



# Εισαγωγή στη Φυσική των Επιταχυντών

Φανουρία **ΑΝΤΩΝΙΟΥ**, Φωτεινή ΑΣΒΕΣΤΑ και  
Γιάννης **ΠΑΠΑΦΙΛΙΠΠΟΥ**

Τμήμα Δέσμεων – Ομάδα Φυσικής Επιταχυντών CERN

Επιμορφωτικό πρόγραμμα Ελλήνων καθηγητών  
CERN, Απρίλιος 2023



Today: ~ **30'000** accelerators operational world-wide\*

The **large majority** is used in **industry** and **medicine**

Industrial applications: ~ 20'000\*

Medical applications: ~ 10'000\*

**Less than a fraction of a percent** is used for **research** and discovery science

Cyclotrons

FFAG

Synchrotrons

Synchrotron light sources ( $e^-$ )

Lin. & Circ. accelerators/Colliders

*\*Source: World Scientific Reviews of Accelerator Science and Technology  
A.W. Chao*



Today: ~ 30'000 accelerators operational world-wide\*

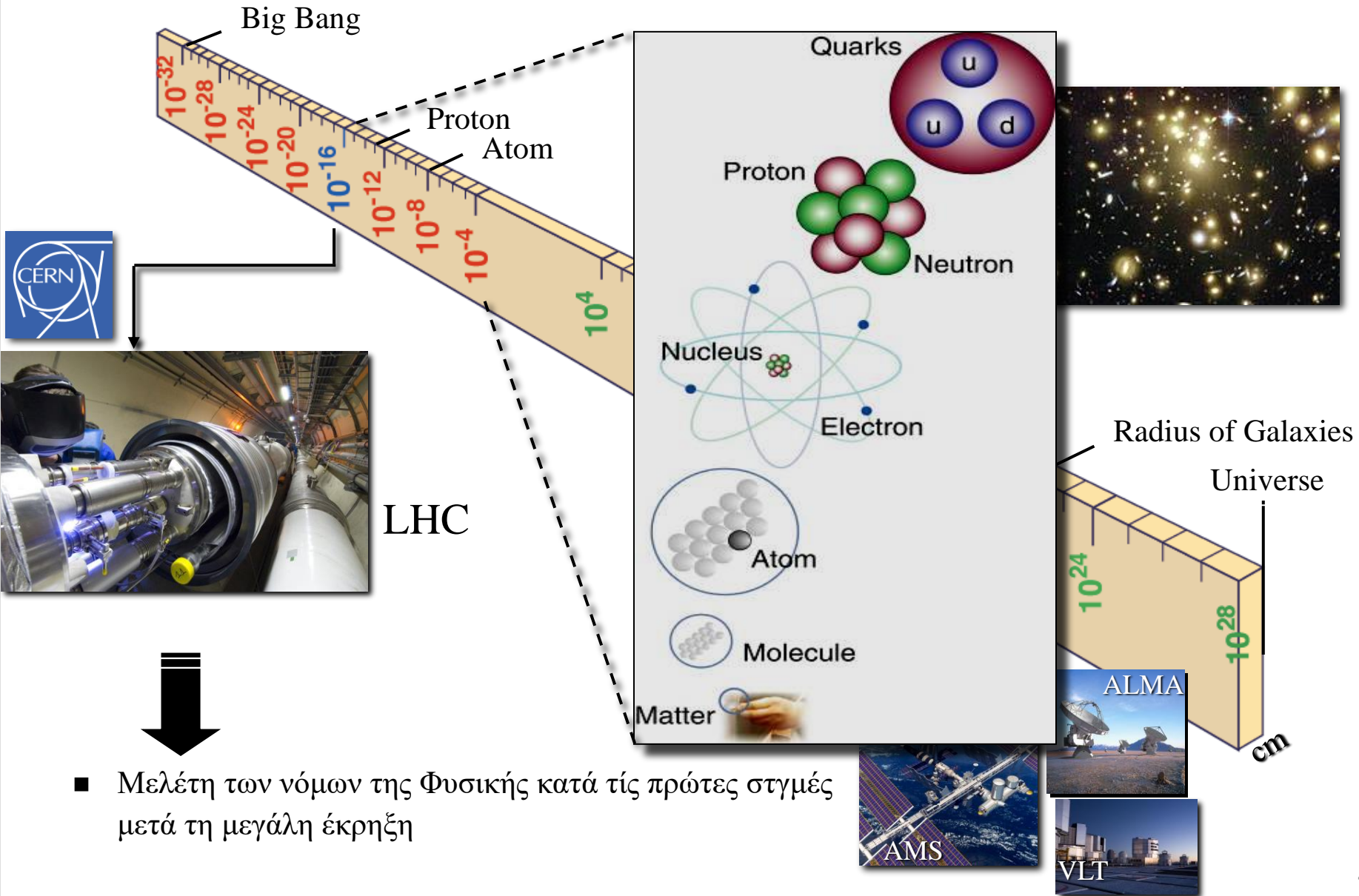
## Θεμελιώδης έρευνα

- Μελέτη των δομικών λίθων της ύλης
  - Φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων
  - Φασματοσκοπία
    - Ακτίνες X
    - Νετρόνια

## Εφαρμογές

- Ιατρική
  - Τομογραφία
  - Χειρουργική
  - Θεραπεία καρκίνου
- Χημεία - Βιολογία
  - Αποστείρωση τροφών
  - Αλλαγή ιδιοτήτων υλικών (transmutation πυρηνικών αποβλήτων)
- Παραγωγή ενέργειας
  - Αδρανειακή σύντηξη
  - Πολλαπλασιαστής ενέργειας

# Οι επιταχυντές στο CERN



- Μελέτη των νόμων της Φυσικής κατά τις πρώτες στιγμές μετά τη μεγάλη έκρηξη

Εισαγωγή στη Φυσική των Επιταχυντών

# Ιστορική Αναδρομή

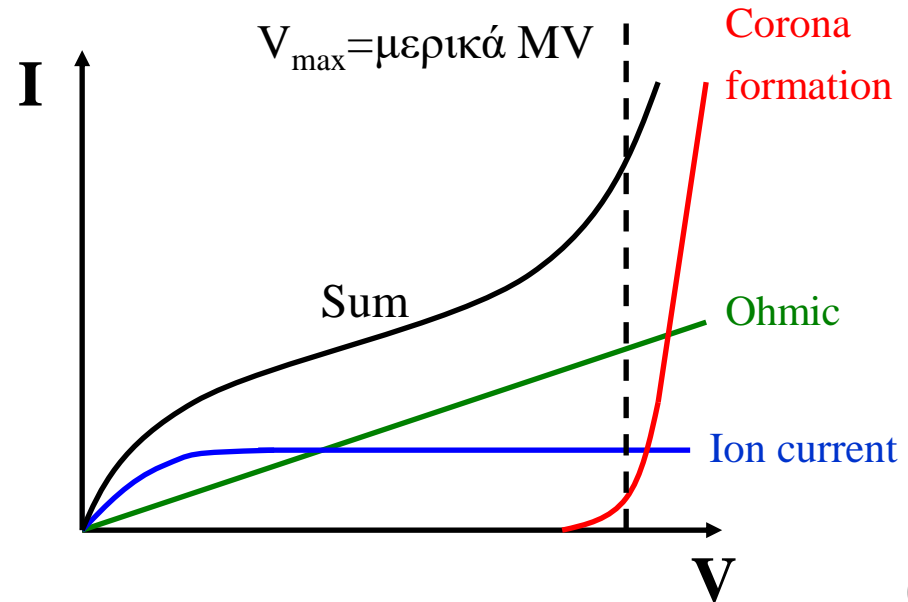
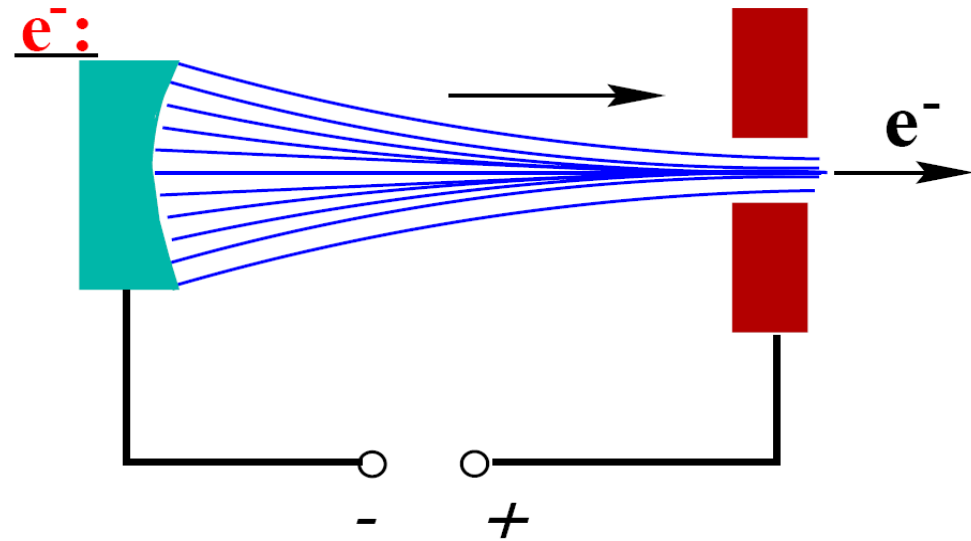
Η κούρσα για υψηλότερες ενέργειες



# Επιταχυντές συνεχούς τάσεως



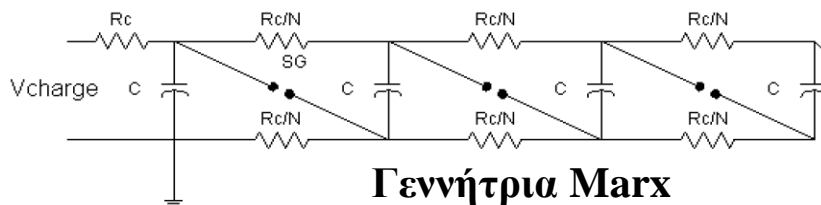
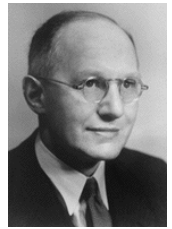
- Ο απλούστερος επιταχυντής (καθοδικοί σωλήνες, οθόνες...)
  - Πηγή σωματιδίων στο **μπλέ** ηλεκτρόδιο, επιτάχυνση σε ηλεκτρικό πεδίο και έξοδος στο **κόκκινο** ηλεκτρόδιο
  - Ενέργειες ανάλογες της εφαρμοζόμενης τάσης
  - Το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά για μεγάλες τάσεις δημιουργώντας σπινθήρες και απώλεια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



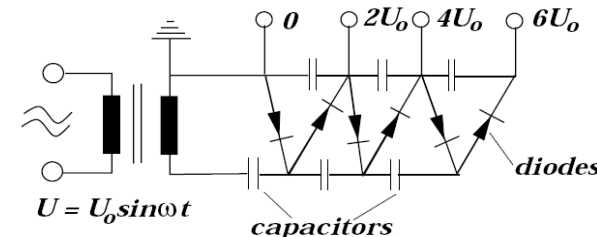
# Πολλαπλασιαστής τάσης

- **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  $V_{\text{charge}}$ 
  - Όταν δημιουργείτε αποφόρτιση με σπινθήρα, λόγω της υψηλής αντίστασης, οι  $N$  πυκνωτές συνδεδεμένοι δίνουν ολική τάση  $NV_{\text{charge}}$

Fermilab cascade γεννήτρια



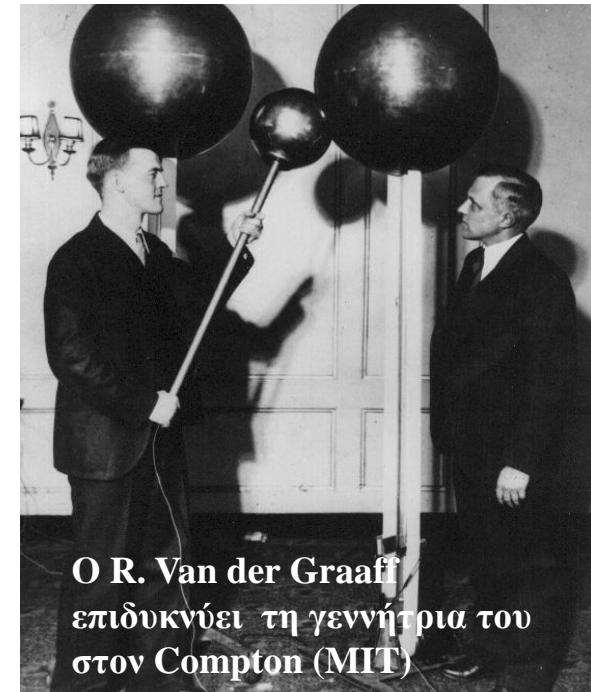
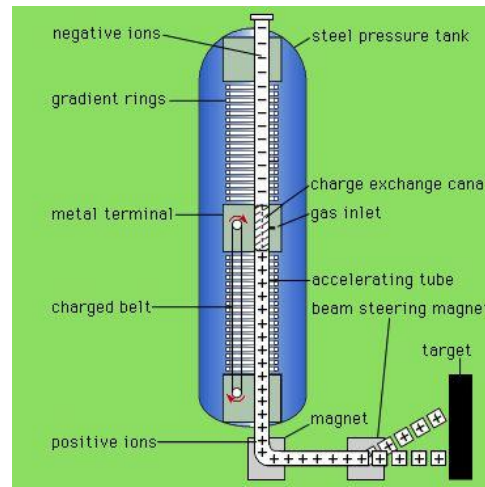
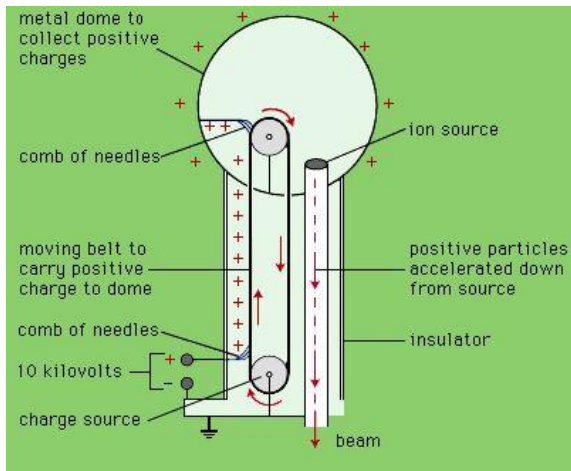
**Κύκλωμα Greinacker**



# Γεννήτρια Van der Graaff (1930)



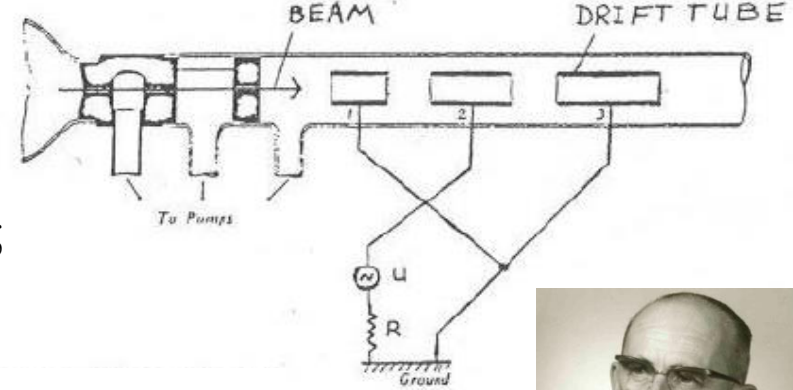
- Φορτία από παραγωγή κορώνας μεταφέρονται μέσω μονωτικού ιμάντα σε θόλο, φορτίζοντας τον με τη μέγιστη τάση (2MV)
- Υψηλότερες τάσεις μπορούν να επιτευχθούν μέσα σε δεξαμενή με μονωτικό αέριο (Φρέον)
- Δυνατότητα διπλασιασμού του δυναμικού (**Tandem**)
  - Αρνητικά φορτισμένα ιόντα επιταχύνονται από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



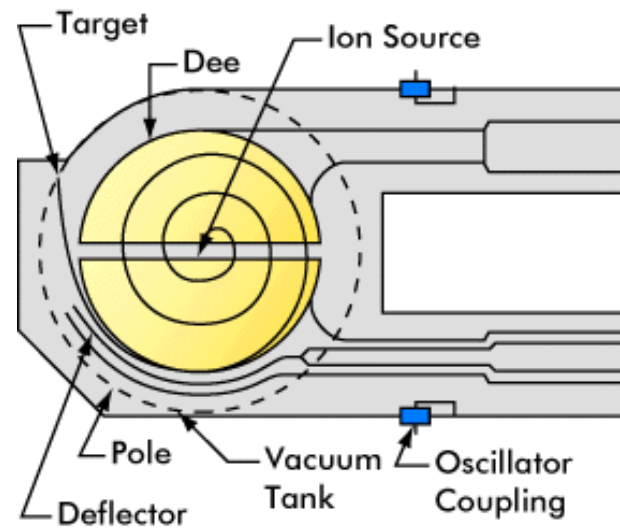
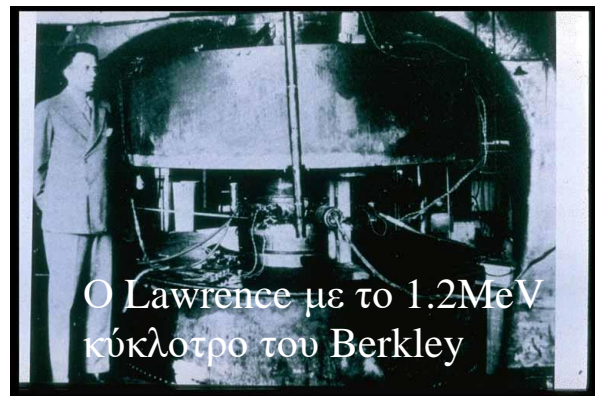


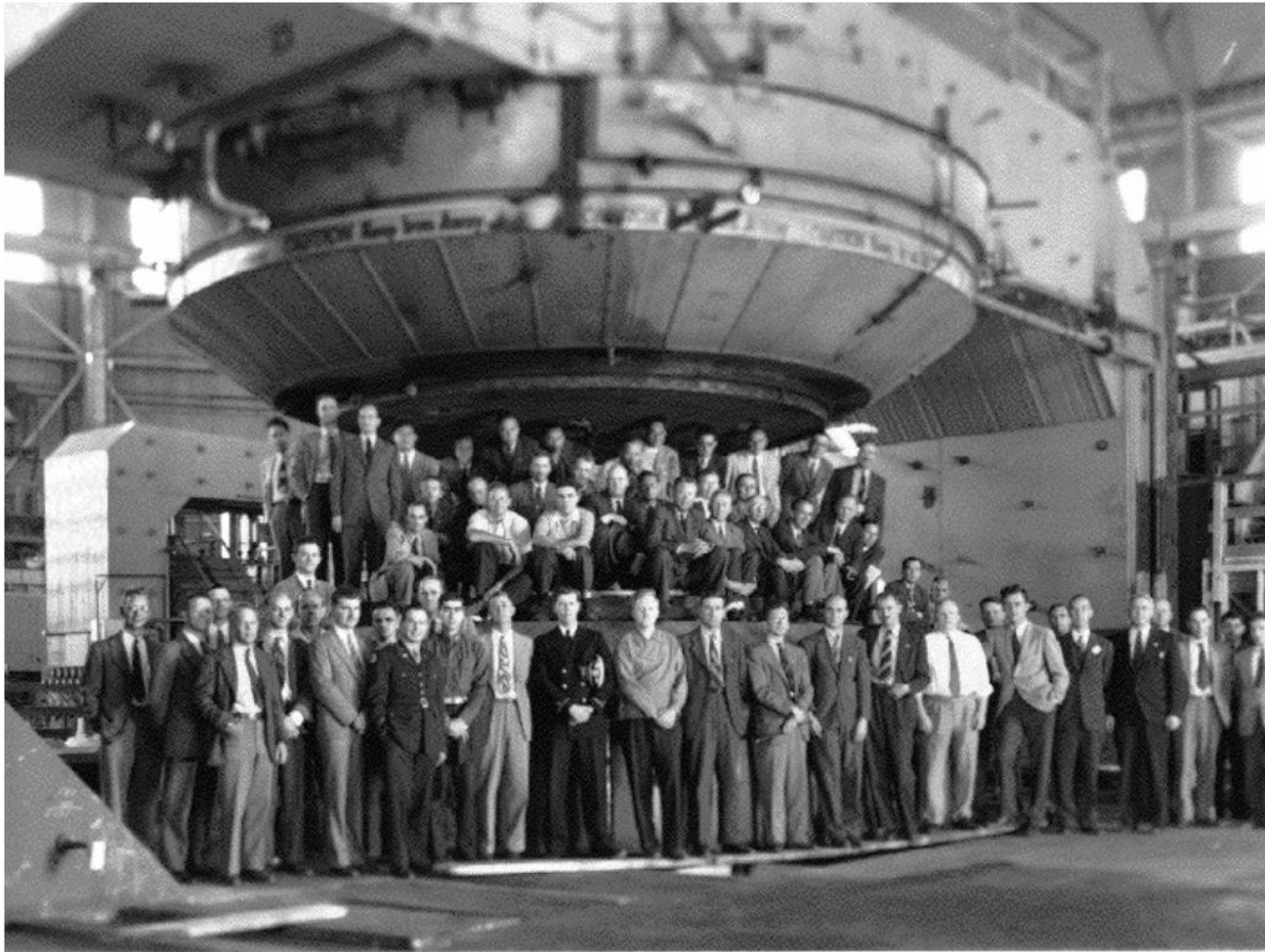
# Γραμμικοί επιταχυντές (linacs)

- 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



- 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 **ισοκύκλοτρου**:  $\omega_{RF} \propto B/\gamma$ . Ενέργειες έως  $600 \text{ MeV}$  επιτυγχάνονται, όμως σφάλματα του μαγνητικού πεδίου αποεστιάζουν τα σωματίδια (δημιουργία απωλειών)





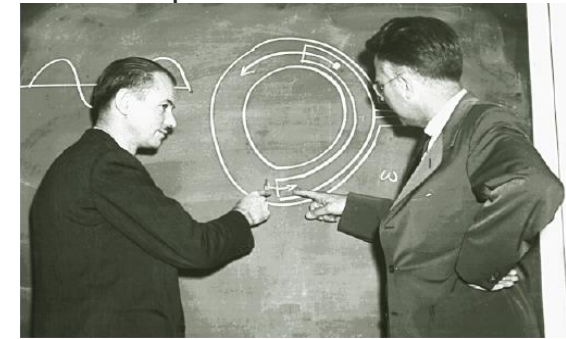
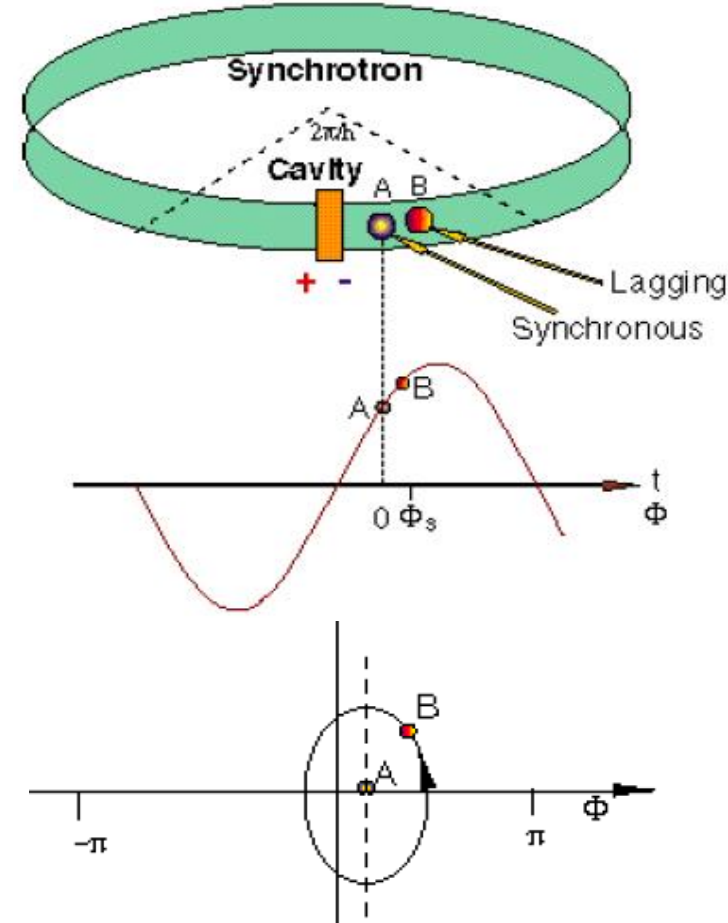
184-inch κύκλοτρο: 1 μόνο δίπολο διαμέτρου 467 cm

Berkeley campus, 1942

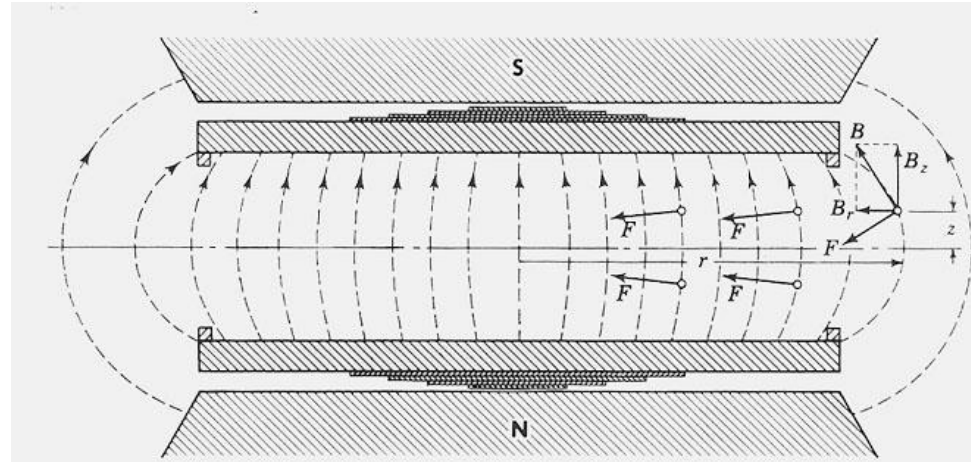
# Εστίαση Φάσης



- Ανακαλύφθηκε ανεξάρτητα από τους **McMillan** και **Veksler** (1945)
- Η **κοιλότητα ραδιοσυχνότητας** (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 κυλιότητα 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**



- 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 περιφές 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 **κατακόρυφα** 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

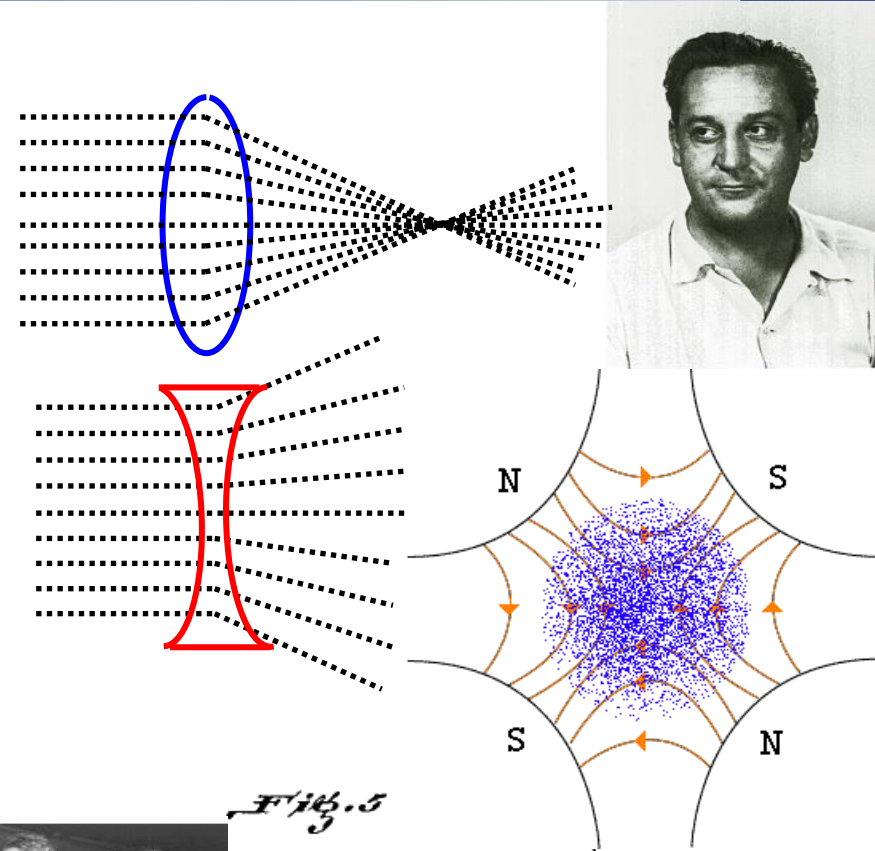
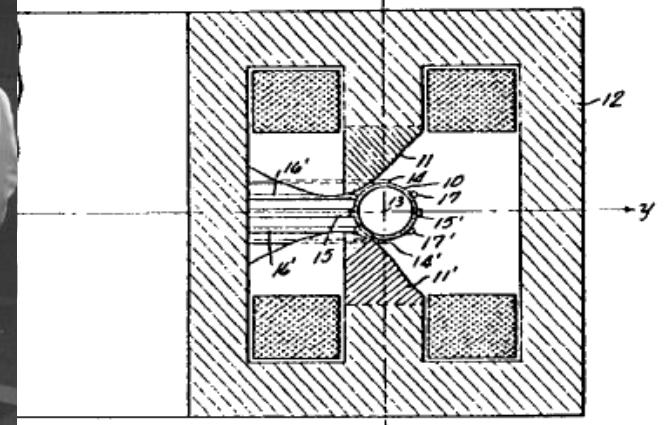
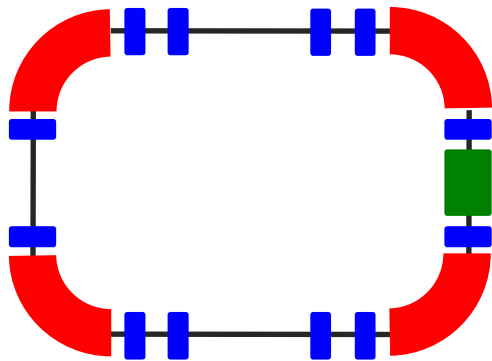


Fig. 5





Διπολικοί μαγνήτες για καθοδήγηση της δέσμης

Τετραπολικοί μαγνήτες για εστίαση της δέσμης

Κυλότητες ραδιοσυχνοτήτων για επιτάχυνση

Η κίνηση των σωματιδίων περιγράφεται από:

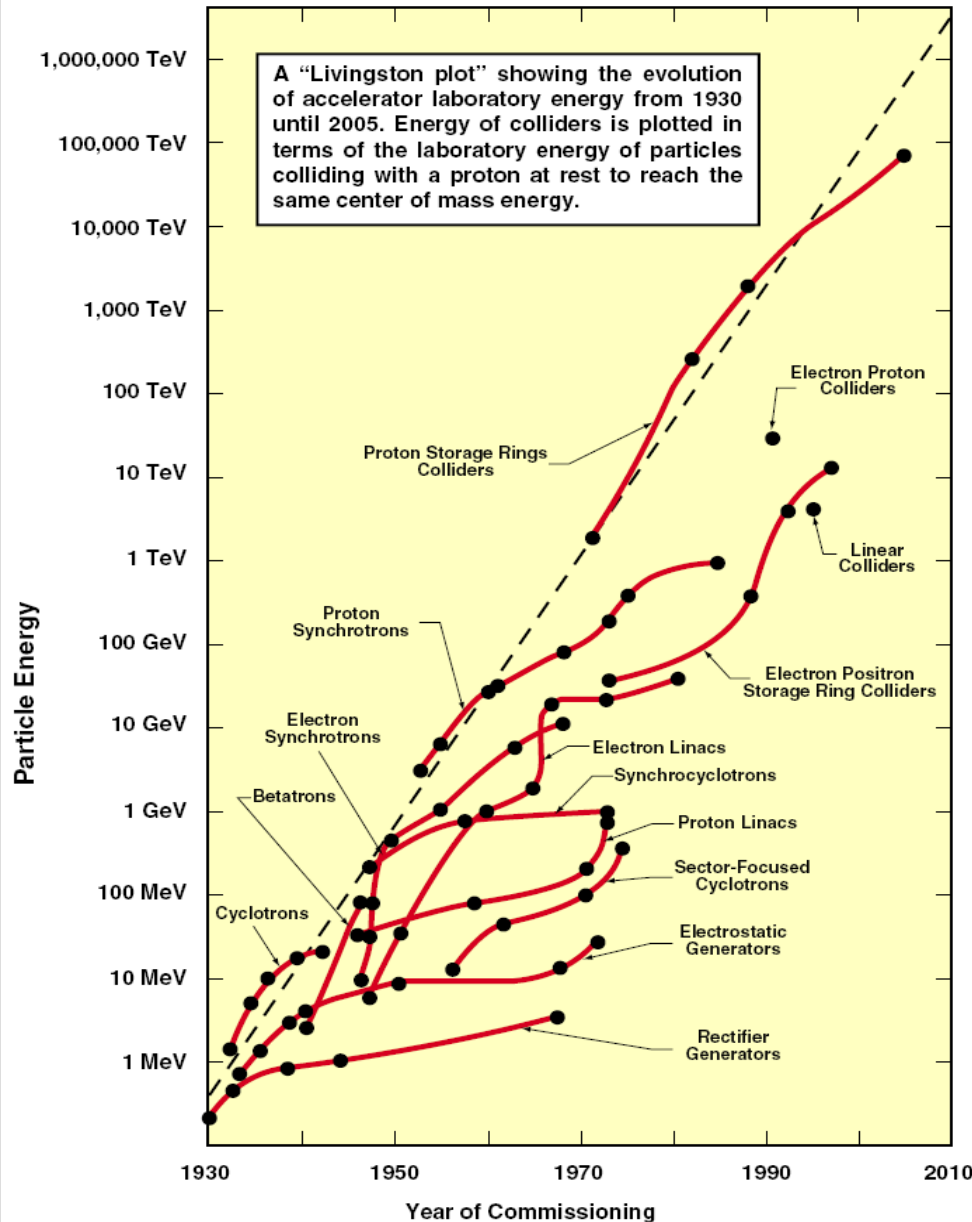
**Lorentz force**

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

- Χρησιμοποιούν **ηλεκτρικά πεδία** για επιτάχυνση και **μαγνητικά** για καθοδήγηση
- Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από αρκετούς διπολικούς μαγνήτες
- Η συχνότητα αλλάζει με την ορμή αλλά παράλληλα το πεδίο ευξάνεται **σύγχρονα** ώστε η ακτίνα των τροχιών να μένει σταθερή. Σε υψηλές ενέργειες:

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

# 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
  - Ένταση δέσμης
  - 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 έντασης
  - 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

- $\gamma = E/(m_0c^2)$  ο σχετικιστικός παράγοντας

- $\epsilon_n$  η νορμαλισμένη εκπεμπτικότητα (emittance)

- $\beta^*$  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

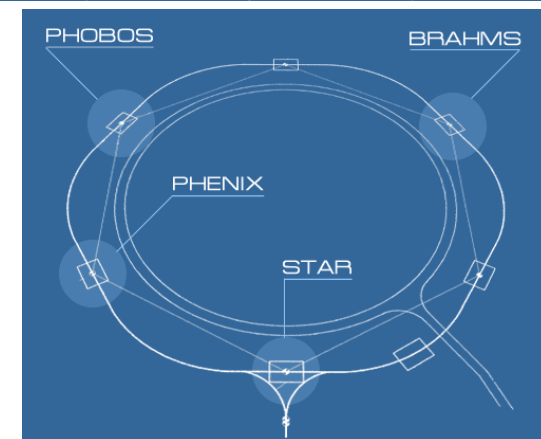
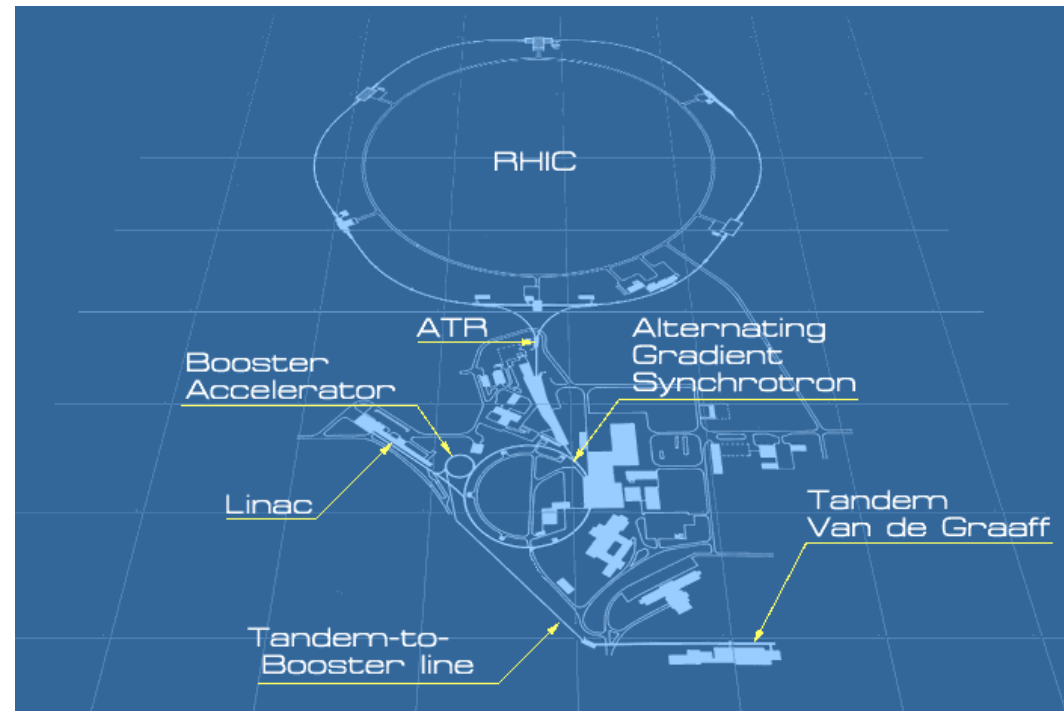
- Εκλαμπρότητα (Brightness), πυκνότητα φωτονίων

- $N_b$  ο αριθμός των φωτονίων

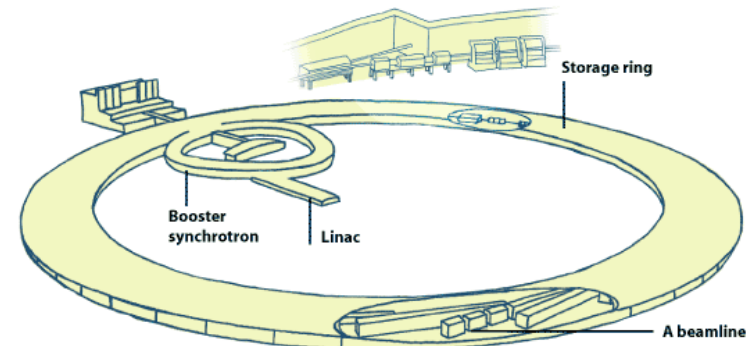
- $\epsilon_{x,y}$  η οριζόντια και κάθετη εκπεμπτικότητα

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

- Συγκρουστήρας ιόντων χρυσού, χαλκού και πολωμένων πρωτονίων με **ενέργειες έως 100 GeV/νουκλεόνιο**
- Οι 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 **πιό 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



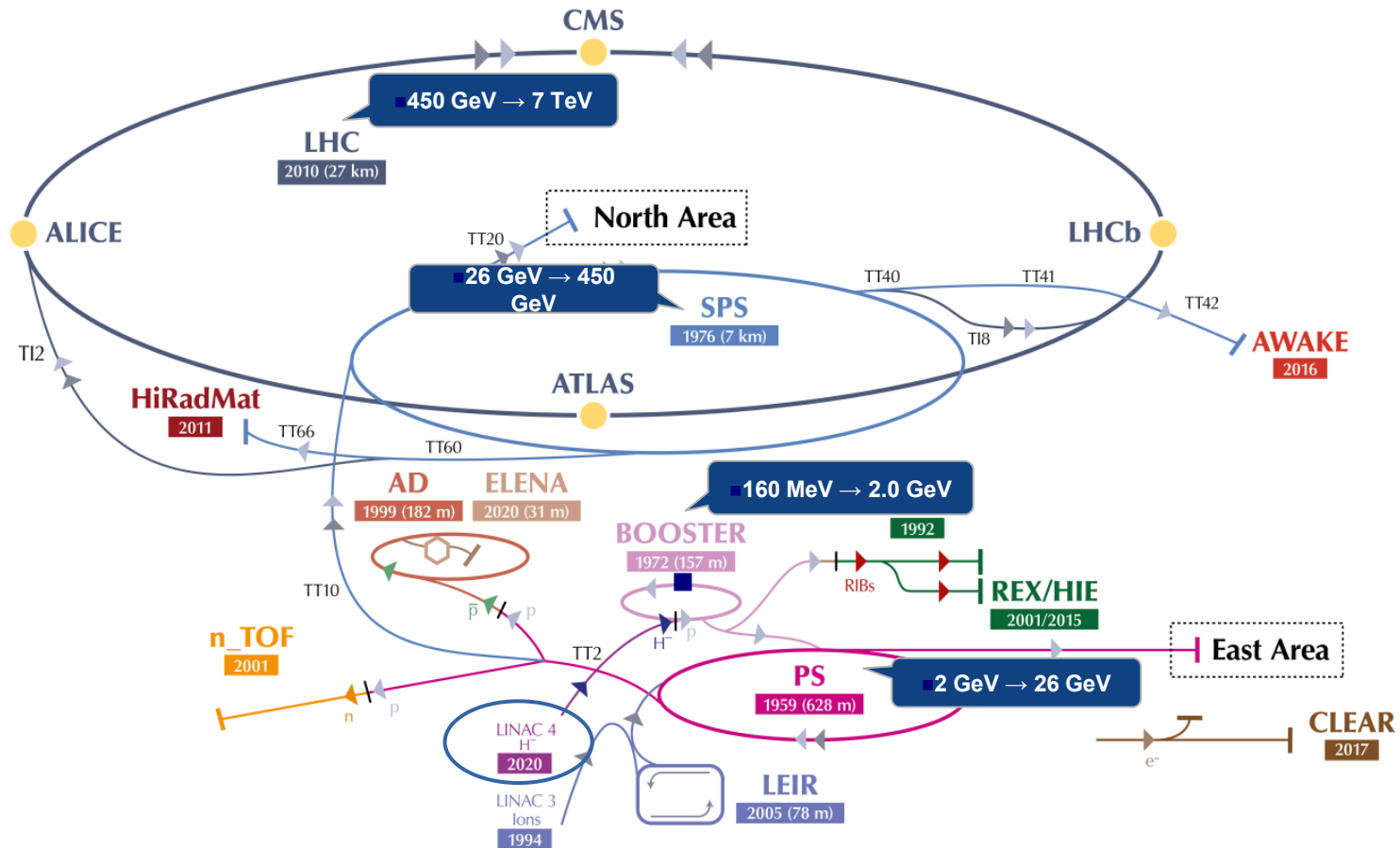
# Πηγή Νετρονίων Διάσπασης (SNS - ORNL)



- Επιστημονικό έργο συνεργασίας 6 εργαστηρίων (LBNL, LANL, JLAB, BNL, ANL, ORNL)
- Η Πηγή Νετρονίων κατα διάσπαση με ισχύ **1.4 MW**
- 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.)



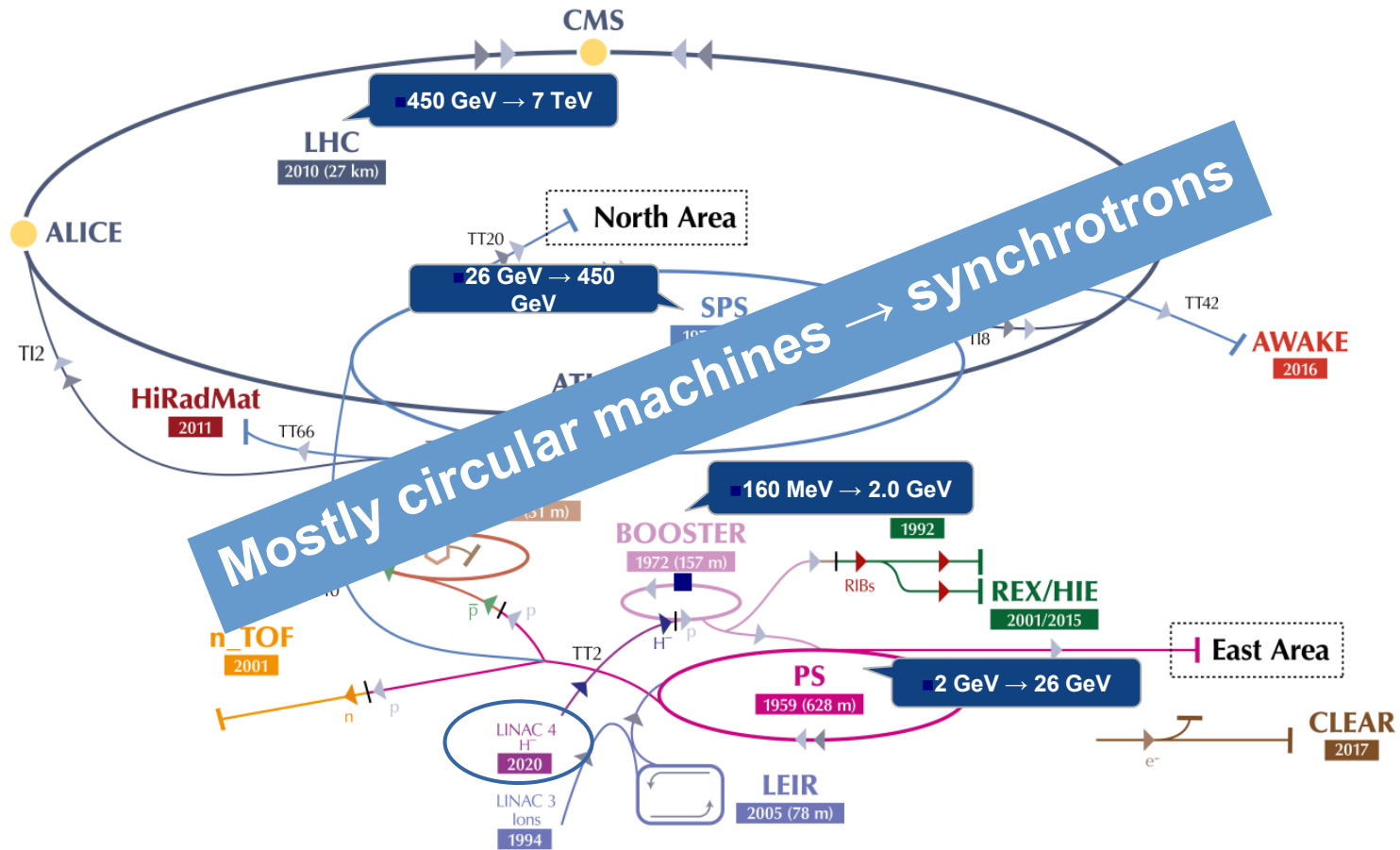
# Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN



▶ H<sup>-</sup> (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶ e<sup>-</sup> (electrons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials

# Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN



- ▶  $H^-$  (hydrogen anions)
- ▶ p (protons)
- ▶ ions
- ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
- ▶ n (neutrons)
- ▶  $\bar{p}$  (antiprotons)
- ▶  $e^-$  (electrons)

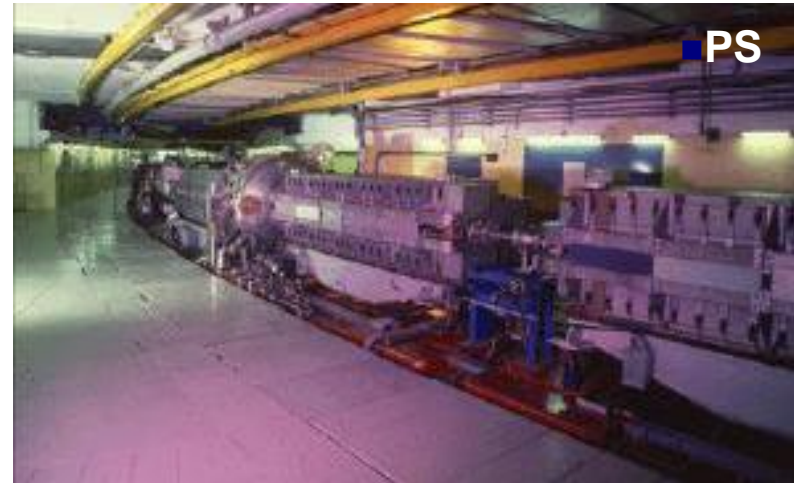
LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials



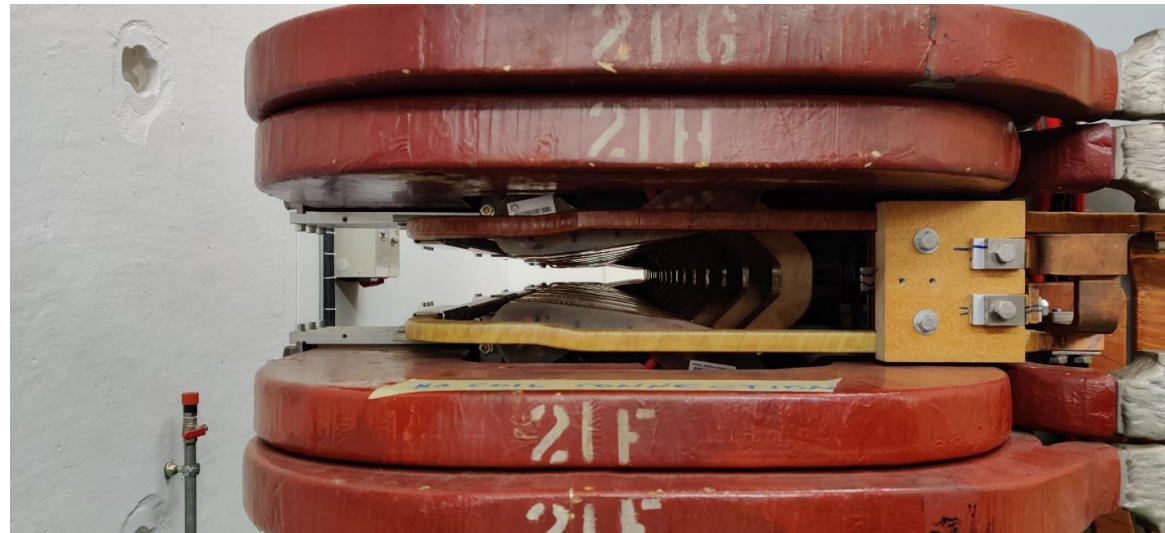
# Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN



- **PS**: σύγχροτρο πρωτονίων (Proton Synchrotron)
- Ο πρώτος επιταχυντής του CERN
- 1<sup>η</sup> λειτουργία: **1959**
- Ακόμα και σήμερα επιταχύνει δέσμες (**πρωτόνια και ιόντα**) για τον LHC και τα άλλα πειράματα του CERN



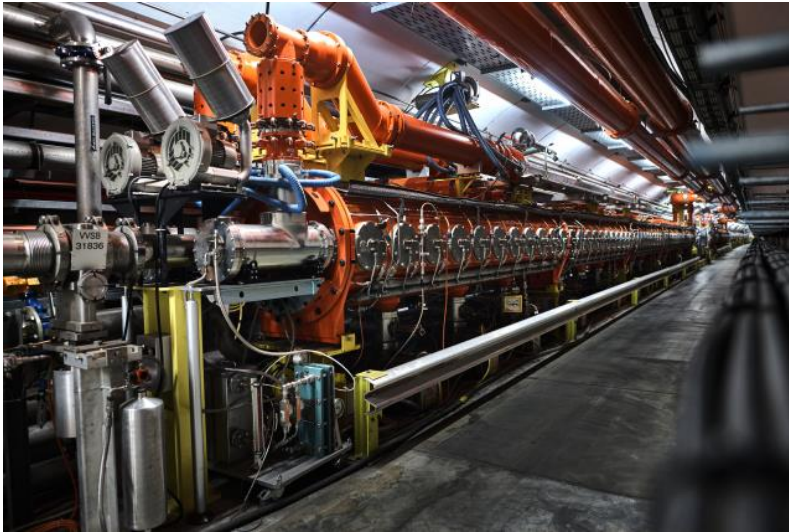
- Αποτελείται από 100 μαγνήτες συνδυαστικής λειτουργίας (combined function)
  - *Ο ίδιος μαγνήτης καθοδηγεί και εστιάζει τη δέσμη!*





- **PSB:** Ενισχυτικό σύγχροτρο πρωτονίων (Proton Synchrotron Booster)
- Ο πρώτος κυκλικός επιταχυντής του συμπλέγματος πρωτονίων του CERN
- 1<sup>η</sup> λειτουργία: **1972**
- Κύριος σκοπός του: να αυξήσει τον αριθμό των πρωτονίων που μπορεί να επιταχύνει ο PS.
- Αποτελείται από 4 επάλληλους δακτυλίους
  - Ουσιαστικά είναι 4 διαφορετικά σύγχροτρα με κοινά χαρακτηριστικά (μαγνήτες κλπ)

# Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN



- **SPS:** Υπέρ-σύγχροτρο πρωτονίων (Super Proton Synchrotron)
- Ο 2<sup>ος</sup> μεγαλύτερος επιταχυντής του CERN με περίμετρο 7km
- 1<sup>η</sup> λειτουργία: **1976**
- Ανακάλυψη των W και Z μποζονίων κατά τη λειτουργία του ως συγκρουστήρας (collider)
- Σήμερα λειτουργεί ως επιταχυντής παράγοντας δέσμες (**πρωτόνια και ιόντα**) για τον LHC και τα άλλα πειράματα του CERN

# Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN



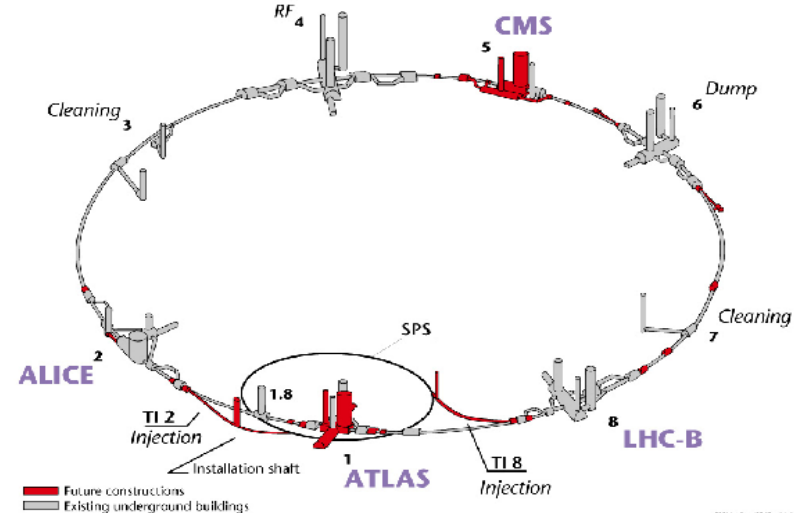
- **LHC**: Μεγάλος αδρονικός Συγκρουστήρας
- Ο μεγαλύτερος επιταχυντής του CERN με **περίμετρο 26.7km**
- 1<sup>η</sup> λειτουργία: **2008**
- Οι δέσμες περιστρέφονται με αντίθετη φορά οδηγούμενες από **1232 υπεραγωγία δίπολα**, μήκους **14.3m** και μέγιστου πεδίου **8T**
  - Λειτουργούν σε θερμοκρασία: **-271.3°C**
- Λειτουργεί με πρωτόνια και ιόντα



# Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN

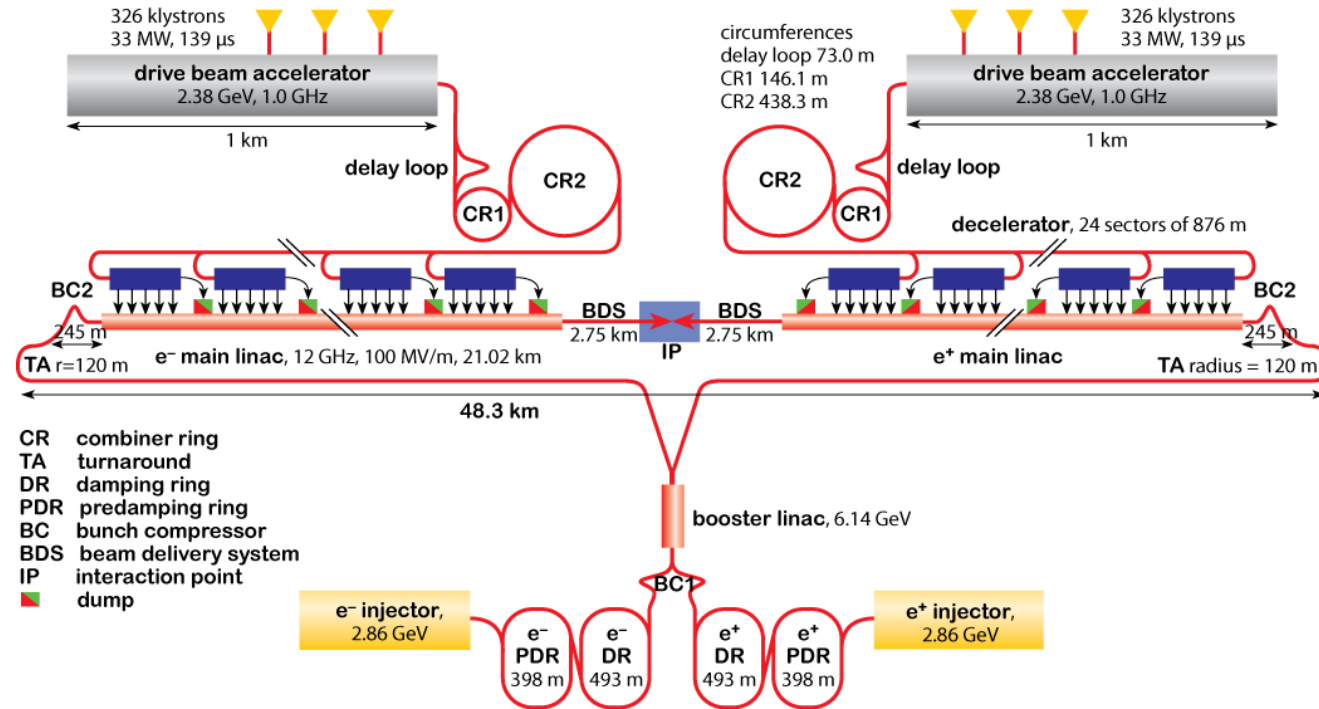


- Υπάρχουν 8 σημεία αλληλεπίδρασης, στα μισά από τα οποία είναι τοποθετημένοι οι ανιχνευτές 4 κύριων πειραμάτων (ATLAS, CMS, ALICE, LHC-B)
- Ο κύριος σκοπός: η παραγωγή, ανίχνευση και μελέτη **μποζονίων Higgs** (ο μηχανισμός απόκτησης μάζας)



- Εργασίες για την αναβάθμισή του (πρωτότυπο δίπολο) μέχρι το 2029 LHC υψηλής φωτεινότητας (HL-LHC) για να αυξηθεί η αποδοτικότητα του LHC (~x10)

# Μελλοντικοί επιταχυντές: CLIC



- Compact  
Linear  
Collider

- e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> collider  
for up to 3 TeV

- Luminosity  
 $6 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  (3 TeV)

- Normal conducting  
RF accelerating structures

- Gradient 100 MV/m

- RF frequency 12 GHz

- Two beam acceleration principle for cost minimisation and efficiency

- Many common points with ILC, similar elements, but different parameters

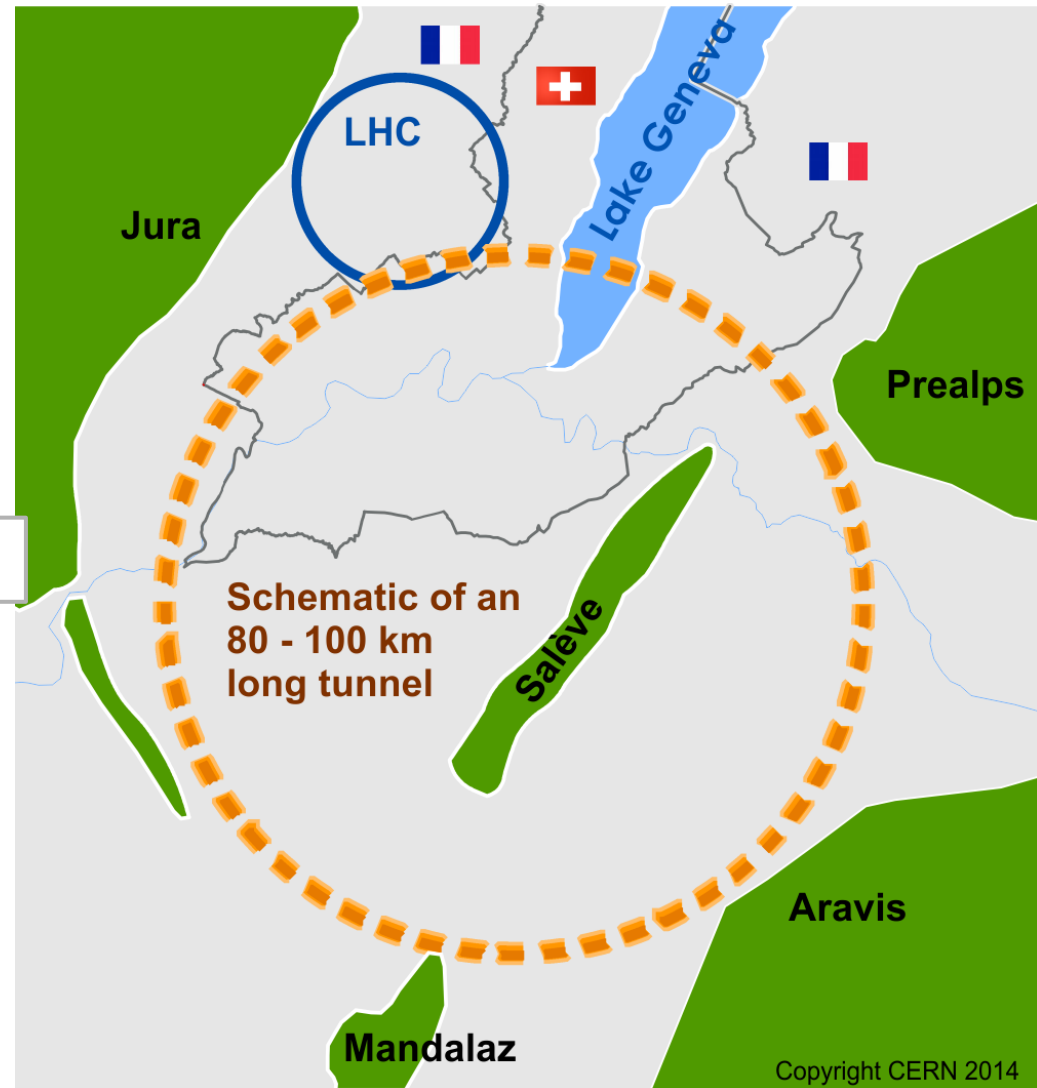


# Μελλοντικοί επιταχυντές: FCC

- **FCC**: Μελλοντικός Κυκλικός Συγκρουστήρας
- Περίμετρος **100 km**
- Συγκρουστήρας αδρονίων (**FCC-hh**)

**~16 T and 100 TeV  $pp$  σε 100 km**

- Συγκρουστήρας λεπτονίων (**FCC-ee**) ως ενδιάμεσος επιταχυντής

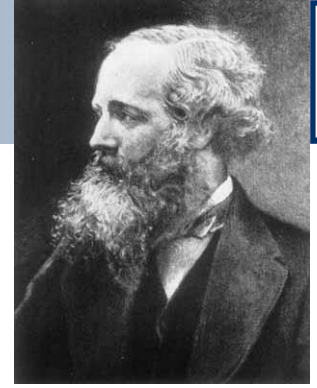






# Βασικές αρχές δυναμικής των επιταχυντών

# 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

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

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



**Νόμος Gauss:** απόκλιση ηλεκτρικού πεδίου δίνει την πυκνότητα πηγών φορτίου

**Νόμος επαγωγής του Faraday:** μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ηλεκτρικό πεδίο

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

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

**Νόμος Gauss για μαγνητισμό:** δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα

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



$E$  = ηλεκτρικά πεδία [V/m]

$\mu_0$  (μαγνητική διαπερατότητα) =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [C V<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]

$B$  = μαγνητική επαγωγή [T]

$\epsilon_0$  (ηλεκτρική διαπερατότητα) =  $8.854 \cdot 10^{-12}$  [V s A<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]

$\rho$  = πυκνότητα φορτίου [C/m<sup>3</sup>]

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

$j$  = πυκνότητα ρεύματος [A/m<sup>2</sup>]

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

# Δύναμη Lorentz

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

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

ή

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

# Δύναμη Lorentz και επιτάχυνση



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

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

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

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

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

# Δύναμη Lorentz και επιτάχυνση



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

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

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

$$\Delta T = \int \mathbf{F} ds = q \int \mathbf{E} ds + q \int \cancel{(\mathbf{v} \times \mathbf{B})} \mathbf{v} dt \quad \text{ή}$$

$$\frac{dT}{dt} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F} = q\mathbf{v} \cdot (\mathbf{E} + \cancel{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}) = q\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}$$

- Κινητική ενέργεια αλλάζει από **ηλεκτρικά (όχι από μαγνητικά πεδία)**

# Δύναμη Lorentz και καθοδήγηση



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

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

ή

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

- Στους επιταχυντές: **μαγνητικά πεδία** χρησιμοποιούνται για **καθοδήγηση**

# Δύναμη Lorentz και καθοδήγηση



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

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

- Στους επιταχυντές: **μαγνητικά πεδία** χρησιμοποιούνται για **καθοδήγησή**
- Εξίσωση Lorentz για την **οριζόντια συνιστώσα** της δύναμης ενός σωματιδίου που κινείται στην **επιμήκη διεύθυνση z**

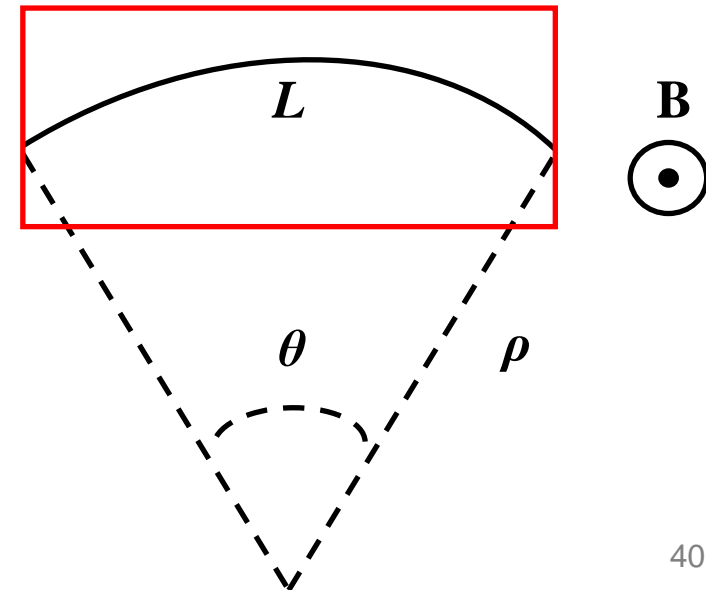
$$\frac{dp_x}{dt} = \mathbf{F}_x = q(E_x - v_z B_y)$$

- Για σχετικιστικά σωματίδια  $v_z \approx c$  και  $v_z B_y \gg E_x$ , αφού ένας απλός μαγνήτης **1 T** (δηλ.  $1 \text{ V s/m}^2$ ), ασκεί δύναμη σε ένα φορτίο που αντιστοιχεί σε ηλεκτρικό πεδίο  **$\sim 300 \text{ MV/m}$**
- Άρα, για **σχετικιστικά σωματίδια**, τα **μαγνητικά πεδία** είναι πολύ πιο αποτελεσματικά στο να **καθοδηγούν** τα σωματίδια

# Δίπολα

- Θεωρούμε κυκλικό επιταχυντή σωματιδίων ενέργειας  $E$  με  $N$  δίπολα μήκους  $L$
- Γωνία κάμψης  $\theta = \frac{2\pi}{N}$
- Ακτίνα κάμψης  $\rho = \frac{L}{\theta}$
- «Ολικό» διπολικό πεδίο

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





# Δίπολα

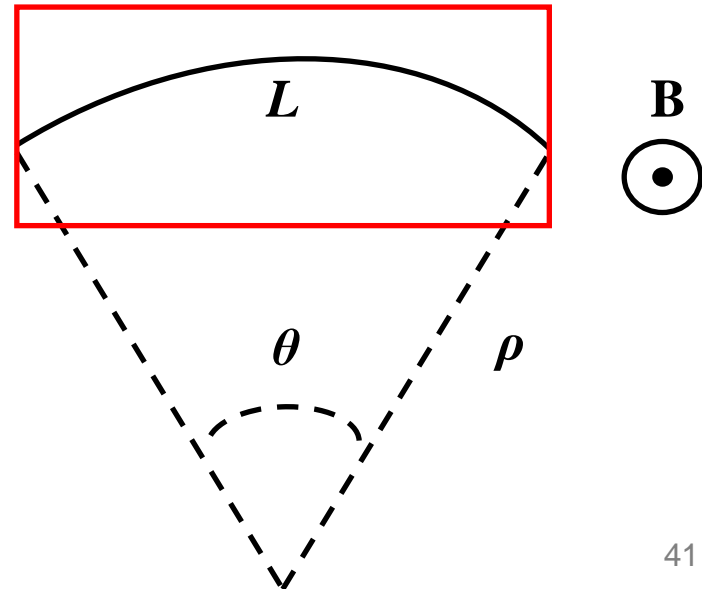
- Θεωρούμε κυκλικό επιταχυντή σωματιδίων ενέργειας  $E$  με  $N$  δίπολα μήκους  $L$
- Γωνία κάμψης  $\theta = \frac{2\pi}{N}$
- Ακτίνα κάμψης  $\rho = \frac{L}{\theta}$



- «Ολικό» 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 χρησιμοποιηθούν
- Η περιφέρεια του δακτυλίου (κόστος) εξαρτάται από την επιλογή του πεδίου



**Example LHC:**



**7000 GeV proton storage ring ( $q = +1e$ )**

**1232 dipole magnets of  $l=15\text{m}$**

**What is the required dipole field?**

**Example LHC:**



**7000 GeV proton storage ring ( $q = +1e$ )**

**1232 dipole magnets of  $l=15\text{m}$**

**What is the required dipole field?**

$$\beta E [\text{GeV}] = 0.2998 B \rho [\text{Tm}]$$

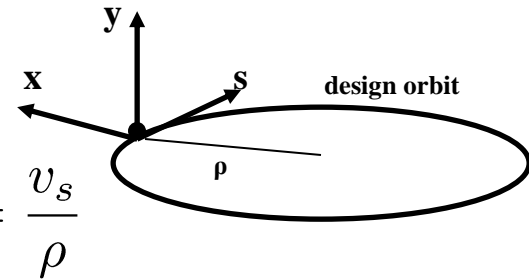
$$\theta = \frac{2\pi}{N} = \frac{l}{\rho}$$

$$B = \frac{2\pi \cdot 7000}{0.2998 N \cdot l} = 8.3\text{T}$$

# Εστίαση δέσμης



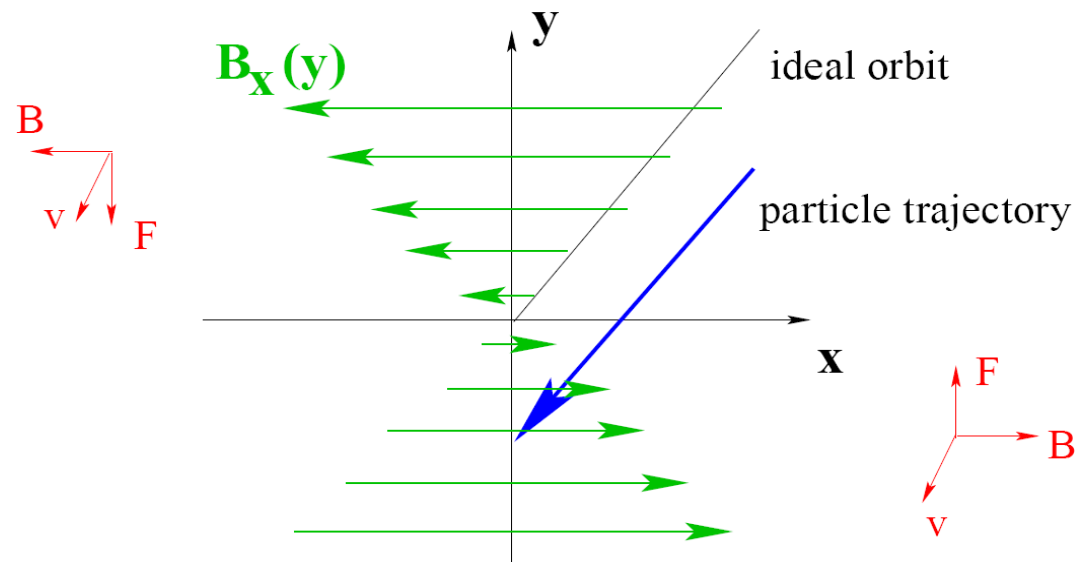
- Έστω σωματίδιο στην ιδεατή τροχιά
- Στο **οριζόντιο επίπεδο**, εκτελεί αρμονικές ταλαντώσεις  $x = x_0 \cos(\omega t + \phi)$  με συχνότητα  $\omega = \frac{v_s}{\rho}$
- Η οριζόντια επιτάχυνση περιγράφεται από  $\frac{d^2 x}{ds^2} = \frac{d^2 x}{v_s^2 dt^2} = -\frac{1}{\rho^2} x$
- Υπάρχει **ασθενής εστίαση** στο οριζόντιο επίπεδο
- Στο **κατακόρυφο 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 **60ms** (μερικές 100αδες στροφές του LHC)



χρειάζεται εστίαση



# Τετράπολα

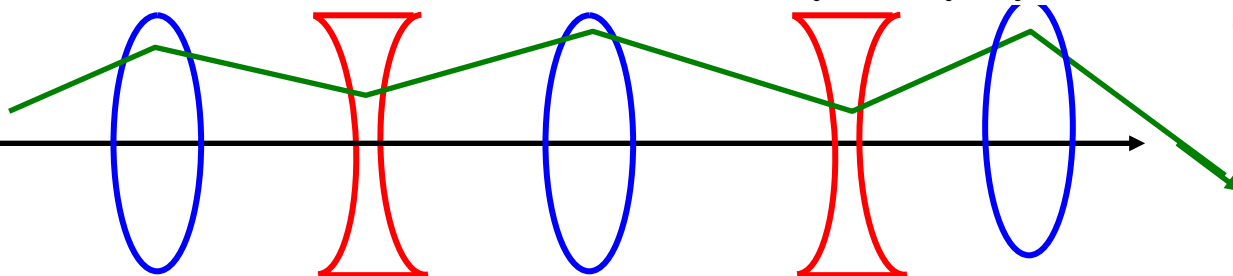
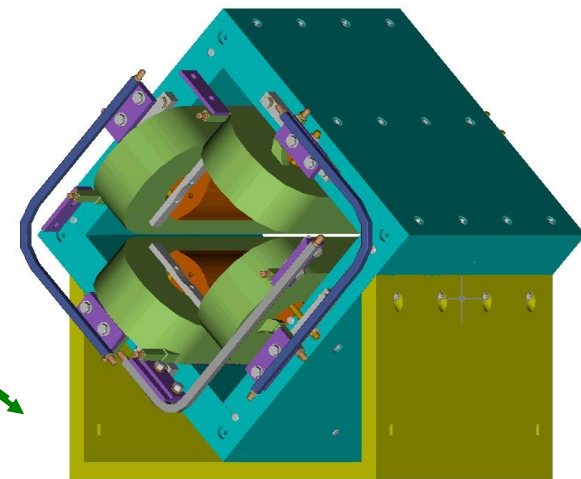
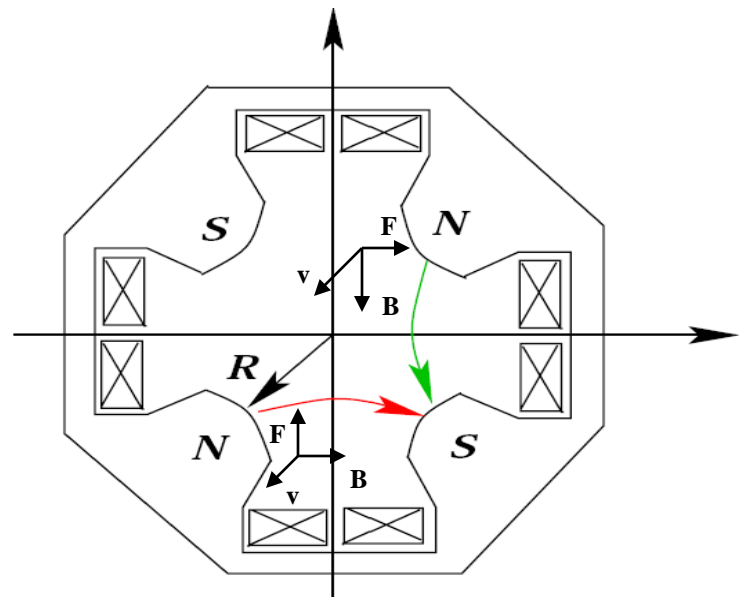


- Τα τετράπολα εστιάζουν στο ένα επίπεδο και αποεστιάζουν στο άλλο
- Το πεδίο είναι  $(B_x, B_y) = g(y, x)$
- Η δύναμη γράφεται  $(F_x, F_y) = k(y, -x)$
- Χρειάζεται εναλλασσόμενη εστίαση και αποεστίαση ώστε να ελεγχθεί η δέσμη, **εναλλασσόμενη εστιακή απόκλιση**
- Απο την οπτική γνωρίζουμε ότι ο συνδυασμός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

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

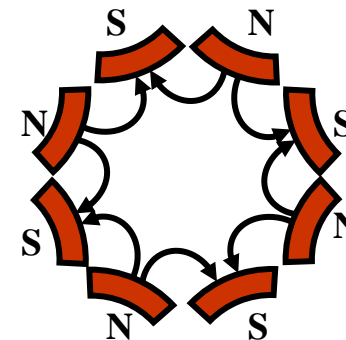
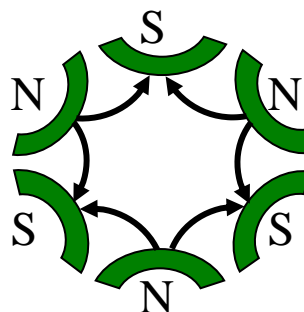
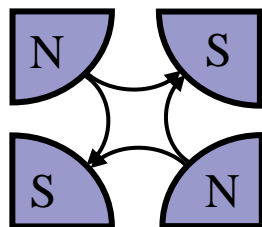
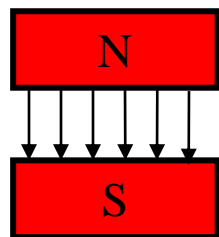
- Εάν  $f_1 = -f_2$ , υπάρχει ένα καθαρό φαινόμενο εστίασης

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



• **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  $\pi/n$ , το πεδίο αντιστρέφεται (αλλάζει πολικότητα)

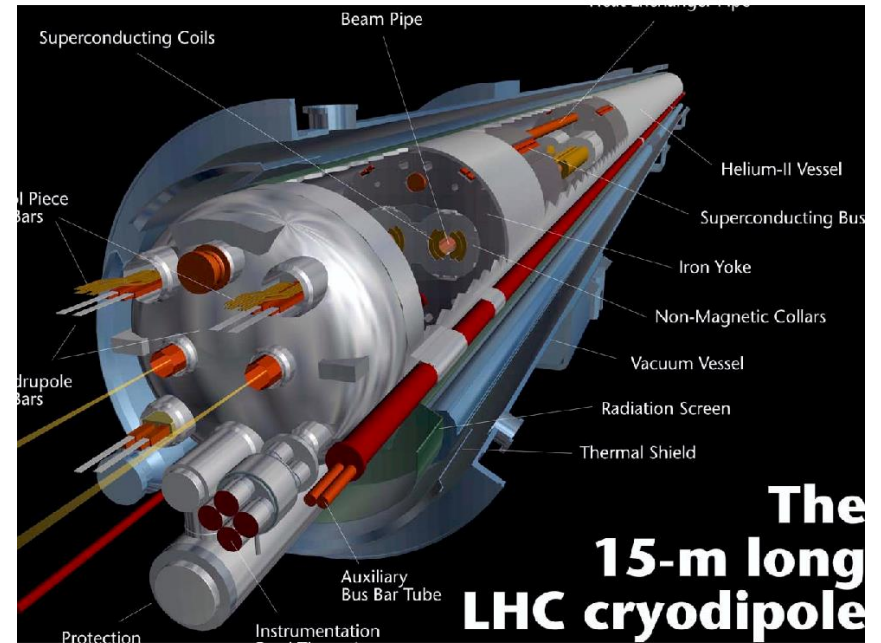
## ■ Κύρια στοιχεία

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

## ■ Βοηθητικά στοιχεία

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

*Thank you!*

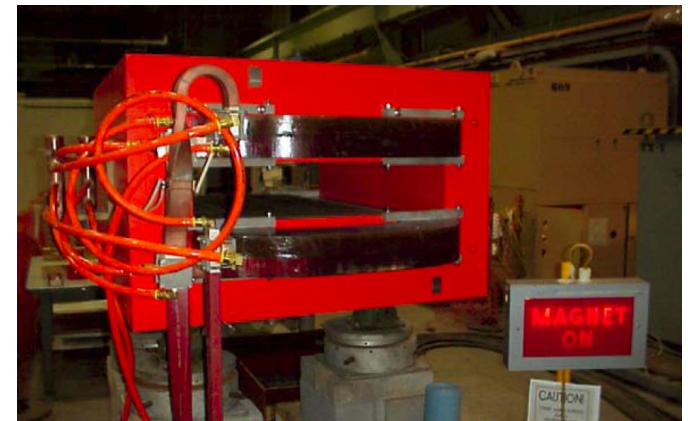


**The 15-m long LHC cryodipole**

Υπεραγωγίμο δίπολο του LHC



Υπεραγωγίμη κοιλότητα  
ραδιοσυχνότητας του SNS



Δίπολο του δακτυλίου του SNS



- **Ενέργεια**

- 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)
- Η ορμή είναι  $c p = \frac{v}{c} E$  (μονάδα μέτρησης eV/c)
- Η κινητική ενέργεια  $E_{kin} = E - E_0$  .
- Για σχετικιστικά σωματίδια  $c p \approx E \approx E_{kin}$  όλες οι ποσότητες αναφέρονται ως «ενέργεια».
- Για βαρέα ιόντα, η ενέργεια αναφέρεται σε κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο

- **Ρεύμα δέσμης**

- ο Μετρημένο σε Amperes (ή κυρίως σε χαμηλότερες τάξης, mA και  $\mu\text{A}$ )
- 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 (1Tesla=10000Gauss)

▪ Εξίσωση Lorentz

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

▪  $E_{tot}$ : Ολική ενέργεια  
 $T$ : Κινητική ενέργεια

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

$\beta$ : «κανονικοποιημένη» ταχύτητα

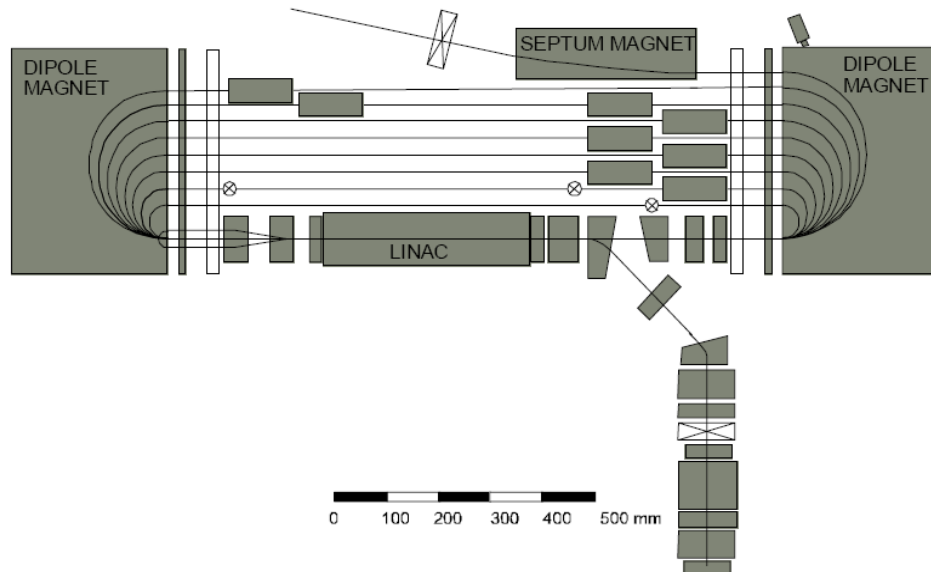
$$\beta = \frac{v}{c}$$

$\gamma$ : «κανονικοποιημένη» ενέργεια

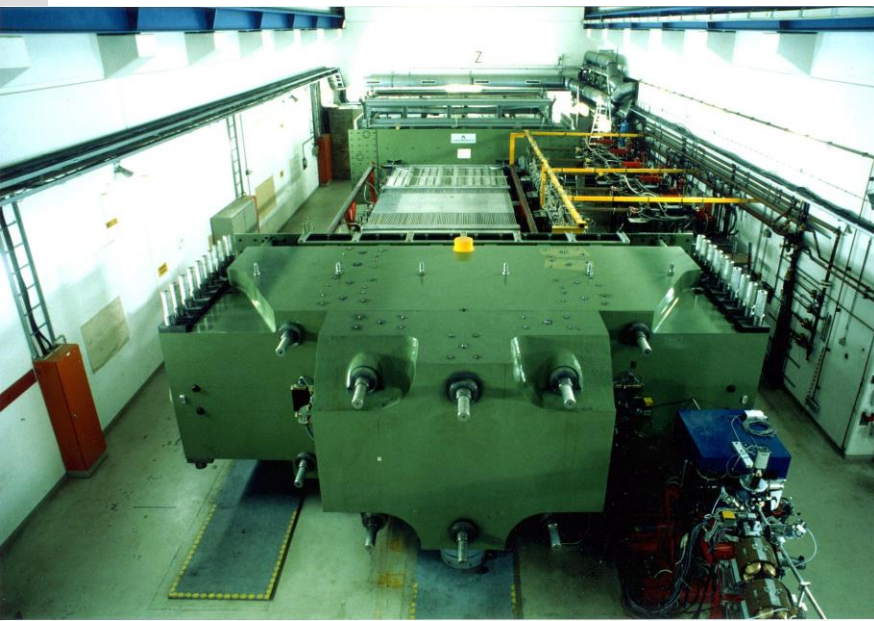
$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$$

$\beta\gamma$ : «κανονικοποιημένη» ορμή

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



Μίκροτρον του MAMI σε σχήμα σταδίου

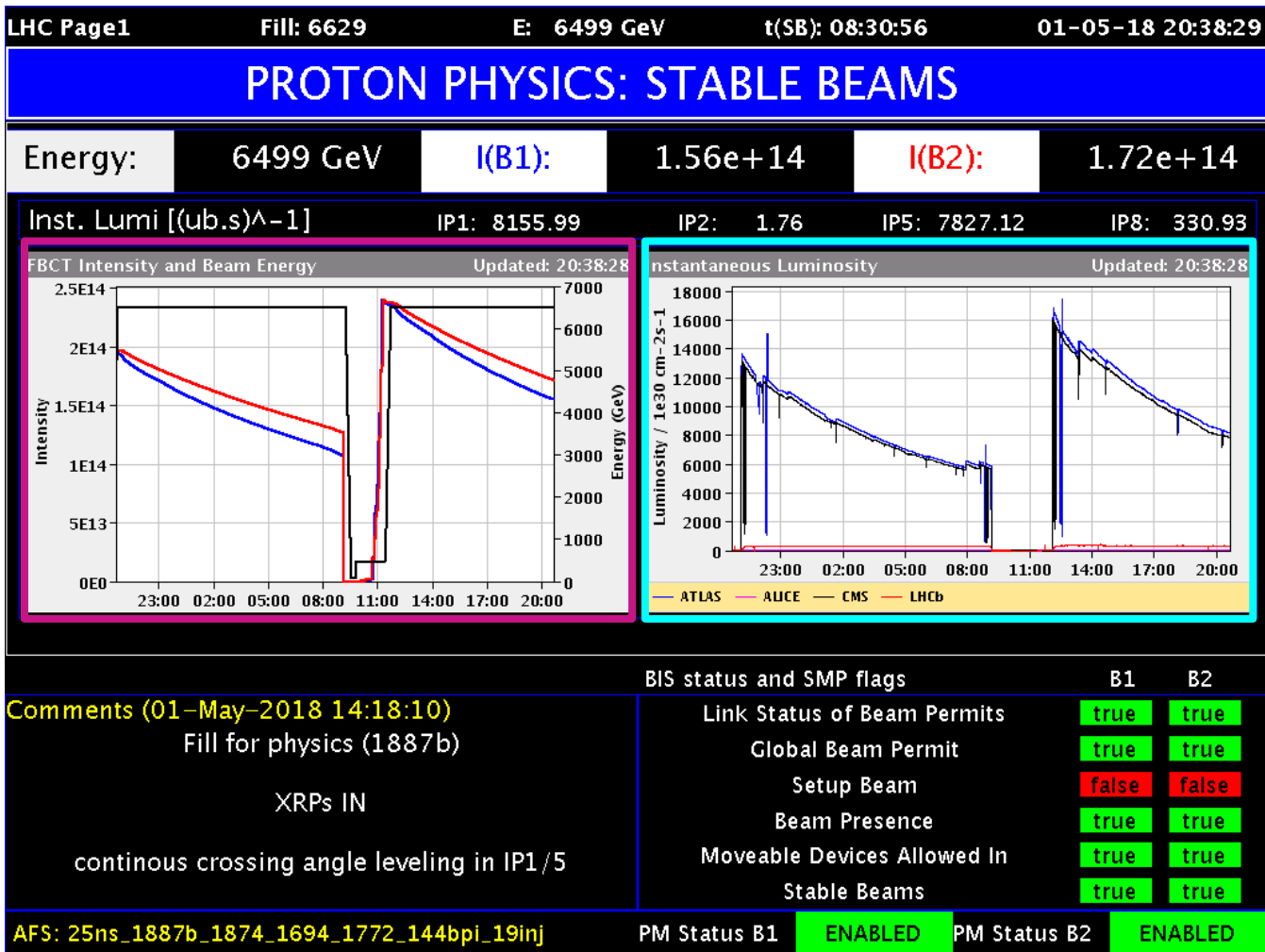


- Ιδέα του **Veksler**(1944), πρωτοκατασκευάστηκε από την ομάδα του **Kapitza** στη δεκαετία του 60.
- Τα ηλεκτρόνια γίνονται πολύ γρήγορα σχετικιστικά σωματίδια και τα κύκλωτρα είναι ανεπαρκή
- Επιλογή της ραδιοσυχνότητας η οποία αυξάνει την ενέργεια ανά στροφή ώστε η μεγαλύτερη τροχία να συντονίζεται 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  $\pi$  από δύο συμμετρικούς διπολικούς μαγνήτες, και κινούνται σε ευθύγραμμα τμήματα όπου κοιλότητες ραδιοσυχνοτήτων τα επιταχύνουν

# LHC Luminosity



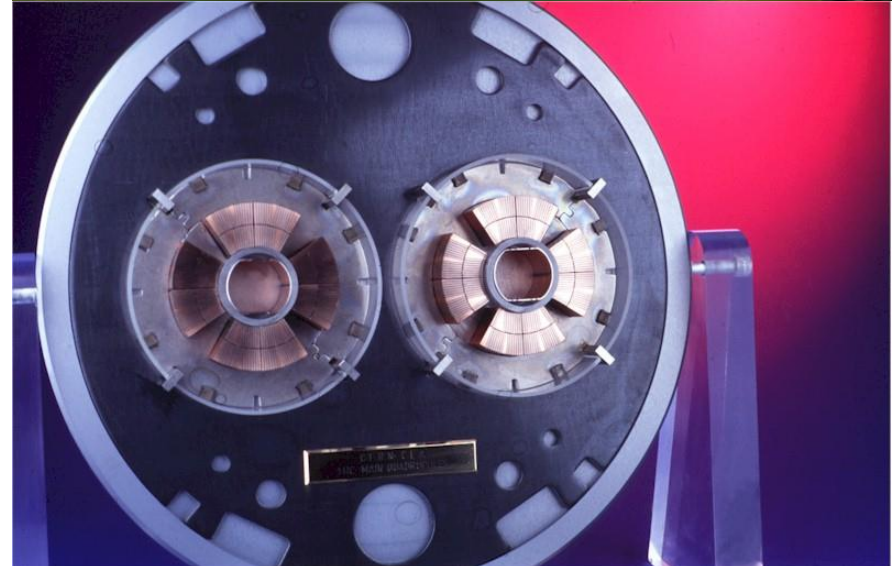
- LHC page 1: The **intensity** of **Beam1** and **Beam2** and the **luminosity** evolution of the LHC, published during operation

# Περίληψη κυκλικών επιταχυντών

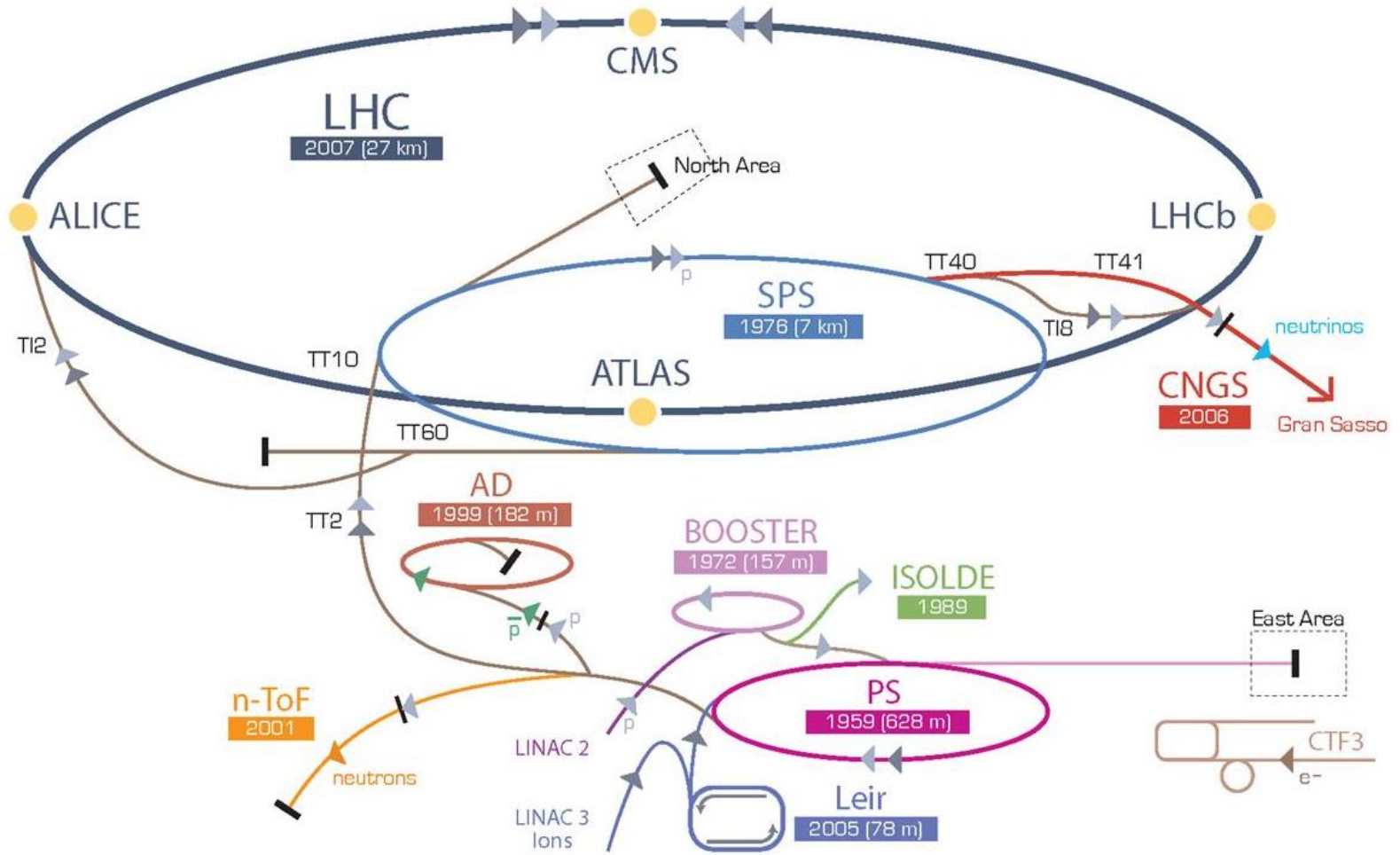


Επιταχυντής	Ραδιο- συχνότητα	Μαγνητικό πεδίο	Ακτίνα της τροχιάς	Σχόλιο
Κύκλοτρο	σταθερή	σταθερή	Αυξάνεται με την ενέργεια	Σωματίδια ασύγχρονα με ραδιοσυχνότητα για υψηλές ενέργειες
Ισο-Κύκλοτρο	σταθερή	μεταβλητό	Αυξάνεται με την ενέργεια	Σωματίδια σύγχρονα αλλά δύσκολη η ευστάθεια των τροχιών
Συγχρο-Κύκλοτρο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

- 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



# Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN



▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶  $\bar{p}$  [antiproton]  $\leftrightarrow$  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



# Στοιχεία εστίασης

- 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

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

*(Note: In the original image, the terms  $\frac{q}{\beta E}$  and  $gl$  are circled in red, and an arrow points from the circled  $gl$  to  $f^{-1}$ .)*

- 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  $\alpha = -k y l$

