

Επιταχυντές

Επιταχυντές

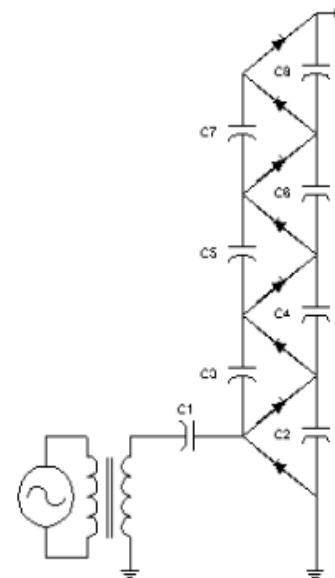
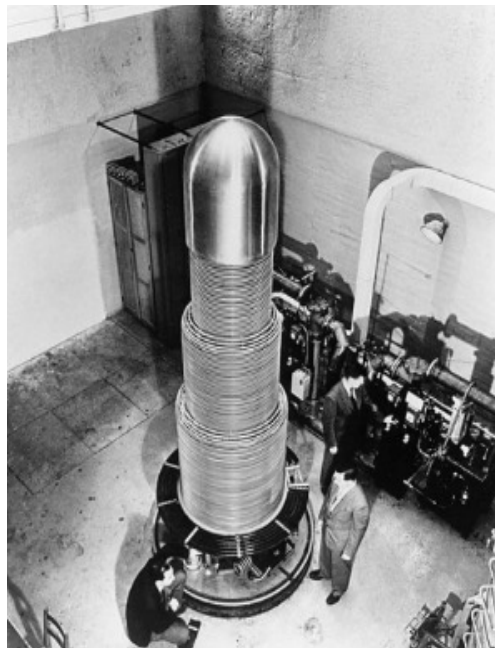
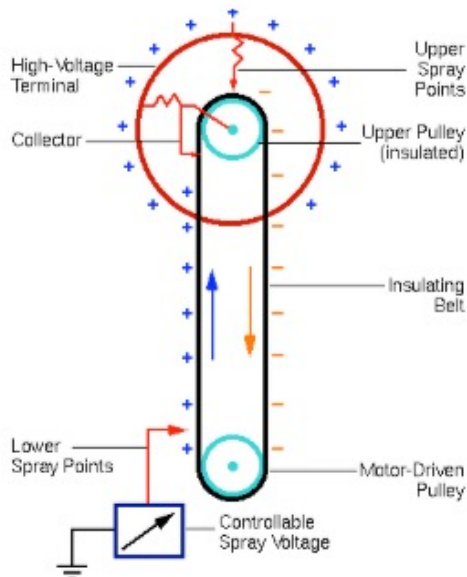
Βασική ιδέα επιταχυντών στηρίζεται στην δύναμη Lorentz: $\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

ενώ το μαγνητικό πεδίο δεν παράγει έργο

Αρχικά οι επιταχυντές δημιουργήθηκαν είτε με ηλεκτροστατικές πηγές δυναμικού ή ανορθωμένες εναλλασόμενες πηγές.

Αυτές οι πηγές μπορούν να φθάσουν σε μερικά MeV ενέργειας, και η χρήση τους περιορίζεται από προβλήματα μόνωσης και διατήρησης φορτίου

Οι διατάξεις αυτές μπορούν να δώσουν σχετικιστικά ηλεκτρόνια, και πρωτόνια που μπορούν να διαπεράσουν το φράγμα του Coulomb δυναμικού ελαφρών πυρήνων και επομένως να χρησιμοποιηθούν για μερικά θέματα πυρηνικής φυσικής



Γεννήτρια Van der Graaf



Cockcroft – Walton επιταχυντής στο Fermilab



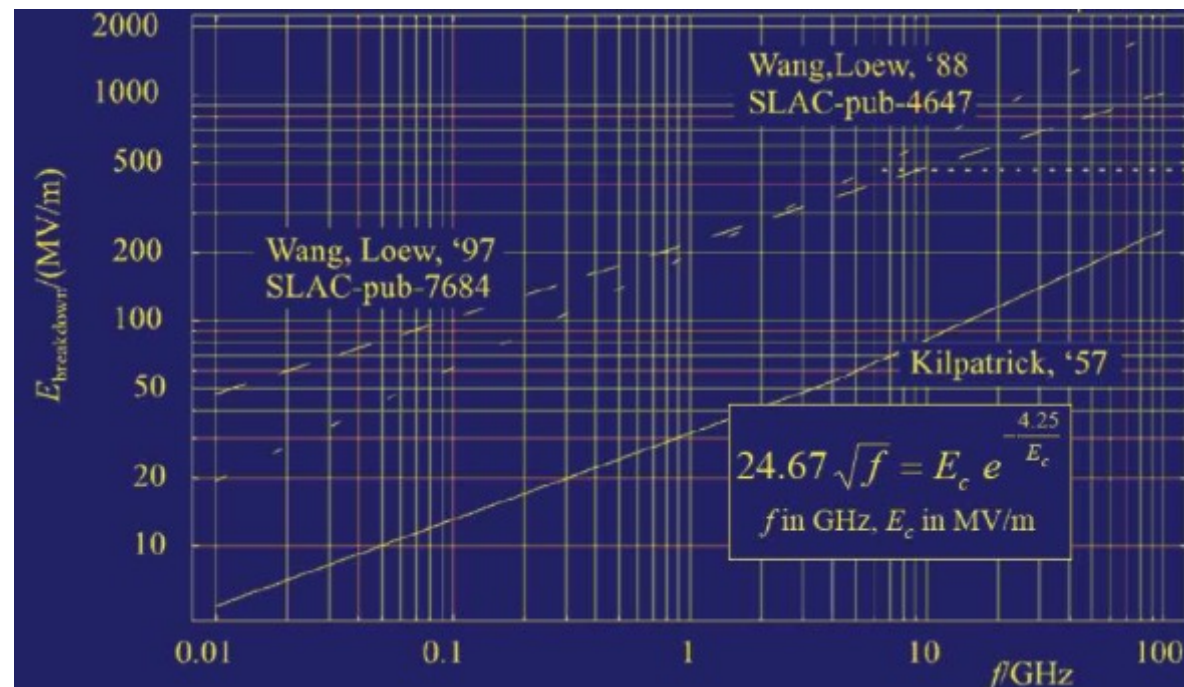
RF κοιλότητες

- ❑ Για σταθερό δυναμικό, χρειαζόμαστε πολύ μεγάλες τιμές πεδίου.
 - για ενέργεια μερικών MeV θα έχουμε πεδίο της τάξης των MV!
- ❑ Για κυκλικούς επιταχυντές σταθερού δυναμικού: $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$
 - αδύνατη η επιτάχυνση για τις περιπτώσεις αυτές
- ❑ Χαμηλό όριο εκκένωσης στον αέρα για σταθερό δυναμικό
- ❑ Ανάγκη για χρήση επιταχυντών με μεταβαλλόμενο πεδίο

❑ Εξισώσεις Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} = 0 \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$



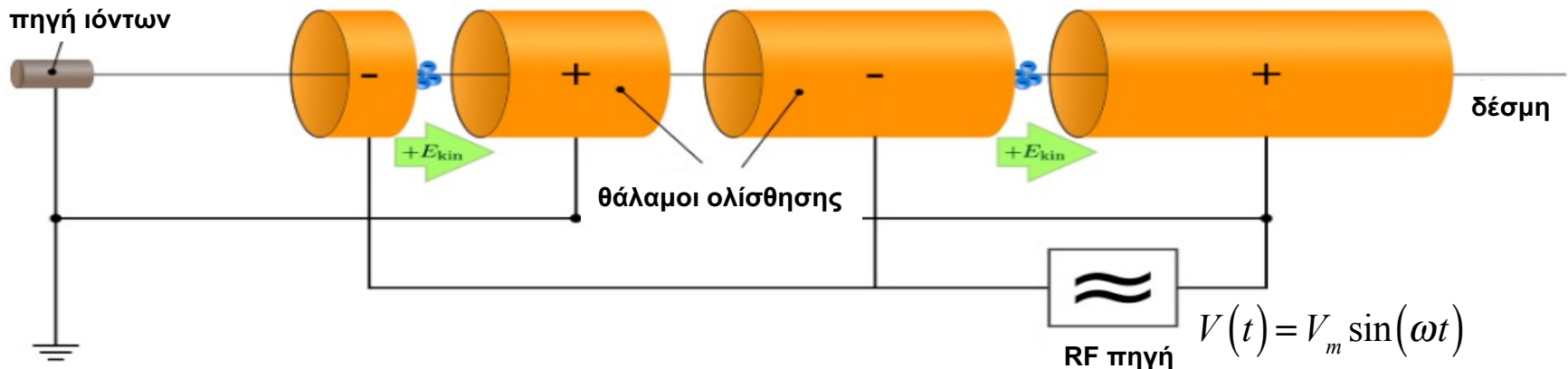
AC (γραμμικοί) επιταχυντές

- ❑ Σε αντίθεση με μια μεγάλη πηγή στατικού δυναμικού, θα μπορούσε κάποιος να χρησιμοποιήσει AC δυναμικό με πολλαπλά στάδια επιτάχυνσης σε γραμμική διάταξη
- ❑ Τα σωματίδια επιταχύνονται αν έχουν τη σωστή φάση ως προς τη εφαρμοζόμενη V
- ❑ Δουλεύει για δέσμη σε πακέτα, με μήκος πακέτου $\sigma_T \ll 1/f_{RF}$ και απόσταση $\Delta t = 1/r_{RF}$
- ❑ Ο απλούστερος σχεδιασμός είναι αυτός του Wideroe γραμμικού επιταχυντή

➤ Για μη σχετικιστική ενέργεια: $E_{kin}^n = nqV_m \sin(\Psi_0) = mv_n^2/2$

Ψ_0 είναι η μέση φάση του RF δυναμικού που αισθάνεται η δέσμη καθώς περνά από τα διάκενα. Για $\Psi_0 = \text{σταθ. παντού}$ ο απαιτούμενος χρόνος για να πάει από το ένα διάκενο στο επόμενο είναι $T_{RF}/2$.

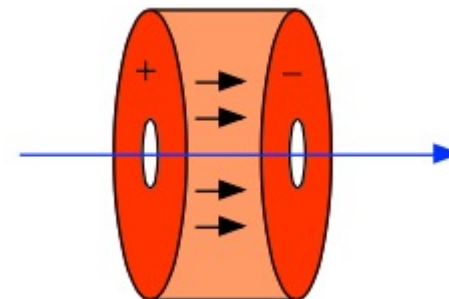
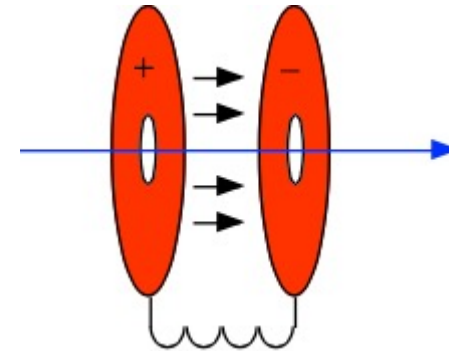
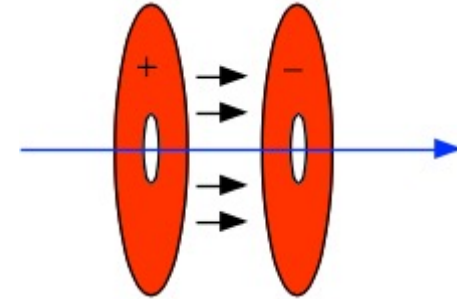
$$l_n = v_n \frac{T_{RF}}{2} = \frac{1}{2} \beta_n \lambda_{RF} = \frac{\sqrt{n}}{f_{RF}} \sqrt{qV_m \sin \Psi_0 / 2m} \propto \sqrt{n}$$



- ❑ Απλή διάταξη αλλά δημιουργείται επαγωγή και χωρητικότητα στα διάφορα τμήματα που από ηλεκτρολογική σκοπιά γίνεται δύσκολη η χρησιμοποίησή της

RF κοιλότητες

- Η απλή ιδέα στηρίζεται στο γεγονός ότι ένας πυκνωτής παράλληλων οπλισμών δημιουργεί ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο E το οποίο μπορεί να επιταχύνει ένα σωματίδιο.
- Έχοντας μια οπή στους δυο οπλισμούς δεν τροποποιεί ιδιαίτερα το πεδίο
- Συνδέοντας τους οπλισμούς με ένα πηνίο δημιουργεί ένα LC κύκλωμα το οποίο ταλαντώνεται με συχνότητα: $\omega^2 = 1/LC$
- Χρησιμοποιώντας πολλά πηνία που συνδέουν τα άκρα των δυο οπλισμών του πυκνωτή, ελαττώνει την επαγωγή ενώ αυξάνει την συχνότητα συντονισμού.
- Στην πραγματικότητα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια κυλινδρική μεταλλική επιφάνεια για να συνδέσουμε τους δυο οπλισμούς



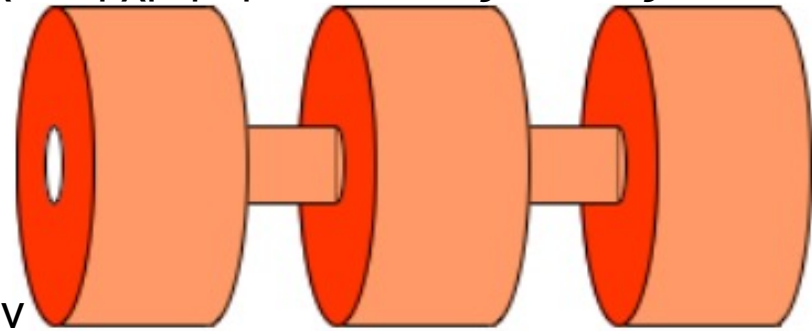
Γραμμικός επιταχυντής Alvarez

- ❑ Αν κατασκευάσουμε τόσο την διάμετρο όσο και το μήκος αρκετά μεγάλα τότε η συχνότητα είναι μικρή (που έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη απαίτηση για την πηγή ισχύος).
- Η περίοδος όμως είναι αρκετά μικρή σε σχέση με το χρόνο διέλευσης των σωματιδίων
- Θα πρέπει να υπάρξει κοίλοι αγωγιμοι σωλήνες οι οποίοι θωρακίζουν τα σωματίδια από το πεδίο το μισό χρόνο που αυτό έχει την λάθος διεύθυνση



Γραμμικοί επιταχυντές

- ❑ Μπορούμε να φτιάξουμε ένα γραμμικό επιταχυντή χρησιμοποιώντας πολλές RF κοιλότητες στην σειρά
- ❑ Χρειάζεται να ρυθμιστεί η φάση σε κάθε κοιλότητα ώστε να προσαρμόζεται στην ταχύτητα των σωματιδίων της δέσμης
- ❑ Για δέσμη πρωτονίων, το μήκος των διάκενων θα πρέπει να αλλάζει από κοιλότητα σε κοιλότητα καθώς αυξάνει η ταχύτητα.
- ❑ Για ηλεκτρόνια, η ταχύτητα εισαγωγής τους στο σύστημα των κοιλοτήτων είναι ήδη κοντά στην ταχύτητα του φωτός και επομένως η διάταξη δεν μπορεί να είναι ομοιόμορφη
- ❑ Προσεκτική κατασκευή της διάταξης μπορεί να χρησιμοποιεί την RF συχνότητα που κατανέμεται κατά μήκος της δέσμης σαν οδηγό συχνότητα για πολλές κοιλότητες στη σειρά χρησιμοποιώντας μια μόνο πηγή ισχύος



Γραμμικός επιταχυντής micro-κυμάτων

- ❑ Αν συγκολλήσουμε μεταξύ τους και με μεγάλη ακρίβεια, δίσκους και κυλίνδρους χαλκού, διαμέτρου 10cm και επαναλάβουμε την διάταξη για 3km θα πάρουμε την διάταξη του γραμμικού επιταχυντή στο SLAC
- ❑ Τροφοδοτώντας με ισχύ 100MW ανά 3m μπορούμε να πάρουμε δέσμη ηλεκτρονίων ενέργειας 50 GeV



Γραμμικός επιταχυντής μικροκυμάτων

- ❑ Χρησιμοποιώντας νιόβιουμ για υλικό αντί για χαλκό και τοποθετώντας την διάταξη σε υγρό ήλιο μετατρέπεται σε υπεραγώγιμος επιταχυντής



Κύκλοτρο

- ❑ Θα θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο E-πεδίο να επιταχύνει τα σωματίδια που θέλουμε, πολλές φορές.
- ❑ Μπορούμε να το πετύχουμε αυτό με την χρήση μαγνητικού πεδίου B το οποίο αλλάζει την διεύθυνση του σωματιδίου σε κυκλική τροχιά
- ❑ Για μη σχετικιστικά σωματίδια:

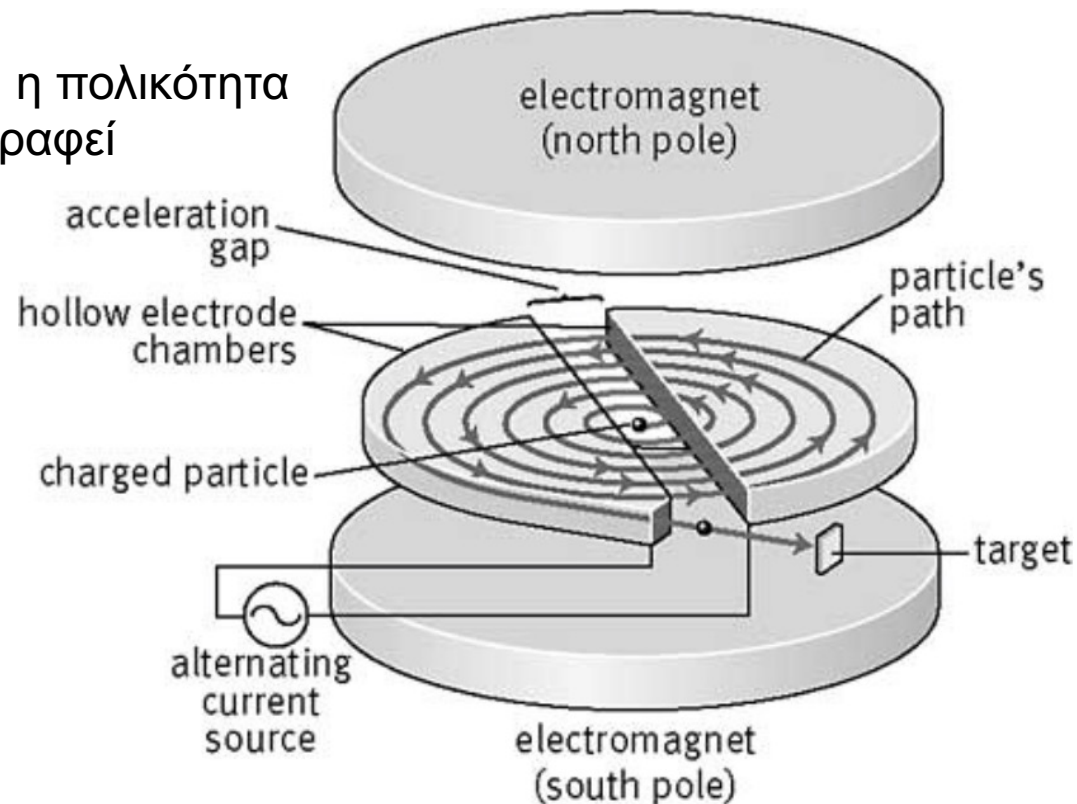
$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow m \frac{v^2}{R} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow v = \frac{qBR}{m}$$

- ❑ Η ταχύτητα και η ακτίνα είναι ευθέως ανάλογα
- ❑ Η περίοδος περιστροφής είναι η περιφέρεια ως προς την ταχύτητα του σωματιδίου

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi R}{qBR/m} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{qB} m \quad \text{ανεξάρτητη της ακτίνας}$$

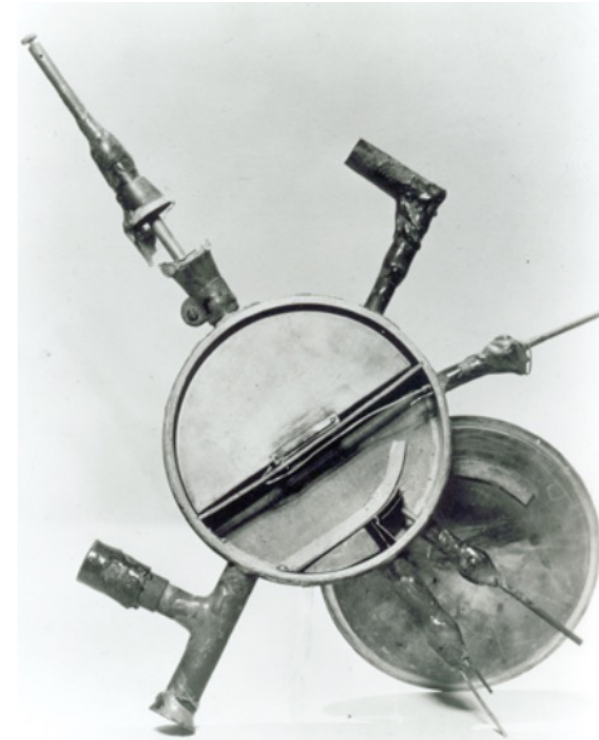
Κύκλοτρο

- ❑ Υπάρχει μια πηγή πρωτονίων ή ιόντων στο κέντρο
- ❑ Το εναλλασσόμενο δυναμικό στο μεσοδιάστημα μεταξύ των δυο μισών κοίλων κυλινδρικών ηλεκτροδίων (D's dognuts) επιταχύνει τα σωματίδια
- ❑ Μέσα σε κάθε ηλεκτρόδιο το πεδίο είναι σχεδόν μηδέν και το μαγνητικό πεδίο B οδηγεί τα σωματίδια σε ημι-κυκλική τροχιά, ξανά στο μεσοδιάστημα
- ❑ Μέχρι να φθάσουν στο διάστημα, η πολικότητα του ηλεκτρικού πεδίου έχει αντιστραφεί οπότε επιταχύνονται και πάλι
- ❑ Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου τα σωματίδια βγουν από τα ηλεκτρόδια και άλλα σωματίδια εισάγονται



Το πρώτο κύκλοτρο

- ❑ Το πρώτο κύκλοτρο κατασκευάστηκε από τον E. Lawrence στο Berkeley
- ❑ Είναι ένας απλός θάλαμος κενού που εισάγεται σε μαγνητικό πεδίο
- ❑ Περιέχει ένα και μόνο ημικυλινδρικό ηλεκτρόδιο
- ❑ Υπάρχει ωστόσο ένα αρκετά ισχυρό E – πεδίο στο άνοιγμα και παρόλο που δεν υπάρχει το δεύτερο ηλεκτρόδιο, η διάταξη είναι ικανή για να δουλέψει



Τροχιά σε ομογενές μαγνητικό πεδίο

□ Ένα σωματίδιο έχει ηλεκτρικό φορτίο q και ταχύτητα u και κινείται μέσα σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο B κάθετο στην τροχιά του.

□ Στο σωματίδιο ασκείται δύναμη $F=quB$ κάθετη στη διεύθυνση κίνησης του σωματιδίου με αποτέλεσμα το σωματίδιο να ακολουθεί κυκλική τροχιά ακτίνας R

□ Μετά από σύντομο χρονικό διάστημα, Δt , το σωματίδιο έχει καλύψει απόσταση $\delta=u\Delta t$

□ Η γωνία που έχει διαγράψει είναι $\Delta\theta=u\Delta t/R$

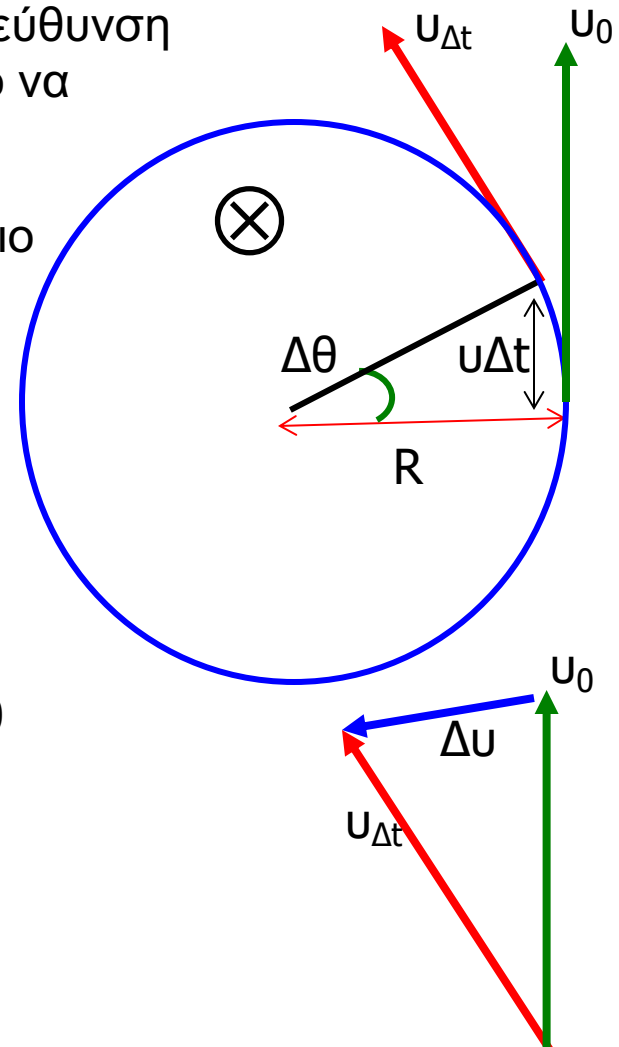
□ Στο χρονικό διάστημα Δt , το διάνυσμα της ταχύτητας έχει στραφεί κατά την ίδια ακριβώς γωνία $\Delta\theta$

□ Το μέτρο της ταχύτητας δεν αλλάζει αλλά αλλάζει η διεύθυνση και επομένως $\Delta u = u\Delta\theta$

□ Κατά αναλογία η μεταβολή στην ορμή είναι $\Delta p = p\Delta\theta$

□ Επομένως θα έχουμε: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \rightarrow qvB = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p\Delta\theta}{\Delta t}$

$$p \frac{(v\Delta t/R)}{\Delta t} \rightarrow qB = \frac{p}{R} \Rightarrow p = qBR$$



Τροχία σε μαγνητικό πεδίο

- Το αποτέλεσμα $p = qBR$ είναι ακριβές και σχετικιστικά παρόλη την απλότητα. Η ακτίνα της τροχιάς σε κάποιο μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της ορμής του σωματιδίου ακόμα και στην σχετικιστική περίπτωση.
- Το αποτέλεσμα είναι εκφρασμένο στο SI σύστημα μονάδων και θα πρέπει να εκφραστεί στο φυσικό σύστημα:
- Πολλαπλασιάζουμε με c για να πάρουμε ενέργεια και μετατρέπουμε την ενέργεια από Joule σε MeV

$$p = qBR \Rightarrow (pc)_{eV} \times (Joule / eV) = (qBRc)_{Joules} \quad \left. \vphantom{p = qBR} \right\} (pc)_{eV} = B_{SI} R_{SI} c_{SI}$$

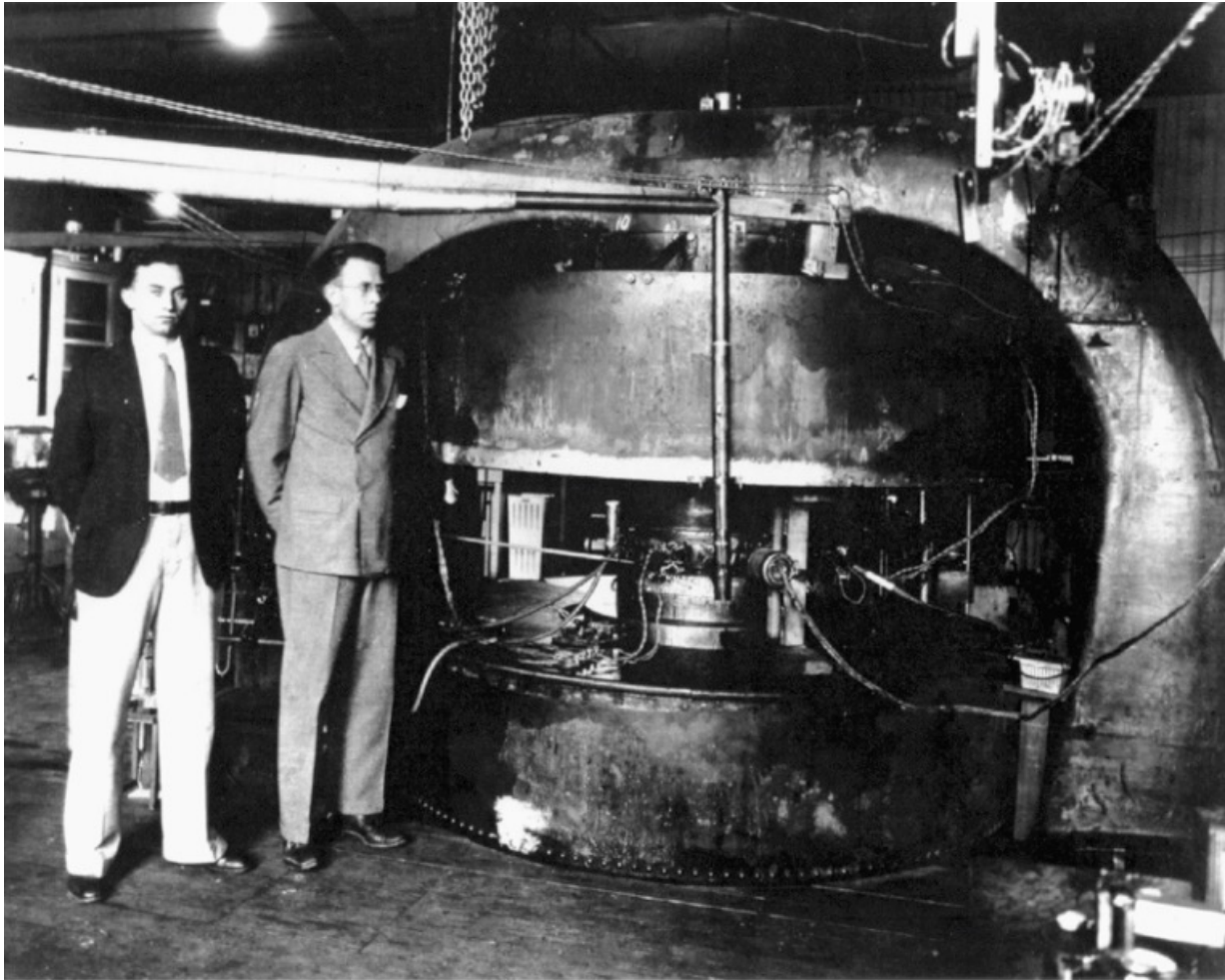
□ Αλλά $(Joule / eV) = 1.602 \times 10^{-19} = q$

□ Αντικατάσταση θα δώσει: $(pc)_{eV} = 2.998 \times 10^8 eV \times \frac{B}{1Tesla} \frac{R}{1m} = 0.298 GeV \times \frac{B}{1Tesla} \frac{R}{1m}$

$$p = 300 \frac{MeV}{c} R_{meter} B_{Tesla} \quad \text{για να αποκτήσει μεγάλη ορμή χρειάζεται ισχυρό μαγνητικό πεδίο}$$

- Επειδή ο σίδηρος δεν μπορεί να ξεπεράσει μαγνήτιση 1.5T θα πρέπει να αυξήσουμε την διάμετρο
- Ένας μαγνήτης 2m διαμέτρου μπορεί να δώσει $p = 450 \text{ MeV}/c$. Για τα πρωτόνια αυτή είναι 0.5 της ταχύτητας του φωτός όπου σχετικότητα γίνεται σοβαρός παράγων

68cm κύκλωτρο



4.5m κύκλωτρο



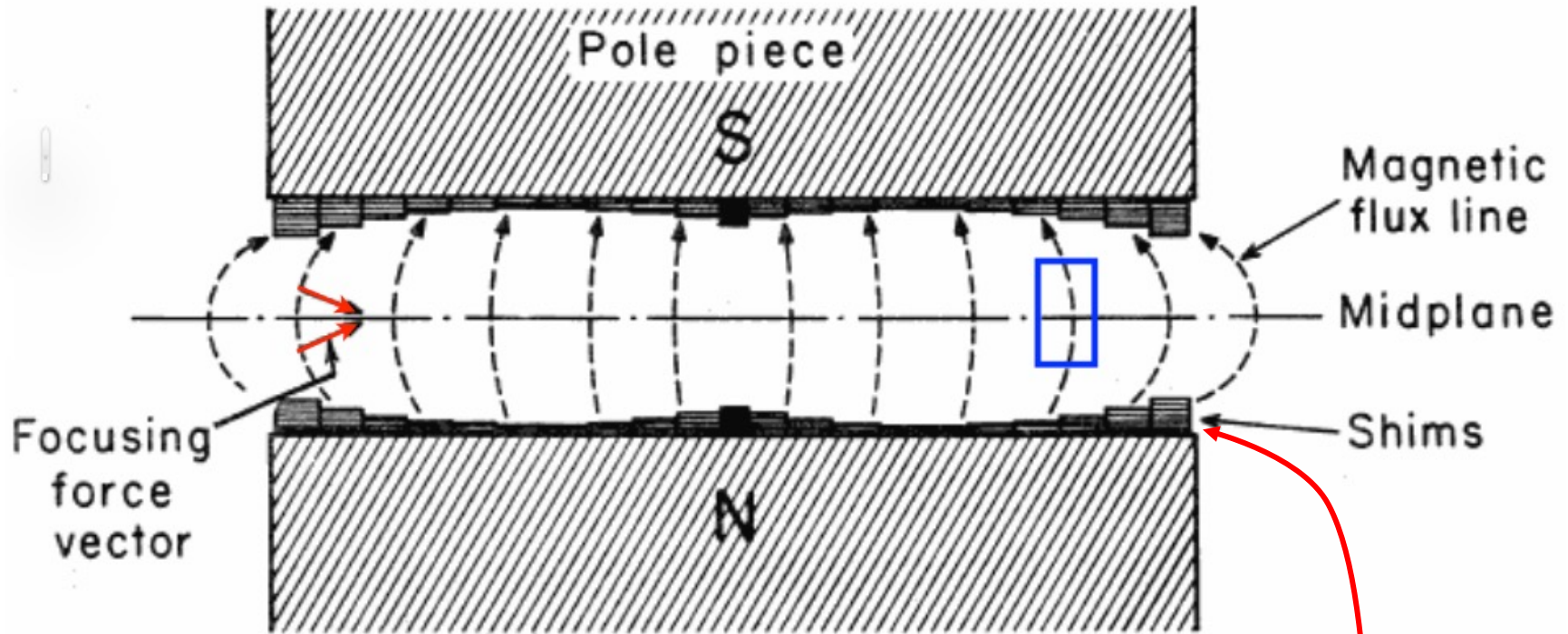
Κύκλωτρο στο Triumph



Κύκλοτρο

- ❑ Ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο κάθετο στην διεύθυνση κίνησης του σωματιδίου κρατά το σωματίδιο σε κυκλική τροχιά αλλά δεν μπορεί να διορθώσει αποκλίσεις που μπορεί να υπάρχουν ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Δηλαδή αν το σωματίδιο έχει συνιστώσα ορμής ως προς τον z-άξονα τότε μπορεί να χτυπήσει πάνω ή κάτω στα ηλεκτρόδια.
- ❑ Ο Lawrence ανακάλυψε γρήγορα ότι αν το μαγνητικό πεδίο δεν είναι απόλυτα ομοιόμορφο και υπάρχουν ατέλειες στα άκρα τότε τα κύκλοτρα δουλεύουν καλύτερα.
- ❑ Η μαγνητική δύναμη είναι κάθετη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Επομένως αν οι δυναμικές γραμμές καμπυλώνουν προς τα έξω, τότε ένα σωματίδιο το οποίο βρίσκεται πάνω από το μεσαίο οριζόντιο επίπεδο θα κινηθεί προς τα κάτω ενώ αυτό που είναι κάτω από το επίπεδο θα κινηθεί προς τα πάνω ερχόμενο στο σωστό επίπεδο
- ❑ Αυτό αποτελεί την **κάθετη εστίαση**

Σχεδιασμός του μαγνήτη του κύκlotrou



- Προστίθεται υλικό ώστε να μετατραπεί το σχήμα των δυναμικών γραμμών και να επιτευχθεί πιο εύκολα εστίαση των σωματιδίων

Όριο κύκλου

□ Υπολογίζουμε την περίοδο του κύκλου λαμβάνοντας υπόψη και σχετικότητα:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi R}{\beta c} \quad \text{αλλά} \quad \beta = \frac{pc}{E} \quad \text{και} \quad p = qBR \Rightarrow R = p/(qB)$$

$$\text{Αντικαθιστώντας θα έχουμε:} \quad T = \frac{2\pi (p/qB)}{(pc/E)c} = \frac{2\pi}{qB} \frac{E}{c^2}$$

$$\text{Για μη σχετικιστικά σωματίδια έχουμε: } \frac{E}{c^2} \sim m \quad \text{οπότε} \quad T = \frac{2m\pi}{qB} \quad \text{κλασικό όριο}$$

Όταν η κινητική ενέργεια γίνεται συγκρίσιμη με την μάζα ηρεμίας τότε η περίοδος γίνεται μεγαλύτερη. Αυτό προκαλεί το σωματίδιο να βρεθεί εκτός φάσης με την RF συχνότητα με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται αντί να επιταχύνεται

Για το κύκλο των 4.5m, μαγνητικό πεδίο 2.2T και ακτίνα τροχιάς 2.08m δίνει στο σωματίδιο ορμή $p = 1373 \text{ MeV}/c$. Επειδή $pc = \beta\gamma mc^2$ και $mc^2 = 938 \text{ MeV}$ για τα πρωτόνια, σημαίνει ότι $\beta\gamma = 1.463$ ενώ $\gamma = 1.772$

Η κινητική ενέργεια θα ήταν $0.772mc^2$ επομένως 724 MeV .

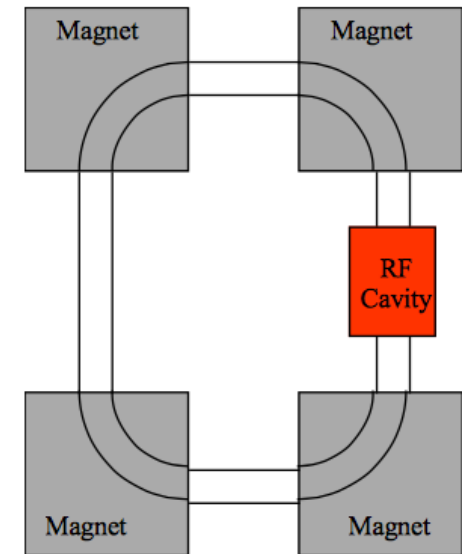
Η περίοδος όμως θα είναι 77% μεγαλύτερη από την περίοδο της μικρότερης τροχιάς. Σαν αποτέλεσμα το σωματίδιο θα βρεθεί εκτός φάσης και η επιτάχυνση σταματά

Σύγχρο-κύκλοτρο

- ❑ Ένας τρόπος για να λύσουμε το πρόβλημα είναι να αυξήσουμε την RF περίοδο να προσαρμοστεί στην αυξημένη περίοδο τροχιάς καθώς το σωματίδιο επιταχύνεται
- ❑ Η μέθοδος αυτή ονομάζεται συγχρο-κύκλοτρο
- ❑ Η τεχνολογία και κατασκευή των RF πηγών γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη και ακριβή χρηματικά. Η δέσμη επίσης πρέπει να είναι σε πακέτα αντί για συνεχής και επομένως η ένταση της δέσμης ελαττώνεται
- ❑ Ωστόσο ήταν επιτυχής αφού για το 4.5m κύκλοτρο έδωσε τελικά ενέργεια 730 MeV με πλήρη εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου και του μεγέθους του κύκλοτρο

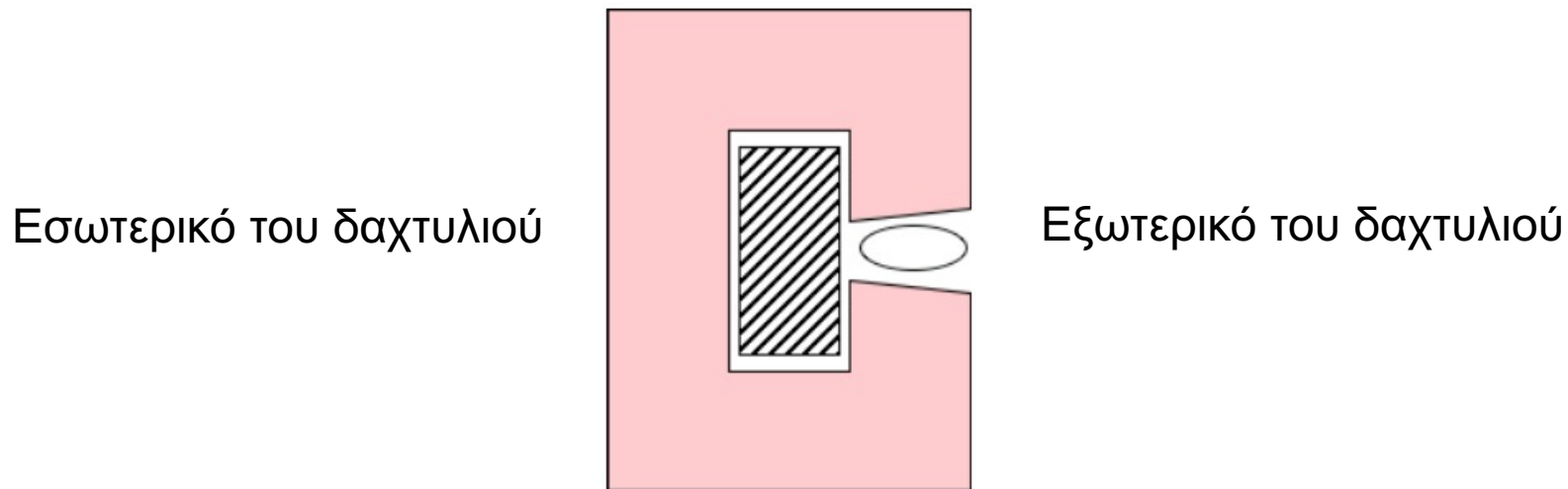
Σύγχροτρο

- ❑ Ενώ κύκλωτρα με μεταβαλλόμενη RF συχνότητα θα μπορούσαν να φθάσουν (δύσκολα) σε ενέργειες για παραγωγή πιονίων, οποιαδήποτε προσπάθεια για μεγαλύτερες ενέργειες θα ήταν πρακτικά αδύνατη χωρίς να απαιτηθεί η κατασκευή μεγαλύτερων και πολύ ακριβότερων μαγνητών
- ❑ Ένα σύγχροτρο έχει σταθερή ακτίνα τροχιάς.
Το μαγνητικό πεδίο χρειάζεται μόνο κοντά στην τροχιά
- ❑ Αυτό επιτρέπει την τροχιά να είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί σε ένα κύκλωτρο και επομένως η ενέργεια θα είναι πολύ μεγαλύτερη
- ❑ Το μαγνητικό πεδίο πρέπει να αυξηθεί καθώς η ορμή του σωματιδίου αυξάνει, το οποίο ισοδυναμεί με την απαίτηση για αύξηση του ρεύματος των μαγνητών
- ❑ Το μαγνητικό μειώνεται και πάλι για την εισαγωγή νέας δέσμης σωματιδίων
- ❑ Το σύγχροτρο επομένως δίνει παλμική δέσμη (σε πακέτα) ή μπορεί να αποθηκεύσει δέσμη.
- ❑ Η RF επιταχύνουσα συχνότητα θα πρέπει επίσης να αλλάζει κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης όπως χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση του συγχρονκύκλωτρου.



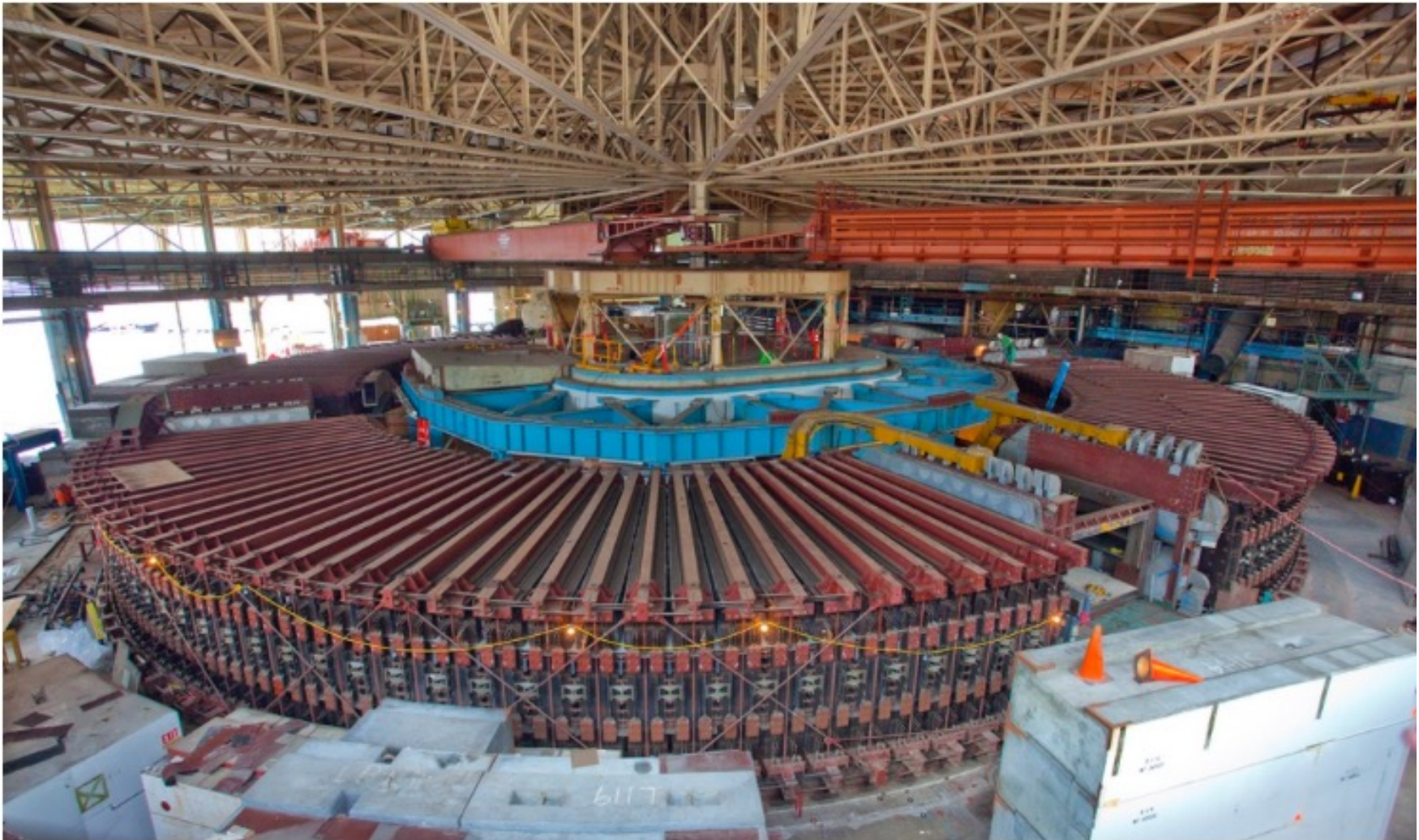
Εστίαση σύγχροτρου

- ❑ Τα πρώτα σύγχροτρα κατασκευάστηκαν στο Berkeley Cosmotron, $E=3\text{GeV}$ (1953)
Betatron, $E = 6\text{GeV}$ (1954)
- ❑ Χρησιμοποίησαν την ίδια τεχνική εστίασης με τα κύκλοτρα: το πεδίο καμπύλωσης ήταν ασθενέστερο σε μεγάλες ακτίνες χρησιμοποιώντας μη παράλληλες επιφάνειες πόλων ώστε να επιτευχθεί ασθενής κάθετη εστίαση
- ❑ Οριζόντια εστίαση δόθηκε από την καμπύλωση της δέσμης



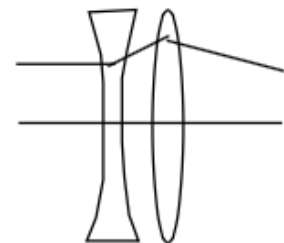
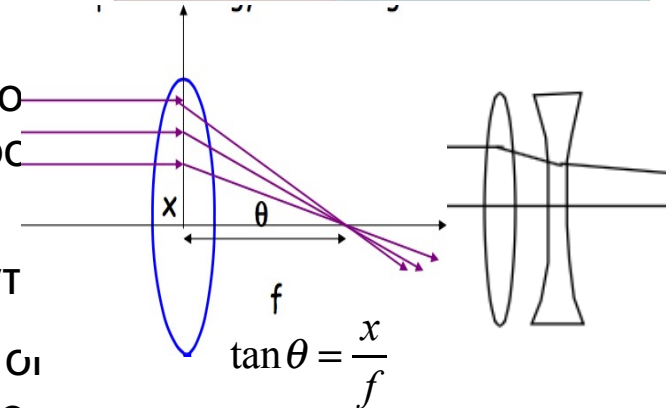
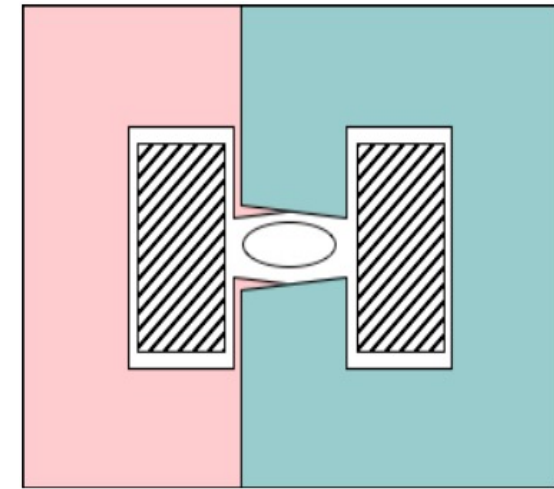
Bevatron

Το Bevatron ολοκληρώθηκε το 1954 και είχε άνοιγμα μαγνήτη 4 πόδια (1.2m) και ήταν 1m ψηλό. Ζύγιζε 10000 τόνους και γέμισε ένα κτήριο



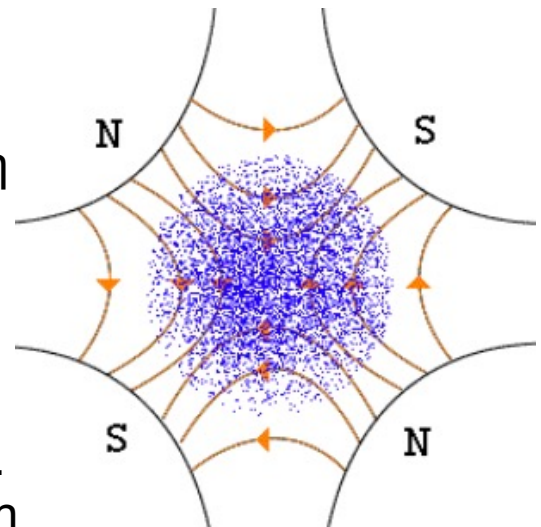
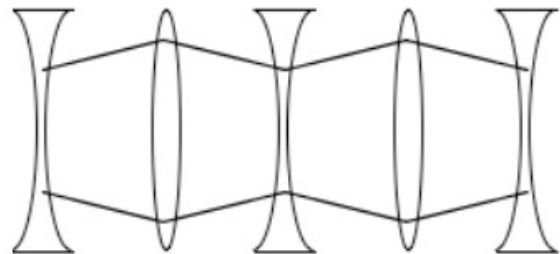
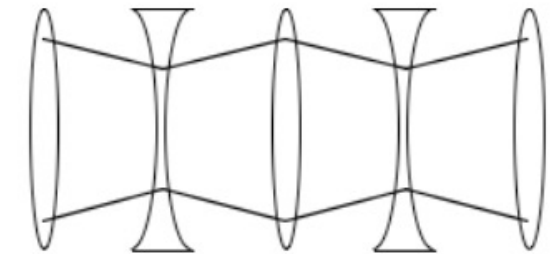
Ισχυρή εστίαση

- Η ενέργεια που μπορούσε να επιτευχθεί περιορίζονταν από το γεγονός ότι παρουσιάζονταν κορεσμός στο στενό εσωτερικό τμήμα του μαγνήτη
- Ανάπτυξη της ιδέας να χρησιμοποιηθούν μαγνήτες τοποθετημένοι ανάποδα
- Κάποιος θα έλεγε ότι η διάταξη αυτή θα αναιρούσε την εστίαση. Δηλαδή οι μισοί μαγνήτες θα προκαλούσαν εστίαση και οι άλλοι μισοί αντίθετη εστίαση με μηδενικό καθαρό αποτέλεσμα
- Ένας συγκλίνοντας φακός προσδίδει ένα λάκτισμα στο εσωτερικό ανάλογο προς την απόσταση από το κέντρο
- Ένας αποκλίνοντας φακός δίνει ένα λάκτισμα προς το εξωτερικό ανάλογο προς την απόσταση από το κέντρο
- Και στις δυο περιπτώσεις οι σταθερές αναλογίας είναι οι ίδιες, αλλά στον αποκλίνοντα φακό η απόσταση από το κέντρο είναι μικρότερη με αποτέλεσμα το λάκτισμα μικρότερο
- Επομένως το καθαρό αποτέλεσμα της συνδυαστικής εφαρμογής δεν είναι μηδενικό και η εστίαση υπερισχύει.
- Το αποτέλεσμα είναι θετικό ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί αρχικά αποκλίνοντας φακός ακολουθούμενος από συγκλίνοντα



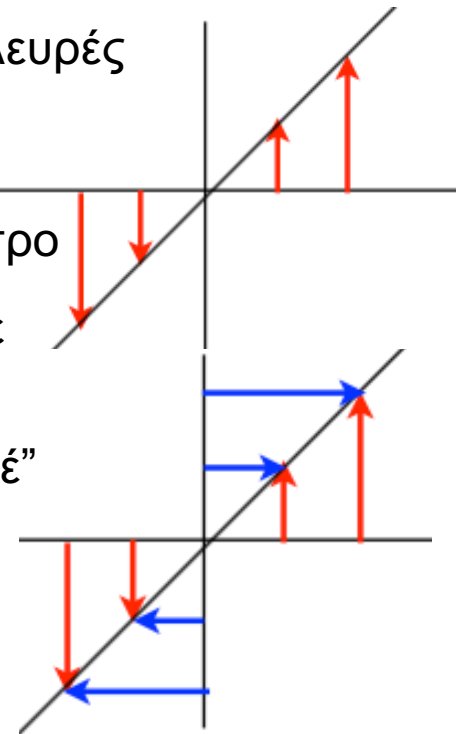
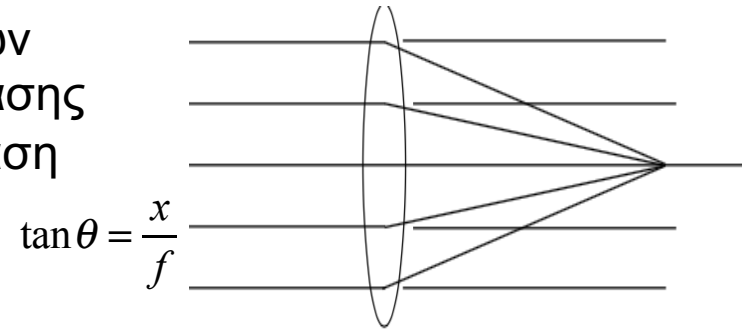
Ισχυρή εστίαση

- ❑ Η χρήση ενός μαγνητικού πεδίου για εστίαση σε μια διεύθυνση ωστόσο προκαλεί απόκλιση στην άλλη διεύθυνση. Σύγκλιση στην κάθετη διεύθυνση προκαλεί απόκλιση στο οριζόντιο επίπεδο
- ❑ Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μαγνήτες που εναλλάσσουν Σύγκλιση (focus) και Απόκλιση (defocus)
- ❑ Η διάταξη που λαμβάνουμε είναι μια Focus Defocus αλυσίδα που ονομάζεται FODO (focusing ακολουθούμενη από κενό, μετά defocusing κλπ)
- ❑ Το καθαρό αποτέλεσμα είναι σύγκλιση και εστίαση και στα δυο επίπεδα
- ❑ Μια άλλη τεχνική που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί ισχυρή εστίαση εναλλασσόμενης βαθμίδας και επιτρέπει πολύ καλύτερα αποτελέσματα εστίασης
 - Μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η χρήση μαγνητών με πόλους πιο στενούς και πιο κοντά μεταξύ τους. Έτσι απαιτείται λιγότερος χαλκός και σίδηρος για την κατασκευή τους. Φθινότεροι και αρα μπορούμε να αυξήσουμε την ακτίνα της περιστροφής
- ❑ Μεγάλο όφελος με χρήση διαφορετικού είδους μαγνητών. Διπολικούς για καμπύλωση και τετραπολικούς για εστίαση



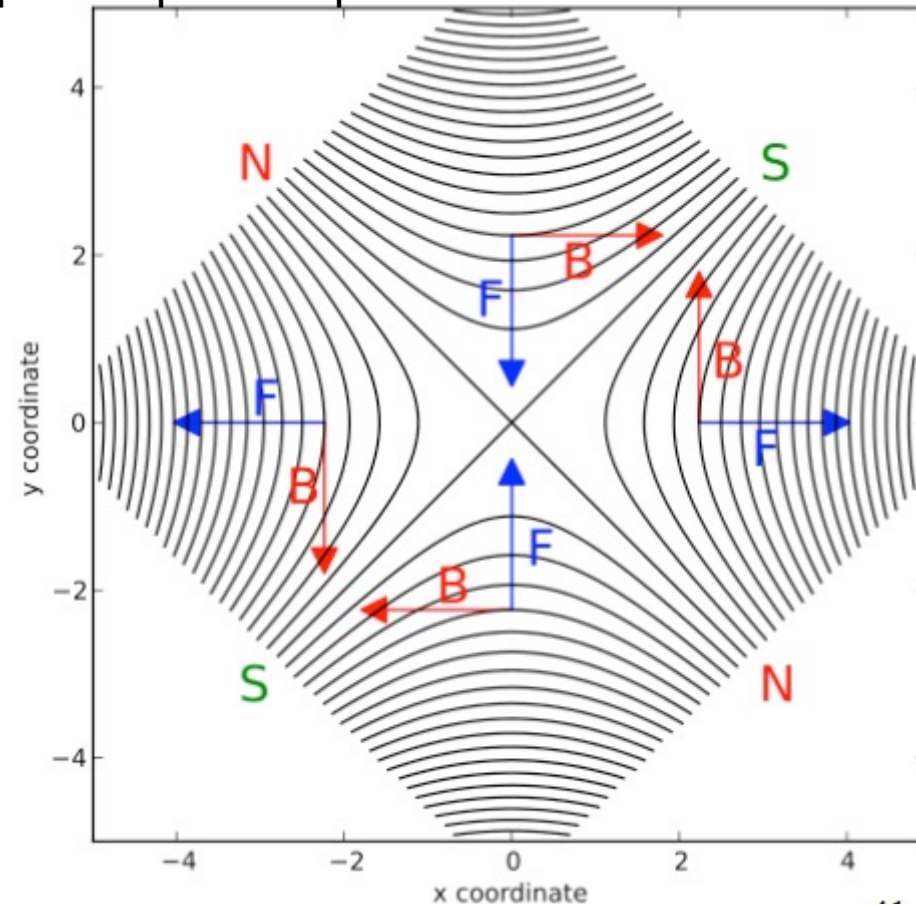
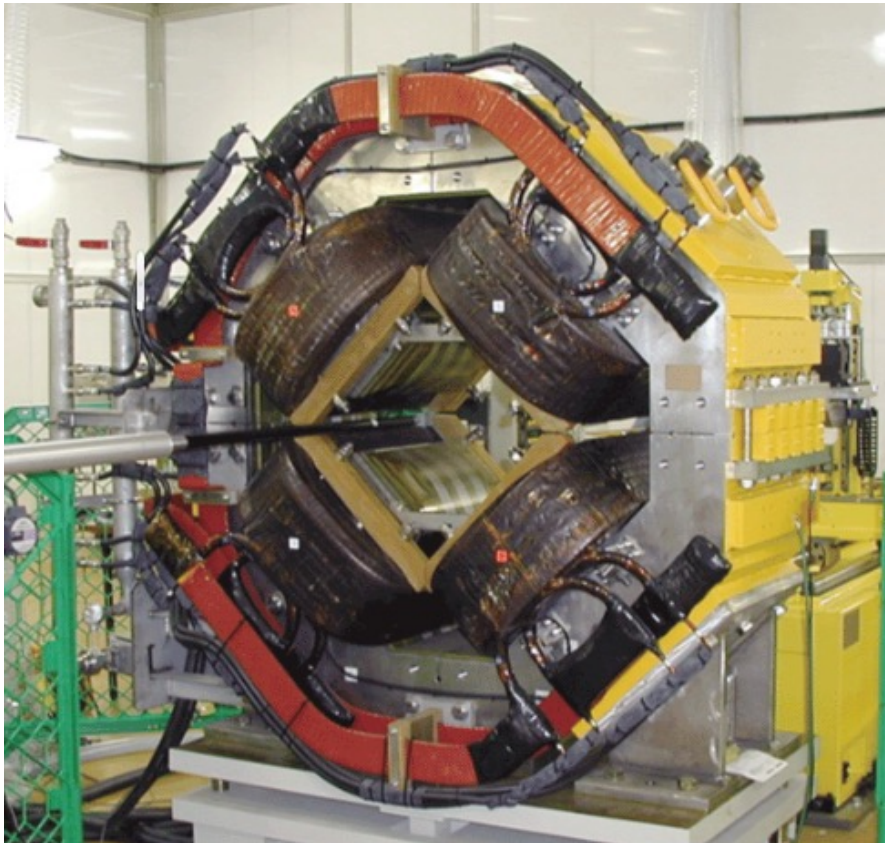
Μαγνητικός φακός

- ❑ Για να εστιαστεί μια παράλληλη δέσμη σωματιδίων σε συγκεκριμένο σημείο, θα πρέπει η γωνία εστίασης να είναι ανάλογη της απόστασης από την απόσταση από το κέντρο του φακού
- ❑ Ένας μαγνητικός φακός θα πρέπει να έχει μαγνητικό πεδίο B το οποίο αυξάνει με την απόσταση από το κέντρο
- ❑ Θα πρέπει επίσης να έχει αντίθετο πρόσημο στις αντίθετες πλευρές ώστε να επιτυγχάνει εστίαση στο οριζόντιο επίπεδο
- ❑ Από την στιγμή που $\vec{\nabla} \times \vec{B} \neq 0$ τότε η παραπάνω προσπάθεια δεν μπορεί να επιτευχθεί εκτός και αν υπάρχει ρεύμα στο κέντρο
- ❑ Προσθέτοντας ένα οριζόντιο πεδίο το οποίο επίσης αυξάνει με την απόσταση από το κέντρο το πεδίο θα έχει $\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$
- ❑ Το “κόκκινο” πεδίο εστιάζει στο οριζόντιο επίπεδο ενώ το “μπλέ” πεδίο αποκλίνει κάθετα



Τετραπολικό μαγνήτες για εστίαση

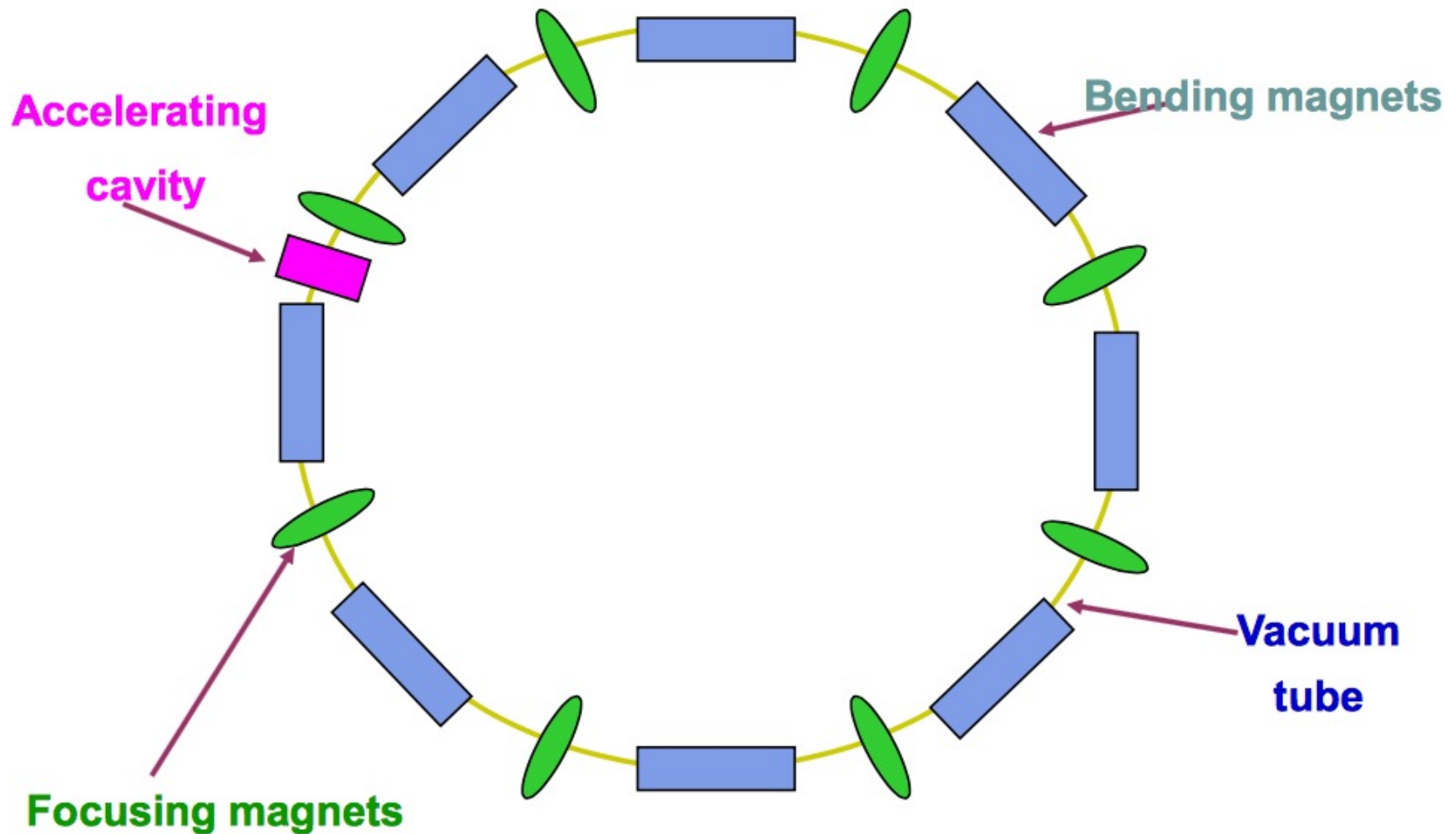
- Η ένταση του πεδίου αυξάνει γραμμικά με την απόσταση από το κέντρο και συγκλίνει την δέσμη κατακόρυφα.
- Παράλληλα αποκλίνει την δέσμη οριζόντια
- Χρησιμοποιούμε διατάξεις σε εναλλαγή για καλή εστίαση



Μεγάλα σύγχροτρα

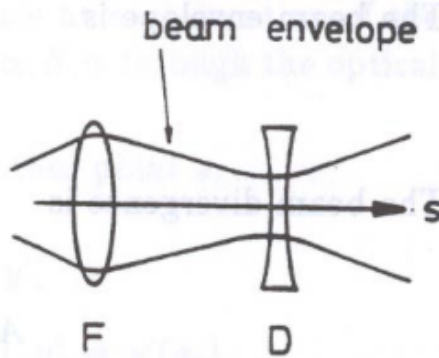
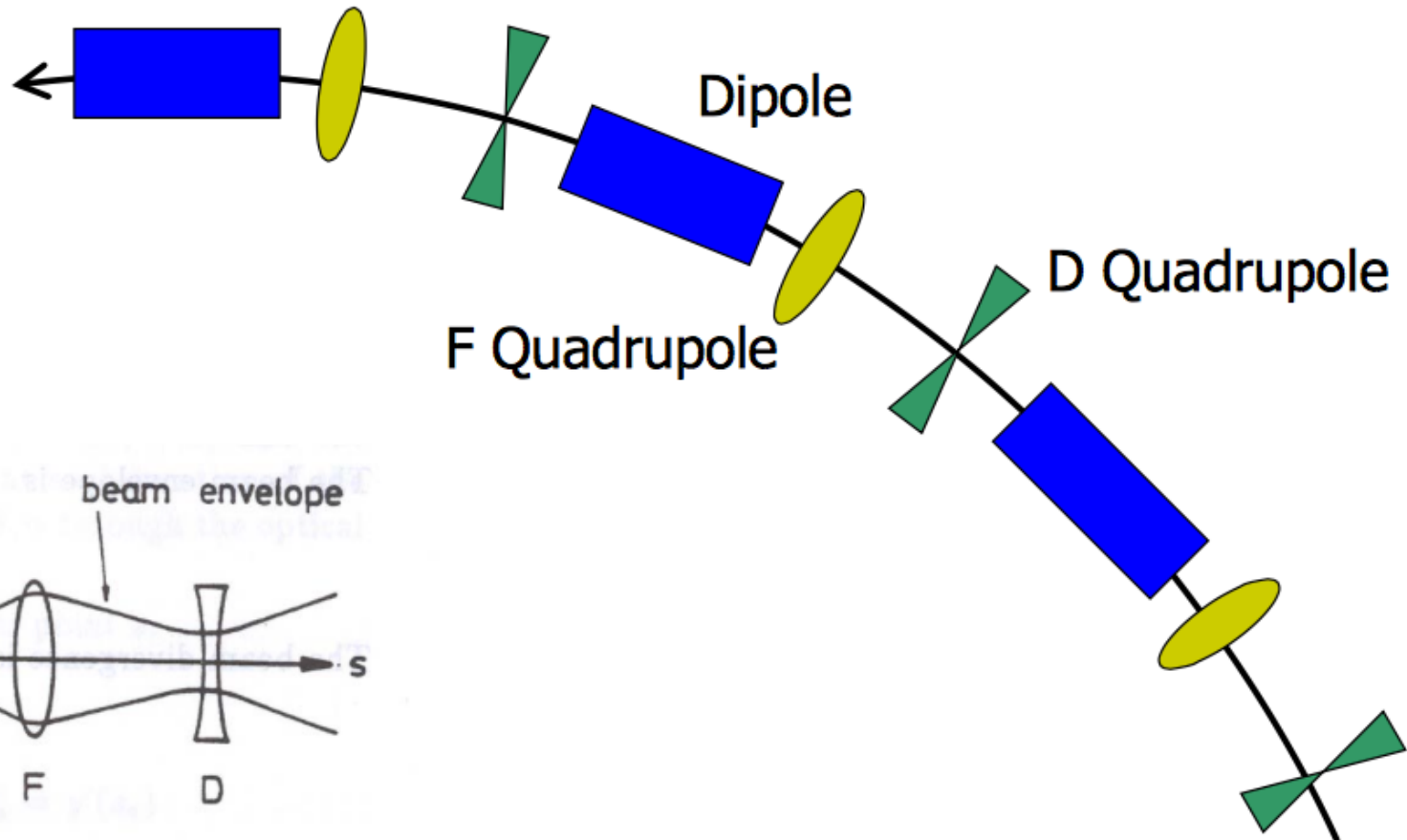
- ❑ Τα πρώτα μεγάλα σύγχροτρα κατασκευάστηκαν στη δεκαετία του 1960
 - ❑ CERN Proton Synchrotron (PS) έφθανε σε ενέργειες 25 GeV
 - ❑ Brookhaven AGS (Alternating Gradient Synchrotron) έφθασε σε ενέργεια 33 GeV
- ❑ Το 1972 κατασκευάστηκε στο Fermilab το κεντρικό δαχτυλίδι (Main ring) ενώ το 1976 στο CERN κατασκευάστηκε το SPS (Super Proton Synchrotron) φθάνοντας σε ενέργειες δέσμης πρωτονίων της τάξης των 400 GeV
 - ❑ Ακτίνες των δυο αυτών επιταχυντών της τάξης των $R = 1000\text{m}$
- ❑ Στο Fermilab, χρησιμοποιώντας υπεραγώγιμους μαγνήτες και την ίδια ακτίνα επιτεύχθηκαν ενέργειες δέσμης 1 TeV
- ❑ Το LHC (Large Hadron Collider) έχει ακτίνας 4200m και σχεδιάστηκε για λειτουργία σε ενέργειες δέσμης 7 TeV χρησιμοποιώντας υπεραγώγιμους μαγνήτες.

Σχεδιασμός ενός σύγχροτρου



Bending and focussing often combined

Απλό πλέγμα σύγχροτρου



FODO Cell

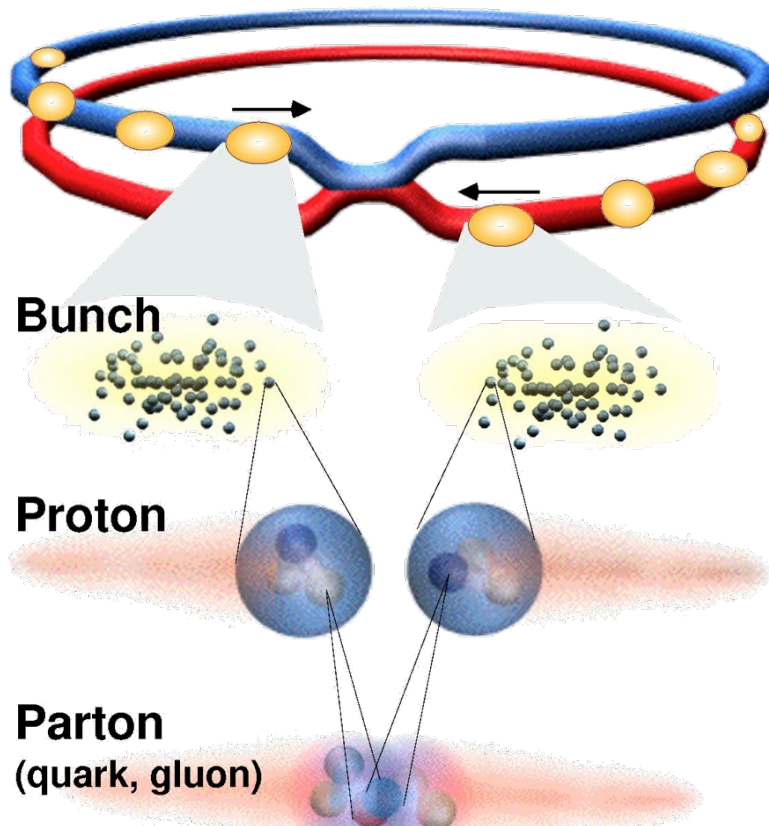
Fermilab



LHC



Αδρονικές Συγκρούσεις στον LHC: με μια ματιά



Proton-proton: 2808 πακέτα/δέσμη

Protons/bunch: 10^{11}

Ενέργεια δέσμης: 3.5, 4, 7 TeV

Φωτεινότητα: $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Συχνότητα περιστροφής: 40MHz

Συχνότητα συγκρούσεων: 10^7 – 10^9

Συχνότητα γεγονότων νέας φυσικής:
 10^{-5}Hz

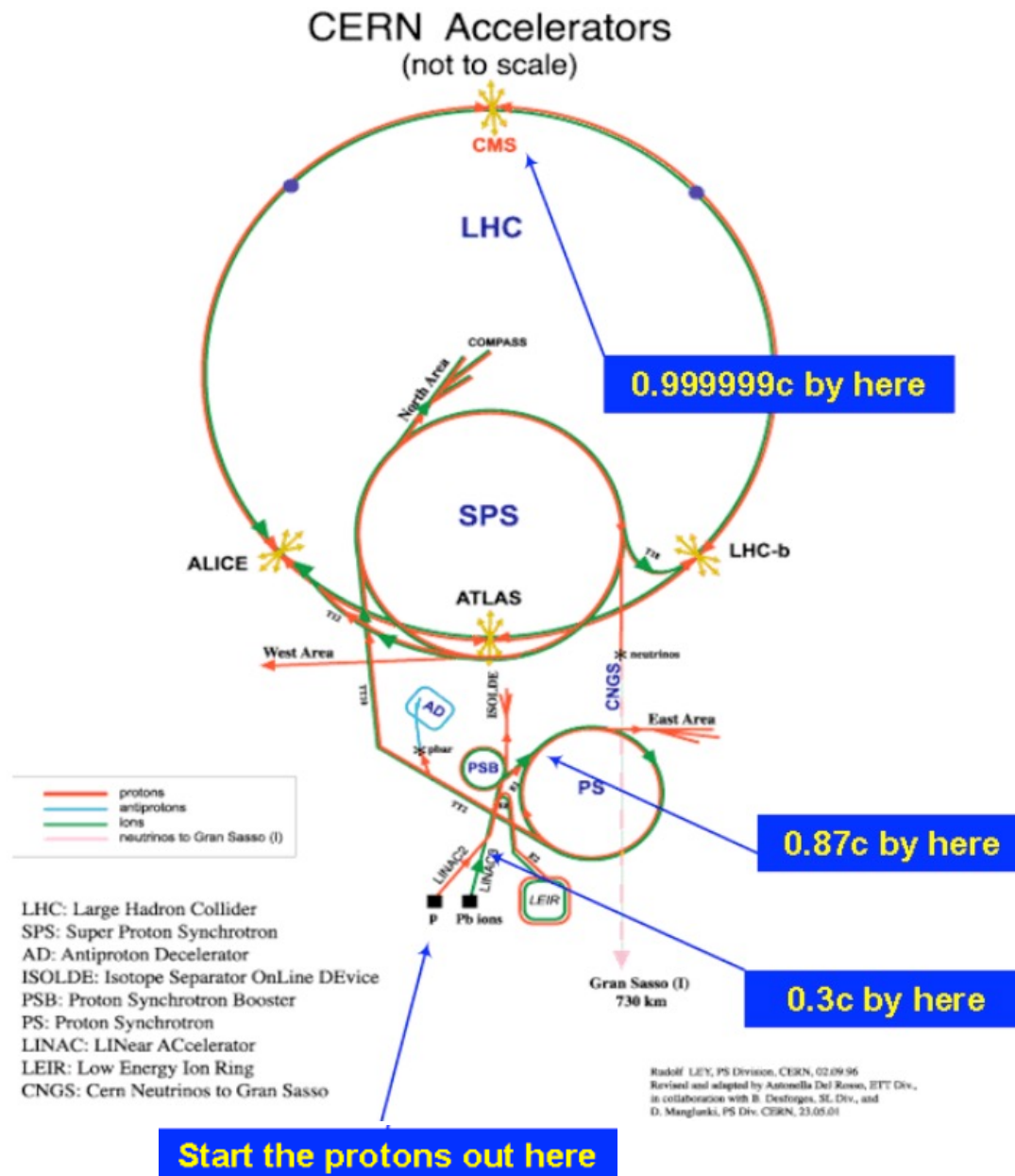
Συχνότητα επιλογής γεγονότων:

1 κάθε **10,000,000,000,000**

Συμπλέγματα επιταχυντών

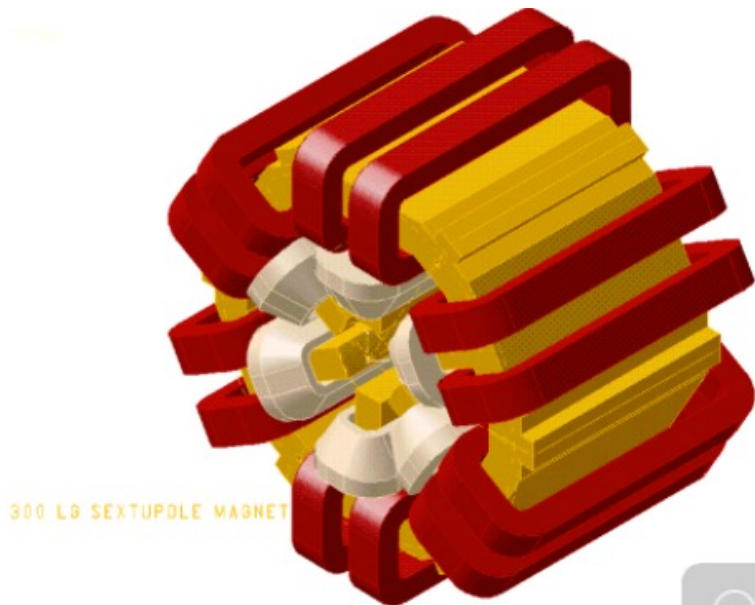
- ❑ Τα σύγχροτρα δεν μπορούν να επιταχύνουν δέσμες σωματιδίων ξεκινώντας από μηδενική ενέργεια όπως συμβαίνει σε ένα κύκλοτρο.
- ❑ Χρειάζεται πάντοτε κάποιο επιταχυντικό σύστημα να δώσει μια αρχική ενέργεια στην δέσμη η οποία κατόπιν θα πρέπει να εισαχθεί στο σύγχροτρο
- ❑ Το προ-επιταχυντικό σύστημα είναι συνήθως ένας DC επιταχυντής, ακολουθούμενος από γραμμικό τμήμα με RF κοιλότητες
- ❑ Επειδή το εγκάρσιο προφίλ της ορμής της δέσμης των σωματιδίων παραμένει αρκετά σταθερό καθώς η διαμήκης ορμή της δέσμης αυξάνει, η διάμετρος της δέσμης ελαττώνεται καθώς επιταχύνεται σε μεγαλύτερη ενέργεια.
- ❑ Το διάφραγμα (άνοιγμα) των μαγνητών και επομένως το κόστος εξαρτάται και προσδιορίζεται από την ορμή της εισαγωγής στο σύγχροτρο
- ❑ Ένα μεγάλο σύγχροτρο τροφοδοτείται από ένα σύγχροτρο μικρότερης διαμέτρου το οποίο περιλαμβάνει μαγνήτες μεγαλύτερου διαφράγματος και επομένως μεγαλύτερου κόστους

Σύμπλεγμα του LHC



Ατέλειες επιταχυντών

- ❑ Οι επιταχυντές δεν είναι τέλειοι
- ❑ Θα πρέπει να διορθωθούν μή ευθυγραμμίσεις καθώς και ατέλειες πεδίων
- ❑ Διορθώσεις για μη γραμμική συμπεριφορά των πεδίων και ταχυτήτων
- ❑ Ανάγκη για διαγνωστικά εργαλεία και μαγνητικές διορθώσεις
- ❑ Προσομιώσεις της συμπεριφοράς είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες και απαραίτητες
- ❑ Για παράδειγμα εξαπολικοί μαγνήτες χρησιμοποιούνται για διόρθωση της ενέργειας των σωματιδίων που δεν ακολουθούν τα υπόλοιπα



Επιταχυντές ηλεκτρονίων

- ❑ Κυρίως γραμμικοί επιταχυντές
- ❑ Η ενέργεια της δέσμης περιορίζεται λόγω εκπομπής ακτινοβολίας από τα ηλεκτρόνια που είναι ιδιαίτερα ελαφρά σωματίδια.
- ❑ Η ακτινοβολία σύγχροτρο: εξαιτίας της κυκλικής επιτάχυνσης, κάθε ηλεκτρόνιο εκπέμπει ακτινοβολία, η ενέργεια της οποίας ανα περιστροφή και σωματίδιο είναι

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{e^2 \beta^3 \gamma^4}{\rho}$$

ρ : ακτίνα καμπυλότητας β : ταχύτητα σωματιδίου γ : παράγοντας Lorentz

- ❑ Ο λόγος απώλειας ενέργειας λόγω σύγχροτρο ακτινοβολίας για δέσμες ηλεκτρονίων και πρωτονίων είναι επομένως (για σωματίδια ίδιας ορμής) είναι $\left(m_e/m_p\right)^4$ τα πρωτόνια χάνουν 10^{13} φορές λιγότερη ενέργεια από τα ηλεκτρόνια

Για ηλεκτρόνια ενέργειας 10 GeV που κινείται σε επιταχυντή ακτίνας $R=1\text{km}$, η απώλεια ενέργειας είναι 1MeV/στροφή και φθάνει στα 16 MeV/στροφή για ενέργειες $E=20\text{ GeV}$

Βασικά πλεονεκτήματα επιταχυντών λεπτονίων είναι η καθαρότητα του περιβάλλοντος σκέδασης από δευτερογενή σωματίδια αφού τα λεπτόνια δεν έχουν εσωτερική δομή, καθώς επίσης και η γνώση της ενέργειας του κέντρου μάζας της σύγκρουσης.

Σύγχροτρα πρωτονίων

- ❑ Ο ρυθμός συγκρούσεων στις περιοχές που γίνεται η διασταύρωση της δέσμης είναι μικρός εν γένει
- ❑ Ορίζεται η ρυθμός αντιδράσεων από την σχέση: $R = \sigma L$
όπου σ είναι η ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης και L η φωτεινότητα της δέσμης που μετράται σε μονάδες $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- ❑ Για συγκρουόμενες δέσμες σε αντίθετη κατεύθυνση και φορά, η φωτεινότητα ορίζεται από την σχέση:

$$L = fn \frac{N_1 N_2}{A}$$

όπου N_1 και N_2 είναι ο αριθμός των σωματιδίων κάθε ομάδας/πακέτου της δέσμης
 A είναι η επιφάνεια διατομής των δεσμών (θεωρώντας ότι οι δέσμες αλληλεπικαλύπτονται πλήρως)

f είναι η συχνότητα περιστροφής του επιταχυντή

n είναι ο αριθμός των πακέτων που αποτελούν τη δέσμη

- ❑ Τυπικές τιμές για επιταχυντές ηλεκτρονίων είναι $10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ και για επιταχυντές πρωτονίων όπως ο LHC της τάξης του $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- ❑ Οι επιταχυντές αδρονίων είναι επιταχυντές που μπορούν να επιτύχουν μεγάλες ενέργειες. Επομένως χρησιμοποιούνται για ανακαλύψεις αν και το περιβάλλον που παρέχουν είναι μεγάλης δραστηριότητας και δεν γνωρίζουμε την ενέργεια CM