

Όλα όσα πάντα θέλατε να μάθετε για
ΤΟΥΣ **ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ** *

*και δεν είχατε την ευκαιρία να ρωτήσετε!

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

Greek Teachers Program – 28.09.2023, CERN

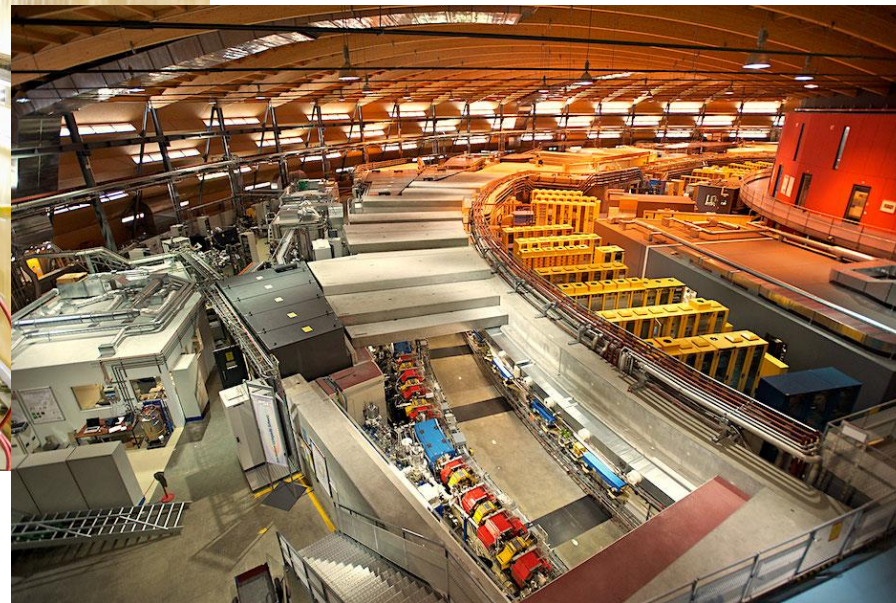
Τι είναι οι επιταχυντές?

Οι επιταχυντές ή σωστότερα οι **επιταχυντές σωματιδίων**, είναι εγκαταστάσεις «μηχανές» που μπορούν να δημιουργήσουν **ενεργειακές δέσμες σωματιδίων**

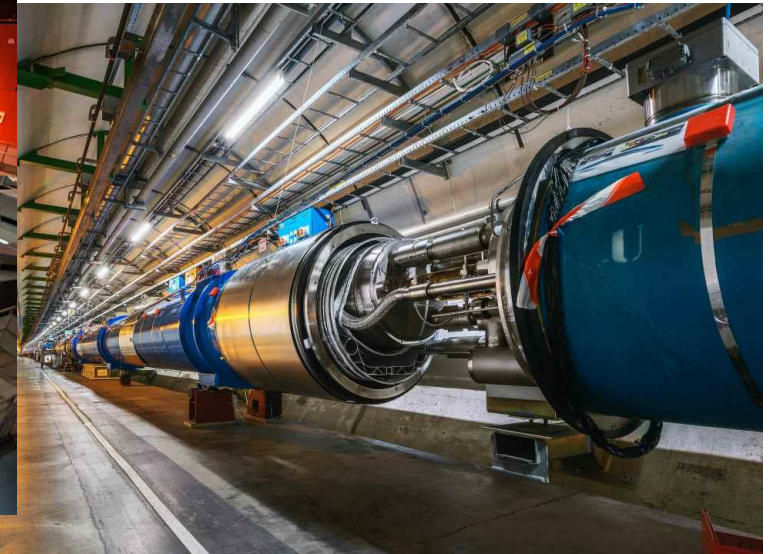


SuperKEKB - Japan

Swiss Light Source - Zurich



LHC - CERN



Τι είναι 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 **πακέτα (bunches)**



Οι δέσμες παράγονται με διάφορους μηχανισμούς, και στην συνέχεια μπορούμε να τις χειριστούμε, όπως:

- να τους αλλάξουμε την **κατεύθυνση**
- να μεγαλώσουμε το μέγεθός τους
 - εγκάρσιο (transverse), ή
 - κατά μήκος της κίνησης – διαμήκες(;) (longitudinal)
- όπως φυσικά και την **κινητική ενέργειά τους**

Γιατί χρειάζονται οι επιταχυντές;

Οι επιταχυντές δημιουργήθηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από το ενδιαφέρον να **μελετήσουμε την δομή του ατόμου.**

Στην συνέχεια άνοιξε ο δρόμος για όλο και μεγαλύτερη ενέργεια για την μελέτη υποατομικών σωματιδίων και την δημιουργία μοντέλου για την ύλη και την γέννηση του σύμπαντος

Παράλληλα και η χρήση επιταχυντών σε διάφορες εφαρμογές είτε για βοήθεια σε άλλα πεδία έρευνας (π.χ. υλικά, βιολογία) είτε σε αυτόνομες εφαρμογές (ακτινοβολία όγκων)

Οι επιταχυντές είναι σήμερα αναπόσπαστο τμήμα πολλών ερευνητικών κέντρων, εργαστηρίων και βιομηχανιών.

Η ιστορία της εξέλιξής τους είναι εντυπωσιακή όπως εντυπωσιακή είναι και η έρευνα που γίνεται σήμερα για την περαιτέρω ανάπτυξή τους

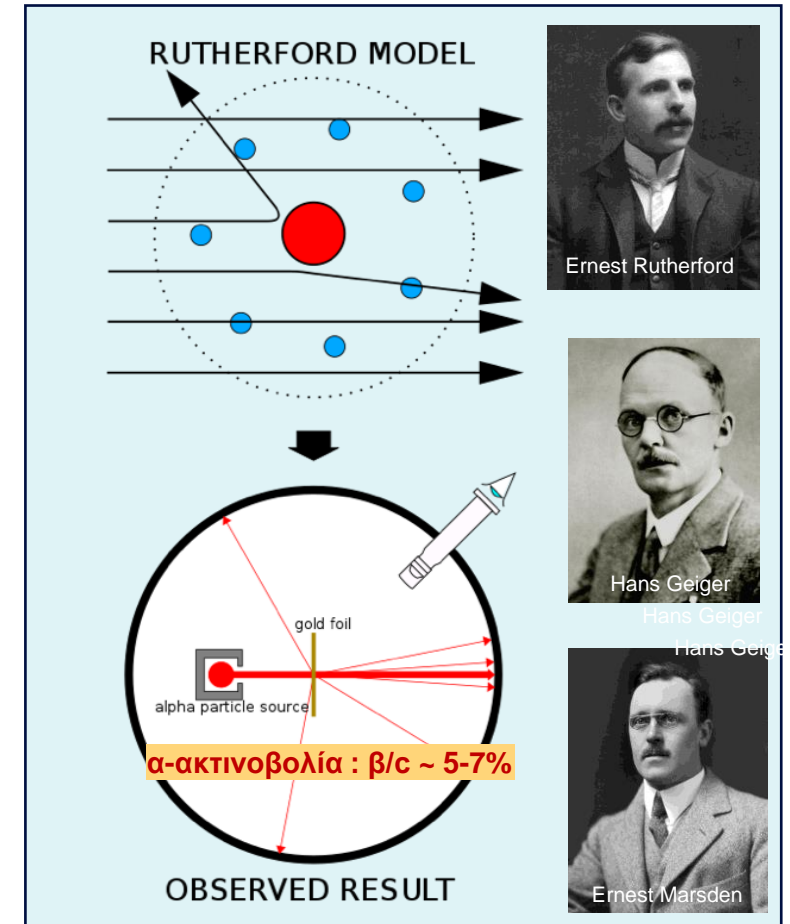
Με την θεμελίωση του ατομικού μοντέλου από τον **Ernest Rutherford** στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με το πείραμα σκέδασης πυρήνων ηλίου (α-σωματίδια) από φύλλα χρυσού (**1911**) γεννήθηκαν πολλά ερωτήματα για την κατανόηση του ατόμου και κυρίως την εξερεύνηση του πυρήνα.

"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 φαινόμενο σήραγγας (tunneling) από το κβαντομηχανικό πηγάδι, και εκτίμησαν ότι ένα σωματίδιο ενέργειας **~500 keV** είναι ικανό να σπάσει τον πυρήνα του ατόμου!

Η ανάγκη για τους πρώτους επιταχυντές γεννήθηκε!



Γιατί χρειάζονται οι επιταχυντές;

Οι επιταχυντές δημιουργήθηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από το ενδιαφέρον να **μελετήσουμε την δομή του ατόμου.**

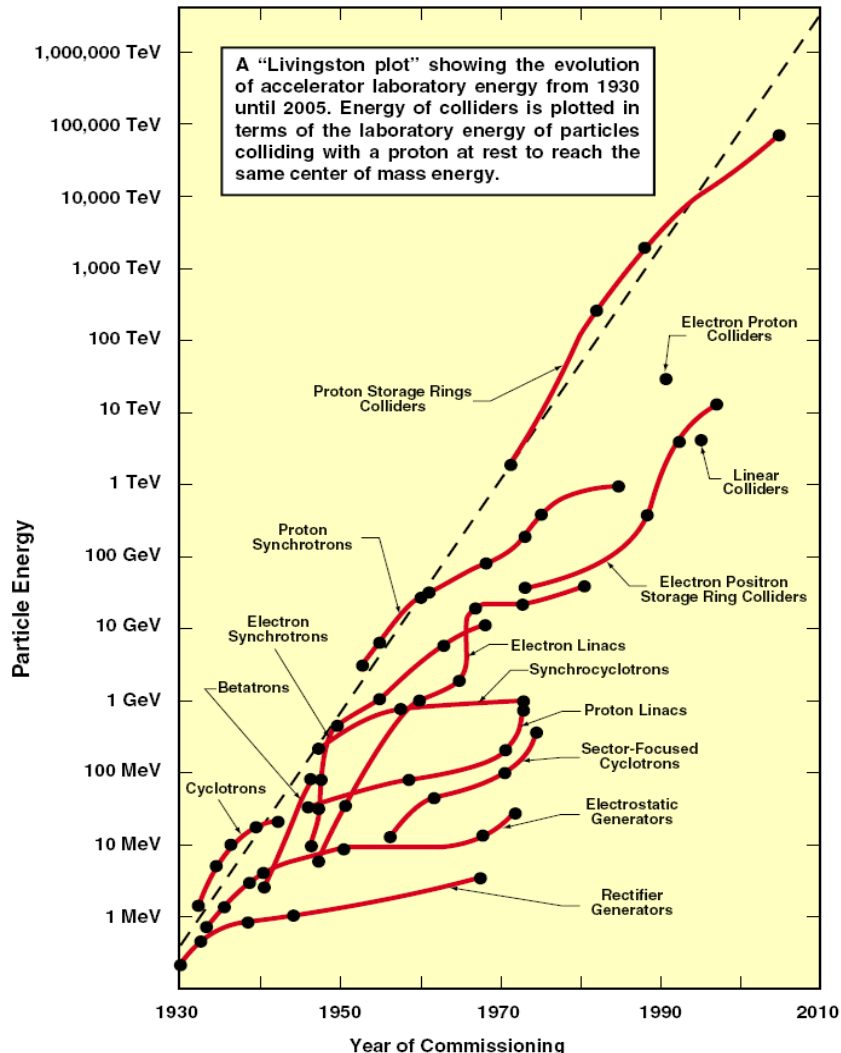
Στην συνέχεια άνοιξε ο δρόμος για όλο και **μεγαλύτερη ενέργεια** για την μελέτη υποατομικών σωματιδίων και την δημιουργία **μοντέλου για την ύλη** και την **γέννηση του σύμπαντος**

Παράλληλα και η χρήση επιταχυντών σε διάφορες εφαρμογές είτε για βοήθεια σε άλλα πεδία έρευνας (π.χ. υλικά, βιολογία) είτε σε αυτόνομες εφαρμογές (ακτινοβολία όγκων)

Οι επιταχυντές είναι σήμερα αναπόσπαστο τμήμα πολλών ερευνητικών κέντρων, εργαστηρίων και βιομηχανιών.

Η ιστορία της εξέλιξής τους είναι εντυπωσιακή όπως εντυπωσιακή είναι και η έρευνα που γίνεται σήμερα για την περαιτέρω ανάπτυξή τους

Το κυνήγι της ενέργειας



- Το **διάγραμμα του Livingston** δείχνει την εξέλιξη των επιταχυντών από τον προηγούμενο αιώνα
- Μέχρι το τέλος του 20^{ου} αιώνα, **σχεδόν κάθε 10 χρόνια η ενέργεια της δέσμης αυξάνεται μια τάξη μεγέθους**
- Η εξέλιξη δεν σταματά στο 2010 του διαγράμματος. Νέες τεχνολογίες εμφανίζονται και αντικαθιστούν ή συμπληρώνουν παλιότερες
- Η ενέργεια δεν είναι ο μόνος παράγοντας. Η **ένταση της δέσμης (ρεύμα)** όπως και το **μέγεθος (διατομή)** είναι επίσης σημαντικοί παράμετροι απόδοσης και στόχοι εξέλιξης των επιταχυντών

Γιατί χρειάζονται οι επιταχυντές;

Οι επιταχυντές δημιουργήθηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από το ενδιαφέρον να **μελετήσουμε την δομή του ατόμου.**

Στην συνέχεια άνοιξε ο δρόμος για όλο και **μεγαλύτερη ενέργεια** για την μελέτη υποατομικών σωματιδίων και την δημιουργία **μοντέλου για την ύλη** και την **γέννηση του σύμπαντος**

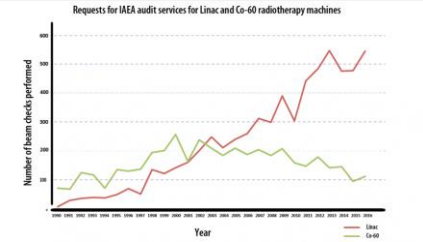
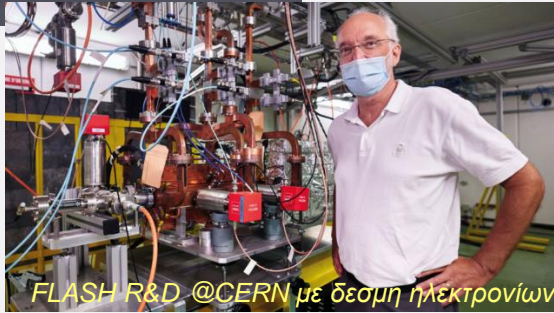
Παράλληλα και η χρήση επιταχυντών σε διάφορες **εφαρμογές** είτε για βοήθεια σε **άλλα πεδία έρευνας** (π.χ. υλικά, βιολογία) είτε σε **αυτόνομες εφαρμογές** (ακτινοβολία όγκων)

Οι επιταχυντές είναι σήμερα αναπόσπαστο τμήμα πολλών ερευνητικών κέντρων, εργαστηρίων και βιομηχανιών.

Η ιστορία της εξέλιξής τους είναι εντυπωσιακή όπως εντυπωσιακή είναι και η έρευνα που γίνεται σήμερα για την περαιτέρω ανάπτυξή τους

Επιταχυντές πέρα από την «φυσική»

Γραμμικοί επιταχυντές δέσμης ηλεκτρονίων για ακτινοβολήση όγκων



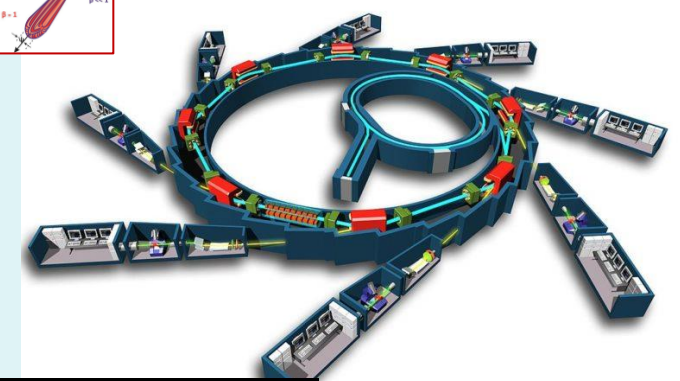
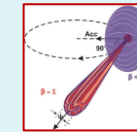
Εφαρμογές από την Βιομηχανία

Μινι-Κύκλοτρο για παραγωγή δέσμης ποζιτρονίων για PET

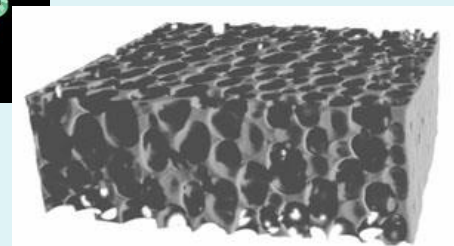


IBA – www.iba-worldwide.com

Επιταχυντές παραγωγής ακτινοβολίας
Synchrotron Light



the structure of the nucleosome core, with the DNA wound round proteins called histones.
(T J Richmond, Zürich.)



Industrial foam viewed by X-ray microtomography using coherent light from a third-generation synchrotron. (ESRF.)

Γιατί χρειάζονται οι επιταχυντές;

Οι επιταχυντές δημιουργήθηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από το ενδιαφέρον να **μελετήσουμε την δομή του ατόμου.**

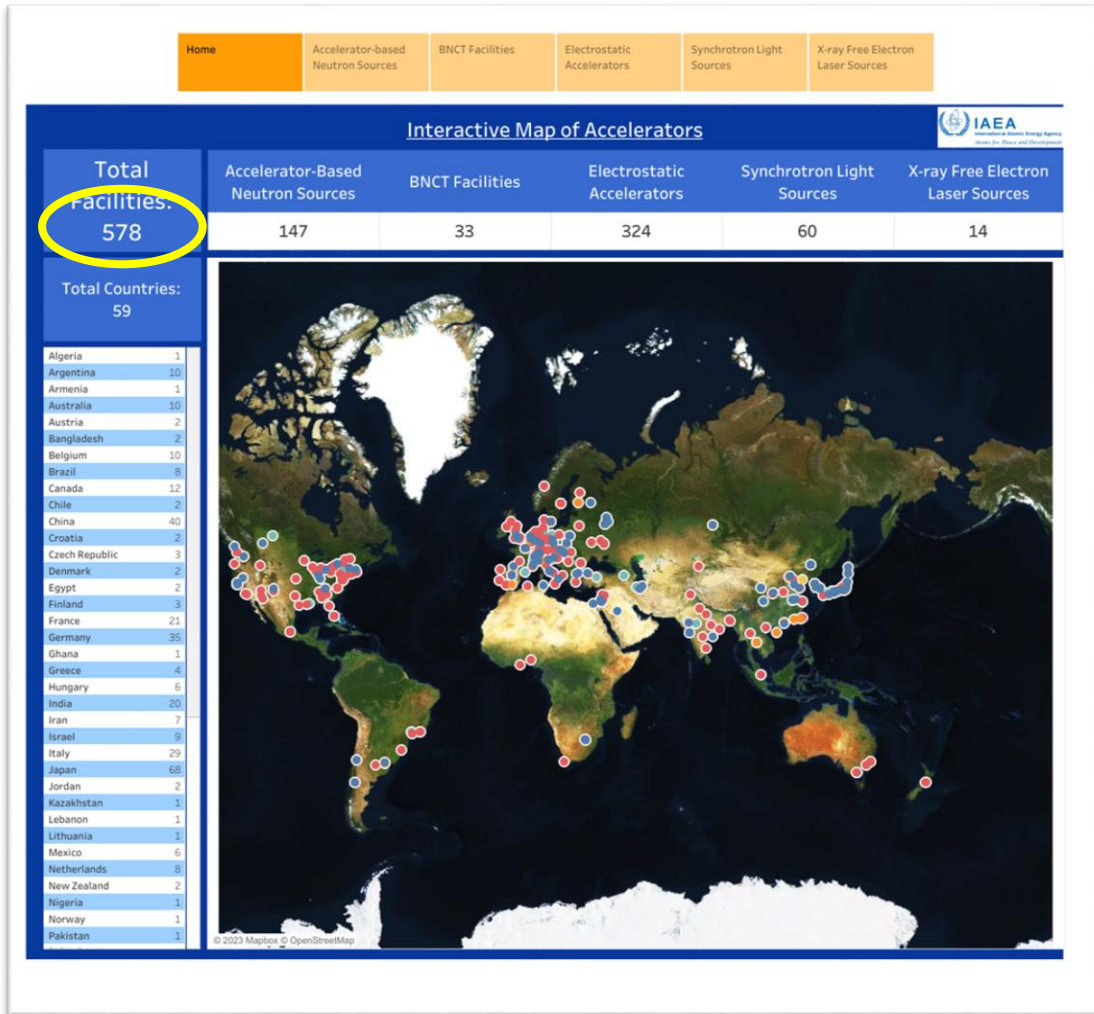
Στην συνέχεια άνοιξε ο δρόμος για όλο και **μεγαλύτερη ενέργεια** για την μελέτη υποατομικών σωματιδίων και την δημιουργία **μοντέλου για την ύλη** και την **γέννηση του σύμπαντος**

Παράλληλα και η χρήση επιταχυντών σε διάφορες **εφαρμογές** είτε για βοήθεια σε **άλλα πεδία έρευνας** (π.χ. υλικά, βιολογία) είτε σε **αυτόνομες εφαρμογές** (ακτινοβολία όγκων)

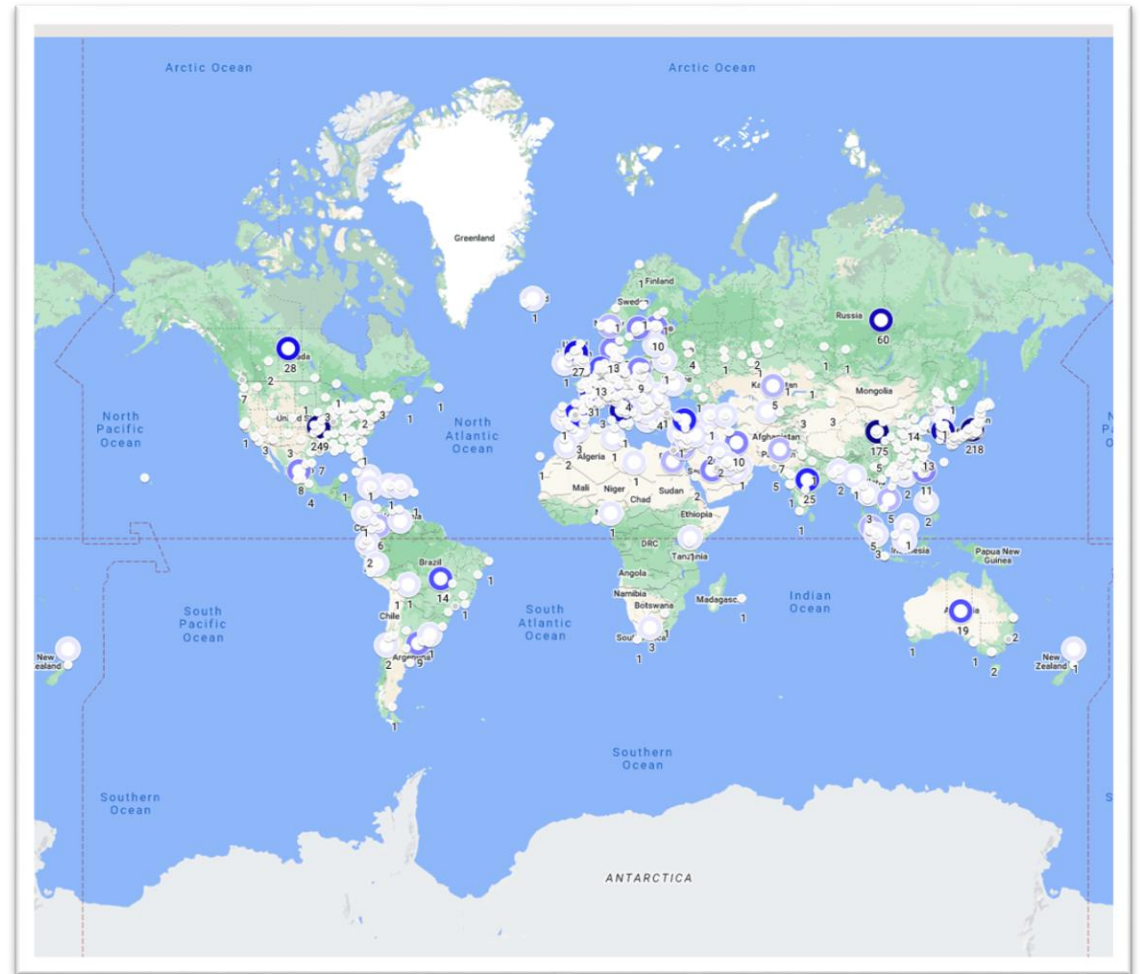
Οι επιταχυντές είναι σήμερα αναπόσπαστο τμήμα πολλών ερευνητικών κέντρων, εργαστηρίων και βιομηχανιών.

Η ιστορία της εξέλιξής τους είναι εντυπωσιακή όπως εντυπωσιακή είναι και η έρευνα που γίνεται σήμερα για την περαιτέρω ανάπτυξή τους

Ερευνητικοί επιταχυντές



Επιταχυντές Κύκλοτρον (Cyclotron) για την παραγωγή ραδιο-ισοτόπων



Copyright © 2023 International Atomic Energy Agency (IAEA).

Γιατί χρειάζονται οι επιταχυντές;

Οι επιταχυντές δημιουργήθηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από το ενδιαφέρον να **μελετήσουμε την δομή του ατόμου.**

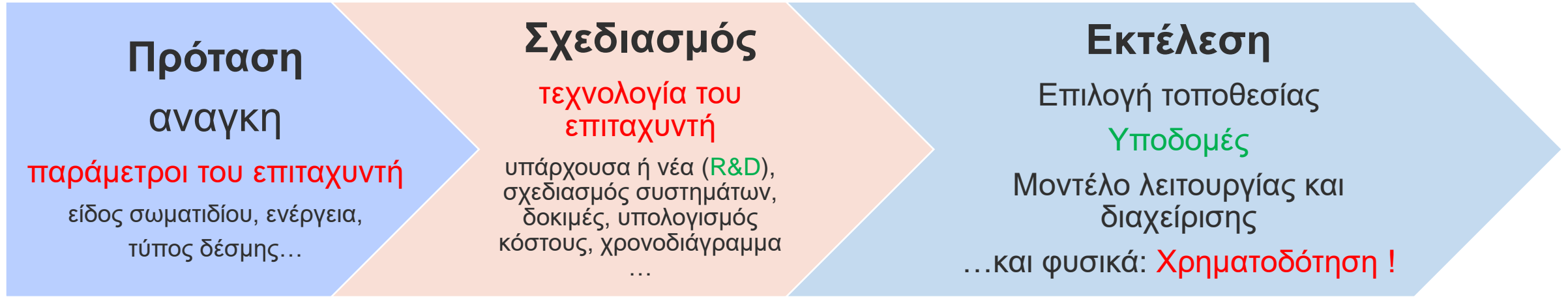
Στην συνέχεια άνοιξε ο δρόμος για όλο και **μεγαλύτερη ενέργεια** για την μελέτη υποατομικών σωματιδίων και την δημιουργία **μοντέλου για την ύλη** και την **γέννηση του σύμπαντος**

Παράλληλα και η χρήση επιταχυντών σε διάφορες **εφαρμογές** είτε για βοήθεια σε **άλλα πεδία έρευνας** (π.χ. υλικά, βιολογία) είτε σε **αυτόνομες εφαρμογές** (ακτινοβολία όγκων)

Οι επιταχυντές είναι σήμερα αναπόσπαστο τμήμα πολλών ερευνητικών κέντρων, εργαστηρίων και βιομηχανιών.

Η ιστορία της εξέλιξής τους είναι εντυπωσιακή όπως εντυπωσιακή είναι και η έρευνα που γίνεται σήμερα για την περαιτέρω ανάπτυξή τους

Τι χρειαζόμαστε για να φτριάξουμε έναν επιταχυντή;

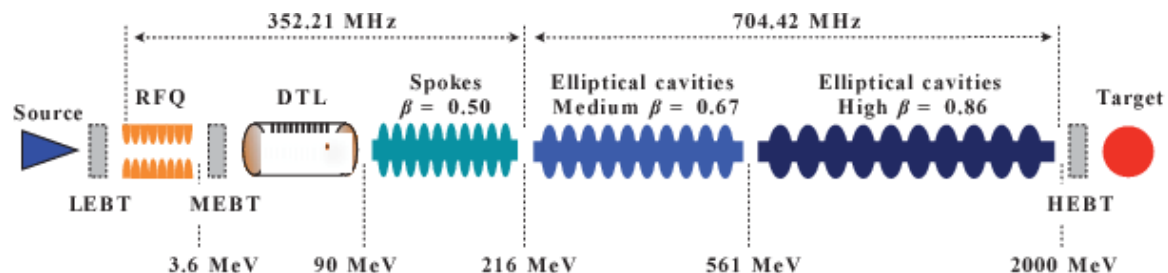


Στοιχεία επιταχυντή:

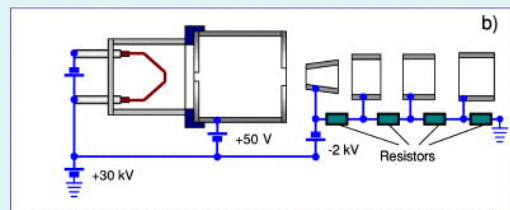
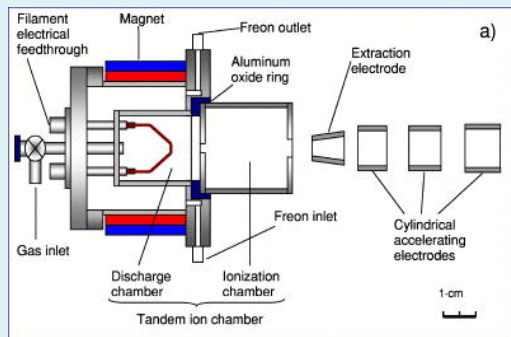
- πηγή δέσμης – **τύπος** σωματιδίων, ποσότητα (ρεύμα, **ένταση δέσμης**), παράμετροι - μέγεθος
- **επιταχυντική διάταξη** – δίνει **ενέργεια** στα σωματίδια της δέσμης
- συστήματα για την **καθοδήγηση της δέσμης** – ορισμός τροχιάς σωματιδίων (διπολα) , **οπτική** της δέσμης (διαμόρφωση μεγέθους $\{x, y, l, t\}$ με τετράπολα, εξάπολα, οκτόπολα...),
- συστήματα για την **παρατήρηση της δέσμης** – μετρήσεις παραμέτρων

Τύποι επιταχυντών

Γραμμικός επιταχυντής (LINAC): τα στοιχεία τοποθετούνται διαδοχικά στην σειρά



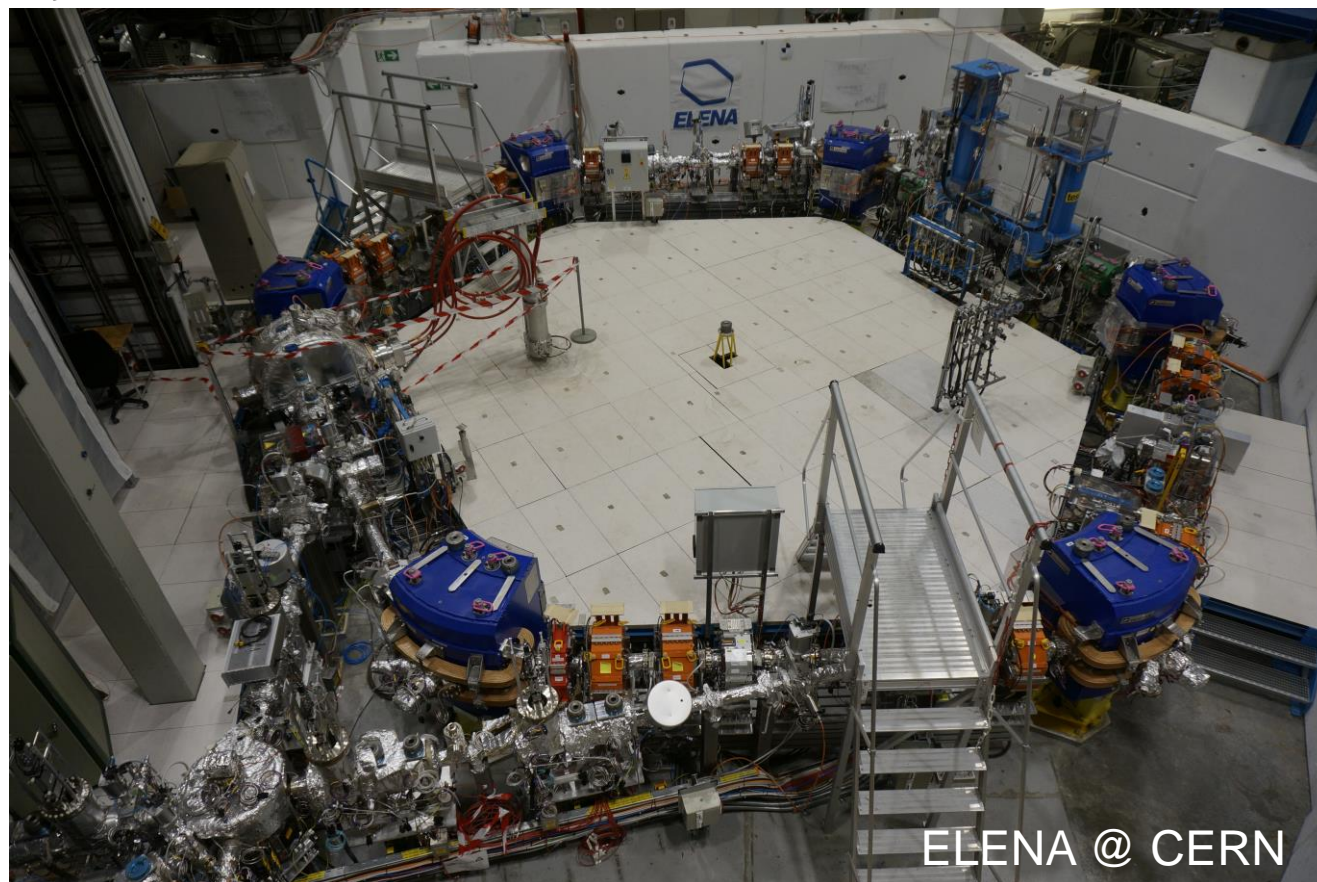
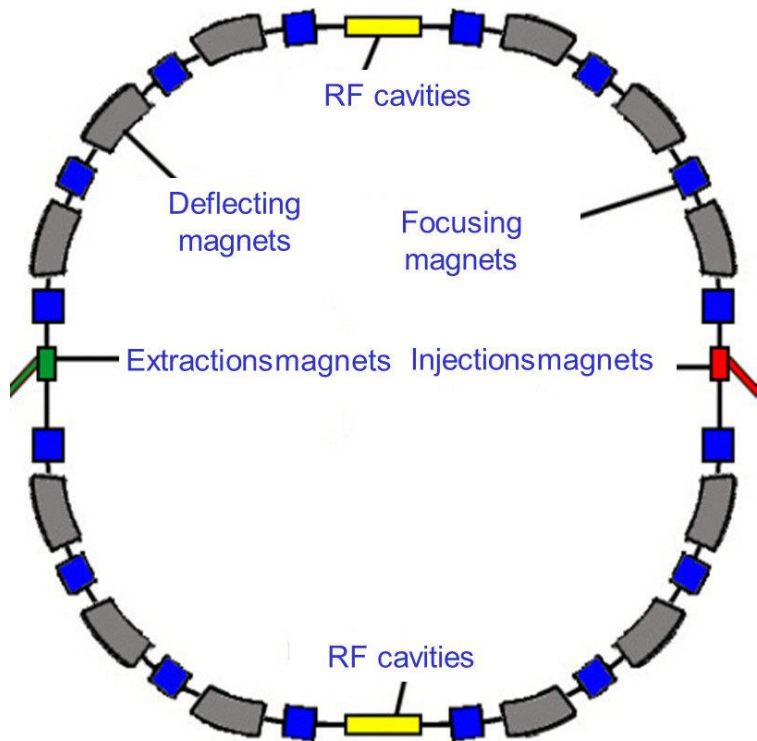
Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης της πηγής της δέσμης



Τύποι επιταχυντών

Κυκλικός επιταχυντής – Synchrotron

τα στοιχεία τοποθετούνται σε κύκλο, επαναλαμβανόμενα μέρη (cells)
η δέσμη(ες) έρχεται εξωτερικά (συνήθως από μια εξωτερική πηγή η LINAC) και είτε μένει μέσα (Collider) είτε
Βγαίνει έξω για άλλο επιταχυντή ή πείραμα

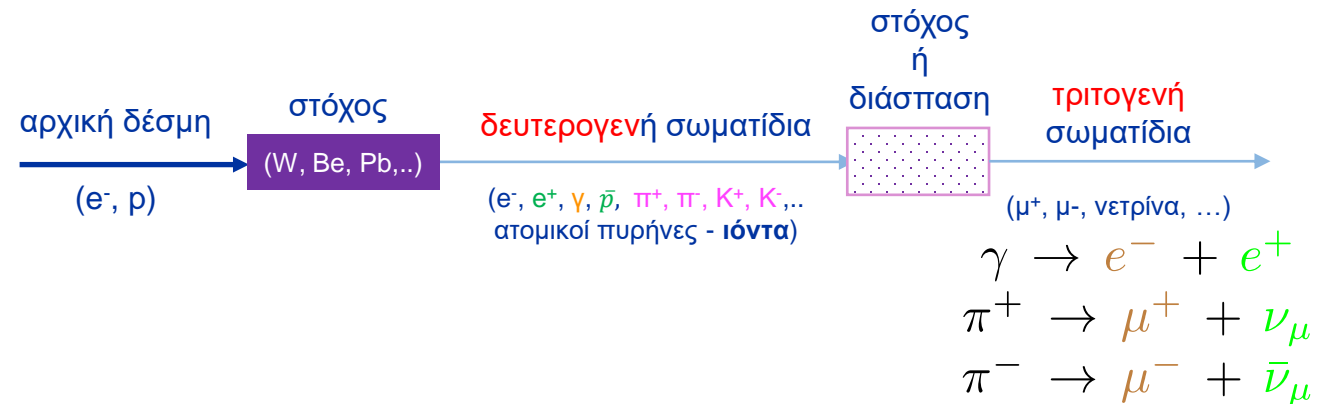
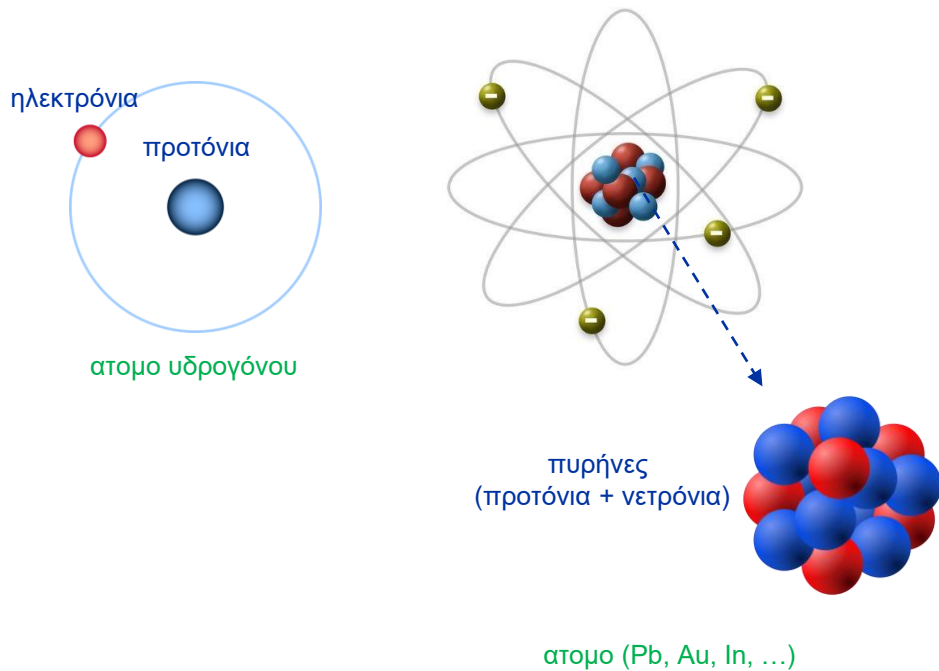


Ποια σωματίδια χρησιμοποιούμε;

Μόνο **φορτισμένα σωματίδια** μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους επιταχυντές.

Συνήθως χρησιμοποιούμε σωματίδια που *βρίσκουμε εύκολα*, όπως τα βασικά συστατικά του ατόμου:
ηλεκτρόνια, πρωτόνια ή ολόκληροι **πυρήνες**.

αλλά και σωματίδια που παράγουμε με μια αρχική δέσμη:



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 παραγόμενης δέσμης μειώνεται κατά έναν παράγοντα $\sim 10,0000$ σε σχέση με το αρχικό!

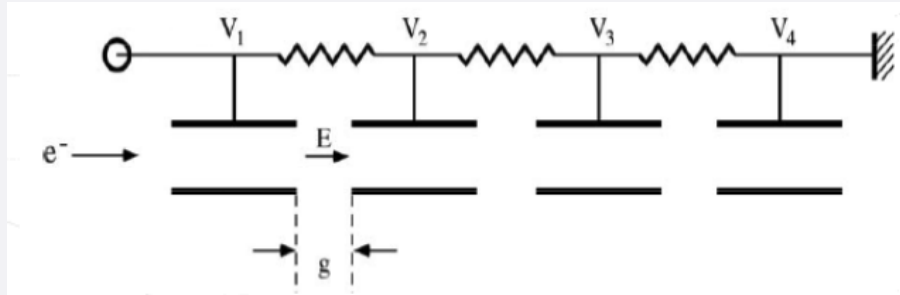
Πως παίρνουν ενέργεια τα σωματίδια;

Η βασική «ιστορική» μέθοδος αύξησης της ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων είναι μέσω της αλληλεπίδρασης με ένα ηλεκτρικό (ηλεκτρομαγνητικό) πεδίο.

Ένα φορτισμένο σωματίδιο σε ένα ηλεκτρικό πεδίο παίρνει κινητική ενέργεια

$$\Delta W = q \cdot \Delta V$$

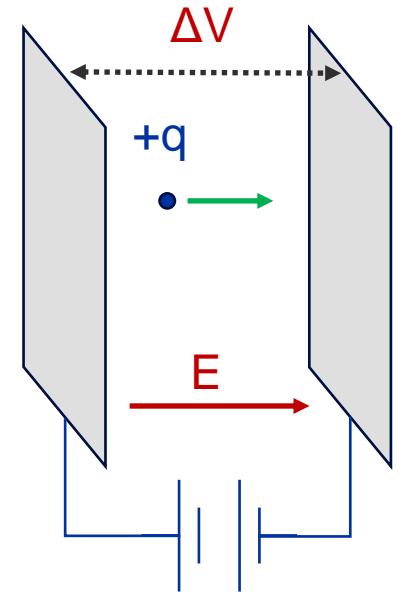
Πρώτοι επιταχυντές : **επιταχυντές σταθερού δυναμικού (DC)**



Η **πρόκληση**: να δημιουργήσουμε μεγάλη και σταθερή διαφορά δυναμικού.

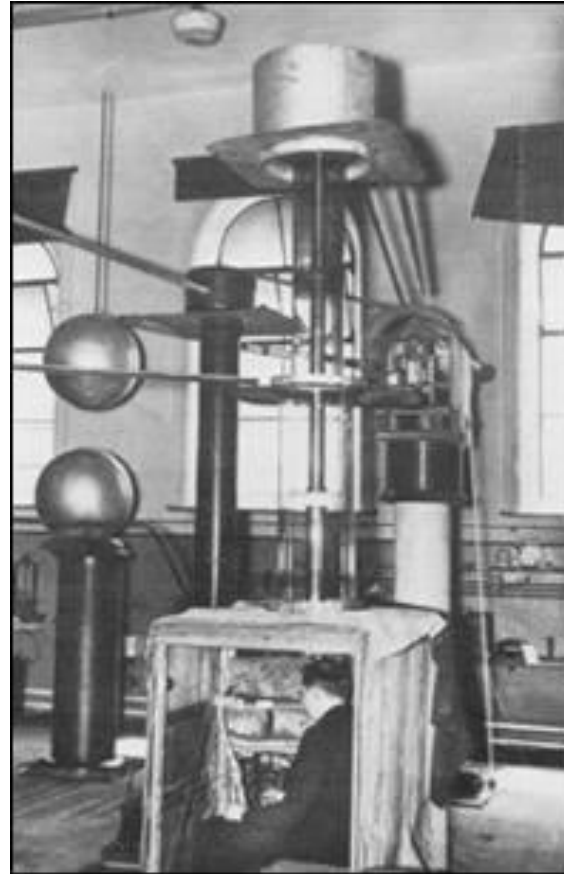
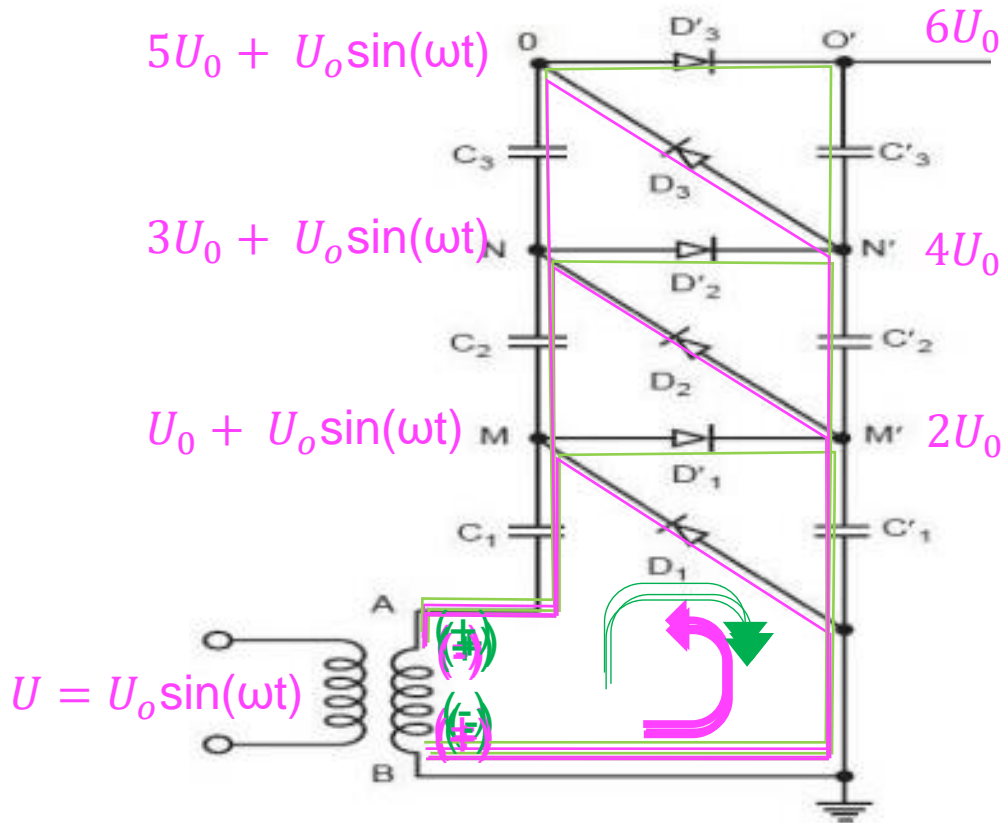
Το **όριο**: τάση εκκένωσης (breakdown voltage), π.χ. 3×10^6 V/m στον αέρα.

όριο ενέργειες ~MeV (~GeV για ιοντα)

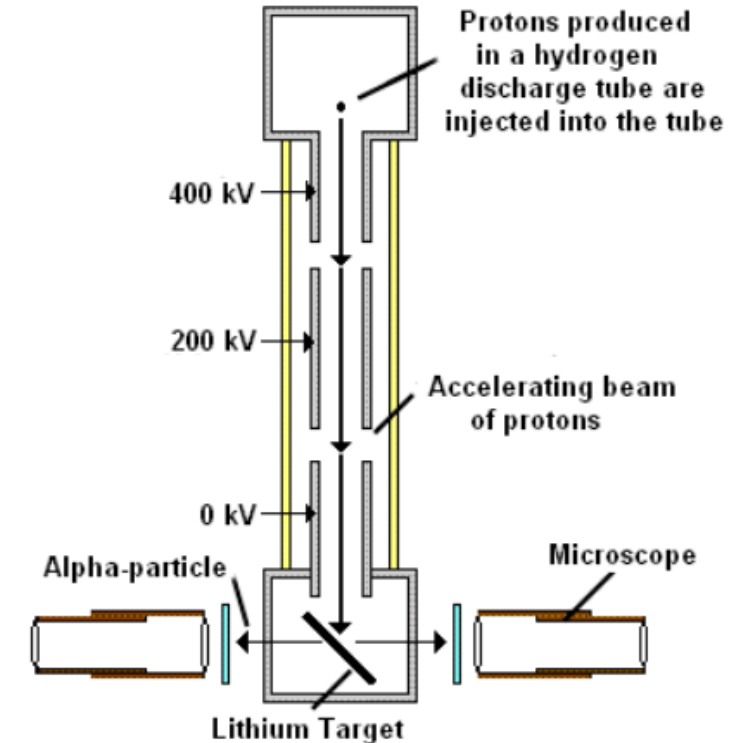
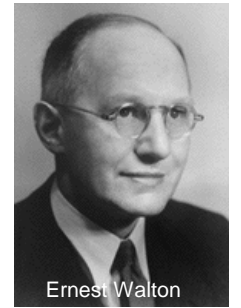


Επιταχυντής Cockroft – Walton (1932)

Κύκλωμα πολλαπλασιασμού τάσης Greinacker (1914)



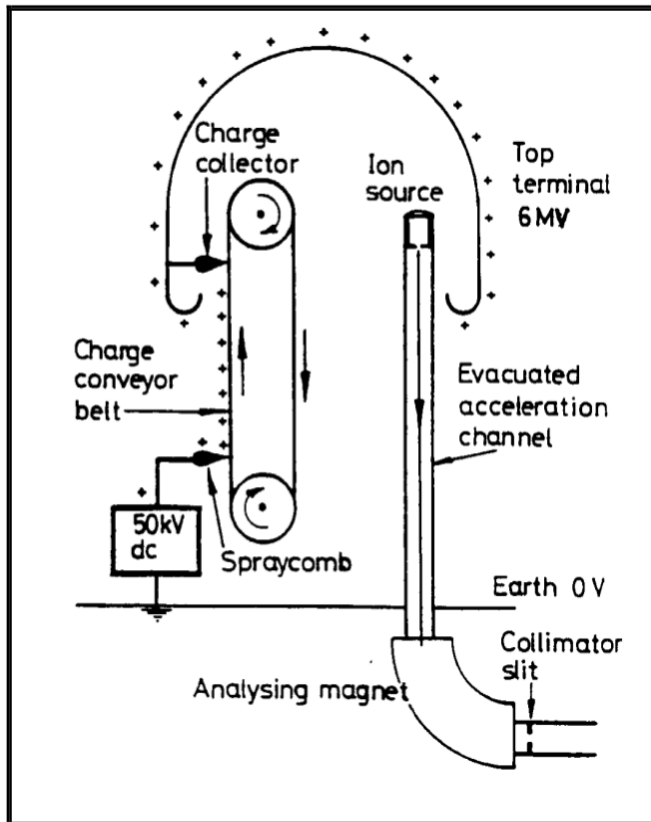
Walton and the machine used to "split the atom"



Πείραμα διάσπασης ατόμου Λιθίου
Βραβείο Νομπέλ 1951

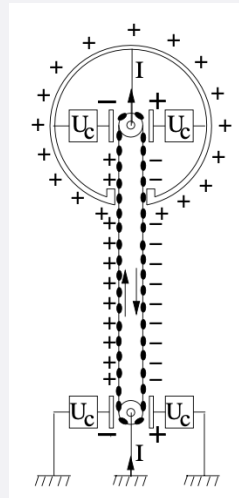
Επιταχυντής (Γεννήτρια) Van de Graaff (1929)

Φορτία από μια πηγή «χαμηλού» δυναμικού μεταφέρονται συνεχώς με μονωτικό ιμάντα σε θόλο, φορτιζοντάς τον. Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί υψηλό δυναμικό που χρησιμοποιείται στην συνέχεια για την επιτάχυνση της δέσμης, κυρίως αρνητικά φορισμένων **Ιόντων**

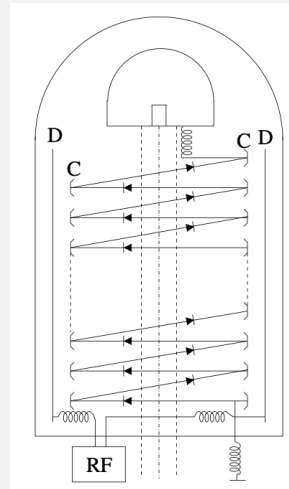


Περικλείοντας τα ηλεκτρόδια σε χώρο με αέριο (dry Nitrogen, ή Freon) και με τη χρήση υψηλής πίεσης 9-10Bar δυναμικά >10MV μπορούν να επιτευχθούν.

Παραλλαγές



Pelletron - Ladderton



Dynamitron



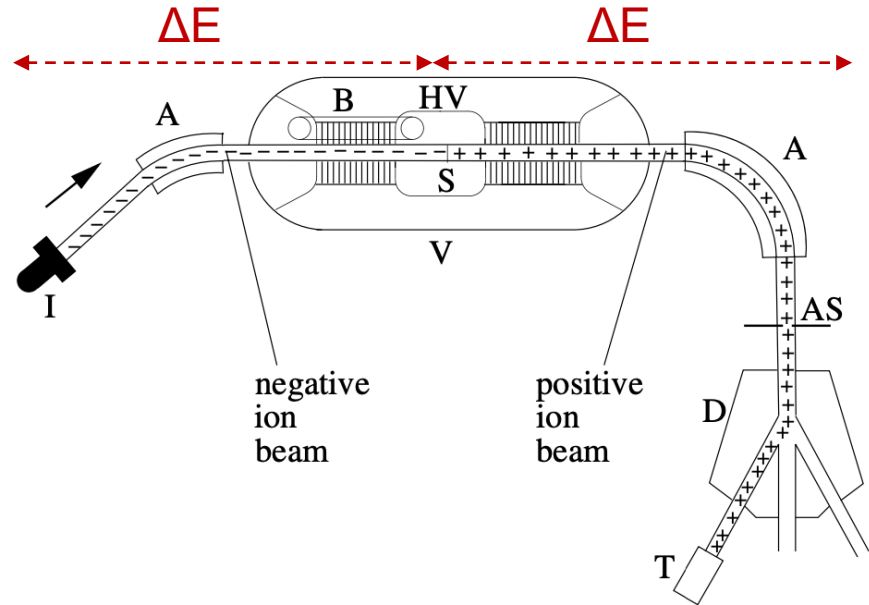
Robert J. Van der Graaff



Daresbury Lab – UK **20MV** 1983-1992

Επιταχυντής Tandem - Van de Graaff

Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημοκριτος – Tandem 5MV

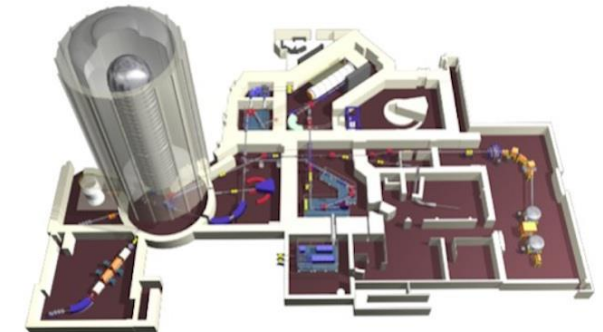


Διπλή διάταξη Van der Graaff με το υψηλό δυναμικό (HV) στην μέση της συσκευής.

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



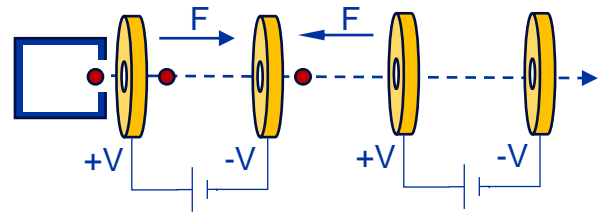
Holifield Facility

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

Όμως πως θα ξεπεράσουμε το όριο του MeV;

Ιδέα: αν τοποθετούσαμε πολλά στατικά πεδία το ένα μετά το άλλο;

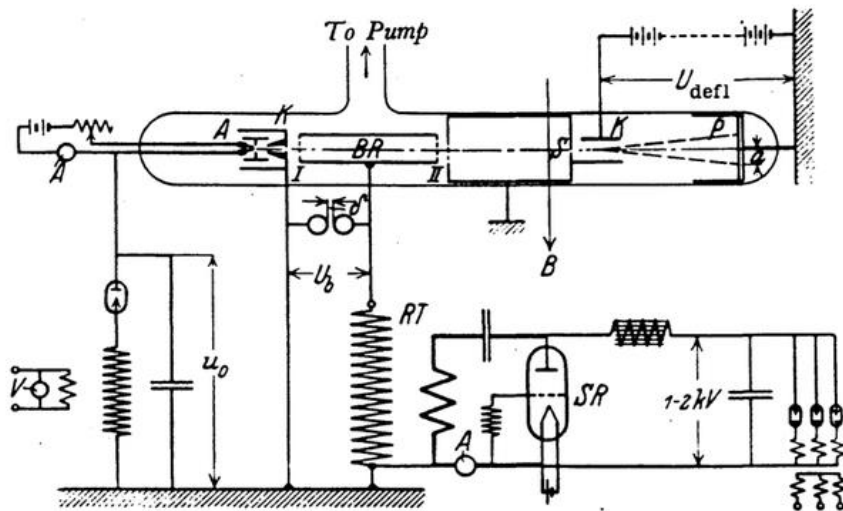
Αν απλά βάζαμε πολλά στατικά πεδία το ένα μετά το άλλο τότε δεν θα κερδίζαμε ενέργεια!



Αυτό γιατί το φορτίο (δέσμη) θα έβλεπε αρχικά την σωστή πολικότητα και θα κέρδιζε ενέργεια, αλλά στο επόμενο θα έβλεπε το αντίθετο δυναμικό άρα θα την έδινε πίσω!

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

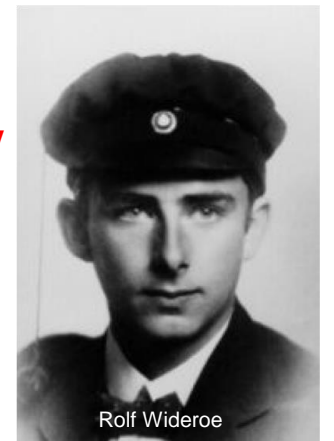
Rolf Widerøe (1928) – διάταξη με δύο αγωγίμους κυλίνδρους, 25 kV, 1 MHz συχνότητα αλλαγής **συντονισμένη με τα σωματίδια**



Ο πρώτος **γραμμικός επιταχυντής** !

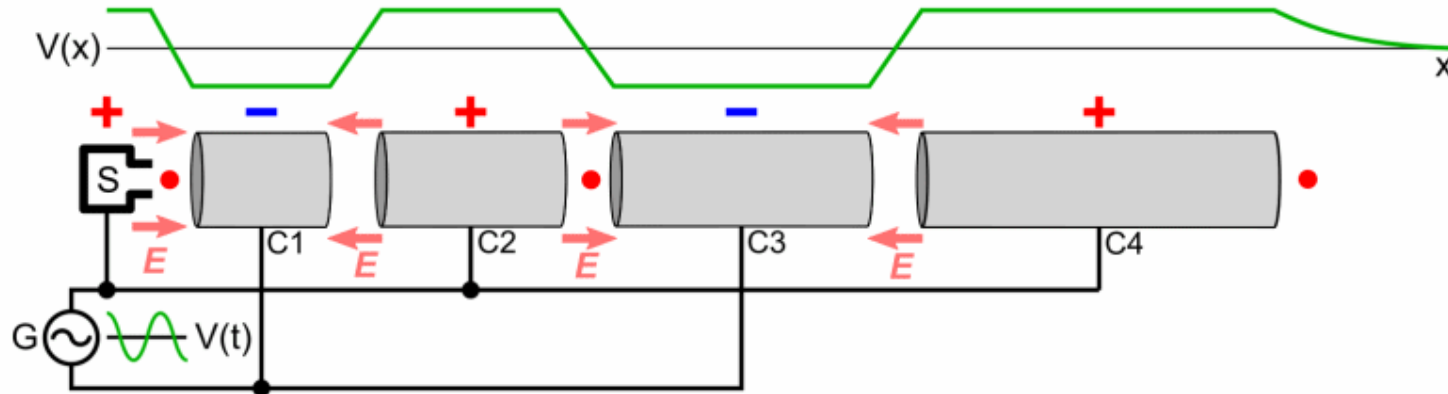
Κατάφερε να επιταχύνει ιόντα Καλίου (K) στα **53 keV**

Η αρχή της **συντονισμένης επιτάχυνσης (resonant acceleration)** παραμένει αναλλοίωτη και χρησιμοποιείται σήμερα σε όλους τους επιταχυντές υψηλής ενέργειας



Τι είναι ένας γραμμικός επιταχυντής;

Γραμμικοί επιταχυντές (1/3)

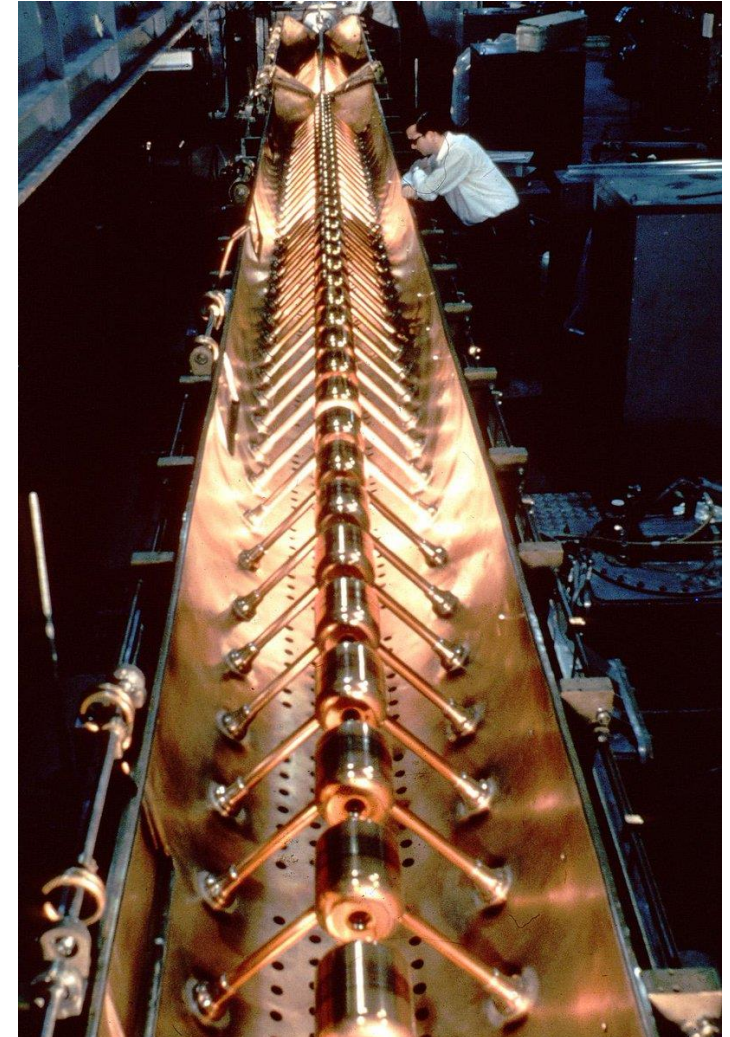


Διαταξη με μια σειρά από αγωγίμους κύλινδρους (συνήθως αμαλγάματα χαλκού) (**drift tubes DT**) συνδεδεμένους με εναλλασσόμενο τροφοδοτικό τάσης υψηλής συχνότητας (RF)

Τα σωματίδια της πηγής επιταχύνονται στα κενά μεταξύ κυλίνδρων που είναι πάντα στην σωστή πολικότητα

Μέσα στους κυλίνδρους το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν (νόμος του Gauss – κλωβός Faraday), τα σωματίδια προχωρούν με την ταχύτητά τους

Για σταθερή συχνότητα, καθώς τα σωματίδια κινούνται με αυξανόμενη ενέργεια/ταχύτητα, το μήκος του κάθε σωλήνα θα πρέπει να μεγαλώνει έως το σχετικιστικό όριο



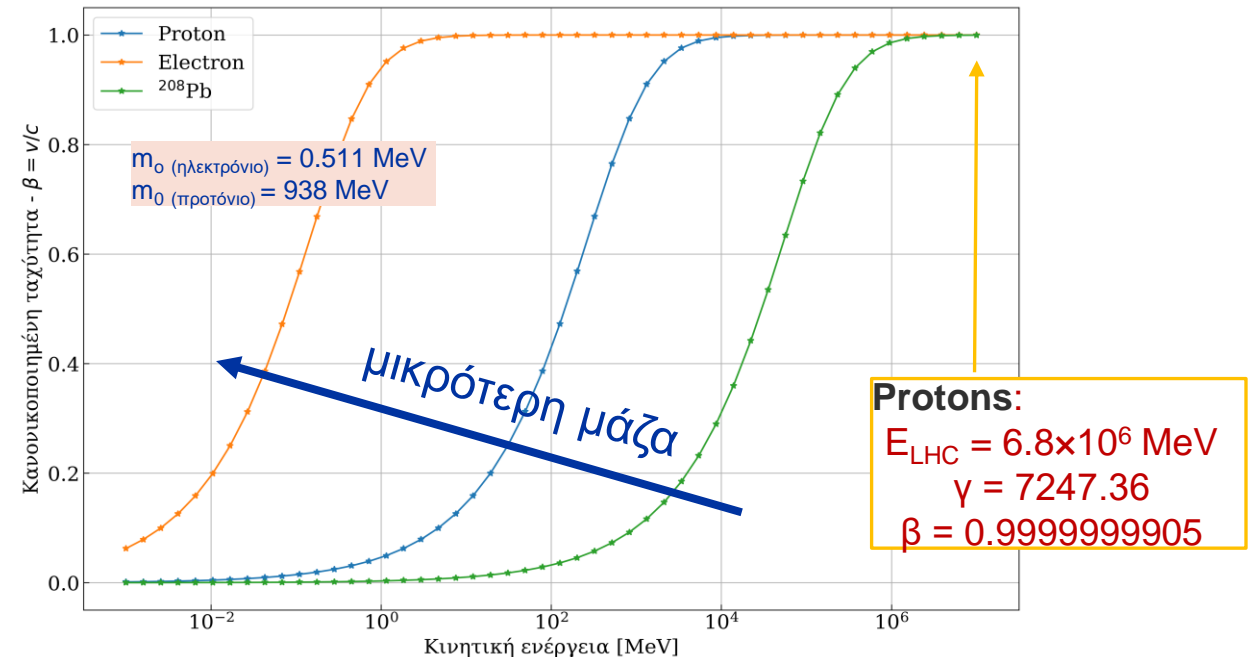
CERN DT Linac 1

Επιτάχυνση σημαίνει αύξηση ταχύτητας;

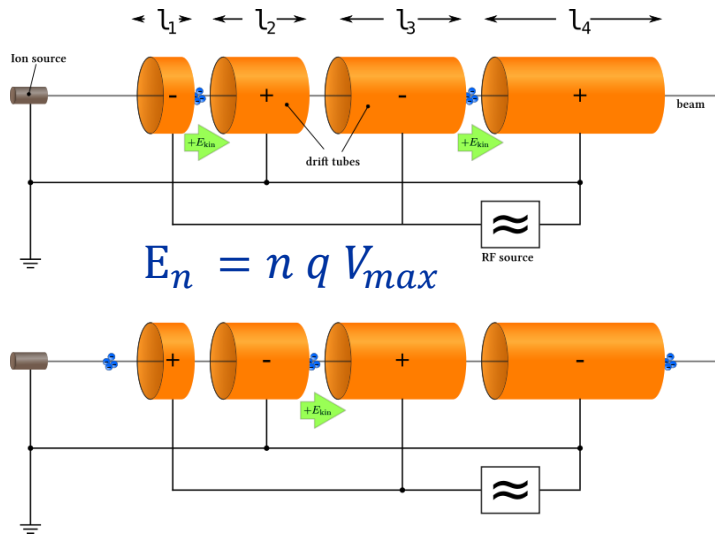
Αρχικά ναι, αλλά μέχρις ένα όριο – αυτό της ταχύτητας του φωτός!

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 μάζα τους, σύμφωνα με τις εξισώσεις της σχετικότητας του Αϊνστάιν.

$$\begin{aligned} E &= T + m_0 c^2 \\ &= m c^2 \\ &= m_0 \gamma c^2 \end{aligned} \quad \beta = \frac{v}{c}$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$



Γραμμικοί επιταχυντές (2/3)



Για να έχουμε το ηλεκτρικό πεδίο σύγχρονο με τα σωματίδια θα πρέπει το μήκος του κάθε κυλίνδρου να είναι:

$$t_n = \frac{l_n}{v_n} = \frac{T_{RF}}{2} \Rightarrow l_n = \frac{1}{2} v_n T_{RF} = \frac{1}{2} \beta_n c T_{RF}$$

$$l_n = \frac{1}{2} \beta_n \lambda_{RF} \quad (1)$$

Ενέργεια επιτάχυνσης ανα μήκος ή βαθμίδα επιτάχυνσης (accelerating gradient)

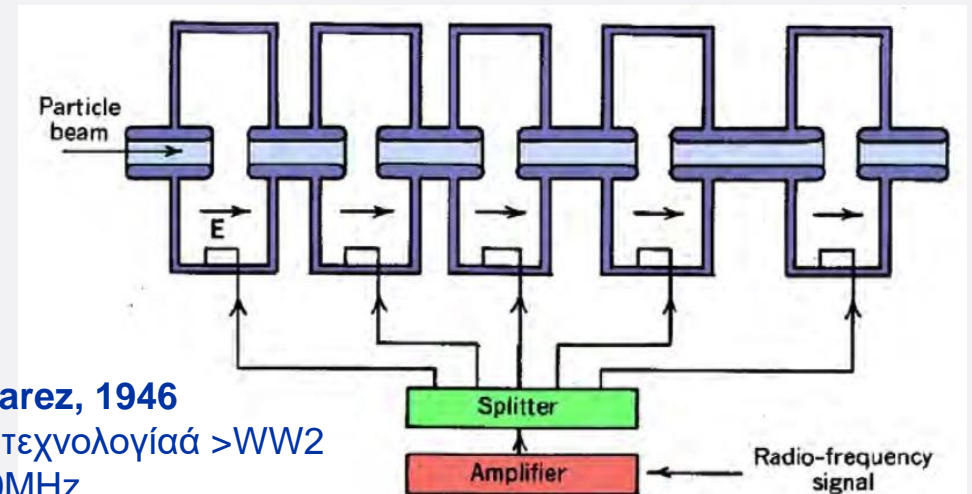
$$\frac{\Delta E}{\Delta l} = \frac{qV_{max}}{l_n} = \frac{2qV_{max}}{\beta_n \lambda_{RF}} \quad (2)$$

- από την (1) : για υψηλές ενέργειες χρειάζεται πολύ μικρό λ_{RF} αλλά για σχετικιστικά σωματίδια το μήκος του κύλινδρου γίνεται πολύ μεγάλο, επίσης από κάποιο μήκος και πάνω οι κύλινδροι δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν ισοδυναμικοί - οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται πιο πολύπλοκες - 20MeV protons $\rightarrow L \sim 3m!$.

Η βασική σχεδίαση του Wideroe δύσκολα εφαρμόζεται για υψηλές ενέργειες!

- από την(2) : η βαθμίδα επιτάχυνσης αυξάνει για μικρότερο λ_{RF} δηλαδή χρειαζόμαστε **υψηλές συχνότητες**, στις αρχές το 20^{ου} αιώνα ήταν δύσκολη τεχνολογία, σήμερα υπάρχουν λύσεις αλλά όχι εύκολο.
- οι κύλινδροι σε υψηλές συχνότητες χάνουν ενέργεια λόγω ακτινοβολίας (αντένες)!
- τέλος η χρήση εναλλασσόμενου δυναμικού συνεπάγεται μη-συνεχεις δέσμες: **bunched beams**

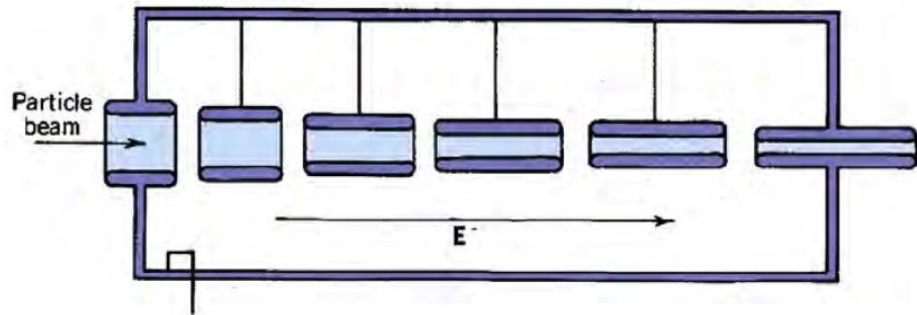
Η λύση είναι να κλείσουμε το σύστημα των κυλίνδρων σε έναν αγωγό δημιουργώντας **κοιλότητες (cavities)**



Alvarez, 1946
RF τεχνολογία >WW2
200MHz

Γραμμικοί επιταχυντές (3/3)

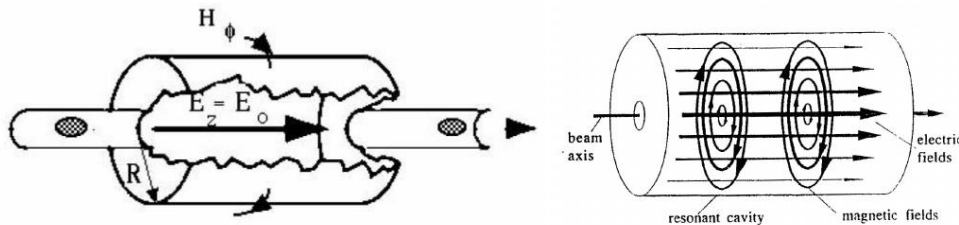
Κοιλότητες επιτάχυνσης – RF Cavities



Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια δημιουργείται από RF τροφοδοτικά ισχύος και αποθηκεύεται στην κοιλότητα με μικρές απώλειες.

Η κάθε κοιλότητα μπορεί να συνδεθεί ανεξάρτητα στην γεννήτρια RF

απλούστερη γεωμετρία: **κυλινδρικό κουτί (pill box cavities)**



Η κοιλότητα είναι ισοδύναμη με ένα LC κύκλωμα – η γεωμετρία της κοιλότητας δίνει στην βασική ταλάντωση ένα **ηλεκτρικό πεδίο συγκεντρωμένο στο κέντρο** κατά μήκος της κίνησης της δέσμης (E_z), και ένα αζιμουθιακό **μαγνητικό πεδίο (B_ϕ)** προς την εξωτερική επιφάνεια

Το ηλεκτρικό πεδίο δίνει επιτάχυνση στην δέσμη, ενώ το μαγνητικό πεδίο οδηγεί σε θερμικές απώλειες (joule) στα τοιχώματα της κοιλότητας



CERN Linac 4 Alvarez structure

352MHz frequency, διαμετρος 500mm, 3 resonators (tanks), 19m, 120 drift tubes

Ενέργεια: 3 MeV – 50 MeV $\beta=0.08 - 0.31$

Και αν έβλεπα διαφορετικά την διάταξη του Wilderoe?



N κύλινδροι σε γραμμική διάταξη \Rightarrow επιτάχυνση $\times N$

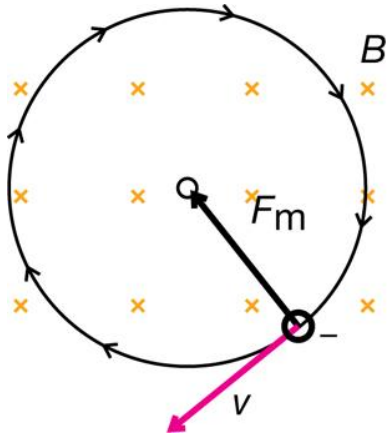


μια διάταξη \times περνάμε πολλές (N) φορές?

κυκλική διάταξη!

Το κύκλοτρο – Cyclotron (1/3)

Κίνηση φορτισμένου σωματιδίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο



$$F_m = q v \times B$$

$$F_m = \frac{m v_\theta^2}{R}$$

$$q v_\theta B_z = \frac{m v_\theta^2}{R}$$

$$\omega_0 = v_\theta / R$$

E. Lawrence : “R cancels R”!

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

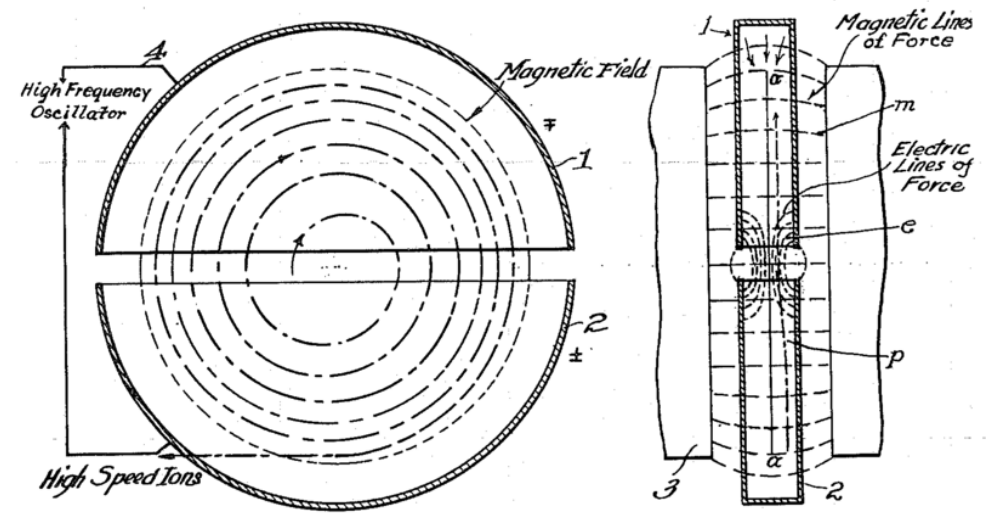
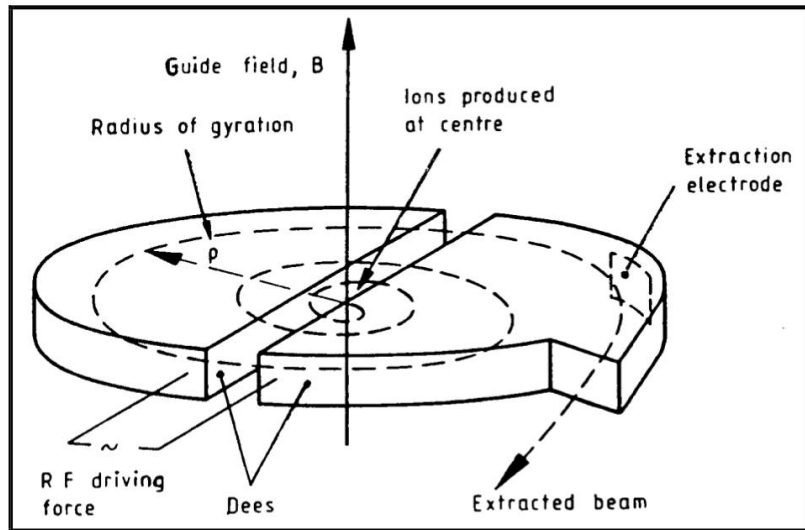
$$R = m v_\theta / q B_z$$

Για σταθερό φορτίο, μάζα, και ομογενές πεδίο B, η γωνιακή ταχύτητα του σωματιδίου είναι σταθερή, και η ακτίνα μεγαλώνει με την ταχύτητα

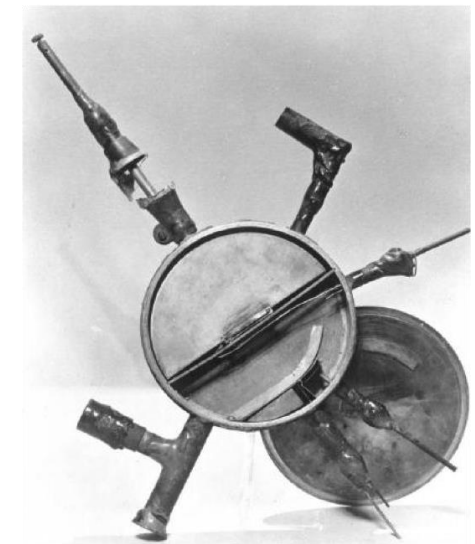
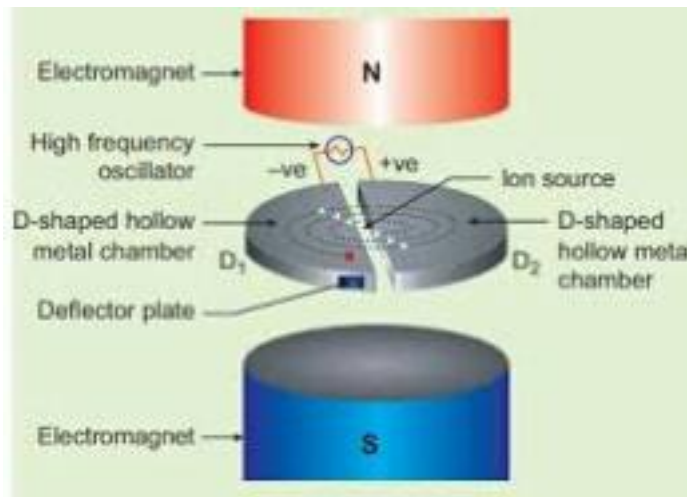


Ernest Lawrence
The Times magazine – November 1, 1937 Nobel Prize

Το κύκλοτρο – Cyclotron (2/3)

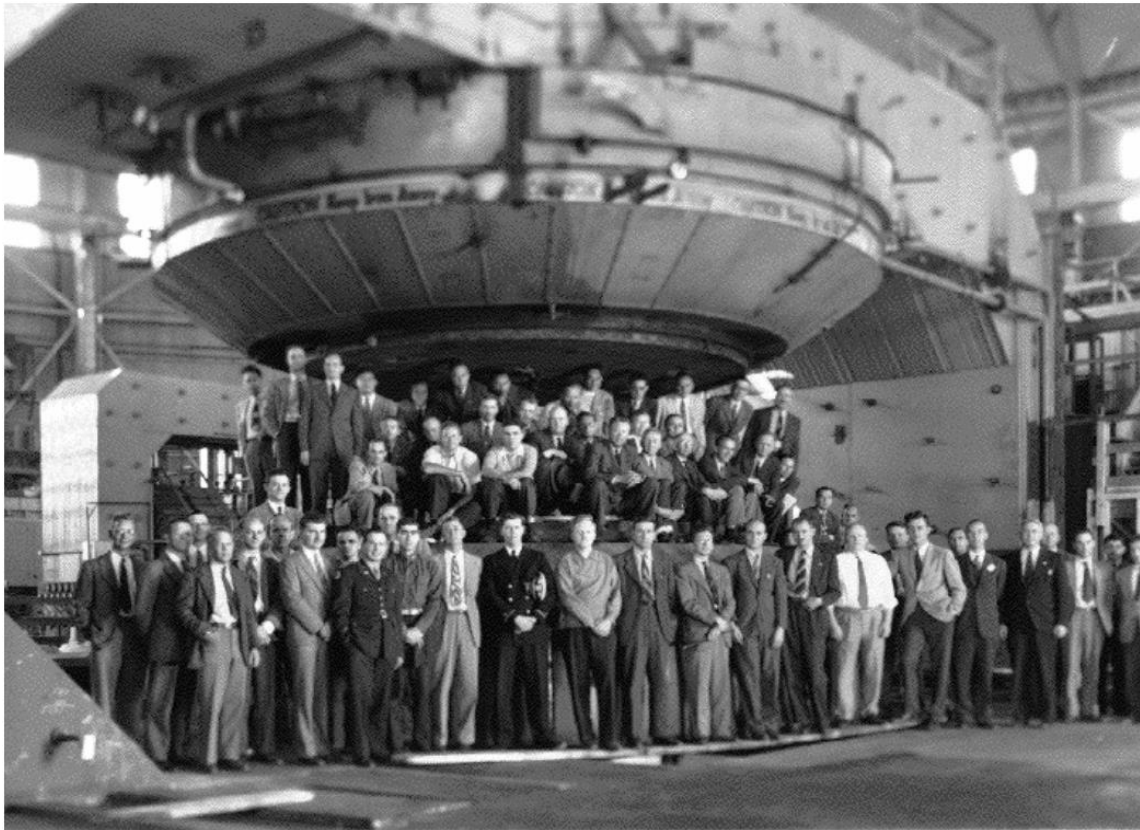


The cyclotron, E. Lawrence – πατέντα 1934



Το πρώτο κυκλοτρο (4")

Το κύκλοτρο – Cyclotron (3/3)



184” κύκλοτρο: 467cm διαμέτρος – Berkeley
1942

Η ιδέα του E.Lawrence ήταν υπέροχη αλλά είχε μια αβλεψία!

Για μεγάλες ενέργειες η σχετικότητα αρχίζει να παίζει ρόλο και η συχνότητα του κύκλοτρο **πρέπει να μειώνεται** $\omega_{RF} \propto \frac{1}{\gamma}$
Mc.Millan & Veksler (1945)

Κρατώντας σταθερή την συχνότητα χάνουμε τα σωματίδια στην τελική τροχιά!

Επίσης η συχνότητα θα πρέπει να είναι διαφορετική ανάλογα με το είδος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται



TRIUMF 520 MeV cyclotron

Vancouver - Canada



CERN 600 MeV synchrocyclotron

Synchrocyclotron : ίδιο με το cyclotron αλλά λαμβάνοντας υπόψιν την αλλαγή της συχνότητας λόγω της σχετικότητας

$$\omega_s(t) = \omega_{RF}(t) = \frac{q B}{m_0 \gamma(t)}$$

Σημείωση: το $\gamma(t)$ είναι διαφορετικό για τα αρχικά (κέντρο του cyclotron) και τελικά σωματίδια! ποιο να διαλέξουμε; \rightarrow απώλειες δέσμης. Κερδίσαμε σε ενέργεια αλλά χάσαμε σε ένταση της δέσμης.

Το κυνήγι για περισσότερη ενέργεια ενθουσιάζει!

Ποια άλλα βήματα για χρειάστηκαν για να φτάσουμε στους σημερινούς
επιταχυντές?

To Betatron – Donald William Kerst (1940)

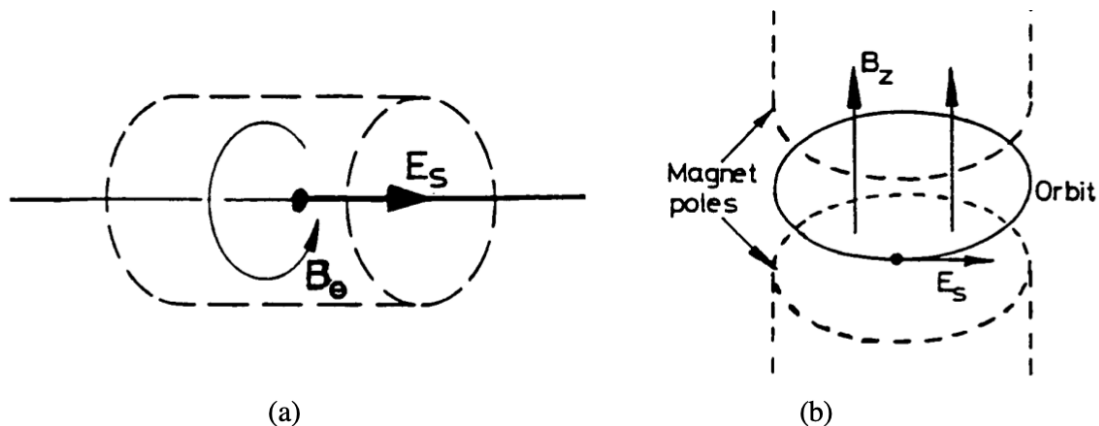


Fig. 6 Acceleration configurations

Νομος του Faraday

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

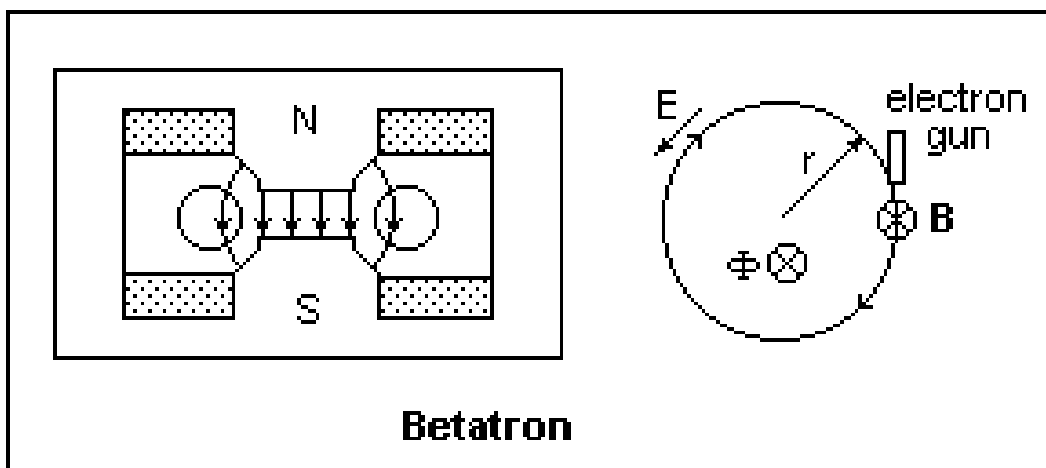


© D. Kerst στο πρώτο betatron – Univ. Illinois 1940

Τα σωματίδια της δέσμης επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου είναι συντονισμένη με την αύξηση της ενέργειας κάνοντας τα σωματίδια να ακολουθούν την ίδια τροχιά, ακόμη και για μεγάλες ενέργειες – σχετικιστικά σωματίδια (ηλεκτρόνια)

Διαφοροποιήσεις στο μαγνητικό πεδίο στην περιοχή που κινείται η δέσμη, κάνουν την τροχιά να αλλάζει – **betatron ταλαντώσεις**

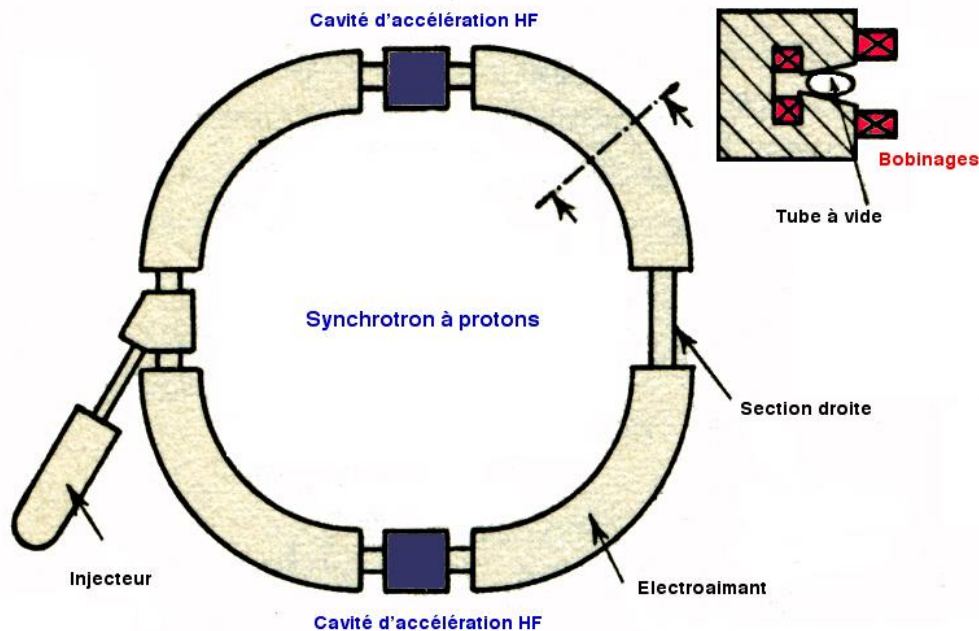


Ρεκορ - 300 MeV (1950)

Το Συγχροτρο – Synchrotron (1/4)

“Particles should be constrained to move in a circle of constant radius thus enabling the use of an annular ring of magnetic field ... which would be varied in such a way that the radius of curvature remains constant as the particles gain energy through successive accelerations” - Marcus Oliphant, 1943

Αντικατάστησε τους μεγάλους μαγνήτες με μια σειρά από μικρούς σε ένα δαχτυλίδι + εστίαση φάσης



Στα κυκλικά τόξα του επιταχυντή έχουμε κίνηση σε ομογενές μαγνητικό πεδίο οπότε:

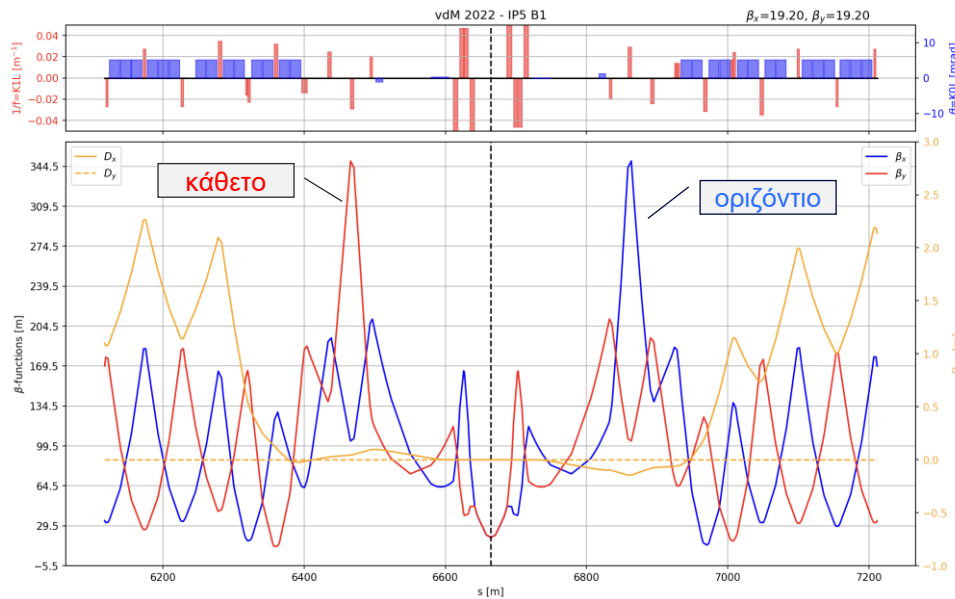
$$F_{arc} = m \frac{v^2}{r} = qvB \implies \frac{1}{r} = \frac{qB}{p}$$

$$\frac{1}{r} [m^{-1}] \approx 0.3 \frac{B [T]}{p [\frac{GeV}{c}]} \quad \text{ή} \quad p [GeV/c] \approx 0.3 B [T] r [m]$$

Οι μαγνήτες ορίζουν μια **τροχιά αναφοράς** στον επιταχυντή

Το Συγχροτρο – Synchrotron (2/4)

Ισχυρή εστίαση – Christophilos (1950) & Courant, Livingston and Snyder (1953)



Τα σωματίδια της δέσμης έχουν γενικά μια απόκλιση (divergence) στο εγκάρσιο επίπεδο. Με την περιστροφή στον επιταχυντή θα τείνουν να φύγουν και τελικά να χτυπήσουν τους πόλους των μαγνητών.

Με την μέθοδο της **ισχυρής εστίασης (strong focusing)** ο επιταχυντής έχει μια σειρά από τετράπολα που εστιάζουν την δέσμη διαδοχικά στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο, πετυχαίνοντας συνολικά μια καθαρή εστίαση κρατώντας το μέγεθος της δέσμης μικρό

Τα σωματίδια κάνουν κατά την περιστροφή μικρές ευσταθείς τροχιές εκτελώντας μικρές βητατρονικές ταλαντώσεις γύρω από την κεντρική τροχιά

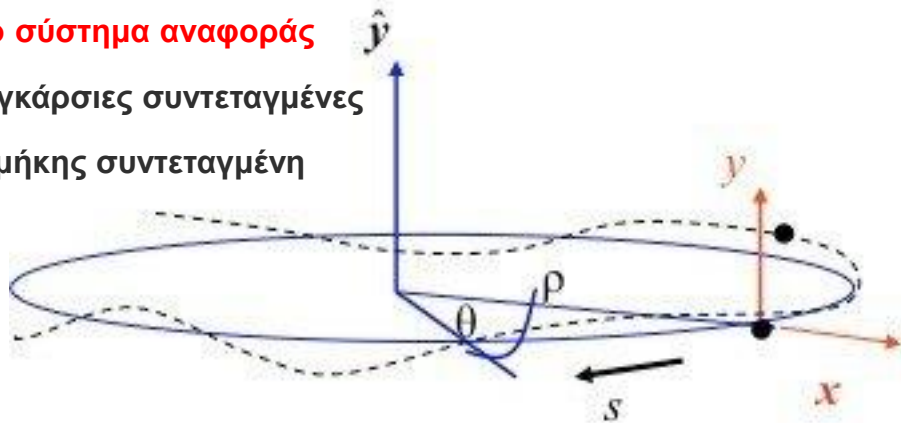
διαμόρφωση πλάτους δέσμης ανά μήκος στον LHC

Το Συγχροτρο – Synchrotron (3/4)

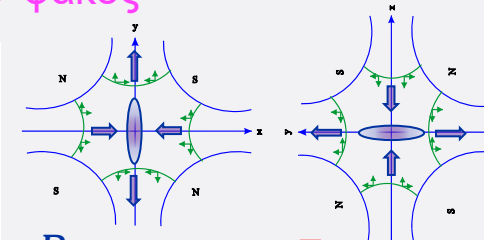
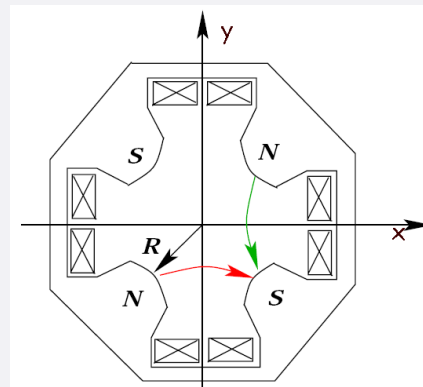
η κίνηση των σωματιδίων στον επιταχυντή

Κινούμενο σύστημα αναφοράς

- $\{x, y\}$: εγκάρσιες συντεταγμένες
- $\{s\}$: διαμήκης συντεταγμένη



Μαγνητικό τετράπολο \Leftrightarrow φακός



$$B_x = -gy \quad F_y = -qvgy$$

$$B_y = -gx \quad F_x = -qv gx$$

- Εστίαση στο ένα επίπεδο
- Αποκλίση στο άλλο

Εγκάρσια κίνηση : πέρασμα από αλληλουχία μαγνητικών στοιχείων – ισχυρή εστίαση

Η σχέση $F_x = kx$ παραπέμπει σε αρμονικό ταλαντωτή

$$x'' - \left(k - \frac{1}{\rho^2}\right)x = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{p_0} x$$

$$y'' + ky = 0$$

$$k = eg / p$$

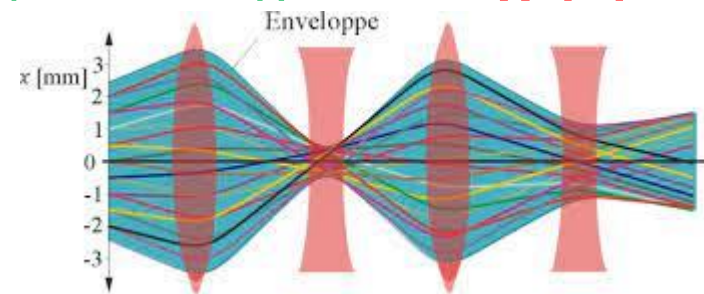
$$x'' + Kx = 0$$

\Downarrow

$$x(s) = A \sin(\sqrt{K}s + \varphi_0)$$

$$x(s) = \sqrt{\epsilon \beta_x(s)} \sin(\varphi(s) + \varphi_0)$$

πλάτος ταλάντωσης – ϵ είναι η emittance της δέσμης, $\beta(s)$ η «beta function» της δέσμης

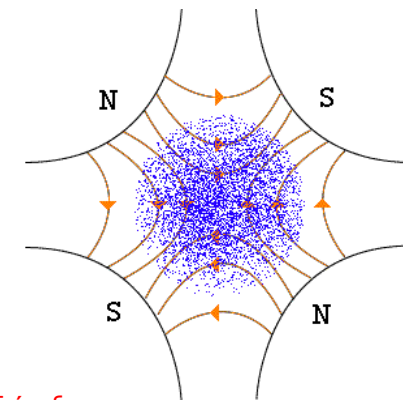


Εγκάρσιο μέγεθος της δέσμης:

$$E(s) = \sqrt{\epsilon \beta(s)}$$

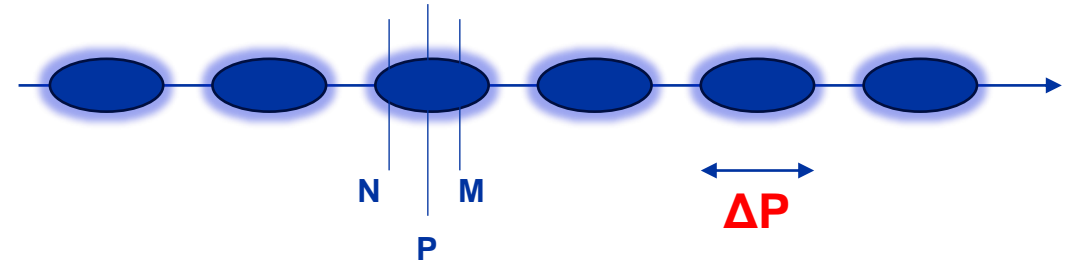
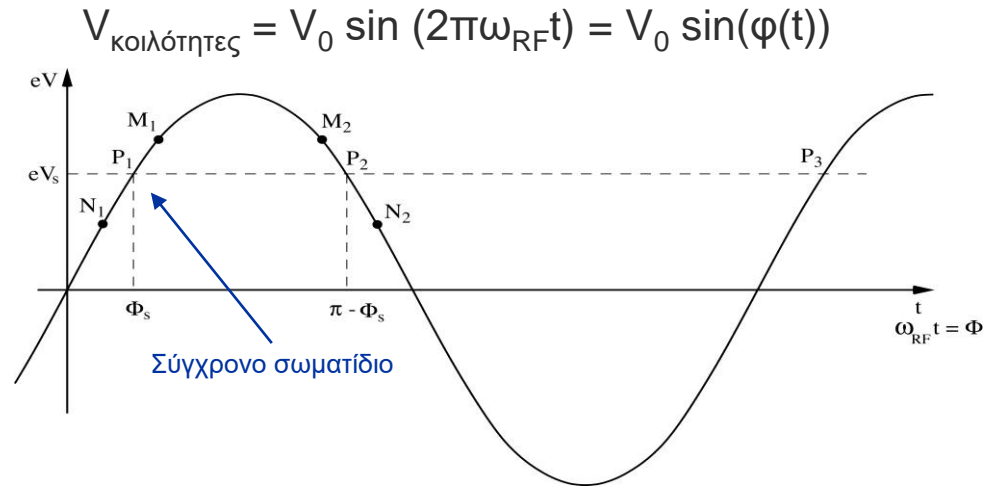
χαρακτηριστικό της δέσμης (παραγωγή, επιτάχυνση)

χαρακτηριστικό της διάταξης (οπτική)



Το Συγχροτρο – Synchrotron (4/4)

Διαμήκης κίνηση – εστίαση φάσης (phase stability)



Η συχνότητα της επιταχυντικής κοιλότητας ρυθμίζεται ώστε το κέντρο του πακέτου (bunch) της δέσμης (**P**) να έχει φάση $0 < \varphi_0 < \pi/2$ (ή $\pi/2 < \varphi_0 < \pi$) για να επιταχυνθεί.

Ένα σωματίδιο **M**₁ που φτάνει αργότερα θα δει μεγαλύτερο δυναμικό θα πάρει παραπάνω ενέργεια, άρα στην επόμενη περιστροφή θα έρθει αργότερα και θα πλησιάσει το **P**

Ένα σωματίδιο που θα έρθει νωρίτερα **N**₁ θα δει μικρότερο δυναμικό και θα πάρει λιγότερη ενέργεια, άρα στην επόμενη περιστροφή θα έρθει αργότερα, δηλαδή θα πλησιάσει το **P**

Με αυτή την τεχνική τα σωματίδια επιτυγχάνεται μια εστίαση και τα σωματίδια κρατιόνται στα **πακέτα RF**

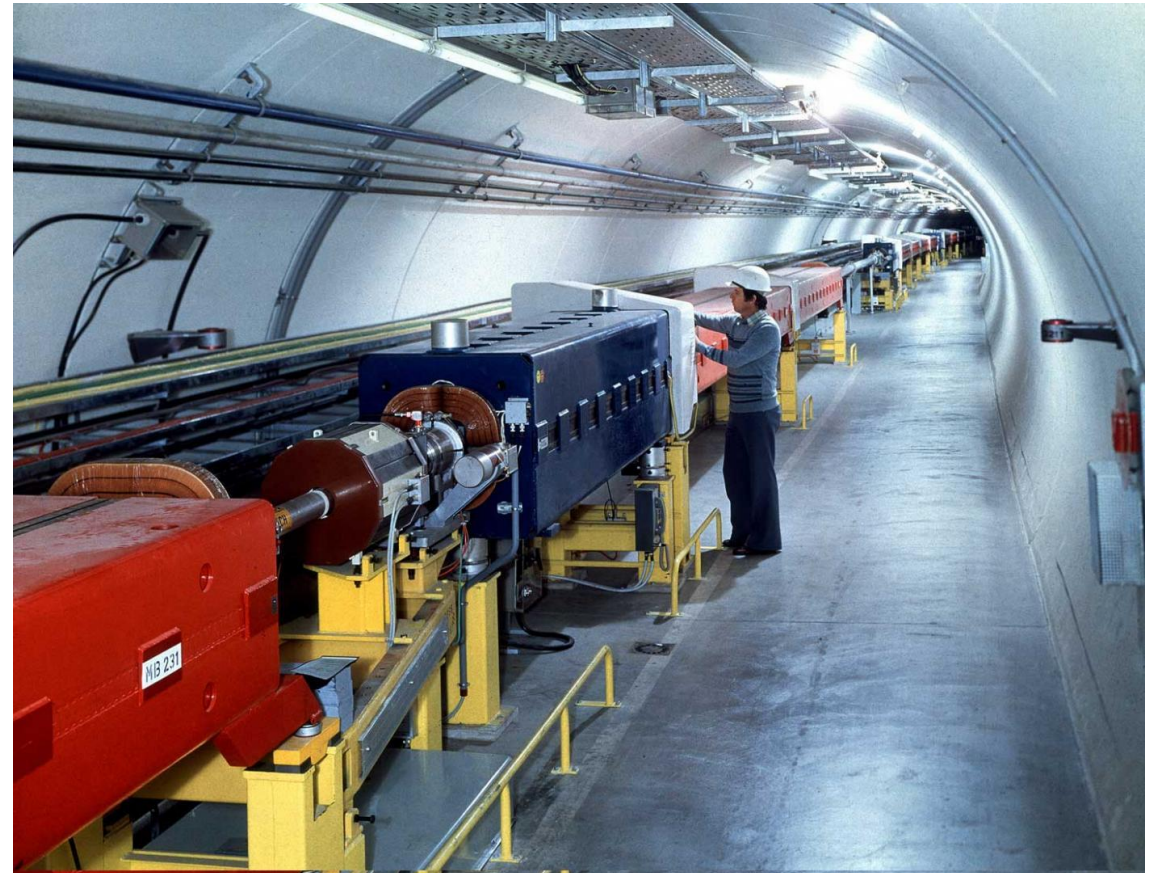
Μερικά παραδείγματα

Η πλειονότητα των επιταχυντών υψηλής ενέργειας σήμερα είναι Συγχροτρα

Proton Synchrotron (PS) @ CERN



Super Proton Synchrotron (SPS) @ CERN



Ανακεφαλαίωση 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	ευσταθείς ταλαντώσεις , αλλά περιορισμός λόγω όγκου
Σύγχροτρο	μεταβλητή	μεταβλητό	σταθερή	ευέλικτος επιταχυντής, δυνατή η επίτευξη πολύ υψηλών ενεργειών

Πως δουλεύουμε με έναν επιταχυντή

Οι επιταχυντές συνήθως δουλεύουν με ένα βασικό κύκλο:

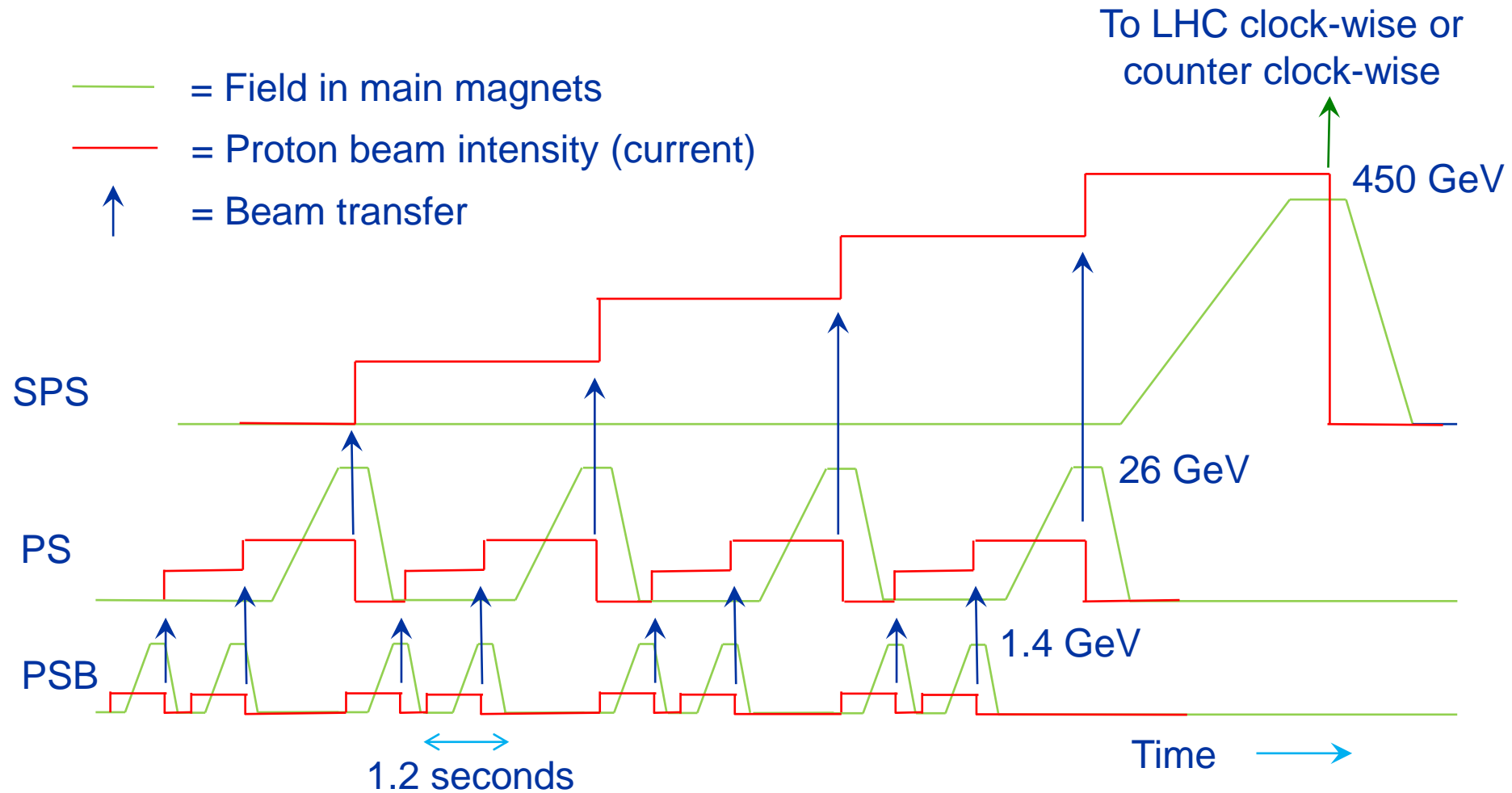
Εισαγωγή της δέσμης (injection)

Επιτάχυνση (acceleration) : το πεδίο στους μαγνήτες ανεβαίνει σύγχρονα με την ενέργεια της δέσμης

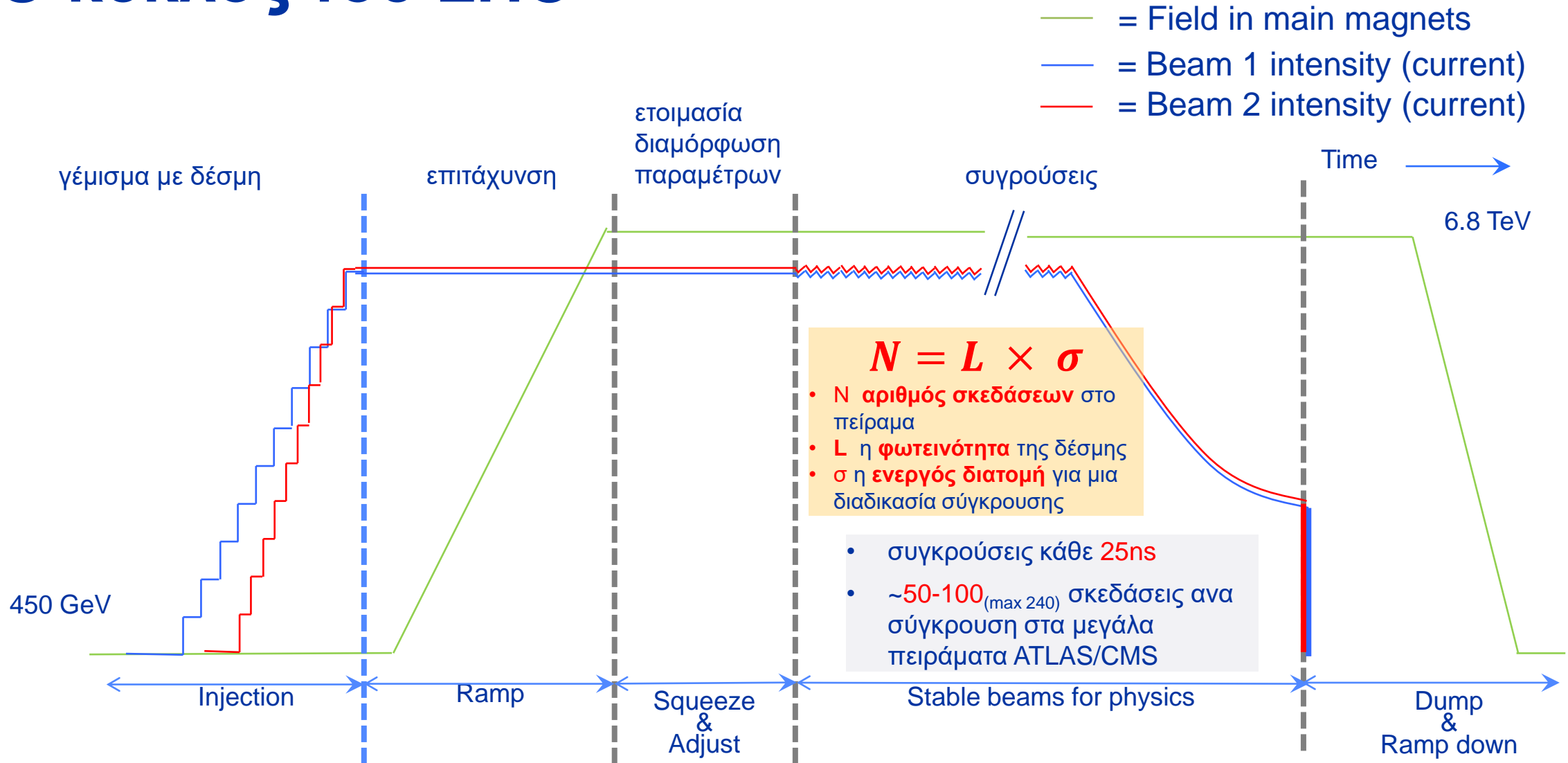
Εξοδος (extraction) της δέσμης για ένα πείραμα ή άλλη διάταξη. Αν είναι Συγκρουστήρας (Collider) οι δέσμες μένουν κάνοντας περιστροφές μέχρι να θεωρηθούν ότι δεν παράγουν κάτι χρήσιμο πιά και στέλνονται σε ένα dump

Χαμήλωμα του πεδίου

Κύκλοι λειτουργίας των επιταχυντών του CERN για το γέμισμα του LHC



Ο κύκλος του LHC



Ο LHC τι ιδιαίτερο έχει;

Ο LHC σε λίγα λόγια!

Φτιαγμένος ~100μ κάτω από την επιφάνεια

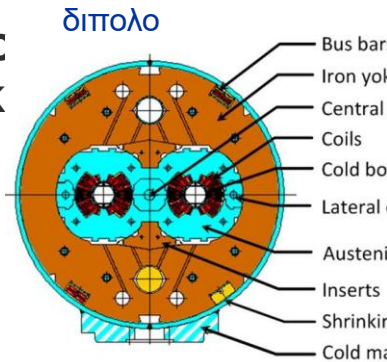
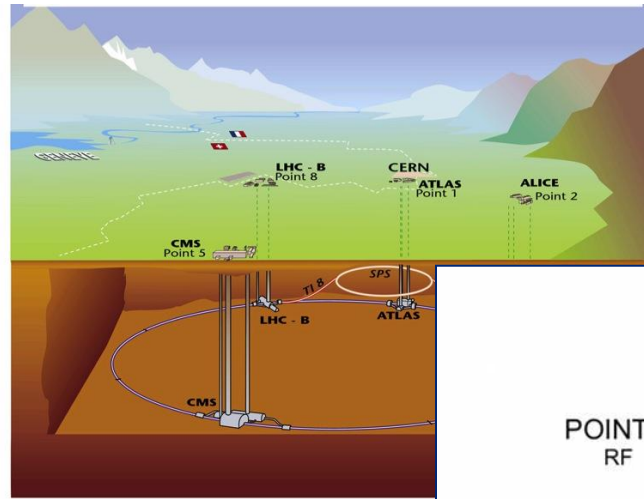
Δύο δέσμες προτονίων που κινούνται αντίθετα και συγκρούονται σε 4 μεγάλα πειράματα

Περιφέρεια 26.7 km

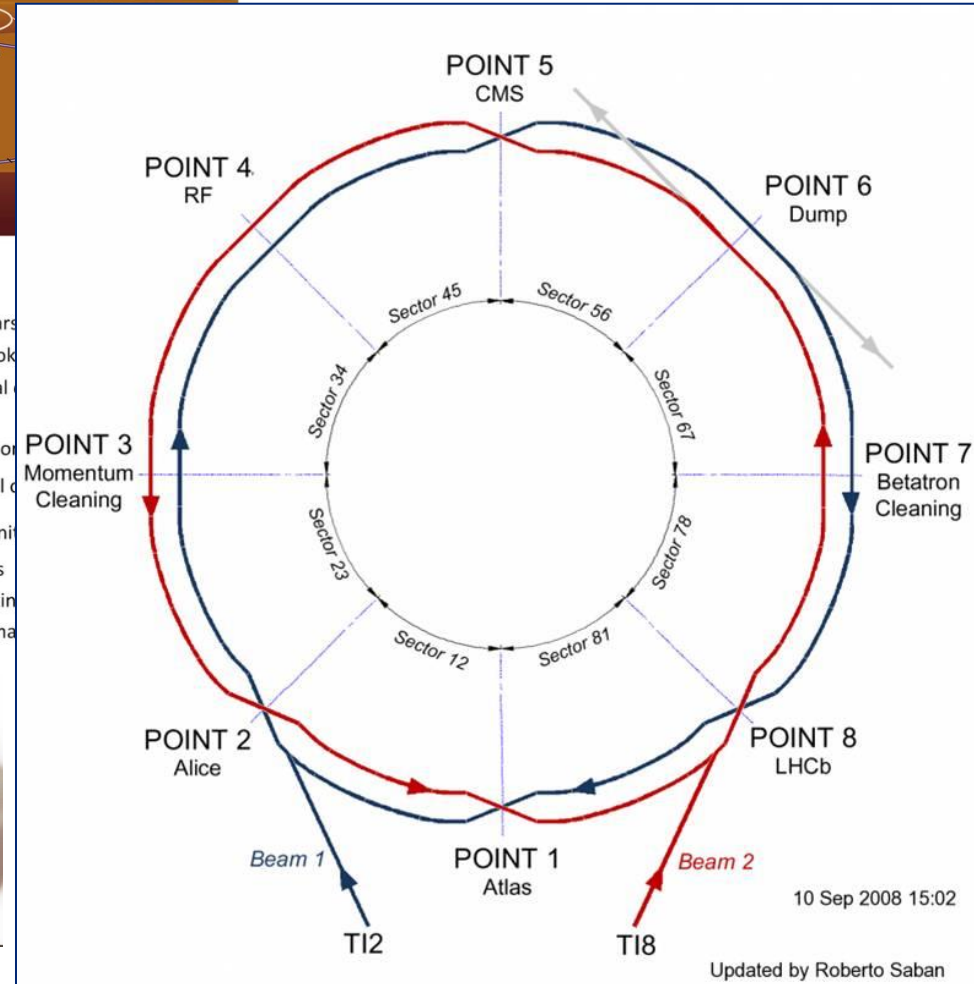
Προηγμένος σχεδιασμός των μαγνητών, με δύο δέσμες στον ίδιο μαγνήτη σε απόσταση 19.4 εκ μεταξύ τους

Υψηλά ρεύματα στους μαγνήτες (13'000A) για να δώσουν το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο 8.3T στα 7 TeV, 150 τόνους υγρό Ήλιο για να κρατηθούν οι μαγνήτες στην χαμηλή θερμοκρασία και να μείνουν υπεραγώγιμοι

Ενέργεια δέσμης ~350MJ, απώλεια ενέργειας λόγω ακτινοβολίας δέσμης 3.7kW



ΤΕΤΡΑΠΟΛΟ



Γιατί ο επιταχυντής είναι κατασκευασμένος υπόγεια;

Για τρεις βασικούς λόγους

1. Για τους μεγάλους επιταχυντές (>1χιλ περίμετρο), η αγορά της αντίστοιχης γης θα ήταν αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και θα έφερνε μεγάλη αλλαγή στην περιοχή (χωριά, δρόμοι κλπ.). Ετσι είτε επιλέγονται νέες περιοχές, είτε υπόγεια κατασκευή. Για μικροτερους επιταχυντές η εξασφάλιση μιας έκτασης δεν είναι απαγορευτική οπότε επιλέγεται σαν λύση. Σε αυτή την περίπτωση οι επιταχυντές είναι λίγα μέτρα (~10μ) κάτω από την επιφάνεια λόγω του (3) και συνήθως καλύπτονται με χώμα ή άλλη προστασία (shielding), ανάλογα και με την ενέργειά τους και τύπο δέσμης.
2. Αν και δεν έχει ιδιαίτερα θέματα ραδιενέργειας η χρήση δεσμών υπόγεια έχει πολλά πλεονεκτήματα σε περίπτωση ατυχημάτων.
3. Μένοντας 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

High Energy Physics Research



Synchrotron Light Source



Πως γεμίζουμε την δέσμη σε έναν επιταχυντή;

Πως γεμίζουμε την δέσμη σε έναν επιταχυντή; Εισαγωγή (injection) – έξαγωγή (extraction)

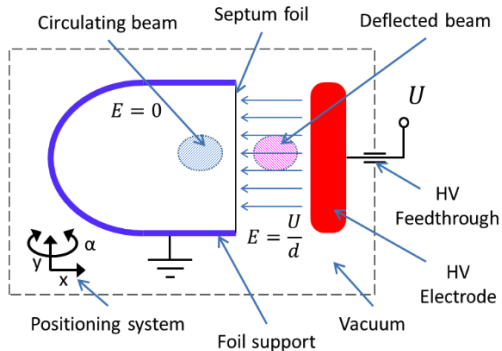
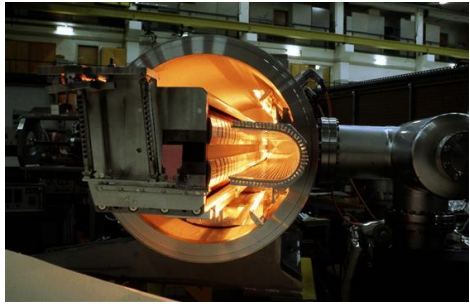
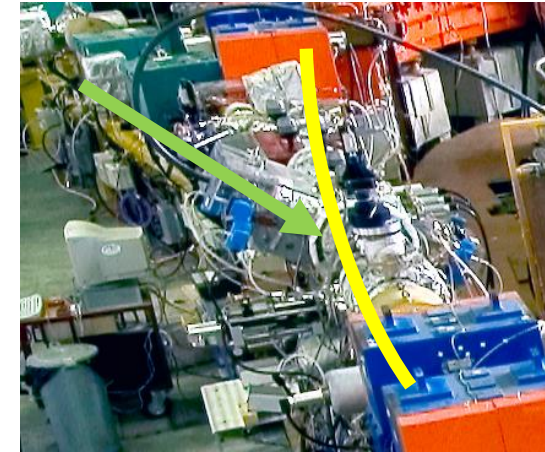
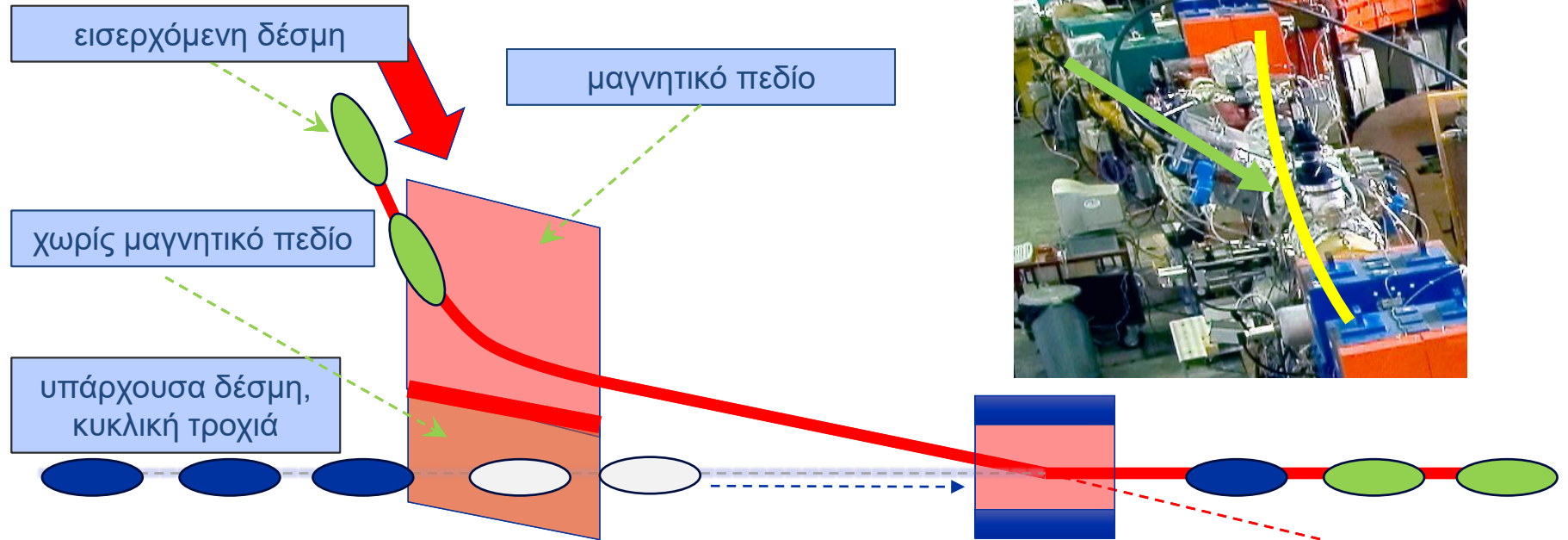


Fig. 4: Schematic view of electrostatic septum



Septum Magnet
ιδιαίτερα σχεδιασμένος μαγνήτης που έχει μια περιοχή με μαγνητικό πεδίο και μια χωρίς

Kicker Magnet
ιδιαίτερα σχεδιασμένος μαγνήτης που μπορεί να φτάσει στο μαγνητικό του πεδίο πολύ γρήγορα

Η αντίστροφη διάταξη χρησιμοποιείται για την έξοδο της δέσμης από τον επιταχυντή

Οι μαγνήτες για την εισαγωγή δέσμης ξεκινούν και σταματούν σε συγχρονισμό με την υπάρχουσα δέσμη ώστε τα νέα πακέτα να τοποθετηθούν στις σωστές «άδειες/επιτρεπτές» θέσεις

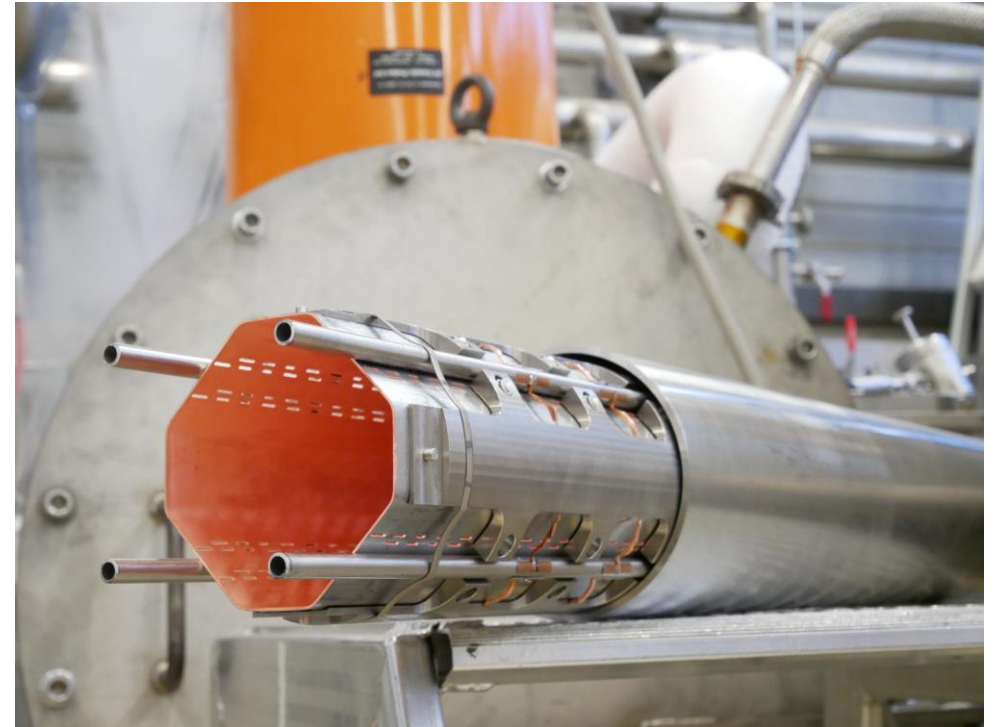
Που κινείται η δέσμη μέσα στον επιταχυντή;

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

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

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

LHC : $\sim 10^{-7} - 10^{-9}$ Pa



θάλαμος κενού LHC r~3cm

Πως αξιολογούμε την απόδοση ενός επιταχυντή;

Συγκρουστήρες (Colliders)

• Φωτεινότητα της δέσμης (Luminosity)

- N_b ο αριθμός των σωματιδίων ανά πακέτο (bunch)
- k_b ο αριθμός των πακέτων
- $\gamma = E/(m_0c^2)$ ο σχετικιστικός παράγοντας
- ϵ_n η νορμαλισμένη emittance
- β^* η συνάρτηση πλάτους στο σημείο αλληλεπίδρασης

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

Επιταχυντές υψηλής έντασης δέσμης (Beam intensity)

• 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

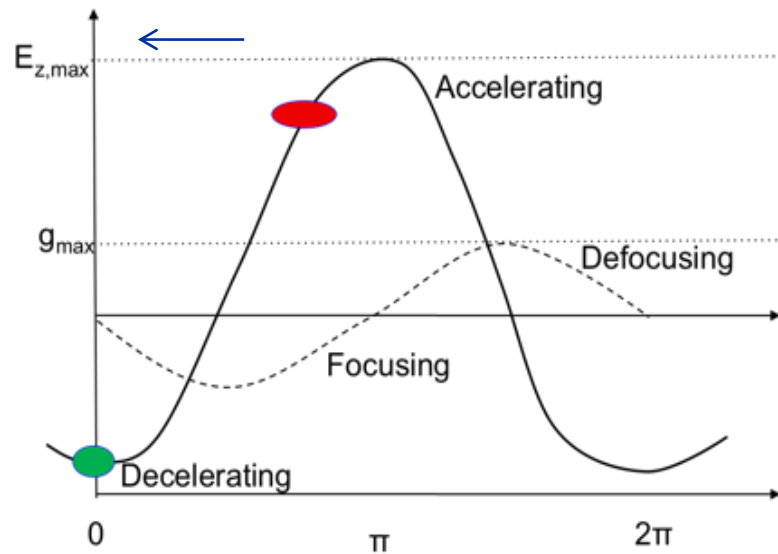
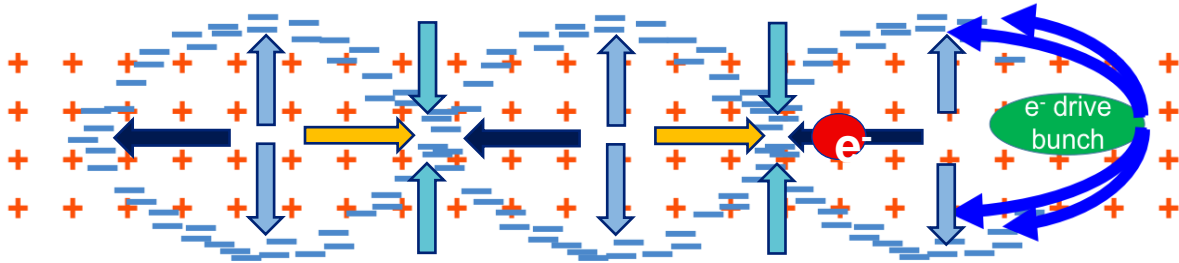
- N_p ο αριθμός των φωτονίων
- $\epsilon_{x,y}$ η οριζόντια και κάθετη εκπεμπτικότητα

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

Πλανά για το μέλλον;

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^-

Ερευνα στους Επιταχυντές

CERN Accelerating science

Sign in Directory



Innovation Fostering in
Accelerator Science and
Technology

HOME ABOUT **WORK PACKAGES** RESULTS INDUSTRY NEWS ARIES CONTACT

Quick links

WP1: Management
WP2: Communication
WP3: Industry engagement
WP4: Innovation, materials
WP5: R&D strategies
WP6: Novel concepts
WP7: Light sources
WP8: Magnets
WP9: Cavities
WP10: Technologies
WP11: Sustainability
WP12: Applications
WP13: Technology infrastructure
WP14: Ethics requirements

Work Packages

WP	Title	Coordinator
1	Management, coordination and dissemination	M. Vretenar (CERN)
2	Training, communication and outreach for accelerator science and technology	Ph. Burrows (UOXF)
3	Industry engagement	M. Morandin (INFN)
4	Managing innovation, new materials	M. Losasso (CERN)
5	Strategies and milestones for accelerator research and technology	F. Zimmermann (CERN), N. Pastrone (INFN), P. Forck (GSI)
6	Novel particle accelerators concepts and technologies	R. Assmann (DESY)
7	High brightness accelerators for light sources	R. Bartolini (DESY)
8	Innovative superconducting magnets	L. Rossi (INFN), L. Quettier (CEA), C. Roux (GSI)
9	Innovative superconducting thin film coated cavities	C. Antoine (CEA), O. Malyshev (UKRI)
10	Advanced accelerator technologies	T. Torims (RTU)
11	Sustainable concepts and technologies	M. Seidel (PSI)
12	Societal applications	R. Edgecock (HUD)
13	Technology infrastructure	S. Leray (CEA)
14	Ethics requirements	P. Foka (GSI)

<https://ifast-project.eu>

Table 3.1: Overview of PWFA facilities

	AWAKE	CLEAR	FACET-II	FF>>	SparcLAB PWFA, LWFA	EuPR@Sparc	CLARA	MAX IV
operation start	2016	2017	2019	2018	2017	2022	2020	tbd
unique contribution	protons	rapid access and operation cycle	high energy peak-current electrons, positrons	MHz rep rate 100kW average power 1 fs resolution bunch diagn. FEL gain tests	PWFA with COMB beam, LWFA external injection, test FEL	PWFA with COMB beam, X-band Linac LWFA ext. inj. test FEL	ultrashort e ⁻ bunches	low emittance, short pulse, high-density e ⁻ beam
research topic	HEP	instrumentation irradiation AA technology	high intensity e ⁻ , e ⁺ beam driven exp.	high average power e ⁻ beam driven exp.	PWFA LWFA FEL	PWFA, LWFA, FEL, other applications	FEL	PWFA, Soft X-FELs
user facility	no	yes	yes	no	no	yes	partially	no
drive beam driver energy	p ⁺ 400 GeV	e ⁻ 200 MeV	e ⁻ 10 GeV	e ⁻ 0.4–1.5 GeV	e ⁻ 150 MeV	e ⁻ 600 MeV	e ⁻ 240 MeV	e ⁻ 3 GeV
ext. inject.	yes	no	no/yes	yes??	no	no	no	no
witness energy	20 MeV	na	tb upgraded	0.4–1.5 GeV	150 MeV	600 MeV	na	3 GeV
plasma density [cm ⁻³]	Rb vapour 1-10E14	Ar, He capillary 1E16-1E18	Li oven 1E15-1E18	H, N, noble gases 1E15-1E18	H, capillary 1E16-1E18	H, capillary 1E16-1E18	He, capillary 1E16-1E18	H, gases 1E15-1E18
length	10 m	5-20 cm	10-100 cm	1-30 cm	3 cm	> 30 cm	10-30 cm	10-50cm
plasma tapering	yes	na	yes	yes	yes	yes		yes
acc. gradient exp. E gain	1 GeV/m average 1+ GeV	na na	10+ GeV/m peak ≈10 GeV	10+ GeV/m peak ≈1.5 GeV	>1 GeV/m?? 40 MeV ??	>1 GeV/m?? > 500 MeV	na na	10+ GeV/m peak 3 GeV



ΤΕΛΟΣ

Προσπάθησα να δώσω μια εισαγωγική ματιά στους επιταχυντές και στην φυσική τους
Οι διαφάνειες είναι συλλογή από διάφορες παλιές ομιλίες, κείμενα, web – ευχαριστώ όλους

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