

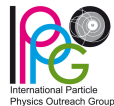
Επιταχυντές και Ανιχνευτές

International Masterclasses

Δρ. Α. Απίκης¹

¹Πανεπιστήμιο Κύπρου

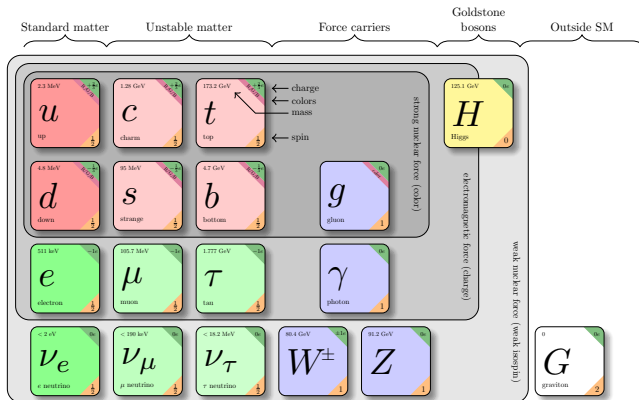
19/03/2024



ΕΙΣΑΓΩΓΗ Το Καθιερωμένο Πρότυπο

Το Καθιερωμένο Πρότυπο περιγράφει το σύμπαν από περίπου 10^{-32} s μέχρι και σήμερα:

- ▶ 12 στοιχειώδη σωματίδια (κουάρκς & λεπτόνια)
- ▶ Αλληλεπιδράσεις σωματιδίων μέσω 3 θεμελιωδών δυνάμεων

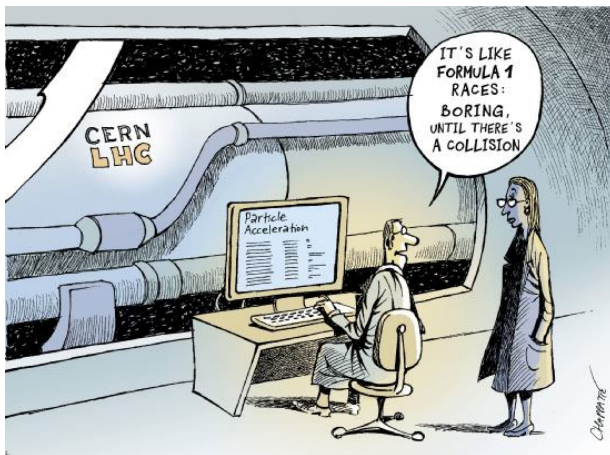


Δύναμη	Σχετική Ισχύς	Εμβέλεια (m)	Σωματίο Αλληλεπίδρασης
Ισχυρή Πυρηνική	1	10^{-15}	Γκλουόνιο (g)
Ηλεκτρομαγνητική	$\frac{1}{137}$	∞	Φωτόνιο (γ)
Ασθενής Πυρηνική	10^{-6}	10^{-18}	W^\pm, Z^0
Βαρύτητα	6×10^{-38}	∞	Βαρυτόνιο ($;$)

Η ιστορία δεν έχει τελειώσει ακόμα όμως αφού :

- ▶ Σημαντικοί λόγοι για να πιστεύουμε στην νέας Φυσικής (π.χ. Υπερσυμμετρία)
- ▶ Οι έρευνες επικεντρώνονται στο Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC)

Τι είναι όμως ένας επιταχυντής; Πως λειτουργεί;



Οι επιταχυντές είναι εργαλεία της σωματιδιακής φυσικής :

- ▶ Επιταχύνουν & συγκρούουν σωματίδια σε πολύ υψηλές ενέργειες
- ▶ Χρήση με ανιχνευτές για μελέτη την ύλης σε μικρές διαστάσεις

Δέσμη σωματιδίων

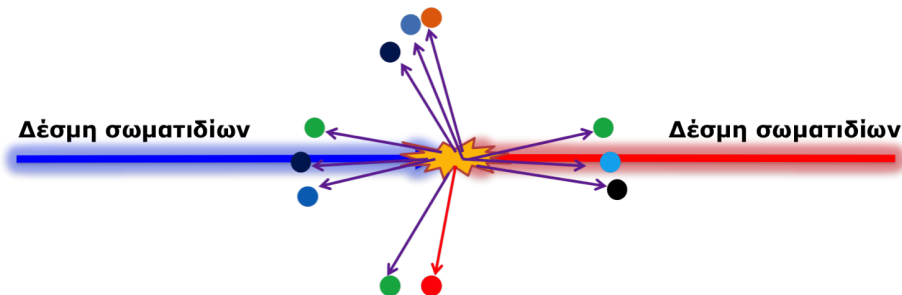


Δέσμη σωματιδίων



Οι επιταχυντές είναι εργαλεία της σωματιδιακής φυσικής :

- ▶ Επιταχύνουν & συγκρούουν σωματίδια σε πολύ υψηλές ενέργειες
- ▶ Χρήση με ανιχνευτές για μελέτη την ύλης σε μικρές διαστάσεις



Πως επιταχύνονται τα σωματίδια; Η βασική ιδέα στηρίζεται στην ηλεκτρική δύναμη

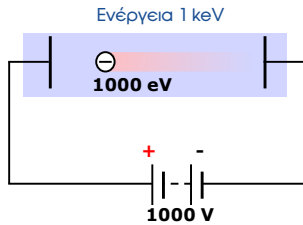
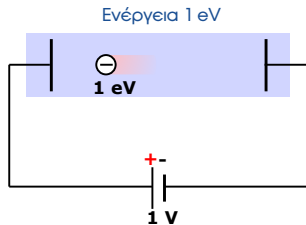
ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ Επιτάχυνση Σωματιδίων

Η δύναμη \vec{F} που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο q μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} :

Ηλεκτρική Δύναμη

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Η δύναμη είναι **παράλληλη** με το ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E} \Rightarrow$ παράγει μηχανικό έργο



Για γραμμικούς επιταχυντές :

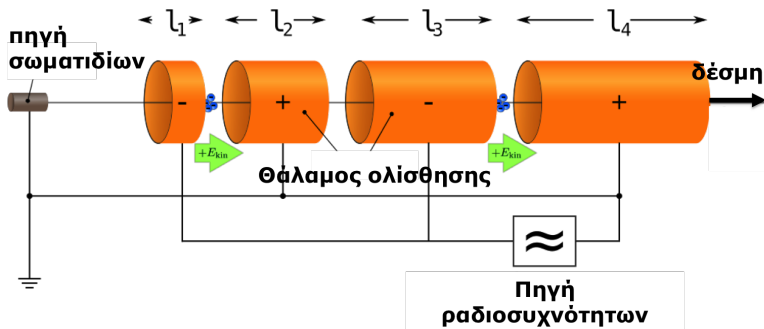
- Χρειαζόμαστε πολύ μεγάλες τιμές πεδίου (1MV για 1 MeV!)

Για κυκλικούς επιταχυντές :

- Η επιτάχυνση είναι αδύνατη για **σταθερό** πεδίο αφού $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$

\Rightarrow Ανάγκη για χρήση επιταχυντών με μεταβαλλόμενο πεδίο

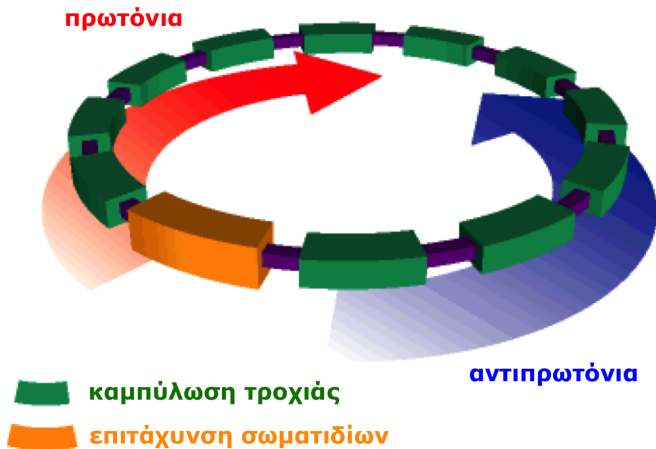
Το μεταβαλλόμενο πεδίο επιτυγχάνεται με τη χρήση AC δυναμικού:



- ▶ Πολλά στάδια επιτάχυνσης σε γραμμική διάταξη
- ▶ Οι κοιλότητες διαθέτουν αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια
- ▶ Ένα μέρος της ενέργειας μεταφέρεται στα σωματίδια κάθε φορά που περνούν
- ▶ Τα σωματίδια επιταχύνονται εάν έχουν τη σωστή φάση ως προς το δυναμικό
 - ▶ $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$

ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ Κυκλικόί Επιταχυντές

- ▶ Δύο δέσμες σωματιδίων περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις
- ▶ Επιτάχυνση, καμπύλωση & συγκράτηση σε (ξεχωριστές) κυκλικές τροχιές
- ▶ Σύγκρουση δεσμών σε καθορισμένα σημεία

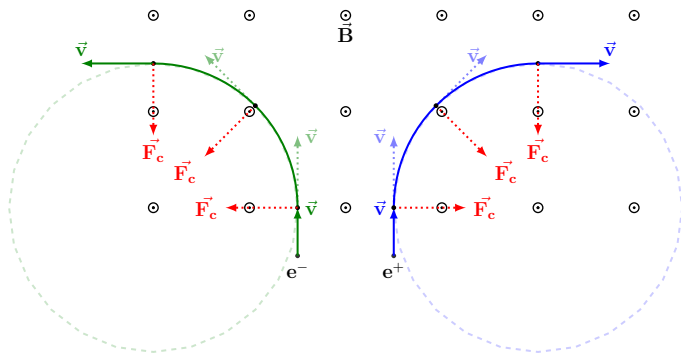


Πως καμπυλώνεται η τροχιά των σωματιδίων; Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου:

Μαγνητική Δύναμη

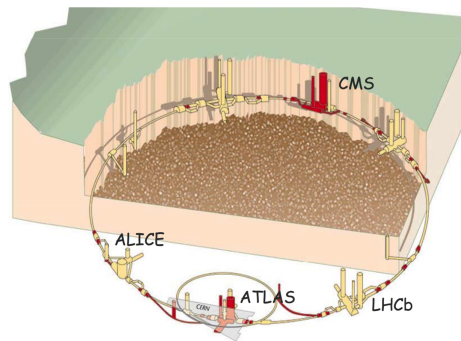
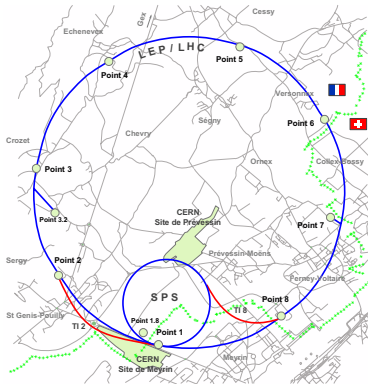
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- ▶ Η δύναμη που ασκείται είναι **κάθετη** με το μαγνητικό πεδίο \Rightarrow μηδενικό έργο
- ▶ Οι μαγνήτες καμπύλωσης παρέχουν κεντρομόλο δύναμη για κυκλικές τροχιές
- ▶ Φορτισμένα σωματίδια που επιταχύνονται εκπέμπουν ακτινοβολία (απώλειες)



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Δίκτυο Επιταχυντών του CERN

- ▶ ATLAS @ P1: Ανιχνευτής Γενικής Χρήσης (βαριά ιόντα/πρωτόνια)
- ▶ ALICE @ P2: Πείραμα Βαρέων Ιόντων
- ▶ CMS @ P5: Ανιχνευτής Γενικής Χρήσης (βαριά ιόντα/πρωτόνια)
- ▶ LHC-b @ P5: Πείραμα Σταθερού Στόχου (φυσική με b -κουαρκ)



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Πόσο Μεγάλος;

Τι είναι ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (LHC);

- ▶ Ο μεγαλύτερος και πιο ισχυρός επιταχυντής σωματιδίων στο κόσμο
- ▶ Βρίσκεται στα γαλλο-ελβετικά σύνορα σε βάθος 50 – 175 m
- ▶ Έχει σχήμα κυκλικό με περίμετρο ~ 27 km
- ▶ Συγκρούει πρωτόνια με ενέργεια δέσμης 7 TeV ($7 \times 10^{12} \text{ eV}$)

Αεροφωτογραφία



Σήραγγα του LHC

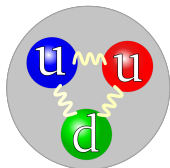


Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Τι είναι τα Αδρόνια;

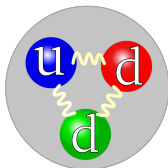
Ο LHC επιταχύνει δύο δέσμες πρωτονίων, τα οποία είναι τα αδρόνια:

- ▶ Σύνθετα υποατομικά σωματίδια
- ▶ Αποτελούνται από κουάρκ
- ▶ Μετέχουν σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις
- ▶ Χωρίζονται σε δύο τύπους:
 - ▶ βαρυόνια (τρία κουάρκ): π.χ. πρωτόνια ή νετρόνια
 - ▶ μεσόνια (κουάρκ-αντικουάρκ): π.χ. πιόνια ή καόνια

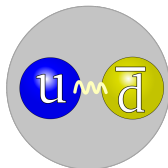
πρωτόνιο (+1e)



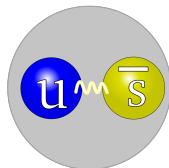
νετρόνιο (+0e)



πιόνιο (+1e)



καόνιο (+1e)

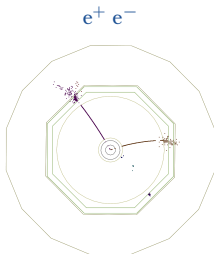


Λεπτόνια (π.χ. ηλεκτρόνια):

- 1 Σημειακά σωματίδια (χωρίς υποδομή)
- 2 Καθαρή τελική κατάσταση
- 3 Γνωστή ενέργεια σύγκρουσης
- 4 Διατήρηση ορμής
- 5 Ειδανικό για μετρήσεις ακριβείας

✓ Ακριβής έλεγχος $\sqrt{s} = E_1 + E_2$

✗ Ακτινοβολία $\frac{\Delta E_e}{\Delta E_p} = \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^4 \sim 10^{13}$

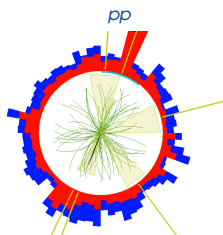


Αδρόνια (π.χ. πρωτόνια):

- 1 Σύνθετα σωματίδια (με υποδομή)
- 2 Χασοτική τελική κατάσταση
- 3 Άγνωστη ενέργεια σύγκρουσης
- 4 Διατήρηση εγκάρσιας ορμής
- 5 Ειδανικό για ανακάλυψη

✓ Αναζήτηση διεργασιών σε διάφορα \sqrt{s}

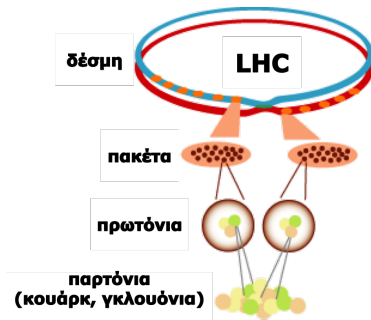
✗ Ενέργεια σύγκρουσης $\sqrt{s} < E_1 + E_2$



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ **Ιδιότητες Δέσμης**

Τα σωματίδια δέσμης είναι τα πρωτόνια (και ιόντα μολύβδου):

- ▶ Κάθε δέσμη αποτελείται από 2, 808 πακέτα πρωτονίων
- ▶ Κάθε πακέτο εμπεριέχει 10^{11} πρωτόνια (25ns ή 7.5μ απόσταση)
- ▶ Κινούνται με ταχύτητα 99.999999% της ταχύτητας του φωτός
- ▶ Διαγράφουν 11, 245 περιστροφές στη σήραγγα ~ 27 km ανά δευτερόλεπτο !!!
- ▶ Η συχνότητα σύγκρουσης πρωτονίων-πρωτονίων είναι 40 MHz



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 1 Μία κάθοδος εκπέμπει e^- σε θάλαμο κενού (θερμιονική εκπομπή)
- 2 Μία άνοδος επιταχύνει τα e^- και τα κατευθύνει σε ένα θάλαμο με υδρογόνου
- 3 Το υδρογόνο ιονίζεται από αλληλεπιδράσεις με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια
- 4 Τα ιονισμένα άτομα υδρογόνου είναι φυσικά πρωτόνια
- 5 Τα πρωτόνια συλλέγονται για να σχηματιστεί μια δέσμη πρωτονίων
- 6 Η δέσμη πρωτονίων μεταφέρεται σε σύμπλεγμα επιταχυντών



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 1 Μία κάθοδος εκπέμπει e^- σε θάλαμο κενού (θερμιονική εκπομπή)
- 2 Μία άνοδος επιταχύνει τα e^- και τα κατευθύνει σε ένα θάλαμο με υδρογόνου
- 3 Το υδρογόνο ιονίζεται από αλληλεπιδράσεις με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια
- 4 Τα ιονισμένα άτομα υδρογόνου είναι φυσικά πρωτόνια
- 5 Τα πρωτόνια συλλέγονται για να σχηματιστεί μια δέσμη πρωτονίων
- 6 Η δέσμη πρωτονίων μεταφέρεται σε σύμπλεγμα επιταχυντών



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 1 Μία κάθοδος εκπέμπει e^- σε θάλαμο κενού (θερμιονική εκπομπή)
- 2 Μία άνοδος επιταχύνει τα e^- και τα κατευθύνει σε ένα θάλαμο με υδρογόνου
- 3 Το υδρογόνο ιονίζεται από αλληλεπιδράσεις με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια
- 4 Τα ιονισμένα άτομα υδρογόνου είναι φυσικά πρωτόνια
- 5 Τα πρωτόνια συλλέγονται για να σχηματιστεί μια δέσμη πρωτονίων
- 6 Η δέσμη πρωτονίων μεταφέρεται σε σύμπλεγμα επιταχυντών



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 1 Μία κάθοδος εκπέμπει e^- σε θάλαμο κενού (θερμιονική εκπομπή)
- 2 Μία άνοδος επιταχύνει τα e^- και τα κατευθύνει σε ένα θάλαμο με υδρογόνου
- 3 Το υδρογόνο ιονίζεται από αλληλεπιδράσεις με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια
- 4 Τα ιονισμένα άτομα υδρογόνου είναι φυσικά πρωτόνια
- 5 Τα πρωτόνια συλλέγονται για να σχηματιστεί μια δέσμη πρωτονίων
- 6 Η δέσμη πρωτονίων μεταφέρεται σε σύμπλεγμα επιταχυντών



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 1 Μία κάθοδος εκπέμπει e^- σε θάλαμο κενού (θερμιονική εκπομπή)
- 2 Μία άνοδος επιταχύνει τα e^- και τα κατευθύνει σε ένα θάλαμο με υδρογόνου
- 3 Το υδρογόνο ιονίζεται από αλληλεπιδράσεις με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια
- 4 Τα ιονισμένα άτομα υδρογόνου είναι φυσικά πρωτόνια
- 5 Τα πρωτόνια συλλέγονται για να σχηματιστεί μια δέσμη πρωτονίων
- 6 Η δέσμη πρωτονίων μεταφέρεται σε σύμπλεγμα επιταχυντών



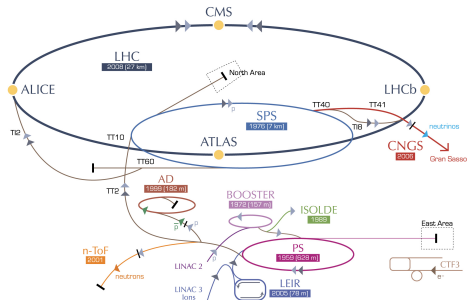
Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 1 Μία κάθοδος εκπέμπει e^- σε θάλαμο κενού (θερμιονική εκπομπή)
- 2 Μία άνοδος επιταχύνει τα e^- και τα κατευθύνει σε ένα θάλαμο με υδρογόνου
- 3 Το υδρογόνο ιονίζεται από αλληλεπιδράσεις με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια
- 4 Τα ιονισμένα άτομα υδρογόνου είναι φυσικά πρωτόνια
- 5 Τα πρωτόνια συλλέγονται για να σχηματιστεί μια δέσμη πρωτονίων
- 6 Η δέσμη πρωτονίων μεταφέρεται σε σύμπλεγμα επιταχυντών



Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 7 Η δέσμη πρωτονίων εισέρχεται στον γραμμικό επιταχυντή LINAC 2
- 8 Επιταχύνεται από τον LINAC 2 μέχρι τα 5 MeV
- 9 Μεταφέρεται στο Proton Synchrotron Booster (PSB) για
 - αύξηση της έντασης της δέσμης (αριθμός πρωτονίων $> 10^{13}$)
 - αύξηση της ενέργειας μέχρι τα 1.4 GeV
- 10 Μεταφορά στον PS και SPS για επιτάχυνση στα 28 GeV και 450 GeV
- 11 Δύο δέσμες εισέρχονται στον LHC και επιταχύνονται στα 7 TeV
- 12 Οι δέσμες έρχονται σε σύγκρουση σε 4 σημεία κάθε 25 ns

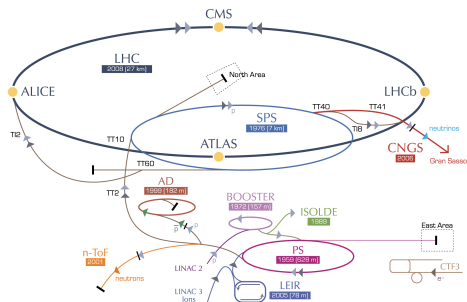


Accelerator	p (GeV/c)	Length (m)
LINAC2*	0.05	30
Booster*	1.4	157
PS	26	628
SPS	450	6911
LHC	6500	26657

* kinetic energy

Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 7 Η δέσμη πρωτονίων εισέρχεται στον γραμμικό επιταχυνητή LINAC 2
- 8 Επιταχύνεται από τον LINAC 2 μέχρι τα 5 MeV
- 9 Μεταφέρεται στο Proton Synchrotron Booster (PSB) για
 - αύξηση της έντασης της δέσμης (αριθμός πρωτονίων $> 10^{13}$)
 - αύξηση της ενέργειας μέχρι τα 1.4 GeV
- 10 Μεταφορά στον PS και SPS για επιτάχυνση στα 28 GeV και 450 GeV
- 11 Δύο δέσμες εισέρχονται στον LHC και επιταχύνονται στα 7 TeV
- 12 Οι δέσμες έρχονται σε σύγκρουση σε 4 σημεία κάθε 25 ns

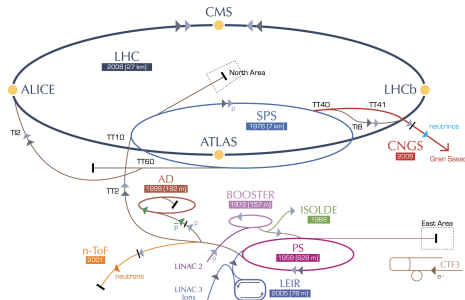


Accelerator	p (GeV/c)	Length (m)
LINAC2*	0.05	30
Booster*	1.4	157
PS	26	628
SPS	450	6911
LHC	6500	26657

* kinetic energy

Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 7 Η δέσμη πρωτονίων εισέρχεται στον γραμμικό επιταχυντή LINAC 2
- 8 Επιταχύνεται από τον LINAC 2 μέχρι τα 5 MeV
- 9 Μεταφέρεται στο Proton Synchrotron Booster (PSB) για
 - ▶ αύξηση της έντασης της δέσμης (αριθμός πρωτονίων $> 10^{13}$)
 - ▶ αύξηση της ενέργειας μέχρι τα 1.4 GeV
- 10 Μεταφορά στον PS και SPS για επιτάχυνση στα 28 GeV και 450 GeV
- 11 Δύο δέσμες εισέρχονται στον LHC και επιταχύνονται στα 7 TeV
- 12 Οι δέσμες έρχονται σε σύγκρουση σε 4 σημεία κάθε 25 ns

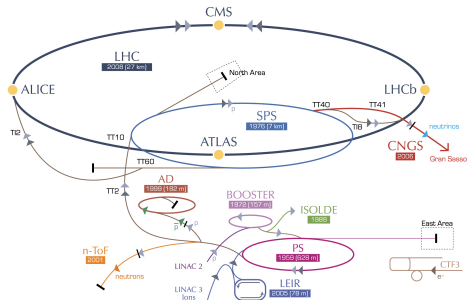


Accelerator	p (GeV/c)	Length (m)
LINAC2*	0.05	30
Booster*	1.4	157
PS	26	628
SPS	450	6911
LHC	6500	26657

* kinetic energy

Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 7 Η δέσμη πρωτονίων εισέρχεται στον γραμμικό επιταχυτή LINAC 2
- 8 Επιταχύνεται από τον LINAC 2 μέχρι τα 5 MeV
- 9 Μεταφέρεται στο Proton Synchrotron Booster (PSB) για
 - ▶ αύξηση της έντασης της δέσμης (αριθμός πρωτονίων $> 10^{13}$)
 - ▶ αύξηση της ενέργειας μέχρι τα 1.4 GeV
- 10 Μεταφορά στον PS και SPS για επιτάχυνση στα 28 GeV και 450 GeV
- 11 Δύο δέσμες εισέρχονται στον LHC και επιταχύνονται στα 7 TeV
- 12 Οι δέσμες έρχονται σε σύγκρουση σε 4 σημεία κάθε 25 ns

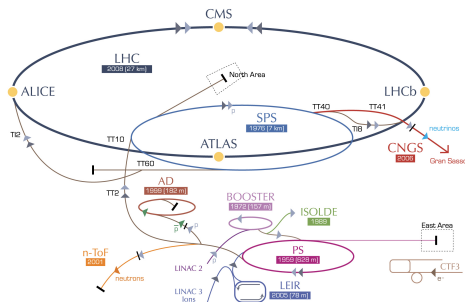


Accelerator	p (GeV/c)	Length (m)
LINAC2*	0.05	30
Booster*	1.4	157
PS	26	628
SPS	450	6911
LHC	6500	26657

* kinetic energy

Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 7 Η δέσμη πρωτονίων εισέρχεται στον γραμμικό επιταχυνητή LINAC 2
- 8 Επιταχύνεται από τον LINAC 2 μέχρι τα 5 MeV
- 9 Μεταφέρεται στο Proton Synchrotron Booster (PSB) για
 - ▶ αύξηση της έντασης της δέσμης (αριθμός πρωτονίων $> 10^{13}$)
 - ▶ αύξηση της ενέργειας μέχρι τα 1.4 GeV
- 10 Μεταφορά στον PS και SPS για επιτάχυνση στα 28 GeV και 450 GeV
- 11 Δύο δέσμες εισέρχονται στον LHC και επιταχύνονται στα 7 TeV
- 12 Οι δέσμες έρχονται σε σύγκρουση σε 4 σημεία κάθε 25 ns

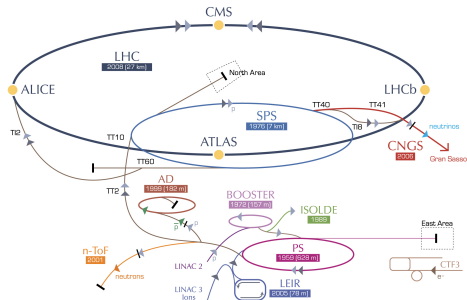


Accelerator	p (GeV/c)	Length (m)
LINAC2*	0.05	30
Booster*	1.4	157
PS	26	628
SPS	450	6911
LHC	6500	26657

* kinetic energy

Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Σχηματισμός Δέσμης

- 7 Η δέσμη πρωτονίων εισέρχεται στον γραμμικό επιταχυνητή LINAC 2
- 8 Επιταχύνεται από τον LINAC 2 μέχρι τα 5 MeV
- 9 Μεταφέρεται στο Proton Synchrotron Booster (PSB) για
 - ▶ αύξηση της έντασης της δέσμης (αριθμός πρωτονίων $> 10^{13}$)
 - ▶ αύξηση της ενέργειας μέχρι τα 1.4 GeV
- 10 Μεταφορά στον PS και SPS για επιτάχυνση στα 28 GeV και 450 GeV
- 11 Δύο δέσμες εισέρχονται στον LHC και επιταχύνονται στα 7 TeV
- 12 Οι δέσμες έρχονται σε σύγκρουση σε 4 σημεία κάθε 25 ns



Accelerator	p (GeV/c)	Length (m)
LINAC2*	0.05	30
Booster*	1.4	157
PS	26	628
SPS	450	6911
LHC	6500	26657

* kinetic energy

Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ ΑΔΡΟΝΙΩΝ Φωτεινότητα

Η βασική παράμετρος για τα πειράματα είναι ο ρυθμός αντιδράσεων $\frac{dN}{dt}$:

Ρυθμός Αντιδράσεων

$$\frac{dN}{dt} = \sigma L$$

όπου σ η ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης και L είναι η φωτεινότητα:

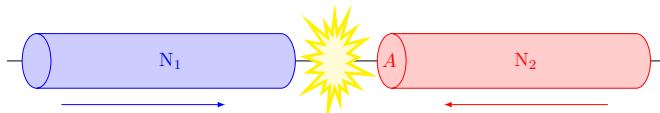
Φωτεινότητα

$$L = fn \left(\frac{N_1 N_2}{A} \right) \quad (\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$$

όπου:

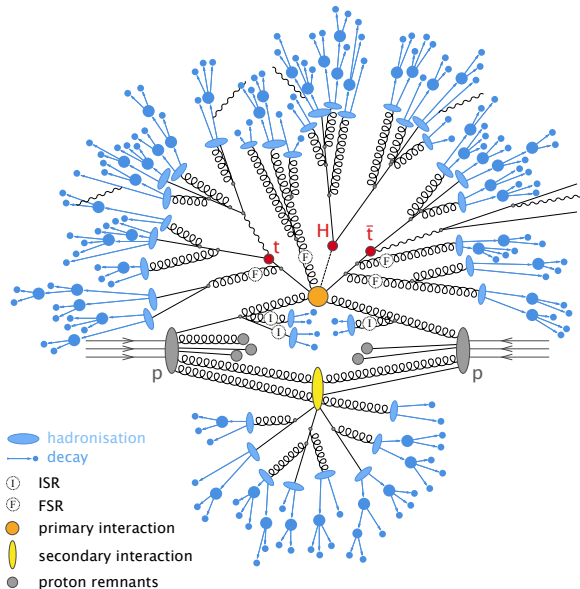
- ▶ N_1 και N_2 ο αριθμός των σωματιδίων κάθε πακέτου δέσμης
- ▶ A είναι η επιφάνεια διατομής των δεσμών
- ▶ f είναι η συχνότητα περιστροφής του επιταχυντή
- ▶ n είναι ο αριθμός των πακέτων που αποτελούν τη δέσμη

Η μέγιστη φωτεινότητα του LHC είναι της τάξης του $2.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.



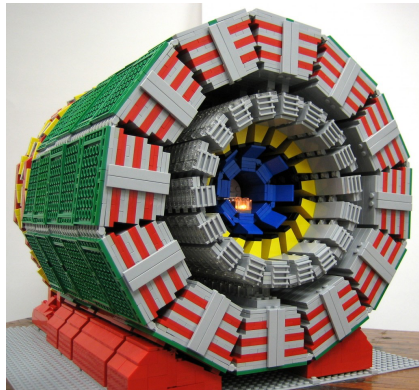
Οι συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων είναι στην πραγματικότητα:

- ▶ Συγκρούσεις μεταξύ των κουάρκς και γκλουονίων που βρίσκονται μέσα στα πρωτόνια



Πως ανιχνεύουμε τα σωματίδια που παράγονται;

- ▶ Τα σωματίδια είναι πολύ μικρά για να τα δούμε \Rightarrow Αδύνατη η **άμεση** παρατήρηση
- ▶ **Έμμεση** παρατήρηση μέσω των αλληλεπιδράσεών τους με συγκεκριμένα υλικά
- ▶ Χρήση ομόκεντρων στρωμάτων ανιχνευτών γύρω από το σημείο σύγκρουσης
- ▶ Κάθε τύπος σωματιδίου αφήνει χαρακτηριστικό σήμα στον ανιχνευτή



Τι θέλουμε να γνωρίζουμε σχετικά με τα σωματίδια;

- ▶ Πού παράγονται
- ▶ Πού διασπώνται
- ▶ Από ποιά διάσπαση προέρχονται (μητέρα σωματίδιο)

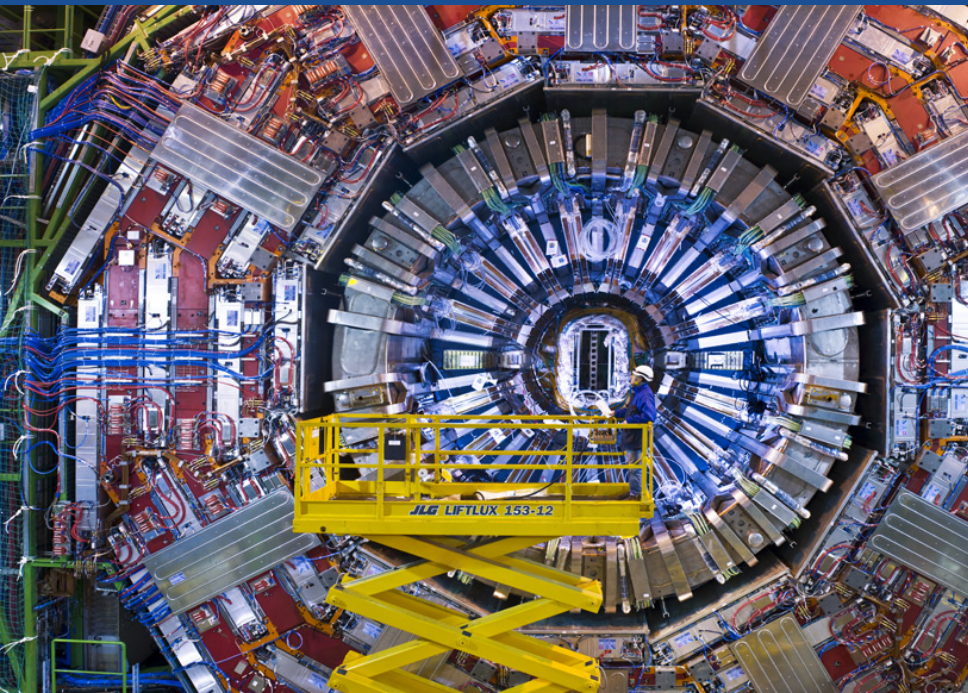
Για να ανακατασκευάσουμε σωματίδια χρησιμοποιούμε ανιχνευτές για να μετρήσουμε:

- ▶ Ηλεκτρικό φορτίο
- ▶ Μάζα
- ▶ Ενέργεια/ορμή

Τα δύο βασικά εργαλεία που έχουμε για ανάκτηση πληροφοριών είναι:

- ▶ Ο **καταγραφέας τροχιών** \Rightarrow προσδιορισμός της ορμής/φορτίου
 - ▶ Ελάχιστη διαταραχή από ανιχνευτή (**μη-καταστρεπτική** μέτρηση)
- ▶ **θερμιδόμετρο ή καλορίμετρο** \Rightarrow προσδιορισμός της ενέργειας
 - ▶ Πλήρης εναπόθεση ενέργειας στον ανιχνευτή (**καταστρεπτική** μέτρηση)

$$E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m^2 c^4$$



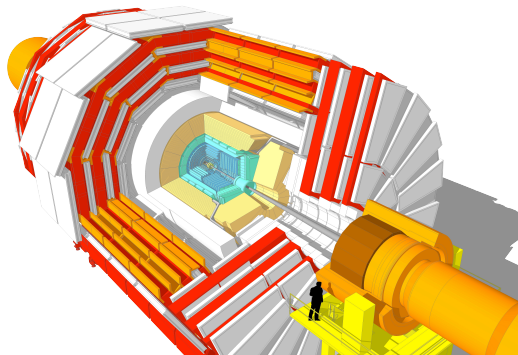
Τι είναι ακριβώς ο ανιχνευτής CMS;

- ▶ Ένας γιγάντιος ανιχνευτής σωματιδίων
- ▶ Βρίσκεται 100m κάτω από τη γη
- ▶ Γεωμετρικά μπορεί να παρομοιαστεί με ένα κυλινδρικό κρεμμύδι:
 - ▶ Αποτελείται από ομοαξονικά στρώματα ανιχνευτών
- ▶ Περιβάλλει 1 από τα 4 σημεία κρούσης του LHC
- ▶ Στο κέντρο του παράγονται σωματίδια από κρούσεις πρωτονίων
- ▶ Τα σωματίδια αυτά διαπερνούν τους υπο-ανιχνευτές αφήνοντας ίχνη

Κύρια χαρακτηριστικά:

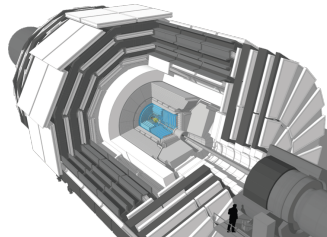
- ▶ Μήκος: 28.7m
- ▶ Διάμετρος: 15m
- ▶ Συνολικό βάρος: 14,000 τόνοι
- ▶ Μαγνητικό Πεδίο: 3.8T (Γης = 25 – 65 μ T)

- 1 Καταγραφέας Τροχιών
 - ▶ Ορμή/φορτίο/σημείο διάσπασης
- 2 Ηλεκτρομαγνητικό Θερμιδόμετρο
 - ▶ Ενέργεια/θέση για e^\pm/γ
- 3 Αδρονικό Θερμιδόμετρο
 - ▶ Ενέργεια/κατεύθυνση πιδάκων
- 4 Υπεραγώγιμος Μαγνήτης
 - ▶ Καμπύλωση τροχιών σωματιδίων
- 5 Ατσάλινος Ζυγός
 - ▶ Επιστροφή μαγνητικών γραμμών
- 6 Σύστημα Μιονίων
 - ▶ Ταυτοποίηση/ορμή για μ^\pm

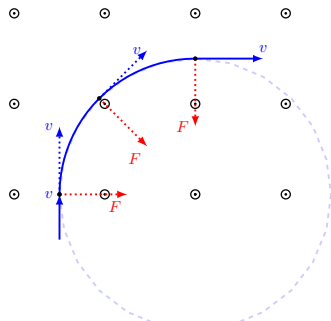


- ▶ Αποτελείται από στρώματα αισθητήρων πυριτίου
- ▶ Φορτισμένα σωματίδια κινούνται προς τα έξω
- ▶ Παράγουν σήματα καθώς διαπερνούν τα στρώματα
- ▶ Συσχέτιση σημάτων σε κάθε στρώμα → τροχιές
- ▶ Οι τροχιές καμπυλώνονται στο μαγνητικό πεδίο → φορτίο
- ▶ Μεγαλύτερη ορμή → μικρότερη καμπυλότητα
- ▶ Σημείο διάσπασης σωματιδίου → χρόνος ζωής

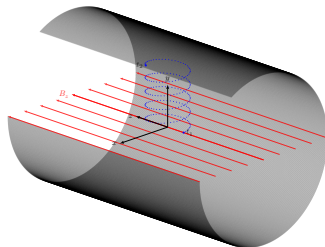
Καταγραφέας Τροχιών



Δύναμη Lorentz

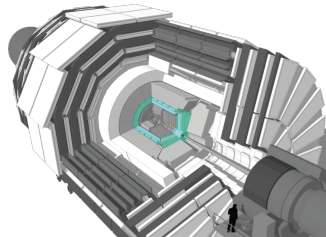


Ελικοειδής τροχιά

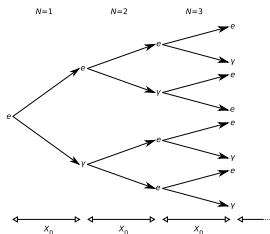


- ▶ Εισερχόμενα e^{\pm}/γ προσπίπτουν στους κρυστάλλους
- ▶ Αλληλεπιδρούν ΗΜ με άτομα μολύβδου-βολφραμίου
- ▶ Το αποτέλεσμα είναι ένας καταίγισμός από σωματίδια
- ▶ Το παραγόμενο φως υφίσταται ολική εσωτερική ανάκλαση
- ▶ Συλλέγεται από φωτοανιχνευτή στην άκρη του κρυστάλλου
- ▶ Περισσότερο φως \rightarrow μεγαλύτερη αρχική ενέργεια

Ηλεκτρομαγνητικό Θερμιδόμετρο



Ηλεκτρομαγνητικός Καταίγισμός

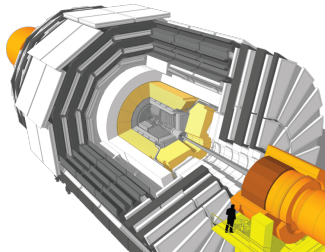


e^{\pm}/γ σε κρύσταλλο με ανιχνευτή φως

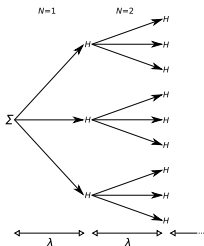


- ▶ Εισερχόμενα αδρόνια προσπίπτουν σε απορροφητές
- ▶ Ισχυρές αλληλεπιδράσεις με πυρήνες ορείχαλκου/χάλυβα
- ▶ Αδρονικός καταίγισμός διαπερνά πλαστικούς σπινθηριστές
- ▶ Το φως που παράγεται απορροφάται από οπτικές ίνες
- ▶ Οι ίνες μεταφέρουν το φως σε φωτοανιχνευτές
- ▶ Μετατροπή σε ηλεκτρικό σήμα (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο)
- ▶ Μεγαλύτερο σήμα \rightarrow μεγαλύτερη αρχική ενέργεια

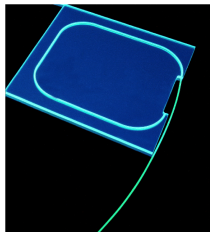
Αδρονικό Θερμιδόμετρο



Αδρονικός Καταίγισμός

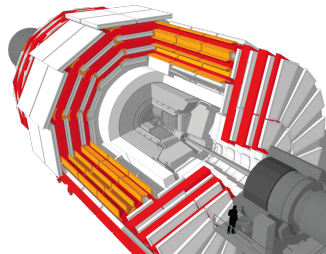


Πλαστικός σπινθηριστής με οπική ίνα



- ▶ Τα μιονία είναι φορτισμένα σωματίδια ($m_{\mu} \simeq 200m_e$)
- ▶ Διαπερνούν αρκετά μέτρα ύλης χωρίς αλληλεπιδράσεις
- ▶ Δημιουργούν όμως σήμα σε θαλάμους αερίων
- ▶ Καθώς το μιονίο διαπερνάει το αέριο αποσπά ηλεκτρόνια
- ▶ Τα ηλεκτρόνια έλκονται από θετικά φορτισμένα σύρματα
- ▶ Η ροή ηλεκτρονίων συνεπάγεται με ηλεκτρικό ρεύμα
- ▶ Το μιονίο αφήνει ίχνη σε διαδοχικά σημεία της τροχιάς του
- ▶ Ανακατασκευή πλήρους τροχιάς (εσωτερικό → εξωτερικό)
- ▶ Μεγαλύτερη ορμή → μικρότερη καμπυλότητα ($\frac{1}{\rho}$)

Σύστημα Μιονίων



Θάλαμος Σωλήνων Ολίσθησης

