

Επιταχυντές και Ανιχνευτές στην Πυρηνική και Σωματιδιακή Φυσική

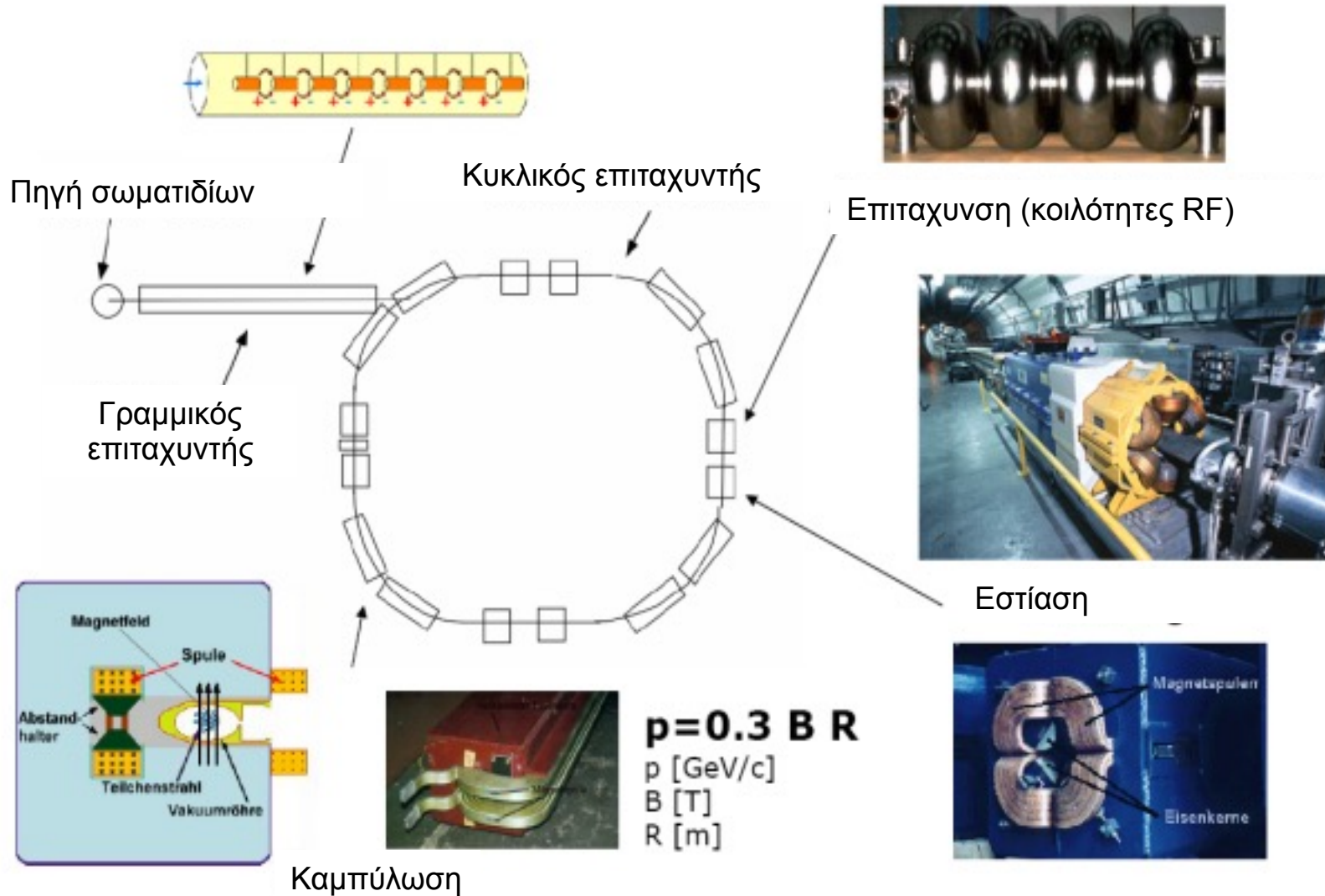
Κ.Κορδάς Δ. Σαμψωνίδης

Διαλεξη 3η

Περιεχόμενα

- Οι βασικές αρχές ενός επιταχυντή σωματιδίων.
- Τα πειράματα στους επιταχυντές
- Βασικές ιδιότητες ενός επιταχυντή.
- Μέθοδοι επιτάχυνσης

Τυπική Διάταξη Επιταχυντή



Βασικές αρχές

Τα πάντα διέπονται από τη δύναμη Lorentz

$$\overline{F}(t) = q \left(\overline{E}(t) + \overline{v}(t) \otimes \overline{B}(t) \right)$$

Ηλεκτρικό πεδίο
επιταχύνει τα
σωματίδια

Σωματίδια με
διαφορετικές ταχύτητες
(ενέργειες)
συμπεριφέρονται
διαφορετικά

Μαγνητικό πεδίο
περιορίζει τα σωματίδια
σε δεδομένη τροχιά

Βασικές ποσότητες που χρησιμοποιούνται στους επιταχυντές

Σχετική ταχύτητα

$$\beta = v/c$$

Ταχύτητα

$$v = \beta c$$

Ορμή

$$p = mv = m_0 \gamma \beta c$$

Κινητική Ενέργεια

$$T = (m - m_0)c^2 = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

$$\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow (\beta\gamma)^2 = \frac{\gamma^2 v^2}{c^2} = \gamma^2 - 1 \Rightarrow \beta^2 = \frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

Βασικές ποσότητες που χρησιμοποιούνται στους επιταχυντές

Η σχετικιστική ενέργεια και ορμή συσχετίζονται με τη σχέση

$$E^2 = p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2$$

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

Σύστημα μονάδων (c=1)

Ενέργεια eV => eV

Ορμή eV/c => eV

Μάζα eV/c² => eV

Ποια η ταχύτητα πρωτονίου που έχει αποκτήσει κινητική ενέργεια 500 MeV.

$$m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

Ενέργεια ηρεμίας είναι 938 MeV

$$E = 938 + 500 = 1438 \text{ MeV}$$

$$p = [(1438)^2 - (938)^2]^{1/2} = 1090 \text{ MeV}/c$$

$$\beta = p/E = 1090/1438 = 0.758$$

$$\frac{E^2}{c^2} = m_0^2 c^2 + \vec{p}^2$$

Για ηλεκτρόνιο κινητικής ενέργειας 500 MeV $\beta = 0.99999$

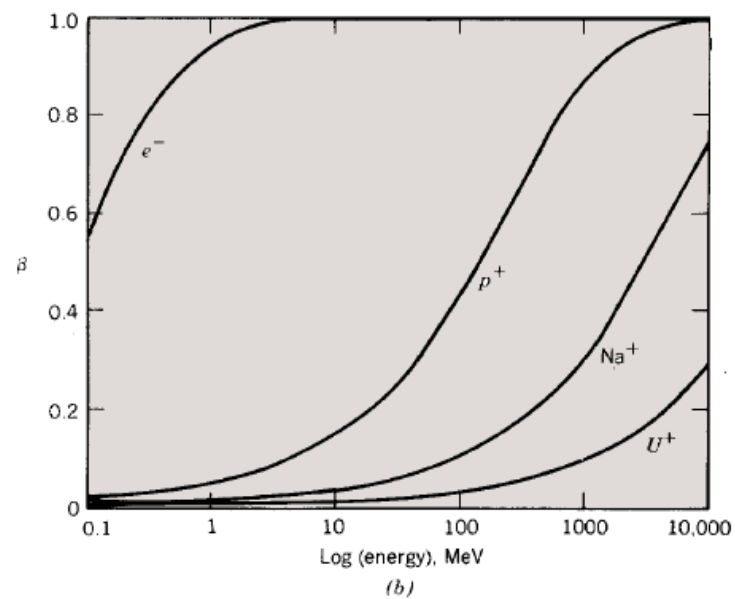
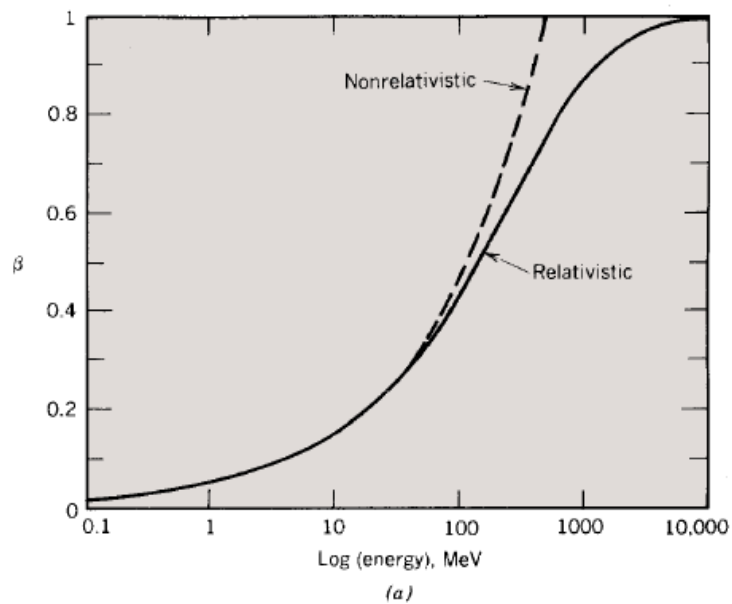


Figure 2.6. Particle velocity normalized to the speed of light as a function of kinetic energy. (a) Protons: solid line, relativistic predicted, dashed line, Newtonian prediction. (b) Relativistic predictions for various particles.

Πρόβλημα

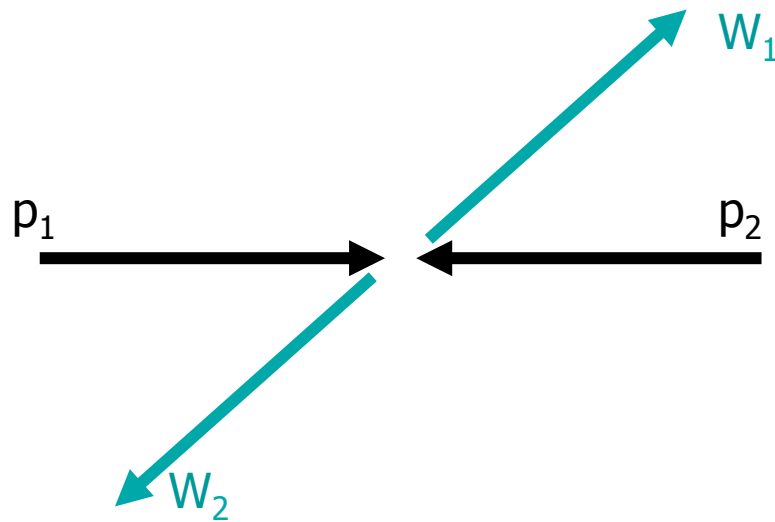
- Σε επιταχυντή ένα πρωτόνιο p_1 με μάζα ηρεμίας m_0 συγκρούεται με αντιπρωτόνιο p_2 (ίδια μάζα ηρεμίας), και παράγονται δύο σωματίδια W_1 και W_2 με ίσες μάζες $M_0=100m_0$
 - Πείραμα 1: p_1 και p_2 έχουν ίσες και αντίθετες ταχύτητες στο σύστημα εργαστήριο. Να βρεθεί η ελάχιστη ενέργεια του p_2 για την παραγωγή των W_1 και W_2 .
 - Πείραμα 2: Στο σύστημα εργαστήριο του p_1 , να βρεθεί η ελάχιστη ενέργεια E' του p_2 για την παραγωγή των W_1 και W_2 .

Πείραμα 1: Να βρεθεί η ελάχιστη ενέργεια του p_2 για την παραγωγή των W_1 και W_2 .

Πείραμα 1

$$\frac{E^2}{c^2} = \vec{p}^2 + m_0^2 c^2 \Rightarrow \text{ίδιες } m_0 \text{ και } p \text{ σημαίνει ίδια } E$$

Η ορμή (3-momentum) είναι μηδέν πριν και μετά τη σύγκρουση



4-momenta πριν τη σύγκρουση:

$$P_1 = \left(\frac{E}{c}, \vec{p} \right) \quad P_2 = \left(\frac{E}{c}, -\vec{p} \right)$$

4-momenta μετά τη σύγκρουση :

$$P_1 = \left(\frac{E'}{c}, \vec{q} \right) \quad P_2 = \left(\frac{E'}{c}, -\vec{q} \right)$$

Διατήρηση της ενέργειας $\Rightarrow E=E' > \text{rest energy} = M_0 c^2 = 100 m_0 c^2$

Πείραμα 2: Στο σύστημα εργαστήριο του p_1 , να βρεθεί η ελάχιστη ενέργεια E' του p_2 για την παραγωγή των W_1 και W_2 .

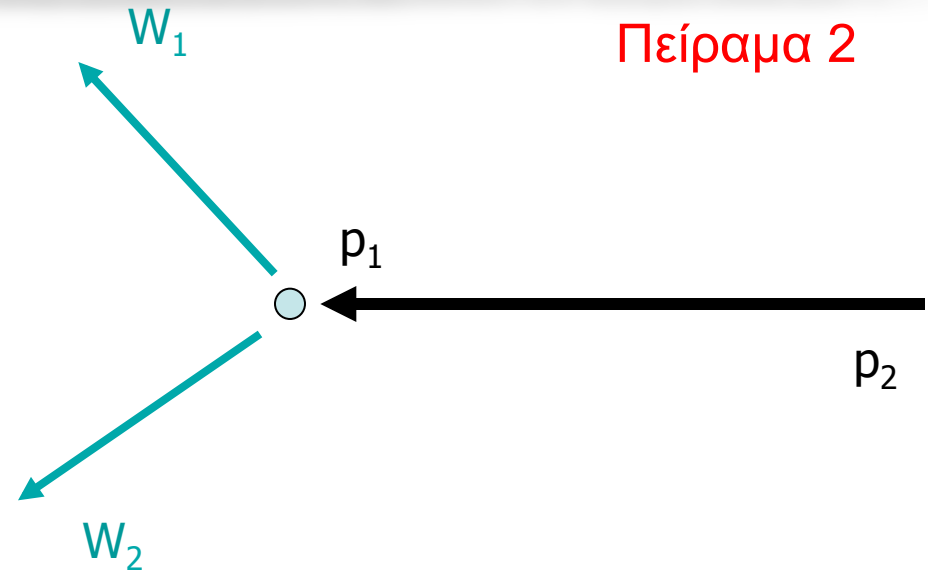
Πείραμα 2

Πριν τη σύγκρουση:

$$P_1 = (m_0c^2, \vec{0}) \quad P_2 = (E'/c, \vec{p})$$

Η συνολική (διαθέσιμη) ενέργεια είναι

$$E_1 = E' + 2m_0c^2$$



Η ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας $E_{cm}^2 = 2m_0c^2 + 2E_{lab}m_0c^2$

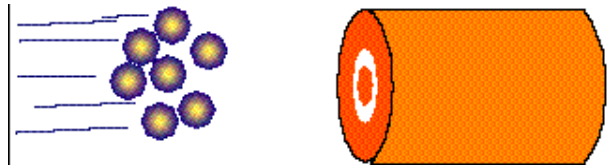
$$2m_0c^2 E_1 = E_2^2$$

$$\Rightarrow 2m_0c^2(E' + m_0c^2) = (2E)^2 > (200m_0c^2)^2$$

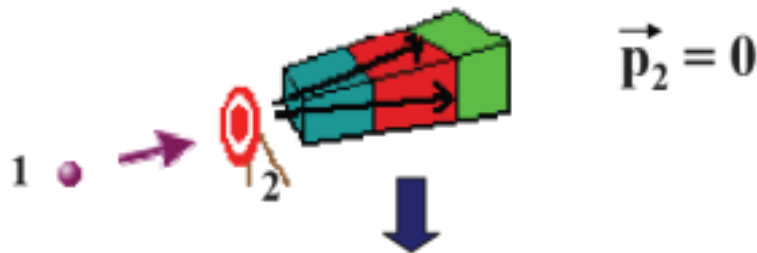
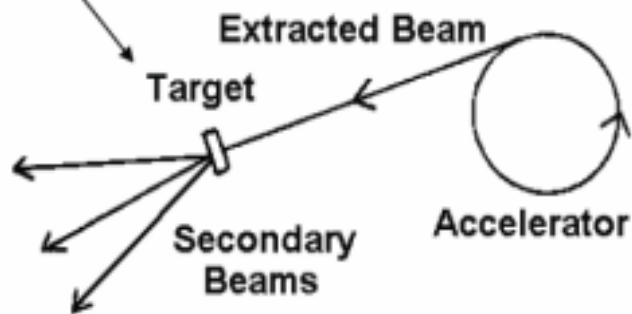
$$\Rightarrow E' > (2 \times 10^4 - 1)m_0c^2 \approx 20,000m_0c^2$$

Τα πειράματα

Πειράματα σταθερού στόχου

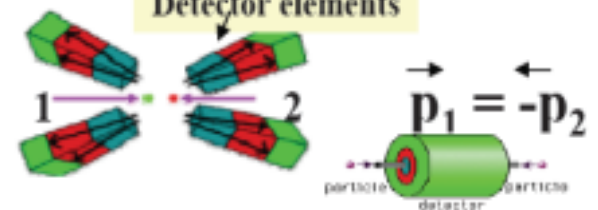
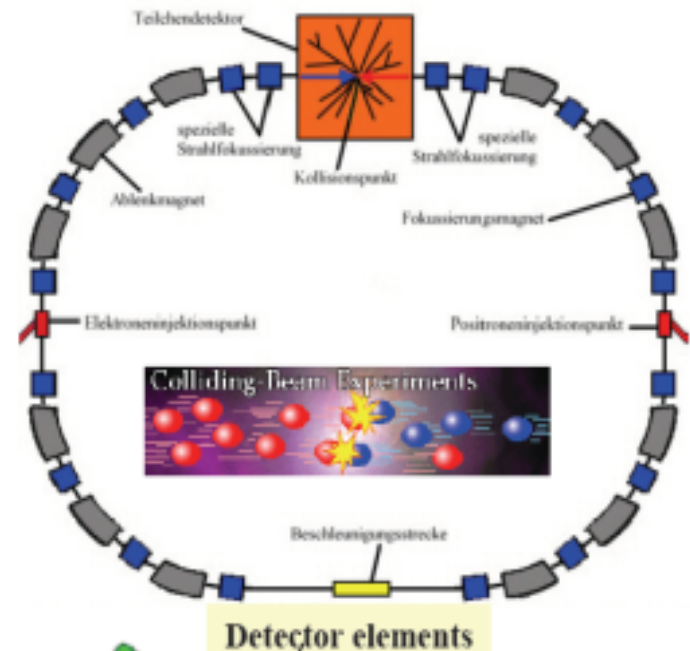
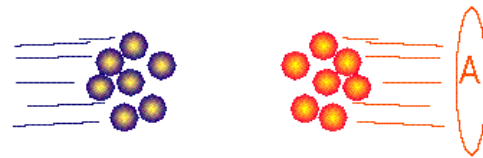


Beryllium, H, ...



$$E_{CM} = \sqrt{2E_{beam} m_{target}}$$

Πειράματα συγκρουόμενων δεσμών

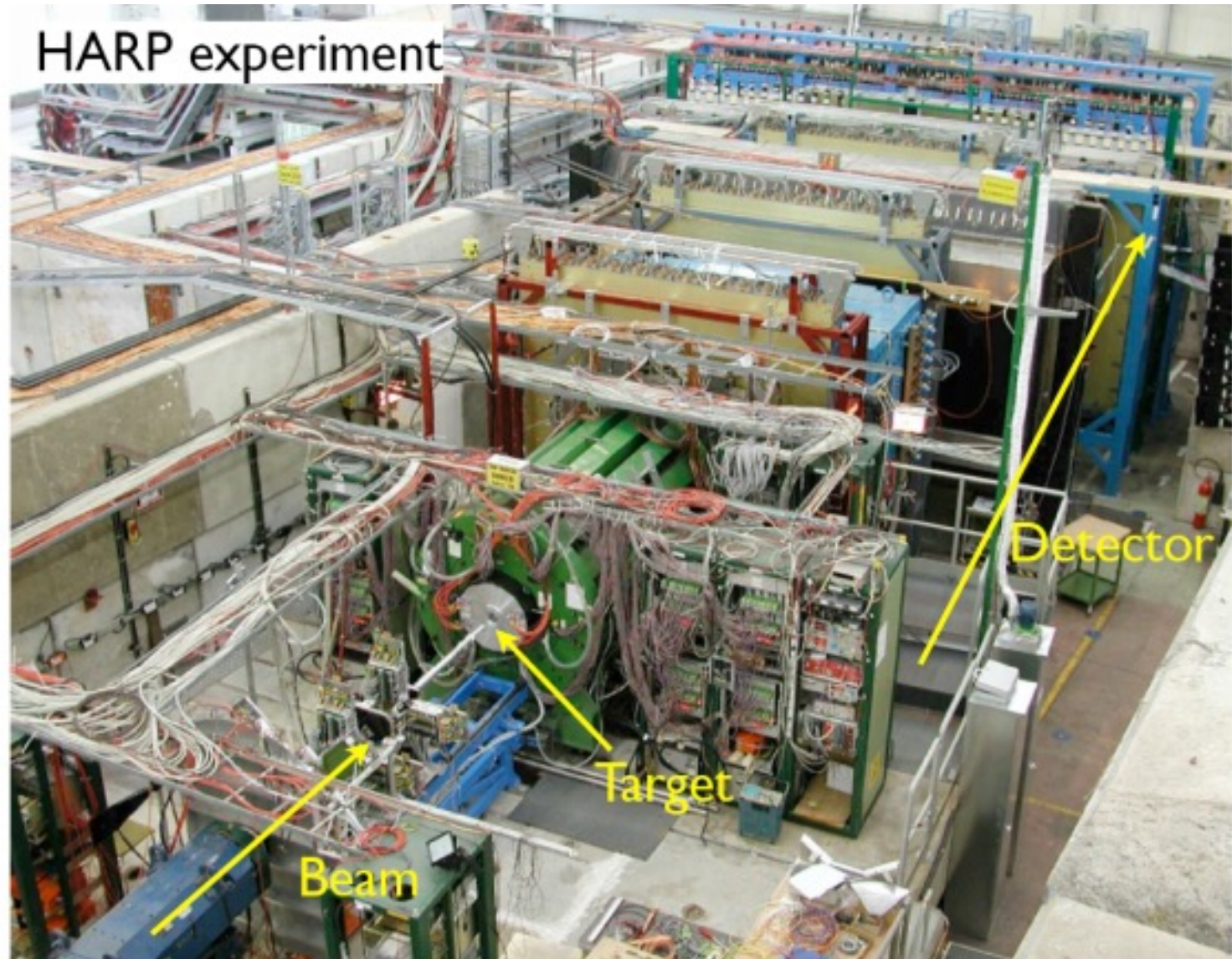


$$E_{CM} = 2E_{beam}$$

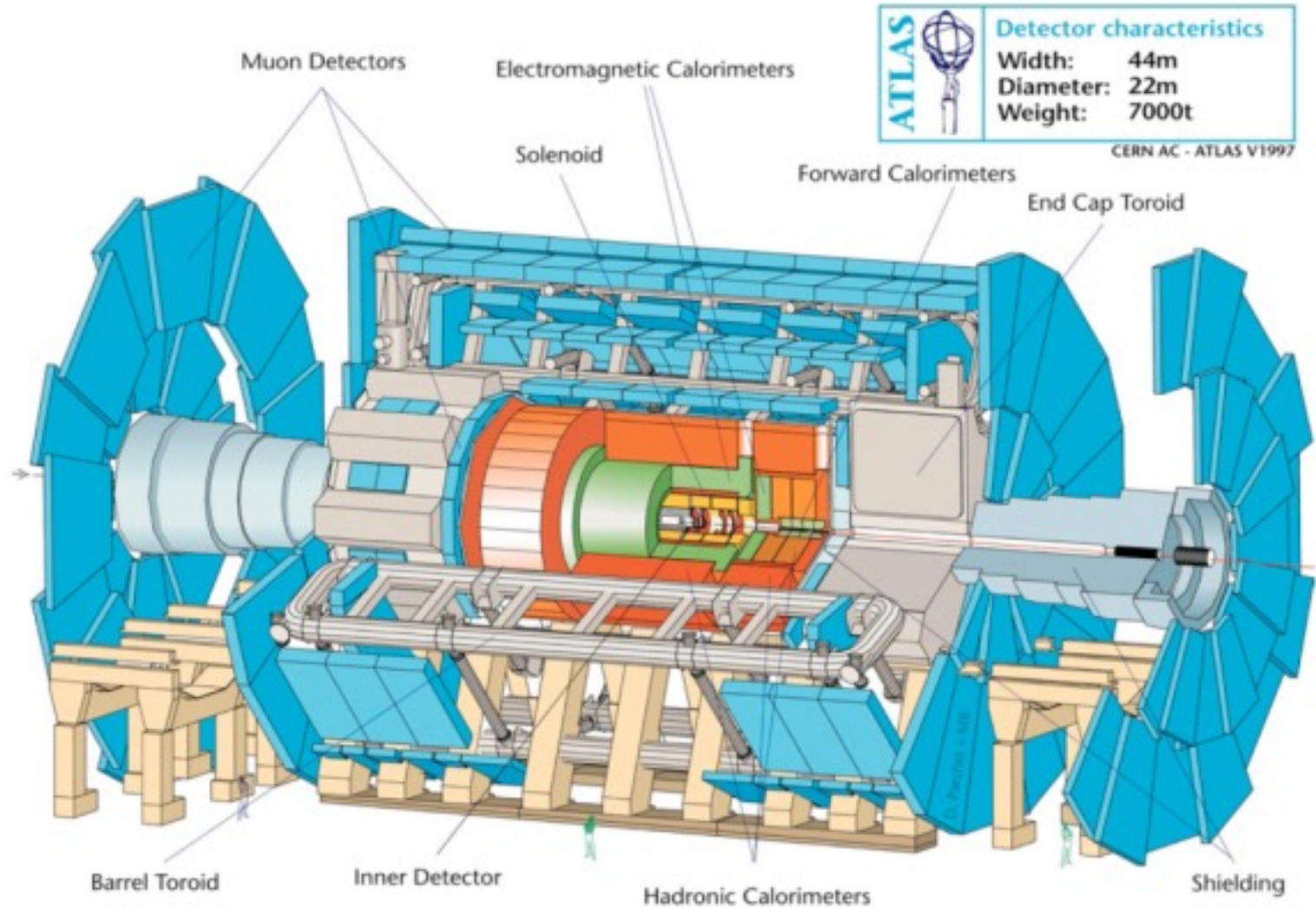
Τα πειράματα

	Fixed Target	Collider
Available energy in the collision	$E_{cm} = (2E_{beam} m_{target})^{1/2}$	$E_{CM} = 2E_b$
Main accelerator concepts	Beam accumulation Extraction	Luminosity Luminosity lifetime Beam Lifetime Insertion
Physics	Particle production Cross section Hadrotherapy Material study	High energy frontiers
Detector design	In the beam direction	4π complete coverage

Πείραμα HARP



Πείραμα ATLAS



Βασικές ιδιότητες των επιταχυντών

- Τύπος σωματιδίων που επιταχύνει
- Η ενέργεια των σωματιδίων
- Το μέρος της ενέργειας της δέσμης πραγματικά διαθέσιμη για την παραγωγή των νέων σωματιδίων
- Φωτεινότητα

Τύπος σωματιδίων που επιταχύνονται

Πρέπει να είναι φορτισμένα.

- Επιταχύνονται με ηλεκτρικό πεδίο (Ενέργεια = $q \cdot V$)
- Εστιάζονται με μαγνητικά πεδία ($p = q \cdot 0.3 R B$)

Μεγάλο χρόνο ζωής

- καλύτερα: άπειρη διάρκεια ζωής

αλλά

Λόγω του παράγοντα Lorentz (γ) ο χρόνος ζωής των σωματιδίων μπορεί να είναι μεγάλος.

π.χ.

Pions, $\tau = 2.6 \times 10^{-8} \text{sec}$, $E = 200 \text{ GeV}$, $\gamma = E/m = 100/0.140 = 1428.6$, $\gamma\tau = 0.04 \text{ msec}$ $v \approx c$,
Μέση απόσταση = $c \gamma \tau = 11 \text{ km}$, αρκετά καλή για πειράματα σταθερού στόχου (CERN, PSI,...)

Muons, $\tau = 2.2 \times 10^{-6} \text{sec}$, $E = 200 \text{ GeV}$, $m = 0.1 \text{ GeV}/c^2$, $\gamma\tau = 4.4 \text{ msec}$!

Μέση απόσταση = **1320 km**! (υπάρχουν ιδέες για επιταχυντή μιονίων muon collider!)

Στην πράξη για τους μέχρι τώρα επιταχυντές :

ηλεκτρόνια, αντι-ηλεκτρόνια, πρωτόνια, αντι-πρωτόνια, βαρέα ιόντα.

Τύπος σωματιδίων

e

Ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια είναι σημειακά σωματίδια: χωρίς εσωτερική δομή

Η ενέργεια του επιταχυντή είναι δύο φορές η ενέργεια της δέσμης μεταφέρεται συνολικά στη σύγκρουση

$$E_{\text{col}} = E_b1 + E_b2 = 2E_b = 200 \text{ GeV (LEP)}$$

Η ενέργεια της δέσμης μπορεί να τεθεί με ακρίβεια σε ένα εύρος ενεργειών, π.χ. σάρωση περιοχής μαζών.

Μετρήσεις ακριβείας (LEP)

Πάνω από μια τιμή ενέργειας δεν είναι δυνατή η χρήση ηλεκτρονίων λόγω της παραγωγής ακτινοβολίας συγχρότρου.

p

Τα πρωτόνια και τα αντοπρωτόνια αποτελούνται από quarks και gluons

Η ενέργεια της δέσμης μεταφέρεται από τα συστατικά των πρωτονίων. Δεν συγκρούεται «όλο» το πρωτόνιο αλλά ένα από τα συστατικά του.

$$E_{\text{col}} < 2E_b$$

Με μια ενέργεια δέσμης είναι δυνατό να σαρωθούν διαφορετικές διαδικασίες σε διάφορες ενέργειες.

Μηχανή ανακαλήψεων
(Discovery Mashine LHC)

Η διαθέσιμη ενέργεια για τις συγκρούσεις είναι μικρότερη της ενέργειας της δέσμης.

Βασική ιδέα επιτάχυνσης

■ *Static field* *25 MeV*
discharge

■ *AC field* *no limit*
length

Στην πράξη ...

Κυκλική τροχιά



Πολλαπλές διελεύσεις

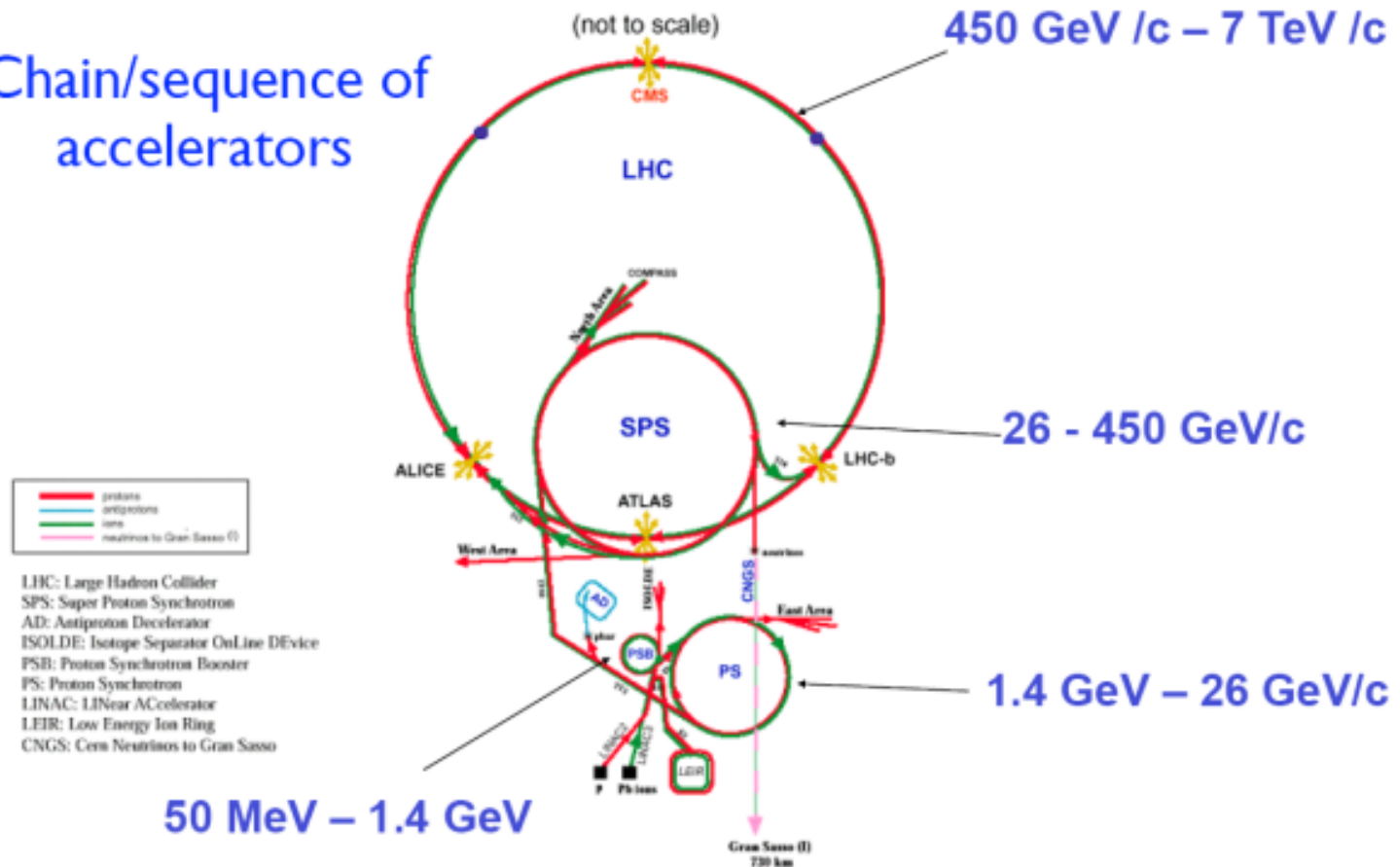
Συνδυασμός διαφόρων περιπτώσεων

■ *Cyclotron* *25 MeV*
non-relativistic

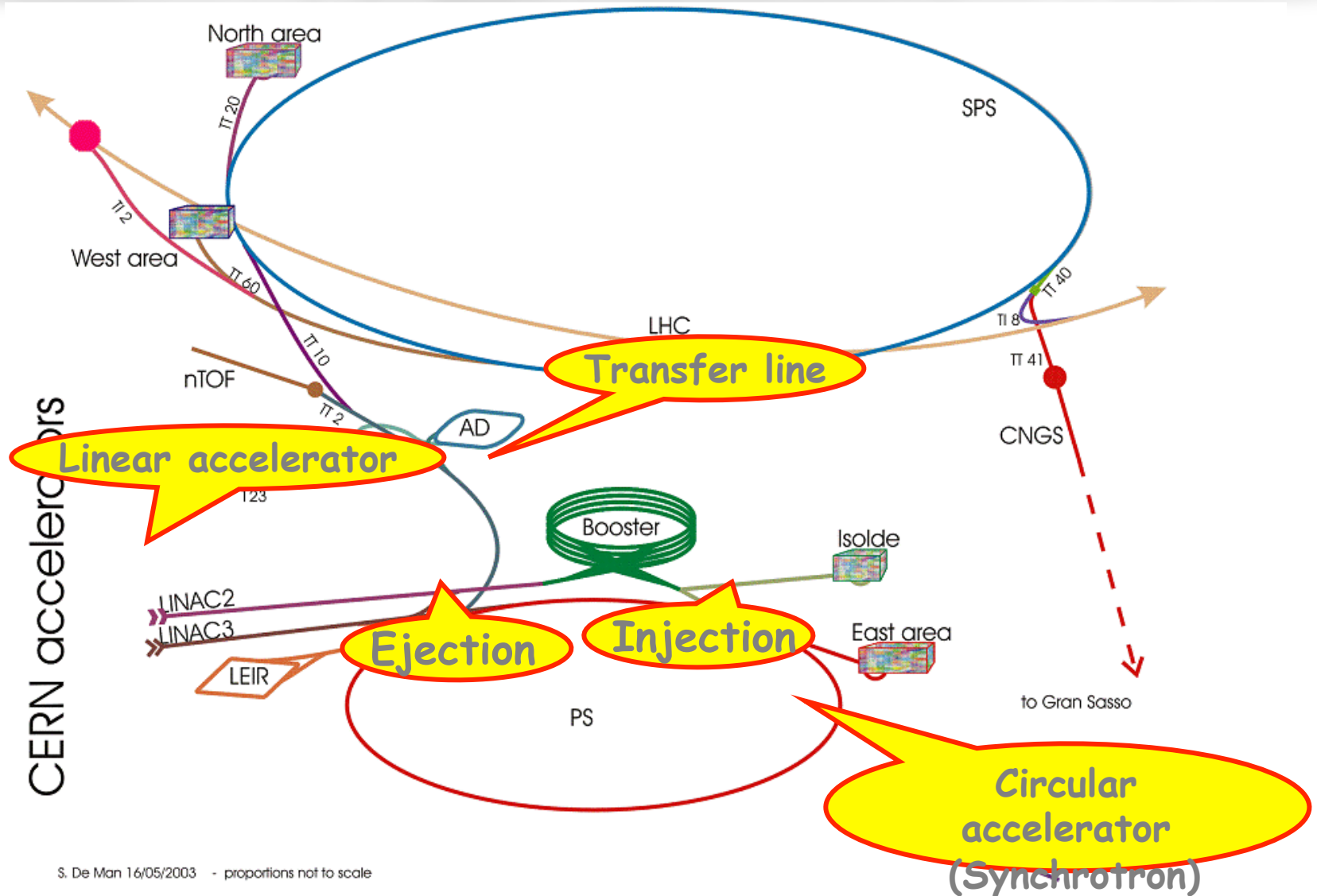
■ *Synchrotron* *no limit*
small magnets

CERN accelerator complex overview

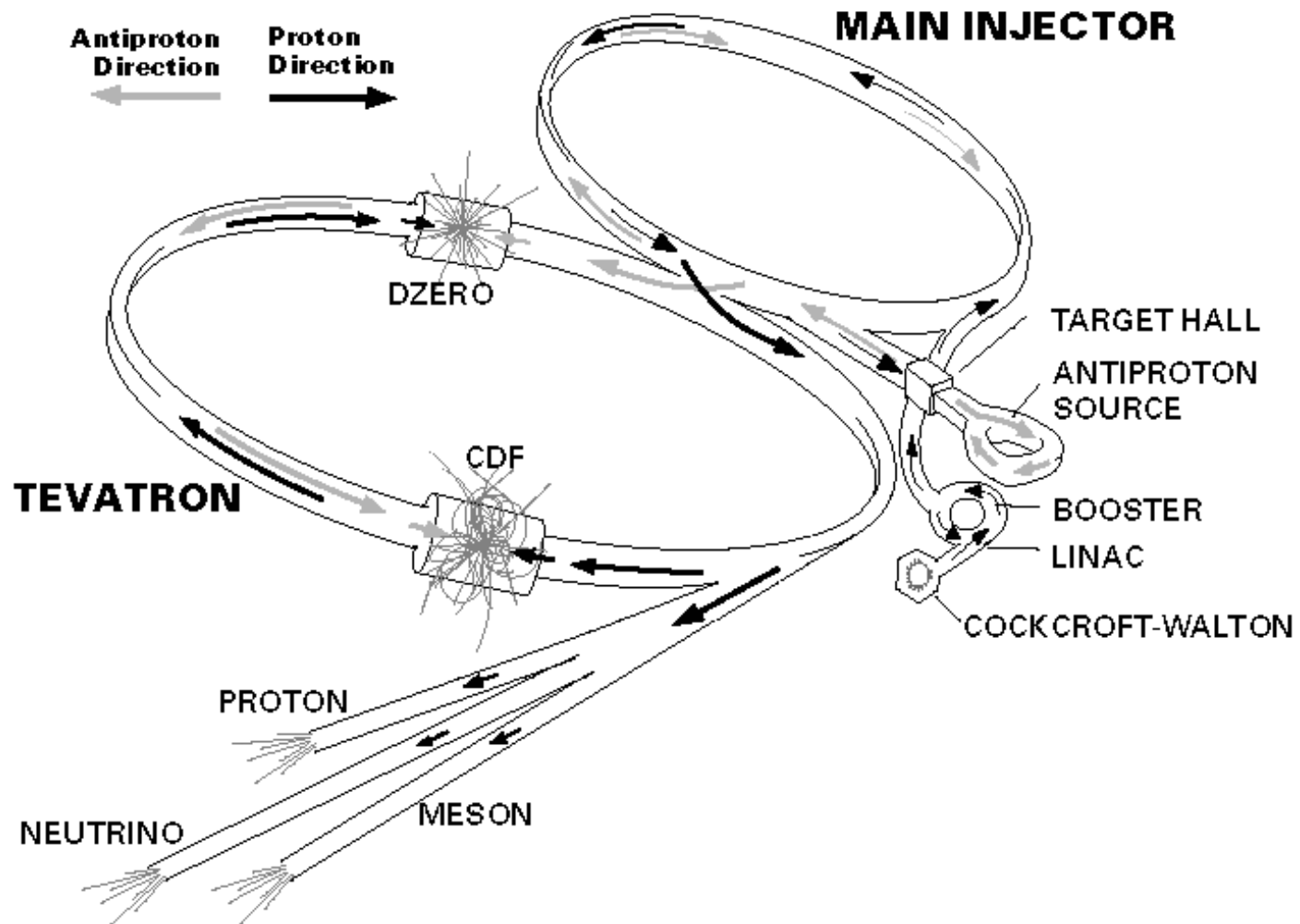
Chain/sequence of accelerators

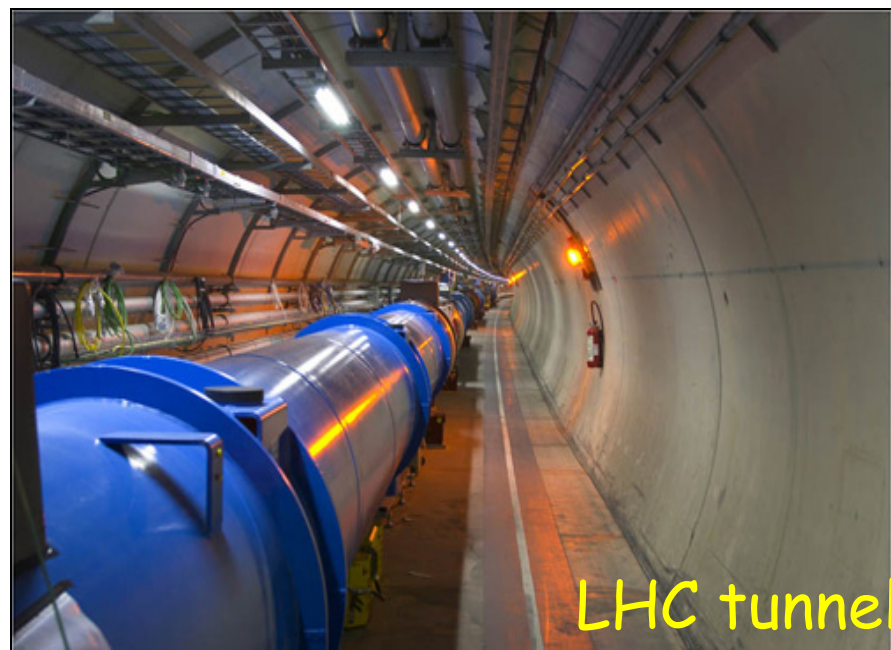
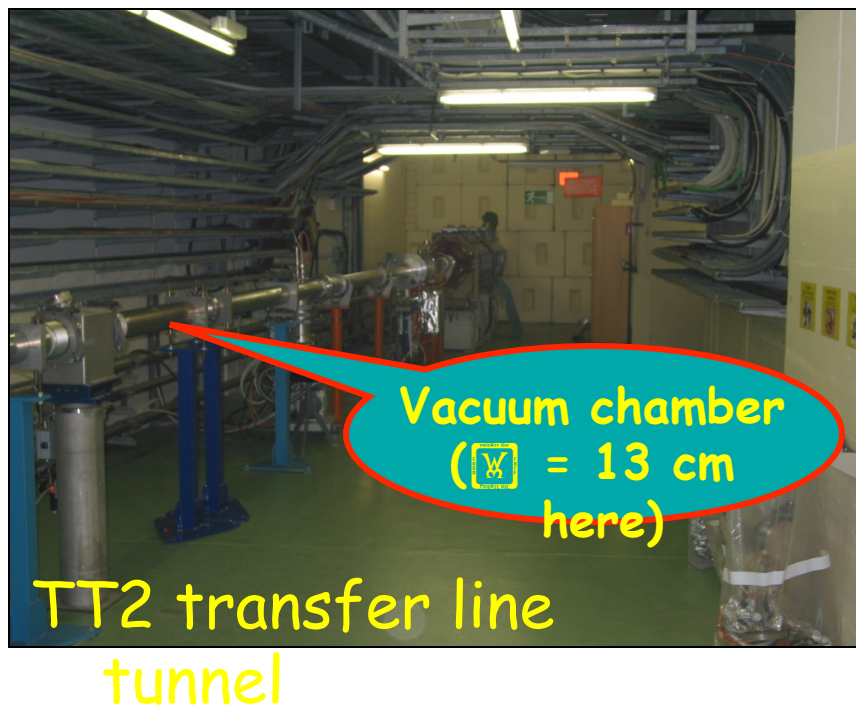
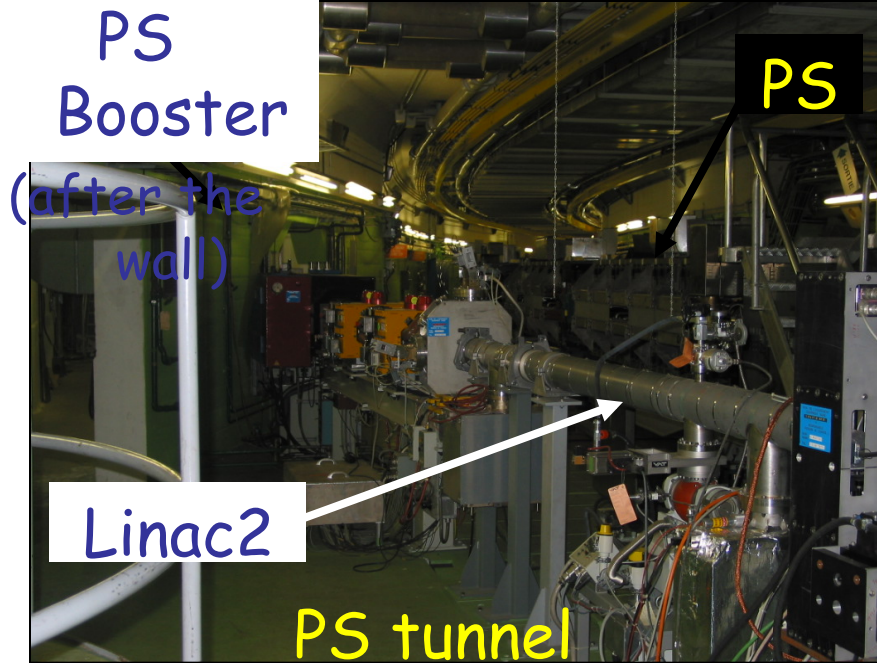


Η δέσμη του LHC



Η δέσμη του Tevatron

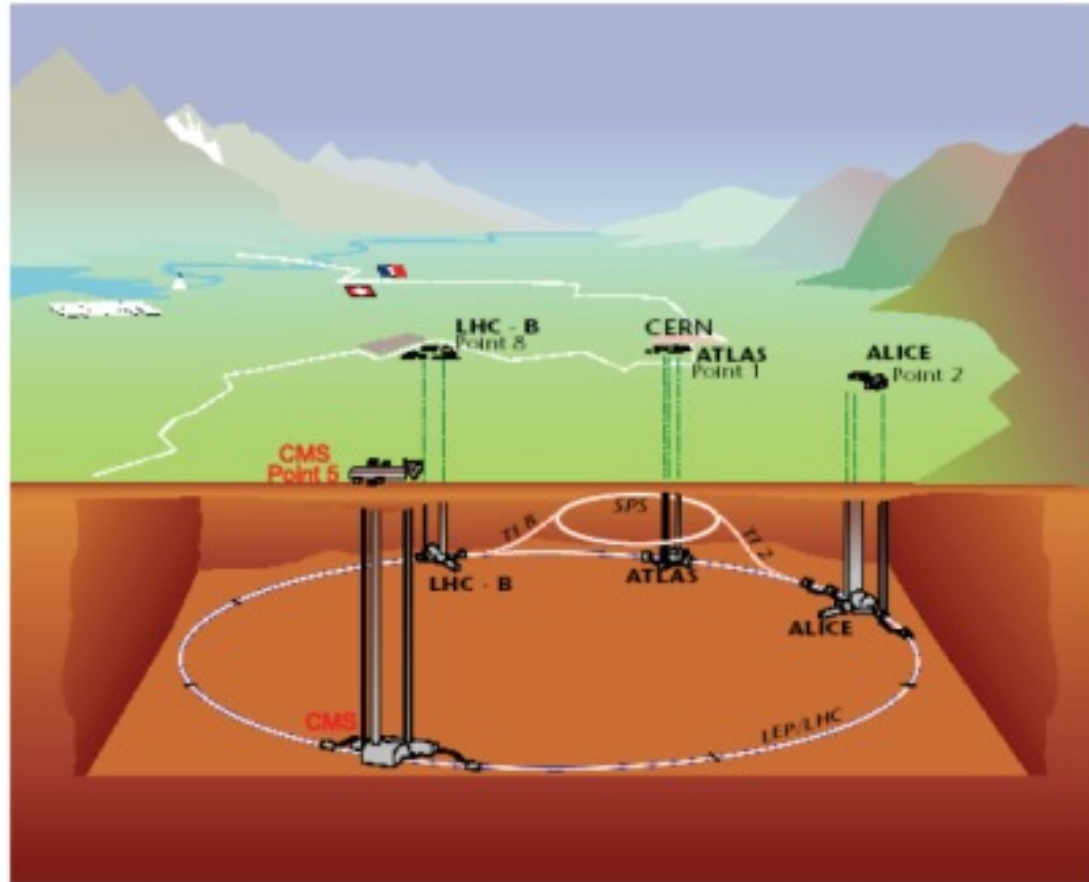




CERN Site

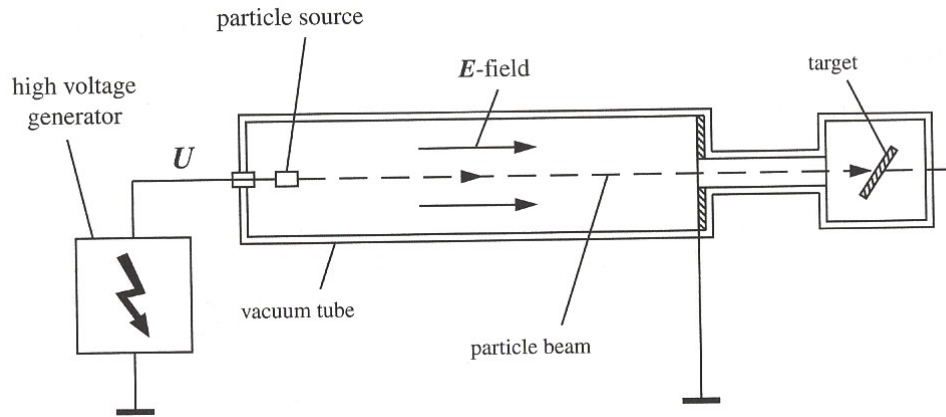


CERN Site



CERN Site (Meyrin)

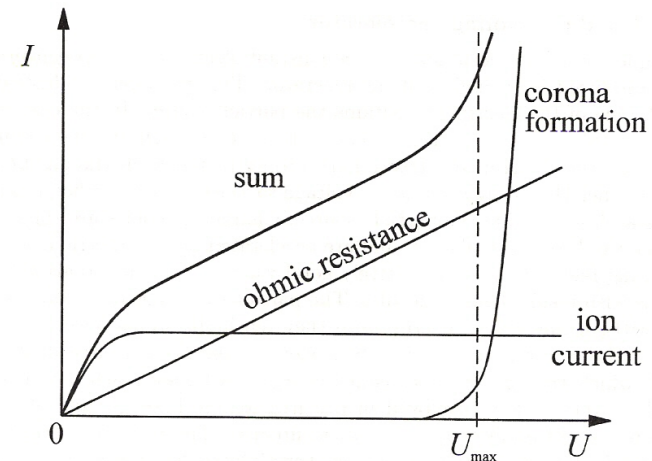
Ηλεκτροστατικός επιταχυντής



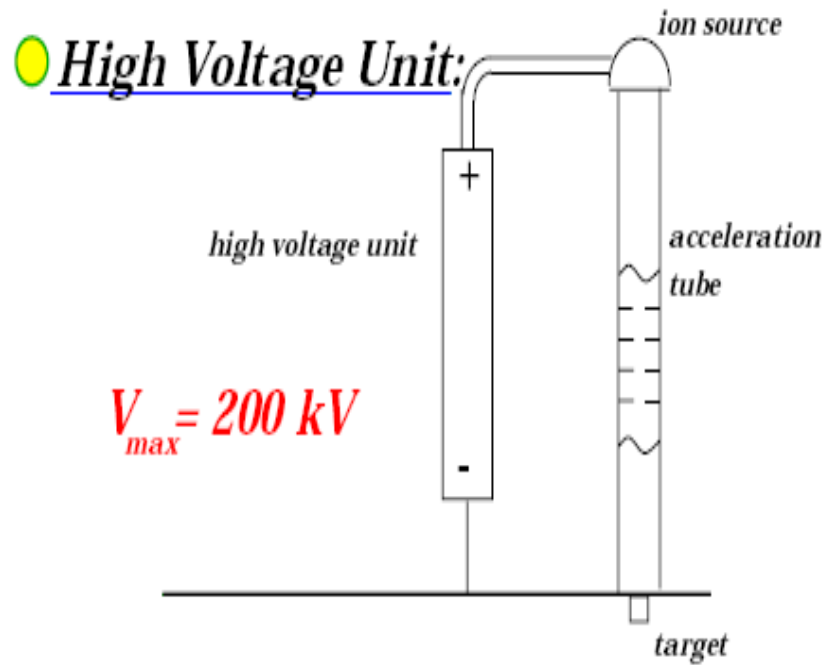
Πηγή e : θερμαινόμενο νήμα
 P , ιόντα : Ιονισμός αερίου με
DC ή AC voltage και
παραγωγή πλάσματος.

Ρεύμα $I(U)$

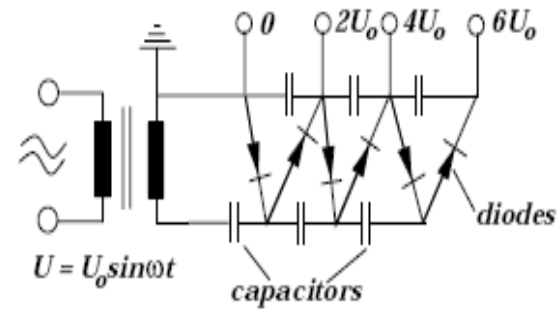
- Πάντα υπάρχει ωμική αντίσταση
- Ρεύμα λόγω ιόντων
- Δημιουργία “κορόνας” (δημιουργία χιονοστιβάδας κοντά στο ηλεκτρόδιο)



Ηλεκτροστατικά πεδία

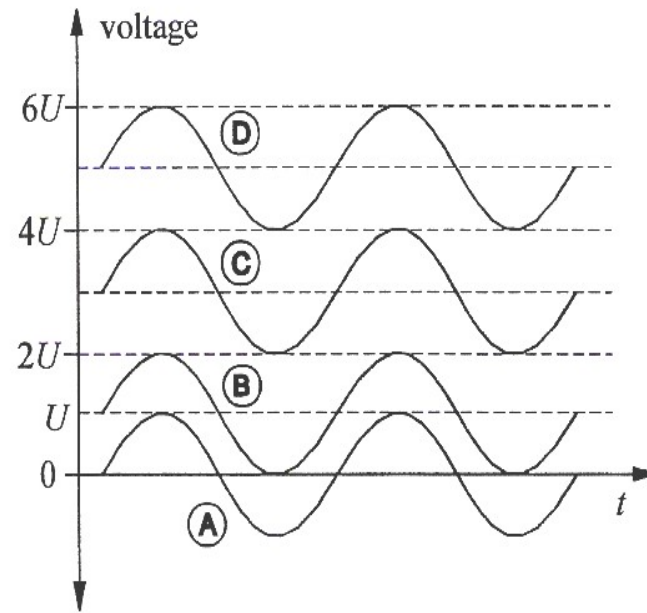
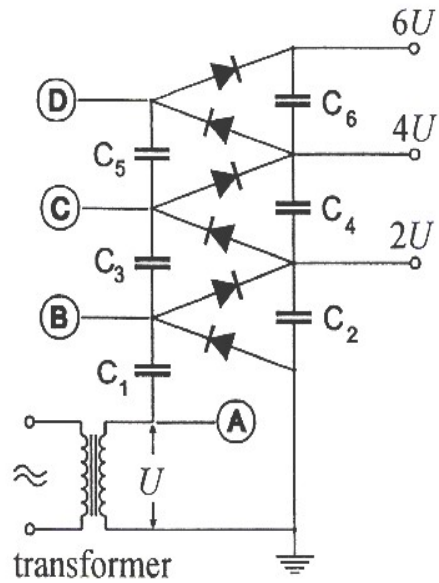


● Cascade Generator:



- 1928: Cockroft + Walton 800kV
- 1932: $p + Li \rightarrow 2 He$ 700kV (p)
(Nobel Prize 1951)

Cockroft-Walton accelerator



Cockroft-Walton accelerator

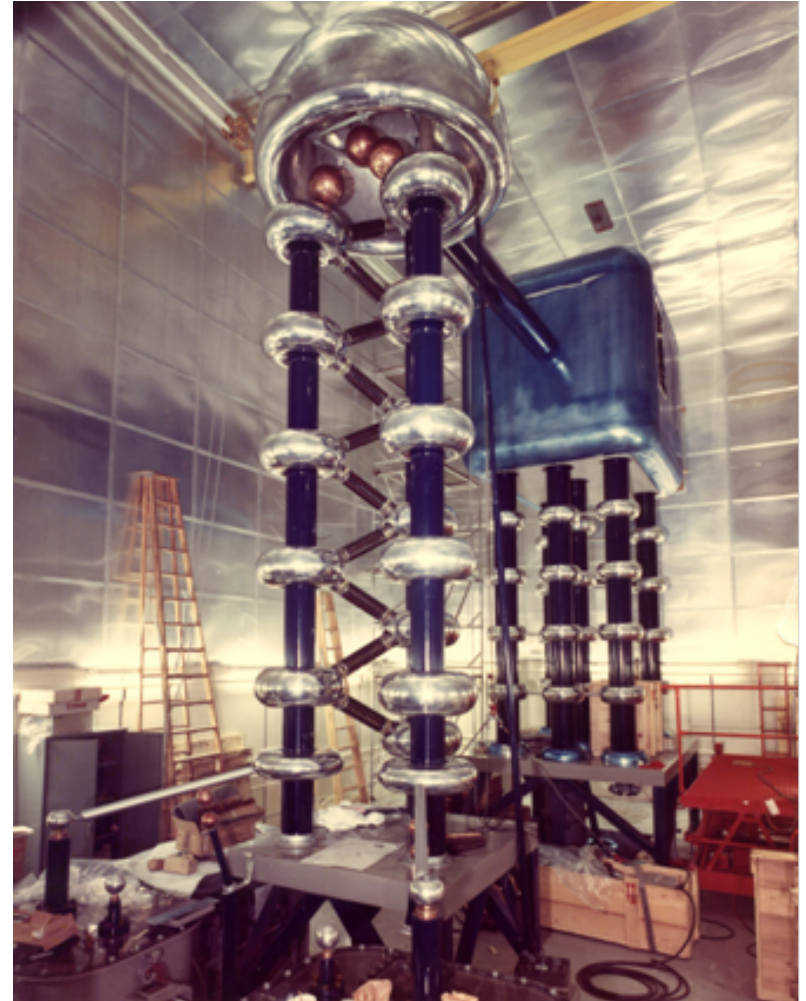
Αναπτύχθηκε από τους John D. Cockroft and Ernest T. S. Walton στο Cavendish Laboratory στην Αγγλία.

Αποτελείται από ένα διαιρέτη τάσης πολλών βημάτων ο οποίος επιταχύνει γραμμικά μέσω σταθερών βημάτων.

Διάκριση για την πρώτη πυρηνική αντίδραση βομβαρδίζοντας λίθιο με πρωτόνια.

Οι Cockroft και Walton μπορούσαν να φτάσουν σε ενέργειες μερικών εκατοντάδων KeV από τον επιταχυντή με άνω **όριο το 1 MeV**.

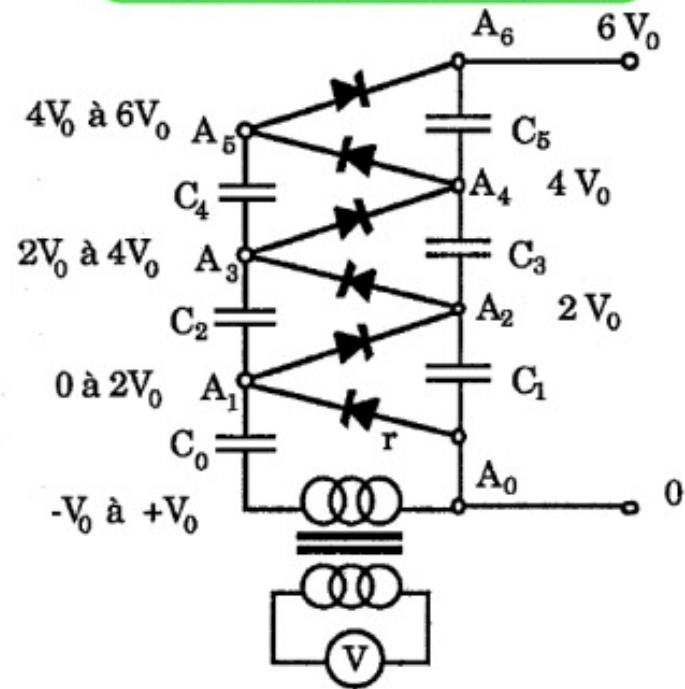
Το άνω όριο επιβάλλεται από ηλεκτρικές εκκενώσεις.



Cockroft-Walton accelerator (CERN proton pre-injector, old)

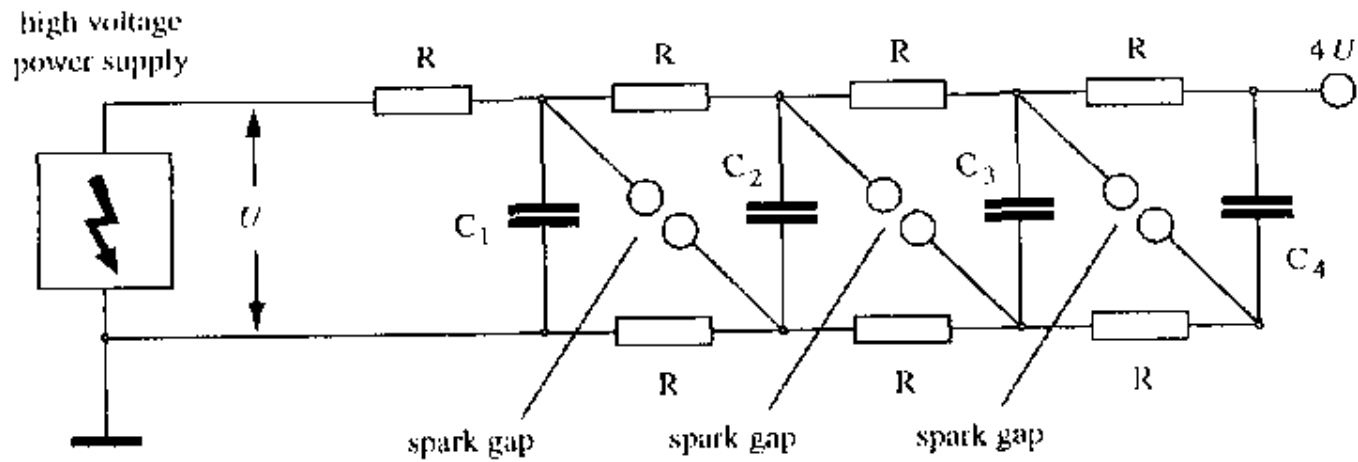


High voltage unit composed by a multiple rectifier system



CERN: 750 kV, used until 1993

Γεννήτρια Marx



Επιταχυντής Van de Graaf

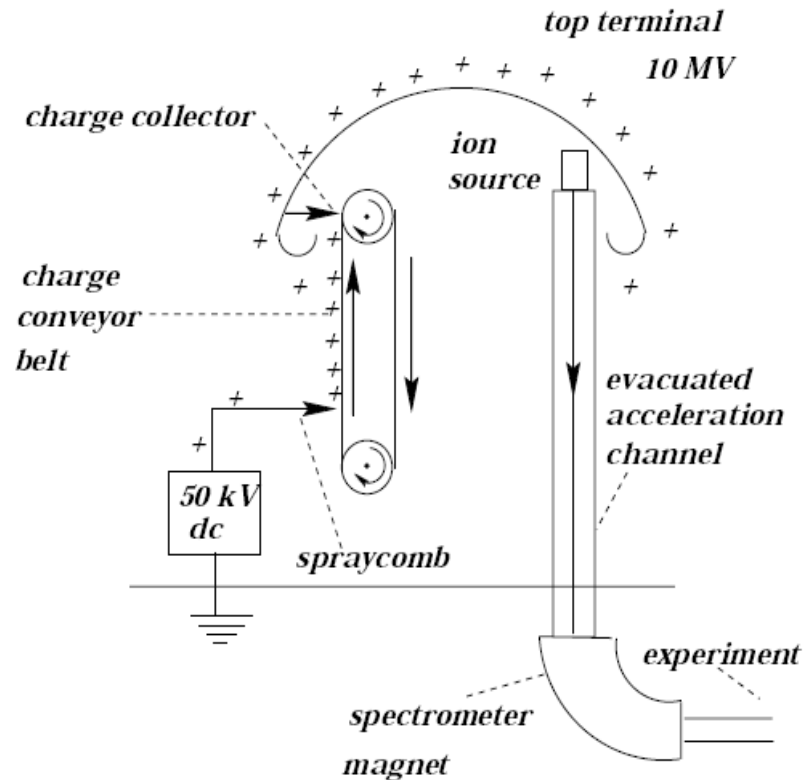
● Single Unit:

Το άνω όριο στις DC υψηλές τάσεις επεκτάθηκε με την ανάπτυξη του επιταχυντή Van de Graaf (1930).

Χρησιμοποιήθηκε μονωτική ζώνη για τη μεταφορά φορτίων σε μια αγώγιμη περιοχή, με την ίδια αρχή της γεννήτριας Van de Graaf

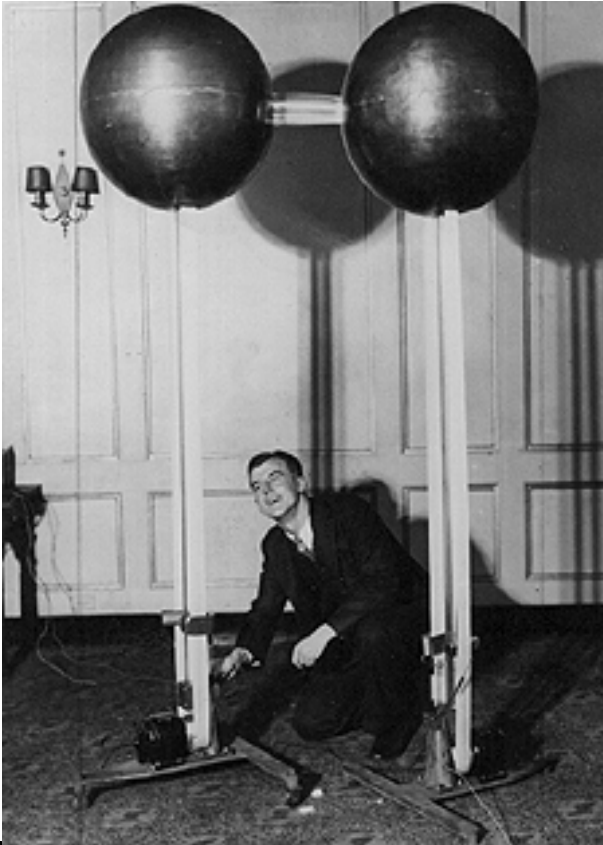
Ο σωλήνας επιτάχυνσης για τα σωματίδια ήταν μονωμένος με αέριο υπό πίεση.

Έτσι έγινε δυνατή η επίτευξη υψηλότερης τάσης απ' ό,τι ο διαιρέτης τάσης του επιταχυντή [Cockroft-Walton](#), ο οποίος περιορίζονταν από εκκενώσεις (spark discharges).

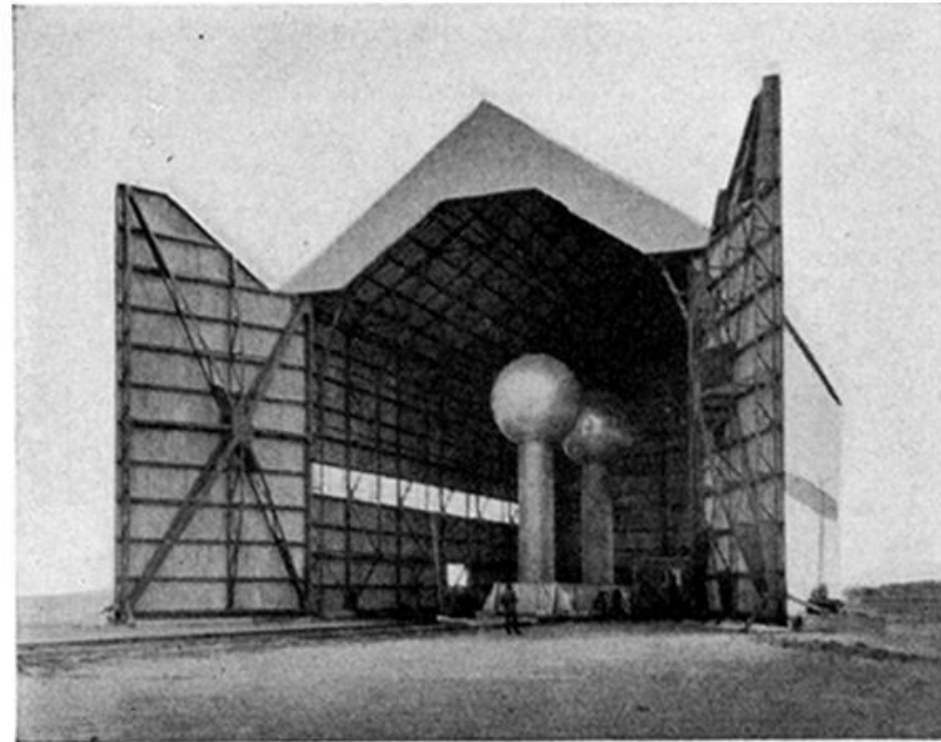


$V = 10 \text{ MVolt}$
 $_{max}$

Van de Graaff generator



This is an early Van de Graaff generator being demonstrated by Robert J. Van de Graaff, himself.

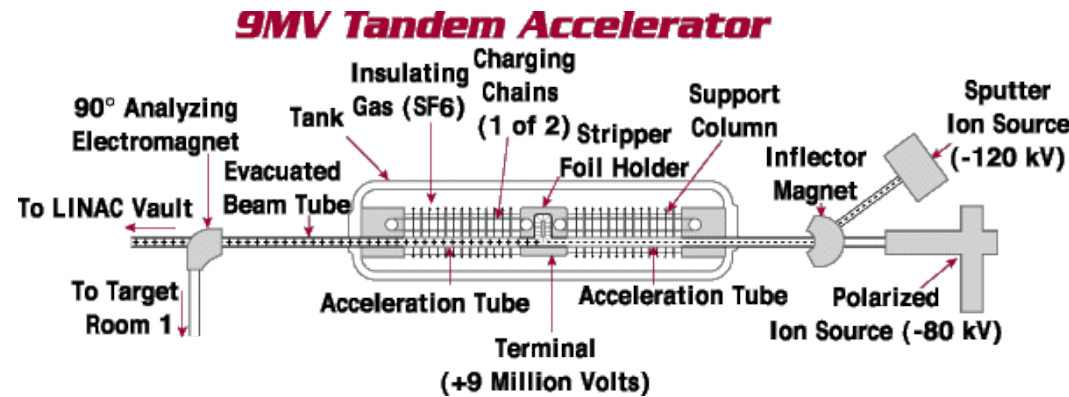
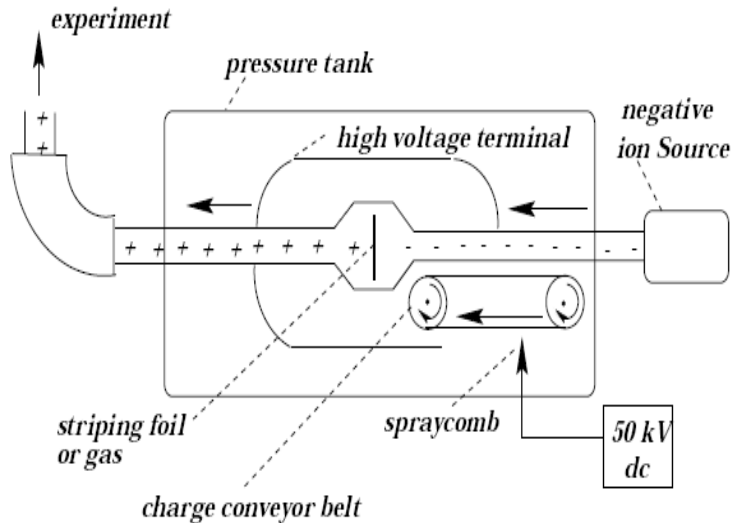


Round Hill electrostatic generator

Van de Graaff - Tandem

Van de Graaff Generator

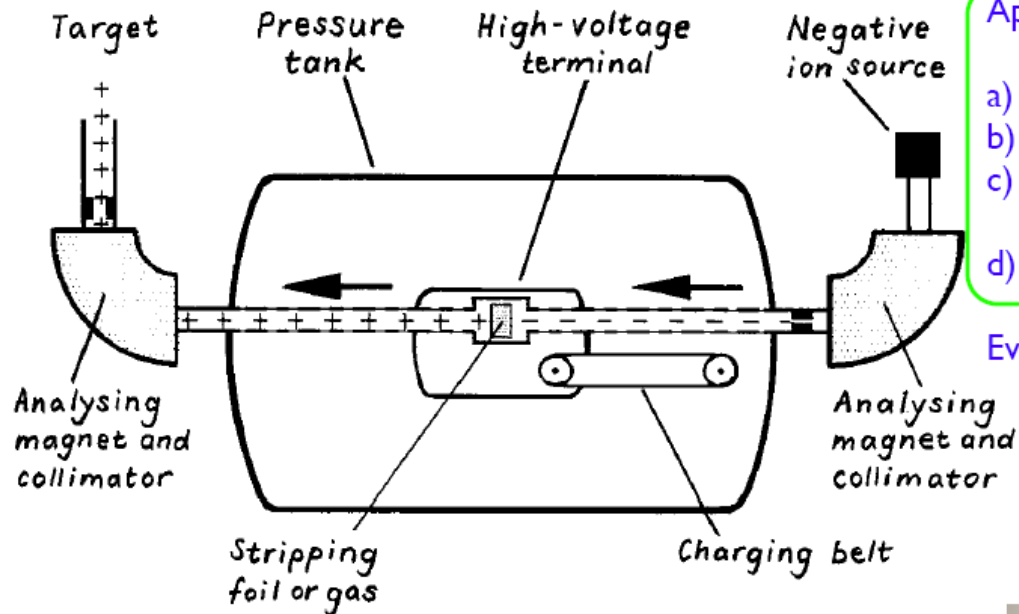
● Tandem generator: (1936)



$V = 25 \text{ MVolt}$
 $_{max}$

Tandem

Tandem



Application of Van der Graaf generator

- Source of negative ions (150 keV)
- Van Der Graff column (25 MV)
- Stripping foil
change in charge
- Further re-acceleration

Everything in a pressurized vacuum tank

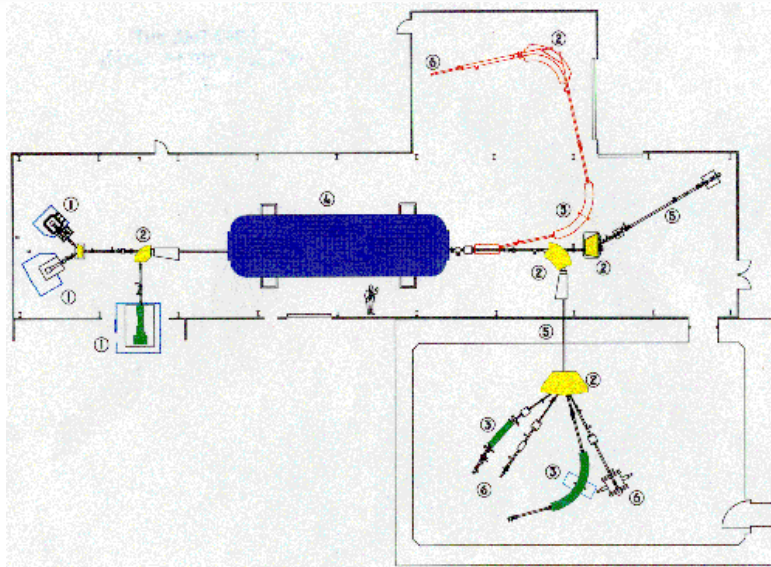
Since negative and positive multicharge states are used, different energies can be obtained

Current applications:

- Low energy injector for Ions
Still in use at Brookhaven (US) as injector for Cu and Au ions
- Compact system for "other uses"
Dating of samples at Louvre.



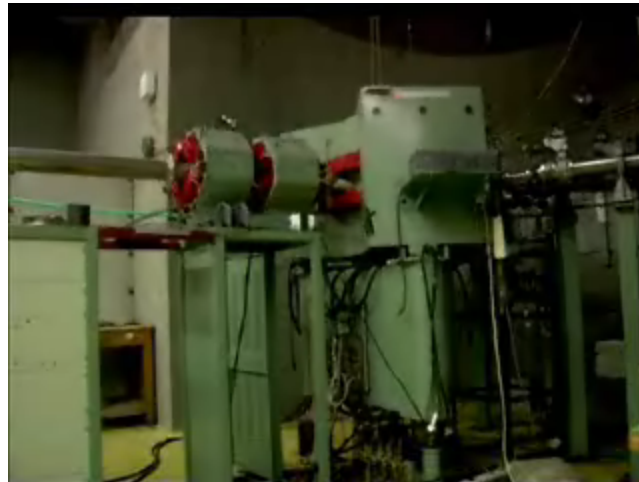
Tandem ANTARES



1. Πηγή ιόντων (αρνητικών)
2. Επιτάχυνση με ηλεκτροστατικά πεδία (~kV)
3. Εκτροπή με μεγάλο ηλεκτρομαγνήτη σε ακριβή γωνία (ιόντα διαφορετικής μάζας χάνονται)
4. Μέσα στον επιταχυντή τα ιόντα επιταχύνονται με την έλξη από πολύ υψηλό θετικό δυναμικό στο κέντρο του δοχείου πίεσης.
5. Στο κέντρο τα ιόντα χάνουν μερικά ηλεκτρόνια και γίνονται θετικά (stripped).
6. Επιταχύνονται με απώθηση απο το πολύ υψηλό θετικό δυναμικό.

Γιαυτό ονομάζεται Tandem (διαδοχικός) γιατί έχει δύο στάδια επιτάχυνσης.

Tandem (Δημόκριτος)

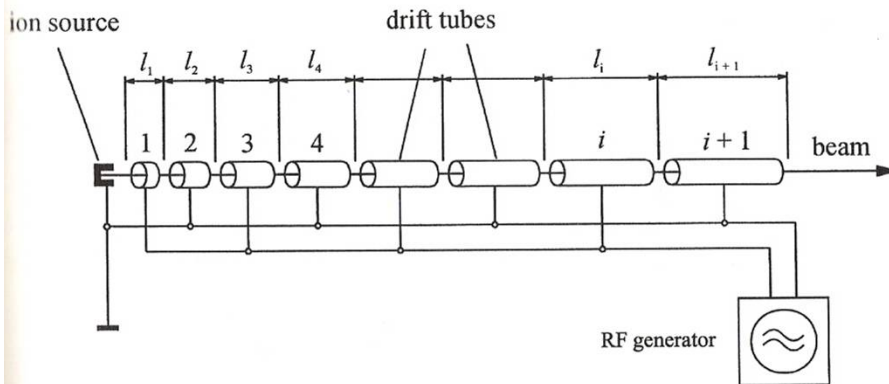


Μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία

Ηλεκτροστατικά πεδία -> δημιουργία “κορόνας”

Μεταβαλλόμενα πεδία (1925) **Ising**

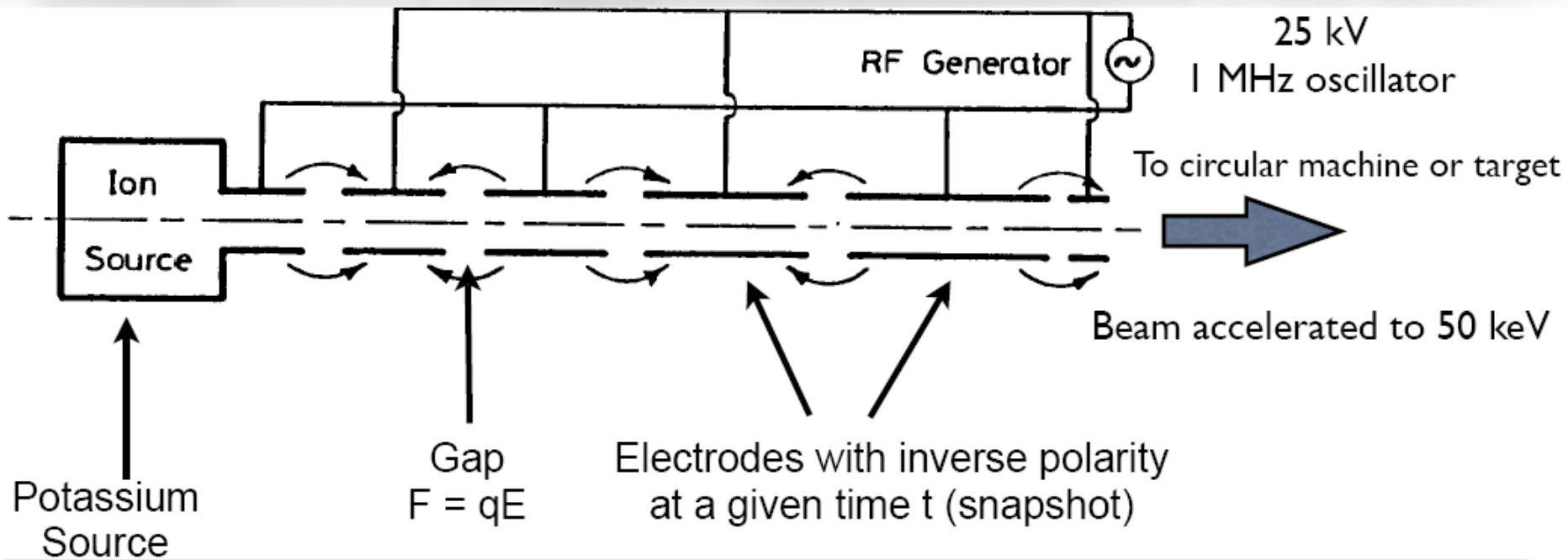
Επιτυχημένο τεστ για γραμμικό επιταχυντή (1928) **Wideroe**



Δομή :

1. Μια σειρά σωλήνων ολίσθησης συνδεδεμένοι “εναλλακτικά” με ένα ταλαντωτή υψηλής συχνότητας.
2. Τα σωματίδια επιταχύνονται στα κενά μεταξύ των σωλήνων.
3. Για σταθερή συχνότητα ταλαντωτή, το μήκος των σωλήνων αυξάνει καθώς αυξάνει και η ταχύτητα.
4. Η δέσμη είναι σε πακέτα (pulsed)

Wideroe Linac



Ο πρώτος γραμμικός επιταχυντής κατασκευάστηκε με σωλήνες ολίσθησης (drift tubes) που χωρίζονται με διάκενα επιτάχυνσης και τροφοδοτούνται από μια γεννήτρια RF (1928).

Το μήκος των σωλήνων πρέπει να αυξάνει γιατί τα σωματρία δεν είναι σχετικιστικά.

Με την αύξηση της ενέργειας (ταχύτητας) το σωματριο πρέπει να βρίσκεται για περισσότερο χρόνο μέσα σε σωλήνα (Faraday Cage) ώστε να είναι σε φάση με το εναλλασσόμενο πεδίο.

Όριο: μετά από μια ενέργεια, το μήκος των σωλήνων γίνεται πολύ μεγάλο. Η συχνότητα πρέπει να αυξηθεί ~ 10 MHz, και πρέπει να περιοριστεί μέσα σε δοχείο (resonator) για την αποφυγή απωλειών του πεδίου.

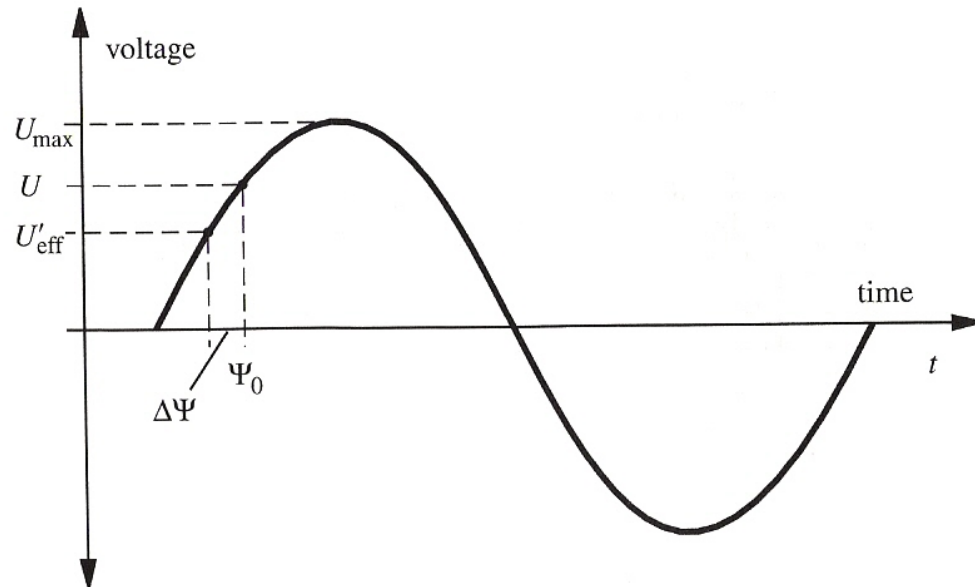
Μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία

Πρόβλημα !

Μη συγχρονισμός σωματιδίων και πεδίου RF.

$$E_i = iqU_{max} \sin \psi_0$$

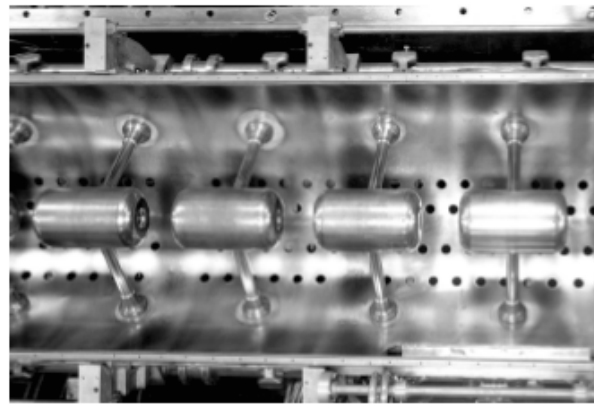
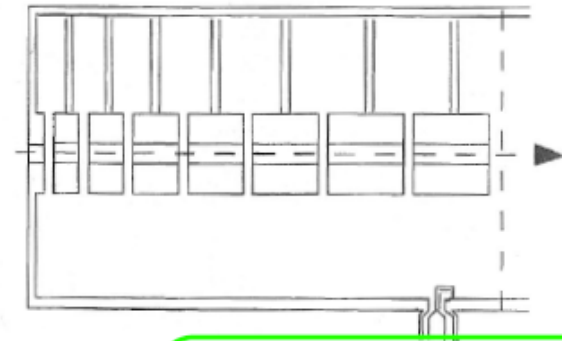
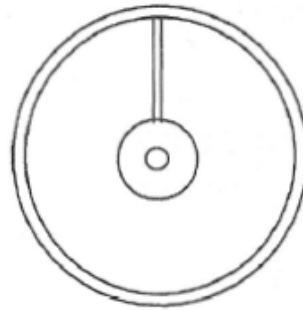
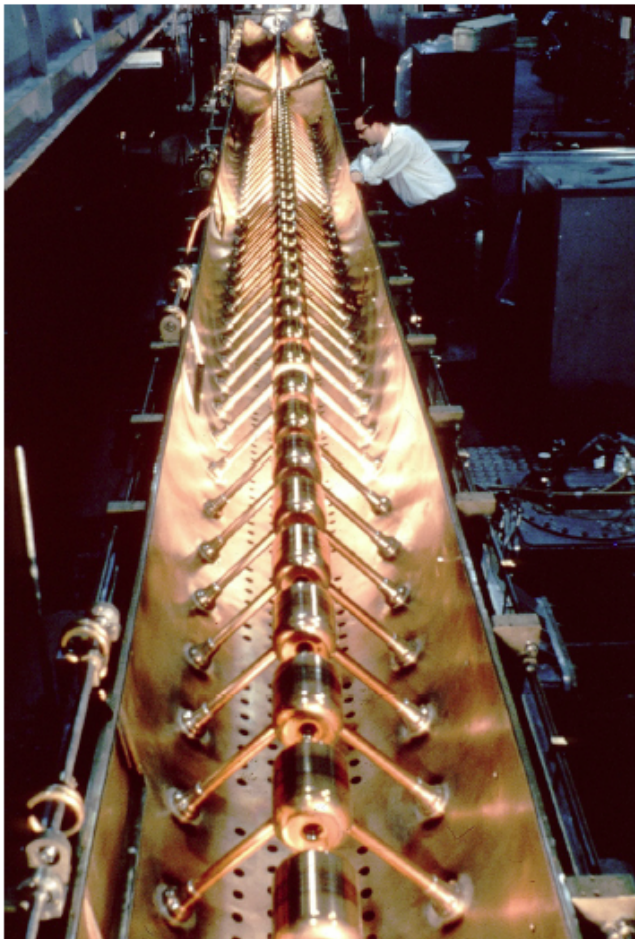
Phase focusing



Alvarez drift tube linac

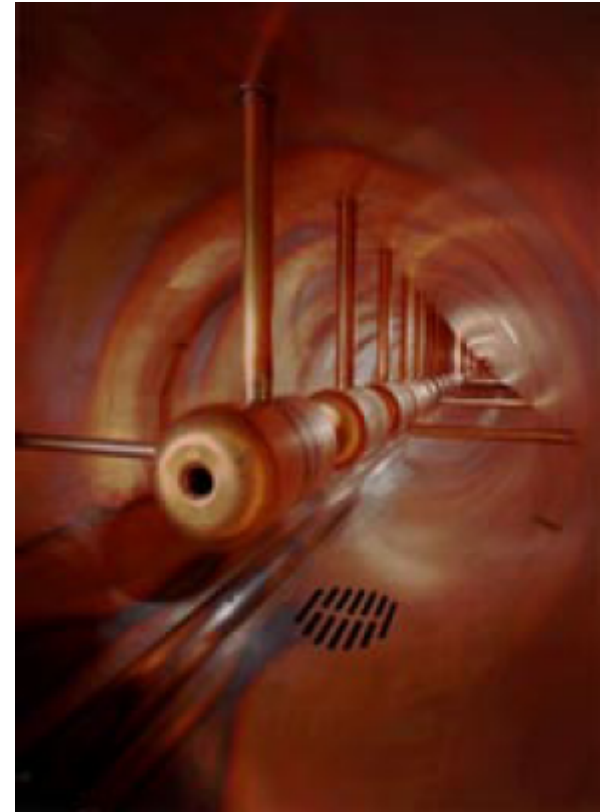
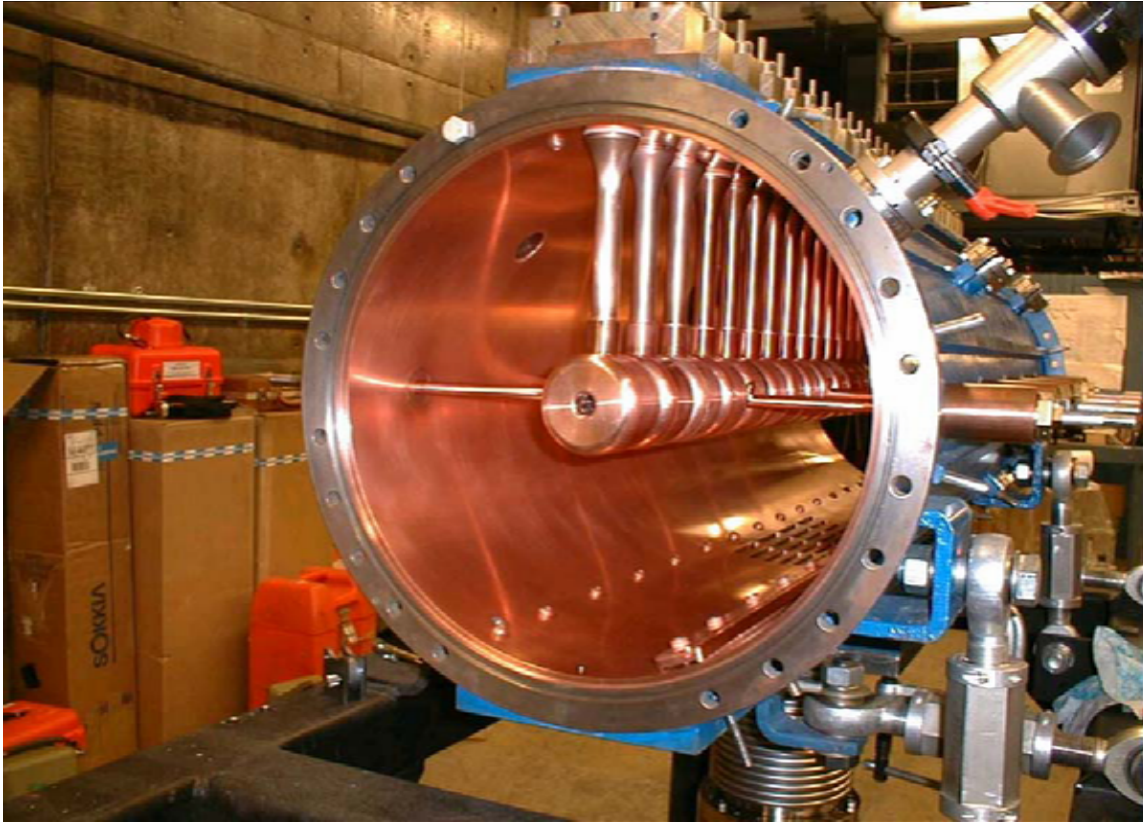
Όπως και στον Widerøe Linac, αποτελείται από σωλήνες ολίσθησης με διάκενα, αλλά το πεδίο δημιουργείται μέσα σε κοιλοότητες συντονισμού. Η συχνότητα του πεδίου \rightarrow 200 MHz

Currently we have two Linacs at CERN with Alvarez structure, for protons and ions.



Εσωτερική δομή (Alvarez type). Οι σωλήνες ολίσθησης στηρίζονται σε stems μέσω των οποίων μεταφέρονται το ρεύμα και το νερό ψύξης για τους τετραπολικούς μαγνήτες (που βρίσκονται μέσα στους σωλήνες). Linac I, επιταχύνει πρωτόνια στα 50 MeV.

ALVAREZ structure

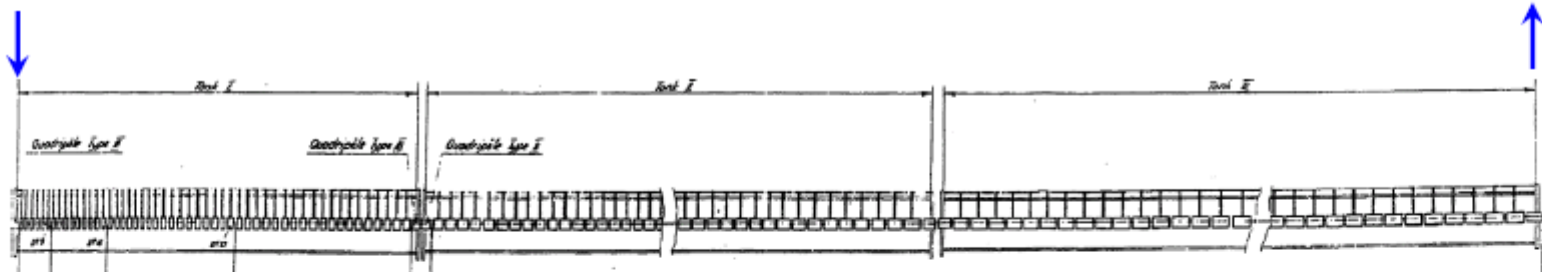


Examples (1)

CERN 50 MeV Proton LINAC
Frequency: 202.56 MHz

Input
 $T = 50 \text{ keV}$
 $\beta = 0.03996$
 $\beta\lambda = 59.1 \text{ mm}$

Output
 $T = 50 \text{ MeV}$
 $\beta = 0.31405$
 $\beta\lambda = 464 \text{ mm}$



ALVAREZ structure (Drift tubes with quadrupole magnets)

Κυματοδηγοί (waveguides)

Όλοι οι σύγχρονοι επιταχυντές χρησιμοποιούν ισχυρά συστήματα RF με συχνότητες εκατοντάδων MHz – GHz.

Οι κυματοδηγοί χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση με τη δέσμη γιατί μπορούν να μεταφέρουν μεγάλη ισχύ χωρίς ιδιαίτερες απώλειες.

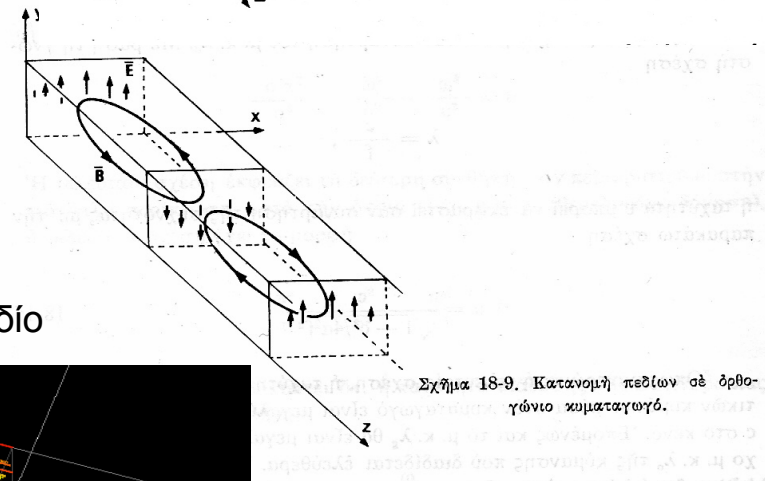
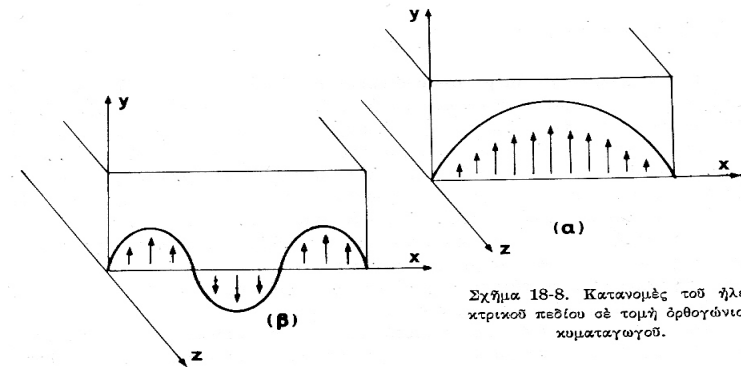
Ιδιότητες κυματοδηγών

- Κοίλοι μεταλλικοί σωλήνες χρησιμοποιούνται για τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- Επιλογή του υλικού με κριτήριο την επιφανειακή αντίσταση (χαλκός).
- Η εφαπτομενική συνιστώσα του E στην επιφάνεια τέλειου αγωγού μηδενίζεται.
- Η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου κάθετη στην επιφάνεια τέλειου αγωγού μηδενίζεται.
- Υπάρχει κάτω όριο στη συχνότητα των κυμάτων που διαδίδονται σ'ένα κυματοδηγό. (cutoff frequency).
- Υπάρχουν δύο περιοχές συχνοτήτων, ελεύθερης διάδοσης και απορρόφησης.
- Κύματα TE, $E_z=0$ & $B_z \neq 0$
- Κύματα TM, $E_z \neq 0$ & $B_z=0$

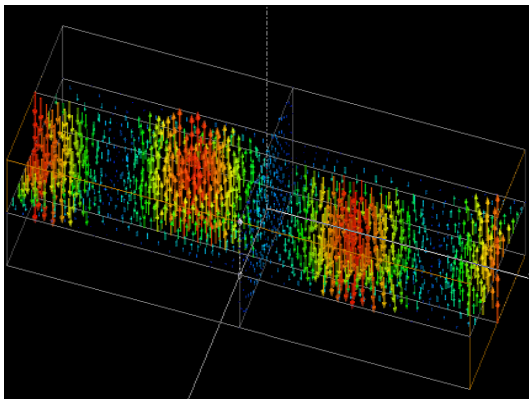
Κυματοδηγοί (waveguides)

Χρήση κυματοδηγών (waveguide)

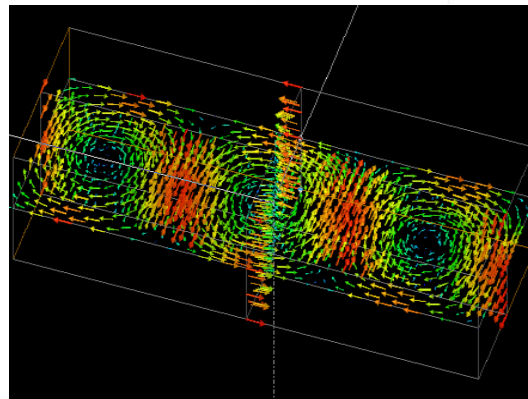
1. Υπάρχει κάτω όριο στη συχνότητα των κυμάτων που διαδίδονται σ' ένα κυματοδηγό. (cutoff frequency)
2. Η ταχύτητα φάσης σε ένα κυματοδηγό μεταβάλλεται με τη συχνότητα.
3. Η ταχύτητα φάσης των κυμάτων μέσα στον κυματοδηγό είναι μεγαλύτερη της c .



Ηλεκτρικό πεδίο



Μαγνητικό πεδίο

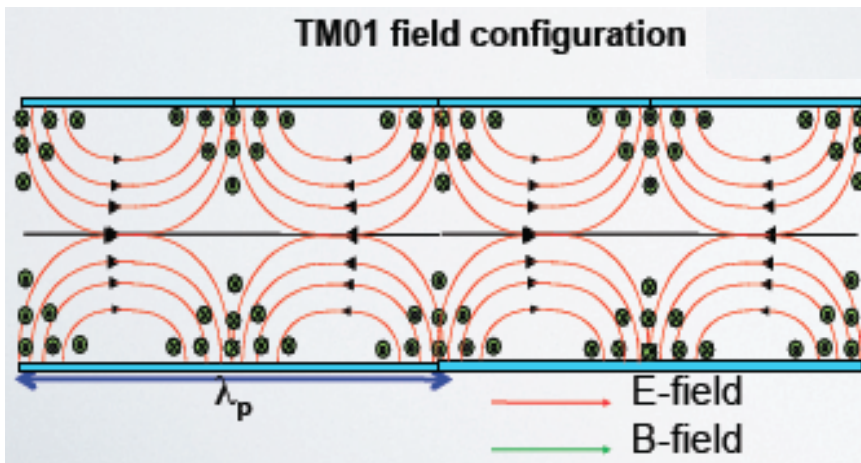


RF κοιλότητες

Οι RF κοιλότητες είναι το μέσο για την επιτάχυνση των σωματιδίων.

Συνήθως είναι μερικές δεκάδες εκατοστά (μήκος), χρησιμοποιούν ένα ΗΜ κύμα του οποίου η συχνότητα έχει ρυθμιστεί κατά τρόπο ώστε να δίνει τα σωματίδια μια επιταχυνόμενη ώθηση καθώς περνούν από μέσα.

Το μέγεθος της κοιλότητας είναι πολύ σημαντικό, διότι πρέπει να συνδέεται με τη συχνότητα του στάσιμου κύματος.



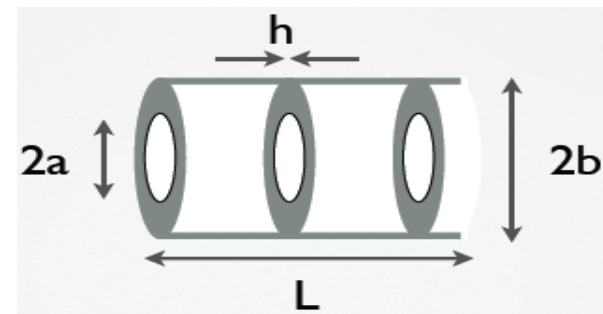
Κύματα TM, $E_z \neq 0$ && $B_z = 0$

- Κάθε συχνότητα αντιστοιχεί σε μια ταχύτητα φάσης
- Η ταχύτητα φάσης είναι πάντα $v_{ph} > c$.

$$v_{gr} = \frac{d\omega}{dk_z}$$

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k_z}$$

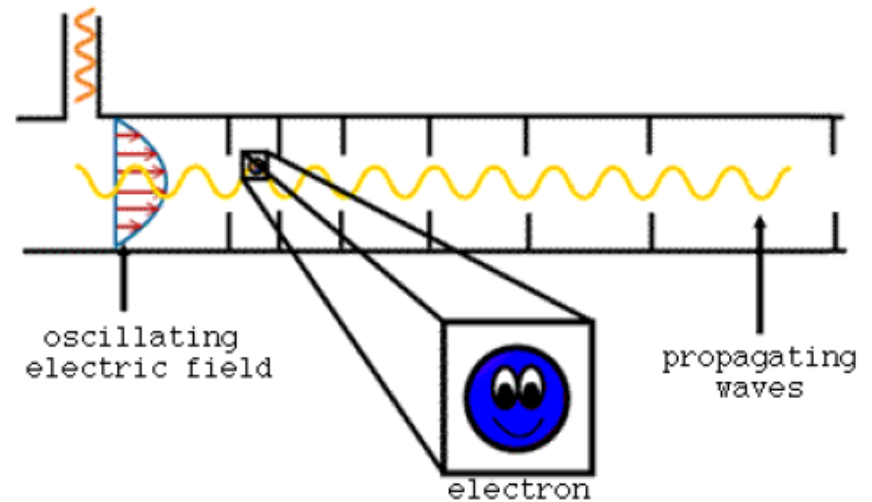
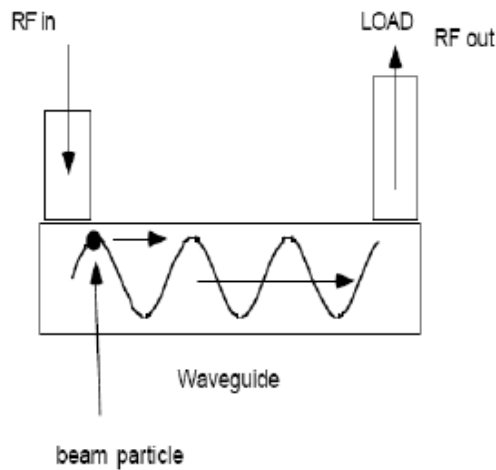
- Θα πρέπει να μειωθεί η v_{ph} .
- Βάζοντας εμπόδια (ίριδες) στον κυματοδηγό



RF κοιλότητες

- Οι RF κοιλότητες λειτουργούν ως
- κοιλότητες με οδεύοντα κύματα και ως
 - κοιλότητες με στάσιμα κύματα

Travelling wave cavity:



Οι κοιλότητες λειτουργούν σε κατάσταση TM: Το ηλεκτρικό πεδίο E (διαμήκης συνιστώσα) παρέχει την επιτάχυνση.

RF κοιλότητες

Δομή 1: Οδεύοντα κύματα

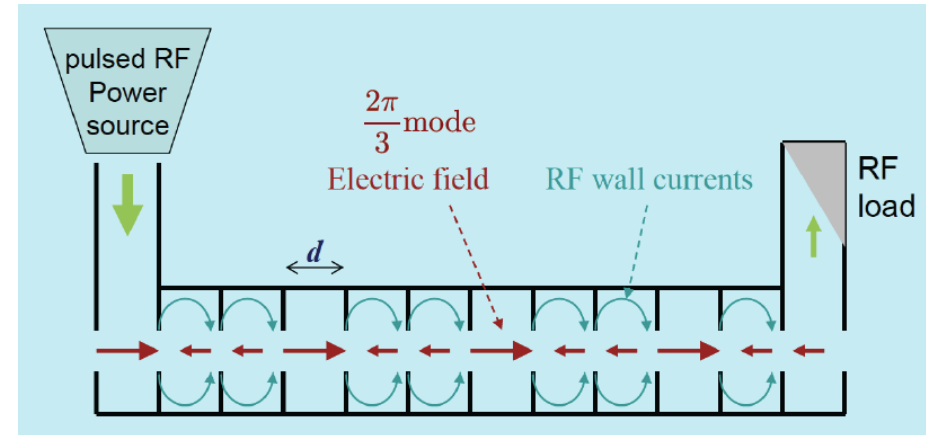
Τα σωματίδια κρατούνται σε φάση με το επιταχύνων κύμα.

Ταχύτητα φάσης κύματος $> c$ και πρέπει να μειωθεί στην ταχύτητα του σωματιδίου με μια σειρά από ίριδες των οποίων η πολικότητα αλλάζει με το χρόνο.

Για να ταιριάζει η φάση των σωματιδίων με την πολικότητα, η απόσταση μεταξύ των ιρίδων αυξάνει προς το τέλος της δομής καθώς και η ταχύτητα των σωματιδίων αυξάνει.

Αλλά για τα ηλεκτρόνια στα 3 MeV η ταχύτητα είναι ήδη $0.99c$.

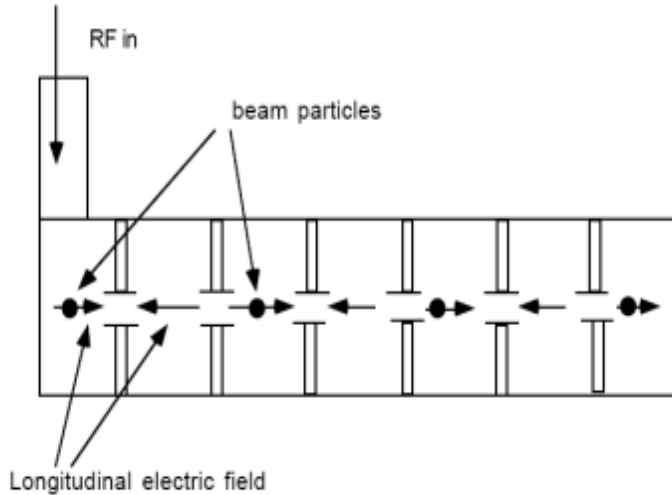
Τα οδεύοντα κύματα χρησιμοποιούνται σε πολύ βραχείς (μs) παλμούς (πακέτα), φτάνουν σε υψηλή απόδοση και υψηλό ρυθμό επιτάχυνσης ($\sim 100 \text{ MeV/m}$, CLIC).



Γενικά χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρόνια $\beta \sim 1$.

RF κοιλοτήτες

Κυλότητα στάσιμου κύματος



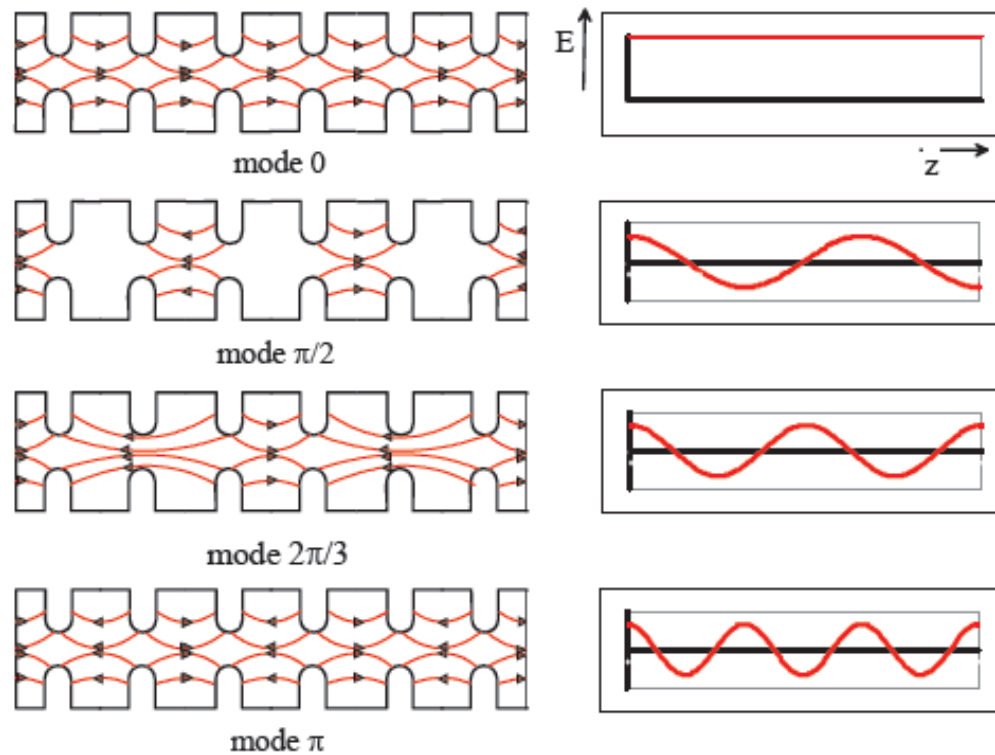
Κλείνοντας τις δύο πλευρές του κυματοδηγού ή της δομής με τις ίριδες, δημιουργούνται στάσιμα κύματα λόγω ανακλάσεων

Μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (ο χρόνος πλήρωσης της κοιλότητας) δημιουργείται μια μόνιμη κατάσταση στάσιμων κυμάτων.

Λόγω της οριακών συνθηκών μόνο ορισμένοι τρόποι ταλάντωσης (με συγκεκριμένες συχνότητες) είναι δυνατον να υπάρχουν.

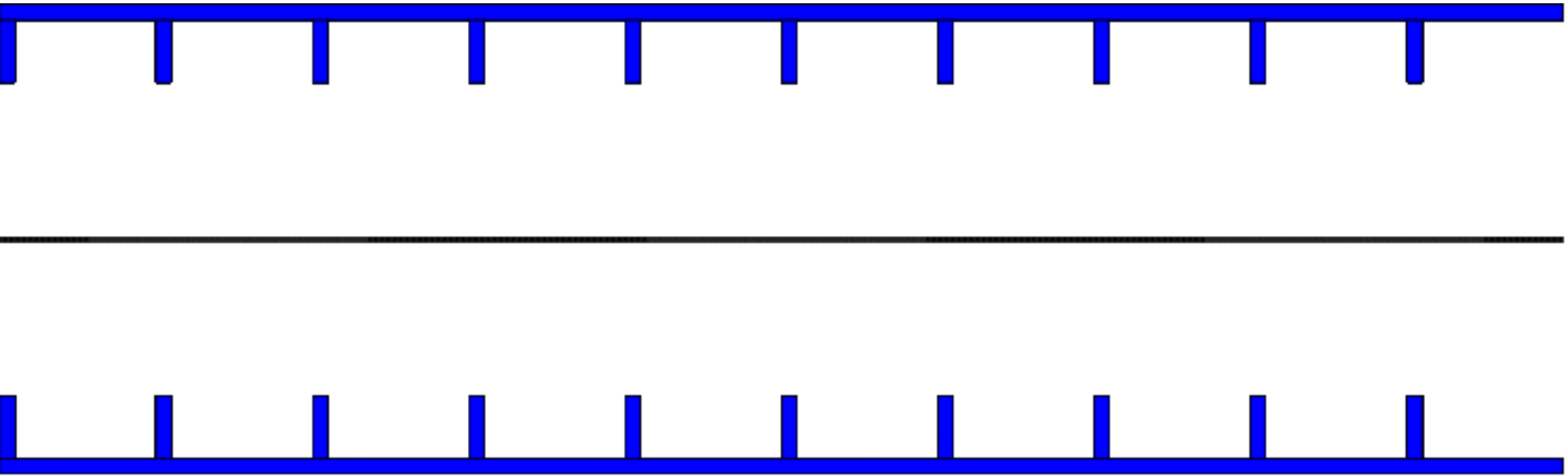
Οι διάφοροι τρόποι ($0, \dots, \pi/2, \dots, \pi, \dots$) αντιστοιχούν στις διαφορές φάσης μεταξύ των γειτονικών κελιών.

Κοιλότητες στάσιμου κύματος

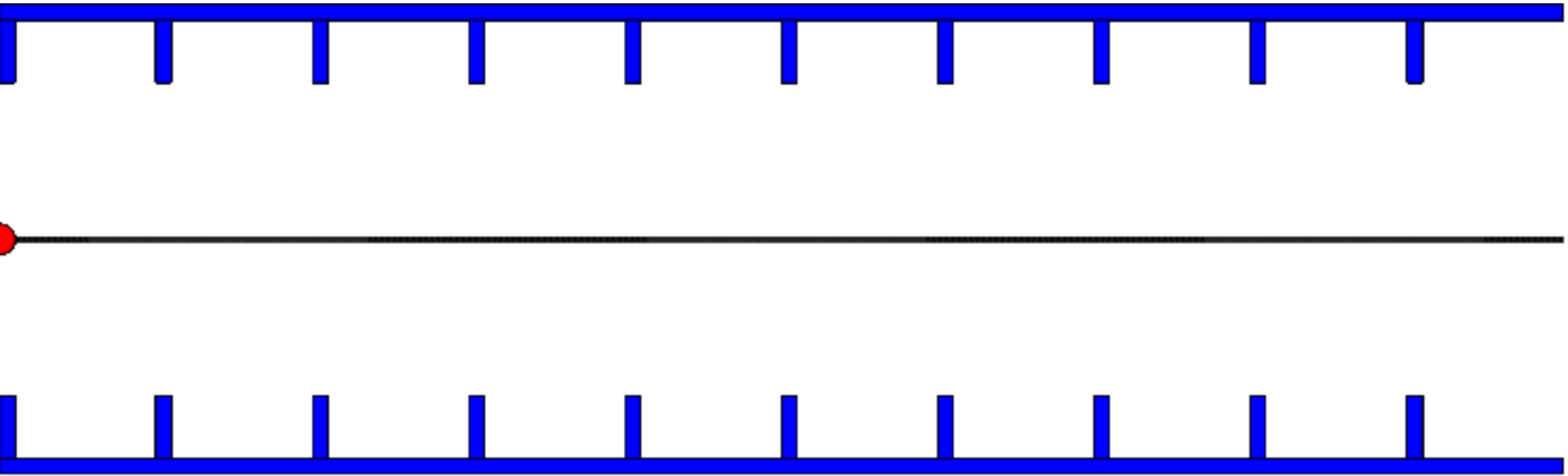


Οι διάφοροι τρόποι (0,... $\pi/2$,... π ,...) αντιστοιχούν στις διαφορές φάσης μεταξύ των γειτονικών κελιών.

Cavity Principle



Cavity Principle



Cavity/Accelerating Structure

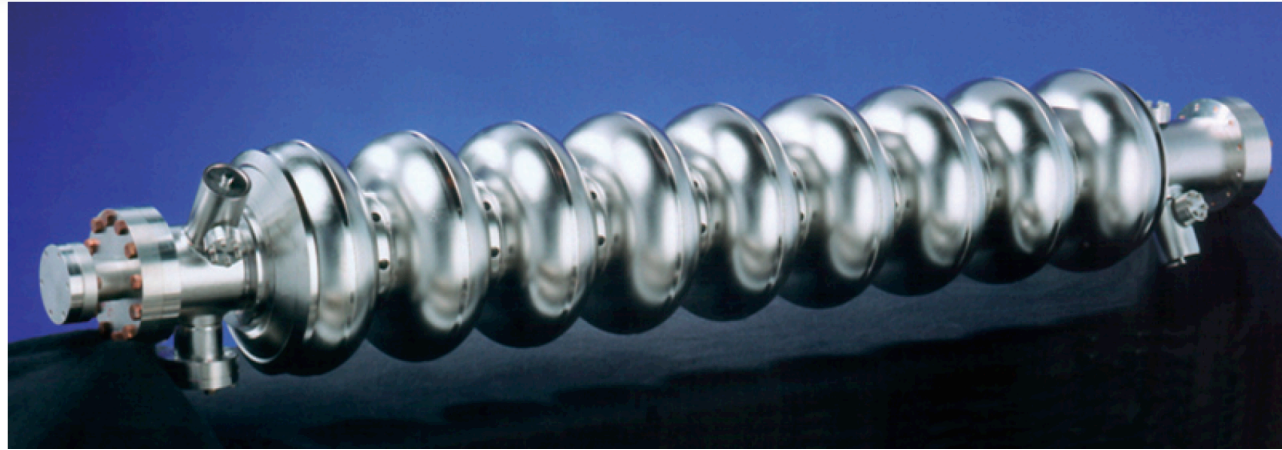
ILC cavity

1.3 GHz, superconducting

Target effective operational
31.5MV/m

Target gradient 35MV/m

$Q_0 \approx 10^{10}$



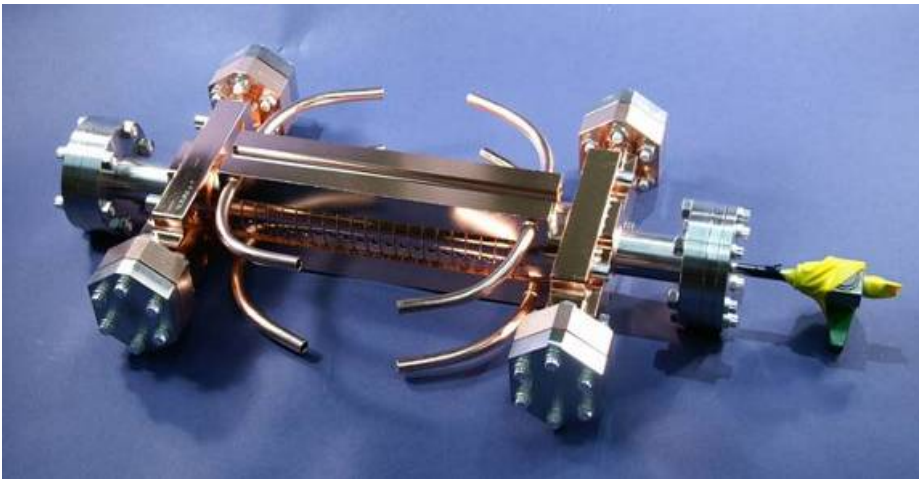
CLIC accelerating structure

12 GHz, normal conducting

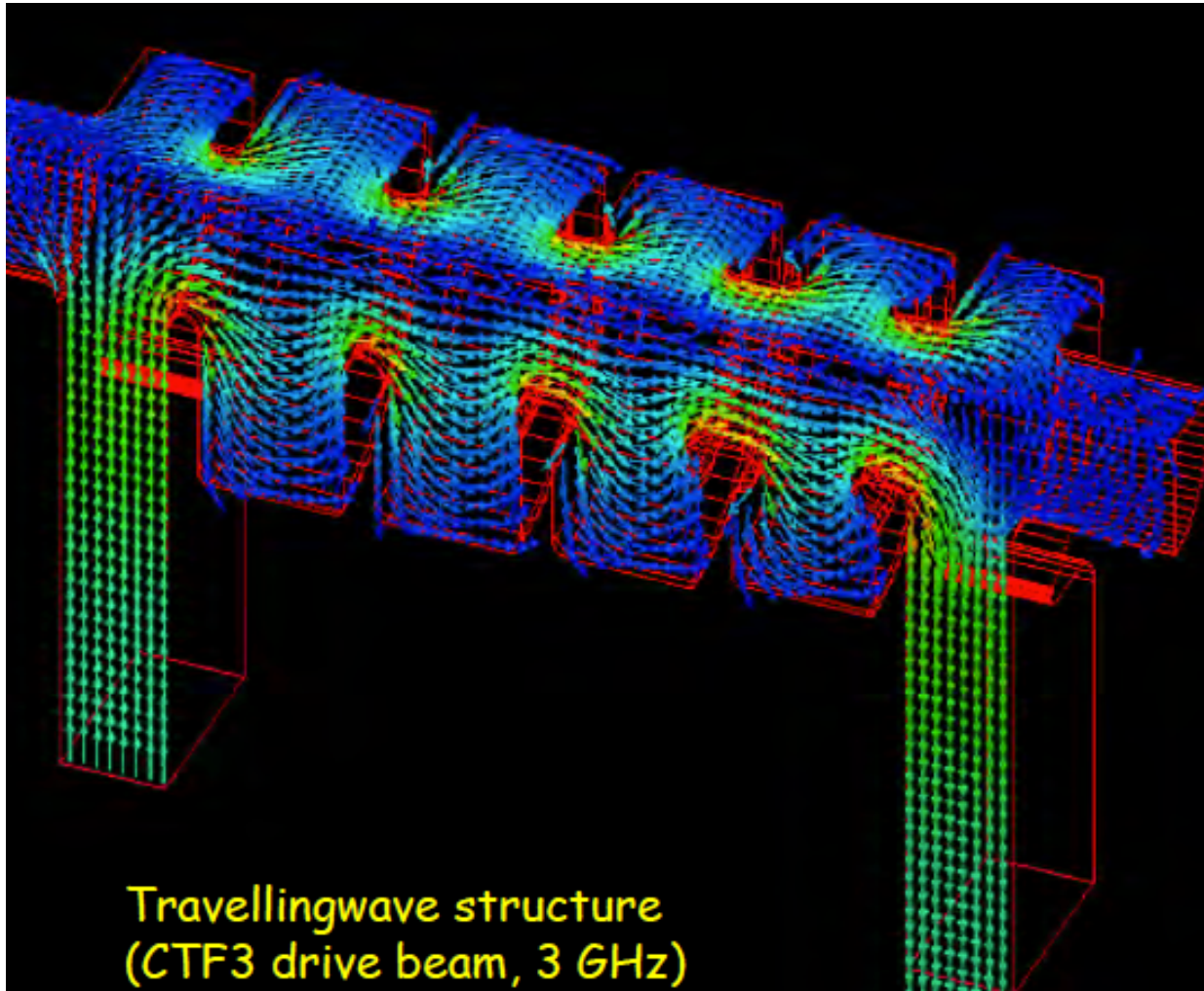
Target effective operational 100MV/m

Target unloaded gradient 120MV/m

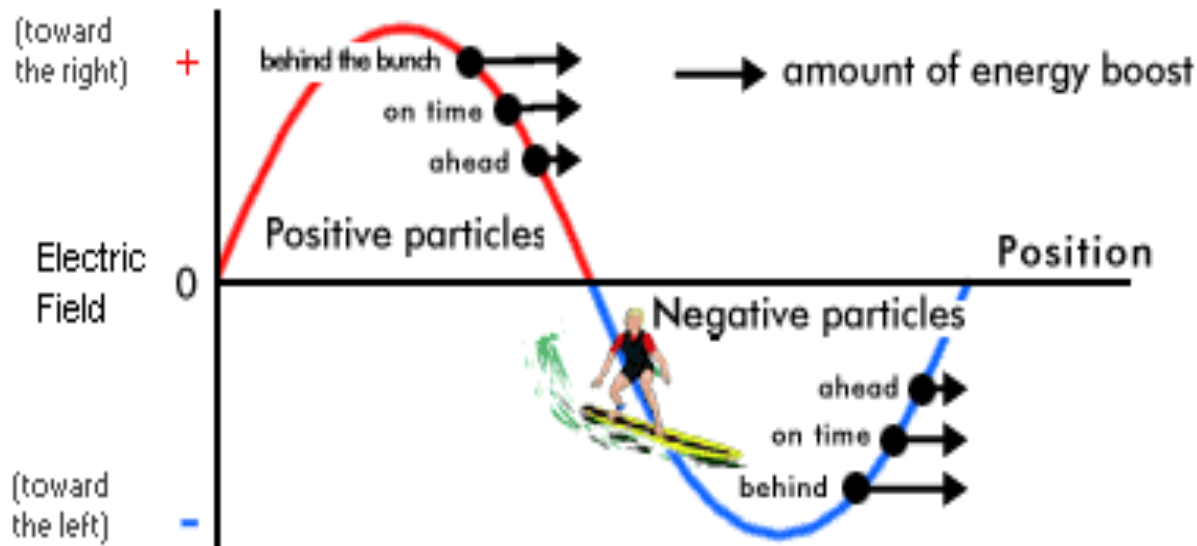
$Q_0 \approx 6 \cdot 10^3$



Waveguide coupling



RF κοιλοτήτες

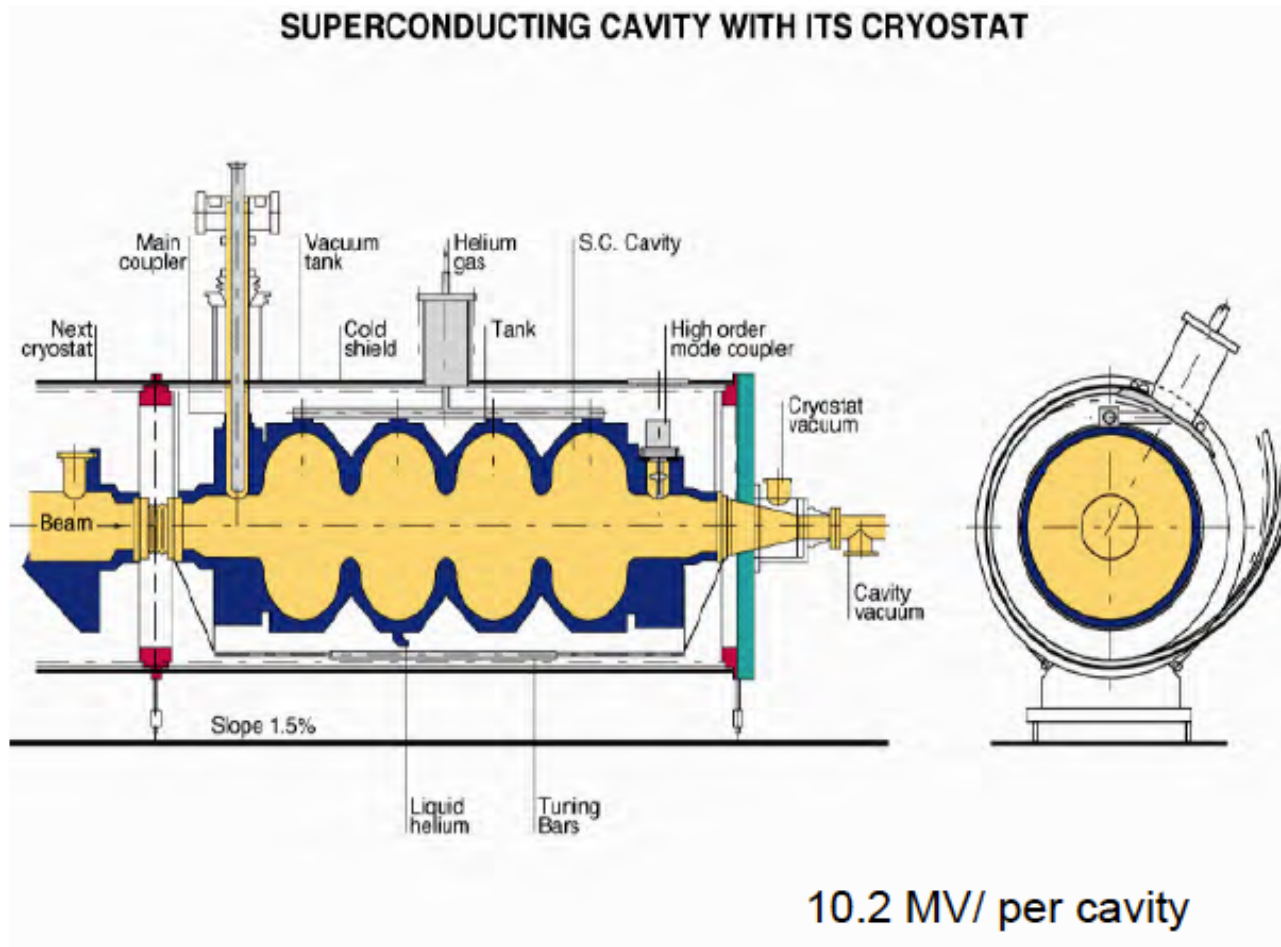


Ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό των RF κοιλοτήτων είναι ότι τα στάσιμα κύματα προσφέρουν ίση ώθηση στα ηλεκτρόνια που διέρχονται από την κοιλότητα σε μια κατεύθυνση και τα ποζιτρόνια (αντι-ηλεκτρόνια) που διέρχονται στην αντίθετη κατεύθυνση.

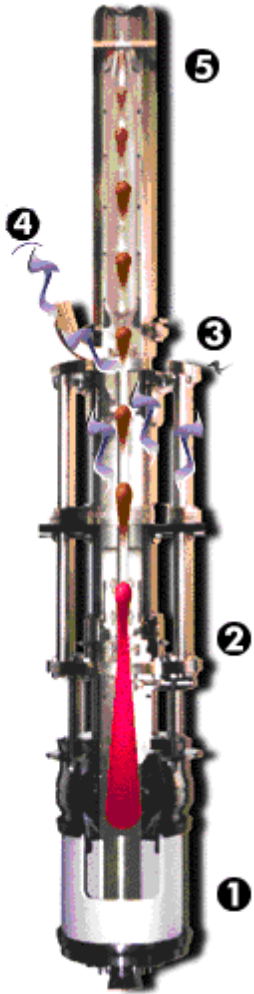
Συστήματα RF

- Χρησιμοποιούνται τόσο στους γραμμικούς (RF Linacs) όσο και στους κυκλικούς (synchrotrons).
- Βασικές παράμετροι της κοιλότητας είναι το ηλεκτρικό πεδίο και η συχνότητα. Γενικά ισχύει η σχέση $E_{\alpha} \lambda = \text{σταθ.}$
- Μεγαλύτερης συχνότητας συστήματα -> μεγαλύτερο επιταχύνον πεδίο.
- Normal conducting (NC) συστήματα κατασκευάζονται από χαλκό.
- Superconducting (SC) συστήματα χρησιμοποιούν Νιόβιο Nb.

LEP Superconducting cavities



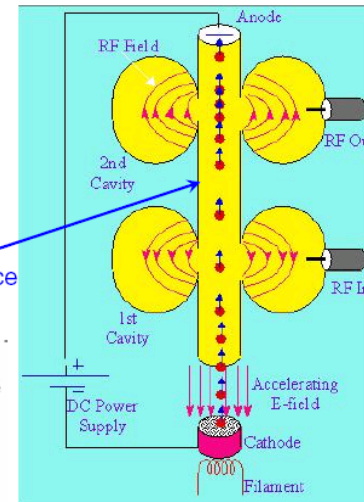
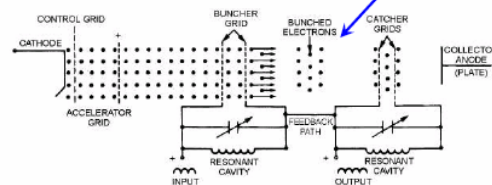
Klystron



In a klystron:

1. Το κανόνι ηλεκτρονίων παράγει τα ηλεκτρόνια.
2. Οι κοιλότητες ρυθμίζουν την ταχύτητα των ηλεκτρονίων έτσι που να φθάνουν σε πακέτα στην κοιλότητα εξόδου (output cavity).
3. Τα πακέτα των ηλεκτρονίων διεγείρουν μικροκύματα στην κοιλότητα εξόδου του Κλείστρου
4. Τα μικροκύματα “ρέουν” προς τον κυματοδηγό, ο οποίος τα μεταφέρει στον επιταχυντή.
5. Τα ηλεκτρόνια απορροφώνται στο τέλος της δέσμης.

- ◆ Filament (electron gun) emits electrons
- ◆ acceleration in DC field
- ◆ velocity modulation in first cavity
- ◆ bunching in drift space
- ◆ extraction of high intensity RF field in second cavity
- ◆ more than one cavity possible

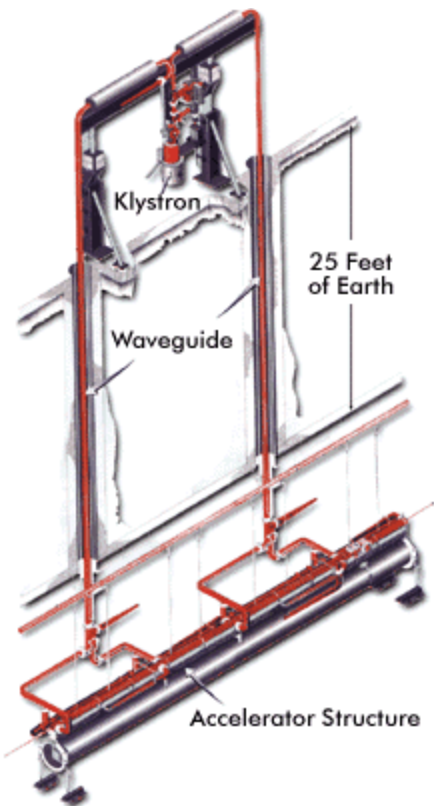


Linac

The [electromagnetic waves](#) that push the electrons in the linac are created by higher energy versions of the microwaves used in the microwave oven in your kitchen.

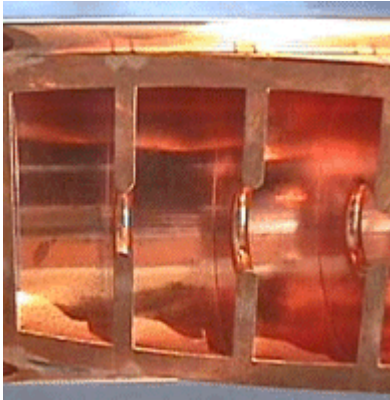
The [microwaves](#) from the [klystrons](#) in the [Klystron Gallery](#) are fed into the [accelerator](#) structure via the [waveguides](#).

This creates a pattern of [electric](#) and magnetic fields, which form an electromagnetic wave traveling down the accelerator.



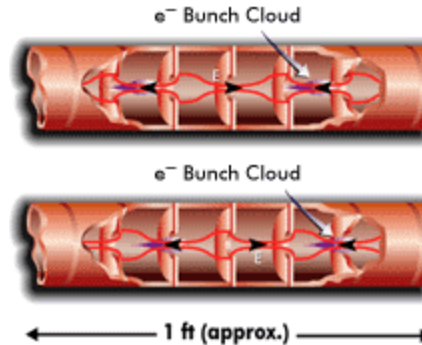
The 2-mile SLAC linear [accelerator](#) (linac) is made from over 80,000 copper discs and cylinders brazed together.

Linac

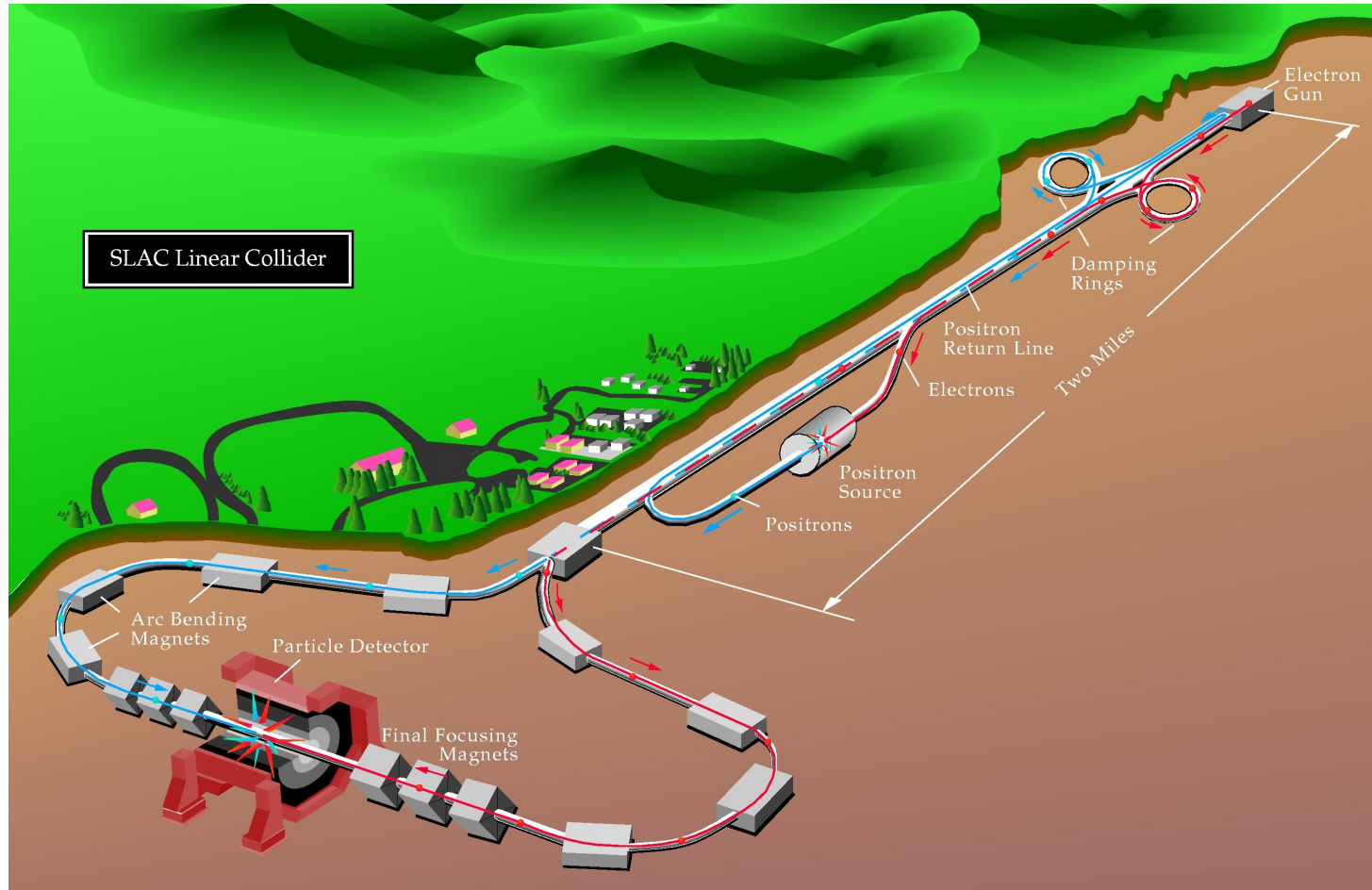


Το μέγεθος των κοιλοτήτων στον επιταχυντή αντιστοιχεί στο μήκος κύματος των μικροκυμάτων έτσι ώστε το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο επαναλαμβάνονται κάθε τρεις κοιλότητες κατά μήκος του επιταχυντή.

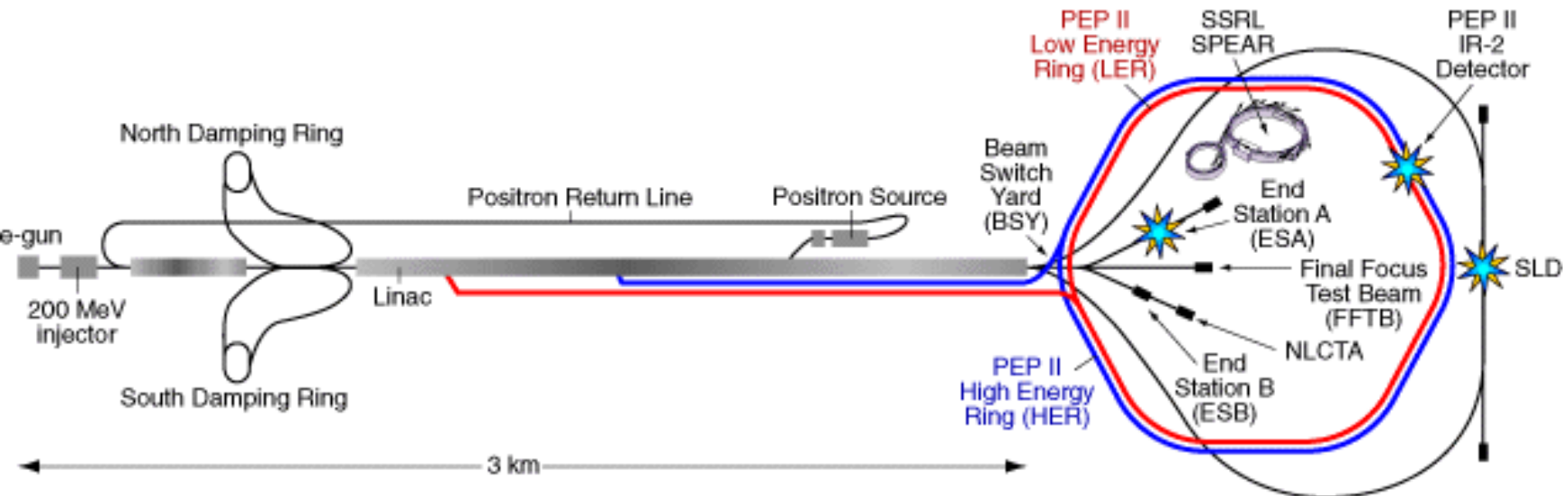
Αυτό σημαίνει, σε γενικές γραμμές, θα μπορούσαν να υπάρξουν πακέτα ηλεκτρονίων που ακολουθούν το ένα το άλλο σε απόσταση τρεις κοιλότητες, και δέσμες ποζιτρονίων στη μισή απόσταση ενδιάμεσα.



Γραμμικός επιταχυντής (SLAC)



Γραμμικός επιταχυντής (SLAC)



Τμήματα του επιταχυντή

Beam Switch Yard
Damping Rings
Electron Gun
Klystrons
Linac
Positron Production

Beam Switch Yard - Damping Ring

