

Εισαγωγή στη Φυσική των Επιταχυντών

Γ. Παπαφιλίππου
Τμήμα Επιταχυντών - CERN

Επιμορφωτικό πρόγραμμα Ελλήνων καθηγητών
CERN, Αυγустος 2010

- Μελέτη των δομικών λίθων της ύλης
 - Φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων
 - Φασματοσκοπία
 - Ακτίνες X
 - Νετρόνια
- Εφαρμοσμένες επιστήμες
 - Medicine
 - Τομογραφία
 - Χειρουργική
 - Θεραπεία καρκίνου
 - Χημεία - Βιολογία
 - Αποστείρωση τροφών
 - Αλλαγή ιδιοτήτων υλικών (nuclear waste transmutation)
 - Παραγωγή ενέργειας
 - Πολλαπλαστής ενέργειας
 - Αδρανειακή σύντηξη με επιταχυντή βαρέων ιόντων

- Ενέργεια

- ο Η ενέργεια μετρείται σε **electronVolt**, $1\text{eV}=1.6022 \times 10^{-19}\text{J}$ και υψηλότερες τάξεις αυτού (π.χ. keV, MeV, GeV, TeV)
- ο Η ορμή είναι $c p = \frac{v}{c} E$ και η κινητική ενέργεια $E_{kin} = E - E_0$. Για σχετικιστικά σωματίδια $c p \approx E \approx E_{kin}$ όλες οι ποσότητες αναφέρονται ως «ενέργεια».
- ο Η ορμή μετρείται σε eV/c
- ο Για βαρέα ιόντα, η ενέργεια αναφέρεται σε κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο

- Ρεύμα δέσμης

- ο Μετρημένο σε Amperes (ή κυρίως σε χαμηλότερες τάξεις, mA και μA)
- ο Αναφέρεται και ως «ένταση» της δέσμης

- Ισχύς δέσμης

- ο Μετρείται σε Watts (η σέ παράγωγα του, kW και MW)

- Μαγνητική Επαγωγή

- ο Αναφέρεται ως μαγνητικό πεδίο και μετρείται σε Tesla ή Gauss ($1\text{Tesla}=10000\text{Gauss}$)

- Εξίσωση Lorentz

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- E_{tot} : Ολική ενέργεια

T : Κινητική ενέργεια

$$E_{tot}^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 = (T + m_0 c^2)^2$$

- β : «κανονικοποιημένη» ταχύτητα

$$\beta = \frac{v}{c}$$

γ : «κανονικοποιημένη» ενέργεια

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$$

$\beta\gamma$: «κανονικοποιημένη» ορμή

$$\beta\gamma = \frac{p}{mc}$$

Ιστορική Αναδρομή

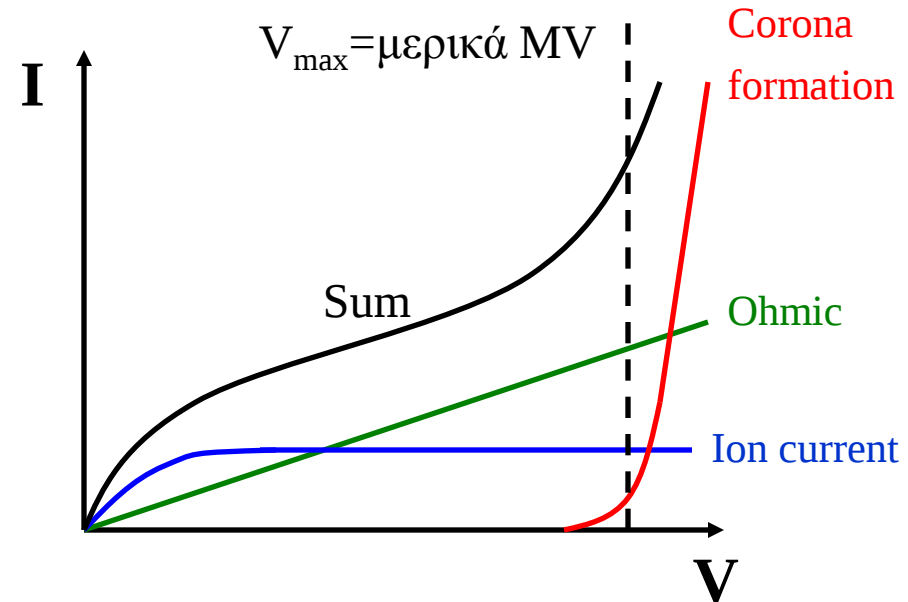
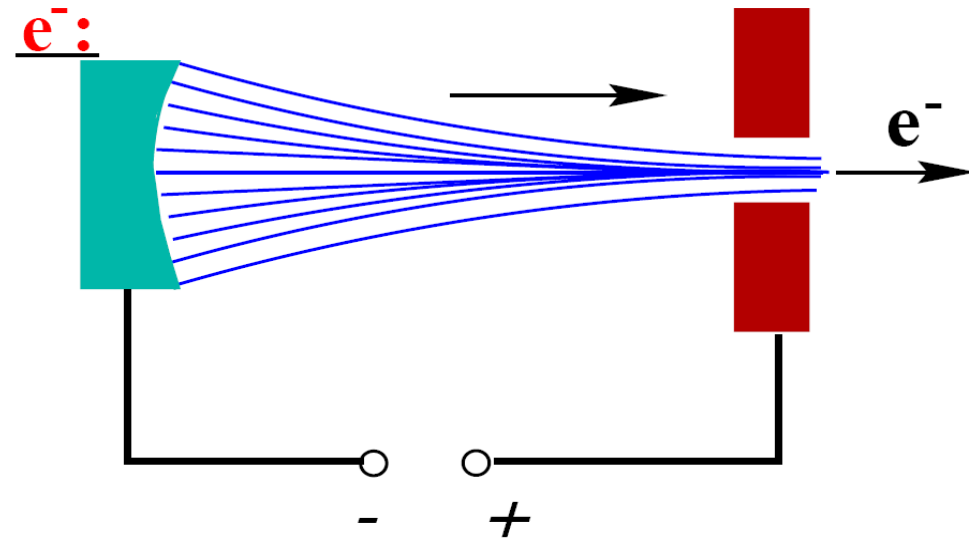
Η κούρσα για υψηλότερες ενέργειες



Επιταχυντές συνεχούς τάσεως



- Ο απλούστερος επιταχυντής (καθοδικοί σωλήνες, οθόνες...)
 - ο Πηγή σωματιδίων στο **μπλέ** ηλεκτρόδιο, επιτάχυνση σε ηλεκτρικό πεδίο και έξοδος στο **κόκκινο** ηλεκτρόδιο
 - ο Ενέργειες ανάλογες της εφαρμοζόμενης τάσης
 - ο Το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά για μεγάλες τάσεις δημιουργώντας σπινθήρες και απώλεια της τάσης (σχηματισμός κορώνας)

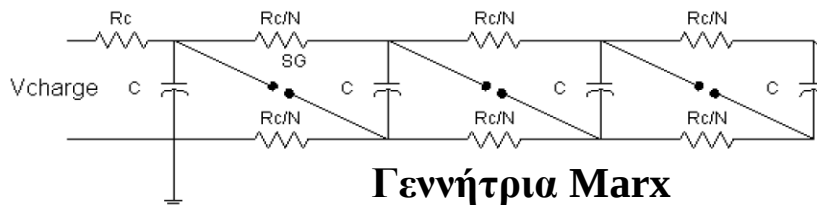
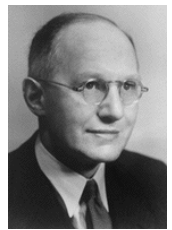


Πολλαπλασιαστής τάσης

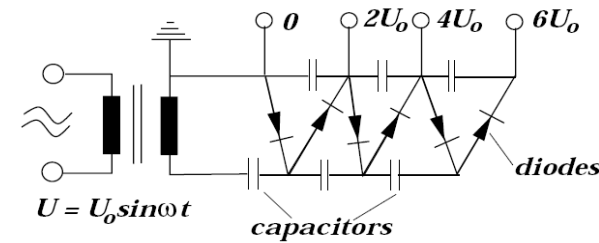


- **Πρόβλημα:** δημιουργία υψηλής τάσης για επίτευξη υψηλότερης ενέργειας
- Οι **Cockcroft** και **Walton**(1932) ανέπτυξαν μια γεννήτρια βασισμένη σε πολλαπλούς ανορθωτές
- Αρχή λειτουργίας του κυκλώματος Greinacker
 - Τροφοδοτικό εναλλασσόμενης τάσης $V = V_0 \sin(\omega t)$
 - 2N δίοδοι (ρεύμα τρέχει σε μία διεύθυνση) ώστε σε κάθε δύο πυκνωτές η μέγιστη τάση είναι $2V_0, 4V_0, 6V_0, \dots, 2NV_0$
 - Τάση 4MV μπορεί να επιτευχθεί για δέσμες 100άδων mA
- Οι Cockcroft και Walton χρησιμοποίησαν έναν τέτοιο επιταχυντή για να βομβαρδίσουν άτομα Li με πρωτόνια, προκαλώντας ατομική αντίδραση και παραγωγή 2 πυρήνων (Βραβείο Nobel 1951)
- Η γεννήτρια Marx (1932) αποτελείται από σειρά αντιστάσεων και πυκνωτών υπό υψηλή συνεχή τάση V_{charge}
 - Όταν δημιουργείτε αποφόρτιση με σπινθήρα, λόγω της υψηλής αντίστασης, οι N πυκνωτές συνδεδεμένοι δίνουν ολική τάση NV_{charge}

Fermilab cascade γεννήτρια



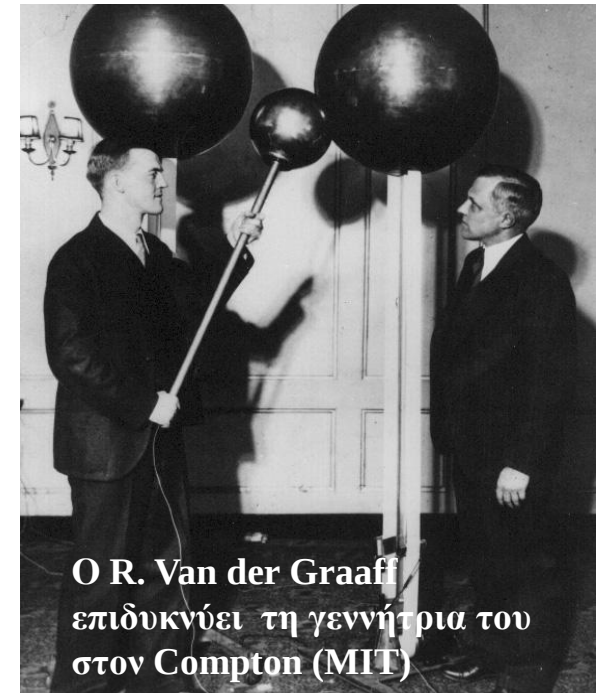
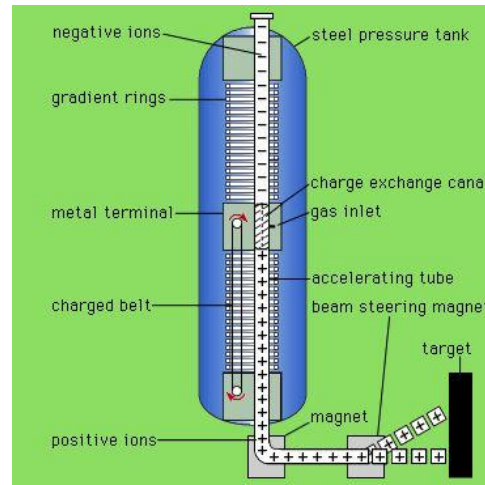
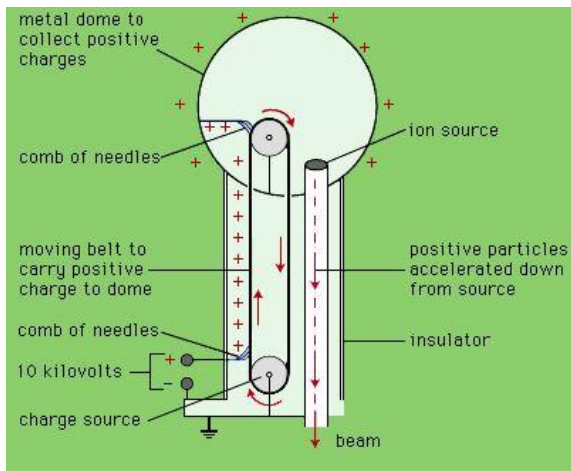
Κύκλωμα Greinacker



Γεννήτρια Van der Graaff (1930)

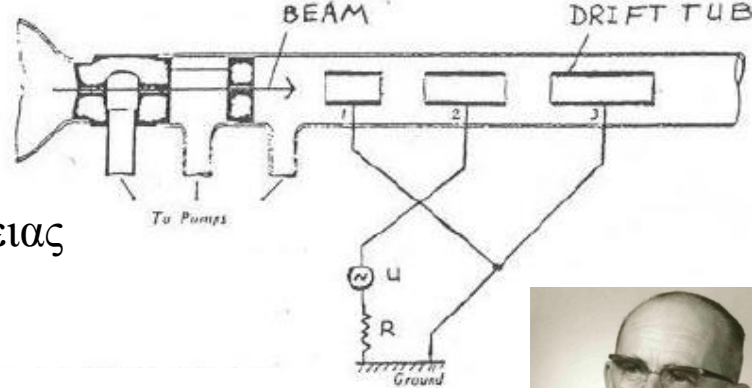


- Φορτία από παραγωγή κορώνας μεταφέρονται μέσω μονωτικού ιμάντα σε θόλο, φορτίζοντας τον με τη μέγιστη τάση (2MV)
- Υψηλότερες τάσεις μπορούν να επιτευχθούν μέσα σε δεξαμενή με μονωτικό αέριο (Φρέον)
- Δυνατότητα διπλασιασμού του δυναμικού (**Tandem**)
 - ο Αρνητικά φορτισμένα ιόντα επιταχύνονται από 0 έως δυναμικό V
 - ο Ηλεκτρόνια απορροφούνται από αέριο και δεύτερη επιτάχυνση με θετικά ιόντα απο δυναμικό V σε 0
 - ο Επίτευξη ενέργειας έως 1GeV για ιόντα πολλαπλού ιονισμού



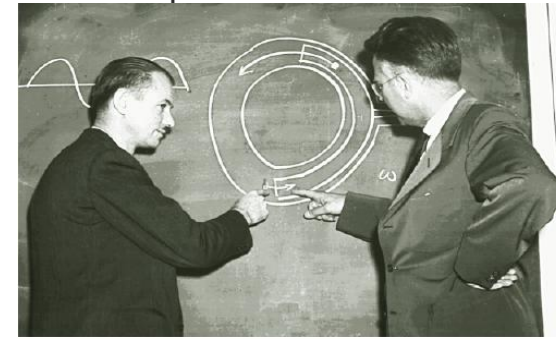
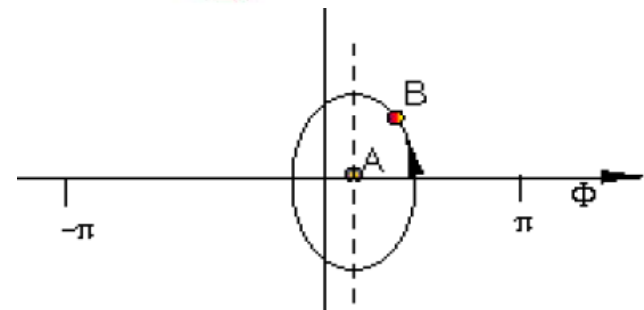
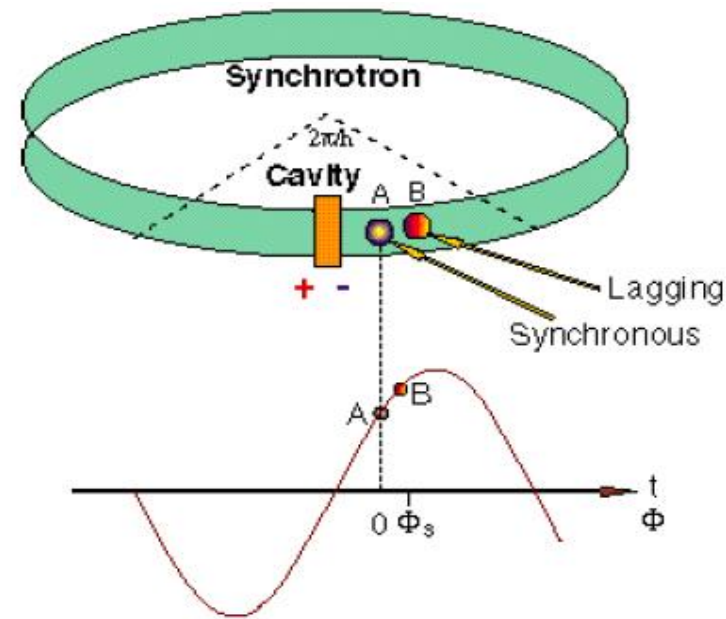
Γραμμικοί επιταχυντές (linacs)

- Πρωτότυπη ιδέα του **Ising**(1924), κατασκευή του **Wideröe** (1928) και πρώτο linac υψηλής ενέργειας (1.3MeV) από τους **Sloan** και **Lawrence** (1931)
- Σειρά από σωλήνες (drift tubes) συνδεδεμένους εναλλασσόμενα με τροφοδοτικό υψηλών συχνοτήτων (Ραδιοσυχνότητες –RF)
- Σωματίδια επιταχύνονται στο χάσμα και δεν βλέπουν πεδίο μέσα στο σωλήνα (δρά ως κλοβός Faraday)
- Καθώς το ηλεκτρικό πεδίο αλλάζει πρόσημο, τα σωματίδια βγαίνουν από το σωλήνα και επιταχύνονται ξανά. Η τελική ενέργεια είναι $E_n = nqV_0 \sin(\Psi_0)$
- Για σταθερή συχνότητα, το μήκος των σωλήνων αυξάνεται με την ταχύτητα $l_n = v_n T_{RF} / 2$ έως το σχετιστικό όριο
- Πώς επιτυγχάνεται συγχρονισμός των σωματιδίων με το πεδίο $\longrightarrow$ **εστίαση φάσης - phase focusing**
- Ο **Beams** (1933) κατασκεύασε το πρώτο linac με **κυματοδηγούς** (waveguides). Ο **Hansen** και οι αδελφοί **Varian** (1937) ανακάλυψαν το **κλύστρο** (klystron) με συχνότητες έως 10GHz.
- Ο **Alvarez** (1946) ανέπτυξε το πρώτο DTL με δομή συντονισμένων κυλοτήτων για πρωτόνια και βαρέα ιόντα



Εστίαση Φάσης

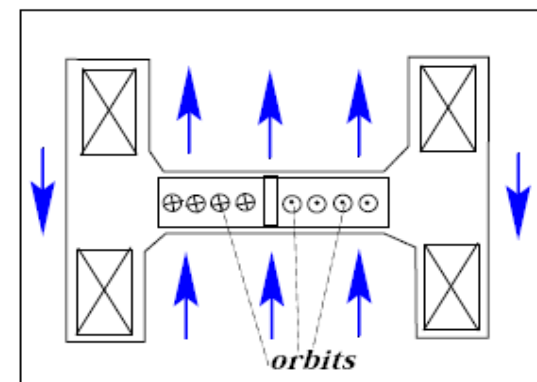
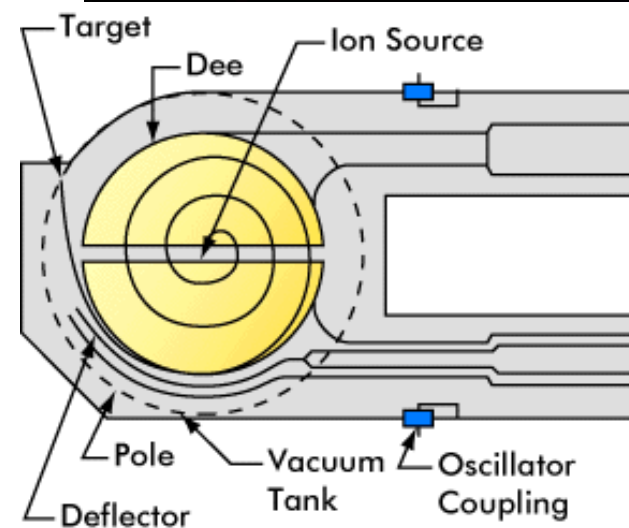
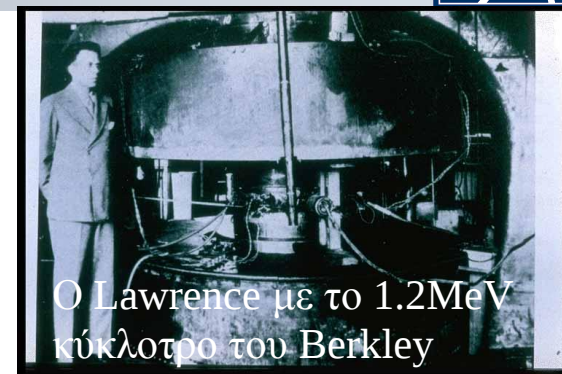
- Ανακαλύφθηκε ανεξάρτητα από τους **McMillan** και **Veksler** (1945)
- Η **κοιλότητα ραδιοσυχνοτήτων** (RF cavity) ρυθμίζεται έτσι ώστε το σωματίδιο στο κέντρο του **πακέτου** (**bunch**) σωματιδίων (το επονομαζόμενο **σύγχρονο** σωματίδιο) λαμβάνει ακριβώς την ενέργεια που χρειάζεται
- Τα σωματίδια βλέπουν δυναμικό
$$V = V_0 \sin(2\pi\omega_{RF}t) = V_0 \sin(\phi(t))$$
- Χωρίς επιτάχυνση, το σύγχρονο σωματίδιο βρίσκεται στην κυλότητα σε φάση $\phi_s = 0$
- Για επιτάχυνση, το σύγχρονο σωματίδιο πρέπει να έχει φάση $0 < \phi_s < \pi$, έτσι ώστε να αυξήσει την ενέργεια $\Delta E = qV_0 \sin(\phi_s)$
- Σωματίδια που φθάνουν **νωρίς** έχουν φάση $\phi < \phi_s$, άρα παίρνουν **λιγότερη** ενέργεια σε σχέση με το σύγχρονο σωματίδιο
- Σωματίδια που φθάνουν **αργά**, έχουν φάση $\phi > \phi_s$, άρα παίρνουν **περισσότερη** ενέργεια σε σχέση με το σύγχρονο σωματίδιο
- Τα σωματίδια **ομαδοποιούνται**

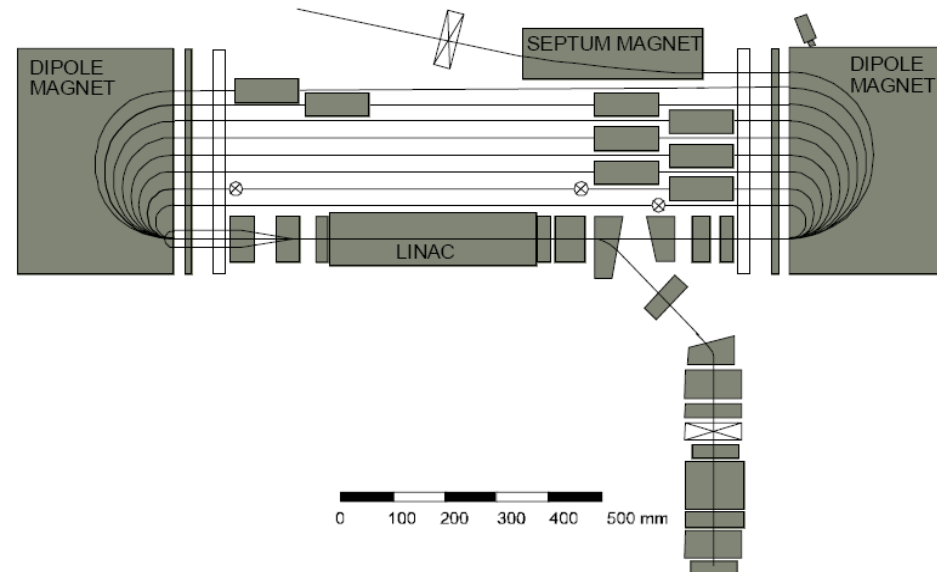


Κύκλοτρο

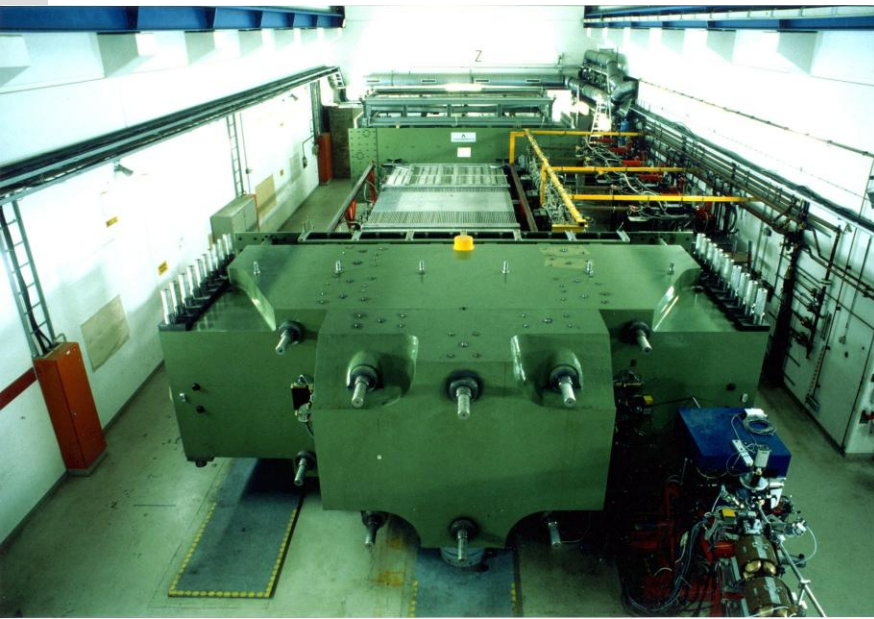


- Ιδέα των **Lawrence** και **Edlefsen**(1930), πρώτη κατασκευή των **Lawrence** και **Livingston**(1932)
- Σταθερή **μαγνητική επαγωγή** B από μαγνήτη σε σχήμα **H** με κυκλοτρονική συχνότητα και ακτίνα που αυξάνεται με την ταχύτητα, για μη σχετικιστικά σωματίδια (σπειροειδείς τροχιές) $\omega_c = qB/m$
- Η τάση επιτάχυνσης σύγχρονη με το πέρασμα του σωματιδίου στο χάσμα $\omega_{RF} = (2n + 1)\omega_c$
- Επιτάχυνση βαρέων σωματιδίων σε χαμηλές ενέργειες $\sim 20\text{MeV}$
- Για υψηλότερες ενέργειες (σχετικιστικά σωματίδια), η συχνότητα μειώνεται με τη μάζα
- Αρχή **συγχρονισμού κυκλότρου** (**McMillan** και **Veksler**, 1945): η ραδιοσυχνότητα πρέπει να μειώνεται με την ενέργεια (μάζα) $\omega_{RF} \propto 1/\gamma$
- Η παραπάνω αρχή επιβάλλει διαφορετικές συχνότητες για διαφορετικό είδος σωματιδίων
- Αρχή **ισοκύκλωτρου**: $\omega_{RF} \propto B/\gamma$. Ενέργειες έως 600MeV επιτυγχάνονται, όμως η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου αποεστιάζει τα σωματίδια (δημιουργία απωλειών)





Μίκροτρον του MAMI σε σχήμα σταδίου



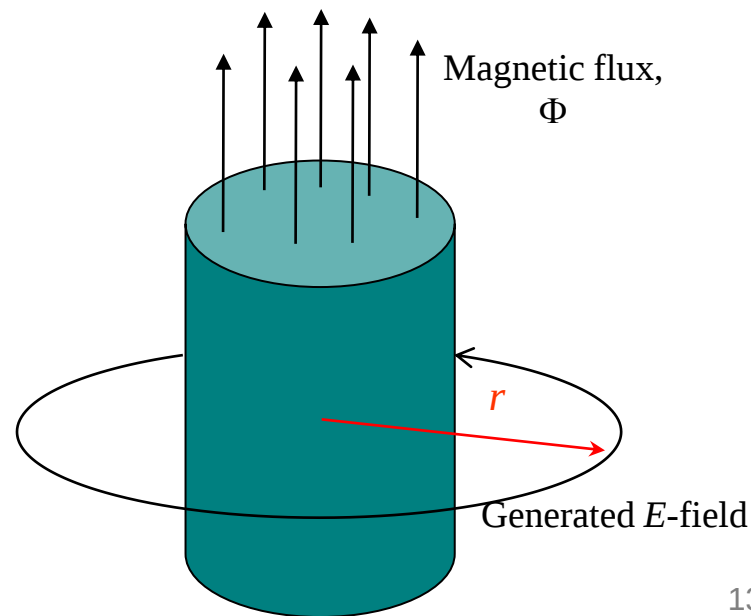
- Ιδέα του **Veksler**(1944), πρωτοκατασκευάστηκε από την ομάδα του **Kapitza** στη δεκαετία του 60.
- Τα ηλεκτρόνια γίνονται πολύ γρήγορα σχετικιστικά σωματίδια και τα κύκλωτρα είναι ανεπαρκείς
- Επιλογή της ραδιοσυχνότητας η οποία αυξάνει την ενέργεια ανά στροφή ώστε η μεγαλύτερη τροχία να συντονίζεται με ακέραιο αριθμό της συχνότητας (αρχή συγχρονισμού)

$$\Delta t = k/\nu_{RF} = \frac{2\pi}{ec^2 B} \Delta E$$

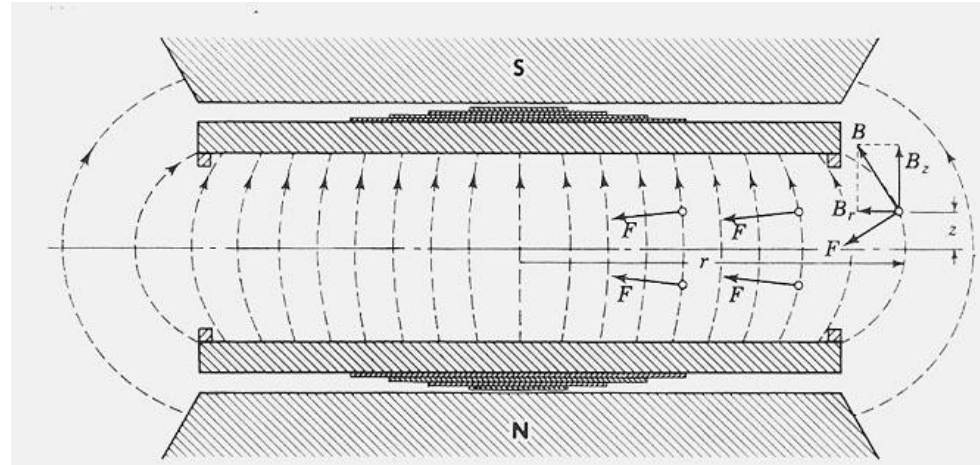
- Τα μίκροτρα έχουν συνήθως σχήμα **σταδίου**: τα σωματίδια στρέφονται κατά γωνία π από δύο συμμετρικούς διπολικούς μαγνήτες, και κινούνται σε ευθύγραμμα τμήματα όπου κοιλότητες ραδιοσυχνοτήτων τα επιταχύνουν

- Ιδέα των **Wideröe**(1928)και **Steenbeck** (1935), πρώτη κατασκευή από τον **Kernst** (1940) (ενέργεια 20MeV)
- Ενώ στο κύκλοτρο το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό (και η ακτίνα αλλάζει), στο βήτατρο γίνεται ακριβώς το αντίθετο
- Σωματίδια Βήτα (σχετικιστικά ηλεκτρόνια) επιταχύνονται από ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο $\mathbf{B}(t) = \mathbf{B}_0 \sin(\omega t)$ από επαγωγή
- Για να κρατείται η ακτίνα σταθερή, απαιτείται η συνθήκη ευστάθειας του **Wideröe**

$$|\mathbf{B}(t)| = \frac{1}{2} \langle |\mathbf{B}(t)| \rangle + |\mathbf{B}_0|$$



- Σωματίδια που εισάγονται εγκάρσια σε ομογενές μαγνητικό πεδίο ακολουθούν κυκλικές τροχιές
- Μαγνητικά σφάλματα αναγκάζουν τα σωματίδια να παρασύρονται ώσπου να διαφύγουν
- Χρειάζεται μία δύναμη επαναφοράς ή «εστίασης»



■ Μια τέτοια εστίαση μπορεί να προέρθει λόγω της απόκλισης του μαγνητικού πεδίου στις περιφέρειες του μαγνήτη

- Οι εγκάρσιες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου είναι $(B_x, B_y) = B_0(-n\frac{y}{r}, 1 - n\frac{x}{r})$ με το δείκτη πεδίου $n = -\frac{r}{B_0} \frac{\partial B_y}{\partial x}$. Τα σωματίδια εκτελούν γραμμικές αρμονικές ταλαντώσεις (ταλαντώσεις **βητάτρου**) με συχνότητες

$$\omega_x = \frac{v}{R} \sqrt{1 - n} \quad , \quad \omega_y = \frac{v}{R} \sqrt{n}$$

- Για ευσταθείς ταλαντώσεις πρέπει να ισχύει η συνθήκη του **Steenbeck**

$$0 < n < 1$$

Ισχυρή εστίαση: Αρχή εναλλασσόμενης απόκλισης

- Αρχή που εφευρέθηκε από τον **Χριστόφιλο** (1950) και ανεξάρτητα από τους **Courant**, **Livingston** και **Snyder** (1953).
- Λόγω της φύσης των εξισώσεων Maxwell είναι αδύνατη η ύπαρξη πεδίων εστίασης και στα δύο επίπεδα, π.χ. τα τετράπολα που εστιάζουν **οριζόντια**, αποεστιάζουν **κάθετα** και το αντίστροφο.
- Μια αλληλουχία από εστιακά και αποεστιακά πεδία μπορεί να δώσει ισχυρότερη καθαρή εστίαση
- Η δύναμης είναι ανάλογες της απόστασης από τον άξονα της δέσμης
- Διαδοχή αντιθέτων εστιακά στοιχείων επιτρέπουν στα σωματίδια να ακολουθήσουν ευσταθείς τροχιές, εκτελώντας μικρές βητατρονικές ταλαντώσεις γύρω από κυκλική περιοδική τροχιά

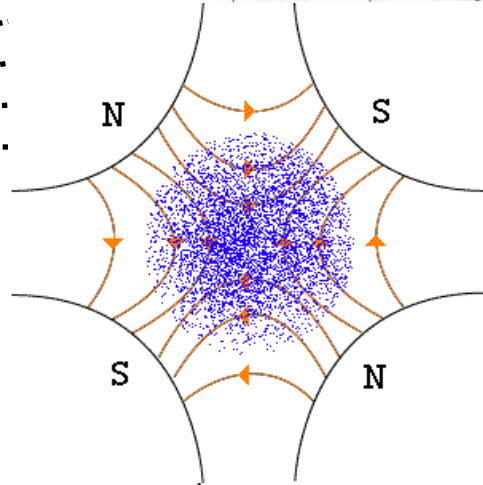
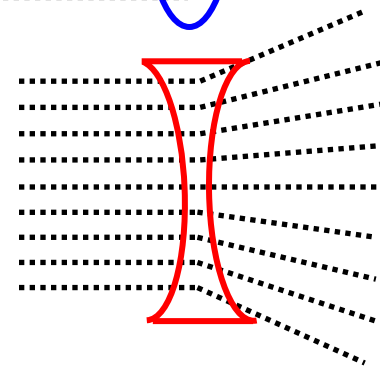
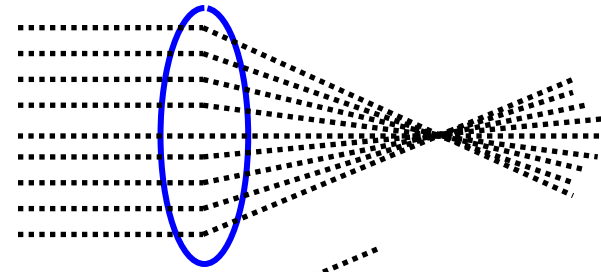
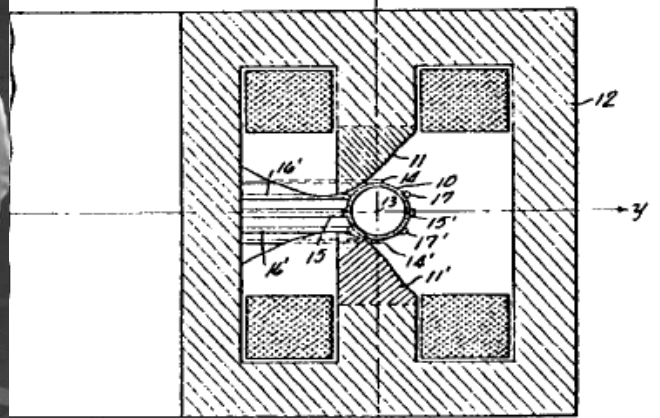


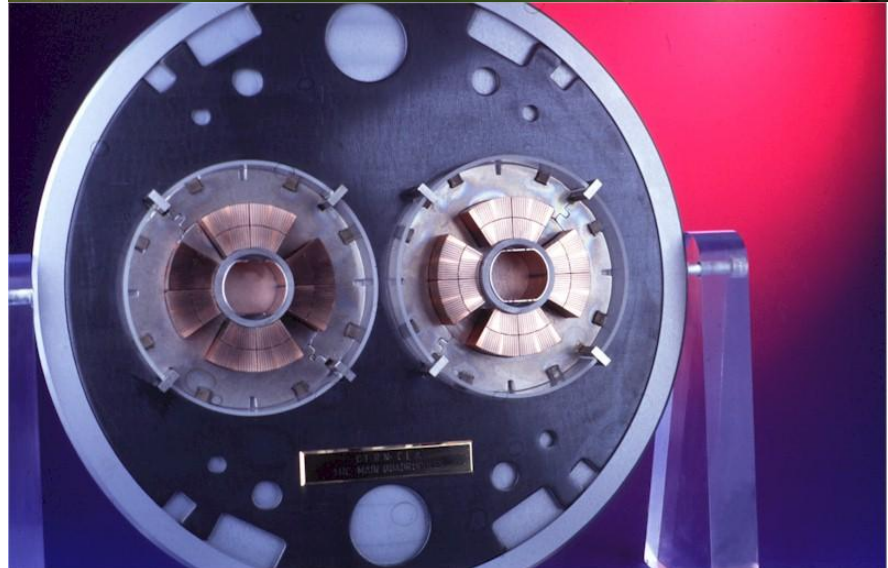
Fig. 5



- Η συχνότητα αλλάζει με την ενέργεια αλλά παράλληλα το πεδίο αυξάνεται **σύγχρονα** ώστε η ακτίνα των τροχιών να μένει σταθερή.
- Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από αρκετούς διολικούς μαγνήτες και αυξάνεται με την ορμή των σωματιδίων. Σε υψηλές ενέργειες:

$$B\rho = \frac{p}{q} \approx \frac{E}{cq} \quad \text{and} \quad E[GeV] \approx 0.3B\rho[T \cdot m]$$

- Πρακτικός περιορισμός των μαγνητικών πεδίων, η αύξηση της ακτίνας της τροχιάς για υψηλές ενέργειες
- Χρήση **υπεραγώγιμων μαγνητών**, π.χ. για τον **Μεγάλο Αδρονικό Συγκρουστήρα (Large Hadron Collider- LHC)**, ακτίνα καμπυλότητας **2.9km** και ενέργεια **7TeV** χρειάζονται δίπολα **8T**
- **Αποθηκευτικοί δακύλιοι**: συσσωρεύουν σωματίδια και τα κρατούν για μεγάλες περιόδους (πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον)
- **Συγκρουστήρες**: δύο δέσμες κυκλοφορούν σε αντίθετες κατευθύνσεις, και συγκρούονται σε συγκεκριμένα σημεία, ώστε να αυξάνεται η ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας

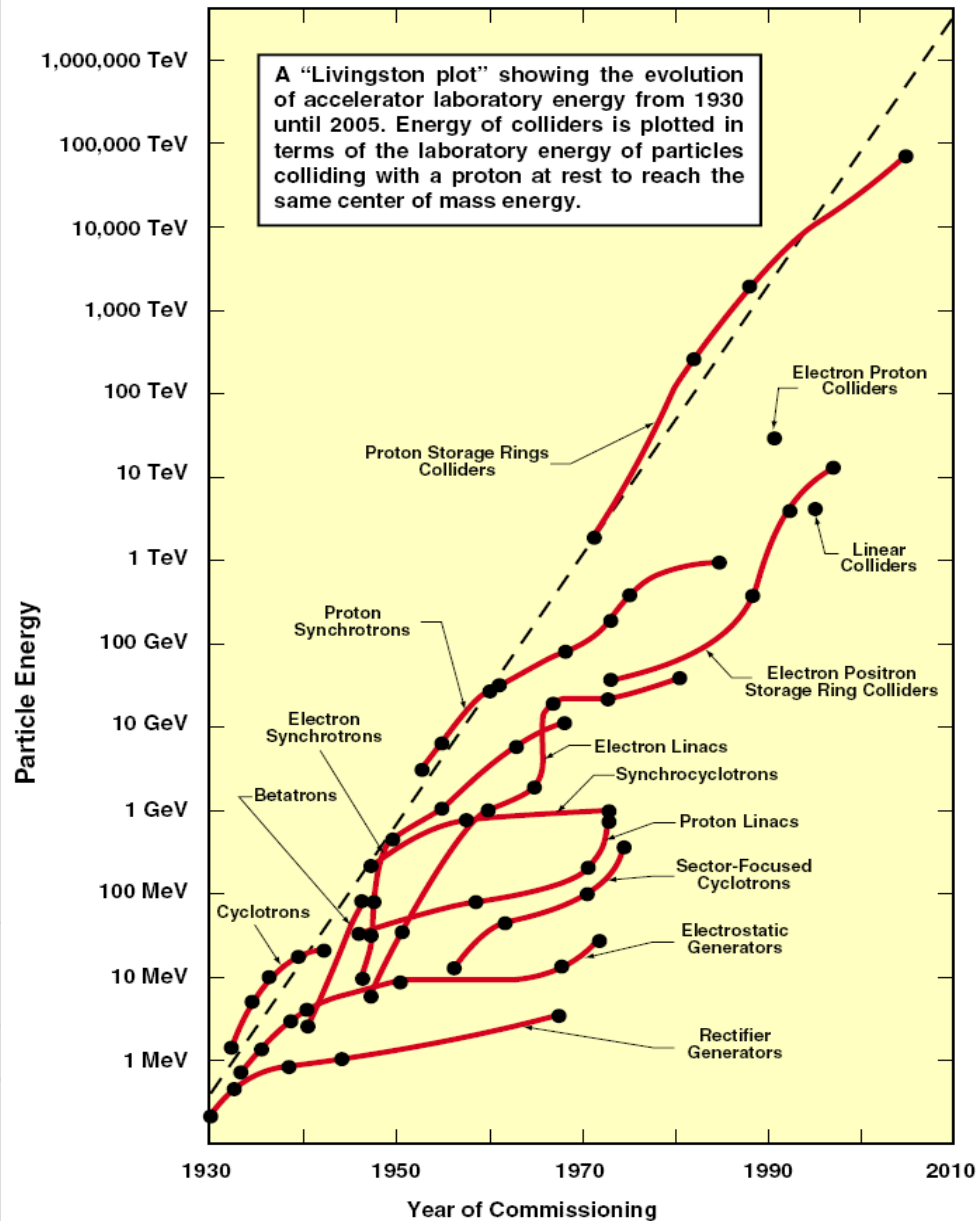


Περίληψη κυκλικών επιταχυντών



Επιταχυντής	Ραδιο- συχνότητα	Μαγνητικό πεδίο	Ακτίνα της τροχιάς	Σχόλιο
Κύκλοτρο	σταθερή	σταθερή	Αυξάνεται με την ενέργεια	Σωματίδια ασύγχρονα με ραδιοσυχνότητα για υψηλές ενέργειες
Ισο-Κύκλοτρο	σταθερή	μεταβλητό	Αυξάνεται με την ενέργεια	Σωματίδια σύγχρονα αλλά δύσκολη η ευστάθεια των τροχιών
Συγχρο-Κύκλοτρο	μεταβλητή	σταθερό	Αυξάνεται με την ενέργεια	Ευσταθής ταλαντώσεις , αλλά περιορισμός λόγω όγκου
Σύγχροτρο	μεταβλητή	μεταβλητό	σταθερή	Ευέλικτος επιταχυντής, δυνατή η επίτευξη πολύ υψηλών ενεργειών

Εξέλιξη της ενεργειας των επιταχυντών



- Το διάγραμμα “Livingston” δείχνει εκθετική αύξηση της ενέργειας με το χρόνο
- Η ενέργεια αυξάνεται μία τάξη μεγέθους κάθε 6-10 χρόνια
- Νέες τεχνολογίες αντικαθιστούν τις παλιές για επίτευξη υψηλότερων ενεργειών, έως ότου επέρχεται κορεσμός και αντικατάσταση με νέα τεχνολογία
- Η διαδικασία συνεχίζεται...
- Η ενέργεια δεν είναι το μόνο ενδιαφέρον μέγεθος
 - ο Ένταση δέσμης
 - ο Διατομή της δέσμης

- Με βάση τις αρχές λειτουργίας
 - Βήτατρα (betatrons), κύκλοτρα (cyclotrons), μικροτρα (microtrons), γραμμικοί επιταχυντές (linacs), σύγχροτρα (synchrotrons), ενισχυτές (boosters), συσσωρευτικοί δακτύλιοι (accumulator rings), αποθηκευτικοί δακτύλιοι (storage rings), επιταχυντές διαμέσου πλάσματος (plasma driven accelerators)
- Με βάση την ενέργεια
 - Υψηλής (μερικά GeV), μέσης (μερικά MeV), χαμηλής (κάτω από MeV)
- Με βάση την ένταση της δέσμης
 - Υψηλής (μερικά Amps), μέσης (μερικά mA), χαμηλής (κάτω από mA)
- Με βάση το είδος των σωματιδίων
 - Λεπτονικοί (ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων, μιονίων), Αδρονικοί (πρωτονίων, βαρέων ιόντων)
- Με βάση τον πειραματικό σκοπό
 - Συγκρουστήρες (colliders), εργοστάσια σωματιδίων (factories), πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον (synchrotron light sources), πηγές νετρονίων διάσπασης (spallation neutron sources), ιατρικοί (medical accelerators), πολλαπλασιαστές ενέργειας (energy amplifiers)...

- Επιταχυντές υψηλών ενεργειών
 - Αδρονικοί συγκρουστήρες (TeVatron, RHIC, HERA, LHC, VLHC)
 - Λεπτονικοί συγκρουστήρες (LEP, CESR, PEP-II, KEKB, DAFNE, ILS, CLIC)
- Συσσωρευτές και σύγχροτρα υψηλής ένστασης
 - Πηγές νετρονίων κατα διάσπαση (ISIS, SNS, ESS, JAERI)
 - Εργοστάσια παραγωγής νετρίνων (Neutrino factories)
 - Πολλαπλασιαστές ενέργειας, εγκαταστάσεις απενεργοποίησης πυρηνικών αποβλήτων (JAERI)
- Πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον
 - Πρώτης γενιάς (PETRA, SPEAR)
 - Δεύτερης γενιάς (BESSY I, SPEAR II, NSLS)
 - Τρίτης γενιάς (ESRF, APS, SPRING-8, SLS, SOLEIL, DIAMOND, ALBA)
 - Τέταρτης γενιάς – Λείζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων (FEL – TESLA, LCLS)
- Επιταχυντές εφαρμογών
 - Ιατρικοί επιταχυντές (LLUMC, AUSTRON, HICAT, PSI, TERA)
 - Βιομηχανικοί επιταχυντές (CAT, Rhodotrons, VARIAN, ACSION)

Συντελεστές απόδοσης επιταχυντών



- Ο σχεδιασμός ενός επιταχυντή εστιάζεται στην **υψηλή απόδοση**
- Συγκρουστήρες

- Φωτεινότητα (Luminosity), ρυθμός παραγωγής γεγονότων

- N_b ο αριθμός των σωματιδίων ανά πακέτο (bunch)
- k_b ο αριθμός των πακέτων
- $\gamma = E/(m_0 c^2)$ ο σχετικιστικός παράγοντας
- ϵ_n η νορμαλισμένη εκπεμπτικότητα (emittance)
- β^* η συνάρτηση πλάτους στο σημείο αλληλεπίδρασης

$$L = \frac{N_b^2 k_b \gamma}{4\pi \epsilon_n \beta^*}$$

- Επιταχυντές υψηλής έντασης

- Μέση ισχύς δέσμης (average beam power)

- $\bar{I}$ η μέση ένταση του ρεύματος
- E η ενέργεια
- f_n ο ρυθμός επανάληψης
- N ο αριθμός των σωματιδίων ανά παλμό (pulse)

$$\bar{P} = \bar{I} E = f_N N e E$$

- Πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον

- Εκλαμπρότητα (Brightness), πυκνότητα φωτονίων

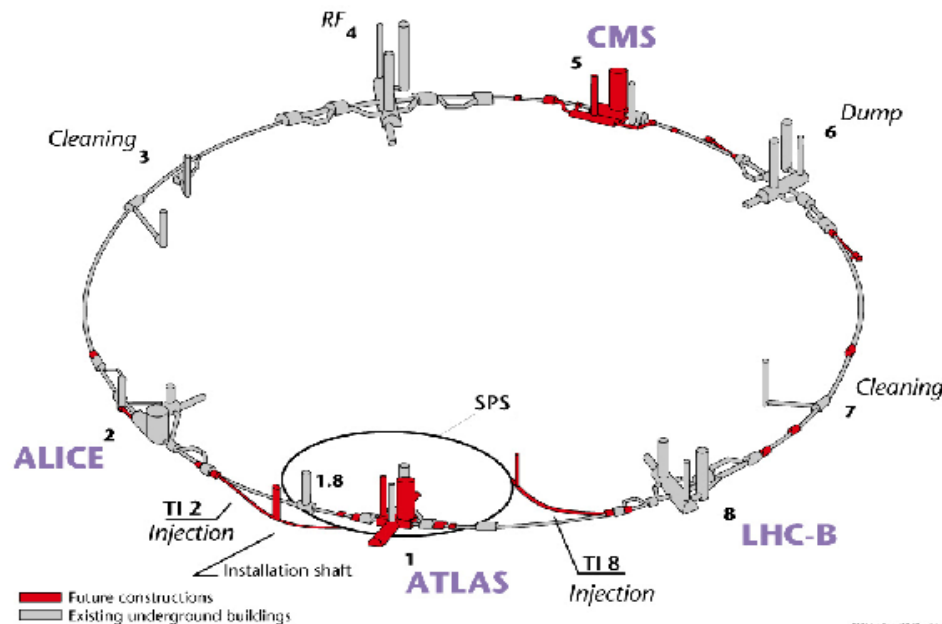
- N_b ο αριθμός των φωτονίων
- $\epsilon_{x,y}$ η οριζόντια και κάθετη εκπεμπτικότητα

$$B = \frac{N_p}{4\pi^2 \epsilon_x \epsilon_y}$$

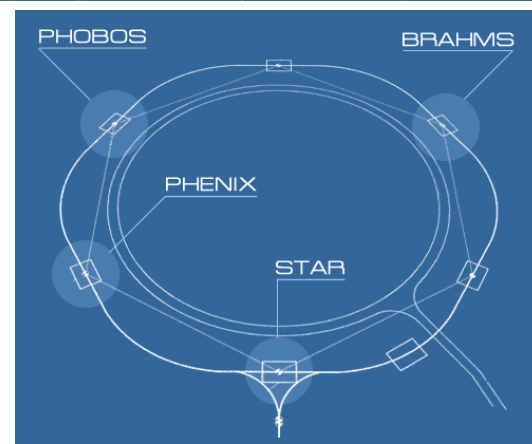
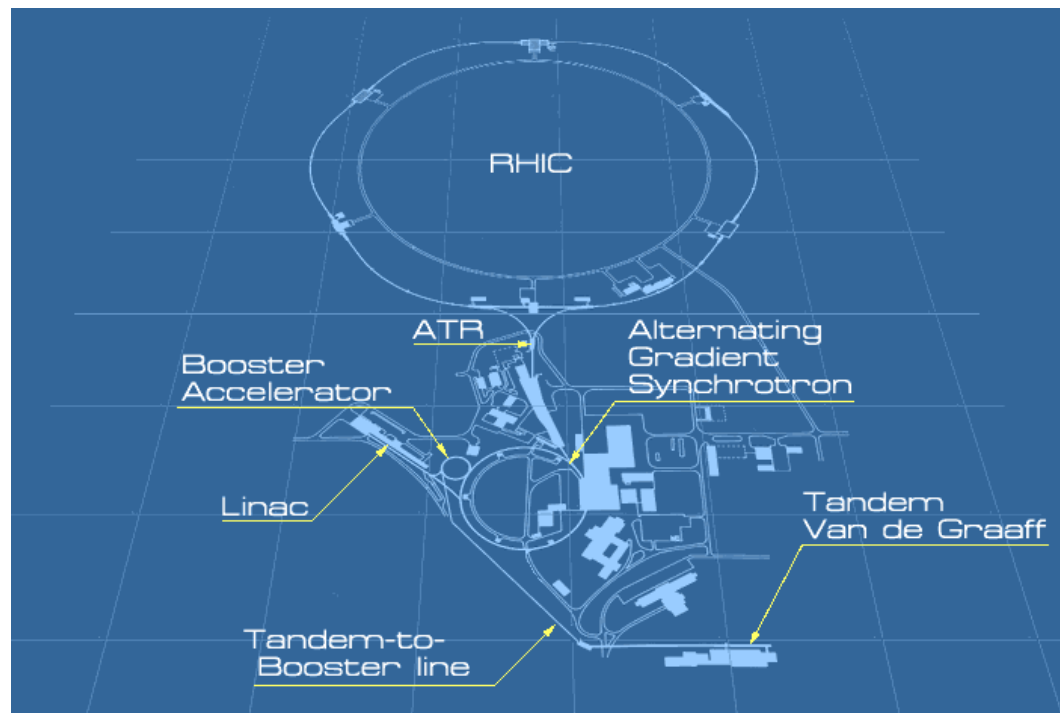
Μεγάλος Αδρονικός Συγκρουστήρας (LHC - CERN)



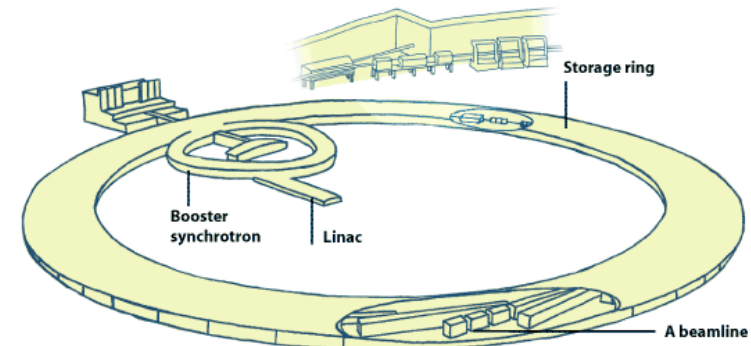
- Συγκρουστήρας πρωτονίων και ιόντων μολύβδου με **ενέργειες έως 7 TeV**
- Ο επιταχυντής κατασκευάζεται στην παλιά στοά του LEP με **περίμετρο 26.7km**
- Η δέσμες περιστρέφονται με αντίθετη φορά οδηγούμενες από **1232 υπεραγωγίμα δίπολα, μήκους 14.3m** και **μέγιστου πεδίου 8T**
- Υπάρχουν 8 σημεία αλληλεπίδρασης, στα μισά από τα οποία είναι τοποθετημένοι οι ανιχνευτές **4 κύριων πειραμάτων** (ATLAS, CMS, ALICE, LHC-B)
- Ο κύριος σκοπός του επιταχυντή είναι η παραγωγή, ανίχνευση και μελέτη **μποσονίων Higgs** (ο μηχανισμός απόκτησης μάζας)



- Συγκρουστήρας ιόντων χρυσού, χαλκού και πολωμένων πρωτονίων με **ενέργειες έως 100 GeV/νουκλεόνιο**
- Η δέσμες περιστρέφονται με αντίθετη φορά σ' ένα **δακτύλιο αποθήκευσης 2.4 μιλίων (~4km)** οδηγούμενες από **1740 υπεραγωγίμα δίπολα**
- Οι δέσμες συγκρούονται σε 6 σημεία στα 4 από τα οποία είναι τοποθετημένοι οι ανιχνευτές **4 κύριων πειραμάτων** (BRAHMS, PHENIX, PHOBOS, STAR)
- Ο κύριος σκοπός του επιταχυντή είναι η παραγωγή, ανίχνευση και μελέτη **πλάσματος quark - γλουονίων**



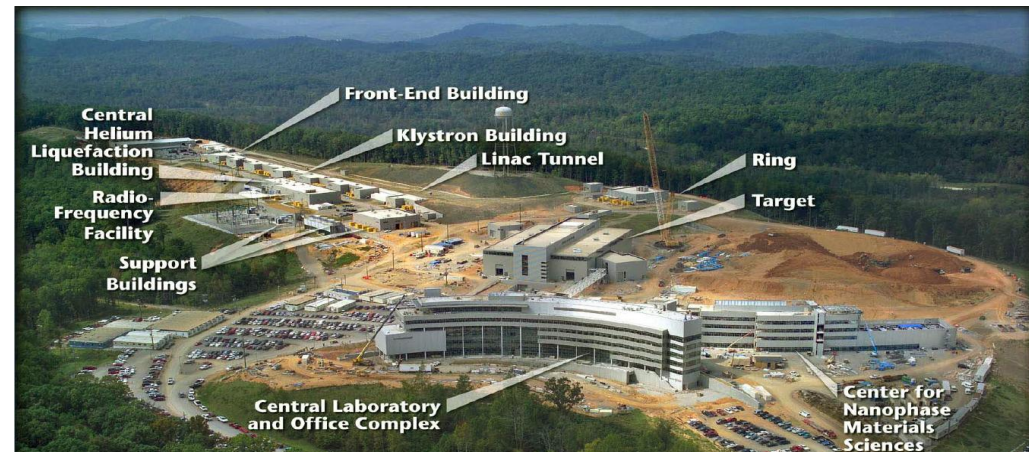
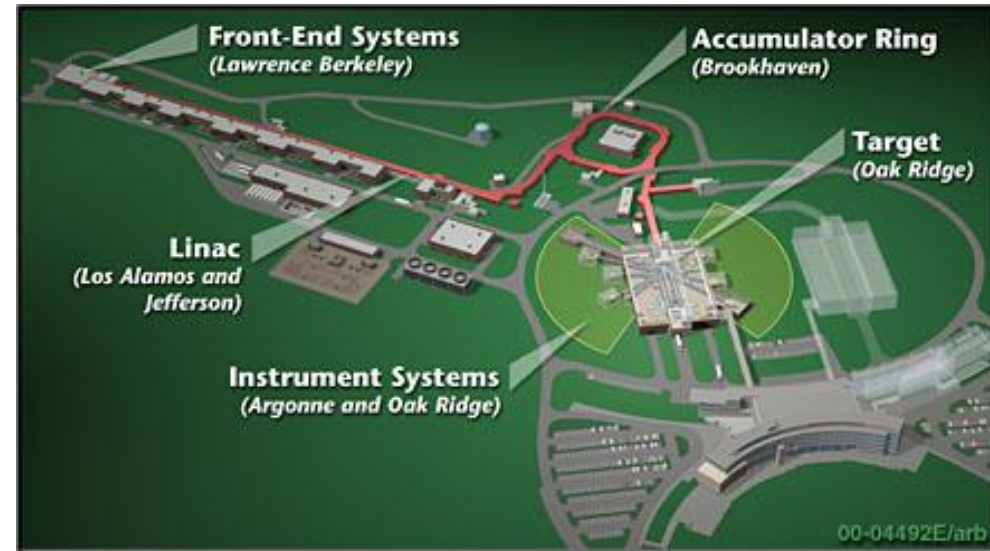
- Η **πρώτη** και **πιο λαμπρή** πηγή ακτινοβολίας σύγχροτρον 3ης γενιάς στην Ευρώπη
- **50 πειραματικές γραμμές δέσμεων** που χρησιμοποιούν «σκληρές» ακτίνες X παραγόμενες από παρεμβολικές μαγνητικές διατάξεις (μαγνητικούς ενισχυτές και κυμματιστές) και διπολικούς μαγνήτες
- **3500 χρήστες/χρόνο** από **14 κράτη μέλη** εκτελούν πειράματα φασματοσκοπίας ακτίνων X για επιστήμη των υλικών, χημεία, βιολογία, γεωλογία, ιατρική, αρχαιομετρία, κ.α.
- Το σύμπλεγμα περιλαμβάνει ένα **γραμμικό επιταχυντή ηλεκτρονίων**, ένα **300 μέτρων ενισχυτικό σύγχροτρο** και ένα **δακτύλιο αποθήκευσης, 844 μέτρων**.
- Ο δακτύλιος αποθήκευσης παρουσιάζει **διαθεσιμότητα ρεκόρ της τάξεως του 98%** με **μέσο χρόνο μεταξύ διακοπών άνω των 2 ημερών**



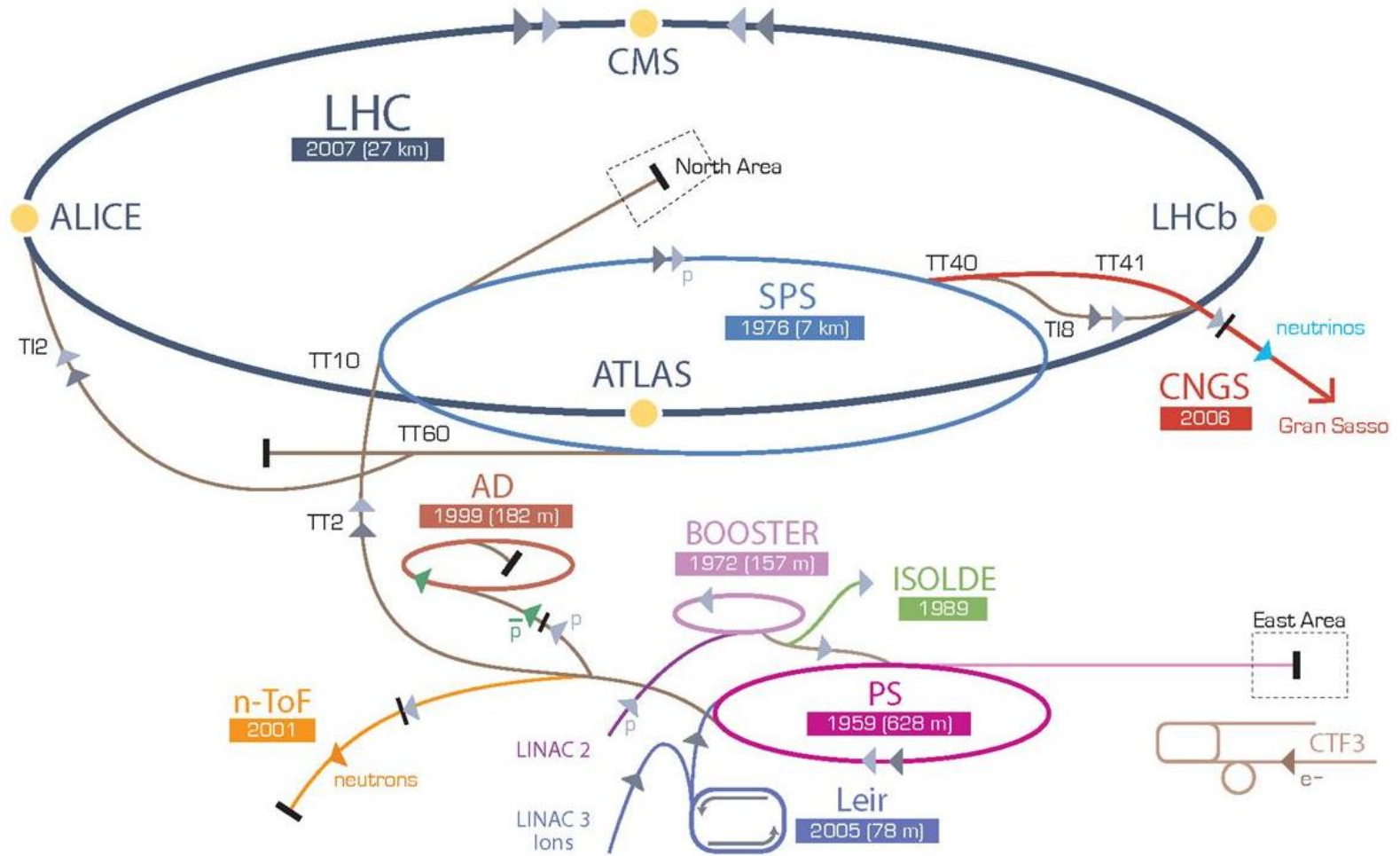
Πηγή Νετρονίων Διάσπασης(SNS - ORNL)



- Επιστημονικό έργο συνεργασίας 6 εργαστηρίων (LBNL, LANL, JLAB, BNL, ANL, ORNL)
- Η Πηγή Νετρονίων κατα διάσπαση με ισχύ **1.4 MW**(8 φορές μεγαλύτερη από την ISIS)
- Το συγκρότημα περιλαμβάνει μία **πηγή H^-** , ένα **300m**γραμμικό **επιταχυντή**, με **υπεραγώγιμες** **κοιλότητες** **ραδιοσυχνότητας**, ένα **δακτύλιο****συσσώρευσης** **πρωτονίων** με **περίμετρο 248m** και ένα **στόχο υγρού υδράργυρου** για την παραγωγή των νετρονίων.
- Ο κύριος σκοπός είναι πειράματα φασματοσκοπίας μέσω σκέδασης νετρονίων σε **24 σταθμούς** (μαγνητική δομή υλικών, νανοτεχνολογία, κ.λπ.)



Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN



▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶ $\bar{p}$ [antiproton] ➔+➔ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

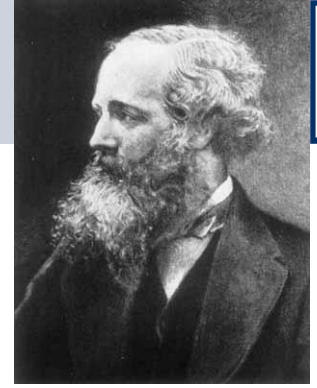
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS CERN Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Βασικές αρχές δυναμικής των επιταχυντών

Εξισώσεις Maxwell



- Φυσική των επιταχυντών: περιγραφή δυναμικής φορτισμένων σωματιδίων παρουσία ηλεκτομαγνητικών πεδίων
- Εξισώσεις Maxwell σχετίζουν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που παράγονται από φορτία και κατανομές ρεύματος

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Νόμος Gauss: απόκλιση ηλεκτρικού πεδίου δίνει την πυκνότητα πηγών φορτίου

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Νόμος Gauss για μαγνητισμό: δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}$$

Νόμος επαγωγής του Faraday: μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ηλεκτρικό πεδίο

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}$$

Νόμος Ampere-Maxwell: ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου σε κλειστή καμπύλη είναι ανάλογη του ρεύματος που τρέχει στην καμπύλη (στατικό ηλεκτρικό πεδίο)



E = ηλεκτρικά πεδία [V/m]

B = μαγνητική επαγωγή [T]

ρ = πυκνότητα φορτίου [C/m³]

j = πυκνότητα ρεύματος [A/m²]

μ_0 (μαγνητική διαπερατότητα) = $4\pi \cdot 10^{-7}$ [C V⁻¹m⁻¹]

ϵ_0 (ηλεκτρική διαπερατότητα) = $8.854 \cdot 10^{-12}$ [V s A⁻¹m⁻¹]

c (ταχύτητα φωτός) = $2.99792458 \cdot 10^8$ m/s

$1/c^2 = \epsilon_0 \mu_0$

- Δύναμη πάνω σε φορτισμένα σωματίδια που κινούνται υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m_0\gamma\mathbf{v}) = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- Στους επιταχυντές: ηλεκτρικά πεδία χρησιμοποιούνται για επιτάχυνση σωματιδίων και μαγνητικά πεδία για καθοδήγησή
 - Ολοκλήρωση της δύναμης ως προς το μήκος της τροχιάς για τον υπολογισμό της κινητικής ενέργειας (ή υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της ενέργειας)

$$\Delta T = \int \mathbf{F} ds = q \int \mathbf{E} ds + q \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} dt \quad \frac{dE}{dt} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F} = q\mathbf{v} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = q\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}$$

- Κινητική ενέργεια αλλάζει από **ηλεκτρικά** αλλά **όχι** από **μαγνητικά πεδία**
- Εξίσωση Lorentz για την οριζόντια συνιστώσα της δύναμης ενός σωματιδίου που κινείται στην επιμήκη διεύθυνση $\mathbf{z}$

$$\frac{dp_x}{dt} = \mathbf{F}_x = q(E_x - v_z B_y)$$

- Για σχετικιστικά σωματίδια $v_z \approx c$ και $v_z B_y \gg E_x$
- Άρα τα μαγνητικά πεδία είναι πολύ πιο αποτελεσματικά στο να καθοδηγούν τα σωματίδια

- Ομογενές μαγνητικό πεδίο $\mathbf{B}$, κάθετο στην κίνηση του σωματιδίου. Τα σωματίδια εκτελούν κυκλική κίνηση όπου η ακτίνα καμπυλότητας είναι

$$\frac{1}{\rho} = |k| = \left| \frac{q}{p} B \right| = \left| \frac{q}{\beta E_{tot}} B \right|$$

- Η κυκλοτρονική συχνότητα (Larmor) $\omega_L = \left| \frac{qc^2}{E_{tot}} B \right|$

- Ορίζουμε ως **μαγνητική ακαμψία** $|B\rho| = \frac{p}{q}$

- In more practical units $\boxed{\beta E_{tot} [GeV] = 0.2998 |B\rho| [Tm]}$

- Για ιόντα με πολλαπλότητα φορτίου Z και ατομικό αριθμό A , η ενέργεια ανά νουκλεόνιο είναι

$$\beta \bar{E}_{tot} [GeV/u] = 0.2998 \frac{Z}{A} |B\rho| [Tm]$$

Δίπολα

- Θεωρούμε κυκλικό επιταχυντή σωματιδίων ενέργειας E με N δίπολα μήκους L

- Γωνία κάμψης $\theta = \frac{2\pi}{N}$

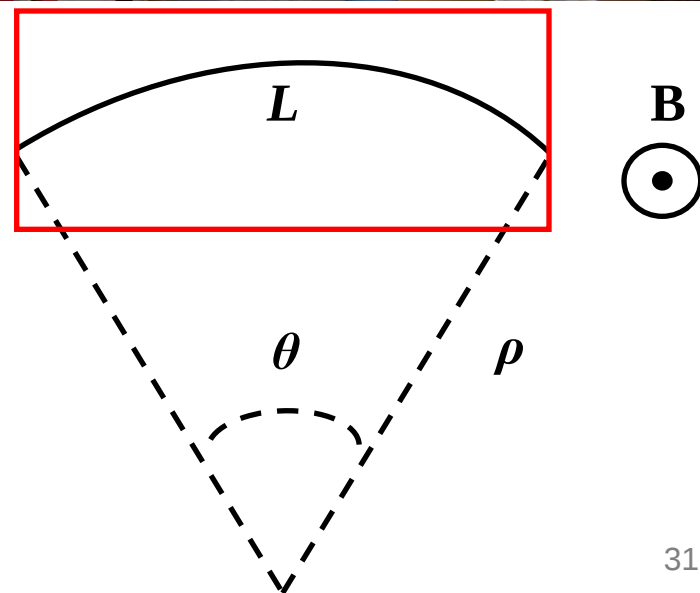
- Ακτίνα κάμψης $\rho = \frac{L}{\theta}$

- Ολοκληρωμένο διπολικό πεδίο

$$BL = \frac{2\pi}{N} \frac{\beta E}{q}$$

- Επιλέγοντας ένα διπολικό μαγνητικό πεδίο, καθορίζεται και το μήκος του, και αντιστρόφως
- Για υψηλότερα πεδία, μικρότερα και λιγότερα δίπολα μπορούν να χρησιμοποιήθουν
- Η περιφέρεια του δακτυλίου (κόστος) επηρεάζεται από την επιλογή του πεδίου

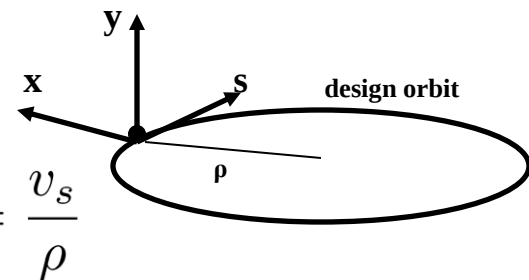
Δίπολο δακτυλίου SNS



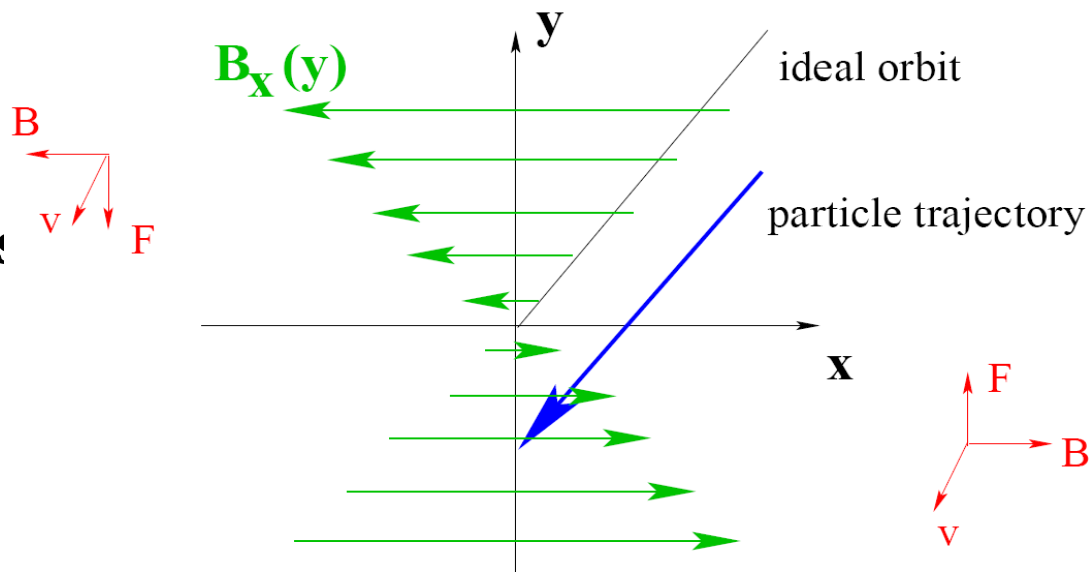
Εστίαση δέσμης



- Έστω σωματίδιο στην ιδεατή τροχιά
- Στο **οριζόντιο επίπεδο**, εκτελεί αρμονικές ταλαντώσεις $x = x_0 \cos(\omega t + \phi)$ με συχνότητα $\omega = \frac{v_s}{\rho}$
- Η οριζόντια επιτάχυνση περιγράφεται από $\frac{d^2x}{ds^2} = \frac{d^2x}{v_s^2 dt^2} = -\frac{1}{\rho^2}x$
- Υπάρχει **ασθενής εστίαση** στο οριζόντιο επίπεδο
- Στο **κάθετο επίπεδο**, η μόνη δύναμη που ασκείται είναι η βαρύτητα. Τα σωματίδια κινούνται κάθετα ως $\Delta y = \frac{1}{2}a_g \Delta t^2$



- Θέτοντας $a_g = 10\text{m/s}^2$, τα σωματίδια μετατοπίζονται κατά **18mm** (άνοιγμα διπόλου του LHC) σε **60m**! (μερικές 100αδες στροφές του LHC)
↓
χρειάζεται εστίαση



- Μαγνητικό στοιχείο που εκτρέπει δέσμες με γωνία ανάλογη της απόστασης από το κέντρο του (ισοδύναμο με τον εστιακό φακό στην οπτική) παρέχει εστίαση
- Η γωνία εκτροπής ορίζεται ως $\alpha = -\frac{y}{f}$ για φακό με μήκος εστίας f και μικρή μετατόπιση y .
- Μαγνητικό στοιχείο μήκους l και απόκλισης g αποδίδει πεδίο $B_x = gy$, έτσι ώστε η γωνία εκτροπής να είναι

$$\alpha = -\frac{l}{\rho} = -\frac{q}{\beta E} B_x l = -\frac{q}{\beta E} g l y$$

f^{-1}

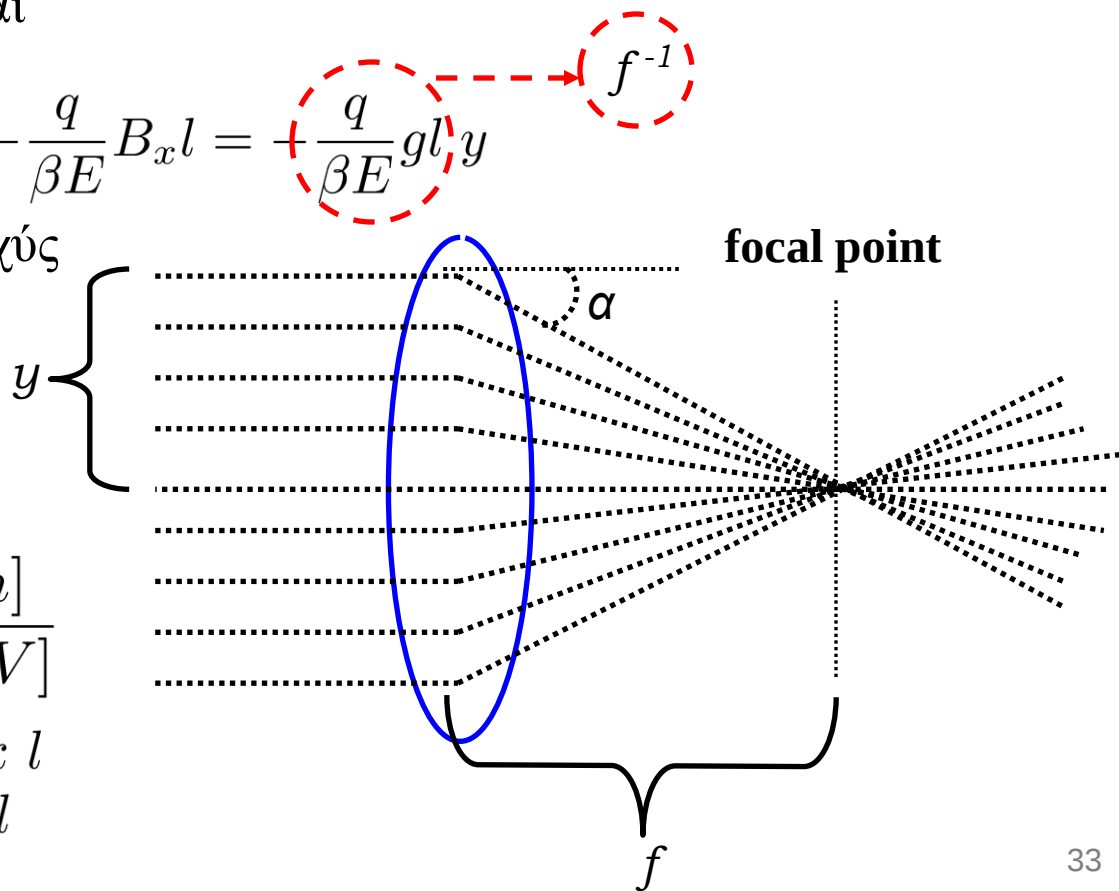
- Η κανονικοποιημένη εστιακή ισχύς ορίζεται ως

$$k = \frac{qg}{\beta E}$$

- Σε πιο πρακτικές μονάδες

$$k[m^{-2}] = 0.2998 \frac{g[T/m]}{\beta E[GeV]}$$

- Το εστιακό μήκος είναι $f^{-1} = k l$ και η γωνία εκτροπής $\alpha = -k y l$



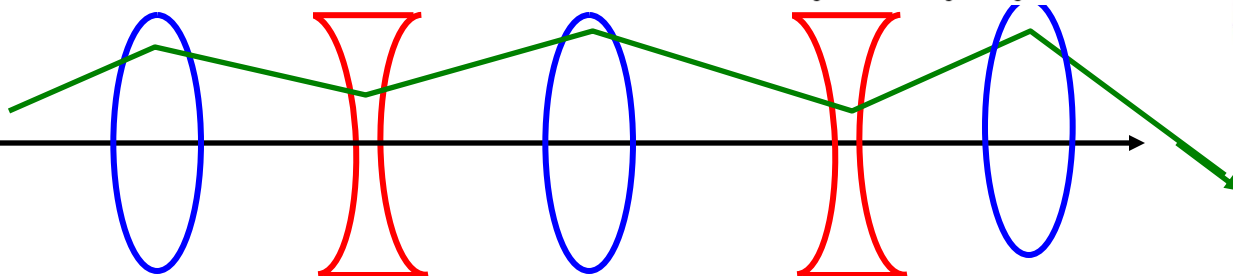
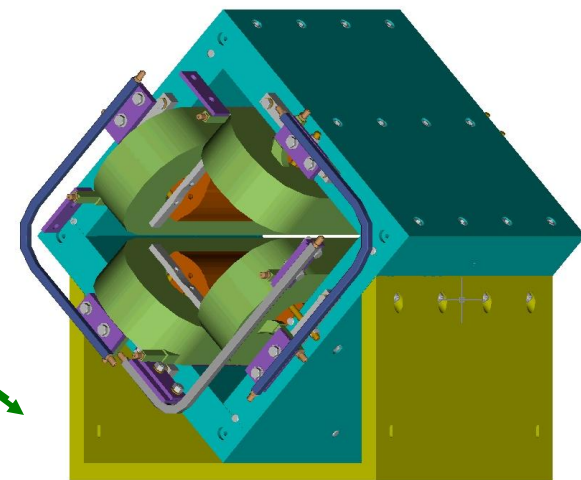
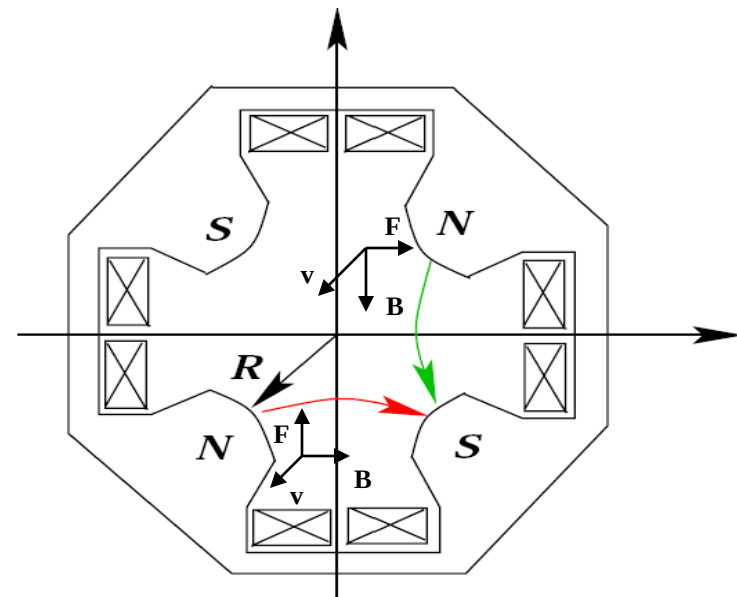
Τετράπολα

- Τα τετράπολα εστιάζουν στο ένα επίπεδο και αποεστιάζουν στο άλλο
- Το πεδίο είναι $(B_x, B_y) = g(y, x)$
- Η δύναμη γράφεται $(F_x, F_y) = k(y, -x)$
- Χρειάζεται εναλλασσόμενη εστίαση και αποεστίαση ώστε να ελεγχθεί η δέσμη, **εναλλασσόμενη εστιακή απόκλιση**
- Απο την οπτική γνωρίζουμε ότι ο συνδυασμός δ φακών με εστιακές αποστάσεις f_1 και f_2 που σε απόσταση d δίνει ολική εστιακή απόσταση

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

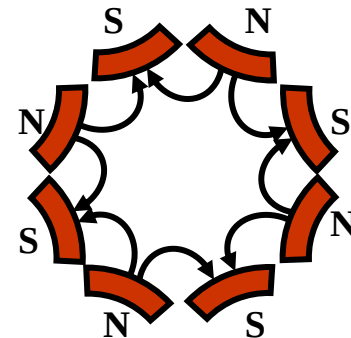
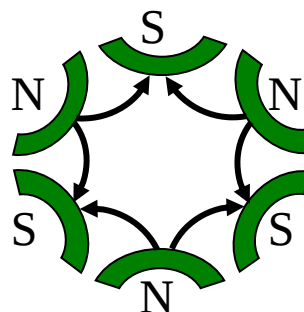
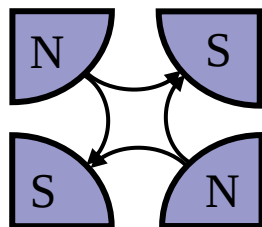
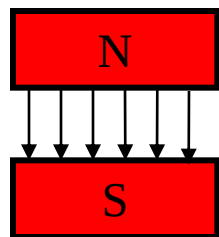
- Εάν $f_1 = -f_2$, υπάρχει ένα καθαρό φαινόμενο εστίασης

$$\frac{1}{f} = \left| \frac{d}{f_1 f_2} \right|$$



- **$2n$ -πολα:**

δίπολο τετράπολο εξάπολο οκτάπολα ...



n : 1 2 3 4 ...

- Κανονικά: το χάσμα εμφανίζεται στο οριζόντιο επίπεδο
- Λοξά: στροφή γύρω από τον άξονα της δέσμης κατά γωνία $\pi/2n$
- Συμμετρία: στροφή γύρω από τον άξονα της δέσμης κατά γωνία π/n , το πεδίο αντιστρέφεται (αλλάζει πολικότητα)

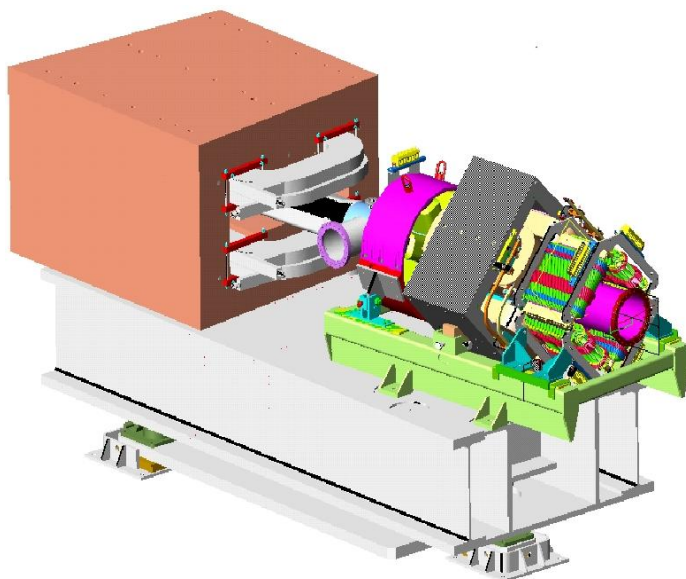
■ Κύρια στοιχεία

- Δίπολο («καμπτικοί» μαγνήτες) → απόκλιση
- Τετράπολο (εστιακοί μαγνήτες) → (απο)εστίαση
- Εξάπολο (χρωματικοί μαγνήτες) → χρωματική διόρθωση
- Κοιλότητα ραδιοσυχνοτήτων → επιτάχυνση

■ Βοηθητικά στοιχεία

- Εκτροπέας (kicker), διαχωριστής (septum) → εισαγωγή, εξαγωγή
- Σωληνοειδές → ελικοειδής τροχιά
- Μαγνητικός ενισχυτής (wiggler) → ακτινοβολία,
κυμματιστές (undulator) → απόσβεση
- Πολύπολλο (οκτάπολο, δεκάπολο, κ.ο.κ.) → διόρθωση

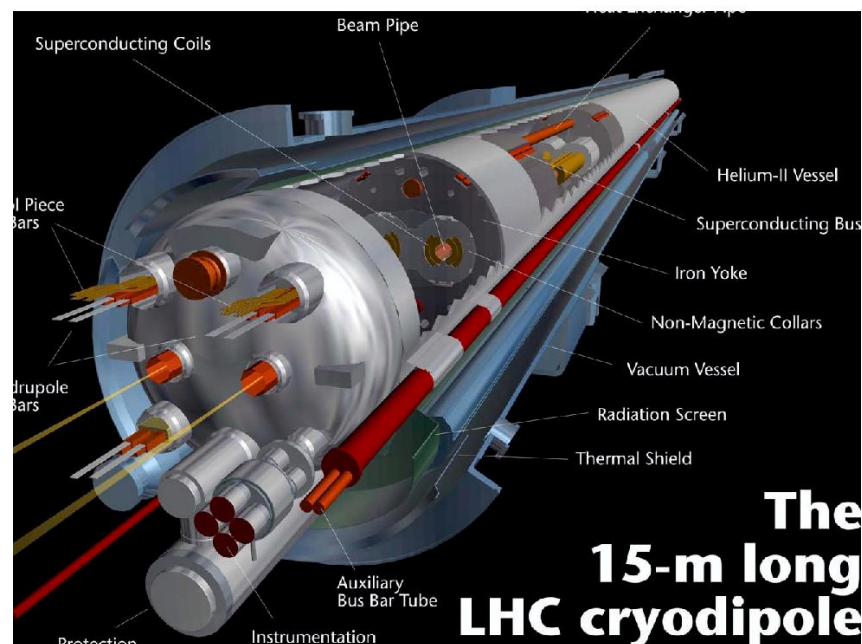
Ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία



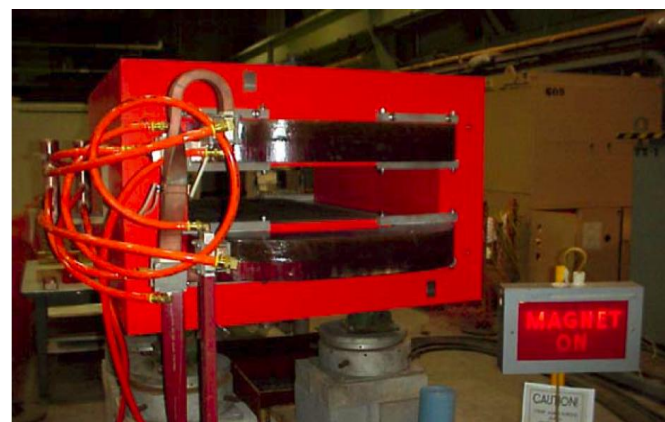
Διάταξη υμκυψέλης του δακτυλίου του SNS



Υπεραγώγιμη κοιλότητα
ραδιοσυχνότητας του SNS



Υπεραγώγιμο δίπολο του LHC



Δίπολο του δακτυλίου του SNS