

Μια εισαγωγή στους Επιταχυντές Σωματιδίων

Όλα όσα πάντα θέλατε να μάθετε για τους **επιταχυντές***
*και δεν είχατε την ευκαιρία να ρωτήσετε!

Παρουσίαση: **Ηλίας Ευθυμιόπουλος**, Ph.D. – CERN Accelerator Physics

Greek Teachers Program – 13-14.04.2024, Athens

Λίγα λόγια για μένα...



Για τι θα μιλήσουμε

Οι βασικές ερωτήσεις

- Τι είναι και πώς γεννήθηκαν οι επιταχυντές?
- Πως λειτουργούν? – η βασική φυσική: δέσμες, κίνηση σωματιδίων
- Σε τί χρησιμεύουν; Οι επιταχυντές του χτές, του σήμερα και του αύριο στην φυσική έρευνα και όχι μόνο !

Τι είναι οι επιταχυντές;

Οι επιταχυντές ή σωστότερα οι

επιταχυντές φορτισμένων σωματιδίων

είναι ηλεκτρο-μηχανικές εγκαταστάσεις **«μηχανές»** που μπορούν

να δημιουργήσουν **ενεργειακές δέσμες σωματιδίων**

Ποια η ανάγκη για τους επιταχυντές;

Πως γεννήθηκε η ιδέα να φτιάξουμε επιταχυντές;

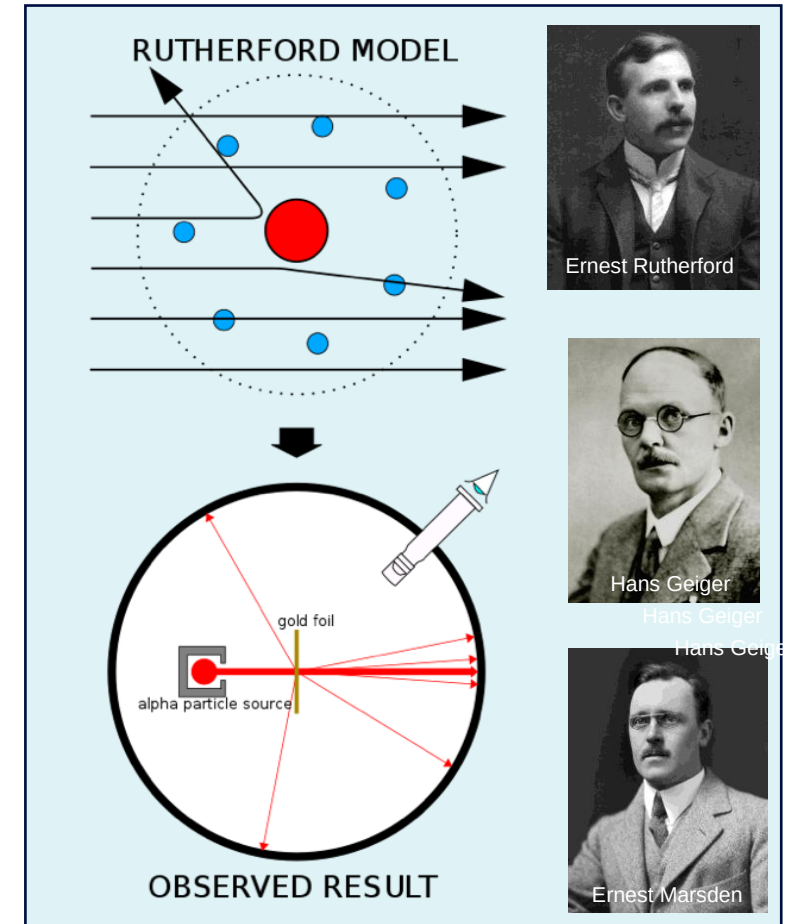
Με την θεμελίωση του ατομικού μοντέλου από τον **Ernest Rutherford** στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με το πείραμα σκέδασης πυρήνων ηλίου (α-σωματίδια) από φύλλα χρυσού (**1911**) γεννήθηκαν πολλά ερωτήματα για την κατανόηση του ατόμου και κυρίως την εξερεύνηση του πυρήνα.

"It has long been my ambition to have available for study a copious supply of atoms and electrons which have an individual energy far transcending that of particles from radioactive bodies."

Ernest Rutherford, Address to the Royal Society, 1927

1928 : Ronald W. Gurney και Gregory Gamov ανακάλυψαν το tunneling από το κβαντομηχανικό πηγάδι και υπολόγισαν ότι ένα σωματίδιο ενέργειας **~500 keV** είναι ικανό να σπάσει τον πυρήνα του ατόμου!

Η ανάγκη δημιουργίας ενεργειακών δεσμών για την μελέτη του ατόμου και των υπό-ατομικών σωματιδίων οδήγησε και οδηγεί ακόμη στην ανάπτυξη των επιταχυντών !



Ο ρόλος της ενέργειας στους επιταχυντές

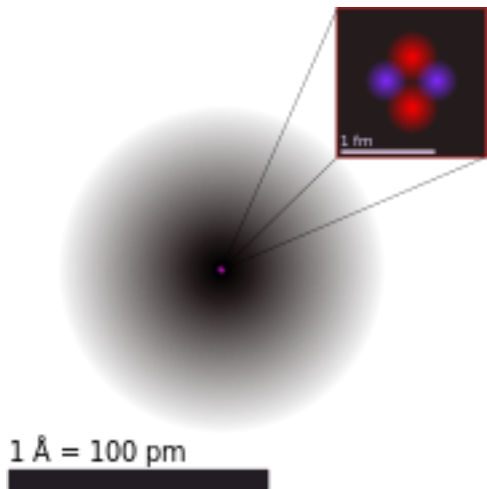
- Δημιουργία νέων σωματιδίων

$$E = m c^2$$

- Μελέτη της δομής της ύλης

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Planck's constant
 $\hbar c = 197.3269 \text{ MeV fm}$

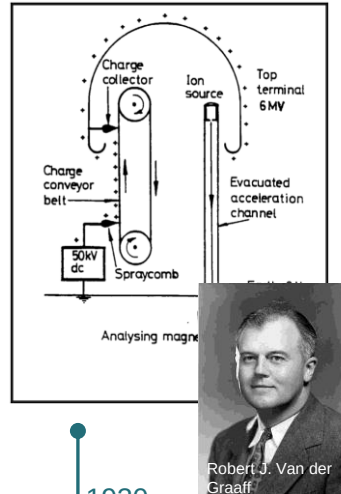


Δομή	Μέγεθος [m]	Ενέργεια [GeV]
Άτομο	$10 - 100 \text{ Å} \Rightarrow 10^{-10}$	$\sim 10^{-5}$
Πυρήνας	$10 \text{ ferm} \Rightarrow 10^{-14}$	~ 0.1
Νουκλεόνια	$1 \text{ fm} \Rightarrow 10^{-15}$	~ 1
Quark	$10^{-3} \text{ fm} \Rightarrow 10^{-18}$	$\sim 10^3$
< Quark	$10^{-4} \text{ fm} \Rightarrow 10^{-19}$	$\sim 10^4$

} **Ενέργεια
του LHC!**

Η εξέλιξη των επιταχυντών – τα αρχικά βήματα ...

Γεννήτρια van der Graaf

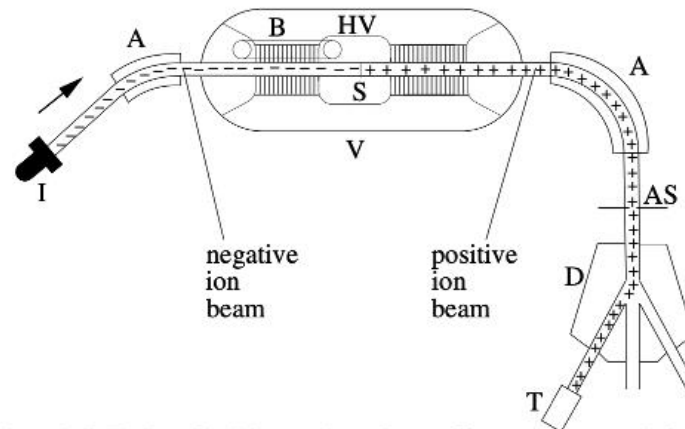


1930

ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

Επιταχυντής Tandem - Van de Graaff

Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημοκριτος – Tandem 5MV

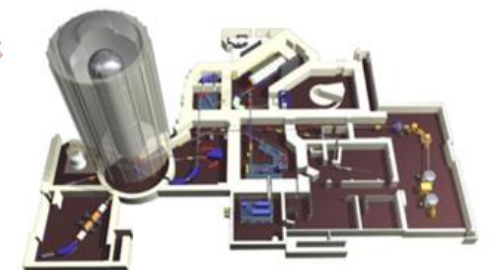


Διπλή διάταξη Van der Graaff με το υψηλό δυναμικό (HV) στην μέση της συσκευής.

Αρνητικά φορτισμένα ιόντα από την πηγή (I) επιταχύνονται αρχικά από το δυναμικό (HV), στην συνέχεια περνάνε μέσα από αέριο (άζωτο ή αργό) που απορροφά τα ηλεκτρόνια μετατρέποντάς τα σε **θετικά φορτισμένα ιόντα**, τα οποία επιταχύνονται μια δεύτερη φορά από το εξωτερικό δυναμικό



Oak Ridge Tandem 25 MV URC electrostatic accelerator

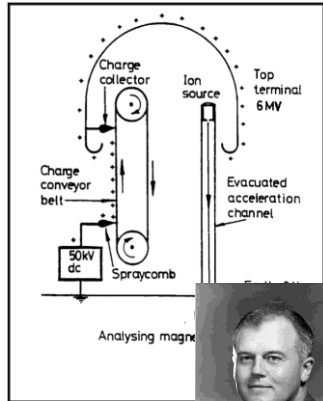


Holifield Facility

A 3D view of the Holifield Radioactive Ion Beam Facility (HRIBF), capable of producing intense beams of unstable nuclei for basic and applied nuclear science research

Η εξέλιξη των επιταχυντών – τα αρχικά βήματα ...

Γεννήτρια van der Graaf



Robert J. Van der Graaff

1930

ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

1932



Walton and the machine used to "split the atom"



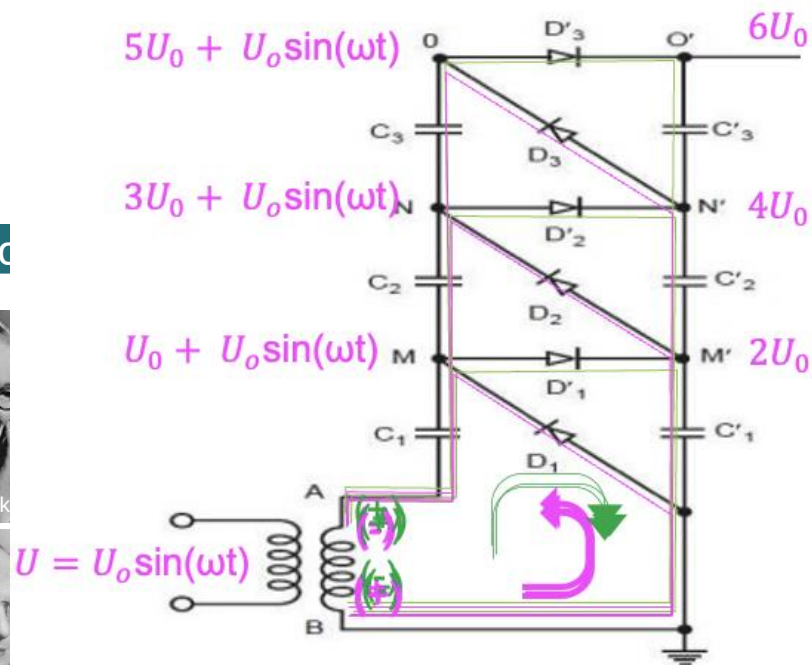
John Cockcroft



Ernest Walton

Επιταχυντής Cockroft – Walton (1932)

Κύκλωμα πολλαπλασιασμού τάσης
Greinacker (1914)



Διασπαση ατομου λιθιου



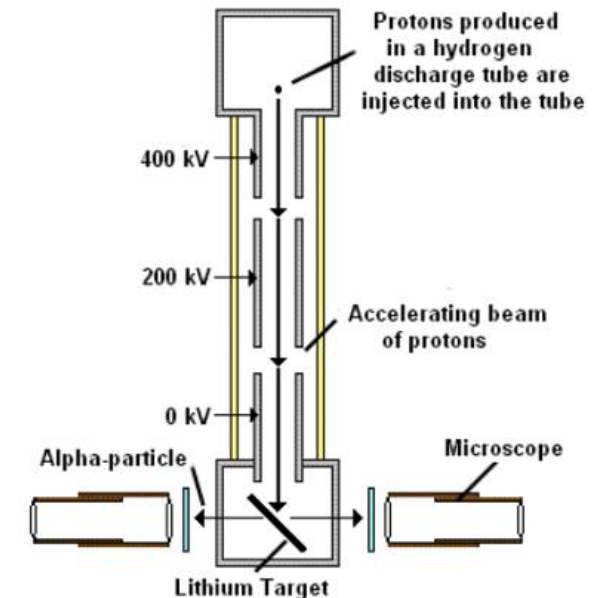
Walton and the machine used to "split the atom"



John Cockcroft



Ernest Walton

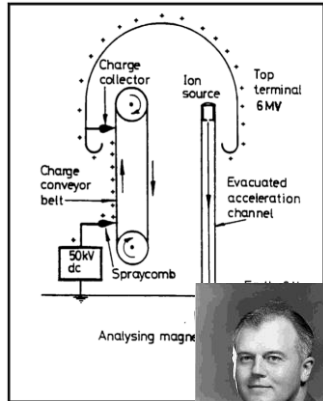


Πείραμα διάσπασης ατόμου Λιθίου
Βραβείο Νουμπέλ 1951

Η εξέλιξη των επιταχυντών – τα αρχικά βήματα ...

Γεννήτρια van der Graaf

Cyclotron E. Lawrence



1930

ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

1932

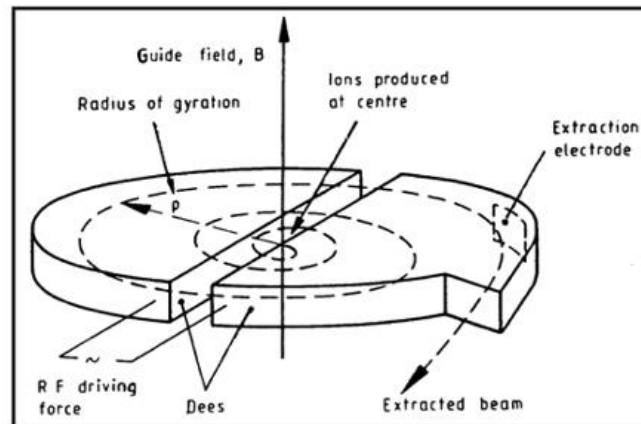


Walton and the machine used to "split the atom"



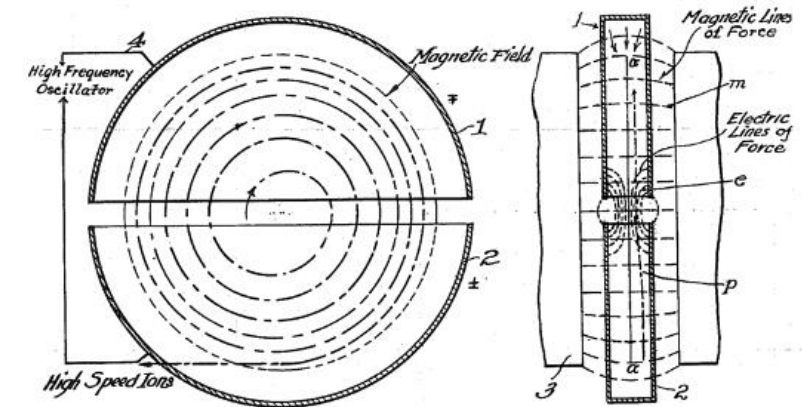
Ernest Walton

Το κύκλοτρο – Cyclotron

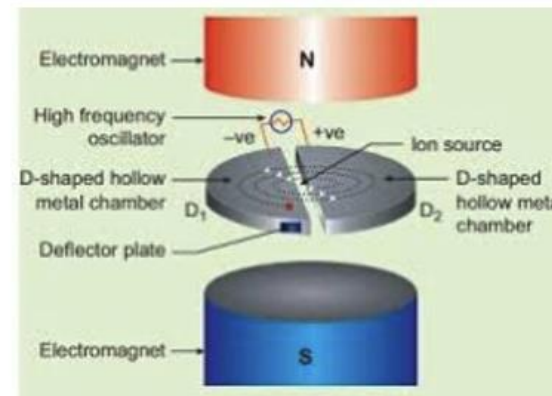


$$\omega_0 = q v_{\theta} B_z / m$$

$$R = m v_{\theta} / q B_z$$



The cyclotron, E. Lawrence – πατέντα 1934



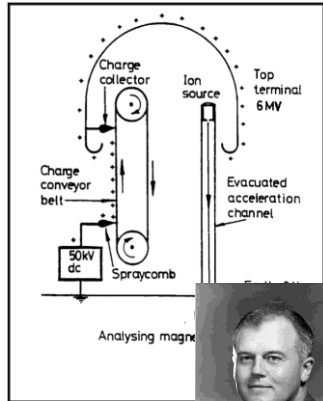
Ernest Lawrence & M. Stanley Livingston, 1.25 MeV cyclotron
Διασπά τον ατομικό πυρήνα λίγες εβδομάδες αργότερα από τους Cockroft & Wilson!



Το πρώτο κυκλοτρο (4")

Η εξέλιξη των επιταχυντών – τα αρχικά βήματα ...

Γεννήτρια van der Graaf



1930

Στατικοί επιταχ

1932



Walton and the machine used to "split the atom"

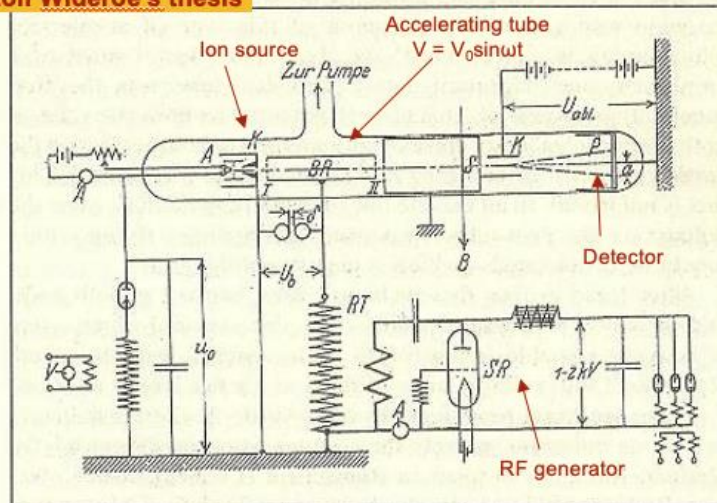


Gustav Ising (1924) – ιδέα να χρησιμοποιήσει εναλλασσόμενα ηλεκτρικά πεδία

Rolf Wideroe - Στο διδακτορικό του (1928) περιέγραψε την βασική ιδέα των μοντέρνων επιταχυντών : επιτάχυνση από ηλεκτρικό εναλλασσόμενο πεδίο Radio-Frequency (RF) συντονισμένο με την κίνηση των σωματιδίων (**resonant acceleration**) – ηλικία 26 ετών!



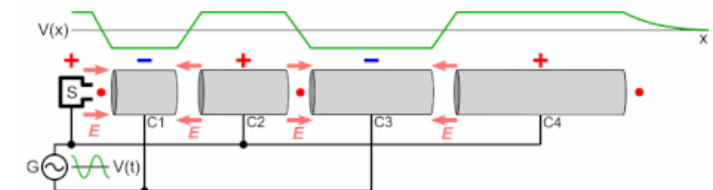
Rolf Wideroe's thesis



Κατάφερε να επιταχύνει ιόντα Καλίου (K) στα **53 keV**

Πραγματικά επαναστατική ιδέα!

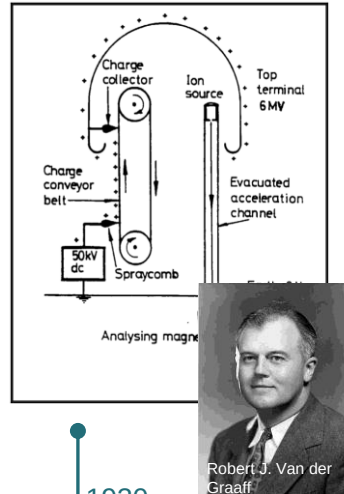
- Χρήση τεχνολογίας RF (εκείνη την εποχή περιορισμένη στα 1-2 MHz), φέρνοντας κοντά την τεχνολογία των ραδιοκυμάτων με αυτή των επιταχυντών
- Χρήση επιταχυντικής διάταξης με συνεχόμενα (2) στάδια επιτάχυνσης → ιδέα της περιοδικής επιτάχυνσης (κυκλικοί επιταχυντές!)
- Η όλη διάταξη: γεννήτρια δέσμης, RF tubes, ανιχνευτή σε σωλήνα κενού



Διάσπαση ατόμου Λιθίου

Η εξέλιξη των επιταχυντών – τα αρχικά βήματα ...

Γεννήτρια van der Graaf



1930

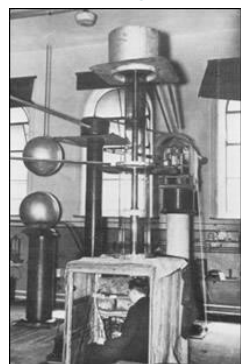
Cyclotron E. Lawrence



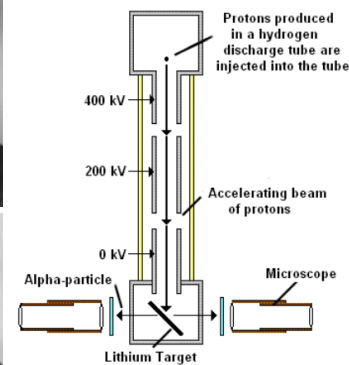
1934

Στατικοί επιταχυντές

1932



Walton and the machine used to "split the atom"

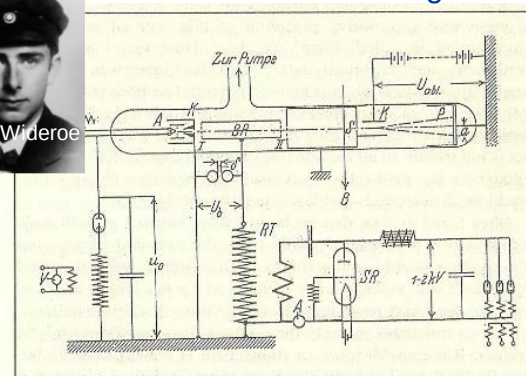


Διάσπαση ατόμου Λιθίου

Κυκλικοί επιταχυντές

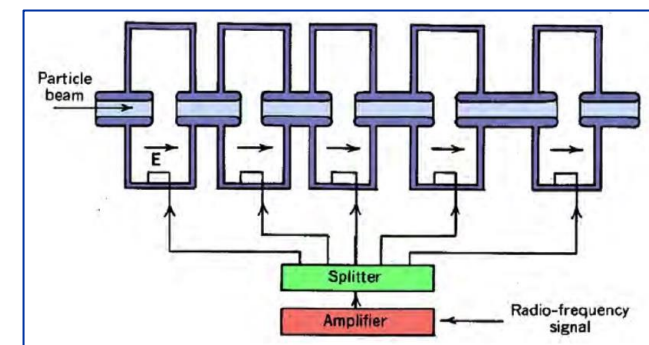
1928

Acceleration using RF

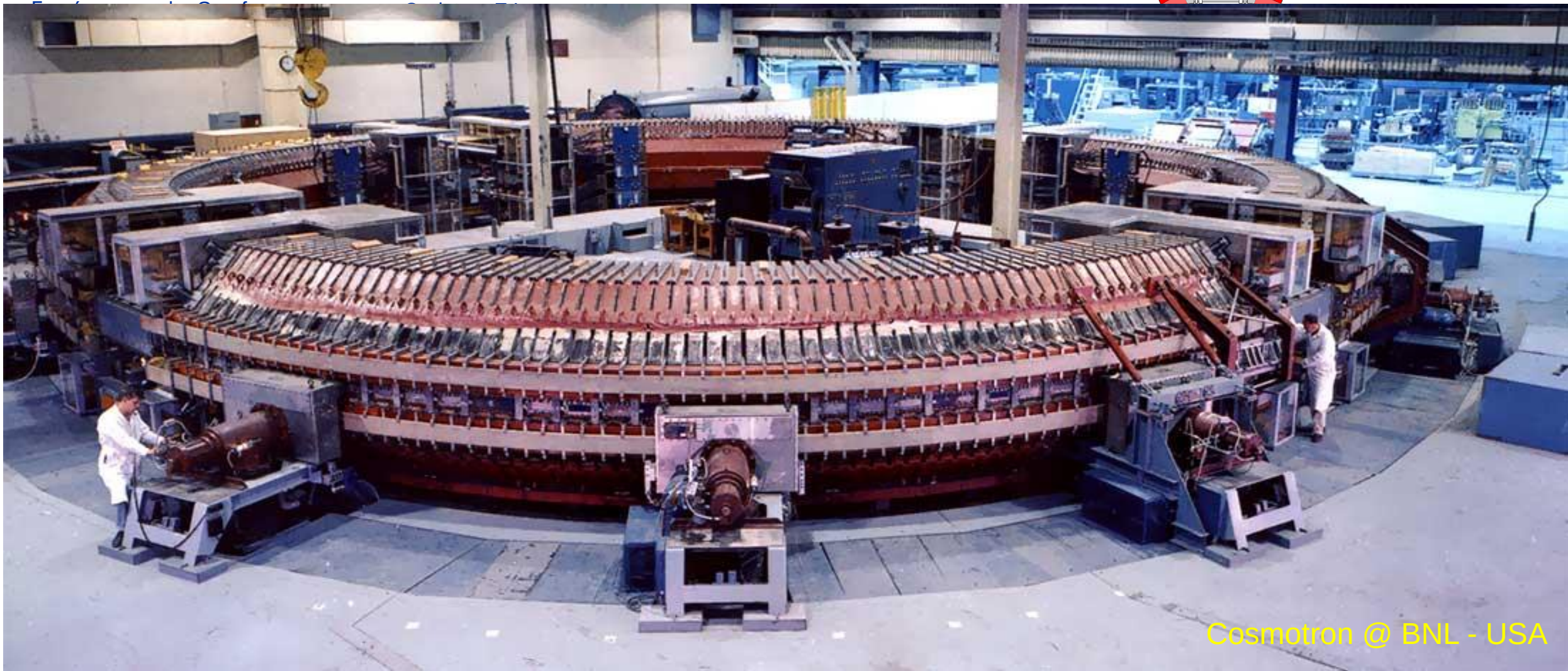


1946

Accelerating structures Hansen-Alvarez



Η εξέλιξη των επιταχυντών – τα αρχικά βήματα ...



Cosmotron @ BNL - USA

to "split the atom"

Ernest Rutherford

Εισαγωγή στην Φυσική

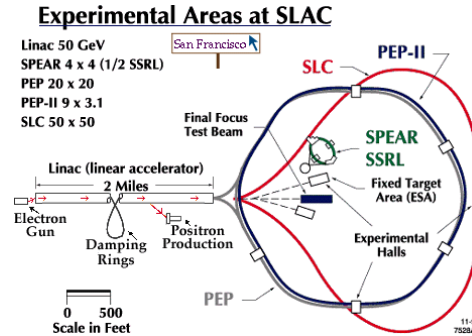
Η εξέλιξη των επιταχυντών – τα επόμενα βήματα μέχρι το σήμερα...



Proton Synchrotron (PS) 25 GeV
CERN
1959



Linear accelerator
Stanford, USA
1966



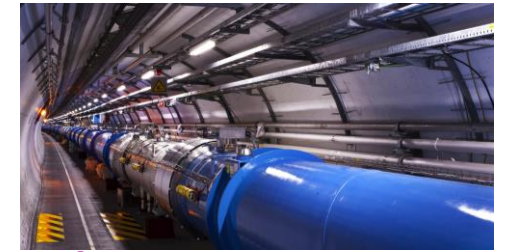
SPEAR – e^+e^- up to 4 GeV
SLC – e^+e^- up to 45 GeV
1972 1989



Sp-p-barS
315-450 GeV - CERN
1981



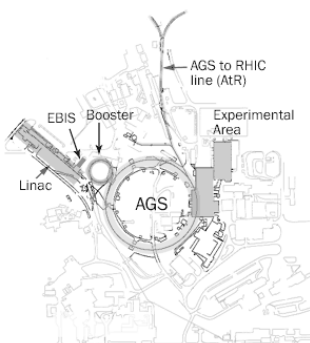
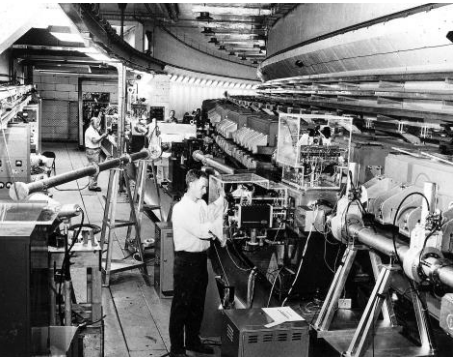
LEP – e^+e^- 45-102.5 GeV



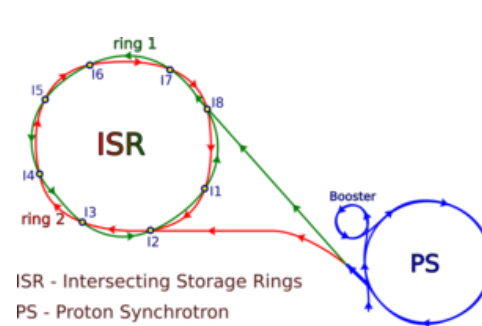
LHC – p-p, ions 6.8 TeV
2009

Κυκλικοί επιταχυντές

1960
Alternating Gradient Synchrotron (AGS)
33 GeV – BNL, USA



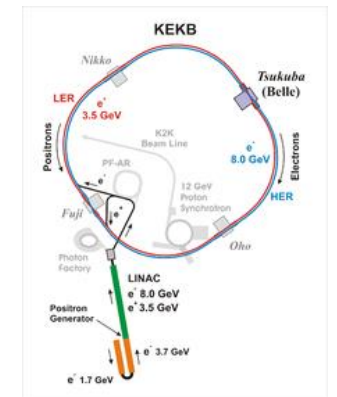
1971
Intersecting Storage Rings (ISR) – CERN p-p 68 GeV



1983
Tevatron p-pbar 1TeV –
FermiLab USA



2018
SuperKEKB, Japan



Πως δουλεύουν οι επιταχυντές

Η φυσική των επιταχυντών

Η δέσμη σωματιδίων

Η δέσμη είναι μια ροή από **σωματίδια ηλεκτρικά φορτισμένα** ή **ουδέτερα** που κινούνται σε μια κατεύθυνση

Οι δέσμες μπορεί να είναι συνεχείς (**DC**) ή σε ομάδες (**bunches**)

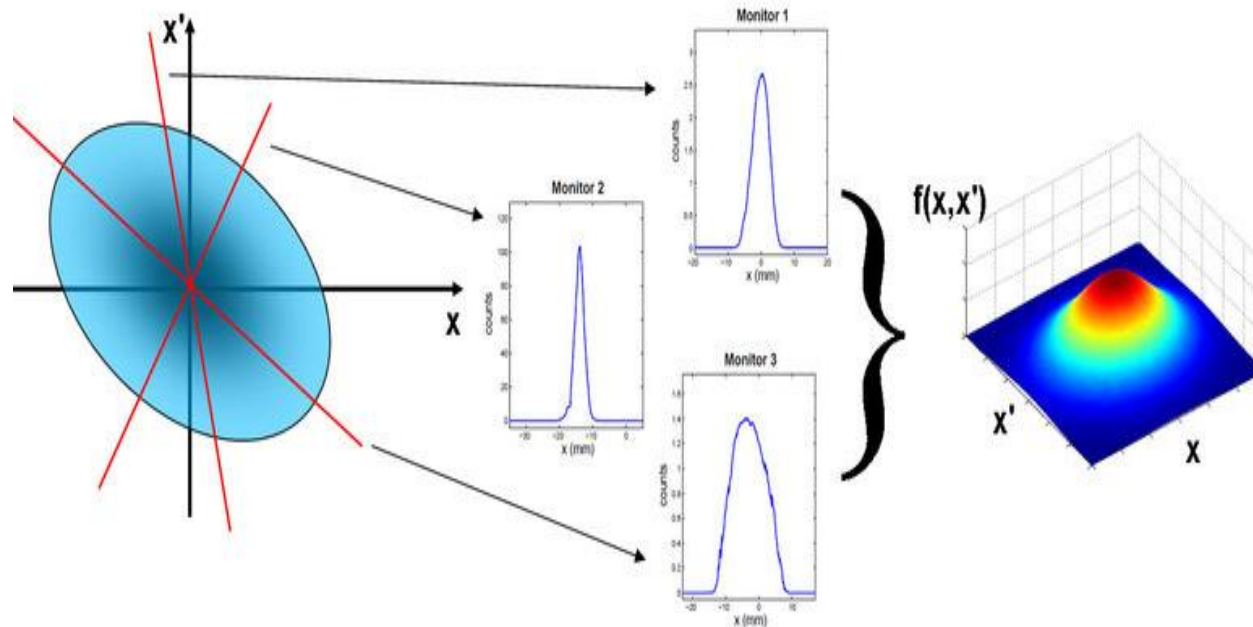
Οι δέσμες παράγονται με διάφορους μηχανισμούς, και στην συνέχεια μπορούμε να τις χειριστούμε, δηλαδή να τους αλλάξουμε μια ή περισσότερες από τις παραμέτρους τους.

Τα σωματίδια της δέσμης περιγράφονται στον 6-διαστατο χώρο των χωρικών συντεταγμένων $\{x, y, z\}$, και ορμών $\{p_x, p_y, p_z\}$.

Ο υπερχώρος (6D) που ορίζεται από όλες τις τιμές των παραμέτρων των σωματιδίων αποτελεί τον **χώρο φάσεων (phase space)** της δέσμης.

Οι δεσμες περιγράφονται επίσης από τις στατιστικά ορισμένες παραμέτρους όπως το εγκάρσιο $\{x, y\}$ ή κατά μήκος $\{z\}$ RMS μέγεθος και την **emittance**

Όταν οι δέσμες δεν επηρεάζονται από πεδία που αλλάζουν την ενέργεια των σωματιδίων τότε η πυκνότητα του χώρου των φάσεων παραμένει σταθερή – **θεώρημα Liouville**.

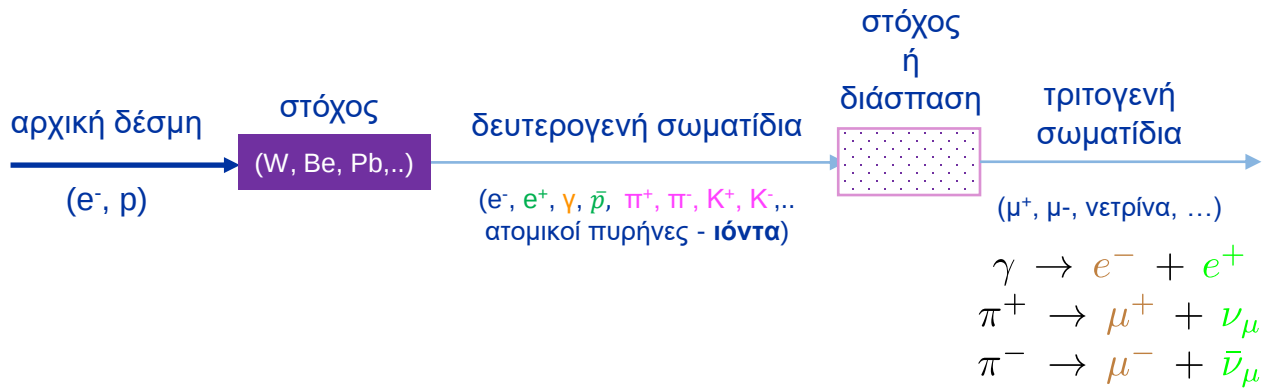
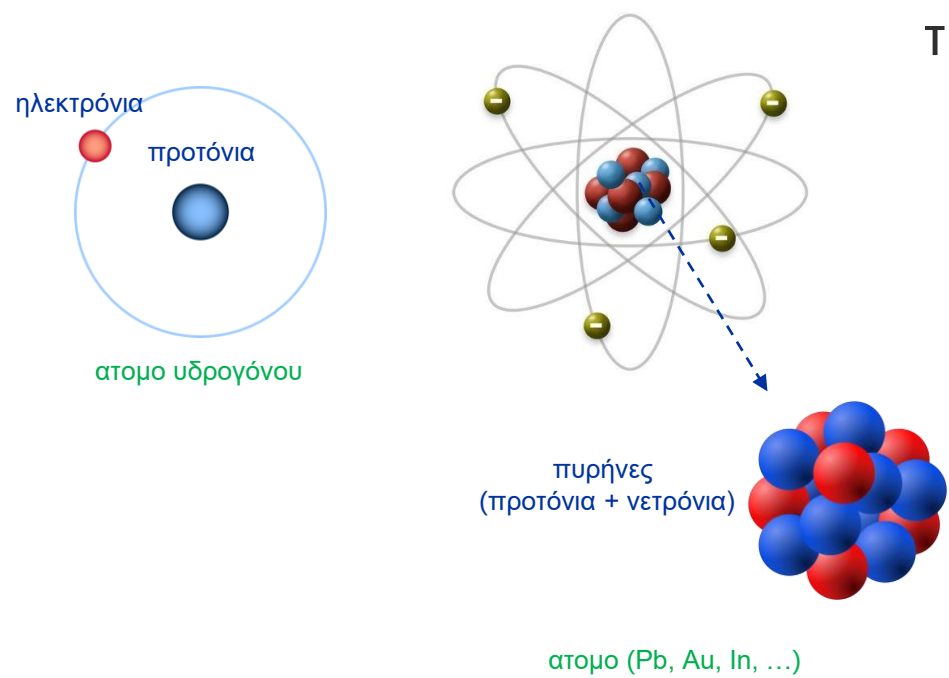


Η δέσμη σωματιδίων

- Μόνο φορτισμένα σωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους επιταχυντές.

Τα σωματίδια είναι αυτά που βρίσκουμε εύκολα, όπως τα βασικά συστατικά του ατόμου: **ηλεκτρόνια**, **πρωτόνια** ή ολόκληροι **πυρήνες**.

αλλά και σωματίδια που παράγονται από αντιδράσεις αυτών την ύλη – **δευτερογενή** ή **τριτογενή** σωματίδια!



Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε δέσμες **σωματιδίων** και **αντι-σωματιδίων**!

Τα δευτερογενή/τριτογενή σωματίδια θα πρέπει να έχουν **χρόνο ζωής** μεγαλύτερο από τον χρόνο που προβλέπεται να μείνουν στον επιταχυντή!

Σε κάθε στάδιο, ο αριθμός των σωματιδίων της δέσμης είναι **~10⁻⁴** του προηγούμενου!

Η επιτάχυνση των σωματιδίων

Οι επιταχυντές δίνουν βασικά **Ενέργεια** (κινητική **T**) στα **φορτισμένα** σωματίδια. Για χαμηλές τιμές αυτή η ενέργεια ισοδυναμεί με αύξηση της ταχύτητάς τους, αλλά γρήγορα φτάνουν κοντά στην ταχύτητα του φωτός και γίνονται σχετικιστικά σωματίδια.

Από αυτό το σημείο, η κινητική ενέργεια ισοδυναμεί με αύξηση της μάζας τους, σύμφωνα με τις εξισώσεις της σχετικότητας του Αινσταιν.

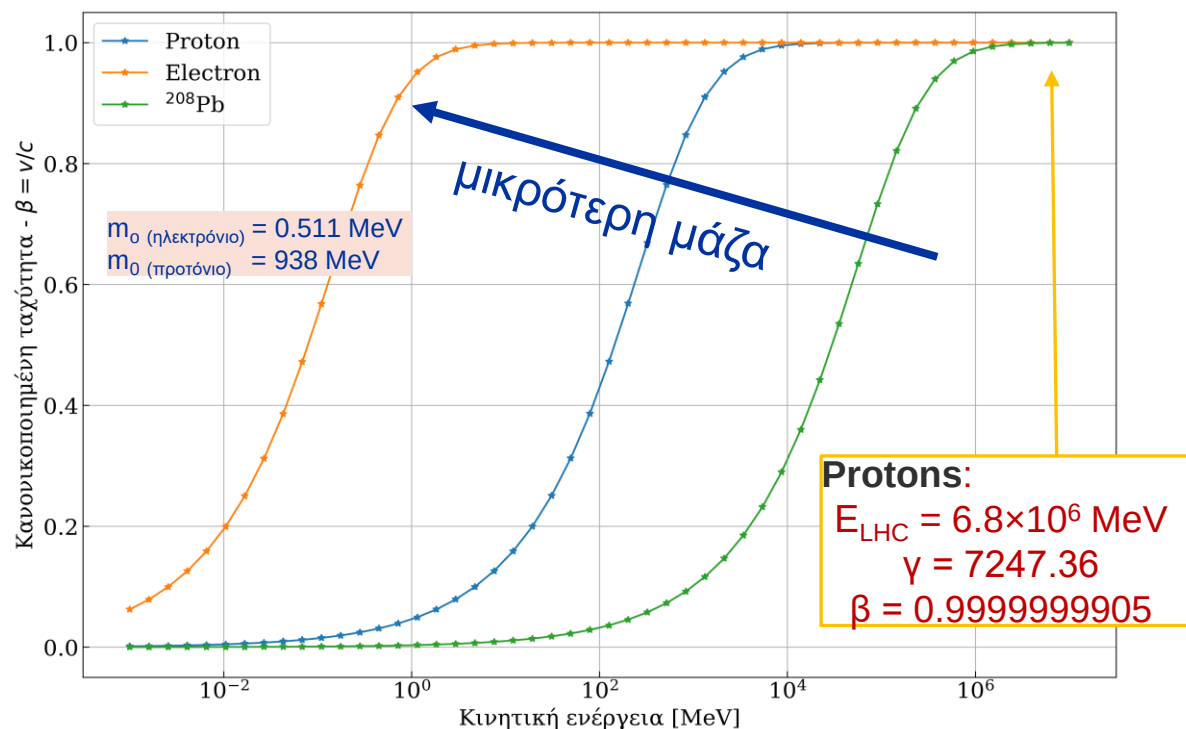
$$E = T + m_0 c^2$$

$$= m c^2$$

$$= m_0 \gamma c^2$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

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



Πως επιδρούμε στις δέσμες; χρειαζόμαστε μια δύναμη!

Ηλεκτρομαγνητισμός!

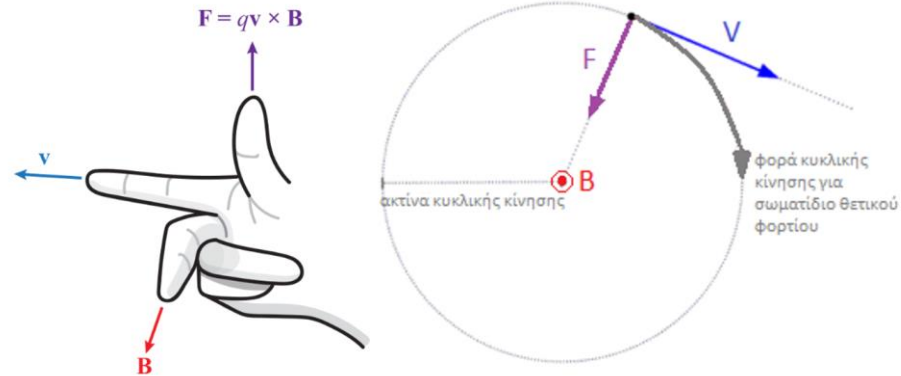
Δύναμη Lorentz σε ένα σωματίδιο μέσα σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

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

$$F_x = q (\cancel{E_x} - v B_y),$$

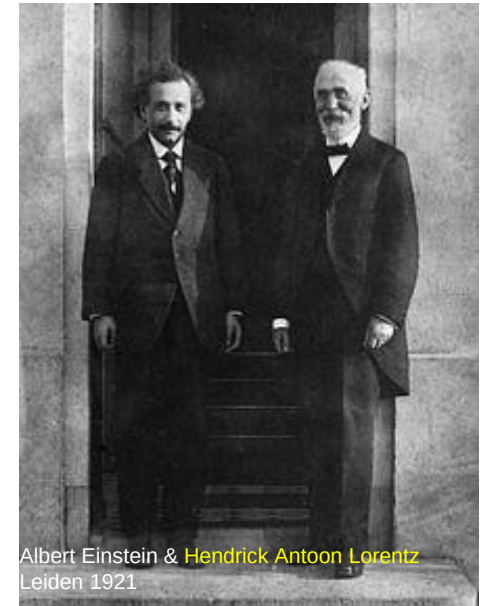
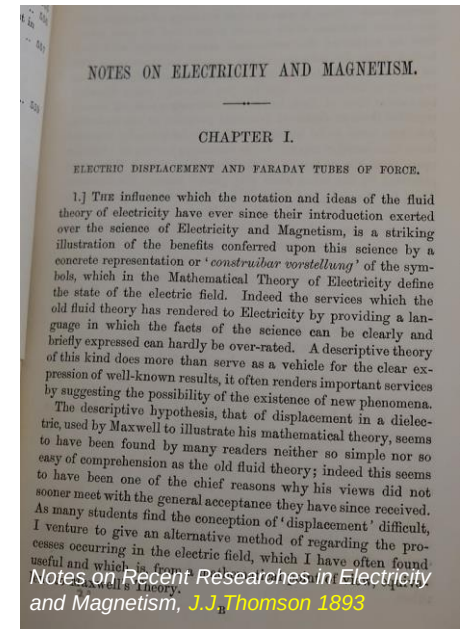
$$F_y = q (\cancel{E_y} - v B_x),$$

$$F_s = q E_s,$$

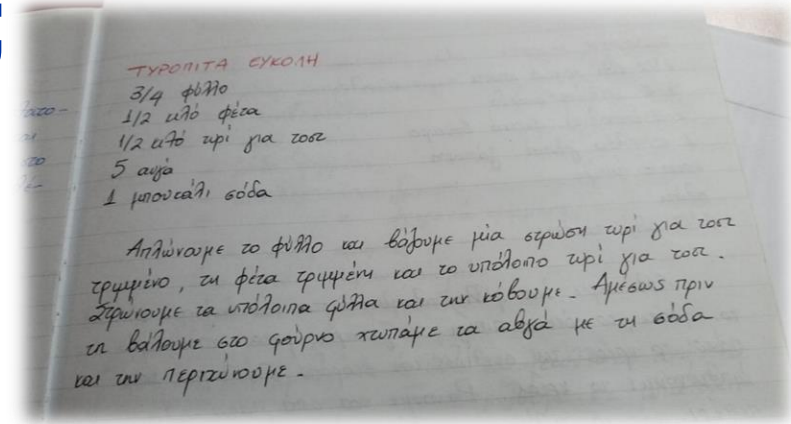
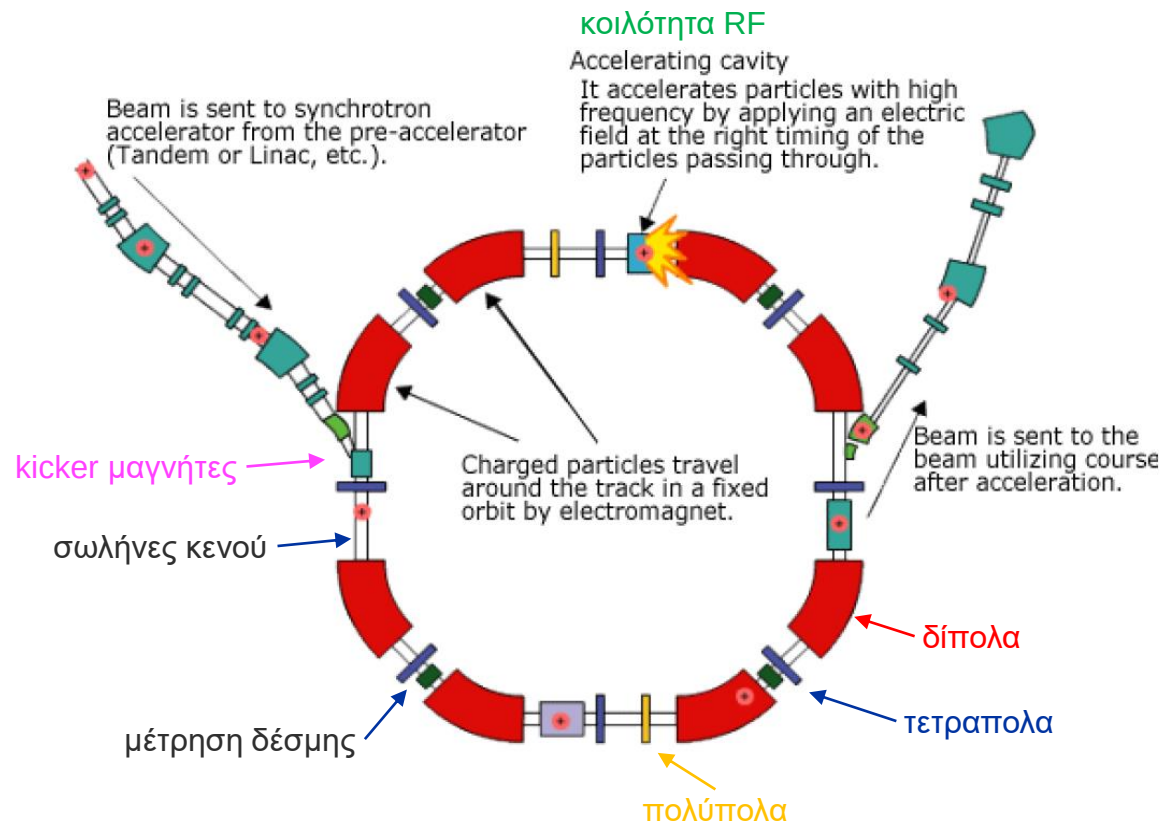


Για σωματίδια με υψηλές ταχύτητες
 $v \cong c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Εγκάρσια μαγνητικά πεδία για την κίνηση των σωματιδίων
Διαμήκη ηλεκτρικά πεδία για την επιτάχυνση



Τι χρειαζόμαστε για τον επιταχυντή; το synchrotron



Τα υλικά του επιταχυντή:

- **Μαγνήτες για την τροχιά και διατήρηση της δέσμης**
 - **Δίπολα** : αλλαγή τροχιάς
 - **Τετράπολα** : focusing – μέγεθος
 - **Πολύπολα** : διορθώσεις, μη γραμμικά φαινόμενα
- **Κοιλότητες RF** για ηλεκτρικό πεδίο επιτάχυνσης
- Συστήματα παρατήρησης της δέσμης
- Κενό στην διαδρομή της δέσμης
- Γρήγοροι μαγνήτες (**kicker magnets**) για την είσοδο ή εξαγωγή της δέσμης

Που κινούνται οι δέσμες στον επιταχυντή;

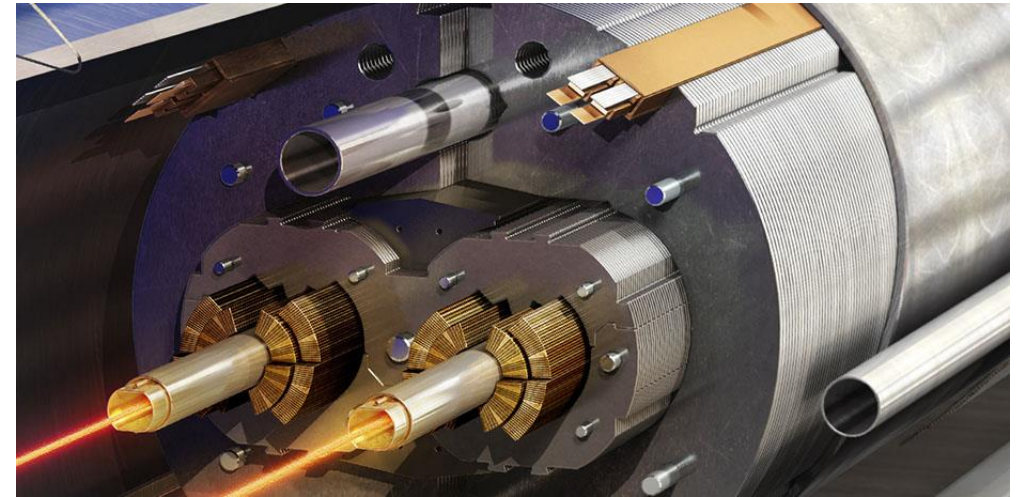
Η δέσμη κινείται μέσα σε ένα **σωλήνα κενού**.

Αυτό γιατί δεν θέλουμε η δέσμη να συγκρούεται με τα άτομα του αέρα και να χάνουμε έτσι τα σωματίδια που επιταχύνουμε, δημιουργώντας παράλληλα πρόβλημα ακτινοβολίας στον επιταχυντή.

Ανάλογα με την ένταση της δέσμης και την λειτουργία του επιταχυντή έχουμε και τις απαιτήσεις για το επίπεδο και την ποιότητα του κενού

LHC : $\sim 10^{-7} - 10^{-10}$ Pa $\Rightarrow 4 \times 10^6 - 4 \times 10^9$ atoms/cm³

πυκνότητα αέρα: $\sim 3 \times 10^{19}$ atoms/cm³



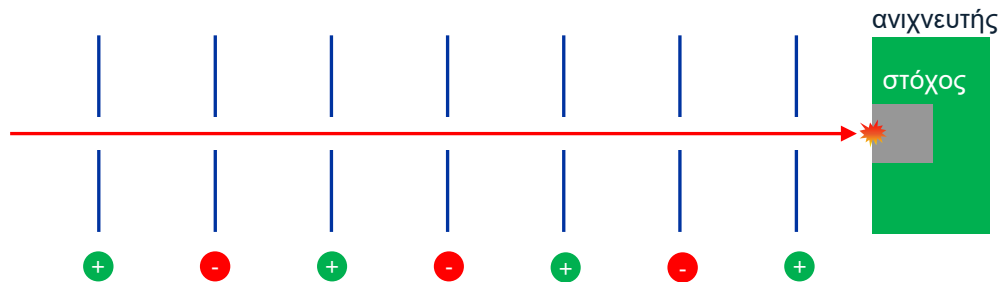
Τύποι επιταχυντών

Κυκλικοί επιταχυντές

Επιταχυντές
σταθερού στόχου
fixed target

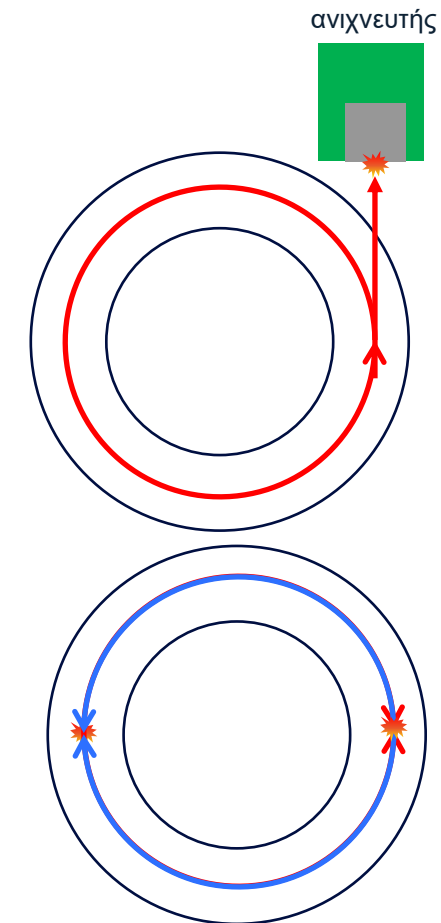
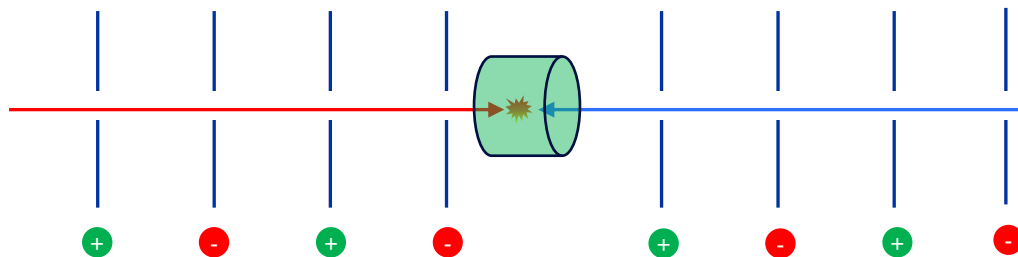
$$E_{CM} = \sqrt{2E_b m_T c^2}$$

Γραμμικοί επιταχυντές



Συγκρουστήρες
colliders

$$E_{CM} = 2 E_b$$



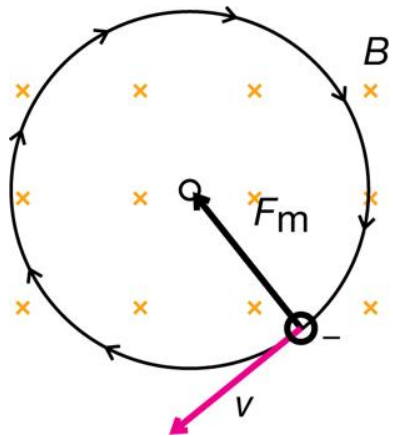
$$E_{FT} = 2 \gamma_C E_C$$

Παράδειγμα: LHC $\gamma_C=7247$, $2\gamma_C \sim 15000$

Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική

Κίνηση φορτισμένου σωματιδίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο



- Δύναμη Lorentz : $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$

$$F_m = \frac{mv^2}{R} = \frac{\gamma m_0 v^2}{R} \quad \left. \vphantom{\frac{\gamma m_0 v^2}{R}} \right\} \frac{\gamma m_0 v^2}{R} = q v B \rightarrow \frac{P}{q} = B R$$

beam rigidity

LHC :

$$B = 8.33 \text{ T}$$

$$p = 7000 \text{ GeV}/c \quad \frac{1}{R [\text{m}]} \cong 0.3 \frac{8.33 [\text{T}]}{7000 [\frac{\text{GeV}}{c}]} \Rightarrow R = 2.83 \text{ km}$$

Το δαχτυλίδι που ορίζεται από τα δίπολα : $S = 2\pi R \rightarrow S \sim 18 \text{ km}$
αντιστοιχεί στο ~66% το συνολικού (27km) – **packing factor**

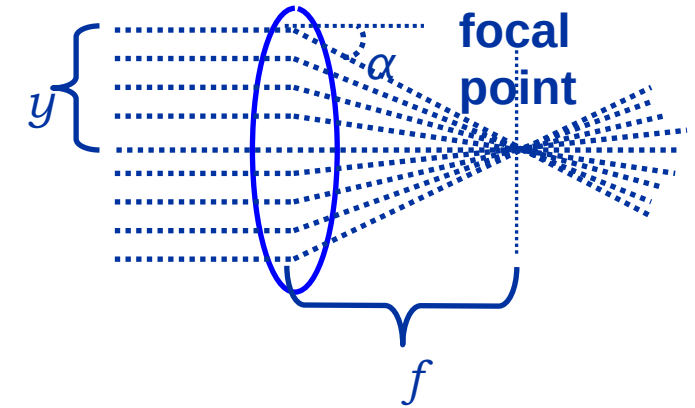
$$\frac{1}{R [\text{m}]} \cong 0.3 \frac{B [\text{T}]}{P [\text{GeV}/c]}$$

Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

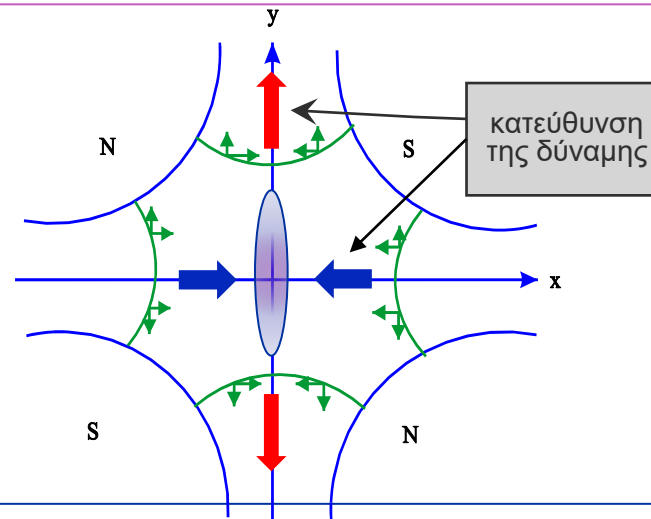
Εγκάρσια δυναμική

Τα τετράπολα

- Αντιστοιχούν στους φακούς της οπτικής
- Μαγνητικό πεδίο: $(B_x, B_y) = G \cdot (y, x)$
- Μαγνητική δύναμη: $(F_x, F_y) = k \cdot (-x, y)$, $k = \frac{G}{B\rho}$



- Τα τετράπολα εστιάζουν την δέσμη στο ένα επίπεδο και αποκλίνουν την δέσμη στο άλλο



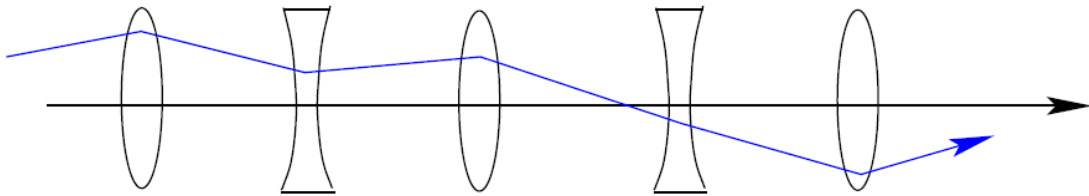
Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή Εγκάρσια δυναμική

Εναλλασσόμενη βαθμίδα εστίασης (Alternating Gradient Focusing)

- Αλληλουχία εστιαζόντων (focusing) και αποκλινόντων (defocusing) τετραπόλων, πετυχαίνοντας συνολικά εστίαση της δέσμης

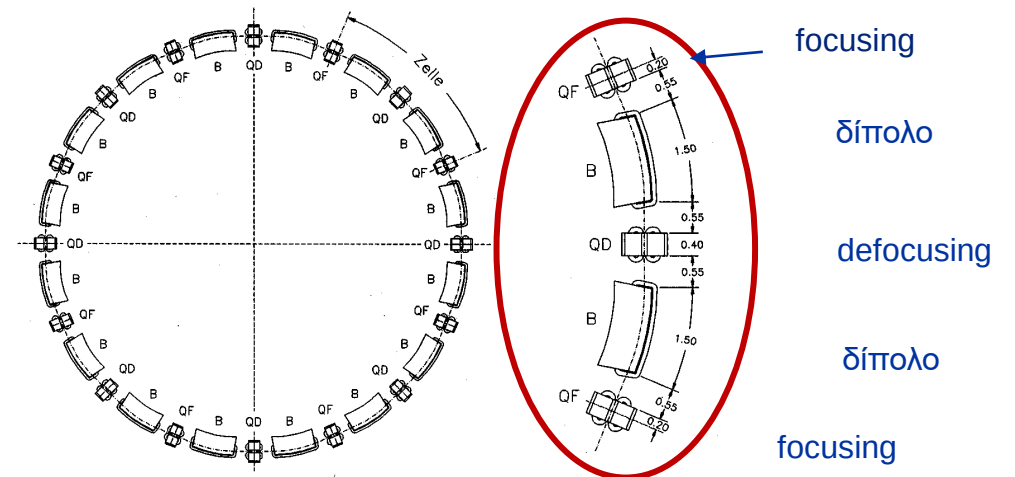
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

- Αν $f_1 = -f_2 \rightarrow \frac{1}{f} = \left[\frac{d}{f_1 f_2} \right]$



Διάταξη FODO

- Διαταξη με διαδοχικά cells από AGF με ενδιάμεσα δίπολα
- Επαναλαμβάνεται διαδοχικά για να κάνει το δαχτυλιδι του επιταχυντή

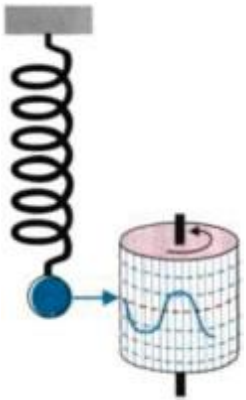


Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική

Τα τετράπολα

- Αντιστοιχούν στους φακούς της οπτικής
- Μαγνητικό πεδίο: $(B_x, B_y) = G \cdot (y, x)$
- Μαγνητική δύναμη: $(F_x, F_y) = k \cdot (-x, y), \quad k = \frac{G}{B\rho}$



$$F = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k \cdot x$$

$$\begin{aligned}x(t) &= A \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\x'(t) &= -A \omega \sin(\omega t + \varphi) \\x''(t) &= -A \omega^2 \cos(\omega t + \varphi)\end{aligned}$$

$$\omega = \sqrt{k/m}$$

Αυτή η εξίσωση μας θυμίζει κάτι;

Νόμος του Hooke

Οι ελαστικές παραμορφώσεις είναι ανάλογες των δυνάμεων που τις προκαλούν.

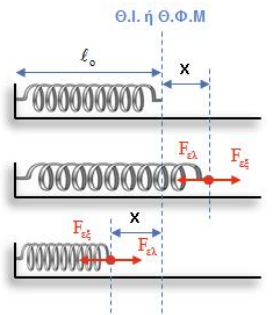
$$F_{ελ} = k \cdot x$$

x : η παραμόρφωση του ελατηρίου σε σχέση με το φυσικό του μήκος (Θ.Φ.Μ)

k : η σταθερά του ελατηρίου που εκφράζει τη σκληρότητα του και μετρείται σε N/m.

ℓ_0 : το φυσικό μήκος του ελατηρίου όταν δεν είναι παραμορφωμένο.

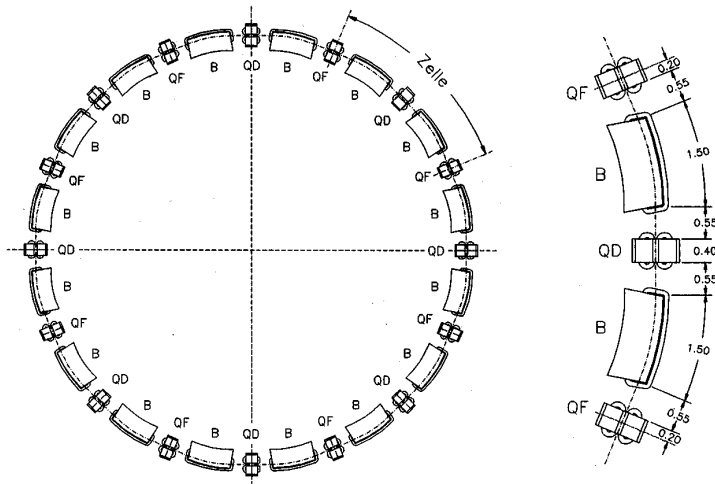
Όπως βλέπεις από το σχήμα η δύναμη του ελατηρίου ($F_{ελ}$) έχει πάντα φορά προς την Θ.Ι. ή Θ.Φ.Μ, που στην περίπτωση του **οριζόντιου ελατηρίου** αυτές οι δυο ταυτίζονται (Θ.Ι. = Θ.Φ.Μ)



Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική

- Τα σωματίδια ανάλογα με την θέση τους στον χώρο των φάσεων της δέσμης, καθώς περνούν από τα διαδοχικά τετράπολα εκτελούν ταλαντώσεις (**ταλαντώσεις betatron**) γύρω από την **κεντρική τροχιά (central orbit)**



- Γενικευμένη εξίσωση κίνησης

$$x'' + \left(k(s) + \frac{1}{\rho(s)^2} \right) x = \frac{1}{\rho(s)} \frac{\Delta p}{p}$$
$$y'' - k(s) y = 0$$

- Συνθήκη περιοδικότητας : $K_{x,y}(s + L) = K_{x,y}(s)$

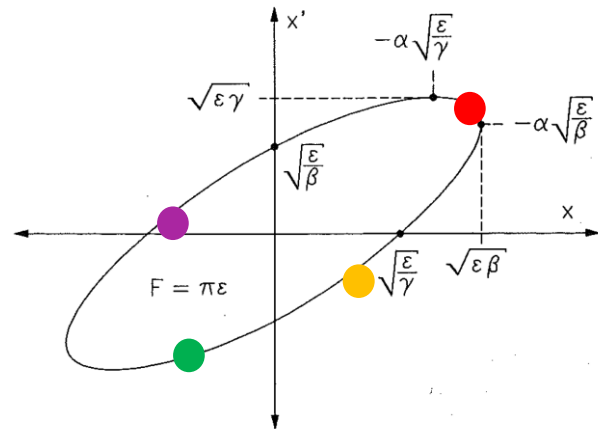
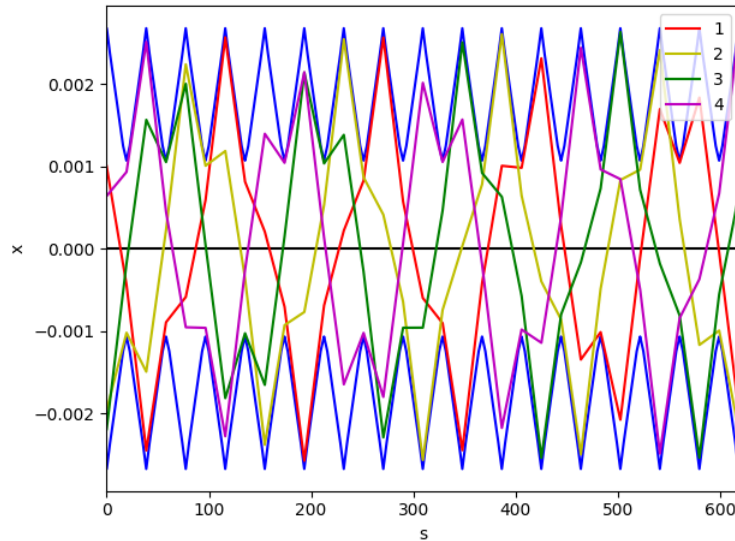
- Γενικές λύσεις

$$K_x(s) = \left(k(s) + \frac{1}{\rho(s)^2} \right)$$
$$K_y(s) = -k(s)$$

$$x(s) = \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \cos(\phi_x(s)) + D(s) \frac{\Delta p}{p}$$
$$y(s) = \sqrt{\epsilon_y \beta_y} \cos(\phi_y(s))$$

Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική



$$x(s) = \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \cos(\phi_x(s)) + D(s) \frac{\Delta p}{p}$$

$$y(s) = \sqrt{\epsilon_y \beta_y} \cos(\phi_y(s))$$

- $\beta_{x,y}$: συνάρτηση beta, χαρακτηριστικό του επιταχυντή και της οπτικής,
- $\epsilon_{x,y}$: emittance, χαρακτηριστικό της δέσμης, αναλοίωτο μέγεθος
 - Ορίζει μια έλλειψη στον χώρο των φάσεων
- $\sqrt{\epsilon \cdot \beta}$: ορίζει το μέγεθος της δέσμης (1-σ RMS)
- **tune**: αριθμός των ταλαντώσεων ανά περιστροφή

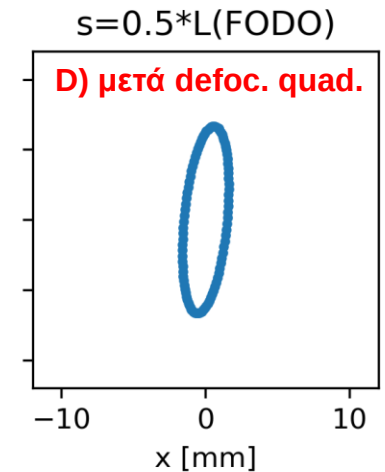
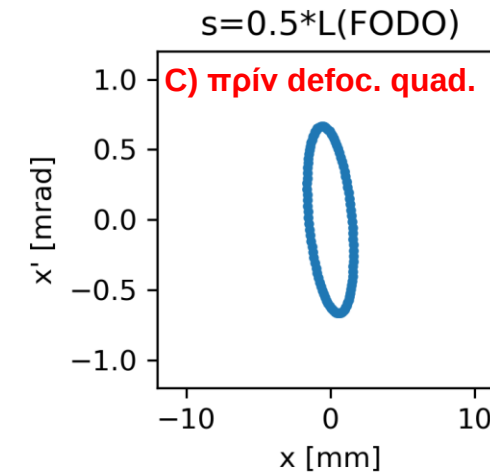
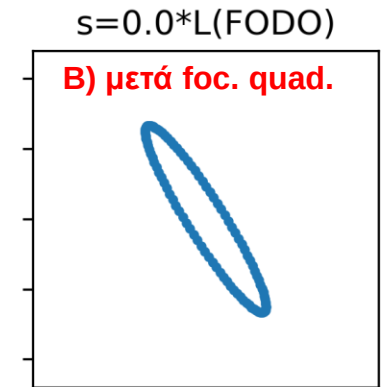
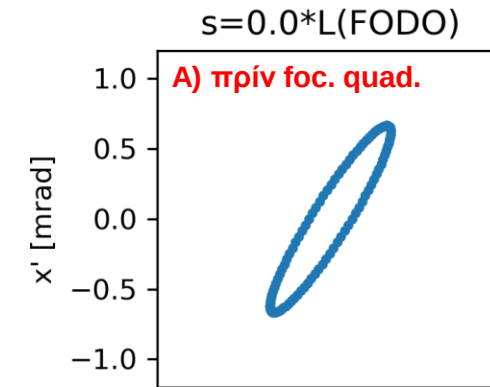
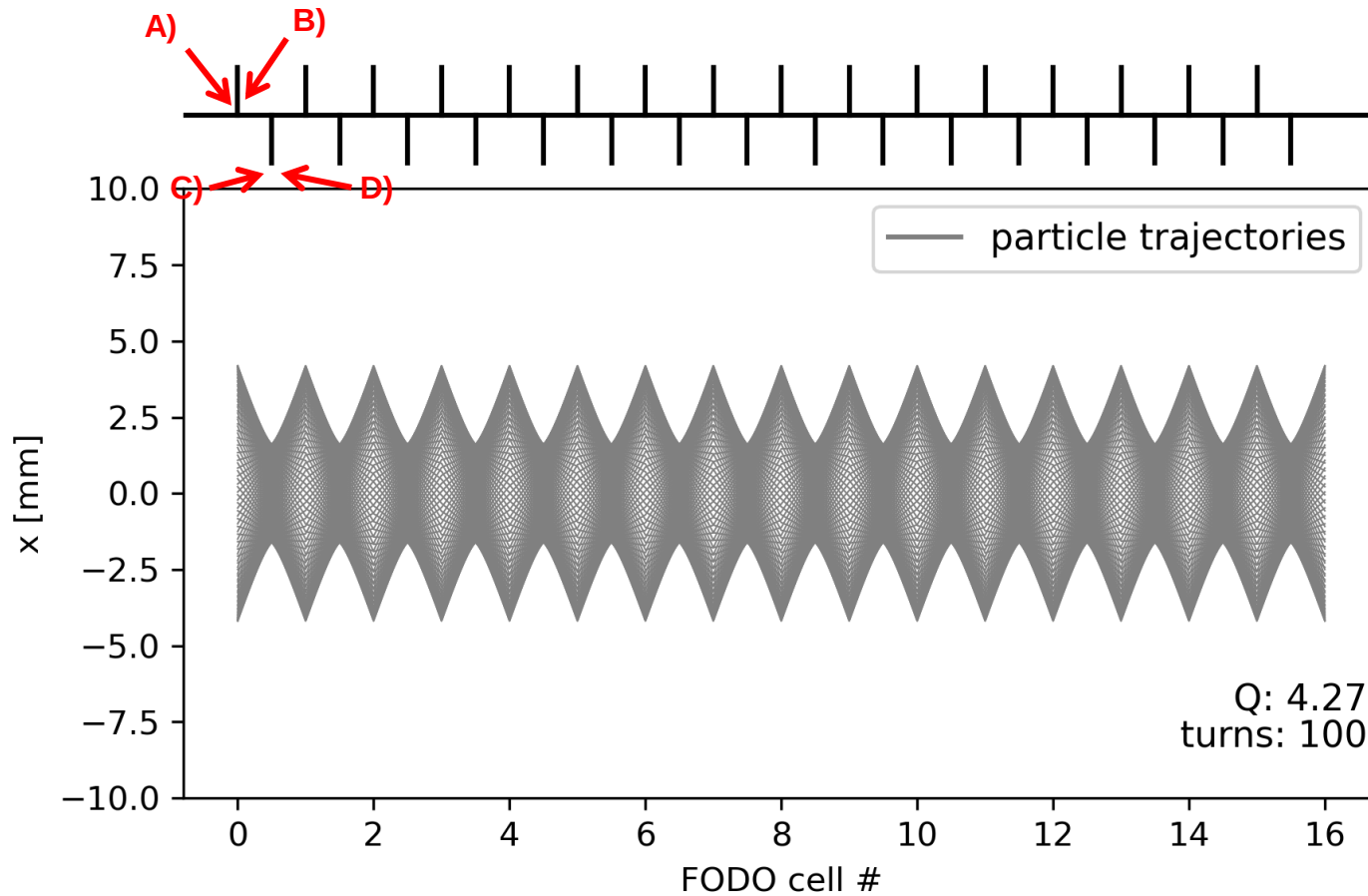
$$Q = \frac{1}{2\pi} \int \frac{ds}{\beta(s)}$$

ακέραιο + δεκαδικό κομμάτι

π.χ. LHC : $Q_x = 62.31$, $Q_y = 60.32$

Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

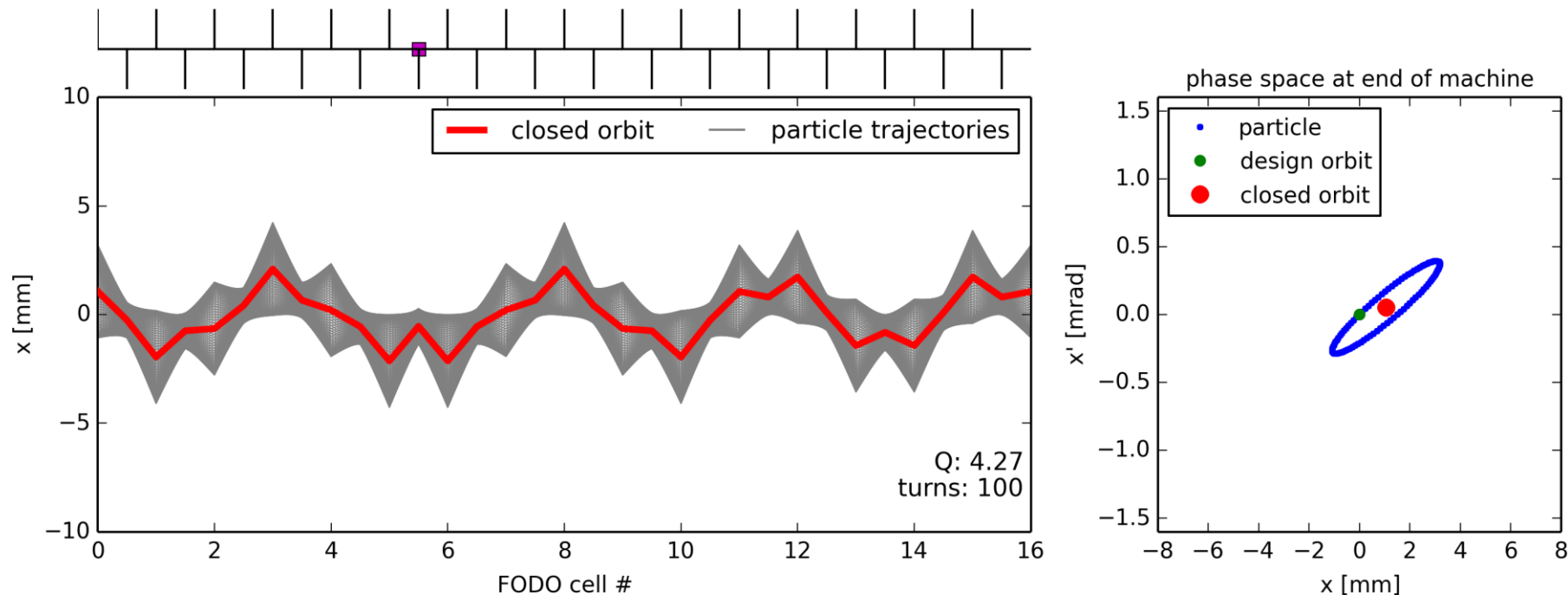
Εγκάρσια δυναμική – ιδανικός επιταχυντής



Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική – μη ιδανικός επιταχυντής

- **Ιδανικός επιταχυντής + σφάλμα σε ένα δίπολο (dipole error) (λάθος)**
 - Το σωματίδιο που ξεκινάει στην ιδανική τροχιά, ... δέχεται μια επιπλέον αλλαγή σε κάθε περιστροφή με αποτέλεσμα να κάνει ταλαντώσεις betatron αλλά σε μια **αλλοιωμένη κλειστή τροχιά**



Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική – σταθερότητα της τροχιάς

- Η σταθερότητα της τροχιάς (μέση) είναι σημαντική για την σωστή λειτουργία του επιταχυντή
 - Εισαγωγή και εξοδος της δέσμης
 - Σταθερότητα του σημείου σύγκρουσης στα πειράματα για τους συγκρουστήρες
 - Σταθερότητα της πηγής του φωτός για εφαρμογές synchrotron radiation ή ραδιο-θεραπείες
- **Απώλεια της σταθερότητας μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα**
 - Χάσιμο ή λάθος κατεύθυνση της δέσμης, εισαγωγή επιπλέον διασποράς στην ενέργεια, εμφάνιση συντονισμών, περιορισμοί στο διαθέσιμο χώρο στο θάλαμο κενού, σταδιακή απώλεια της δέσμης, αλληλεπίδραση {x, y} επιπέδων,...
- **Πιθανές πηγές:**
 - **Αργές μεταβολές (χρόνια – μήνες)** : γεωμετρία του επιταχυντή, στο τούνελ, ή περιοδικές μεταβολές ανάλογα με τις εποχές
 - **Μεσαίας κλίμακας μεταβολές (ημέρες – ώρες)**: θέση γής-ήλιου, μέρα-νύχτα (θερμικές), ολίσθηση των ηλεκτρονικών, ...
 - **Γρήγορες μεταβολές (λεπτά – δευτερόλεπτα)** : σεισμικές δονήσεις, απώλεια των τροφοδοτικών ισχύος για τους μαγνήτες, απώλεια συστημάτων ψύξης...
- **Η μελέτη και εφαρμογή συστημάτων διάγνωσης και διόρθωσης της τροχιάς είναι σημαντικό κομμάτι στον σχεδιασμό και λειτουργία των επιταχυντών**

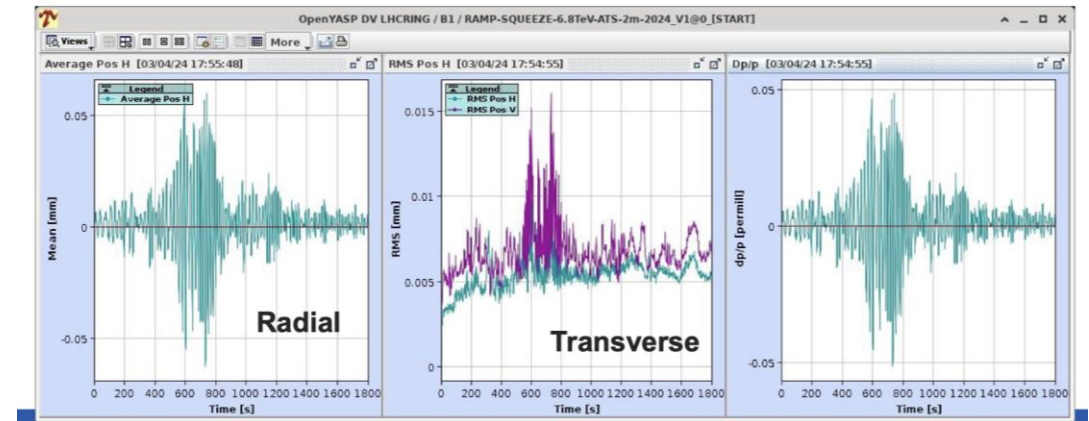
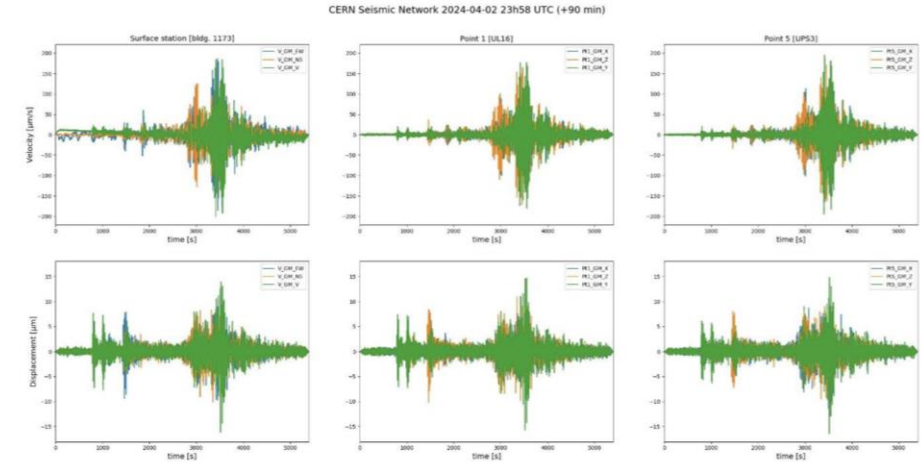
Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική –

Ο επιταχυντής λόγω της διάστασής του και κυρίως λόγω της απαίτησης συγχρονισμού είναι πολύ ευαίσθητος σε οτιδήποτε μπορεί να του αλλοιώσει την γεωμετρία

Τελευταίο παράδειγμα **ο σεισμός στην Ταιβαν**

- Ένταση 7.2M, »κούνησε» το LHC για περίπου μία ώρα!
- Κύριο φαινόμενο – ακτίνα ($\pm 50\mu\text{m}$) – κάθετο $\sim 15\mu\text{m}$ - σαν ένα μεγάλο κύμα
- Όμως χάρη στα συστήματα ελέγχου και διορθωσης δεν χάσαμε την δέσμη!

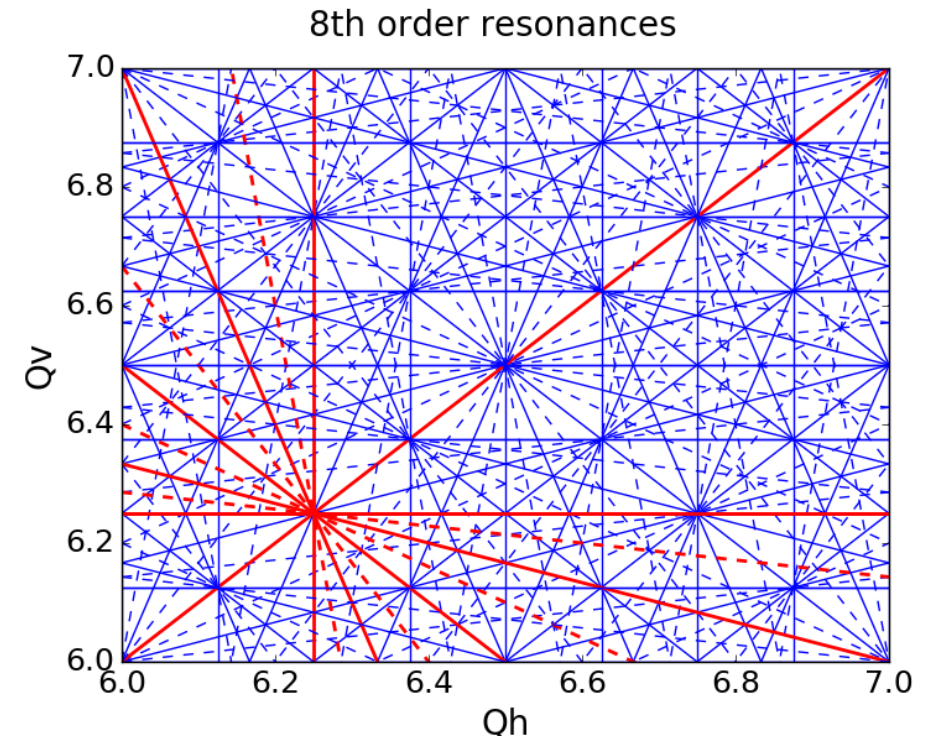
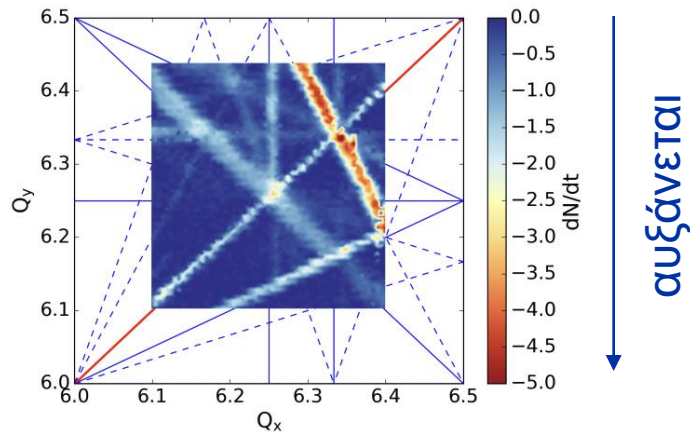


Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική - συντονισμοί

- Ο επιταχυντής σαν περιοδικό σύστημα παρουσιάζει συντονισμούς:
 - Συνθήκη σταθερότητας (Q_x, Q_y) : $mQ_x + nQ_y = \ell$
- Το σημείο λειτουργίας και τα σωματίδια της δέσμης πρέπει να είναι μακριά από τέτοιους συντονισμούς που οδηγούν σε απώλειες

Ρυθμός απώλειας της δέσμης

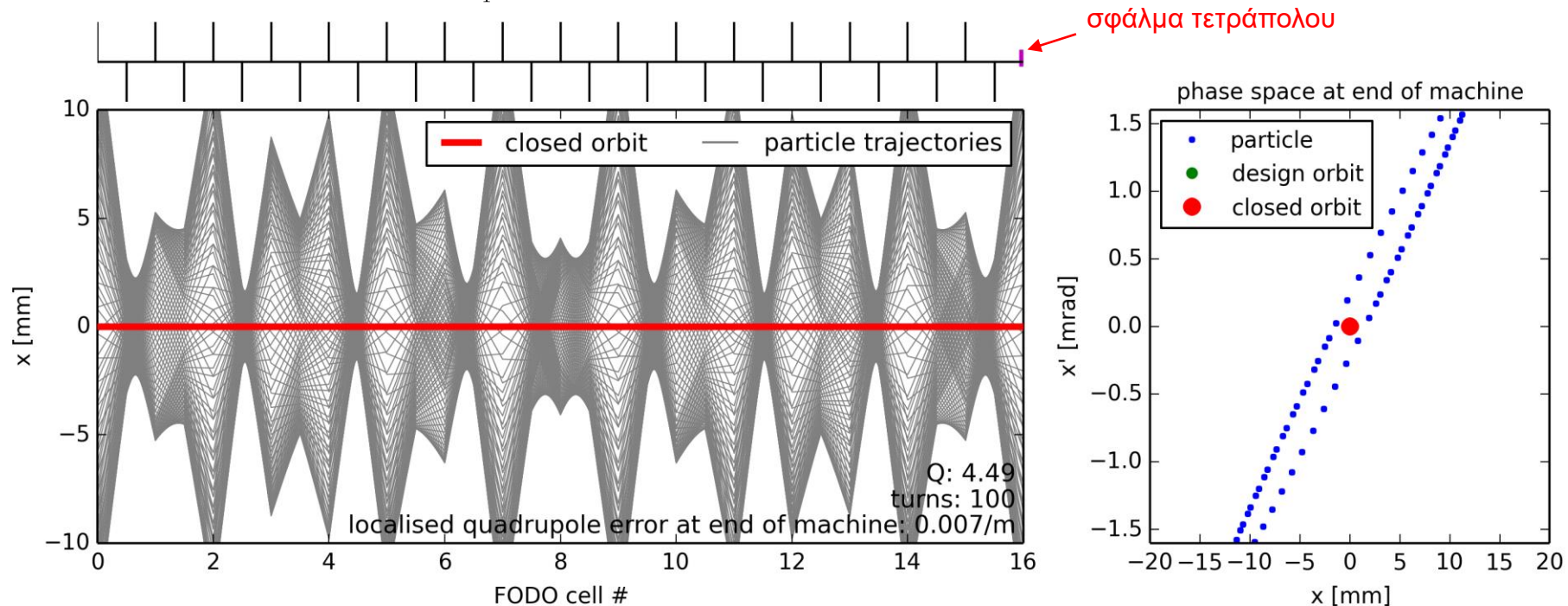


Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική - συντονισμοί

- Σφάλματα στα τετράπολα μπορούν να οδηγήσουν σε διαφοροποίηση της οπτικής, μεταβολή του tune της μηχανής, μεταφέροντας το σημείο λειτουργίας κοντά σε συντονισμούς με αποτέλεσμα την απώλεια της δέσμης

$$\frac{\delta\beta}{\beta_0} = -\frac{1}{2\sin(2\pi Q)} \int_{s_1}^{s_1+C} \beta(s) \delta K(s) \cos(2\psi - 2\pi Q) ds$$



Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Εγκάρσια δυναμική

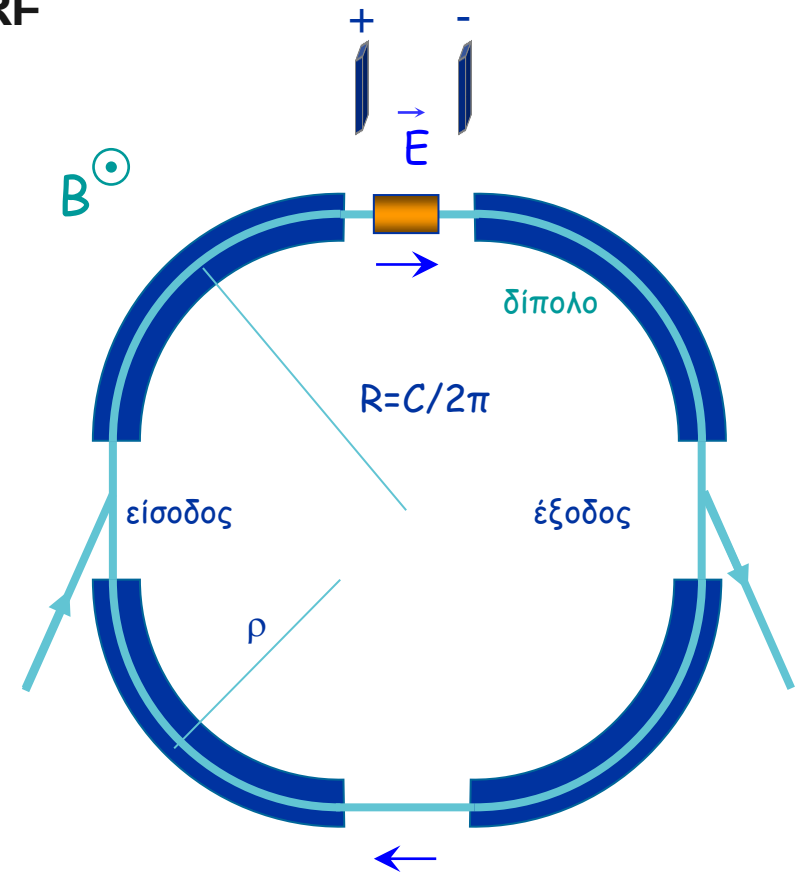
Συνοψίζοντας

- Ο έλεγχος της οπτικής είναι σημαντικός παράγοντας για την σωστή και βέλτιστη λειτουργία του επιταχυντή
- Πηγές σφαλμάτων: αλλαγές στη γεωμετρία ή σφάλματα στους μαγνήτες
- Μέτρηση και διόρθωση της οπτικής (μαγνήτες) απαραίτητη, ιδίως για στο ξεκίνημα του επιταχυντή
- Δυναμικά φαινόμενα από την δέσμη ή την αλληλεπίδραση των δεσμών όπως στους συγκρουστές δημιουργούν επίσης αλλαγές στην οπτική (tune shift) με ταυτόχρονη ενεργοποίηση συντονισμών
 - Αλληλεπίδραση beam-beam στο σημείο σύγκρουσης (head-on) ή όταν οι δέσμες έρχονται κοντά (beam-beam long ranges)
- Τα δυναμικά φαινόμενα αποτελούν σημαντική πρόκληση στην σχεδίαση και λειτουργαία επιταχυντών υψηλής έντασης και ενέργειας

Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Διαμήκης δυναμική - επιτάχυνση

- Η επιτάχυνση σε ένα synchrotron επιτυγχάνεται με τις κοιλότητες RF
 - ηλεκτρικό πεδίο από δυναμικό παράλληλο με τον άξονα της κίνησης
- Στην διάρκεια της επιτάχυνσης η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου είναι συγχρονισμένη με την μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στην κάθε περιστροφή → συνθήκη για σταθερή ακτίνα καμπυλότητας
- Αύξηση ενέργειας ανά περιστροφή
$$qV \sin \phi = qV \sin \omega_{RF} t$$
- Σύγχρονη φάση
$$\phi = \phi_s = \text{const}$$
- Συνθήκη συγχρονισμού
$$\omega_{RF} = h \omega_{rev}$$
- **H : harmonic number = αριθμός των κύκλων RF ανά περιστροφή**
 - Δείχνει τον μέγιστο αριθμό από από πακέτα δέσμης που μπορούμε να έχουμε

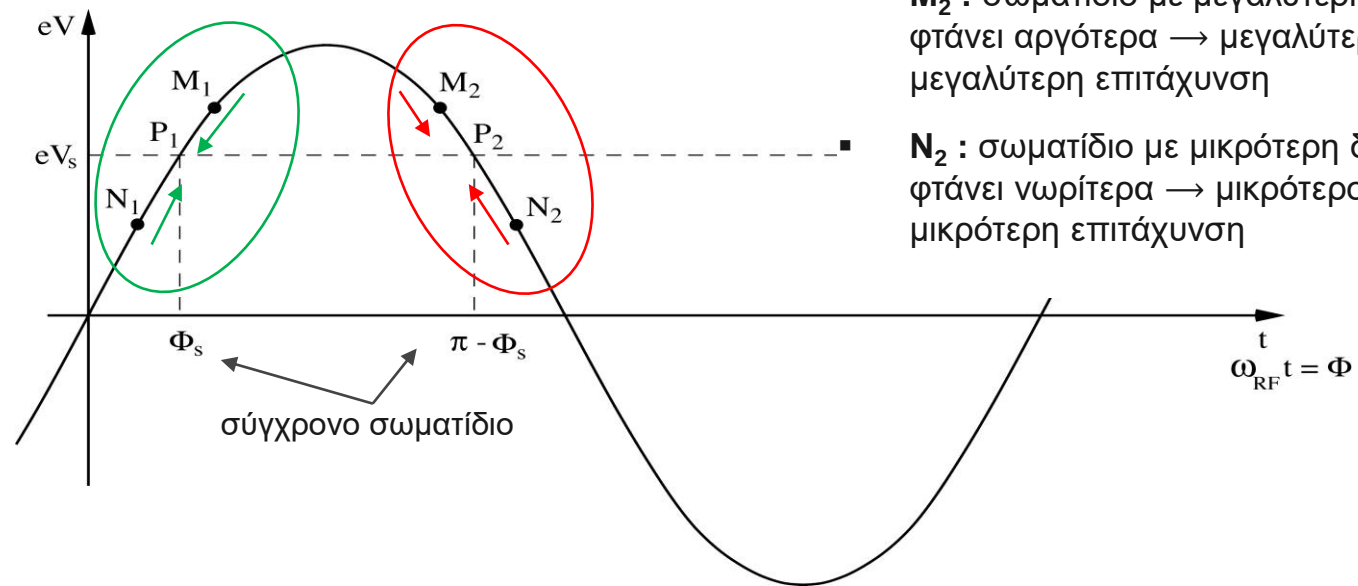


Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Διαμήκης δυναμική – phase focusing

- **Εστίαση φάσης (phase focusing)** : σχηματισμός πακέτων (bunches) δέσμης γύρω από το σύγχρονο σωματίδιο
- **Για χαμηλές ενέργειες**: ο χρόνος άφιξης (φάση) στην κοιλότητα RF εξαρτάται από την ταχύτητα των σωματιδίων
- **Για υψηλές ενέργειες**: τα σωματίδια κινούνται με την ίδια ταχύτητα, ο χρόνος άφιξης εξαρτάται από την διαδρομή

- N_1 : σωματίδιο με μεγάλη ταχύτητα (ενέργεια), φτάνει νωρίτερα → μικρότερο δυναμικό, μικρότερη επιτάχυνση
- M_1 : σωματίδιο με μικρή ταχύτητα φτάνει αργότερα → μεγαλύτερο δυναμικό, μεγαλύτερη επιτάχυνση



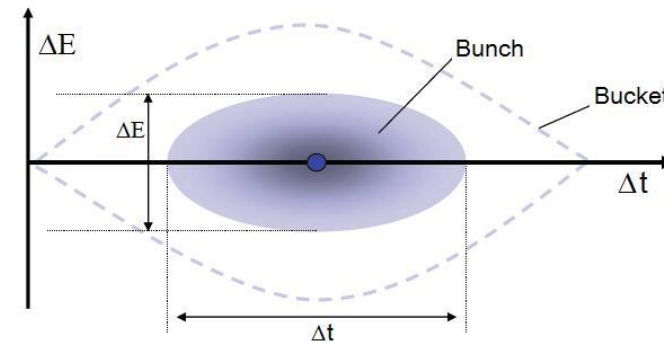
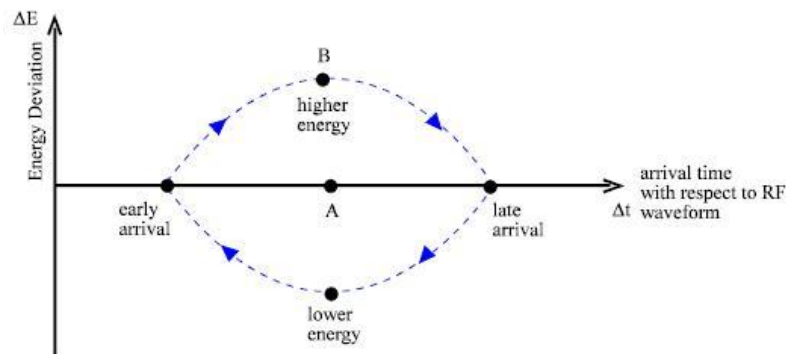
- M_2 : σωματίδιο με μεγαλύτερη διαδρομή φτάνει αργότερα → μεγαλύτερο δυναμικό, μεγαλύτερη επιτάχυνση
- N_2 : σωματίδιο με μικρότερη διαδρομή, φτάνει νωρίτερα → μικρότερο δυναμικό, μικρότερη επιτάχυνση

Σωματίδια που φτάνουν σε άλλες φάσεις είναι ασταθή και θα χαθούν σταδιακά μένοντας μακριά από τον πακέτο δέσμης

Η κίνηση της δέσμης στον επιταχυντή

Διαμήκης δυναμική – phase focusing

- Όπως και για την εγκάρσια κίνηση, τα σωματίδια εκτελούν ταλάντωση γύρω από το συγχρονο σωματίδιο



■ LHC :

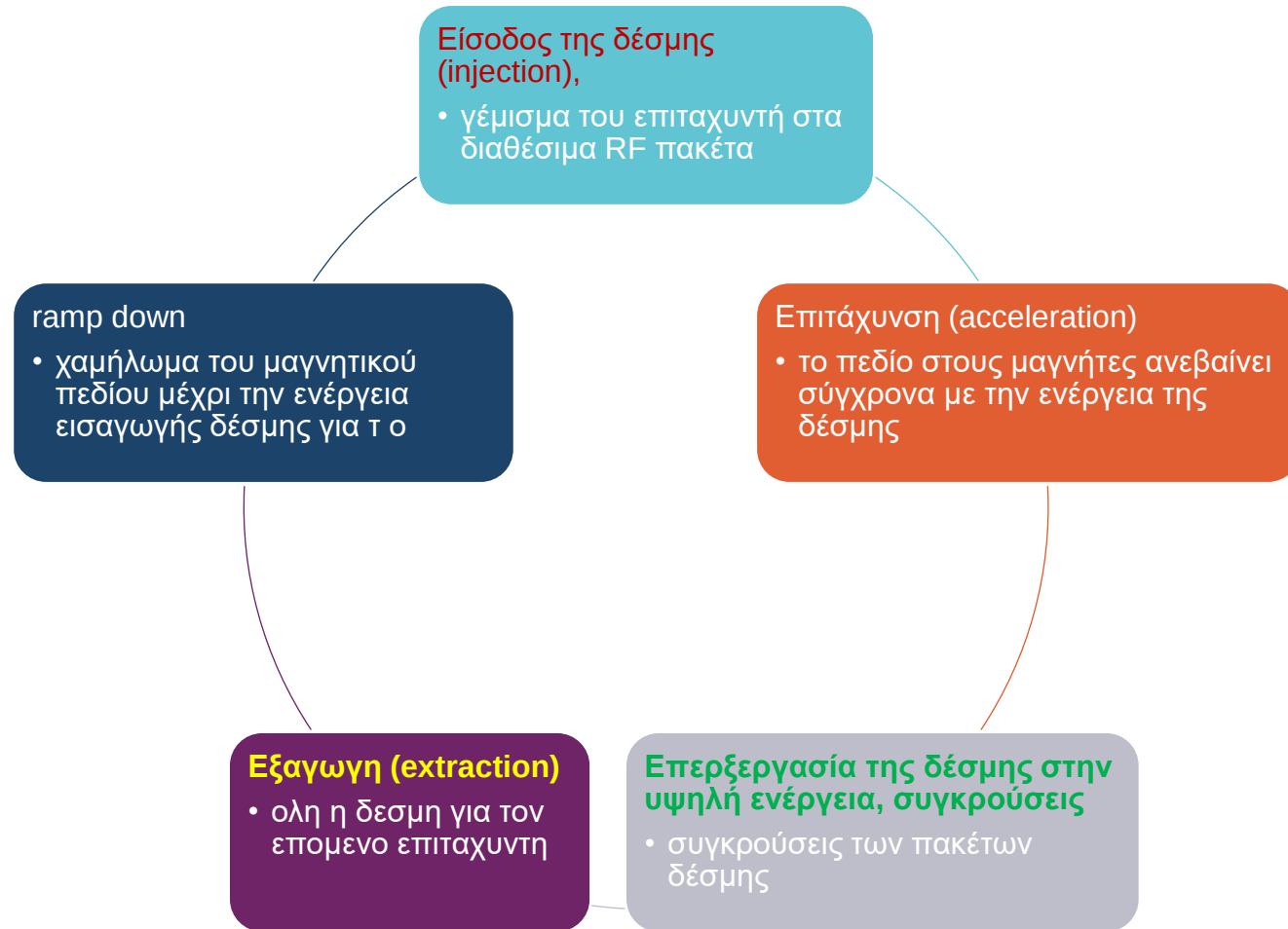
- Περίμετρος 26'659 m
- $f_{\text{rev}} = C_{\text{light}} / 26'659 = 11.245 \text{ kHz}$
- $f_{\text{RF}} = 400 \text{ MHz}$

harmonic number : $h = f_{\text{RF}} / f_{\text{rev}} \sim 35640$

Πακέτα δέσμης (1/10) : 3564 @ 40 MHz

Πως δουλεύουμε με έναν επιταχυντή

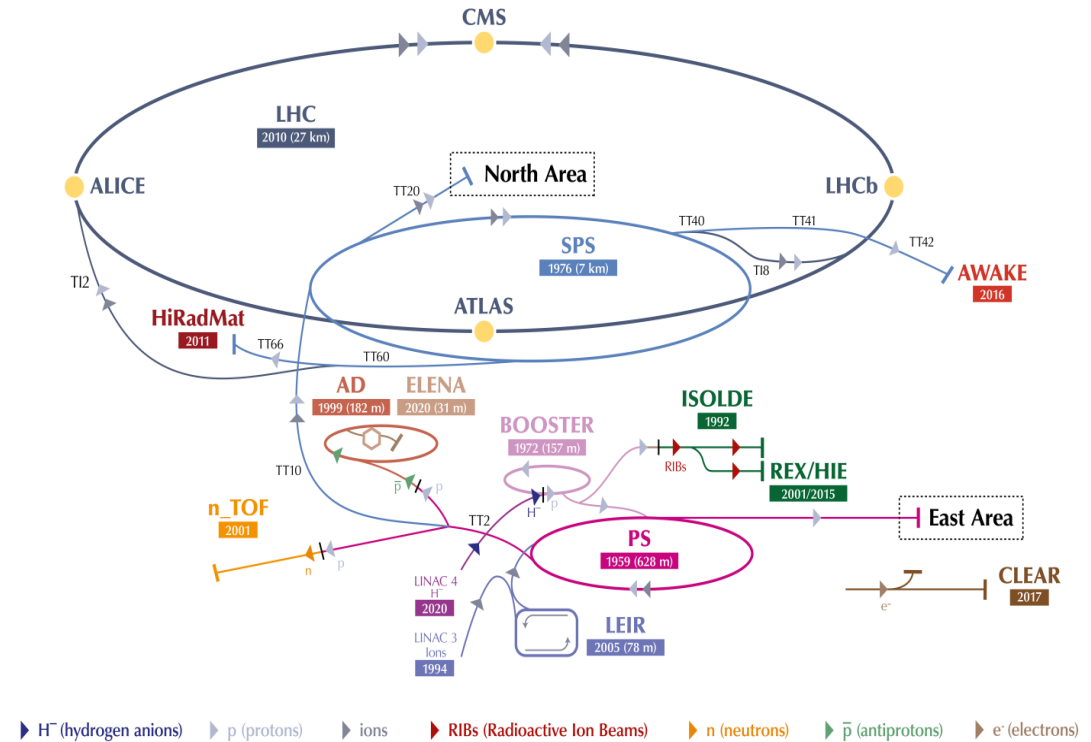
Ο κύκλος λειτουργίας ενός επιταχυντή



Ο κύκλος λειτουργίας ενός επιταχυντή

Το σύμπλεγμα των επιταχυντών του CERN

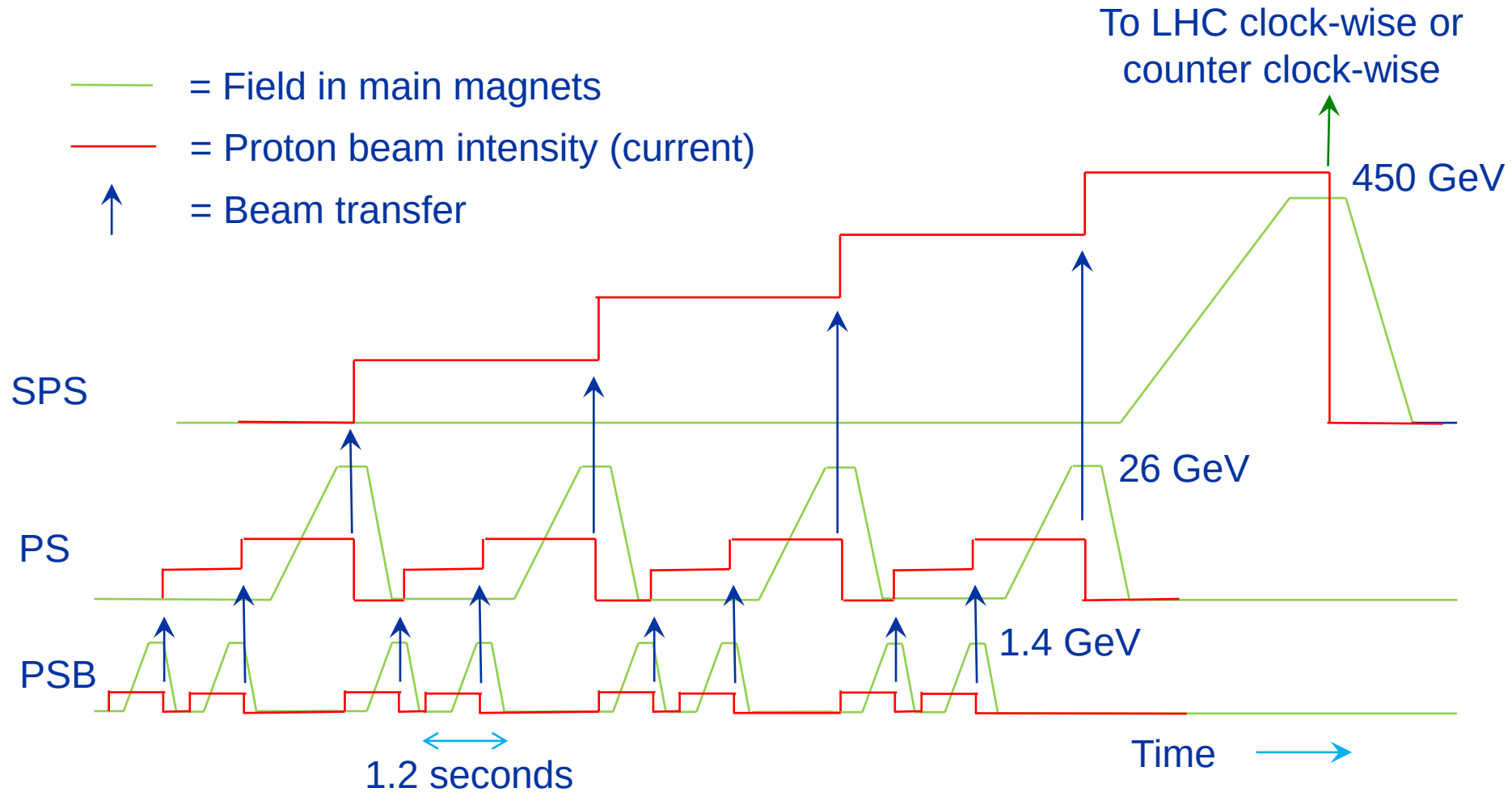
- Ο κάθε επιταχυντής σχεδιάζεται για ένα συγκεκριμένο εύρος επιτάχυνσης
 - Δυνατότητα των μαγνητών
 - Δυναμική της δέσμης
- Χρησιμοποιούμε πολλούς επιταχυντές στην σειρά για να πετύχουμε μεγάλες ενέργειες
 - Η δέσμη μεταφέρεται από τον ένα επιταχυντή στον επόμενο



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

Ο κύκλος λειτουργίας ενός επιταχυντή

LHC injectors



Ο LHC σε λίγα λόγια!

Φτειαγμένος ~100μ κάτω από την επιφάνεια

Έχουμε συγκρούσεις σε 4 μεγάλα πειράματα

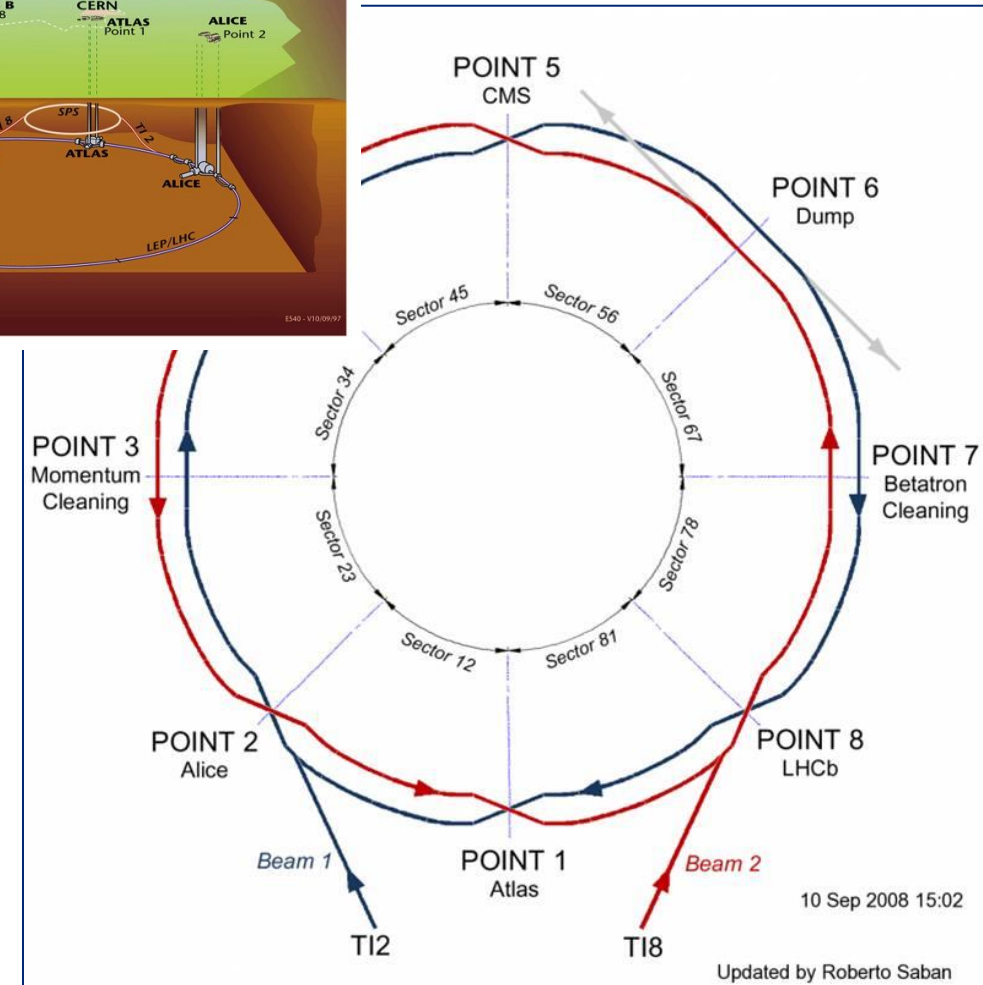
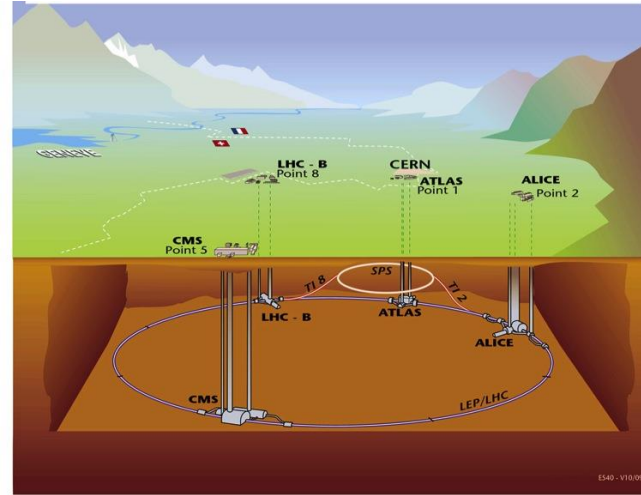
Περιφέρεια 26.7 km

Ιδιαίτερος σχεδιασμός των μαγνητών με δύο δέσμες στον ίδιο μαγνήτη σε απόσταση 19.4 εκ μεταξύ τους

150 τόνους υγρό Ηλιο για να κρατηθούν οι μαγνήτες στην χαμηλή θερμοκρασία και να μείνουν υπεραγωγιμοί

Χαρακτηριστικά δέσμης:

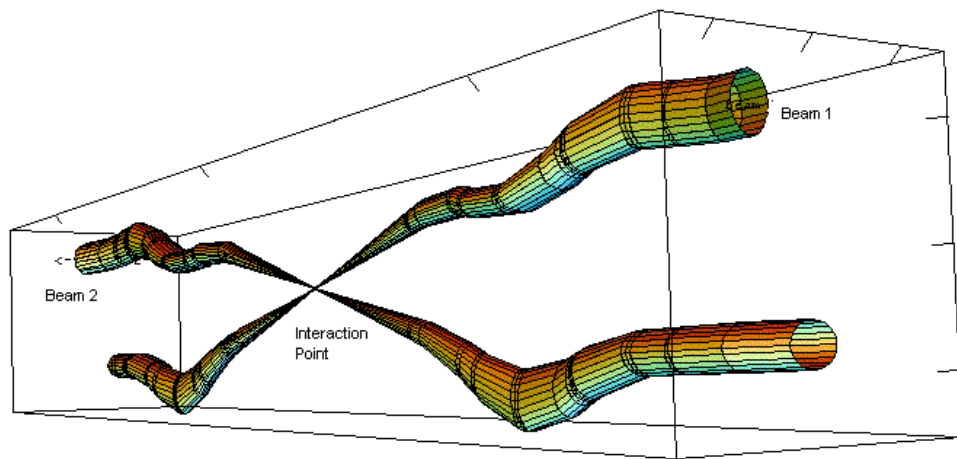
- $1.1-2.2 \cdot 10^{11}$ protons/bunch
- Ενέργεια: 130 KJ,
- πυκνότητα ενέργειας: $\sim 0.5 \cdot 10^{12}$ J/m³
 - Για σύγκριση: diesel-βενζίνη $4 \cdot 10^{10}$ J/m³, Li-bat $6 \cdot 10^9$ J/m³



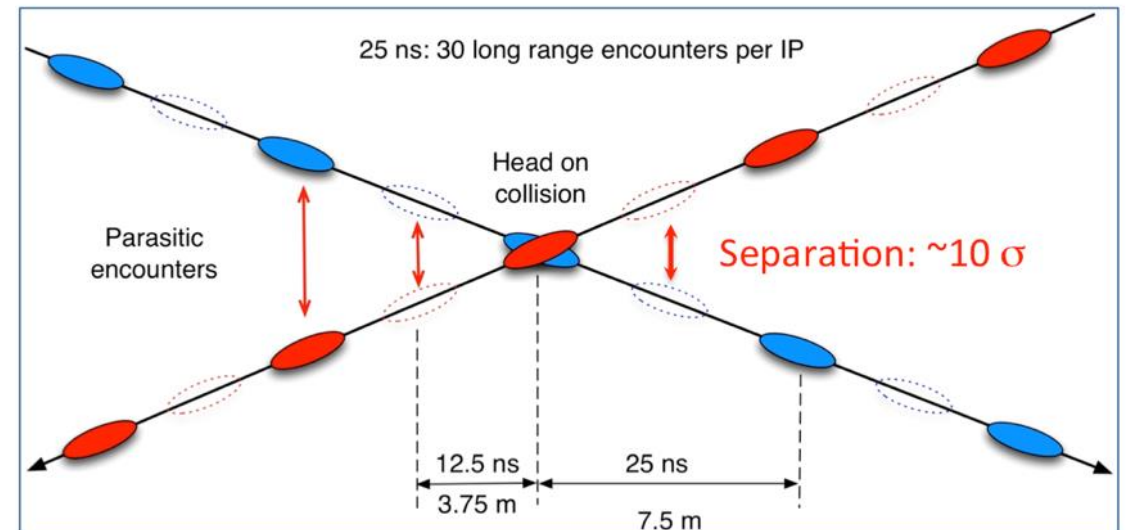
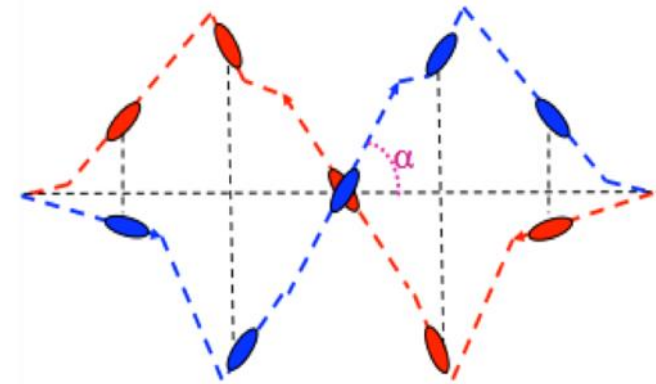
Πως συγκρούονται οι δέσμες

LHC

- Οι δεσμες κινούνται στον 3-διαστατο χώρο, θελουμε να συγκρουστούν στο κέντρο των ανιχνευτών
- Με την ιδιαίτερους μαγνήτες μπορούμε να οδηγήσουμε τις δέσμες σε σύγκρουση



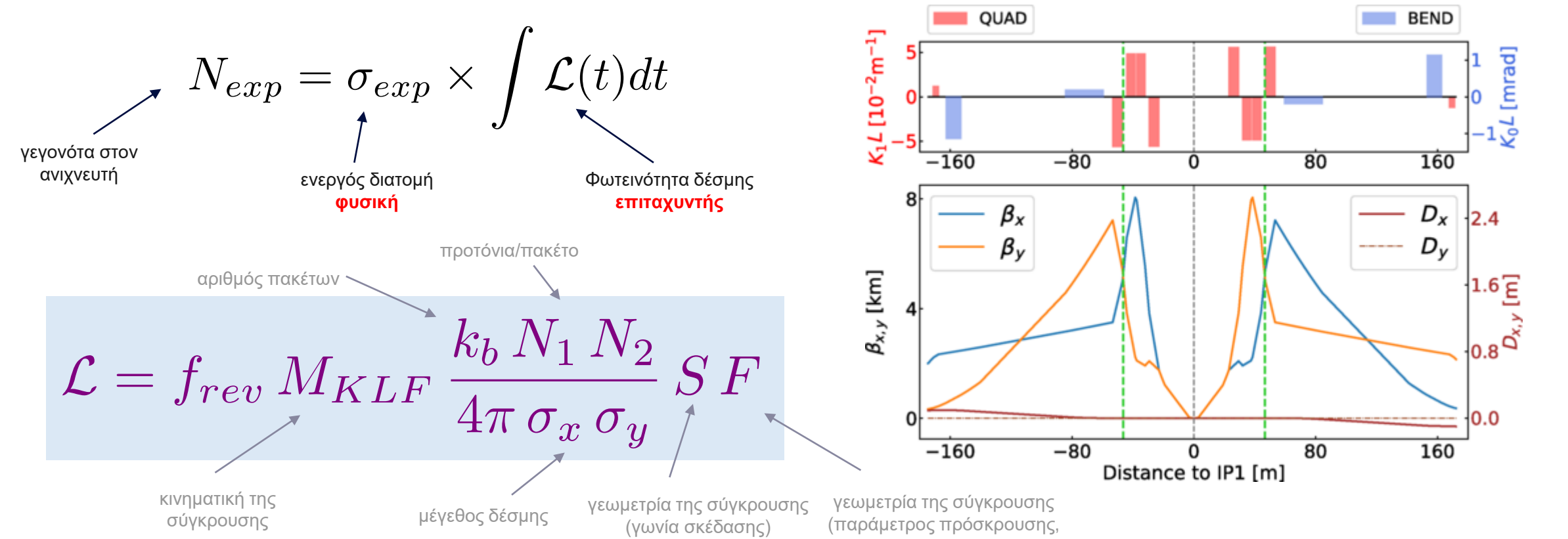
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision



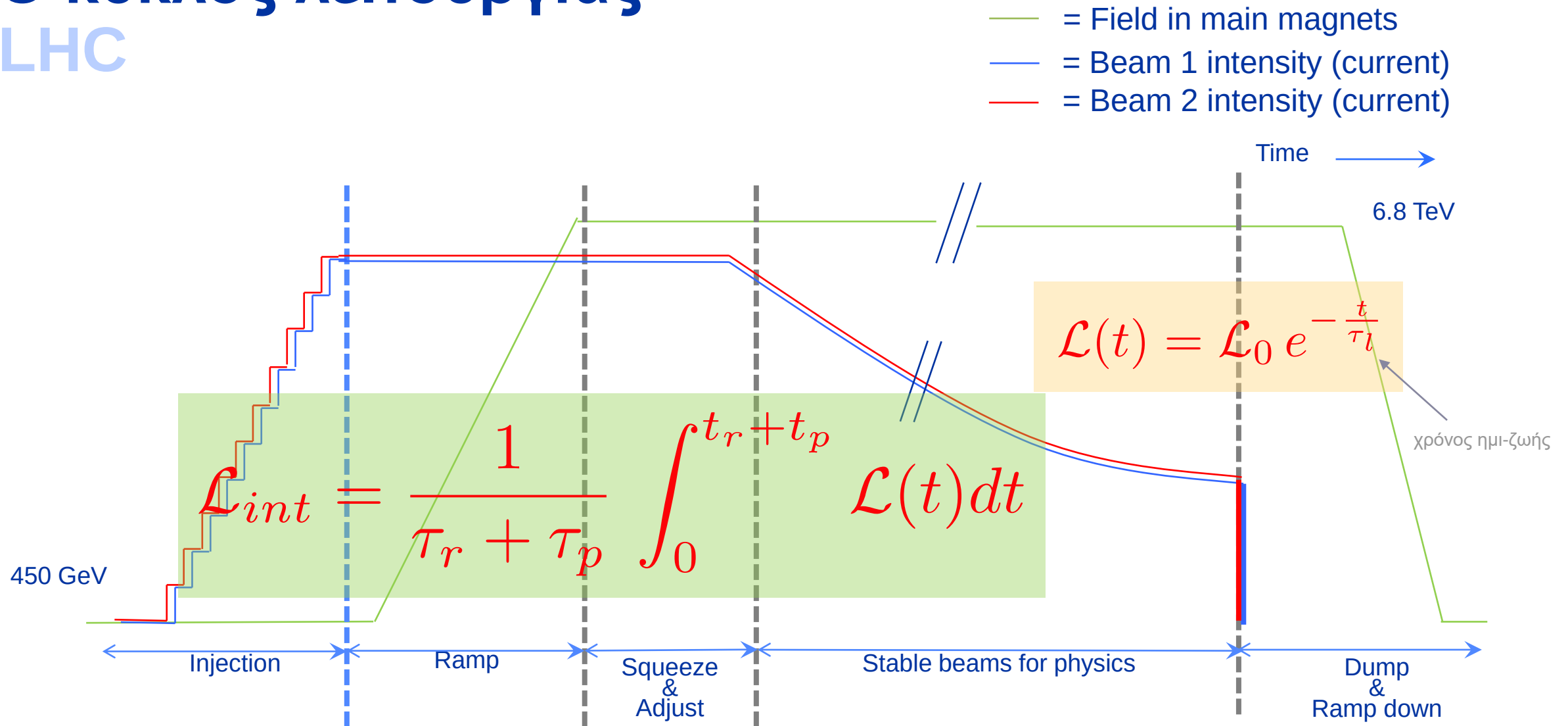
Πως συγκρούονται οι δέσμες

LHC

- Αυτό που ενδιαφέρει είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των συγκρούσεων για την παραγωγή (νέων) σωματιδίων



Ο κύκλος λειτουργίας LHC



Η φυσική του επιταχυντή

Ο επιταχυντής σαν σύστημα περιγράφεται από την κλασσική μηχανική

- Κλασσική Νευτώνια μηχανική για πιο «φυσική» περιγραφή
- Hamiltonian – Lagrangian mechanics για πιο «μαθηματική περιγραφή»

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= T - V \\ \mathcal{H} &= T + V\end{aligned}\quad \mathcal{H}(\mathbf{p}, \mathbf{q}, t) = \sum_{i=1}^n p_i \dot{q}^i - \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t), \quad \mathbf{p} = \partial \mathcal{L} / \partial \dot{\mathbf{q}} \quad \frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{p}}, \quad \frac{d\mathbf{p}}{dt} = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{q}}$$

Κανονικές συντεταγμένες
(phase space coordinates)

- Η βασική περιγραφή συμπληρώνεται με τις εξισώσεις Maxwell για τα ηλεκτρικά/μαγνητικά πεδία
- Τα σωματίδια θεωρούνται σαν «σφαίρες-σημεία»

Η φυσική του επιταχυντή ...και η κβαντομηχανική;

- Για ταχύτητες που «πλησιάζουν» την ταχύτητα του φωτός η περιγραφή της κίνησης πρέπει να περιλαμβάνει την Ειδική Σχετικότητα
- Το κβαντομηχανικό μήκος κύματος των σωματιδίων, de Broglie, τουλάχιστον για τις τωρινές ενέργειες είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις του επιταχυντή για να έχει νόημα μια κβαντομηχανική περιγραφή
- Όμως τα σωματίδια διατηρούν τις κβαντομηχανικές τους ιδιότητες και φαινόμενα ως προς τις αλληλεπιδράσεις τους, ή την εκπομπή ακτινοβολίας (π.χ. synchrotron radiation) είναι κβαντομηχανικά φαινόμενα με την αντίστοιχη περιγραφή
 - Επίσης ιδιαίτερες επιταχυντικές διατάξεις όπως τα Free Electron Lasers, Wave Acceleration, Crystal channeling, βασίζονται ή χρησιμοποιούν κβαντομηχανικά φαινόμενα

Πως γεμίζουμε την δέσμη σε έναν επιταχυντή;

Εισαγωγή (Injection) / Εξαγωγή (Extraction) της δέσμης

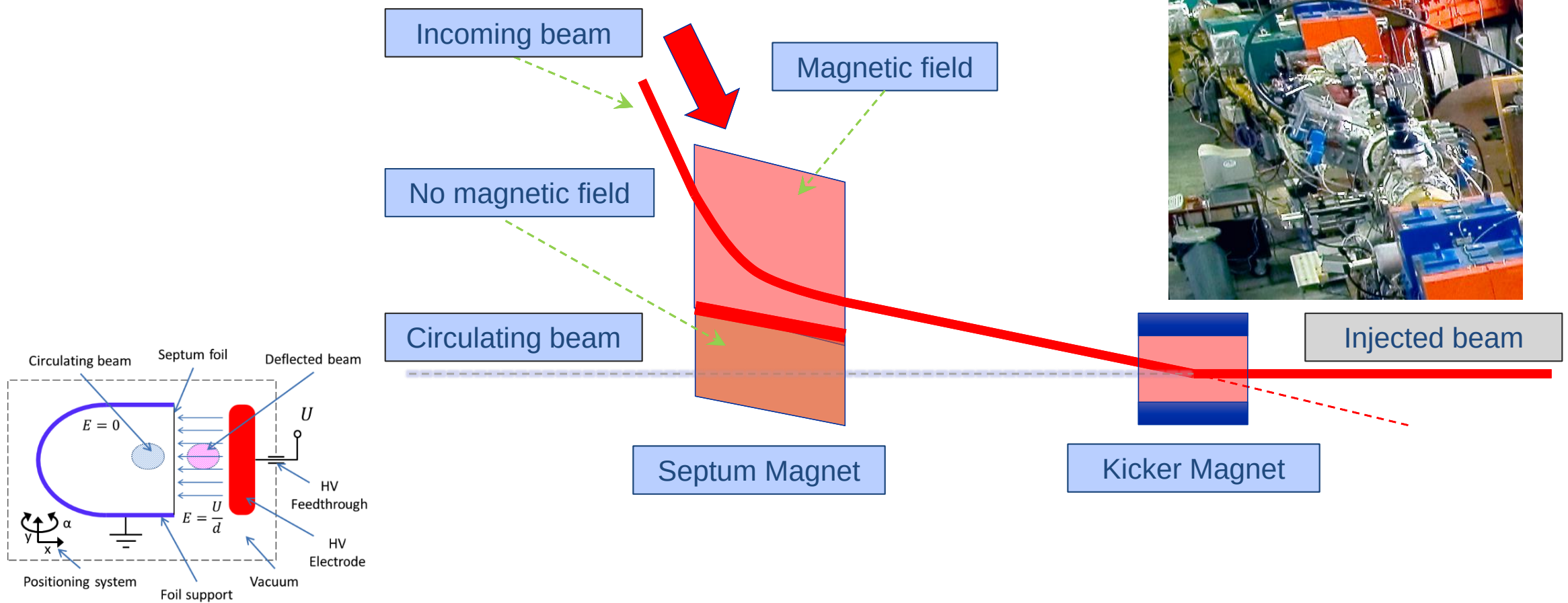
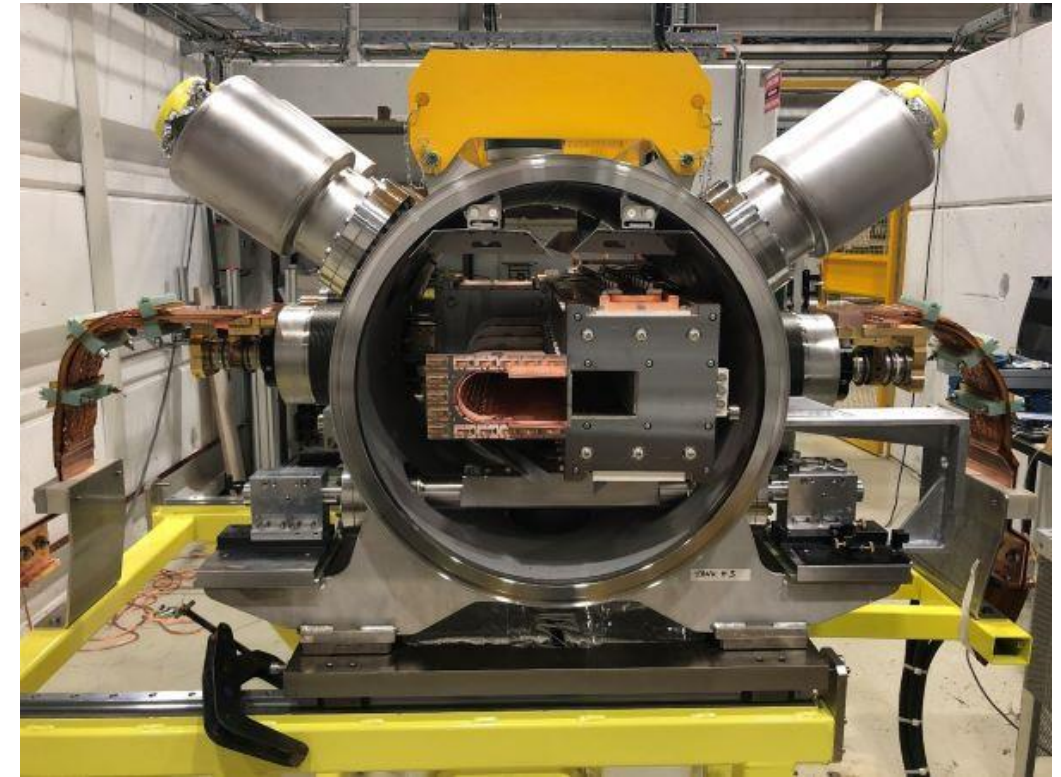
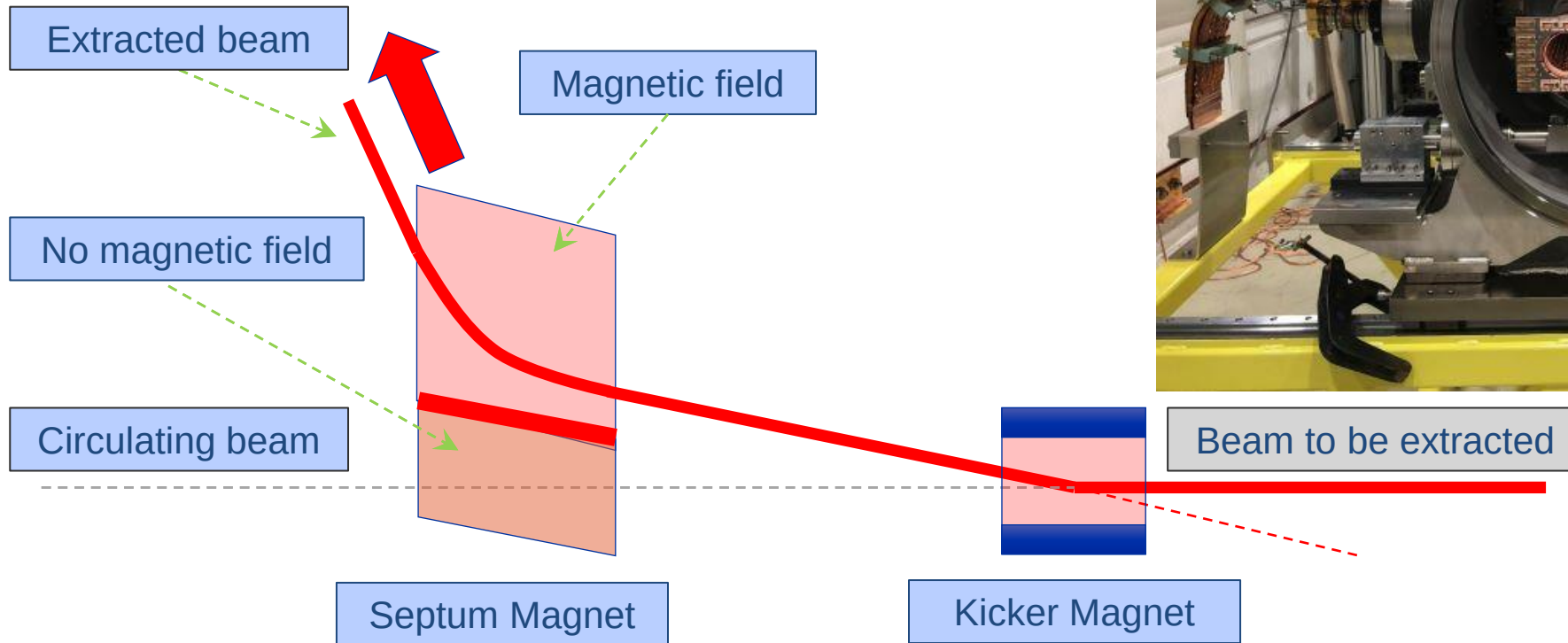


Fig. 4: Schematic view of electrostatic septum

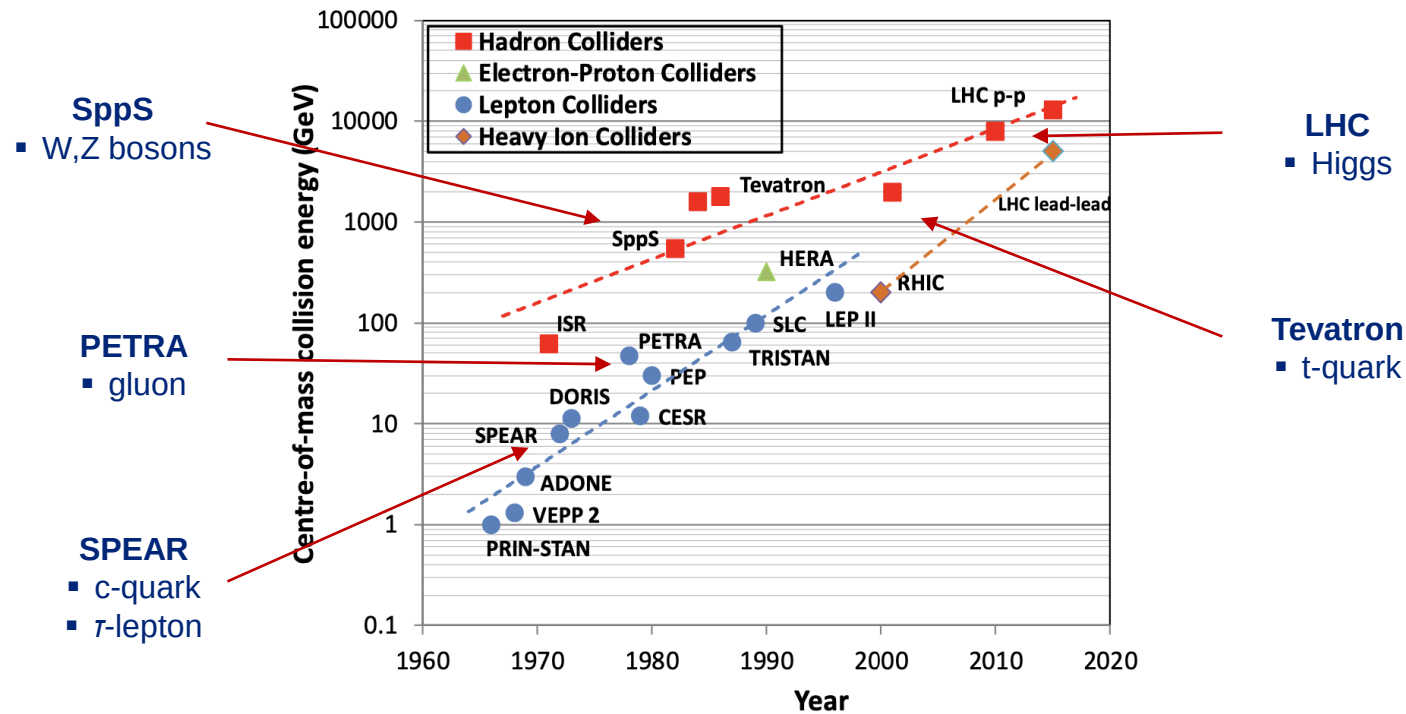
Εισαγωγή (Injection) / Εξαγωγή (Extraction) της δέσμης



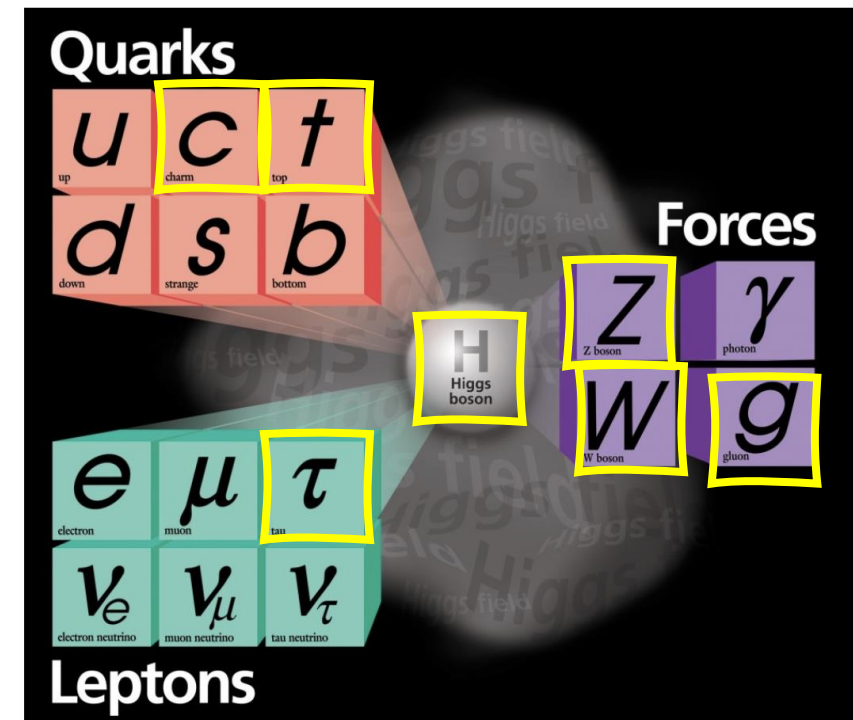
Η εξέλιξη των επιταχυντών

...ΤΟ ΧΤΕΣ

- Οι επιταχυντές έπαιξαν έναν κομβικό ρόλο στην θεμελίωση του Καθιερωμένου Πρότυπου (Standard Model)



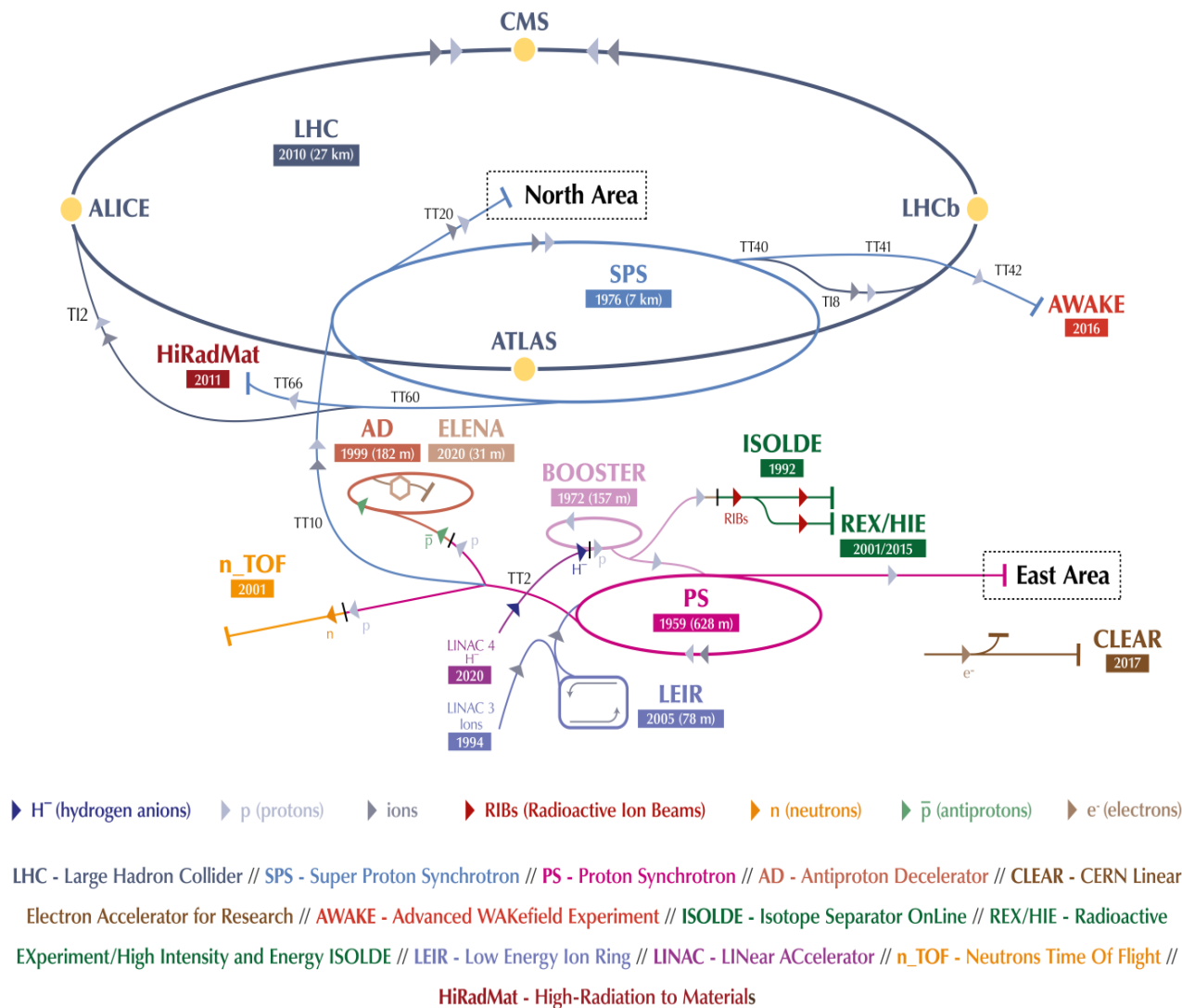
Standard Model
Particles and forces



Η εξέλιξη των επιταχυντών ... το σήμερα

CERN

- Το μεγαλύτερο κέντρο επιταχυντών σήμερα στον κόσμο
- Σειρά επιταχυντών για την παραγωγή των δεσμών υψηλής ενέργειας προτονίων ή ιόντων για τον LHC
- Κύριο πρόγραμμα: LHC
- Παράλληλα ένα ποικίλο πρόγραμμα φυσικής με δέσμες σταθερού στόχου
 - πρωτόνια, ηλεκτρόνια, ιόντα, νετρόνια
- Μελέτη της ύλης και της πυρηνικής δομής
- Παραγωγή και μελέτη της αντι-ύλης

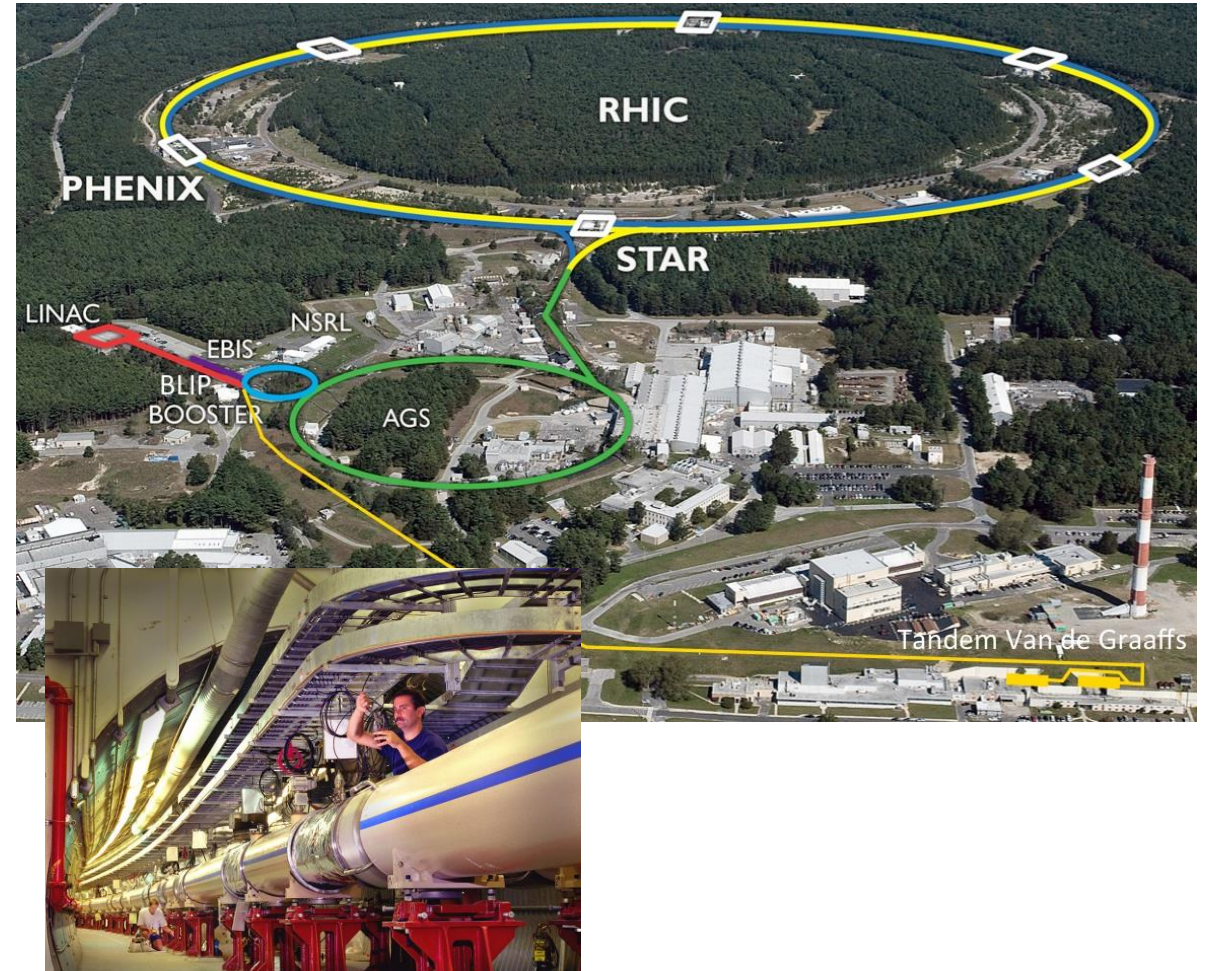


Η εξέλιξη των επιταχυντών ... το σήμερα

Brookhaven National Lab (BNL) - USA

Χρήση υπερ-αγώγιμων καλωδίων στην σχεδίαση των μαγνητών για την εξασφάλιση υψηλών μαγνητικών πεδίων

- **Συγκρούσεις ιόντων** (πυρήνες χρυσού, χαλκού, ..) με ενέργειες έω 100 GeV/nucleon
- Μήκος ~4 km, 1740 μαγνήτες
- 4 εγκατεστημένα πειράματα στα σημεία σύγκρουσης (BRAHMS, PHENIX, PHOBOS, STAR)
- Βασική έρευνα η μελέτη του quark-gluon plasma σαν μέρος της δημιουργίας του σύμπαντος
- Σχέδια για την κατασκευή του **EIC – Electron-Ion collider**



Η εξέλιξη των επιταχυντών ... το σήμερα

Spallation Neutron Source (SNS), Oak Ridge - USA

- **Παραγωγή δεσμών νετρονίων** από σύγκρουση δεσμής πρωτονίων υψηλής έντασης σε στόχο (Υδράργυρος)
- Διάταξη:
 - πηγή H^- ($p+2e$)
 - 300m γραμμικός επιταχυντής με υπεραγώγιμες κοιλότητες RF
 - δαχτυλίδι συσσώρευσης της δέσμης (1 MW)
 - στόχος από υδράργυρο
- πειράματα σκέδασης νετρονίων σε υλικά, μελέτη της δομής, nano-materials, ...

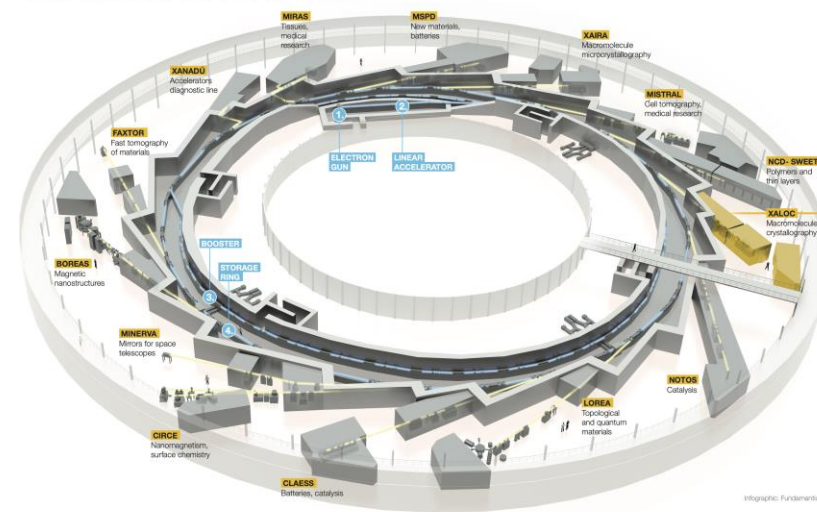


Η εξέλιξη των επιταχυντών ... το σήμερα

ALBA Synchrotron Light Facilities – Barcelona Spain

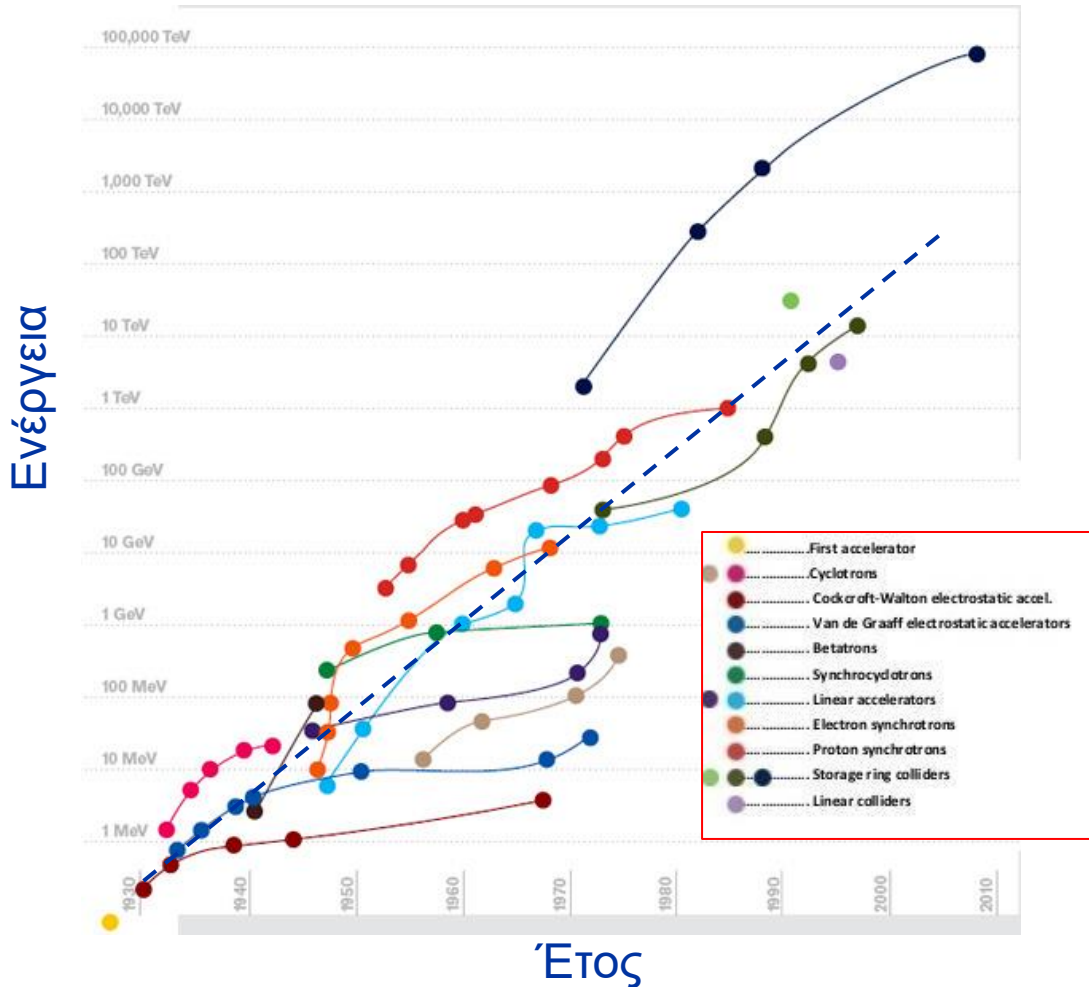
- Τελευταίας 3^{ης} γενιάς synchrotron light, το νεότερο κέντρο στην λεκάνη της μεσογείου
- 3 GeV δέσμη ηλεκτρονίων, 270μ περίμετρος
- πειραμάτων με soft και hard X-rays δέσμες
- Μελέτες για βιο-τεχνολογία, επιστήμη των υλικών (μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών, νανο-τεχνολογία)
- 6'000 ώρες δέσμης/χρόνο για πειράματα, 2'000 χρήστες από πανεπιστήμια ή ερευνητικά ιδρύματα ή βιομηχανία το χρόνο.
 - 65% χρήστες από την Ισπανία, 35% από άλλες χώρες

THE ALBA SYNCHROTRON



Συνοπτικά η εξέλιξη των επιταχυντών

Το διάγραμμα του Livingston



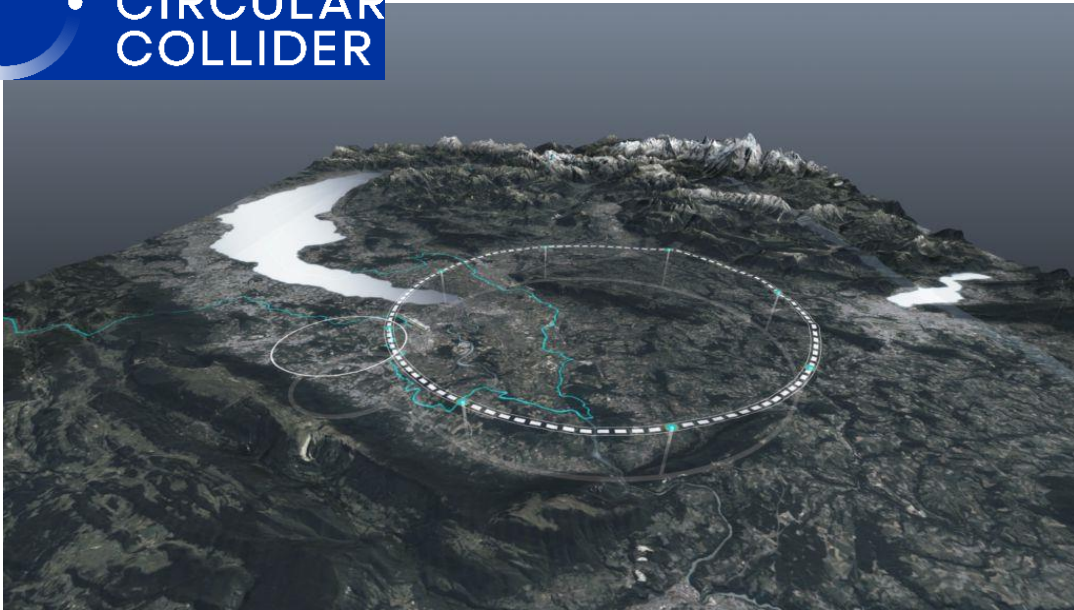
- Το διάγραμμα του Livingston δείχνει την εξέλιξη των επιταχυντών από τον προηγούμενο αιώνα
- Μέχρι το τέλος του 20^{ου} αιώνα, κάθε 6-10 χρόνια η ενέργεια αυξάνεται μια τάξη μεγέθους
- **Νέες τεχνολογίες εμφανίζονται και αντικαθιστούν ή συμπληρώνουν παλιότερες**

Όμως:

- Η ενέργεια δεν είναι ο μόνος παράγοντας εξέλιξης
- Τα χαρακτηριστικά της δέσμης: ένταση, διατομή είναι επίσης σημαντικά

Η εξέλιξη των επιταχυντών ... το αύριο

Η πρό(σ)κληση για Υψηλότερη Ενέργεια



- ~90km τούνελ, κάτω από την λίμνη της Γενεύης!

FCC-ee : συγκρουστήρας ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων

- 45 – 175 GeV ενέργεια δέσμης

Προκλήσεις:

- οπτική του επιταχυντή για την επίτευξη της φωτεινότητας $\sim 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,
- μέγεθος δέσμης στο σημείο σύγκρουσης $\sim 40 \mu\text{m}$ (h), 40 nm (v),
- Συνεχής αναπλήρωση της απώλειας ενέργειας λόγω ακτινοβολίας synchrotron
 - power loss/beam $\sim 50 \text{ MW}$

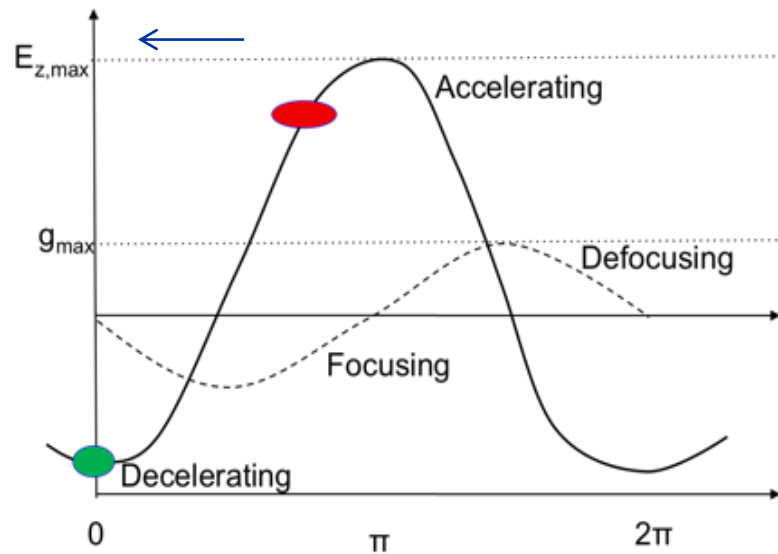
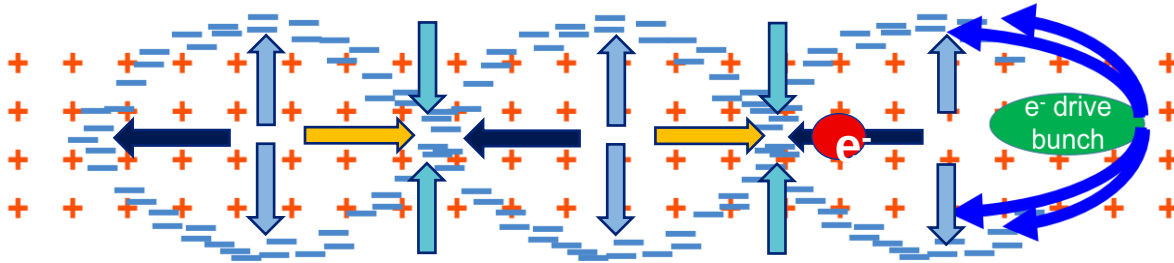
Απώτερο μέλλον:

FCC-hh : συγκρουστήρας πρωτονίων / ιόντων στο ίδιο τούνελ

- 50 TeV ενέργεια δέσμης,
- 16.7 GJ ολική ενέργεια $\times 30$ απο το LHC!

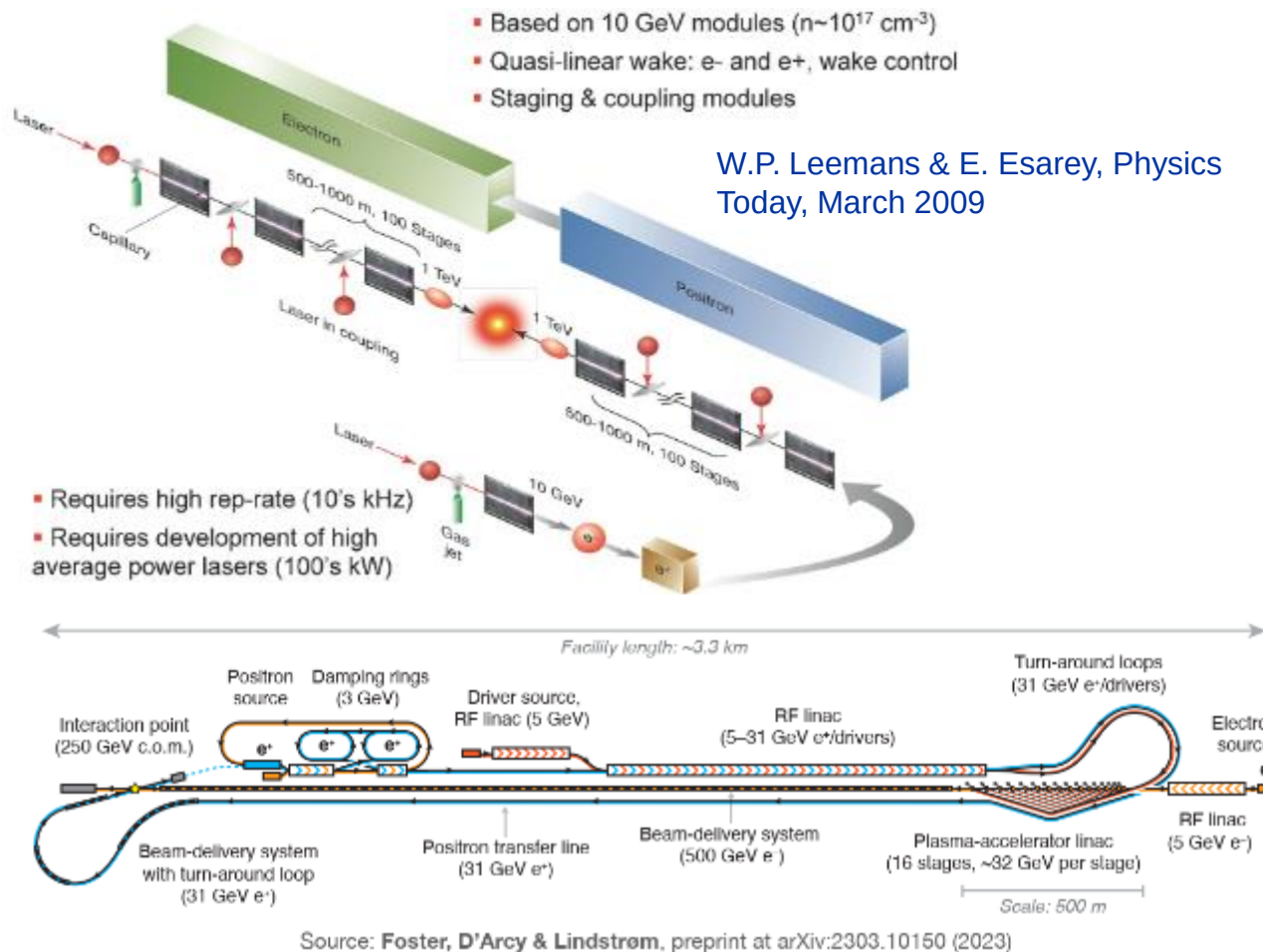
Επιτάχυνση με πλάσμα wakefield

Νέα τεχνολογία που σκοπεύει να καταφέρει ~1000 μεγαλύτερη βαθμίδα επιτάχυνσης



- ← Accelerating for e^-
- Decelerating for e^-
- ↑ Focusing for e^-
- ↓ Defocusing for e^-

Η εξέλιξη των επιταχυντών ... το αύριο



- Γραμμικός επιταχυντής ηλεκτρονίων με τεχνολογία πλάσματος για την μελέτη του Higgs: $e^+ e^- \rightarrow H Z$ (CM $\sim 216 \text{ GeV}$)
- Πλεονεκτήματα: επιτάχυνση με πολύ μικρή διασπορά στην ενέργεια, μικρές emittances
- Προκλήσεις: η επιτάχυνση των ποζιτρονίων, πολλά διαδοχικές κυψέλες πλάσματος για την επίτευξη της τελικής ενέργειας, integrated luminosity

A hybrid, asymmetric, linear Higgs factory based on plasma-wakefield and radio-frequency acceleration

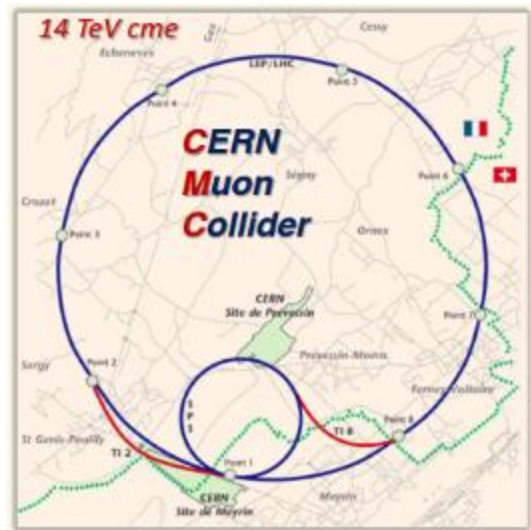
B. Foster,^{1,2,*} R. D'Arcy,^{1,2} and C. A. Lindström³

¹John Adams Institute for Accelerator Science at University of Oxford, Oxford, UK

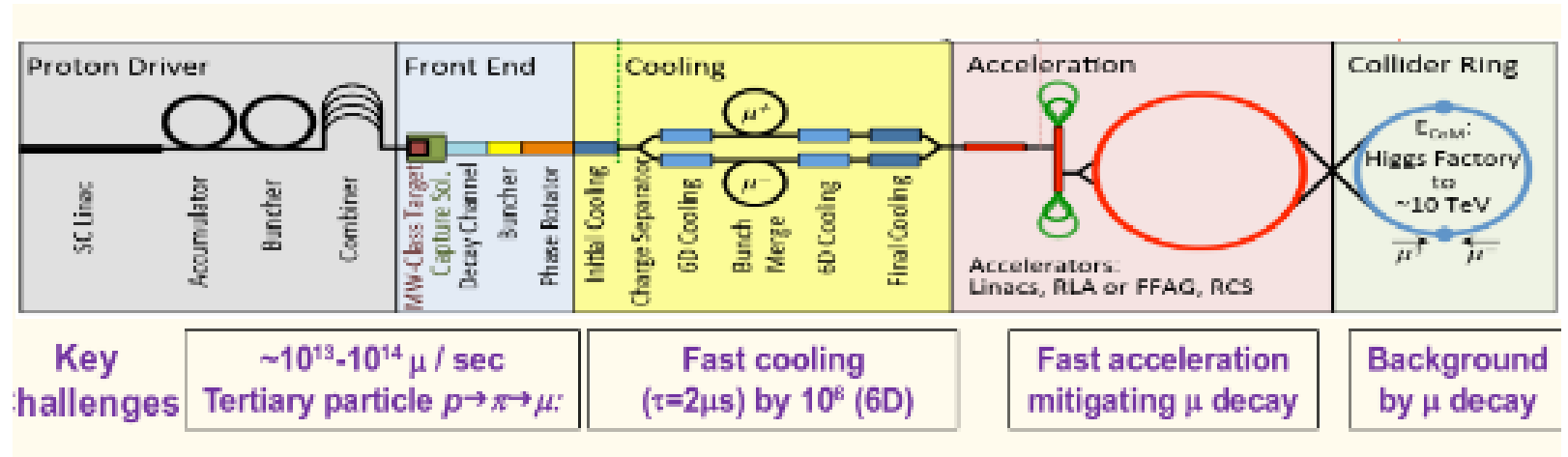
²Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany

³Department of Physics, University of Oslo, Oslo, Norway
(Dated: August 24, 2023)

Η εξέλιξη των επιταχυντών ... το αύριο



MOPMF072, IPAC18, V. Shiltzev, D. Neuffer



Συγκρουστήρας μονίων – Muon Collider

- Δυνατότητα για συγκρούσεις από Z, H (~ 200 GeV) έως 10 TeV – δρόμος για μεγάλες ενέργειες!
- Πλεονέκτημα: τα μόνια δεν χάνουν ενέργεια λόγω synchrotron radiation (είτε στα δίπολα είτε από την παρουσία της άλλης δέσμης στο σημείο σύγκρουσης – beamstrahlung), «λογική» κατανάλωση ενέργειας
- Προκλήσεις : ανάπτυξη νέων τεχνολογιών,
 - τα μόνια είναι τριτογενή σωματίδια, ασταθή με μικρό χρόνο ημι-ζωής ($\sim 2 \mu\text{s}$)

Οι επιταχυντές σήμερα ... πέρα από την φυσική των σωματιδίων

>35'000 επιταχυντές σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο:

44% για ραδιο-θεραπεία

41% για εμφύτευση ιόντων

9% για βιομηχανικές εφαρμογές

4% ερευνα στις χαμηλές ενέργειες

1% παραγωγή ισοτόπων για θεραπεία

<1% έρευνα

Θεραπεία καρκίνου

Ανάπτυξη ημι-αγωγών

Υλικά: αποστείρωση, χρονολόγηση με C, επεξεργασία αερίων διύλησης

Υλικά: μικρο-ανάλυση, φασματογράφοι μάζας, PIXE (particle-induced X-ray emission)

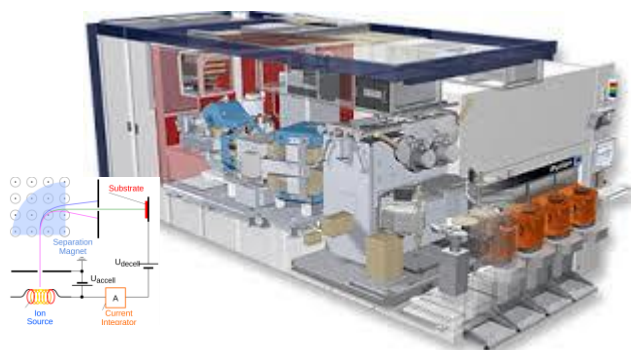
PET και SPECT απεικόνισης



Γραμμικός επιταχυντής ηλεκτρονίων για ραδιο-θεραπεία



Επιταχυντής tandem για έρευνα υλικών και εργα τέχνης



Εμπορικό σύστημα για εμφύτευση ιόντων



Το Rhodotron της IBA για την παραγωγή ισχυρών δεσμών ηλεκτρονίων



Cyclotron πρωτονίων για παραγωγή ραδιο-ισοτόπων

Οι επιταχυντές σήμερα

... συμβολή στην έρευνα για το περιβάλλον

Χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια μπορούν να σπάσουν μοριακούς δεσμούς και να χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία:

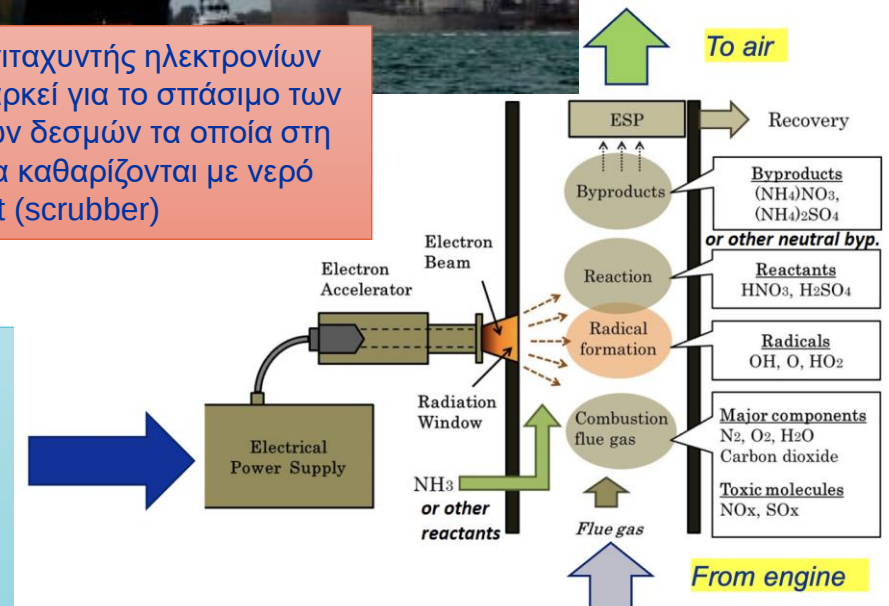
- αερίων διύλισης (μετατροπή του SOx)
 - υγρών αποβλήτων
 - αερίων καύσης πλοίων (μετατροπή του SOx και NOx)
- **Η ναυτιλία** είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας στην ατμοσφαιρική μόλυνση: ένα κρουαζιερόπλοιο παράγει τόσα αέρια θείου όσο 1 εκ. αυτοκίνητα!
 - Τα πλοία καίνε βαριά αποστάγματα διύλισης, φτηνά αλλά πλούσια σε θείο. Τα καύσιμα Ντίζελ υψηλής απόδοσης εκπέμπουν οξείδια αζώτου και μικρο-σωματίδια.
 - Η νέα νομοθεσία προβλέπει δραστική μείωση των εκπομπών SOx και NOx από τα πλοία, κυρίως σε παράκτιες περιοχές.
 - Σήμερα υπάρχουν τεχνικές λύσεις για τον περιορισμό των προϊόντων SOx ή NOx αλλά δεν υπάρχει βιώσιμη οικονομική λύση και για τα δύο ταυτόχρονα

Πρόγραμμα: Hybrid Exhaust Gas Cleaning Retrofit Technology for International Shipping (HERTIS)

Ενα πρόγραμμα βασισμένο στην πατέντα του προωθήθηκε με τη συνεργασία την Ινστιτούτων έρευνας (including CERN), βιομηχανίας επιταχυντών, ναυπηγείων, πλοιοκτήτριες εταιρίες, ναυτιλιακές εταιρίες σε (Germany, UK, Switzerland, Poland, Latvia, Italy).



Ενας επιταχυντής ηλεκτρονίων 150kV αρκεί για το σπάσιμο των μοριακών δεσμών τα οποία στη συνέχεια καθαρίζονται με νερό water jet (scrubber)



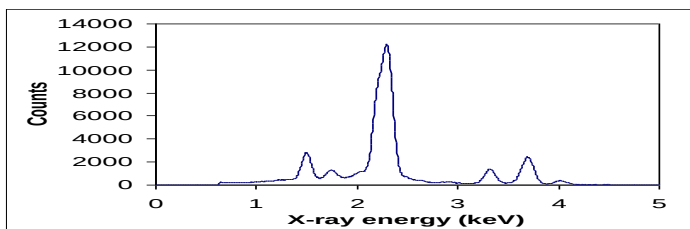
Οι επιταχυντές σήμερα ... συμβολή στην τέχνη!

Ανάλυση δέσμης Ιόντων (e.g. PIXE, Proton Induced X-ray Emission)

Μια δέσμη από σωματίδια (protons) απο τον επιταχυντή χτυπάει ένα δείγμα (π.χ. ενός πίνακα)

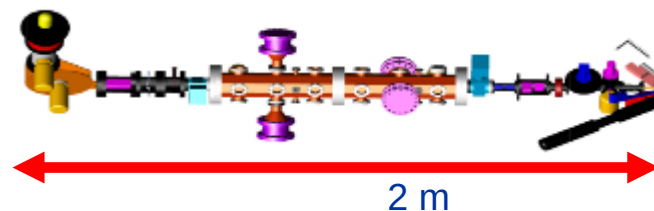
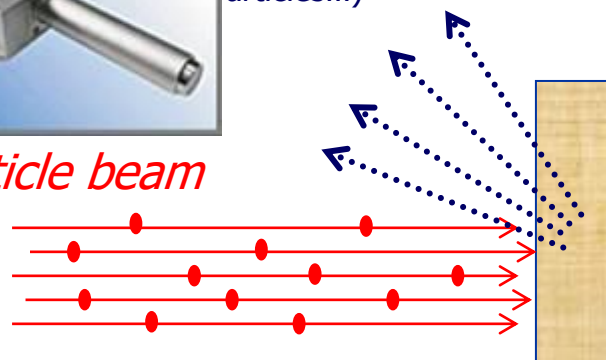
Τα άτομα διεγείρονται και εκπέμπουν διαφορετικούς τύπους ακτινοβολίας (ακτίνες-X, φωτόνια, κλπ) ανάλογα με την σύσταση του υλικού – φασματική ανάλυση από διάφορους ανιχνευτές επιτρέπει τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης των υλικών

Ανίχνευση ακτινοβολίας και φασματική ανάλυση



of radiation of
ristic energies (X-
articles...)

particle beam



Ritratto Trivulzio by Antonello da Messina, 1476 – analysis at INFN-LABEC (Florence)



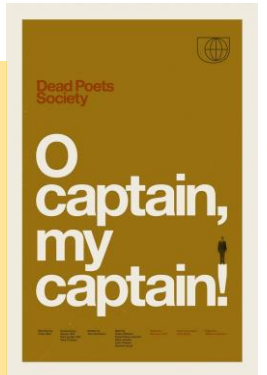
Portable PIXE system based on an RFQ linac being built by CERN and LABEC

Οι τελευταίες λέξεις

... οι προκλήσεις και οι ευκαιρίες!

- Οι επιταχυντές αποτέλεσαν και αποτελούν σημαντικό στοιχείο στην βασική και εφαρμοσμένη έρευνα, ιατρική, βιομηχανία με την ζήτηση και εφαρμογές να πολλαπλασιάζονται.
- Μια ιδιαίτερα σημαντική πρόκληση σήμερα είναι η βιωσιμότητα: το ενεργειακό αποτύπωμα για την εξέλιξη και λειτουργία των επιταχυντών.
- Παράλληλα βασικές τεχνολογίες των επιταχυντών παραμένουν ίδιες από την εποχή της αρχικής ιδέας από τον ο Wideroe ~100 χρόνια πριν ! Για να προχωρήσουμε τα όρια των επιταχυντών χρειαζόμαστε νέες καινοτόμες ιδέες παράλληλα, με τεχνολογικά άλματα
- Για να γίνει αυτό χρειάζεται να εμπνεύσουμε την αγάπη και το ενδιαφέρον για την επιστήμη στους νέους

Εδώ έρχεται ο δικός σας ρόλος!





ΤΕΛΟΣ

Προσπάθησα να δώσω μια εισαγωγική ματιά στους επιταχυντές και στην φυσική τους
Οι διαφάνειες είναι συλλογή από διάφορες παλιές ομιλίες, κείμενα, web, μεταξύ άλλων από τους : F.
Asvesta, E. Metrical, D.Gamba, M. Vreternar - στους ευχαριστώ όλους

Καλή συνέχεια και αν εχετε επιπλέον ερωτήσεις στο e-mail: Ilias.Efthymiopoulos@cern.ch

Γιατί ο επιταχυντής είναι κατασκευασμένος υπόγεια;

Για τρεις βασικούς λόγους

1. Η αγορά της αντίστοιχης γής θα ήταν αρκετά πολύπλοκη διαδικασία στην περιοχή αλλά και γενικότερα και σε άλλα μέρη ερευνητικά κέντρα. Θα έκοβε για παράδειγμα πολλούς δρόμους, χωριά κλπ.
2. Αν και δεν έχει ιδιαίτερα θέματα ραδιενέργειας η χρήση δεσμών υπόγεια έχει πολλά πλεονεκτήματα σε περίπτωση ατυχημάτων.
3. Μενοντας στο υπέδαφος έχουμε μια πιο σταθερή θερμοκρασία που χρειάζεται για την λειτουργία του. Π.χ. αποφυγή διαστολών/συστολών λόγω αυξημένης θερμοκρασίας με συνέπεια την μην σωστή ευθυγράμμιση των μαγνητών

Σε άλλα μέρη που το (1) δεν είναι τόσο σημαντικό πρόβλημα οι επιταχυντές είναι συνήθως μερικά μέτρα κάτω από το έδαφος για το (2) με τα χώματα από την εκσκαφή να τοποθετούνται πάνω από την εγκατάσταση για επιπλέον προστασία (shielding)