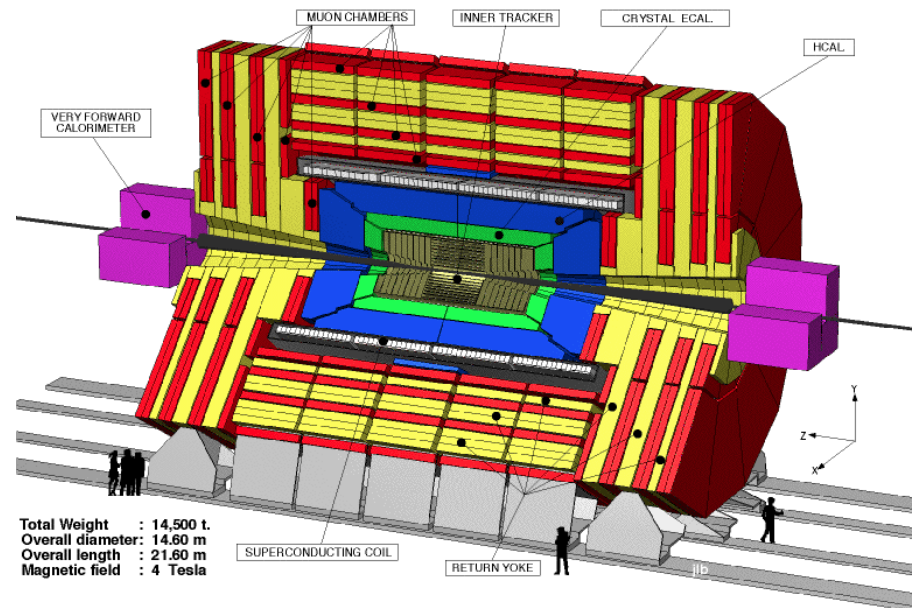
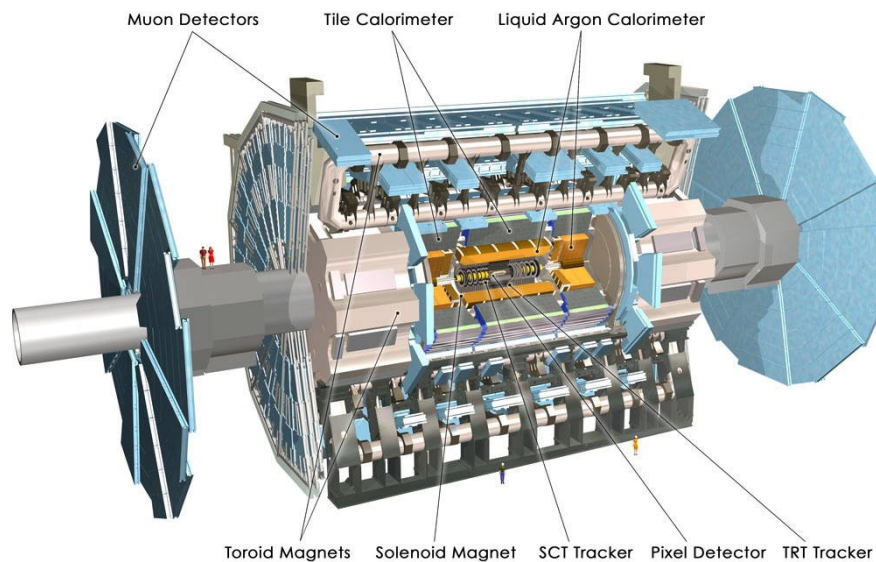


Αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με την ύλη και Ανιχνευτές σωματιδίων



Αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με ύλη

❑ Φορτισμένα σωματίδια

- Απώλειες ενέργειας λόγω ιονισμού
- Ηλεκτρομαγνητικές καταιγίδες
- Αδρονικές καταιγίδες
- Πολλαπλή σκέδαση Coulomb
- Ακτινοβολία Cherenkov

❑ Ουδέτερα σωματίδια

- Φωτόνια
- Αδρόνια

Πειράματα: Σχεδιασμός στοιχείων ανιχνευτών

■ Τα περισσότερα πειράματα συνδυάζουν διάφορες τεχνολογίες ανιχνευτών

➤ Ανάδειξη διαφορετικού τρόπου μέτρησης

■ Η γεωμετρία του ανιχνευτή προσδιορίζεται από το είδος της δέσμης:

➤ Συγκρουόμενες δέσμες, σταθερού στόχου, πειράματα μη επιταχυντών

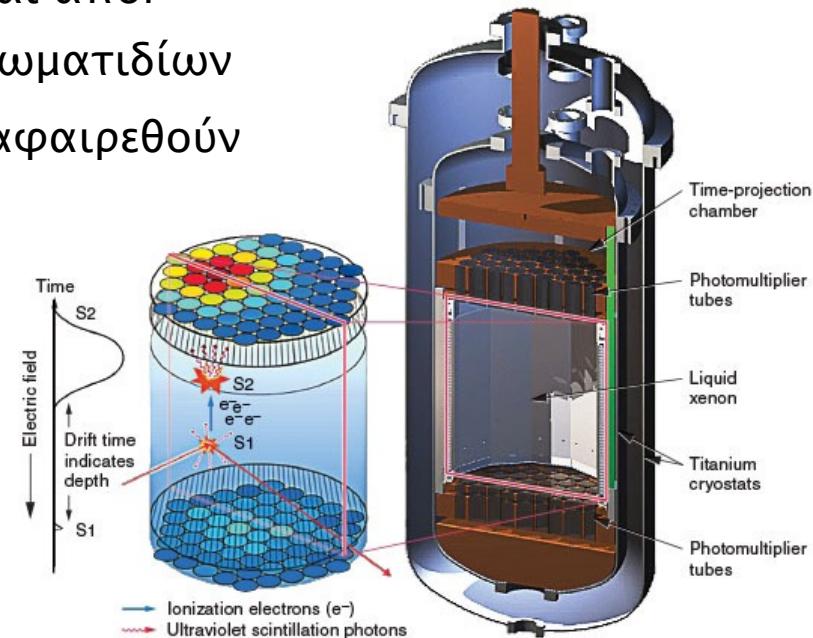
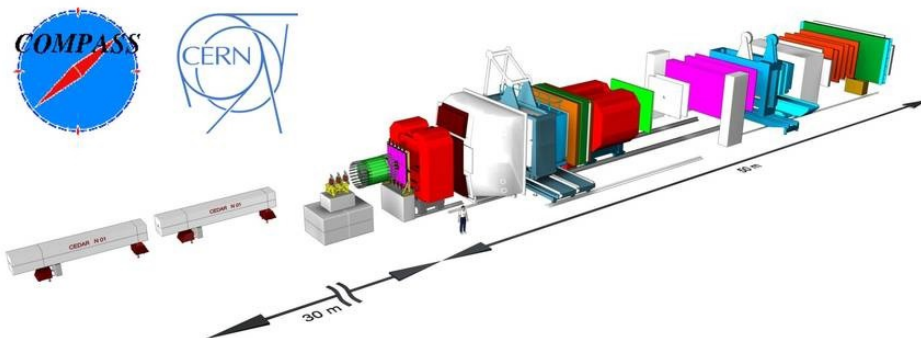
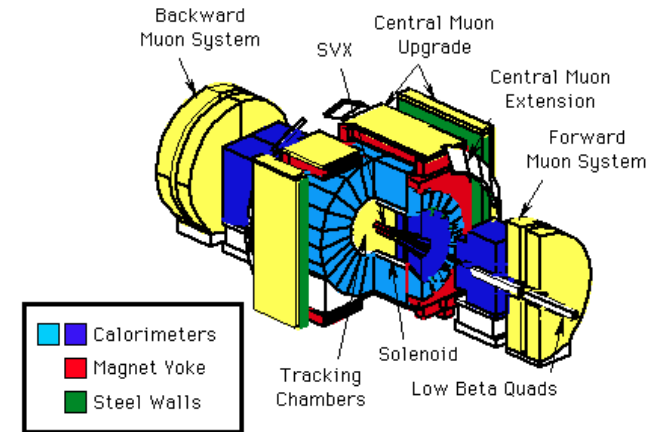
■ Ο βαθμός λεπτομέρειας του ανιχνευτή (**granularity**) προσδιορίζεται από τον αριθμό των σωματιδίων που αναμένονται για κάθε γεγονός

■ Η απαιτούμενη διακριτική ικανότητα εξαρτάται από:

➤ Την ορμή και ενέργεια των παραγόμενων σωματιδίων

➤ Τις διεργασίες υποβάθρου που πρέπει να αφαιρεθούν

CDF Detector



Ταξινόμηση των ανιχνευτών σωματιδίων: Τι μετράμε

❑ Φορτισμένα σωματίδια:

- **Ορμή:** προσδιορισμός της τροχιάς σε μαγνητικό πεδίο
- **Μάζα:** πολύπλοκος ο προσδιορισμός
 - ✧ απαιτεί προσδιορισμό της ταχύτητας και ορμής
- **Ενέργεια:** εναπόθεση όταν σταματά στον ανιχνευτή
 - ✧ απώλειες ενέργειας λόγω ιονισμού

Ανιχνευτές τροχιών

❑ Ισχυρά αλληλεπιδρόντα ουδέτερα σωματίδια:

- **Ενέργεια:** εναπόθεση όταν σταματά στον ανιχνευτή
 - ✧ απώλειες ενέργειας λόγω πυρηνικών αλληλεπιδράσεων

Καλορίμετρα

❑ Φωτόνια:

- **Ενέργεια:** δίδυμη γέννεση ακολουθούμενη από ιονισμό

❑ Μιόνια:

- **Ορμή:** όπως και για τα άλλα φορτισμένα σωματίδια
- **Δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας λόγω πυρηνικών αλληλεπιδράσεων ή bremsstrahlung ακτινοβολίας (ως προς ηλεκτρόνια)**
 - ✧ Χρειάζεται πολύ υλικό για να σταματήσουν

❑ Νεutrίνο:

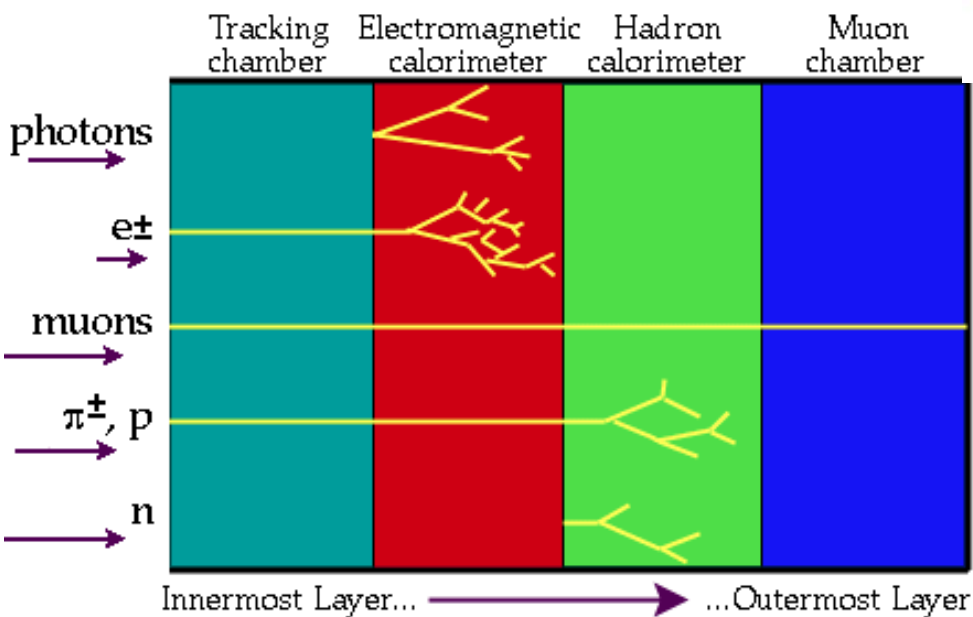
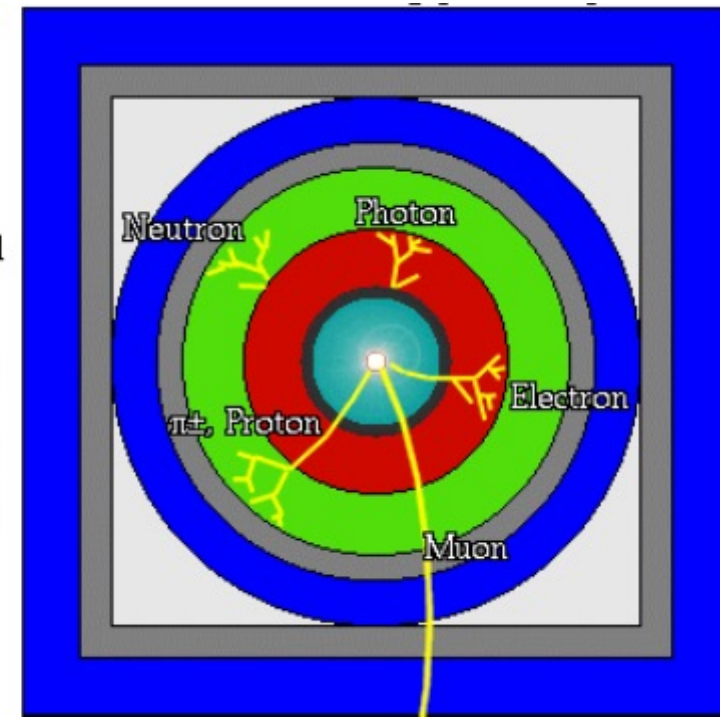
- Συχνά ανιχνεύονται από την ... απουσία τους (ελλειματικό ισοζύγιο ορμής)
- Ασθενείς αλληλεπιδράσεις με τους πυρήνες ($\nu N \rightarrow N\mu X$)

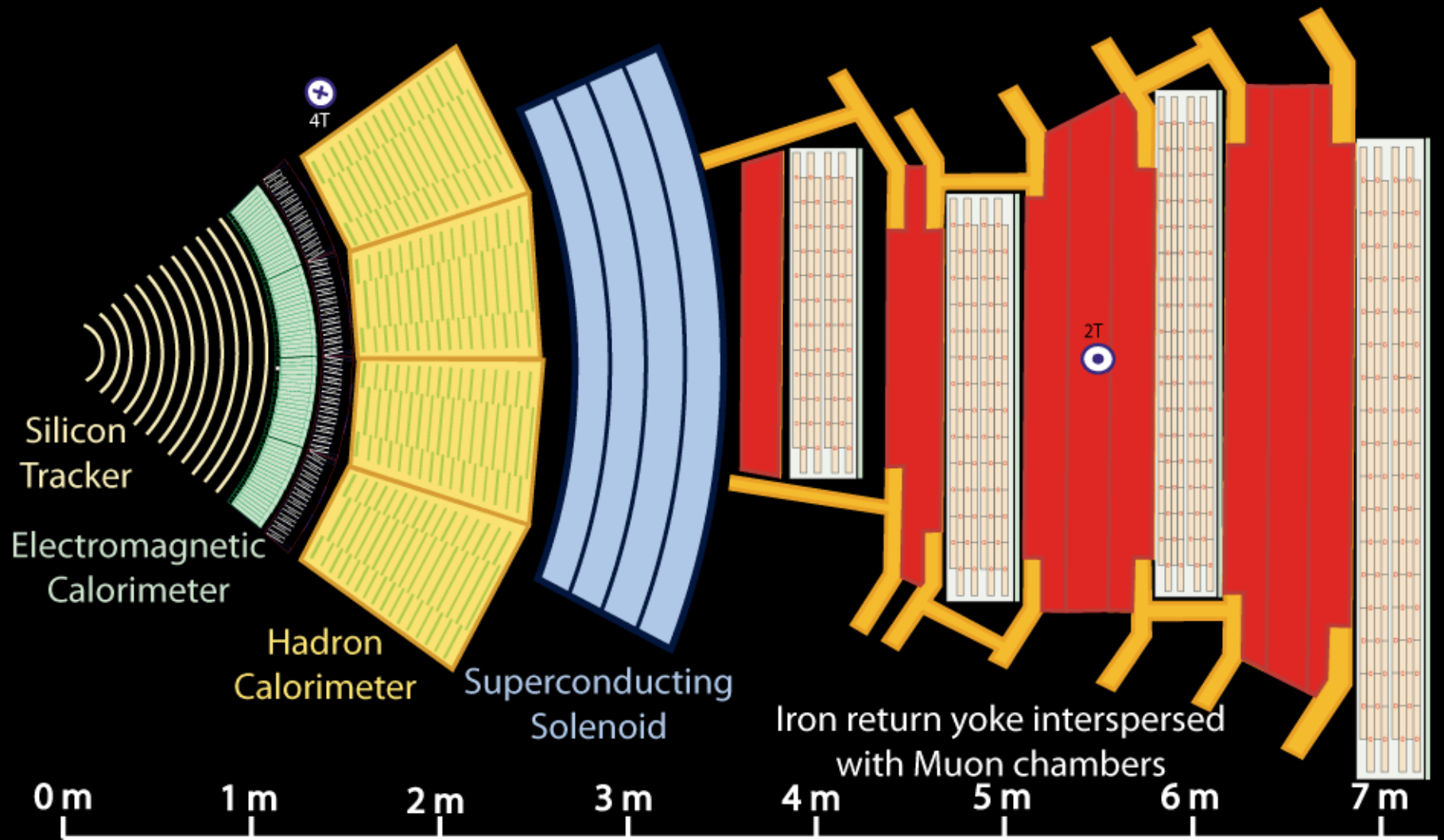
Ανατομία ενός ανιχνευτή



- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

Εγκάρσια τομή ενός ανιχνευτή





Key:

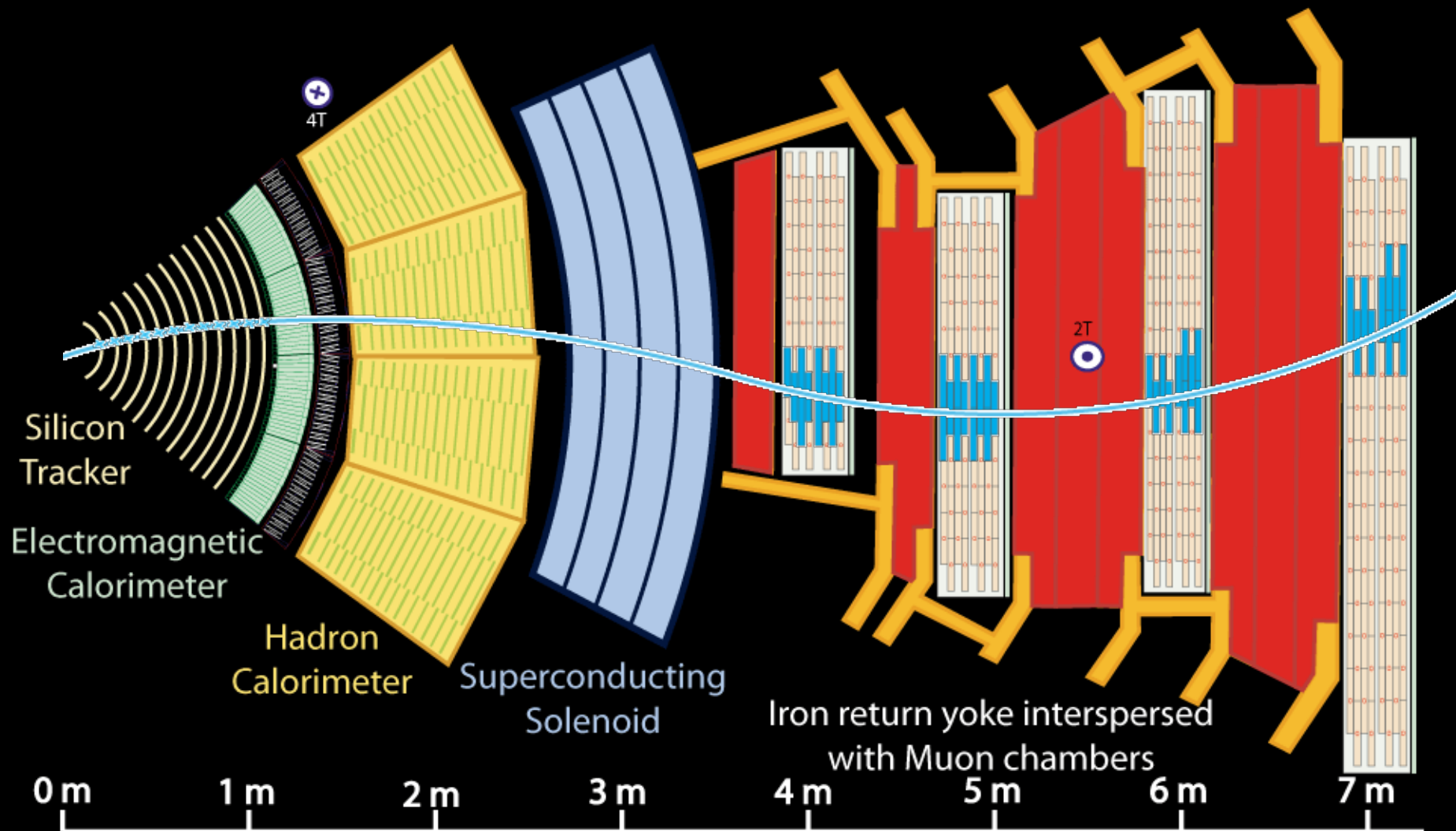
— Muon

— Electron




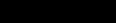
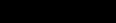
— Charged Hadron (e.g. Pion)

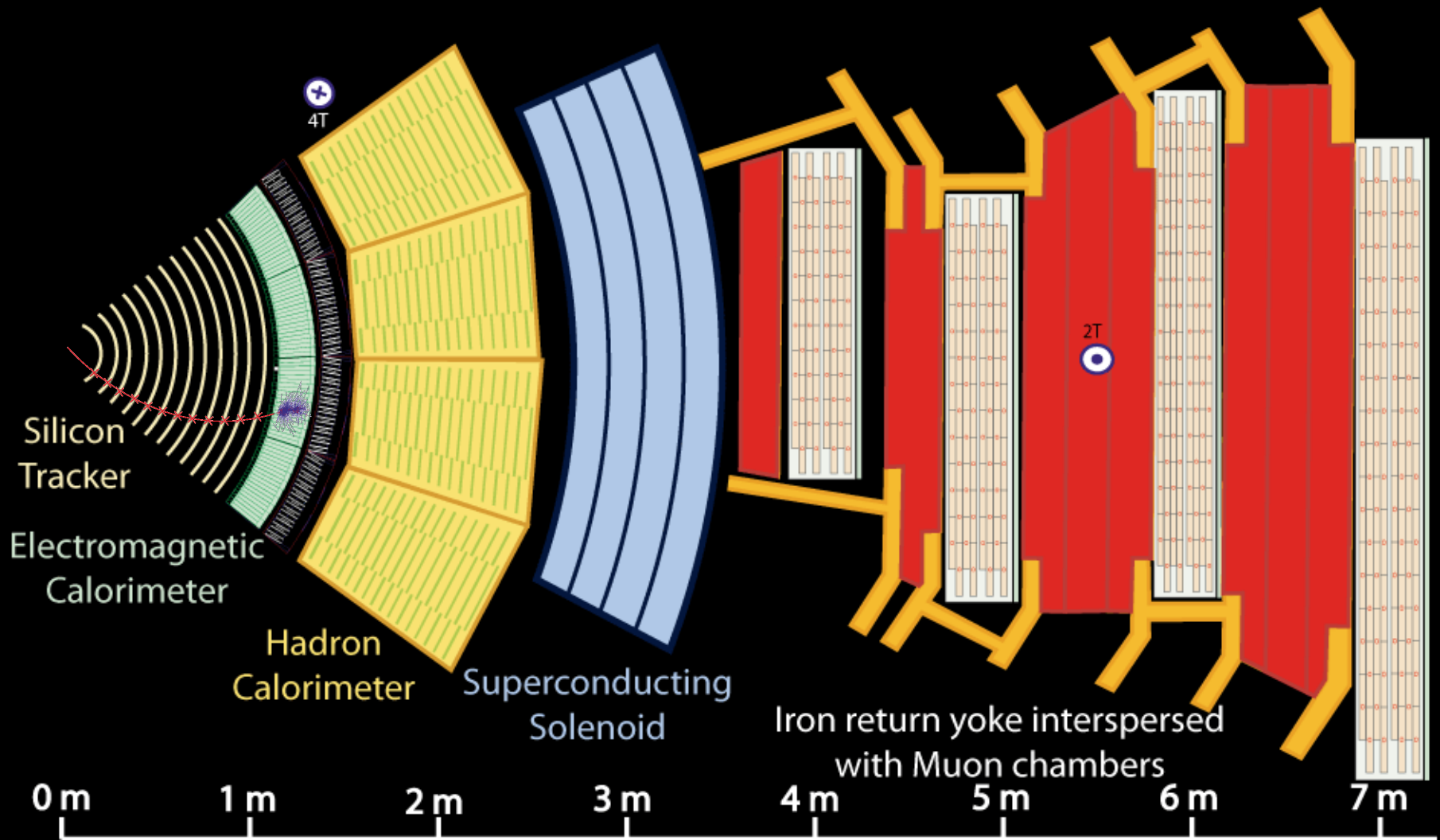
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

- | | | |
|--|--|---|
|  Muon |  Electron |  Charged Hadron (e.g. Pion) |
|  Neutral Hadron (e.g. Neutron) |  Photon | |



Key:

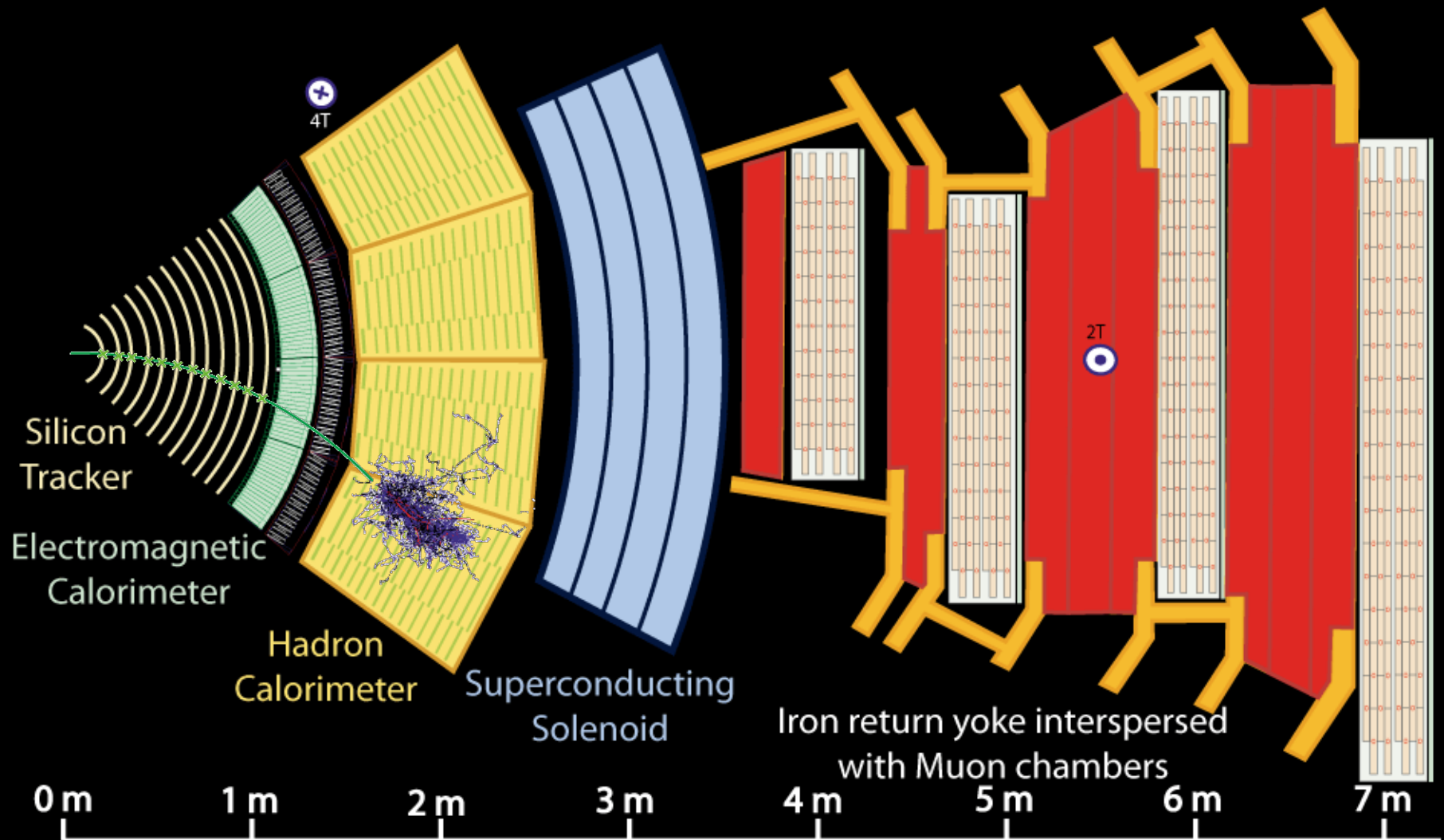
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

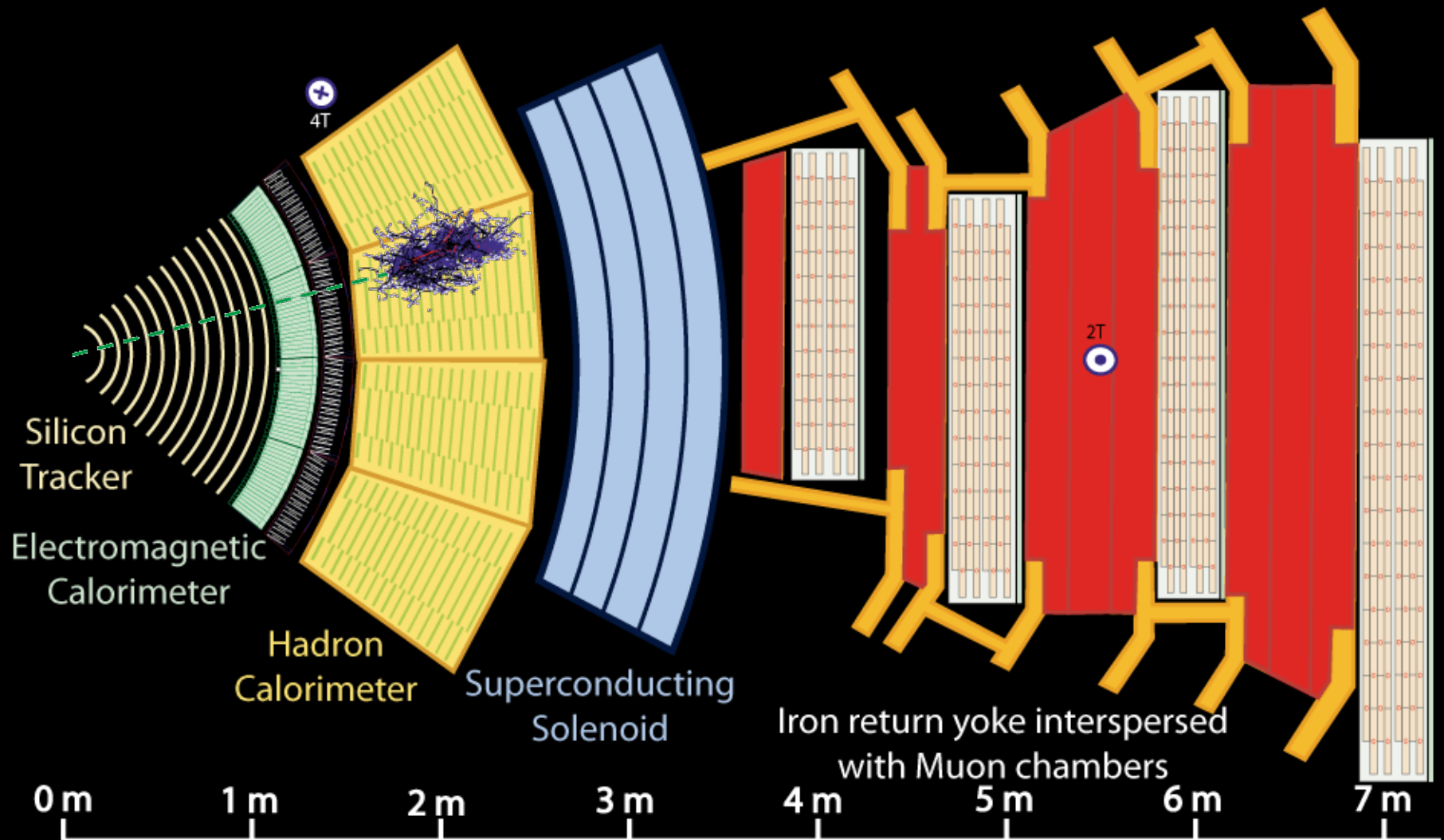
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

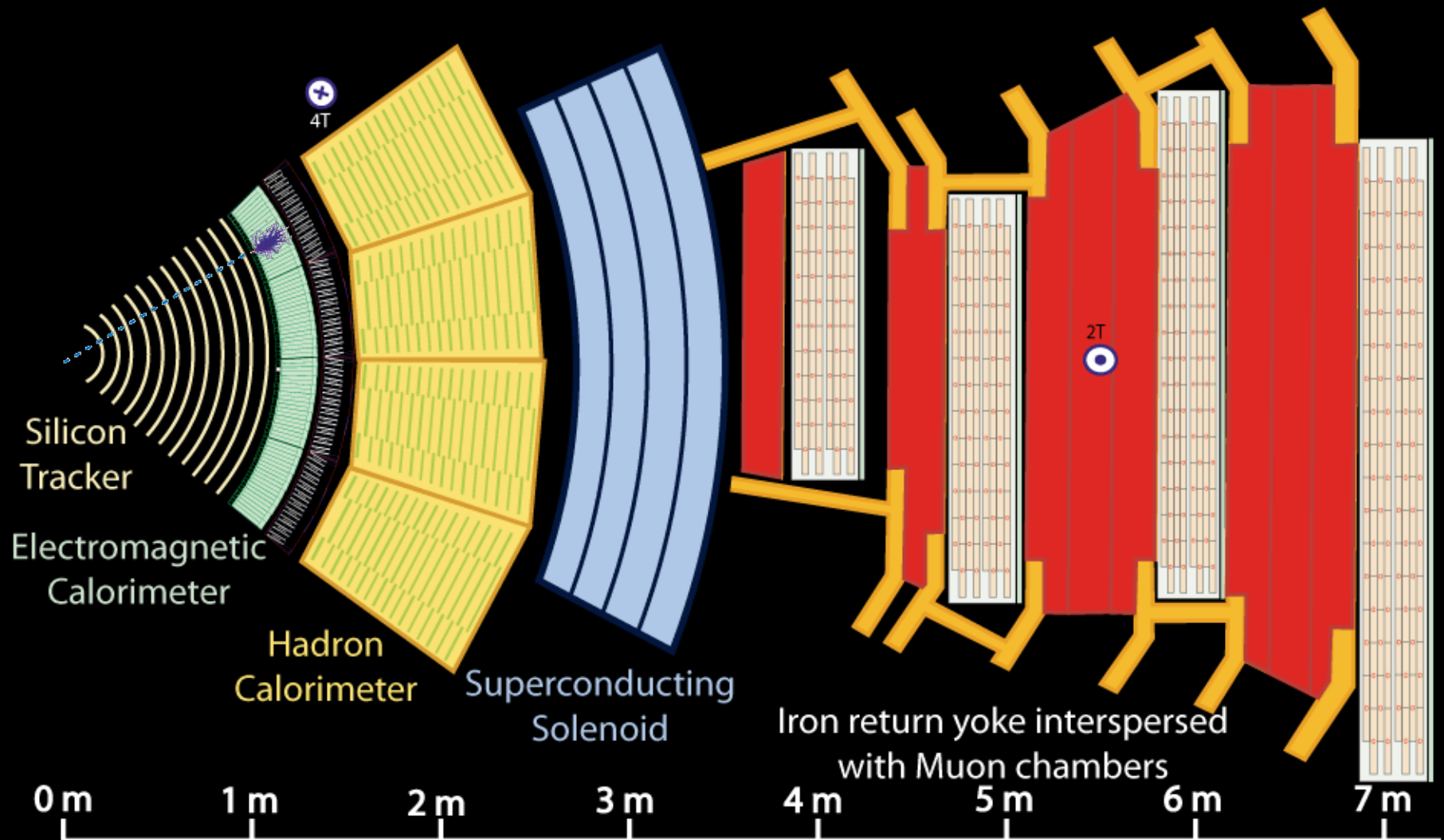
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

Αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με την ύλη

- ❑ Πέρα από τα αδρονικά καλορίμετρα όπου οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων με το υλικό του ανιχνευτή είναι κυρίως πυρηνικής φύσης, και τους ανιχνευτές νετρίνο, ο κύριος τρόπος ανίχνευσης σωματιδίων στηρίζεται στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις
 - Ακόμα και για τις εξαιρέσεις, η ανίχνευση των δευτερογενών προϊόντων στηρίζεται στις EM αλληλεπιδράσεις
- ❑ Φορτισμένα σωματίδια αφήνουν τροχιά ιονισμού
 - Η ποσότητα ιονισμού εξαρτάται από την ορμή του σωματιδίου
 - Η ολική ενέργεια που εναποτίθεται όταν ένα σωματίδιο σταματά σε έναν ανιχνευτή μετράται από τον αριθμό των σωματιδίων ιονισμού που προκλήθηκαν στην καταιγίδα ιονισμού που προκάλεσε το σωματίδιο
- ❑ Στατιστική περιγραφή της απώλειας ενέργειας λόγω ιονισμού

Πειραματικά σταθερά σωματίδια

□ Σωματίδια που είναι απολύτως σταθερά (δεν διασπώνται) είναι τα:

- ηλεκτρόνια, τα νεutrίνο, και τα πρωτόνια (και τα αντισωματίδιά τους)
- ελεύθερα νεutrίνα έχουν χρόνο ζωής $\tau = 881.5\text{sec} \sim 15\text{min}$

✧ Διαφορές στην ενέργεια Fermi σε δέσμιες καταστάσεις πυρήνων έχει σαν αποτέλεσμα την σταθεροποίηση των νεutróniων:

- ✓ π.χ στο δευτέριο (ισότοπο του H) το νεutrónιο είναι σταθερό γιατί η μάζα του δευτερίου είναι 1875.6MeV ενώ αν το νεutrónιο διασπώνταν σε p e και ν , η μάζα του συστήματος θα ήταν $p+p+e = 1877.5\text{MeV}$. Επομένως η αντίδραση δεν μπορεί να προχωρήσει
- ✓ Σταθερότητα του δευτερίου σημαντική για το πως είναι σήμερα το σύμπαν

- Τα μίονια έχουν χρόνο ζωής $\tau = 2.197 \mu\text{s}$ ($c\tau = 658.6\text{m}$)
- Τα φορτισμένα πιόνια έχουν χρόνο ζωής $\tau = 26.03 \text{ ns}$ ($c\tau = 7.805\text{m}$)
- Τα φορτισμένα καόνια έχουν χρόνο ζωής $\tau = 12.38 \text{ ns}$ ($c\tau = 3.712\text{m}$)
- Τα K_L^0 έχουν χρόνο ζωής $\tau = 51.16 \text{ ns}$ ($c\tau = 15.34\text{m}$)
- Τα K_S^0 έχουν χρόνο ζωής $\tau = 0.089 \text{ ns}$ ($c\tau = 2.68 \text{ cm}$)
- Τα π^0 έχουν χρόνο ζωής $\tau = 8.5 \times 10^{-17}\text{s}$ ($c\tau = 25.2 \text{ nm}$)
- Τα Λ^0 έχουν χρόνο ζωής $\tau = 0.263\text{ns}$ ($c\tau = 7.89 \text{ cm}$)

Μήκος διάσπασης με σχετικότητα

- ❑ Το μήκος διάσπασης είναι η απόσταση που διανύουν τα σωματίδια μέχρι να διασπαστούν και εξαρτάται από την ταχύτητα του σωματιδίου και το χρόνο ζωής
- ❑ Ο χρόνος ζωής μετράται στο σύστημα αναφοράς του σωματιδίου

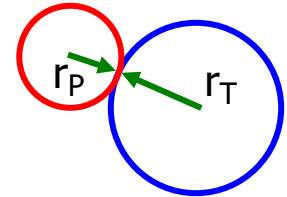
➤ Στο σύστημα του εργαστηρίου ο χρόνος αυτός μετράται μεγαλύτερος λόγω διαστολής και το σωματίδιο επομένως ζει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα

$$\lambda = vt_{LAB} = (\beta c)(\gamma \tau_{\text{σωμ.}}) = \beta c \gamma \tau_{\text{σωμ.}} \quad \text{εφόσον } p = \beta \gamma mc \quad \text{έχουμε: } \lambda = \frac{p}{mc} c \tau$$

- ❑ Ένα σωματίδιο με ορμή $p=mc$ (70.7% της c) θα διανύσει μέση απόσταση ίση με $c\tau$ πριν διασπαστεί.
- ❑ Αν η ορμή του είναι 10 φορές μεγαλύτερη τότε και η απόσταση που θα διανύσει πριν διασπαστεί θα είναι 10 φορές μεγαλύτερη

Υπενθύμιση: Ιδέα Ενεργού διατομής

- ❑ Φανταστείτε μια δέσμη σωματιδίων που μπορούν να προσεγγιστούν σα σφαίρες ακτίνας r_p που προσπίπτουν σε ένα στόχο από σωματίδιο ακτίνας r_t .
- ❑ Φανταστείτε ότι η σκέδαση είναι ανιχνεύσιμη αν οι σφαίρες των προσπίπτοντων σωματιδίων και του σωματιδίου του στόχου εφάπτονται ενώ τίποτα άλλο δεν συμβαίνει σε διαφορετική περίπτωση. Έτσι αν το κέντρο της σφαίρας ενός σωματιδίου της δέσμης βρίσκεται σε απόσταση $r_p + r_t$ από το σωματίδιο του στόχου, δηλαδή σε μια επιφάνεια $\sigma = \pi \times (r_p + r_t)^2$ τότε μπορεί να ανιχνευθεί



- ❑ Αν η δέσμη αποτελείται από N_δ σωματίδια τα οποία κατανέμονται τυχαία σε μια επιφάνεια A , και προσπίπτουν σε στόχο που έχει ένα μόνο σωματίδιο τότε ο αριθμός των σκεδάσεων N_D που θα μετρηθούν θα είναι:

$$N_D = N_\delta \sigma / A \Rightarrow \sigma = \frac{N_D A}{N_\delta} \quad \text{που μας δίνει πληροφορία σχετικά με το μέγεθος των σωματιδίων}$$

- ❑ Αν ο στόχος αποτελείται από N_T σωματίδια, μέσα σε μια επιφάνεια A , τότε η πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν με ένα σωματίδιο της δέσμης είναι $\sigma N_T / A$

➤ Για N_δ σωματίδια στη δέσμη τα οποία προσπίπτουν στο στόχο, ο αριθμός των σωματιδίων που θα σκεδαστούν θα είναι: $N_D = N_\delta (\sigma N_T / A)$

- ❑ Αν ο στόχος έχει πάχος T και όγκο $V = A T$, τότε η πυκνότητα των σωματιδίων του στόχου είναι $\rho_T = N_T / V = N_T / (A T) \Rightarrow T \rho_T = N_T / A$

- ❑ Ο αριθμός των σωματιδίων που σκεδάζονται θα είναι: $N_D = N_\delta \sigma \rho_T T$

- ❑ και επομένως η ενεργός διατομή σκέδασης θα είναι: $\sigma = N_D / (N_\delta \rho_T T)$

Η έννοια της ενεργού διατομής

- ❑ Η ενεργός διατομή μπορεί να εξαρτάται από τις ιδιότητες και των δυο σωματιδίων που συγκρούονται. Μπορεί να εξαρτάται από την ενέργεια/ορμή
- ❑ Αν ένα σωματίδιο έχει φυσικές διαστάσεις και η αλληλεπίδραση είναι πολύ ισχυρή ώστε το σωματίδιο μοιάζει «αδιαπέραστο», η ενεργός διατομή είναι περίπου η φυσική επιφάνεια του σωματιδίου
- ❑ Αν η αλληλεπίδραση είναι σχετικά ασθενής τότε η ενεργός διατομή μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από την φυσική επιφάνεια του σωματιδίου
- ❑ Το κβαντικό μήκος κύματος των σωματιδίων είναι επίσης σημαντικό
 - Για σωματίδια τα οποία είναι «σημειακά», οι ενεργές διατομές τείνουν να είναι ανάλογες του τετραγώνου του μήκους κύματος.
 - Καθώς η ορμή του σωματιδίου αυξάνει και επομένως το μήκος κύματος του σωματιδίου ελαττώνεται, η ενεργός διατομή ελαττώνεται πολύ γρήγορα

Επιταχυντής συγκρουόμενων δεσμών

- ❑ Στους επιταχυντές αυτούς, ο στόχος είναι η άλλη δέσμη και συνήθως τα σωματίδια και στις δυο δέσμες είναι σε μορφή πακέτων και οι σκεδάσεις συμβαίνουν σε συγκεκριμένες περιοχές
- ❑ Αν υπάρχουν N_T σωματίδια στην δέσμη του «στόχου» επιφάνειας A και N_δ σωματίδια στην δέσμη των «προσπίπτοντων» σωματιδίων που περνούν την ίδια επιφάνεια A , και η ενεργός διατομή είναι σ , τότε ο αριθμός των σκεδαζόμενων σωματιδίων σε κάθε πέρασμα πακέτων δέσμης από την περιοχή σκέδασης είναι:

$$N_D = N_\delta \sigma N_T / A$$

- ❑ Αν η διέλευση των πακέτων των δεσμών γίνεται με συχνότητα f το δευτερόλεπτο, ο αριθμός των σκεδαζόμενων σωματιδίων/sec είναι:

$$N_D / \text{sec} = \sigma f N_\delta N_T / A$$
- ❑ Ο ρυθμός των γεγονότων είναι: $N_D / \text{sec} = \sigma L$ όπου L η φωτεινότητα της δέσμης
 - Όπως έχουμε δει, η φωτεινότητα της δέσμης ορίζεται: $L = \frac{N_1 N_2}{A} f \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- ❑ Συνήθως οι πυκνότητες σωματιδίων της δέσμης είναι Gaussian και ελλειπτικές παρά συγκεκριμένης επιφάνειας, το μέγεθος των δυο δεσμών δεν είναι απαραίτητα το ίδιο και δεν είναι απαραίτητα κεντραρισμένες μεταξύ τους
- ❑ Στην πράξη, η φωτεινότητα μετράται, χρησιμοποιώντας γεγονότα σκέδασης μιας διεργασίας αναφοράς με ενεργό διατομή σ , που είτε υπολογίζεται θεωρητικά ή μετράται με ακρίβεια σε κάποιον άλλο επιταχυντή ή συγκεκριμένο τρόπο