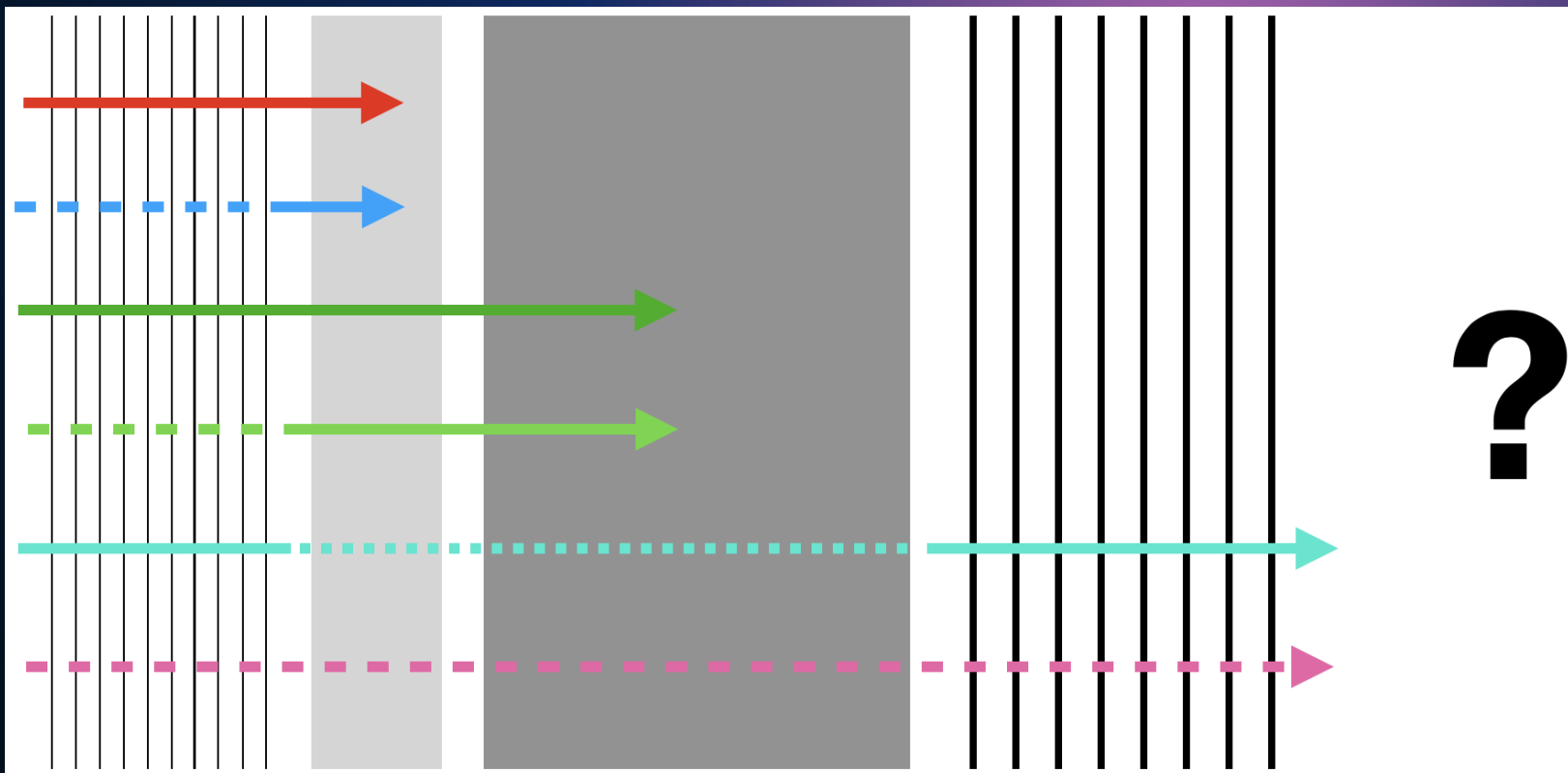
Ανίχνευση σωματιδίων στο CMS

	QUARKS	LEPTONS
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	-1
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u up	e electron
	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
	$\frac{2}{3}$	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	c charm	μ muon
	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
	$\frac{2}{3}$	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	t top	τ tau
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	ν_e electron neutrino
	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	s strange	ν_μ muon neutrino
	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	b bottom	ν_τ tau neutrino

Ανιχνευτής τροχιών

Καλορίμετρο

Ανιχνευτής τροχιών



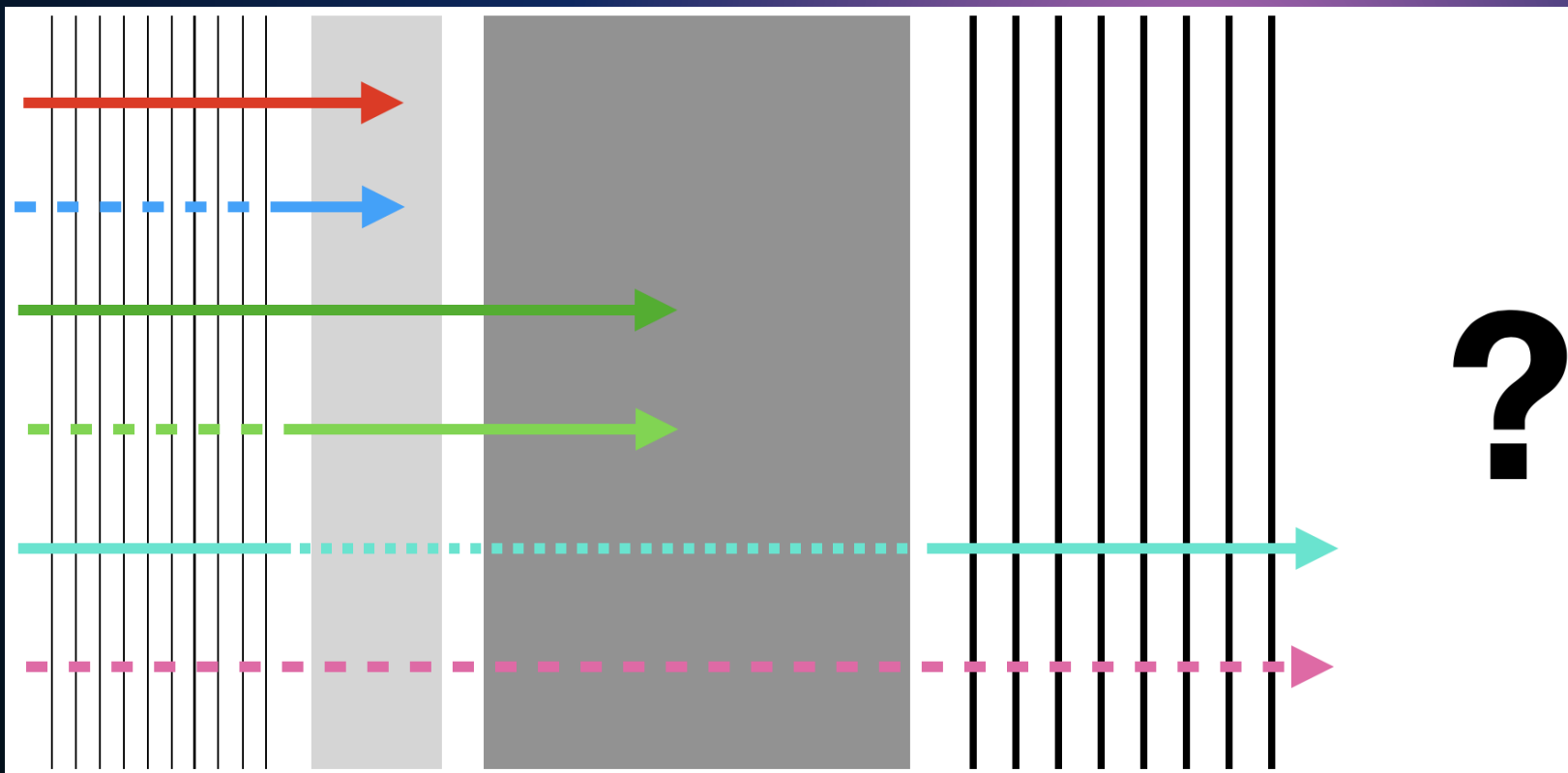
Ανίχνευση σωματιδίων στο CMS

	QUARKS	LEPTONS
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	-1
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u up	e electron
	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
	$\frac{2}{3}$	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	c charm	τ tau
	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
	$\frac{2}{3}$	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	t top	τ tau
	d down	ν_e electron neutrino
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	s strange	ν_μ muon neutrino
	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	b bottom	ν_τ tau neutrino
	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

Ανιχνευτής τροχιών

Καλορίμετρο

Ανιχνευτής τροχιών



Ηλεκτρόνια

Φωτόνια

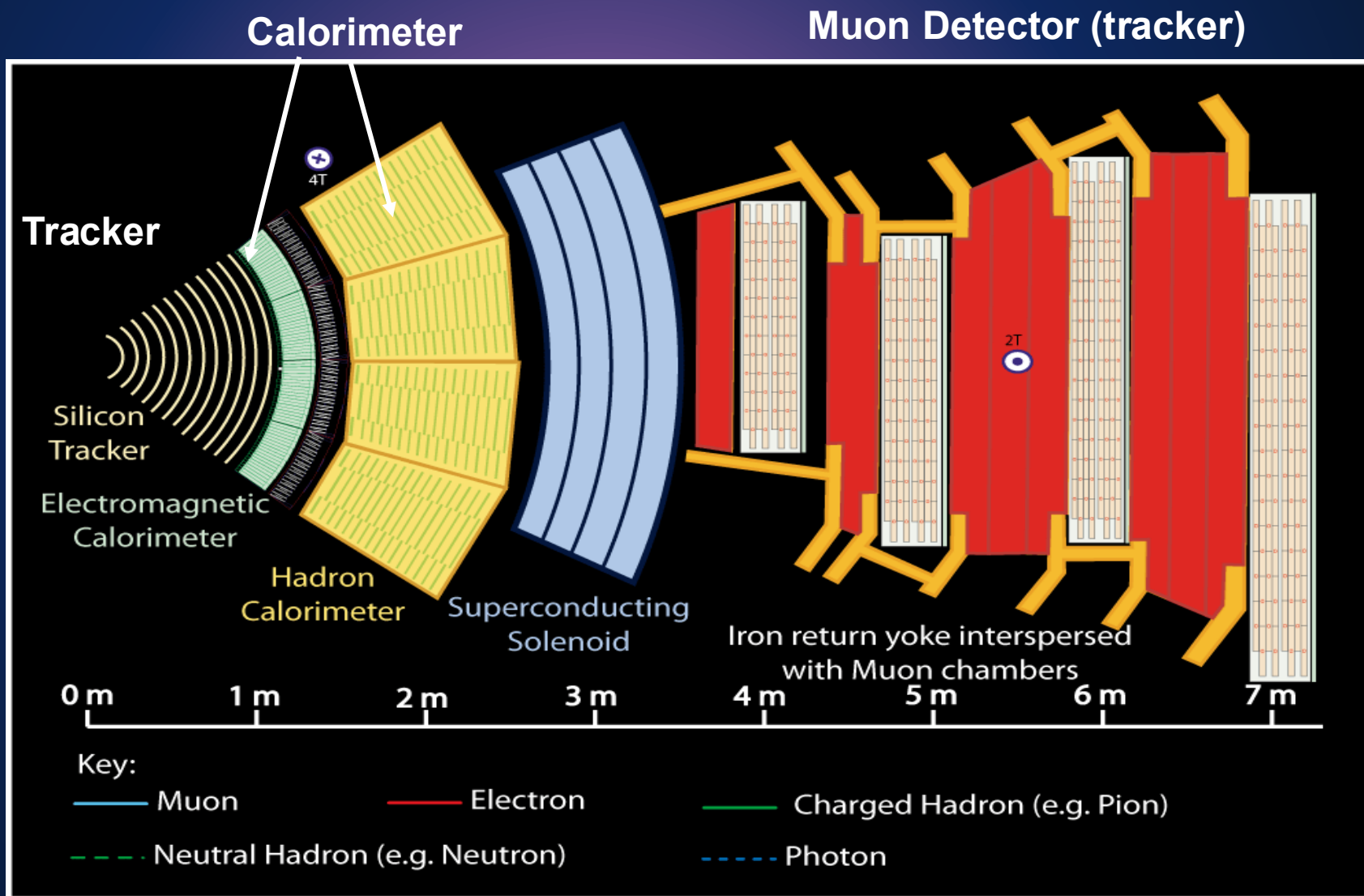
Φορτισμένα αδρόνια

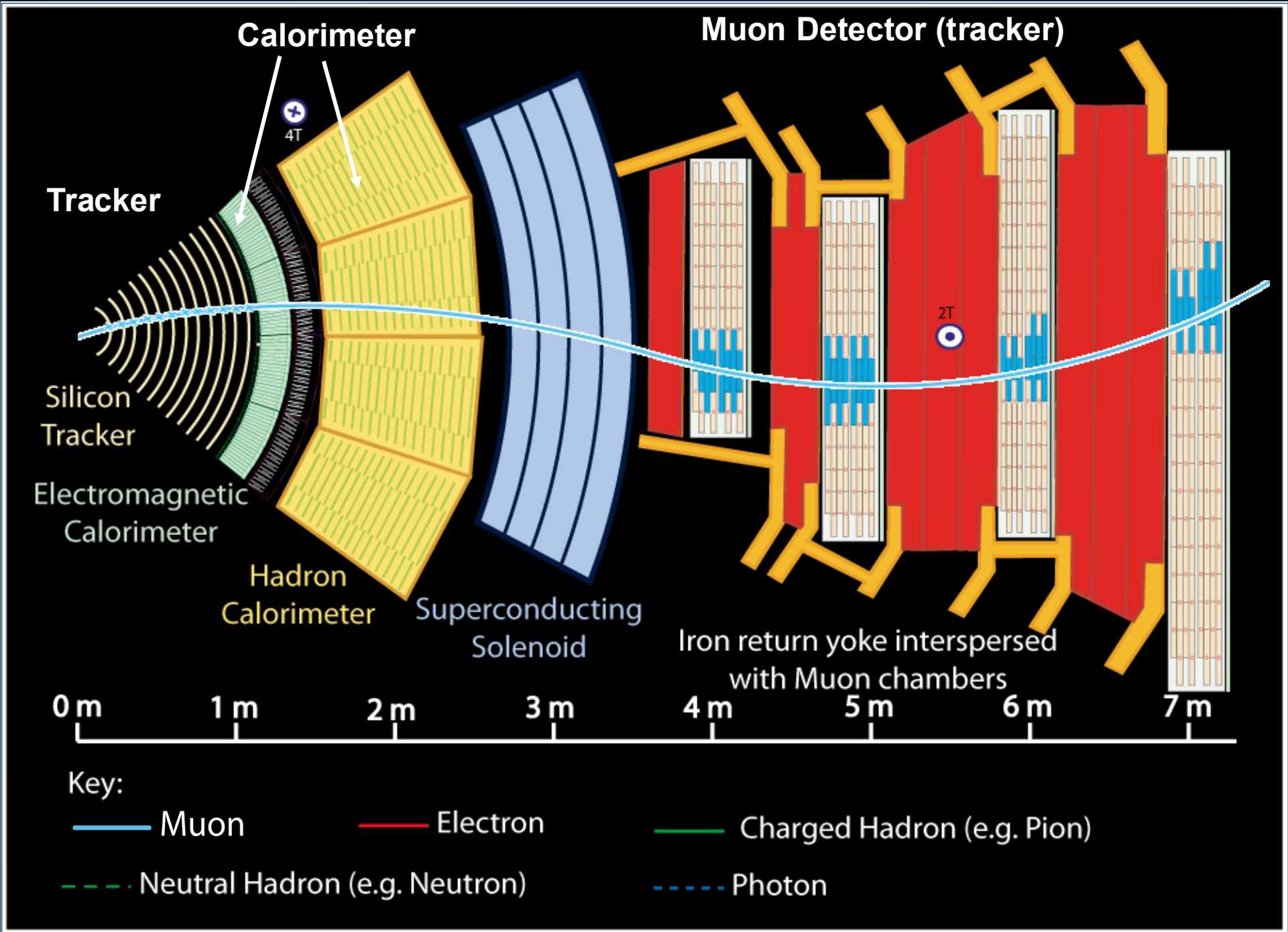
Ουδέτερα αδρόνια

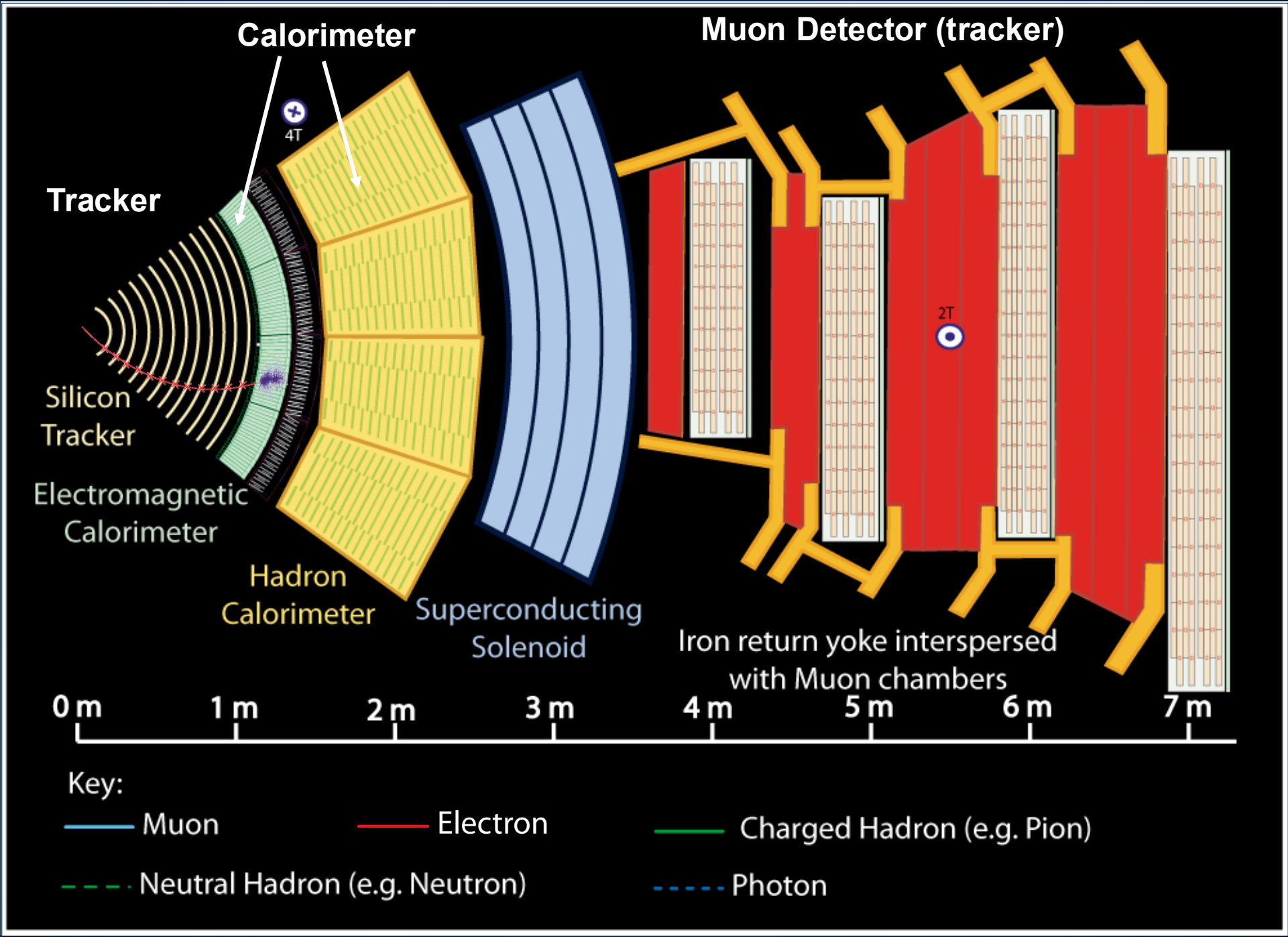
Μιόνια

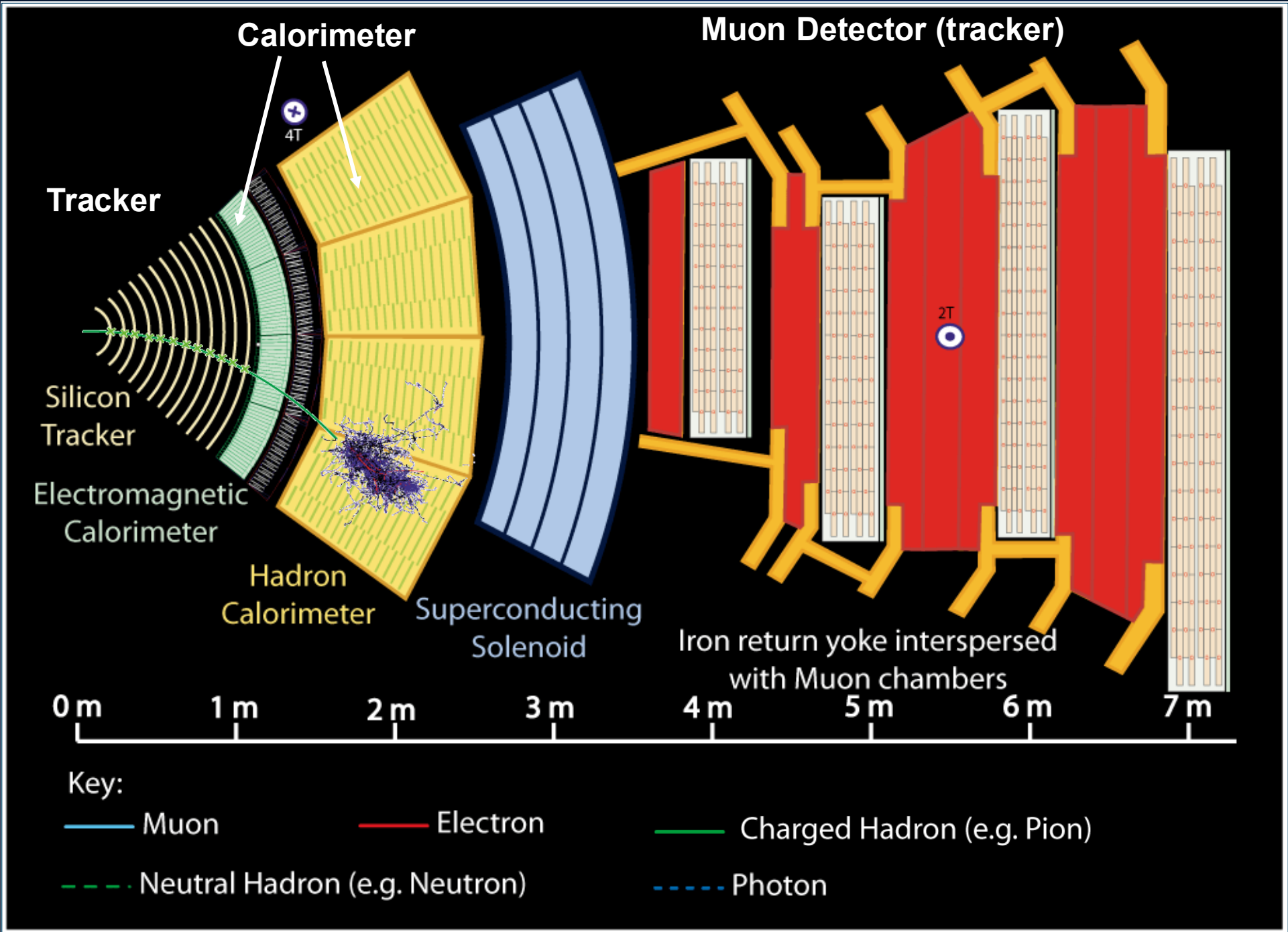
Νετρίνο

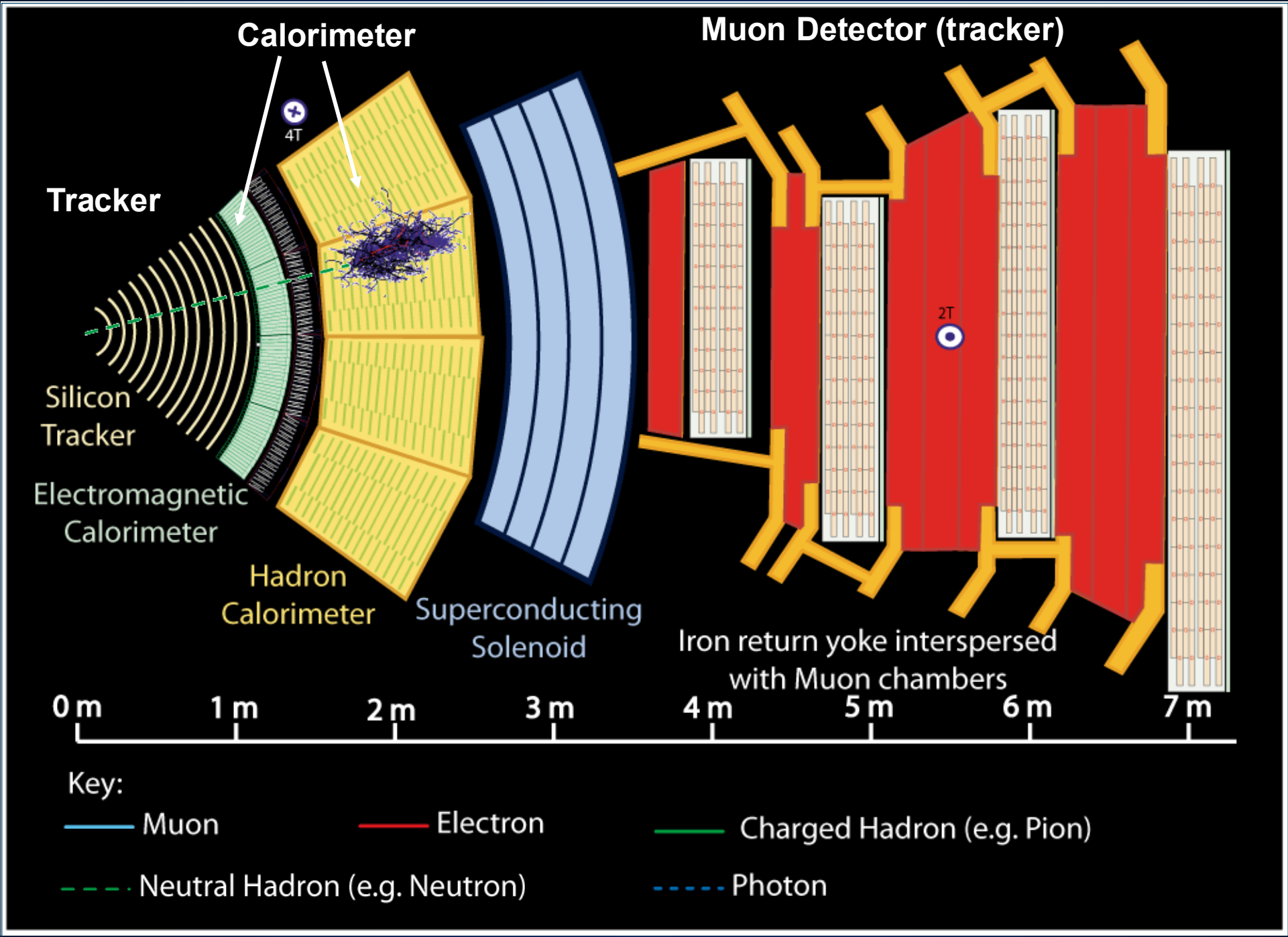
Ανίχνευση σωματιδίων στο CMS

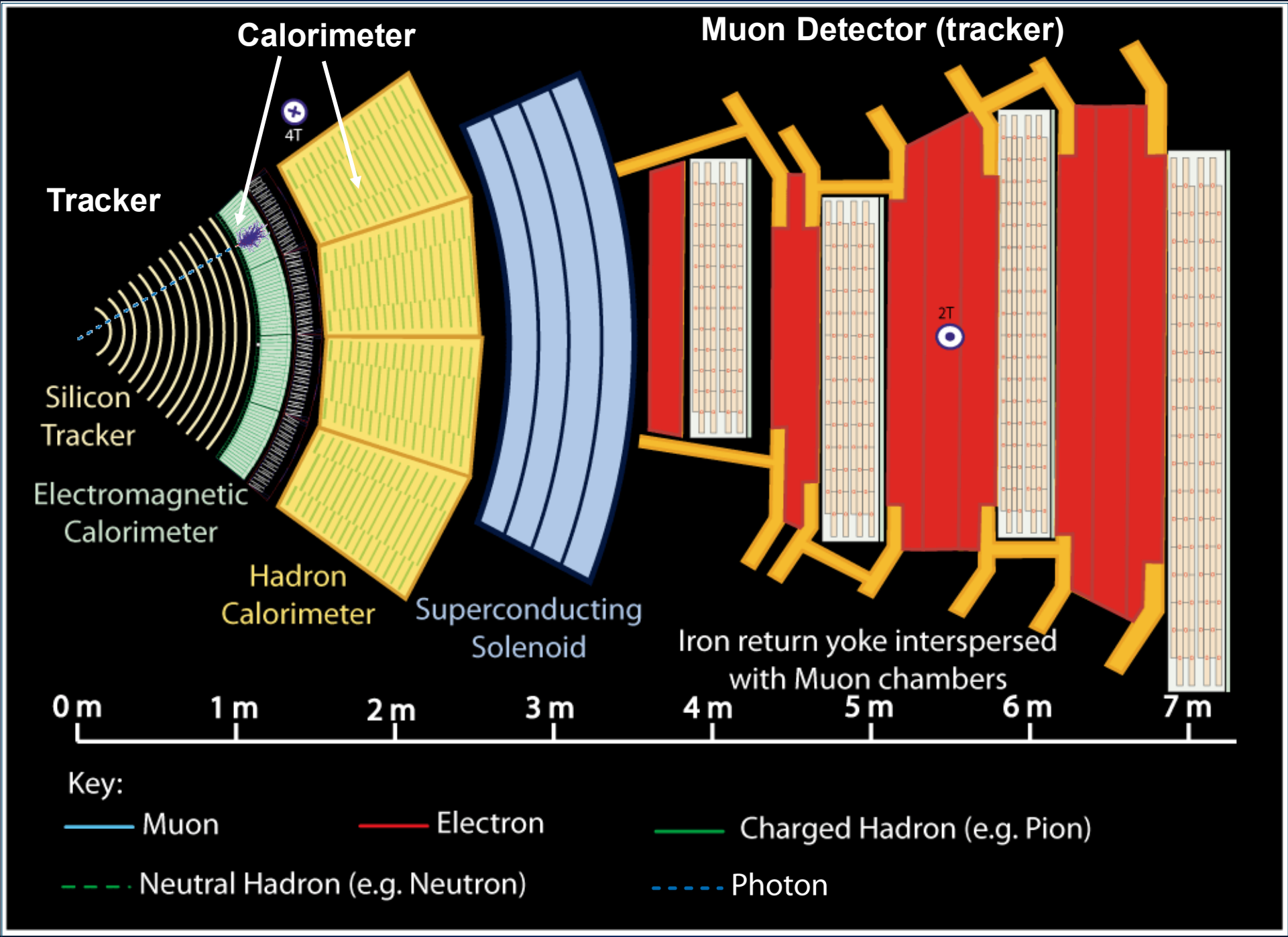




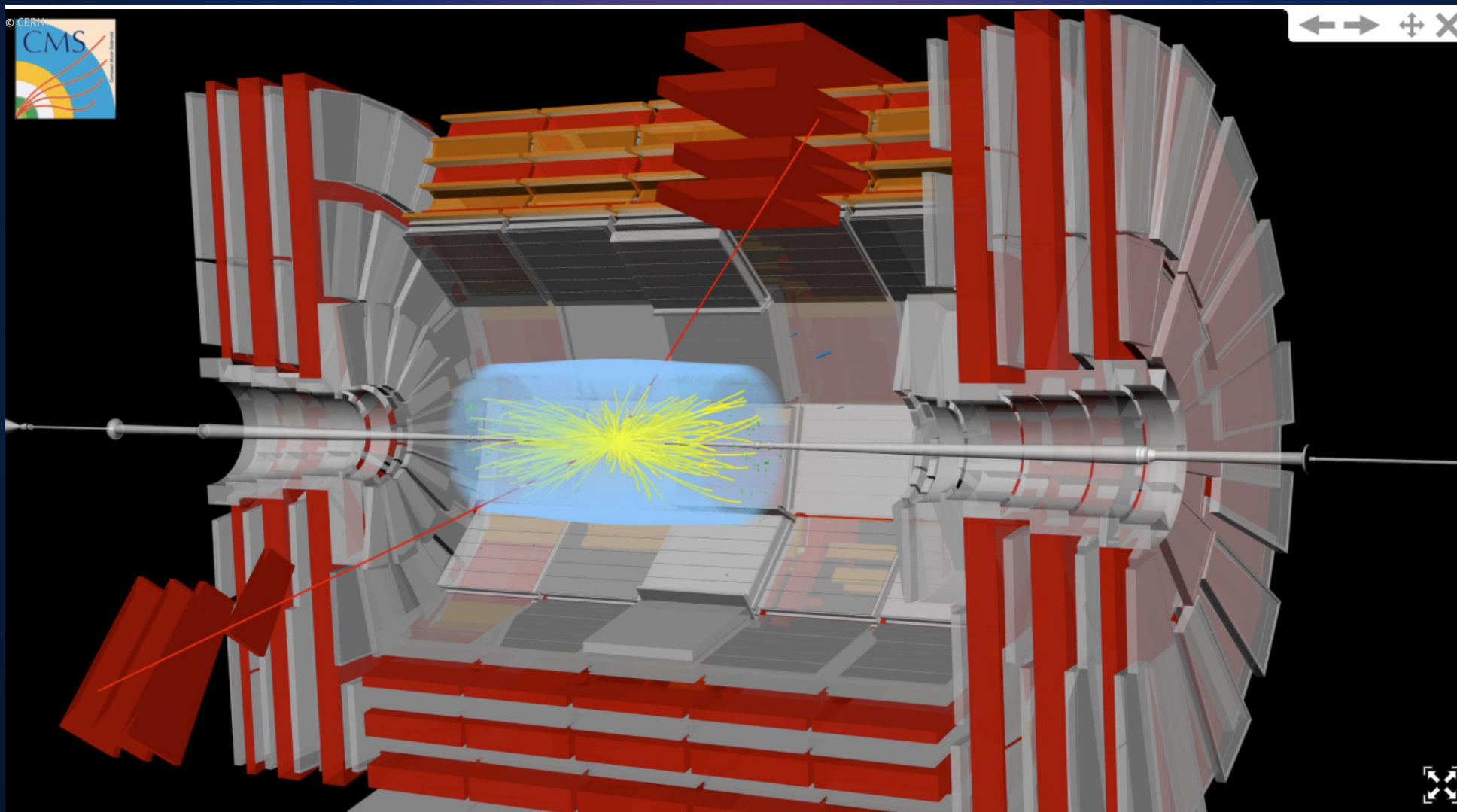




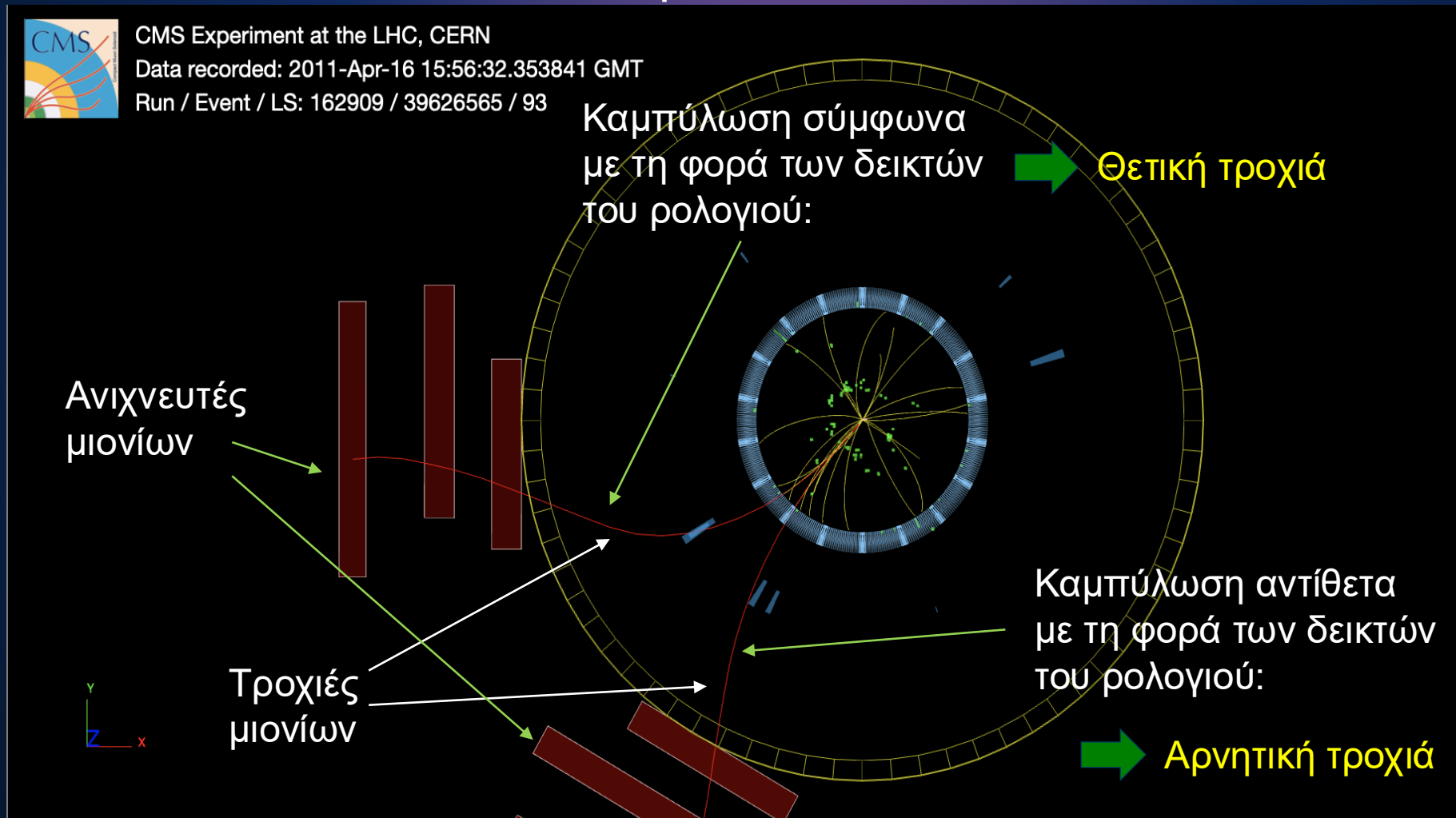




Πραγματικό Z γεγονός στον ανιχνευτή CMS

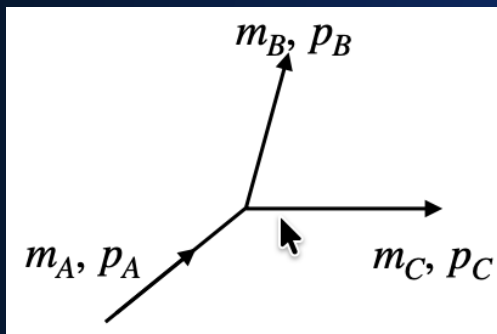


Υποψήφιο γεγονός για παραγωγή και διάσπαση ενός ηλεκτρικά ουδέτερου σωματιδίου που διασπάται σε δύο μίονια



Διερεύνηση της διάσπασης ενός σωματιδίου

Θεωρήστε την διάσπαση ενός ασταθούς σωματιδίου A σε δύο άλλα σωματίδια B και C: $A \rightarrow BC$



$$p_A = p_B + p_C$$

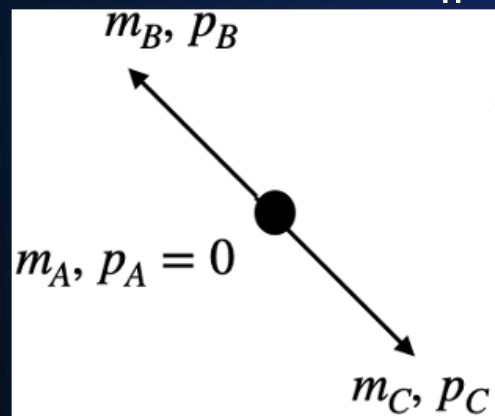
$$E_A = E_B + E_C$$

Η ορμή και ενέργεια του συστήματος διατηρούνται

Η ολική ενέργεια E ενός σωματιδίου είναι το άθροισμα της κινητικής του ενέργειας και της «δυναμικής» του ενέργειας που είναι η μάζα του σωματιδίου.

$$E = mc^2 \longrightarrow E = \sqrt{(|\vec{p}|c)^2 + (mc^2)^2}$$

Θεωρήστε ότι το διασπώμενο σωματίδιο έχει μηδενική κινητική ενέργεια ή μηδενική ορμή. Αυτό είναι το σύστημα αναφοράς ηρεμίας σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας



$$0 = p_B + p_C$$

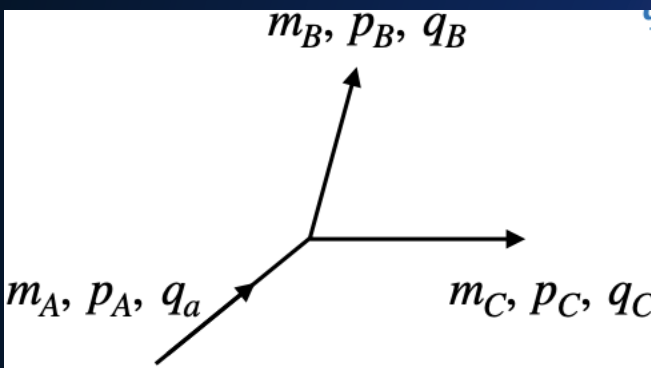
$$m_A = E_B + E_C$$

Επομένως η αρχική ενέργεια είναι μόνο η ενέργεια της μάζας του σωματιδίου A: $E_A = m_A c^2$

$$m_A c^2 = \sqrt{(E_B + E_C)^2 - |\vec{p}_B c + \vec{p}_C c|^2}$$

Διερεύνηση της διάσπασης ενός σωματιδίου: φορτίο

Θεωρήστε την διάσπαση ενός ασταθούς σωματιδίου A σε δύο άλλα σωματίδια B και C: $A \rightarrow BC$

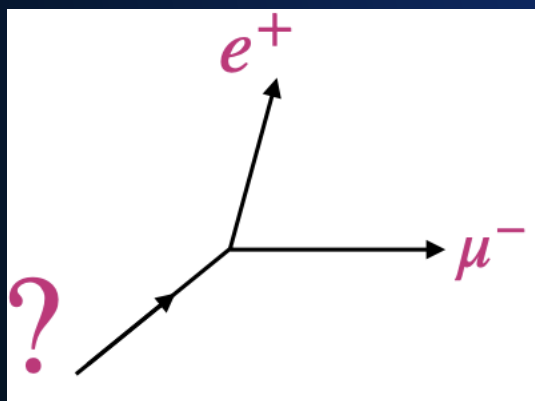


$$q_A = q_B + q_C$$

$$E_A = E_B + E_C$$

Το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται

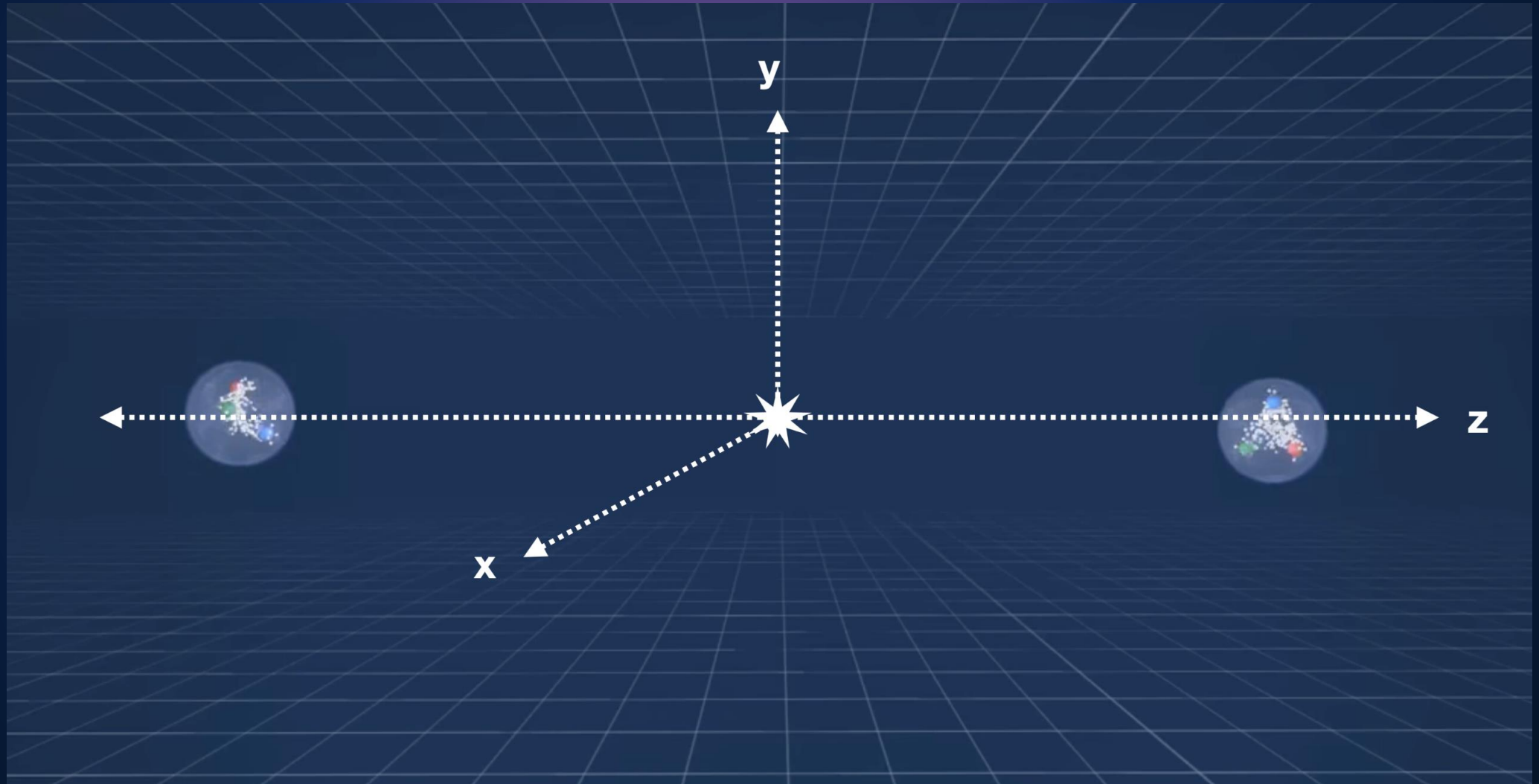
Αν μετρήσουμε το ηλεκτρικό φορτίο των προϊόντων B και C τότε ξέρουμε και το φορτίο του σωματιδίου A



Μπορούμε ακόμα να μετρήσουμε το είδος των σωματιδίων: ηλεκτρόνια, μίονια, φωτόνια κλπ

Επομένως κοιτώντας τα προϊόντα διάσπασης, μπορούμε να βρούμε το φορτίο, μάζα και άλλες ιδιότητες του διασπώμενου σωματιδίου A παρόλο που δεν το έχουμε μετρήσει ποτέ στον ανιχνευτή μας.

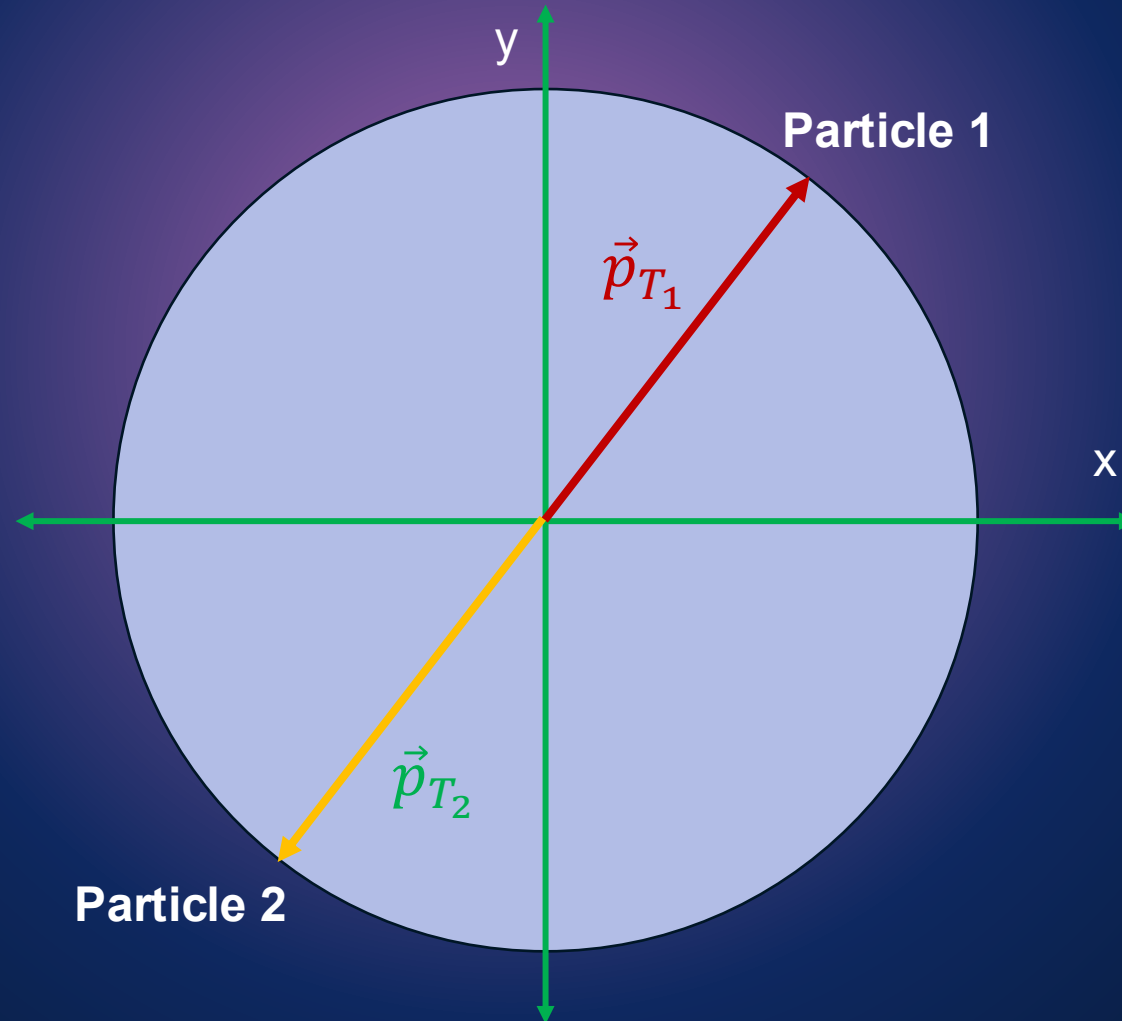
Διατήρηση ορμής



Διατήρηση ορμής στο εγκάρσιο (x-y) επίπεδο

$$\vec{p}_T = (p_x, p_y)$$

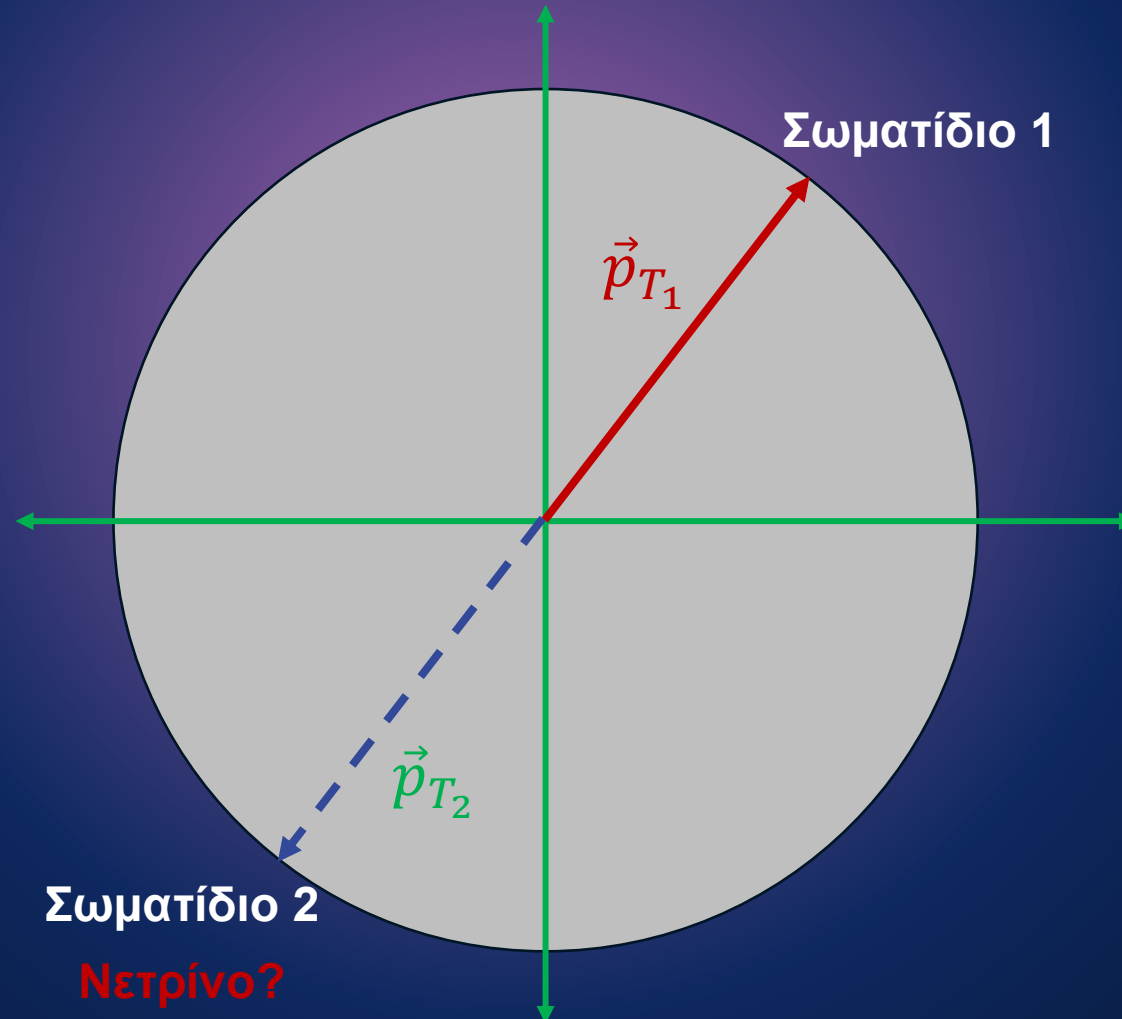
$$\vec{p}_{T_1} + \vec{p}_{T_2} = \vec{0}$$



Διατήρηση ορμής στο εγκάρσιο (x-y) επίπεδο

$$\vec{p}_T = (p_x, p_y)$$

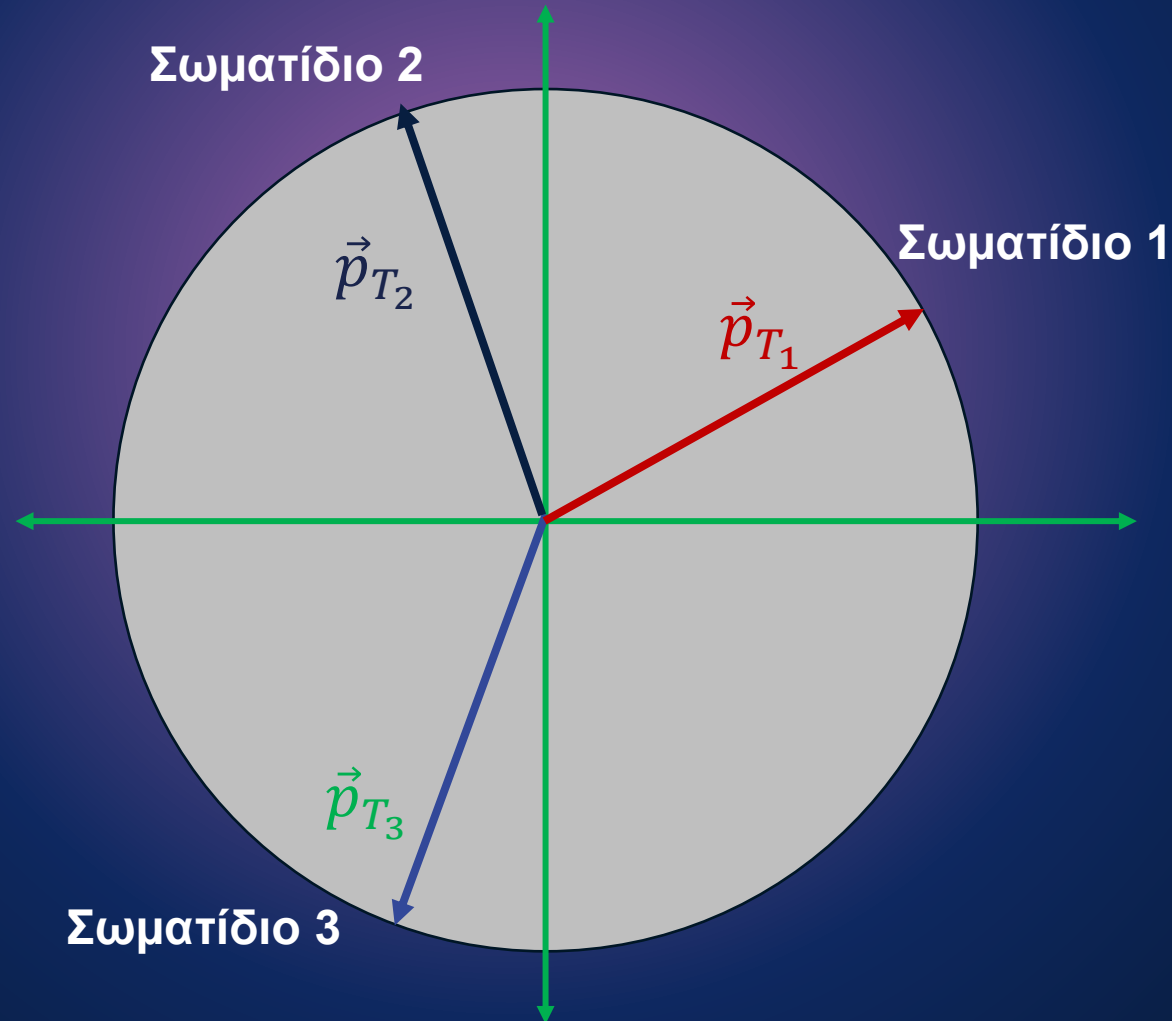
$$\vec{p}_{T_1} = -\vec{p}_{T_2}$$



Διατήρηση ορμής στο εγκάρσιο (x-y) επίπεδο

$$\vec{p}_T = (p_x, p_y)$$

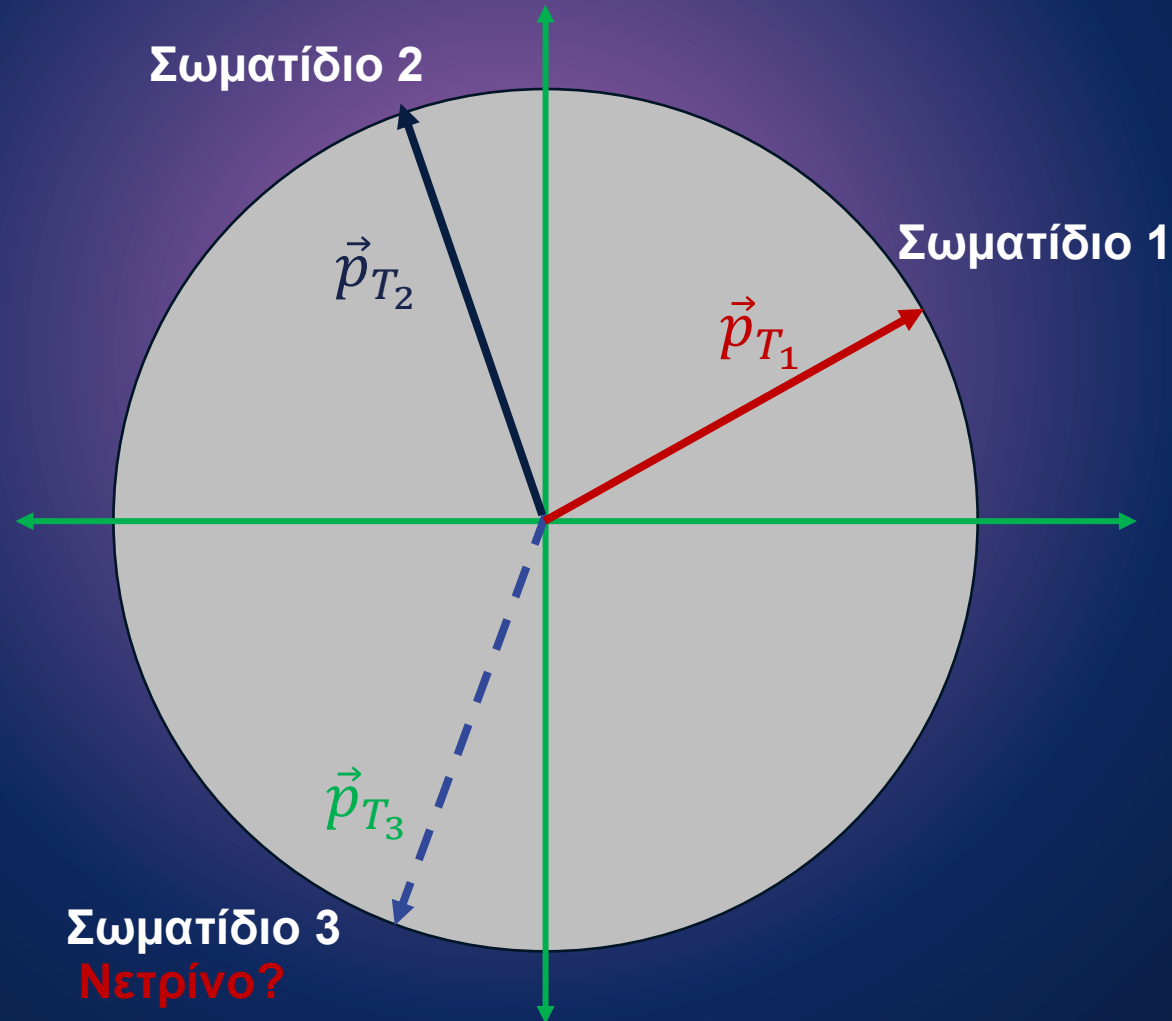
$$\vec{p}_{T_1} + \vec{p}_{T_2} + \vec{p}_{T_3} = \vec{0}$$



Διατήρηση ορμής στο εγκάρσιο (x-y) επίπεδο

$$\vec{p}_T = (p_x, p_y)$$

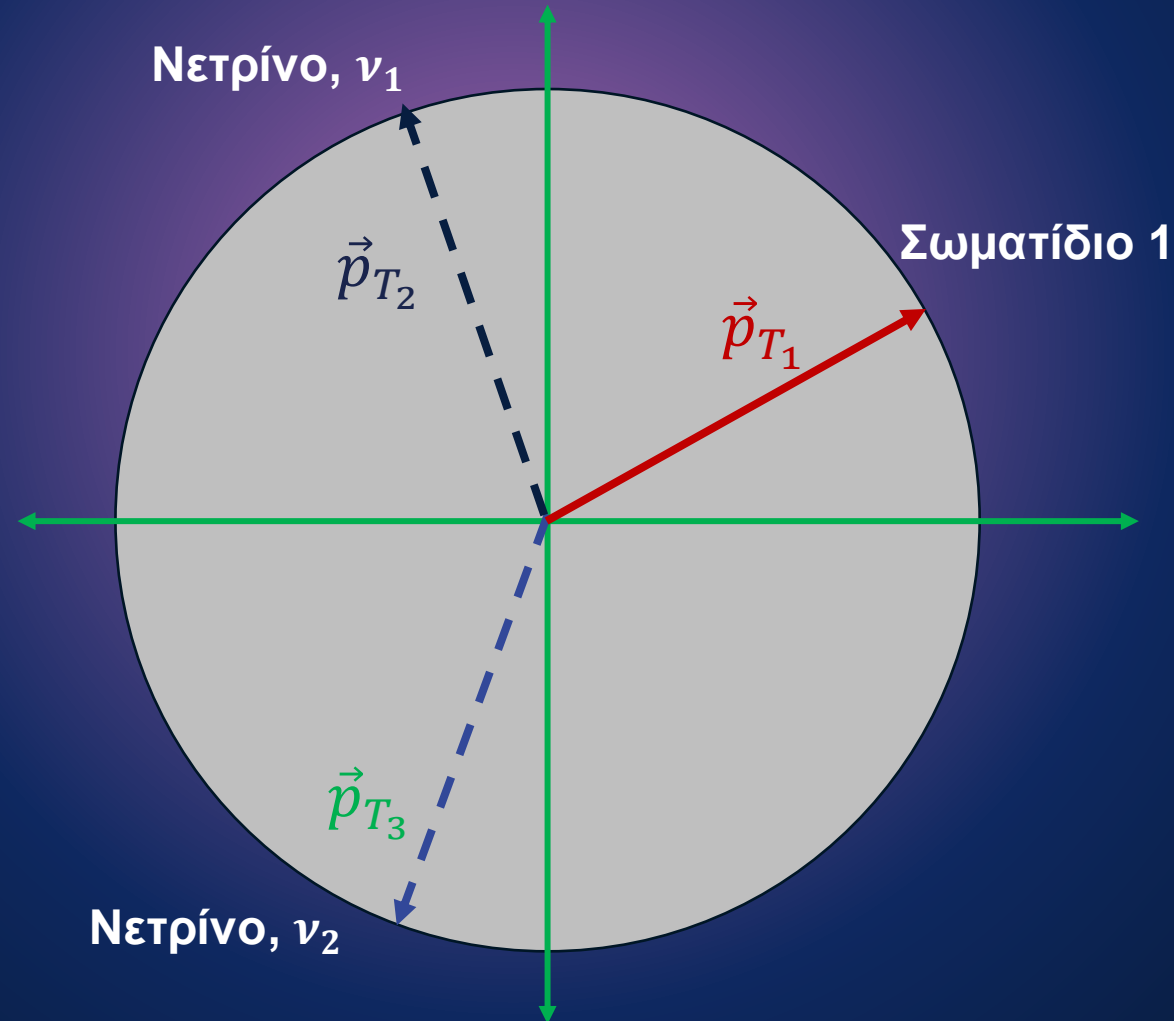
$$\vec{p}_{T_1} + \vec{p}_{T_2} = -\vec{p}_{T_3}$$



Διατήρηση ορμής στο εγκάρσιο (x-y) επίπεδο

$$\vec{p}_T = (p_x, p_y)$$

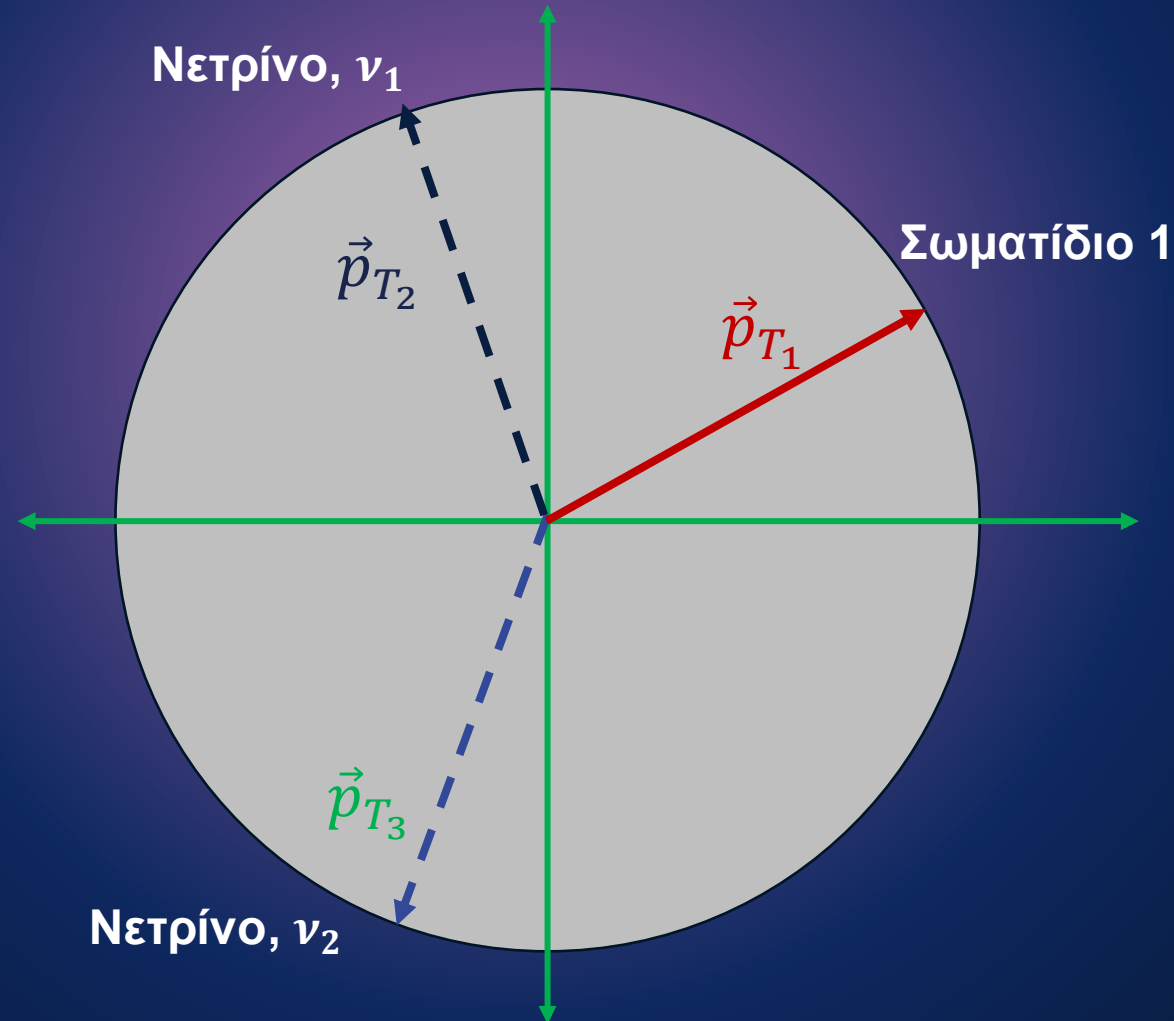
$$\vec{p}_{T_1} = -(\vec{p}_{T_2} + \vec{p}_{T_3})$$



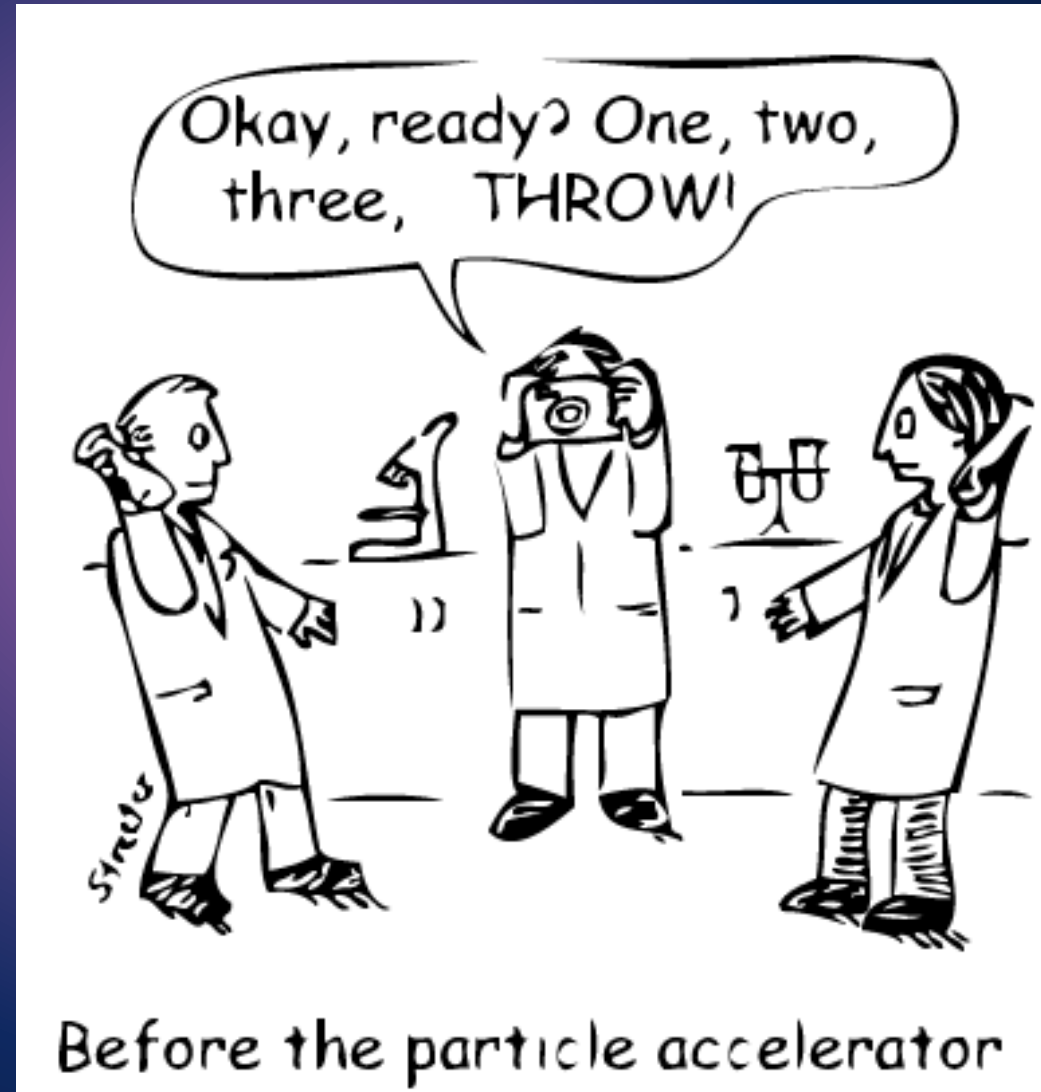
Διατήρηση ορμής στο εγκάρσιο (x-y) επίπεδο

$$\vec{p}_T = (p_x, p_y)$$

$$\vec{p}_{T_1} = -(\vec{p}_{T_2} + \vec{p}_{T_3})$$

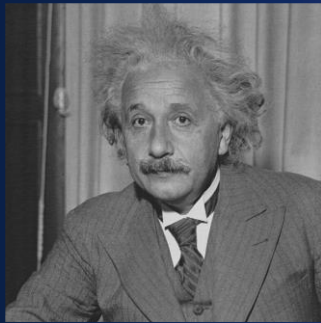


Δεν ασχολούμαστε μόνο με
συγκρούσεις σωματιδίων....



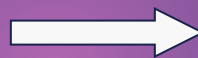
Το CERN, τα σωματίδια, οι επιταχυντές και οι ανιχνευτές σχετίζονται με την καθημερινή ζωή

Η θεμελιώδης έρευνα πάντα είναι ο οδηγός για καινοτομίες

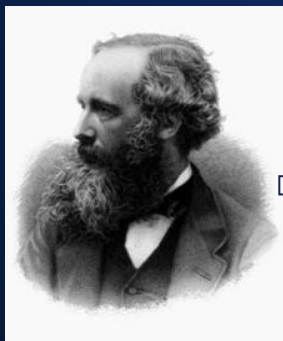


Σχετικότητα

100%
SCIENCE



For GPS to work, we have to take into account the correction due to time dilation. Otherwise, there would be a position error of around 10m after just 5 minutes of travel-time!



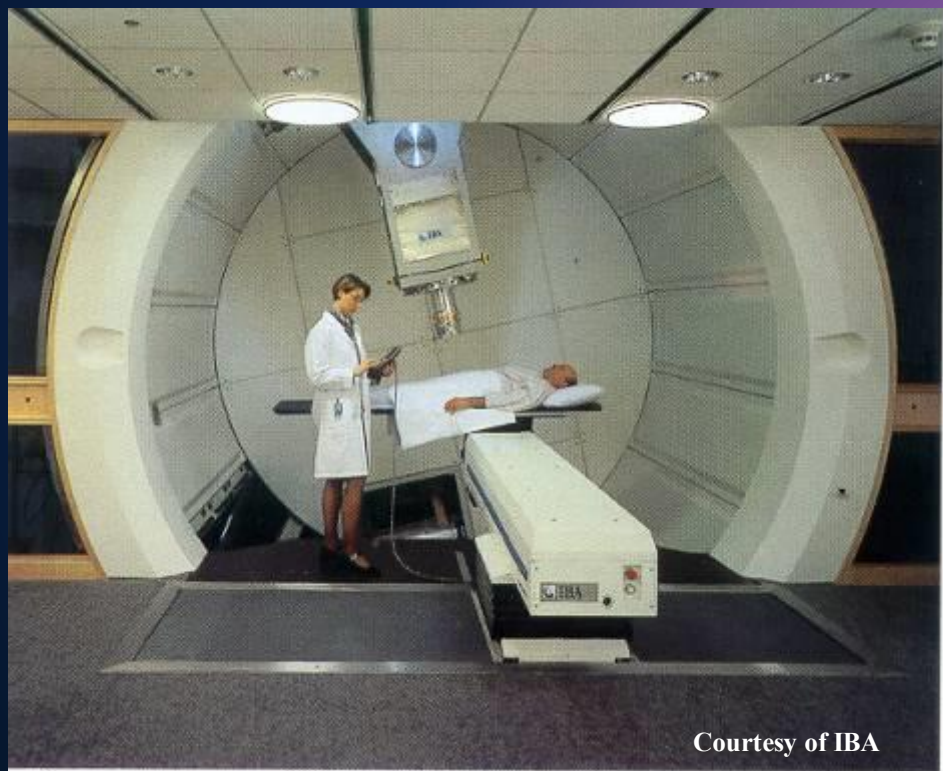
Ηλεκτρομαγνητισμός

100%
SCIENCE



Telephones use electromagnetic waves to communicate

Επιταχυντές: αναπτύχθηκαν σε εργαστήρια φυσικής και χρησιμοποιούνται σε νοσοκομεία



Courtesy of IBA

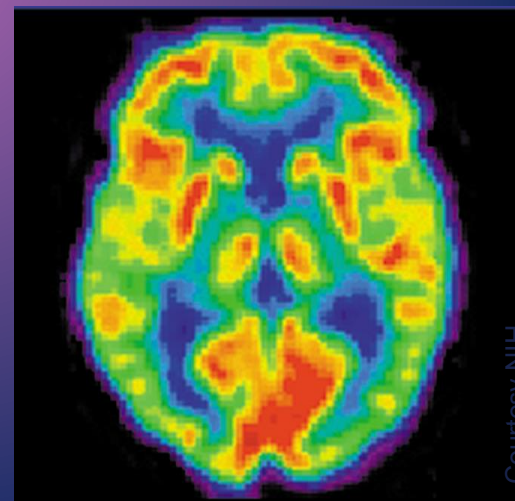
Περίπου 9000 από τους 17000 επιταχυντές σε λειτουργία χρησιμοποιούνται στην ιατρική

Η θεραπεία με αδρόνια χρησιμοποιείται για καταπολέμηση καρκίνου

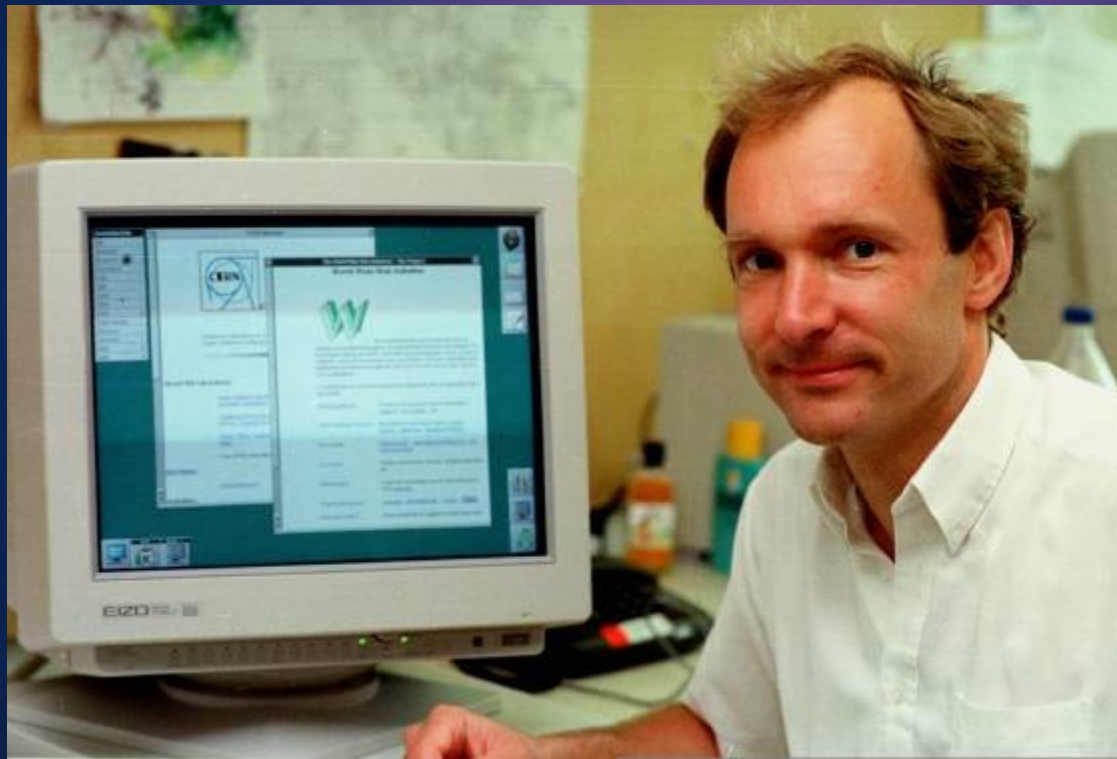
Ανιχνευτές: αναπτύχθηκαν σε εργαστήρια και χρησιμοποιούνται σε ιατρικές απεικονίσεις



PET (Positron Emission Tomography) χρησιμοποιεί αντιύλη (positrons).



Άλλα ενδιαφέροντα ... **WWW**
35 years old! (1989)



Tim John Berner-Lee

Puzzle της σωματιδιακής φυσικής..



Είναι ακόμα ασυμπλήρωτο...

Ελπίζω κάποιοι/κάποιες από σας να βοηθήσουν να συμπληρωθεί!!