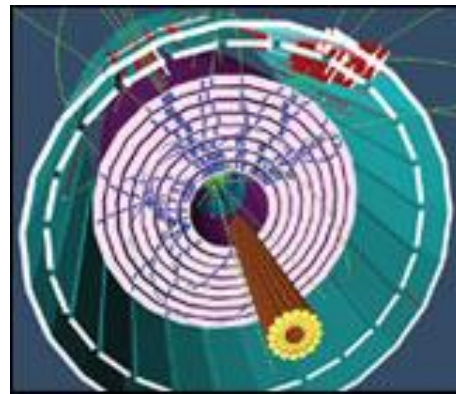


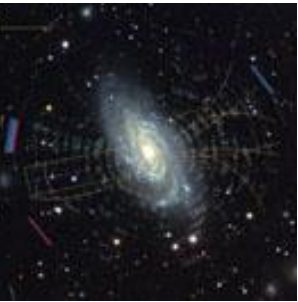
Επιταχυντές: Πηγαίνοντας πίσω στο χρόνο...



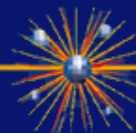
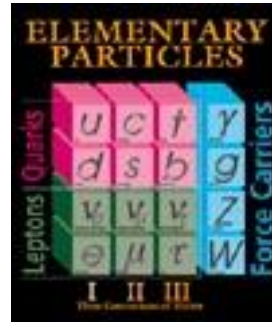
*Ανασκόπηση των Επιταχυντών:
Από τους CRT στις συγκρουόμενες δέσμες*

Η ιδέα είναι πολύ απλή...

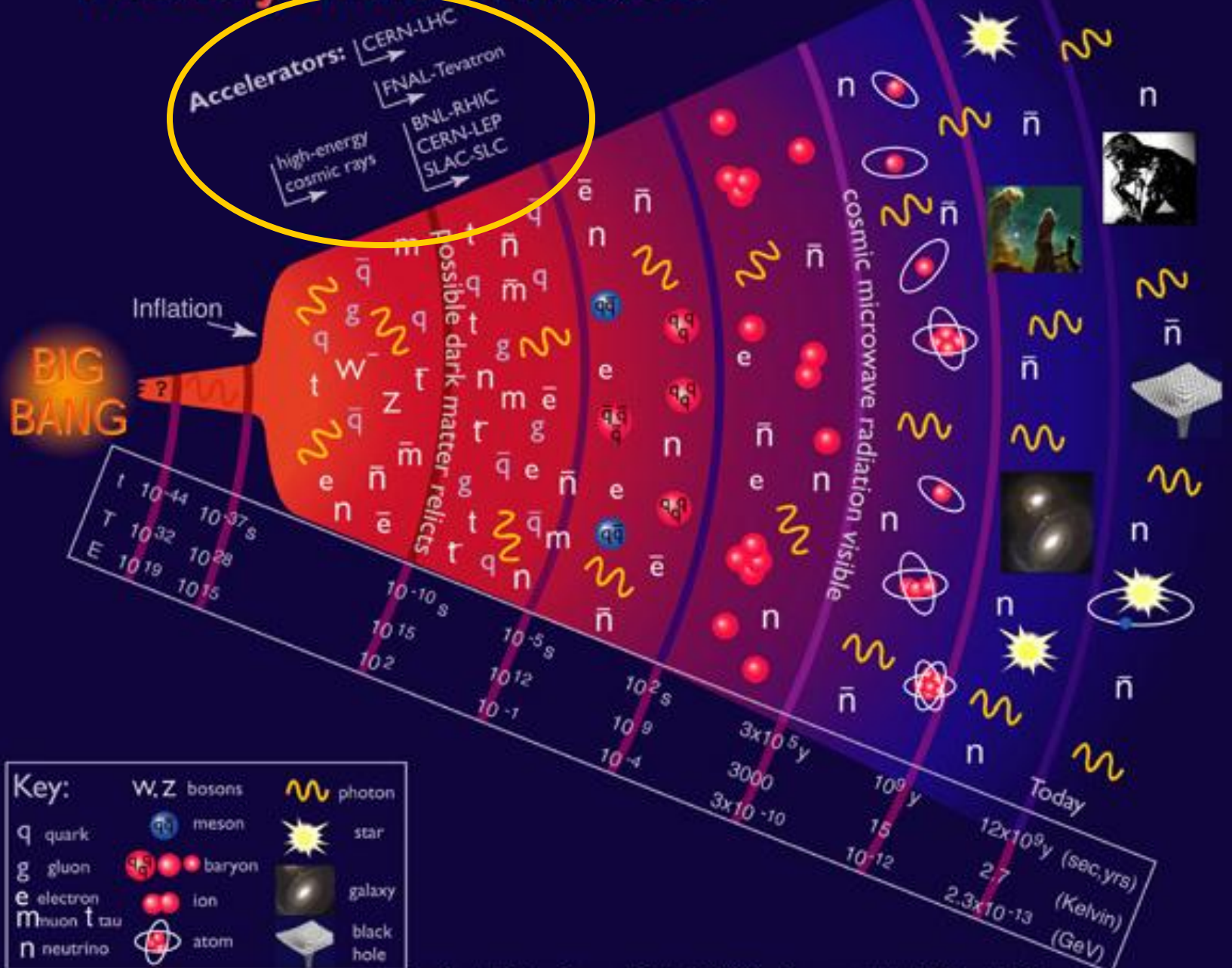
Παίρνοντας τα μικρότερα σωματίδια και δίνοντας τους την υψηλότερη δυνατή ενέργεια.



Από αυτή την απλή ιδέα έχει προέλθει η Φυσική Υψηλών Ενεργειών, η τεχνολογία των επιταχυντικών συστημάτων, και η επανάσταση της γνώσης μας πάνω στην ύλη, χώρο και χρόνο.



History of the Universe

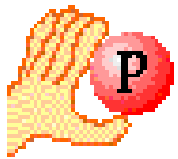


Γιατί Χρειαζόμαστε τους Επιταχυντές;

Οι επιταχυντές επιλύουν δυο προβλήματα στους Φυσικούς:

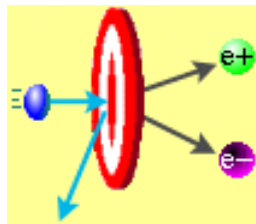
✓ Καταρχήν, αφού όλα τα σωματίδια συμπεριφέρονται σαν κύματα, οι φυσικοί χρησιμοποιούν επιταχυντές για να αυξάνουν την ορμή των σωματιδίων, επομένως μικραίνει το μήκος κύματος αρκετά ώστε να μπορούμε να δούμε μέσα στο άτομο. (Resolving power!)

✓ Κατά δεύτερον, η ενέργεια των γρήγορων σωματιδίων χρησιμοποιείται για τη δημιουργία βαριών σωματιδίων τα οποία θέλουμε να μελετήσουμε.



protons

+



anti-protons

$$E=mc^2 !$$



Ανασκόπηση- Τα Βασικά

Βασικά, ένας επιταχυντής επιταχύνει τα σωματίδια σε μεγάλες ταχύτητες με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών πεδίων όπου κτυπούν ένα στόχο ή άλλα σωματίδια. Γύρω από το σύγκρουσης τοποθετούμε ανιχνευτικά συστήματα για να μελετήσουμε τα αποτελέσματα αυτής της αντίδρασης ή γεγονότος.

Οι Επιταχυντές στις Υψηλές Ενέργειες χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες:

• Σταθερού στόχου: Τα σωματίδια κτυπούν ένα ακίνητο στόχο



Ένα φορτισμένο σωματίδιο(*electron* ή *proton*) επιταχύνεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και κτυπά ένα στόχο, που μπορεί να είναι στερεός, υγρός, ή αέριο. Ένας ανιχνευτής καθορίζει Το φορτίο, ορμή, μάζα, κλπ. Των παραγόμενων σωματιδίων.

• Συγκρουόμενες δέσμες : δυο δέσμες σωματιδίων διαπερνούν η μια την άλλη

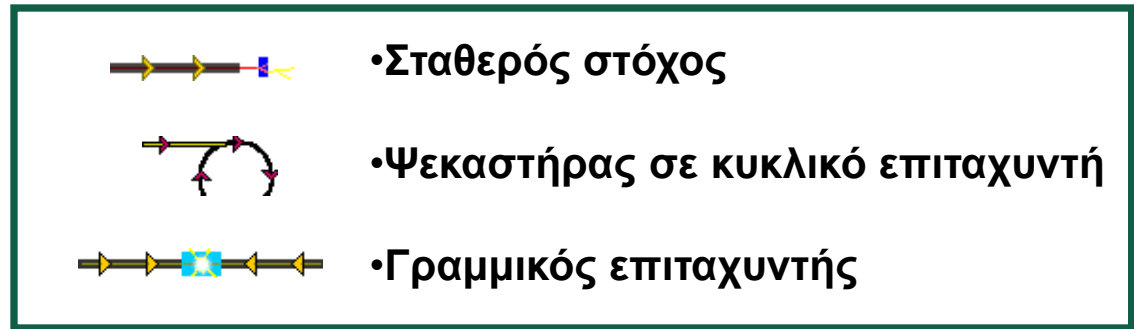


Το πλεονέκτημα: και οι δυο δέσμες έχουν μεγάλη ενέργεια, επομένως θα μπορέσουμε να παράγουμε βαριά σωματίδια από ότι παράγουμε σε πειράματα σταθερού στόχου με την ίδια ενέργεια. Αυτά τα σωματίδια έχουν μεγάλες ορμές (μικρά μήκη κύματος), καλύτερα «μικροσκοπία».

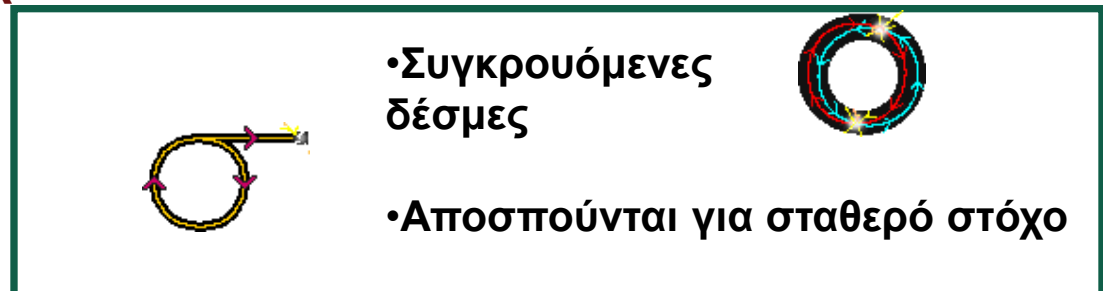
Τύποι Επιταχυντών

Οι Επιταχυντές ταξινομούνται βασικά σε δυο κατηγορίες:

Γραμμικοί Επιταχυντές (Linacs): Σωματίδια εκτοξεύονται όπως σ' ένα όπλο. Χρησιμοποιούνται στα πειράματα σταθερού στόχου, ως το πρώτο στάδιο επιτάχυνσης σ' ένα κυκλικό επιταχυντή, ή σαν γραμμικοί επιταχυντές.



Κυκλικό Επιταχυντές (Synchrotron): Χρησιμοποιούνται σε πειράματα συγκρουόμενων δεσμών ή αποσπώνται από το δακτύλιο για τα πειράματα σταθερού στόχου. Μεγάλοι μαγνήτες καθοδηγούν το σωματίδιο ώστε να παραμένει σε κυκλική τροχιά.



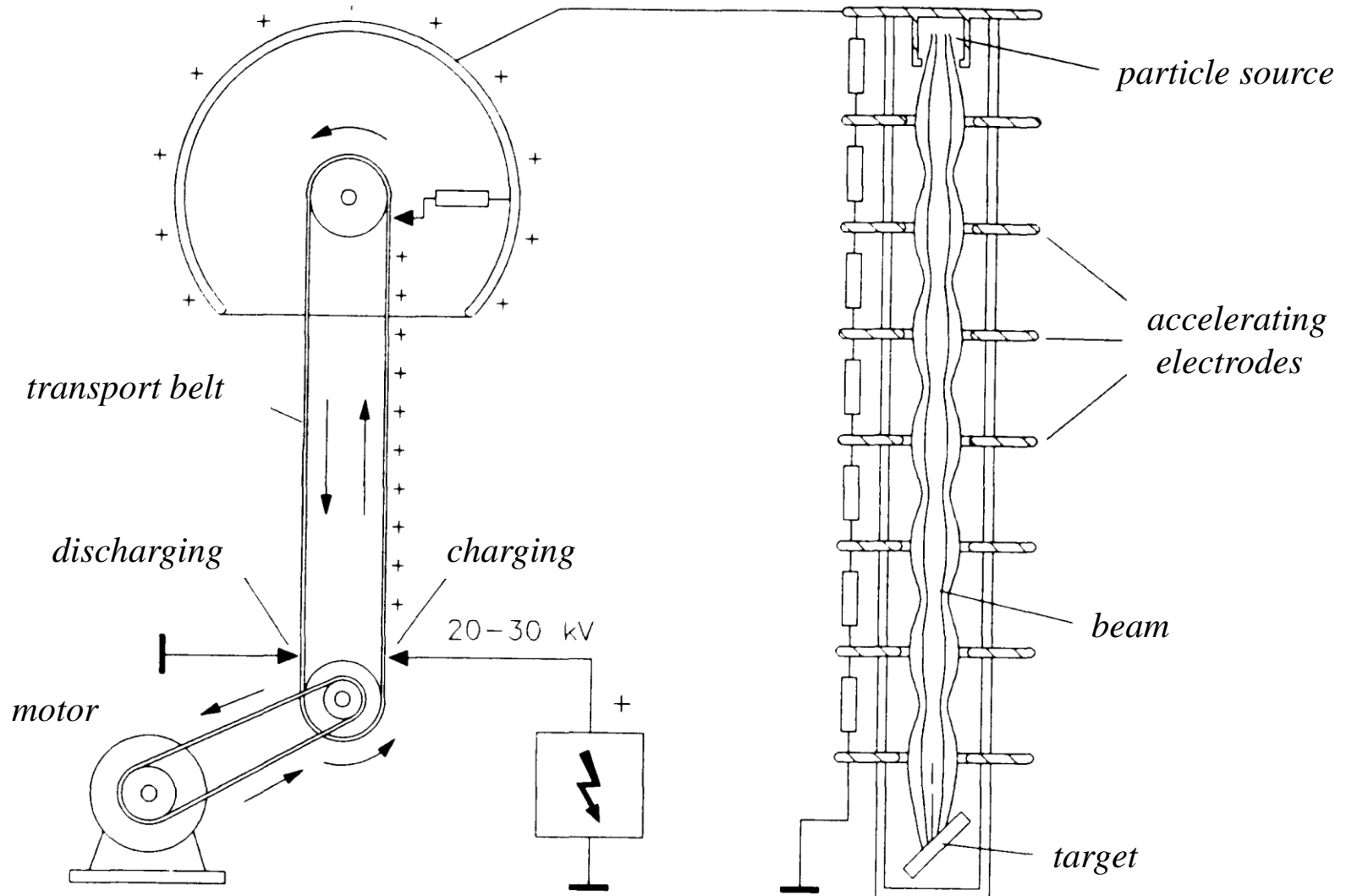
Επιταχυντές Φορτισμένων Σωματιδίων (0)

Η μελέτη και διερεύνηση του πυρήνα και των συστατικών του για ακόμη μικρότερους και θεμελιώδεις «σημειακούς δομικούς λίθους» της ύλης, απαίτησαν τη βαθύτερη μελέτη της διαδικασίας της σκέδασης και της εξαΰλωσης σε ενέργειες του κέντρου μάζας του πυρήνα και των συστατικών του ολοένα και μεγαλύτερες.

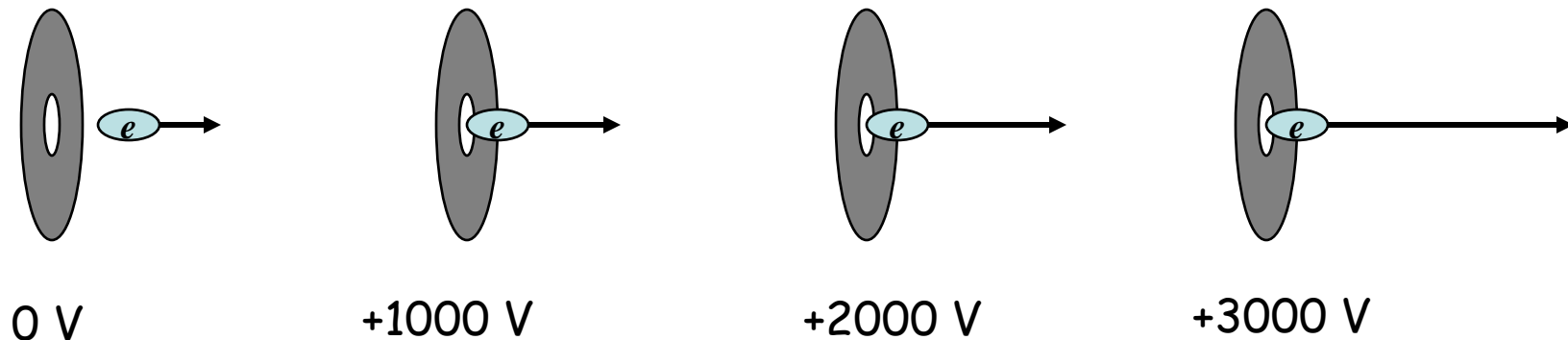
Αυτό επιτεύχθηκε με τη σχεδίαση και κατασκευή **επιταχυντών** φορτισμένων σωματιδίων. Για την επιτάχυνση των πρωτονίων ο ηλεκτροστατικός επιταχυντής Van-de-Graaf, το κύκλοτρο ασθενούς εστίασης και το συγχρο-κύκλοτρο επιτάχυναν τα σωματίδια σε ενέργειες 15 MeV, 20 MeV και 500 MeV αντίστοιχα, στο σύστημα εργαστηρίου.

Van-de-Graaf επιταχυντής

(Wille, Teilchenbeschleuniger)

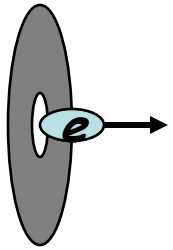


Επιταχύνοντας σωματίδια

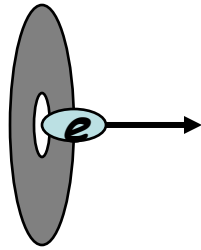


- ❑ Μετά από αυτή τη διαδικασία το e έχει ενέργεια ... 3000 [eV].
- ❑ Άρα για να έχουμε 5 MeV, π.χ., χρειαζόμαστε 5 MV !!!
- ❑ Ασύμφορο!
- ❑ Επομένως, τι κάνουμε;

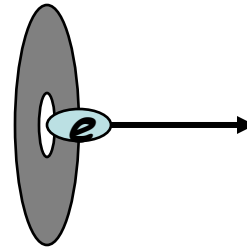
Γραμμικός Επιταχυντής



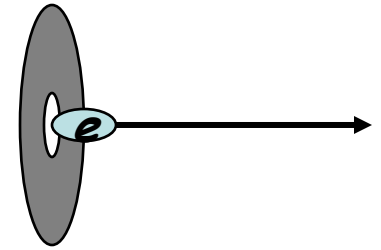
+1000 V



-1000 V



+1000 V



-1000 V

- Η υψηλή τάση μεταβάλλεται από θετική σε αρνητική την κατάλληλη χρονική στιγμή ώστε το ηλεκτρόνιο να επιταχύνεται προς το επόμενο επίπεδο!
- Παρατηρείστε ότι χρειαζόμαστε μόνο 1000 V, ΟΧΙ 1 MV. Αν περάσει ανάμεσα από 1000 τέτοια επίπεδα, θα αποκτήσει 1000 φορές την ενέργεια που αποκτά όταν περνά ανάμεσα από ένα ζεύγος τέτοιων επιπέδων!
- Με αυτό τον τρόπο, επιταχύνουμε ένα ηλεκτρόνιο σε πολύ μεγάλες ενέργειες.

Γραμμικός Επιταχυντής

Μπορεί να είναι ~1 km!

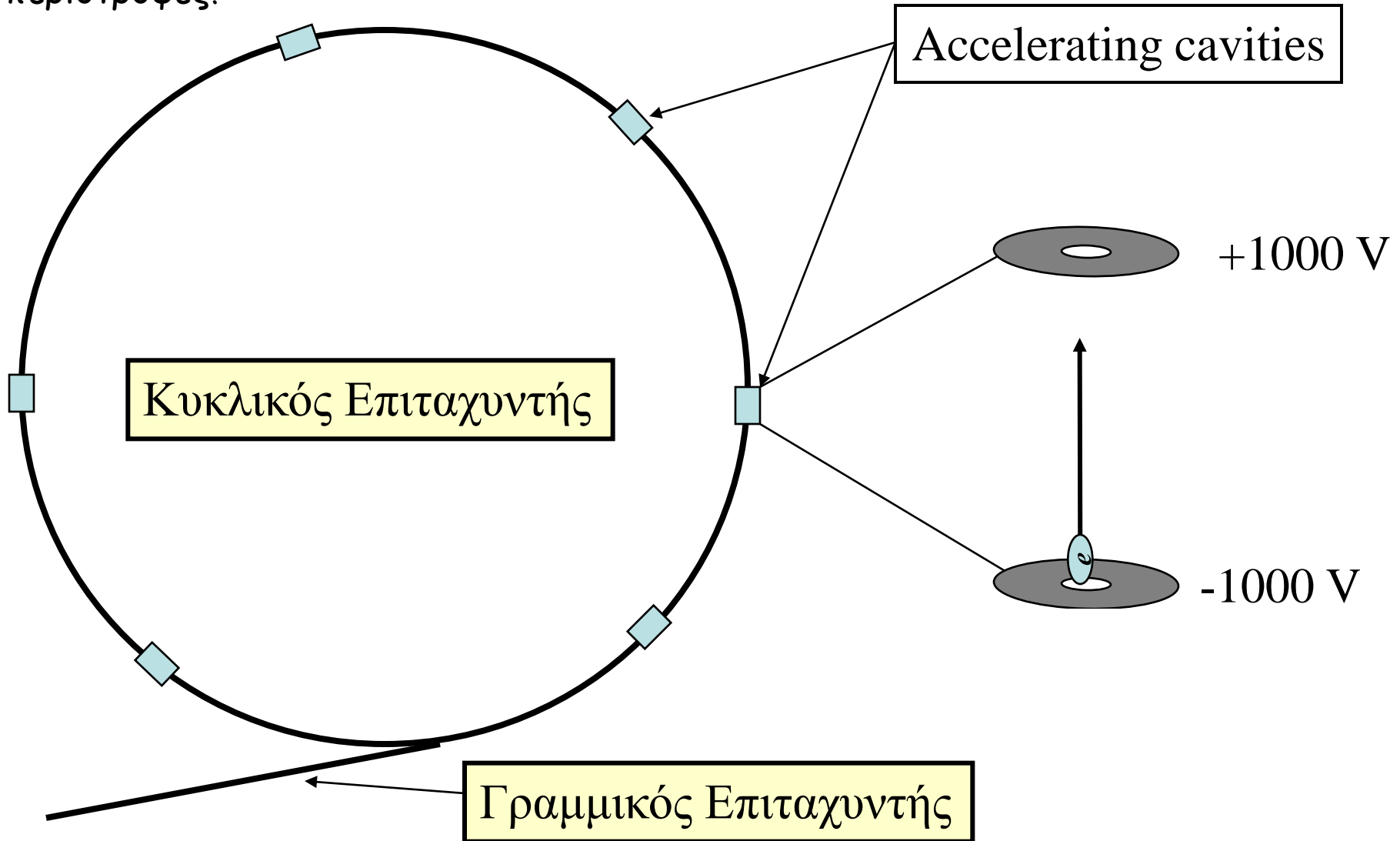


Vrooom!

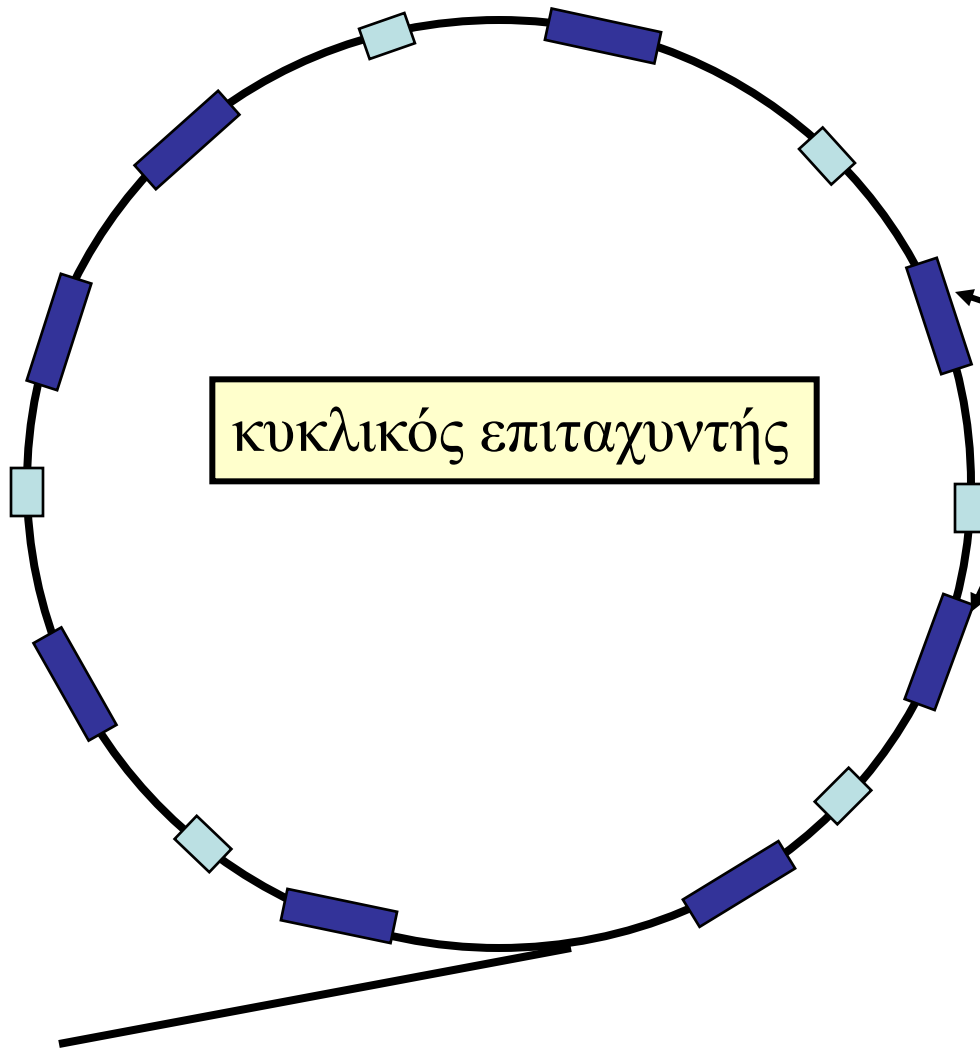
Επίπεδα επιτάχυνσης

Κυκλικοί Επιταχυντές

Ηλεκτρόνιο "αποκτά" την τελική του ενέργεια μετά από πολλές περιστροφές!



Κυκλικός Επιταχυντής



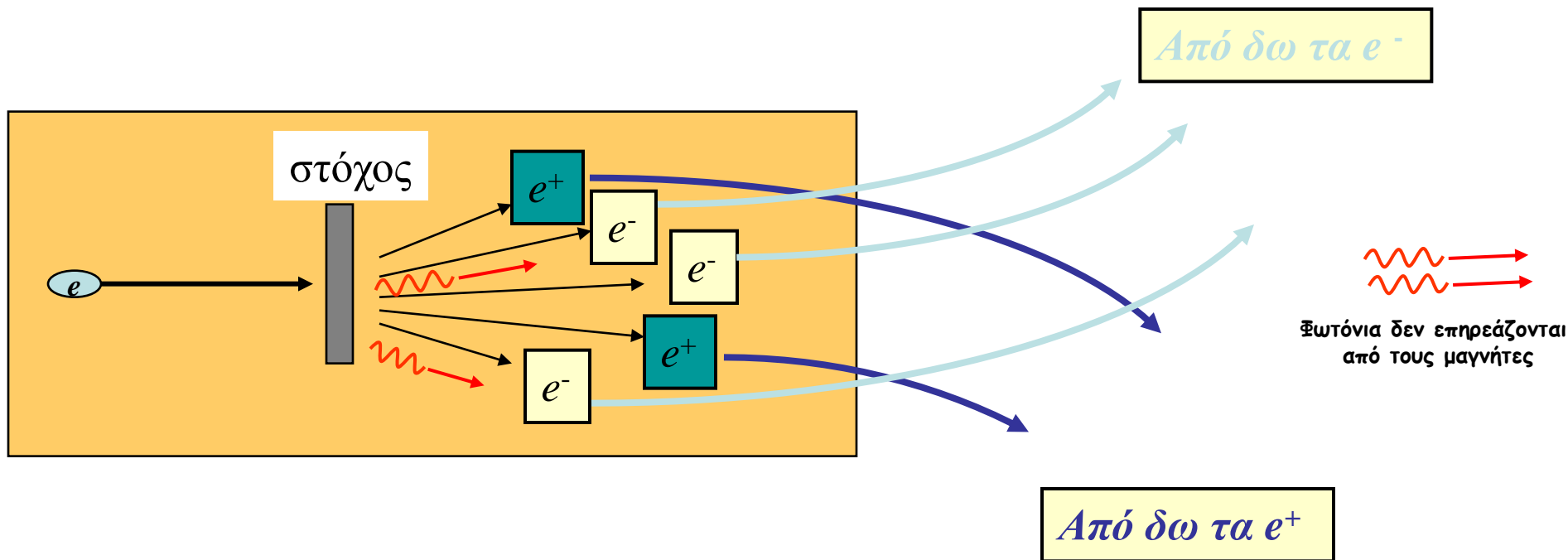
κυκλικός επιταχυντής

- ❑ Τα φορτισμένα σωματίδια περιστρέφονται και σε κάθε περιστροφή αυξάνεται η ενέργεια τους με τη βοήθεια των accelerating cavities.
- ❑ Τα σωματίδια καμπυλώνονται με τη βοήθεια των διπολικών μαγνητών!!!
- ❑ Η “**ισχύς καμπύλωσης**” των μαγνητών πρέπει να αυξάνεται καθώς αυξάνει η ενέργεια (δύσκολο πρόβλημα)..
- ❑ Το όριο της ενέργειας περιορίζεται από την ικανότητα μας να μπορέσουμε να τα κρατήσουμε σε κύκλο...

Επιτάχυνση Σωματιδίων

- Μπορούμε να **επιταχύνουμε ηλεκτρόνια** διότι είναι φορτισμένα σωματίδια και έλκονται από θετικά μεταλλικά επίπεδα που έχουν θετική τάση.
- Με την ίδια ιδέα, μπορούμε να επιταχύνουμε θετικά φορτία όπως πρωτόνια.
- Απλά αντιστρέφοντας τη θετική με αρνητική τάση !!!.
- Επομένως, μπορούμε να επιταχύνουμε ποζιτρόνια (ηλεκτρόνια με θετικό φορτίο). Όλες οι τάσεις είναι αντεστραμμένες!!
- Δηλαδή, γνωρίζουμε πώς να επιταχύνουμε φορτισμένα σωματίδια!
- Πως μπορούμε να παράγουμε ποζιτρόνια;

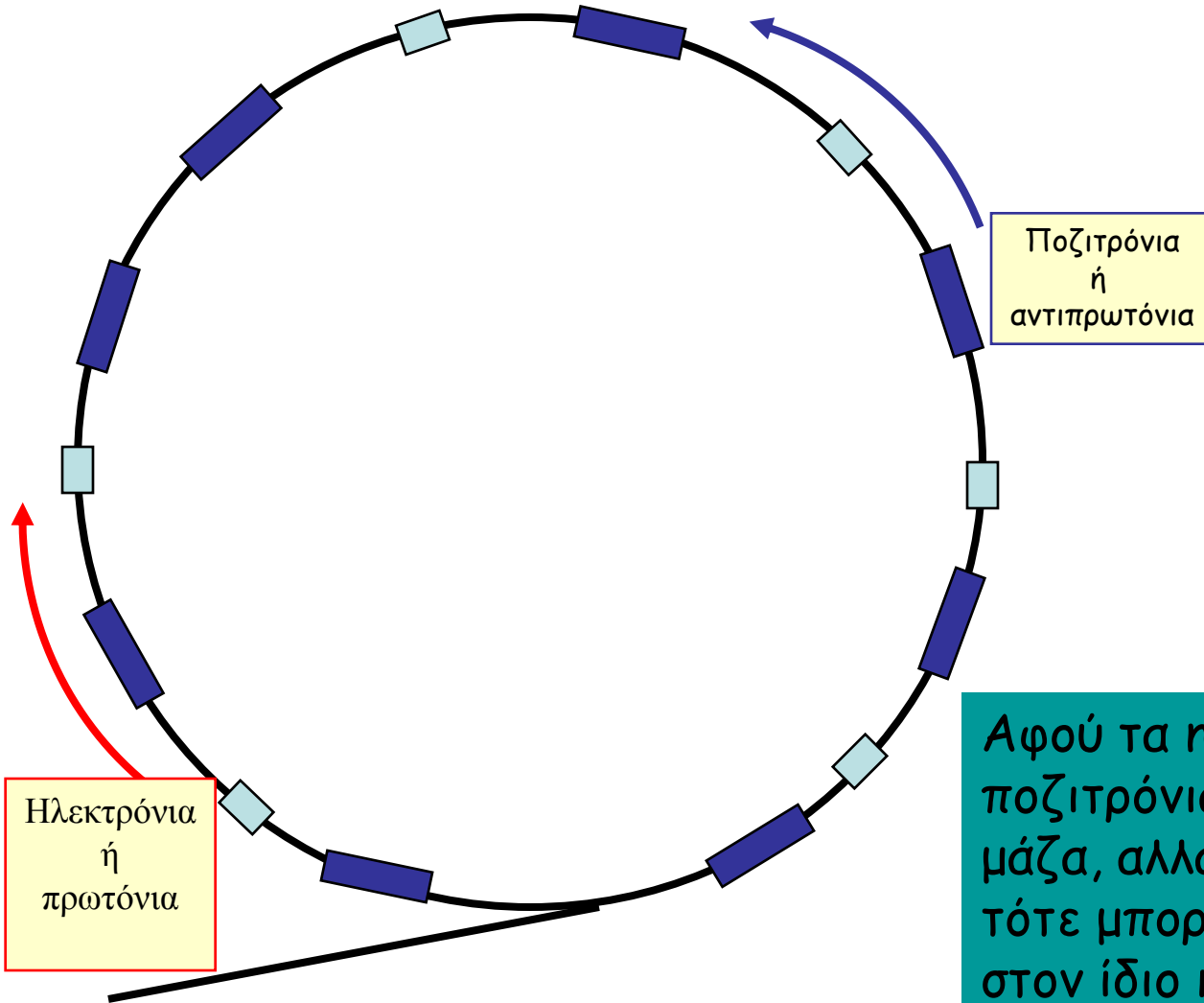
Παραγωγή Αντισωματιδίων



Με τη βοήθεια μαγνητών τα αρνητικά ηλεκτρόνια καμπυλώνονται προς τη μια πλευρά ενώ τα ποζιτρόνια προς την άλλη, επομένως με αυτό τον τρόπο τα "ξεχωρίσουμε" μεταξύ τους!

Αφού ξεχωριστούν, τα ποζιτρόνια "εστιάζονται" και επιταχύνονται!

Κυκλικός Επιταχυντής



Αφού τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια έχουν την ίδια μάζα, αλλά αντίθετα φορτία, τότε μπορούν να επιταχύνονται στον ίδιο κυκλικό επιταχυντή!

Σύγκρουση !!!!!

Στο σημείο σύγκρουσης, κατασκευάζουμε ένα ανιχνευτή για την ανίχνευση των σωματιδίων που παράγονται.

Με τους ανιχνευτές, μετρούμε:

1. Ορμή
2. Τύπο σωματιδίου
3. φορτίο

+ πολλές άλλες ποσότητες!

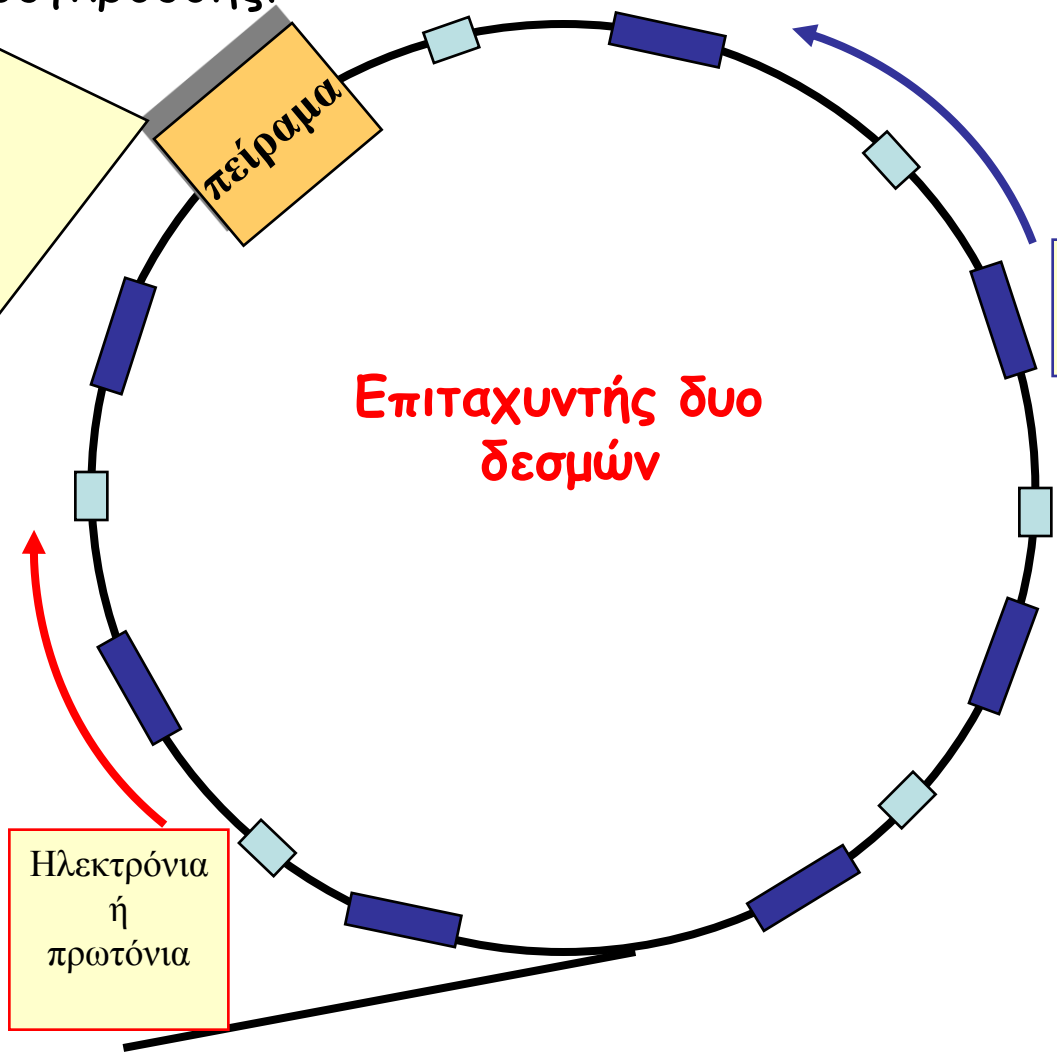
σημείο σύγκρουσης!

πείραμα

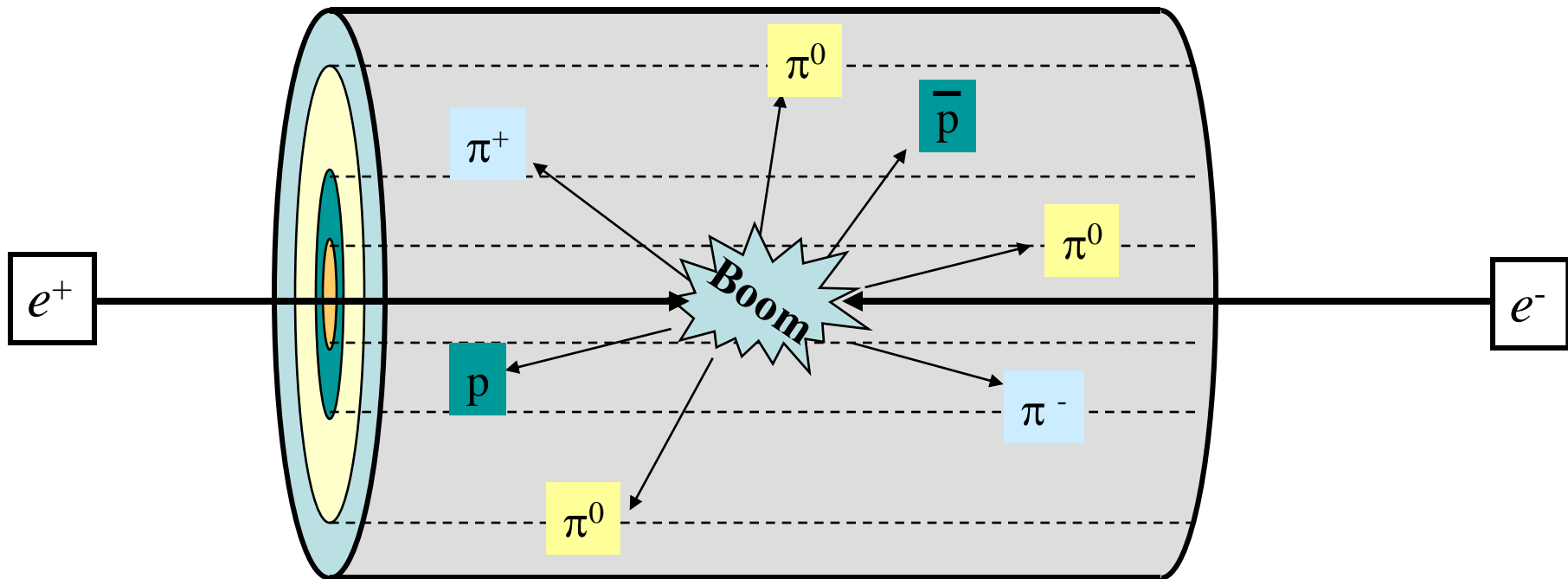
Επιταχυντής δυο δεσμών

Ποζιτρόνια ή αντιπρωτόνια

Ηλεκτρόνια ή πρωτόνια



Ανιχνευτής



Υπάρχουν αρκετά ομόκεντρα επίπεδα στον ανιχνευτή. Κάθε επίπεδο Εξυπηρετεί διαφορετικό σκοπό:

1. **Tracking** - προσδιορίζεται η τροχιά των σωματιδίων
2. **Καλορίμετρο** - μέτρηση ενέργειας σωματιδίων και φωτονίων
3. **Ταυτοποίηση σωματιδίου**: ξεχωρίζονται οι διάφοροι τύποι των σωματιδίων, πιόνια από πρωτόνια από καόνια, κλπ.

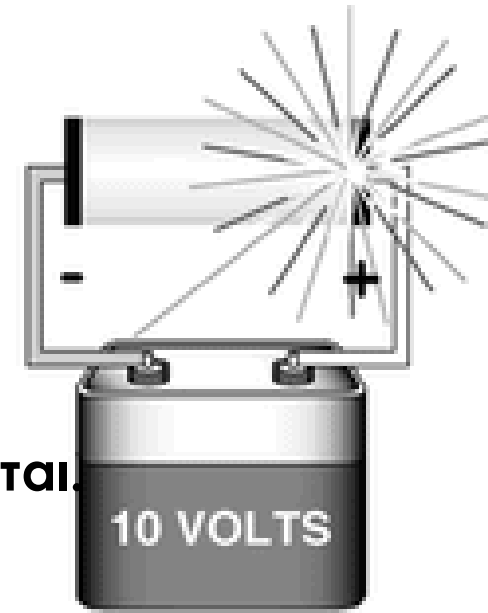
Εισαγωγή στους Επιταχυντές

Πως δουλεύουν οι Επιταχυντές ?

➤ Στα φορτισμένα σωματίδια ασκούνται δυνάμεις μεταξύ τους – ετερώνυμα έλκονται; Ομώνυμα απωθούνται.

- Νόμος Coulomb $F = -K q_1 q_2 / r^2$
- Νόμος Newton $F = dP/dt = m a$

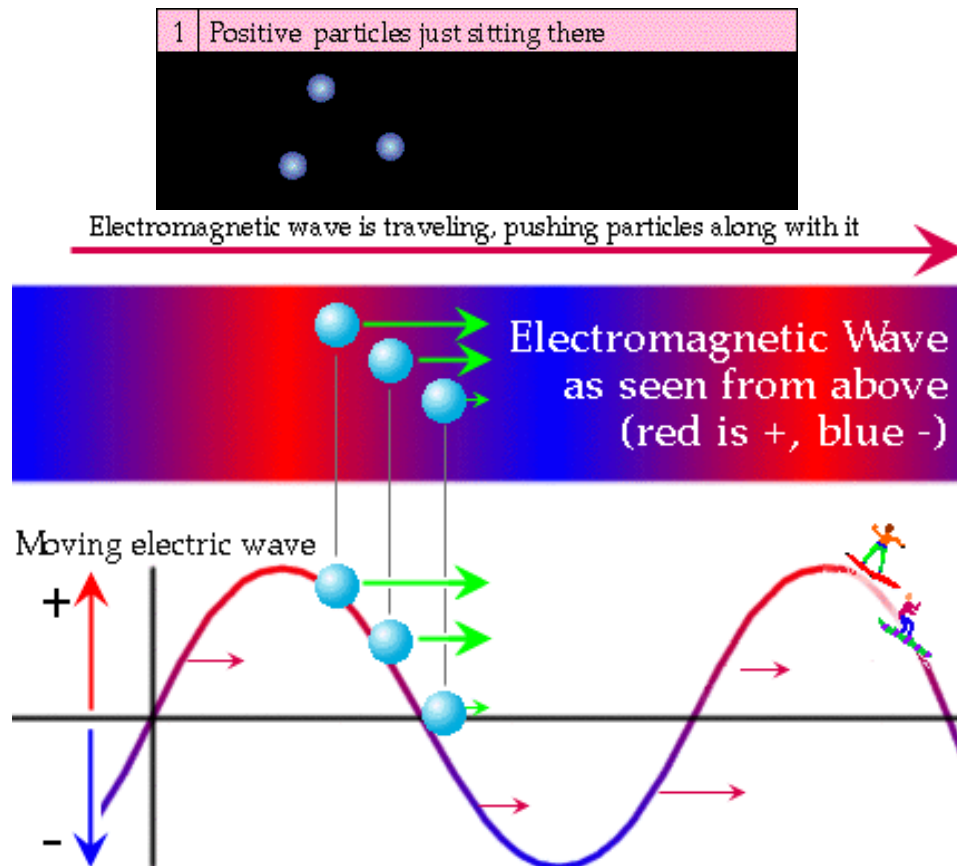
➤ Ένα σωματίδιο με θετικό ή αρνητικό φορτίο δέχεται μια δύναμη όταν βρίσκεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Όταν μια δύναμη δρα σε ένα σωματίδιο, τότε θα έχουμε επιτάχυνση.



Yeeeeeeeehaaaaaaaaaa! /!

Ακολουθώντας το κύμα

Οι επιταχυντές επιταχύνουν τα φορτισμένα σωματίδια μέσω ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων όπου έλκονται ή απωθούνται. Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο κινείται κατά μήκος του επιταχυντή, «παρασύροντας» το σωματίδιο μαζί του.



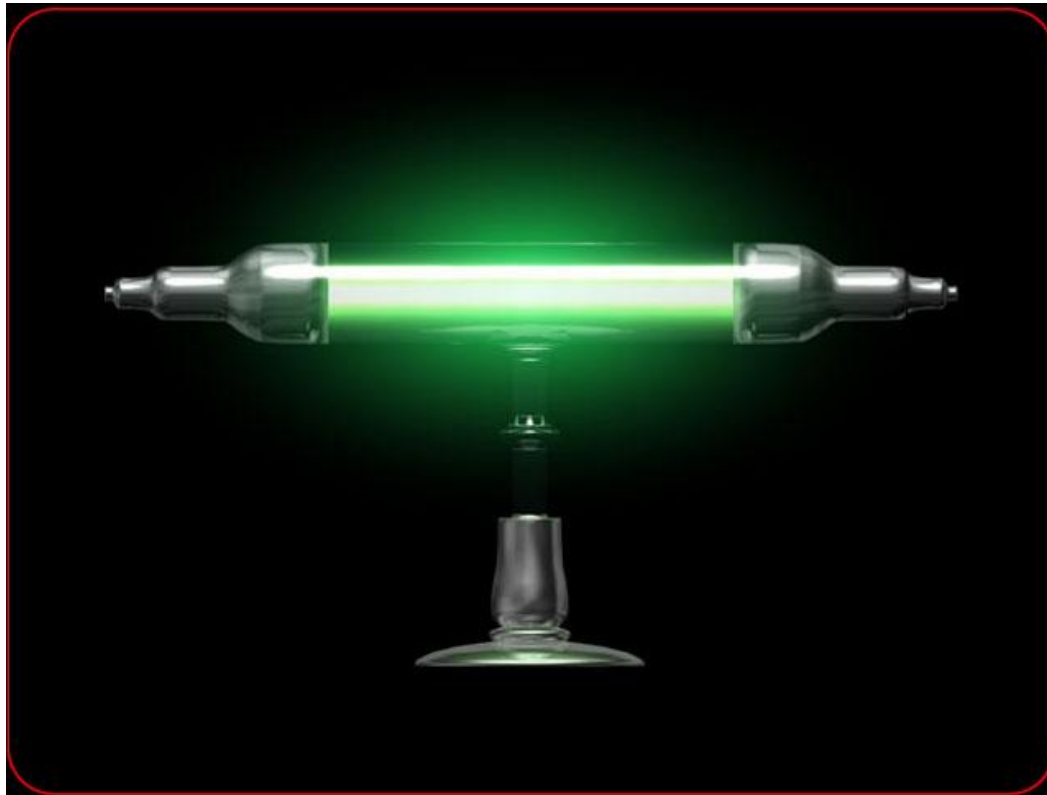
Positively charged particles (●) close to the crest of the E-M wave experience the most force forward; those closer to the center experience less of a force. The result is that the particles tend to move together with the wave.

Πώς αρχίσαμε...

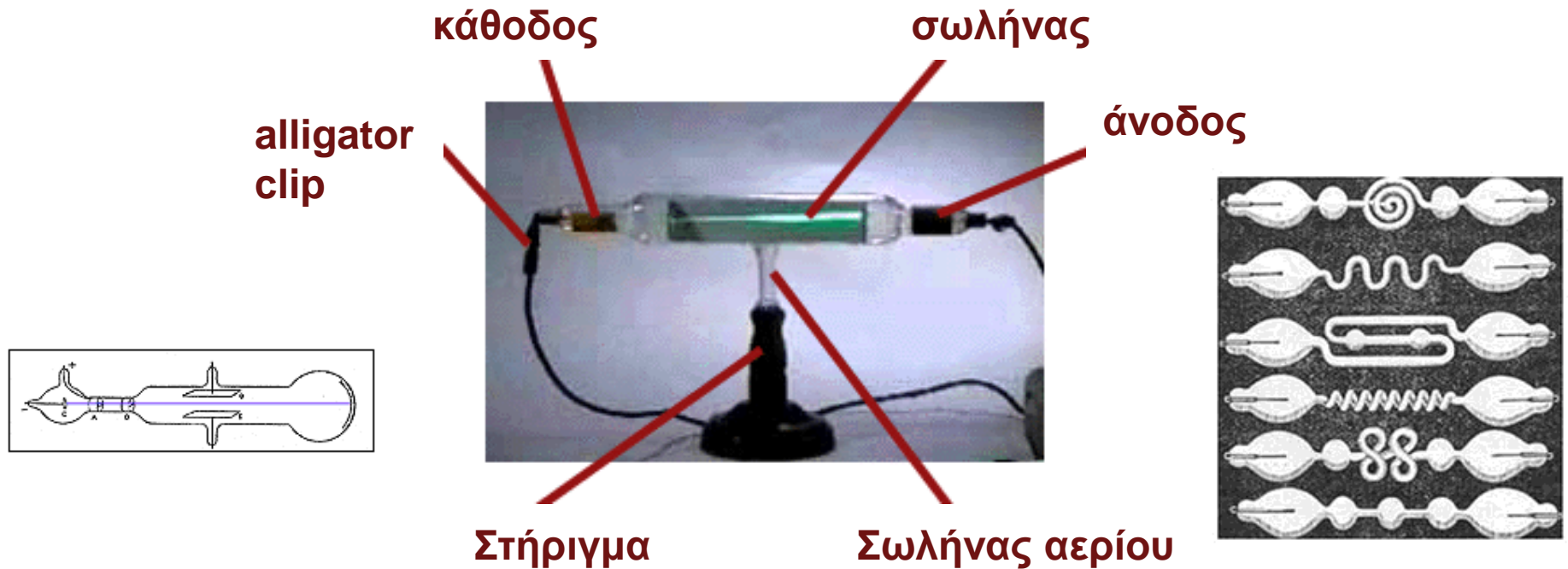
J.J. Thomson ανακάλυψε το ηλεκτρόνιο το 1897

Μελετώντας τις ακτίνες σε κενούς καθοδικούς σωλήνες μπόρεσε να χρησιμοποιήσει την ταχύτητα και την απόκλιση τη δέσμης για να υπολογίσει το λόγο του ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα των καθοδικών ακτινών.

Βρήκε ότι αυτό είναι μια σταθερά ποσότητα ανεξάρτητη από το αέριο που χρησιμοποιήσου στο σωλήνα, από το μέταλλο της καθόδου και ήταν περίπου 1000 φορές μικρότερη από την τιμή που υπολόγιζε για ιόντα υδρογόνου στην ηλεκτρόλυση των υγρών.



Σωλήνας καθοδικών ακτινών (CRT)

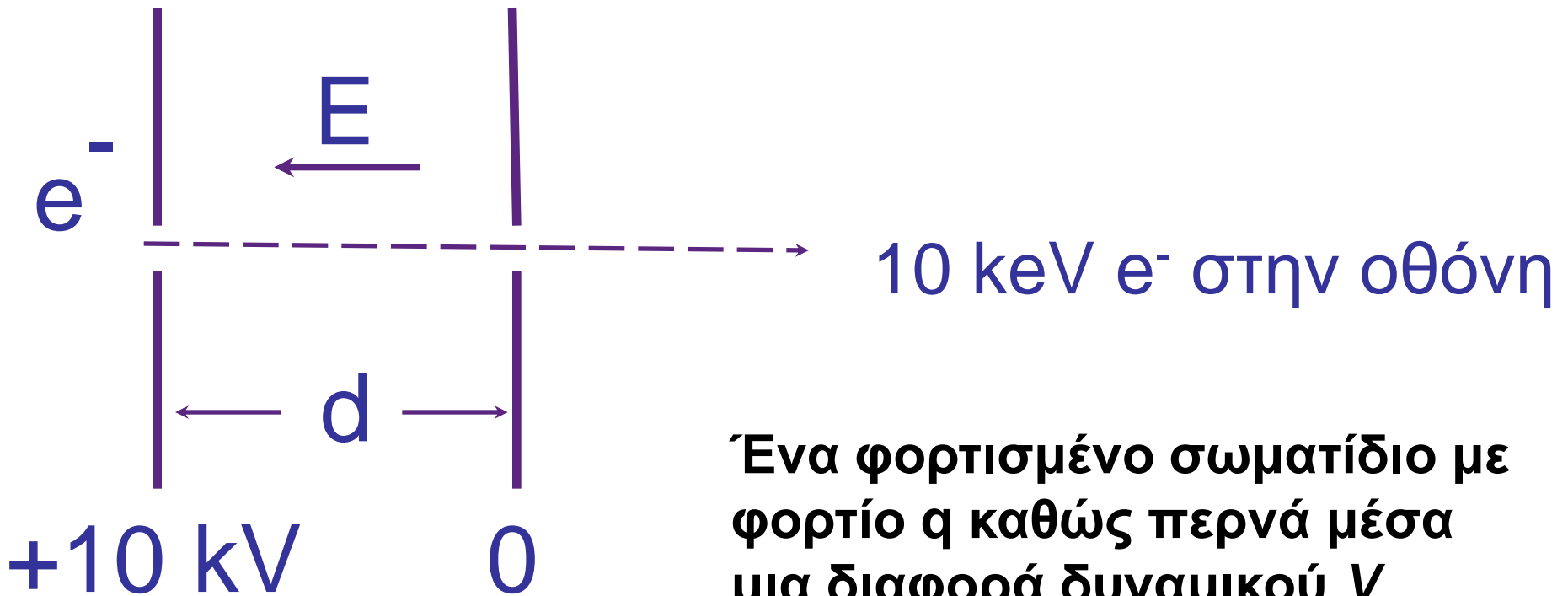


Μια κάθοδος (πηγή εκπομπή ηλεκτρονίων) που είναι μια λυχνία πυράκτωσης εκπέμπει ηλεκτρόνια που οδηγούνται μέσω του κενού και με τη βοήθεια μια ηλεκτρικής τάσης (διαφοράς δυναμικού) στην άνοδο.

Σωλήνας της TV: δέσμη e^- καθοδηγούνται με **ηλεκτροστατικούς πυκνωτές** σε κάποιο σημείο πάνω στην «οθόνη». Η δέσμη κινείται τόσο γρήγορα όπου το ανθρώπινο μάτι δεν βλέπει μόνο ένα σημείο, αλλά πολλά σημεία πάνω στην οθόνη για κάποια χρονική στιγμή, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια μεταβλητή εικόνα δηλαδή την κίνηση.

CRTs και επιτάχυνση

Ένας CRT μπορεί να θεωρηθεί ως ένας επιταχυντής:

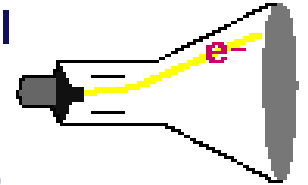


Ένα φορτισμένο σωματίδιο με φορτίο q καθώς περνά μέσα μια διαφορά δυναμικού V αποκτά κινητική ενέργεια qV

$$1 \text{ eV} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ J/C})$$

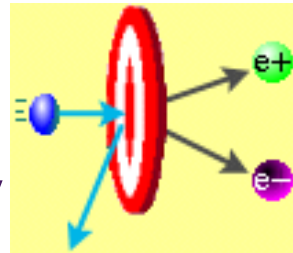
Τι Επιταχύνουμε?

Ηλεκτρόνια: Θερμαίνοντας ένα μέταλλο παράγονται ηλεκτρόνια. Η τηλεόραση, όπως ο καθοδικός σωλήνας ακτινών, χρησιμοποιεί αυτό τον μηχανισμό.



Πρωτόνια: Τα παράγουμε πολύ εύκολα ιοντίζοντας υδρογόνο.

Αντισωματίδια: Για να πάρουμε αντισωματίδια, κτυπούμε ενεργητικά σωματίδια πάνω σ' ένα στόχο. Τότε, παράγονται ζεύγη σωματιδίων και αντισωματιδίων μέσω εικονικών φωτονίων ή γλουονίων. Με τη βοήθεια των μαγνητικών πεδίων μπορούμε να τα ξεχωρίσουμε και να τα απομονώσουμε .



Δύναμη Lorentz

✓ Σ' ένα φορτισμένο σωματίδιο ασκείται μια δύναμη

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

✓ γενικότερα, σ' ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο, το σωματίδιο θα διαγράψει μια ελικοειδή τροχιά με ακτίνα

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad \Rightarrow \quad r = \frac{mv}{qB}$$

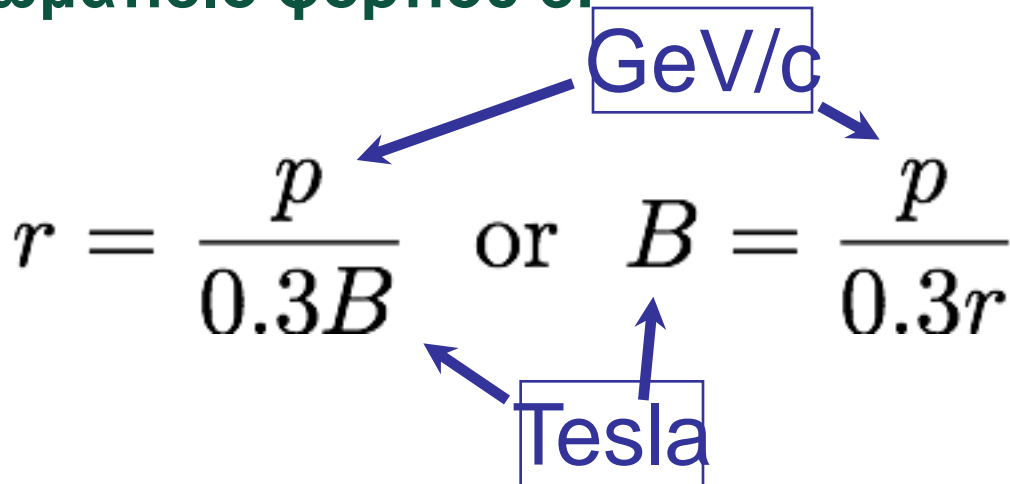
✓ Η παραπάνω συνθήκη ισχύει για σωματίδια που κινούνται σε κύκλο

Σχετικιστική κίνηση σε Μαγνητικό Πεδίο

- Η ίδια σχέση ισχύει και στη σχετικιστική περίπτωση αρκεί να αλλάξουμε mv με την ορμή p του σωματιδίου

$$r = \frac{p}{qB}$$

- Στις μονάδες που χρησιμοποιούμε στις υψηλές ενέργειες ή πυρηνική φυσική, βρίσκουμε μια βολική σχέση για σωματίδιο φορτίου e :


$$r = \frac{p}{0.3B} \quad \text{or} \quad B = \frac{p}{0.3r}$$

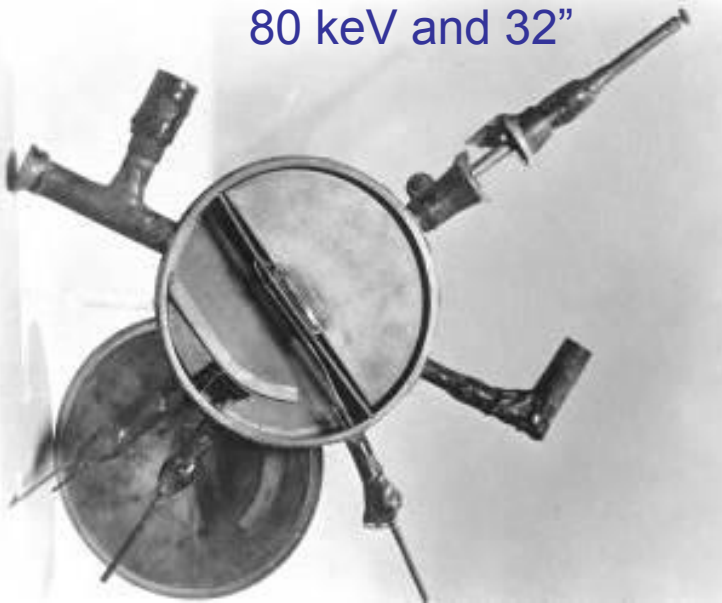
Κυκλοτρονική Συχνότητα

- Η κυκλοτρονική συχνότητα για ένα μη-σχετικιστικό σωματίδιο που κινείται σε κυκλική τροχιά μέσα σ' ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο, είναι:

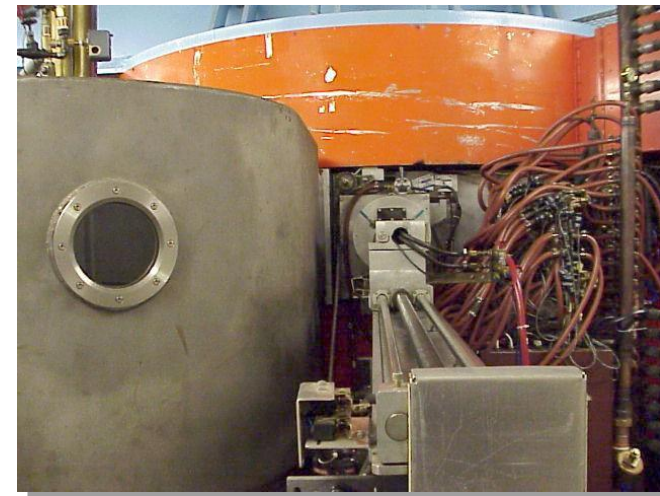
$$\omega_c = \frac{v}{r} = \frac{qvB}{p} \approx \frac{qB}{m}$$

- αυτή η ανεξαρτησία της κυκλοτρονικής συχνότητας από την ταχύτητα οδηγεί στην ιδέα των επιταχυντών που ονομάζονται **κυκλοτρόνια** (**cyclotrons**)

80 keV and 32"



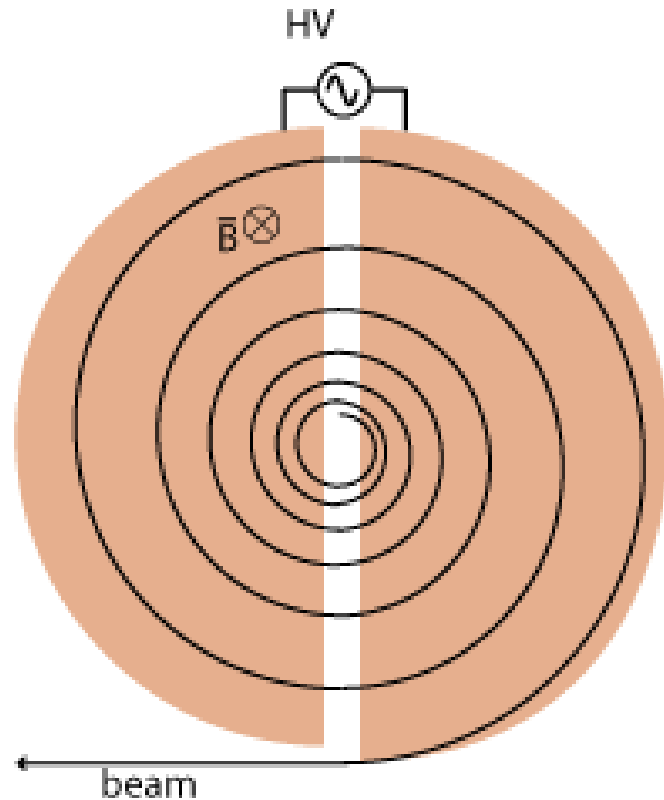
E. O. Lawrence
first cyclotron



UC Davis 76 cyclotron

Κυκλοτρόνια (Cyclotrons)

cyclotrons είναι ο πιο γνωστός τύπος επιταχυντών στις Υψηλές Ενέργειες και Πυρηνική Φυσική, χρησιμοποιούνται καθημερινά στα Νοσοκομεία και Πανεπιστήμια

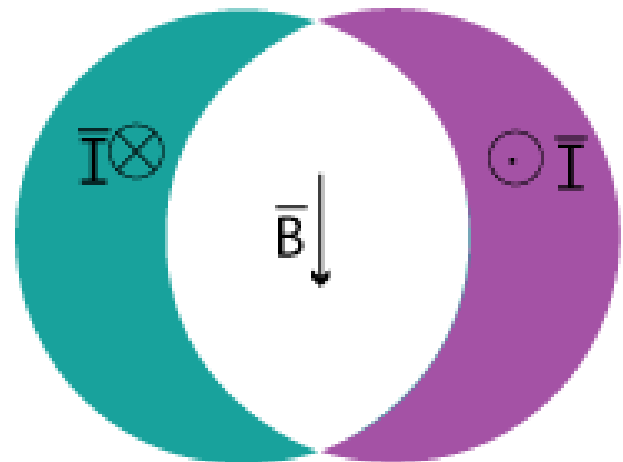
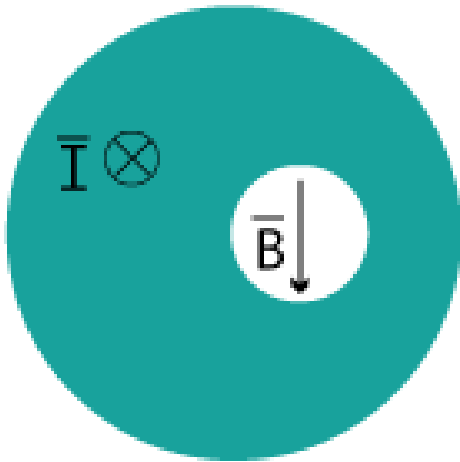


Φορτισμένα σωματίδια ξεκινούν από το κέντρο, και κινούνται στο κενό μεταξύ των δυο ημισφαιρίων όπου επιταχύνονται λόγω της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται ανάμεσα στα δυο αυτά ημισφαίρια.

Τυπικές ενέργειες σωματιδίων ~100 MeV

Μαγνήτες καμπύλωσης (Bending Magnets)

- ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο: διπολικός μαγνήτης
- Θεωρείστε έναν αγωγό με κυκλική διατομή που μεταφέρει σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά με μια κυκλική οπή στον αγωγό:



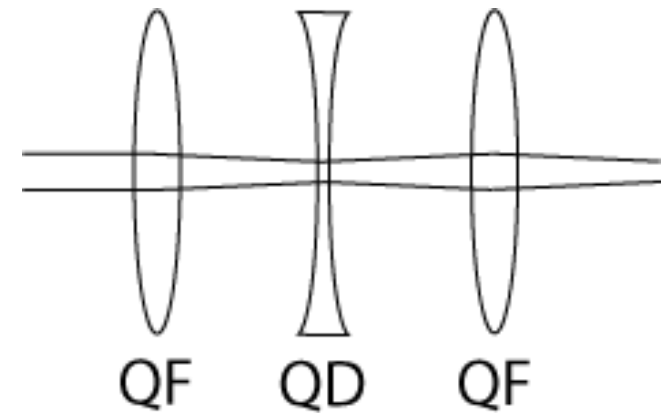
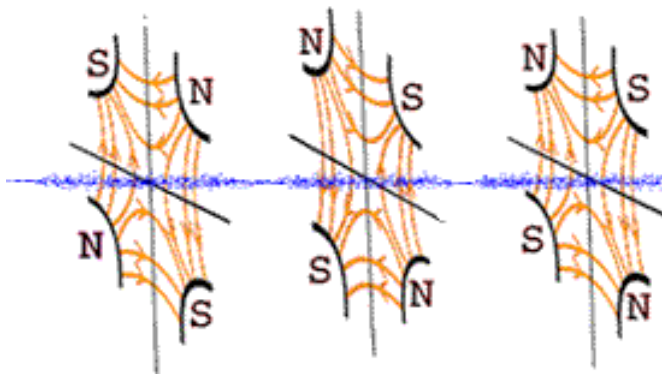
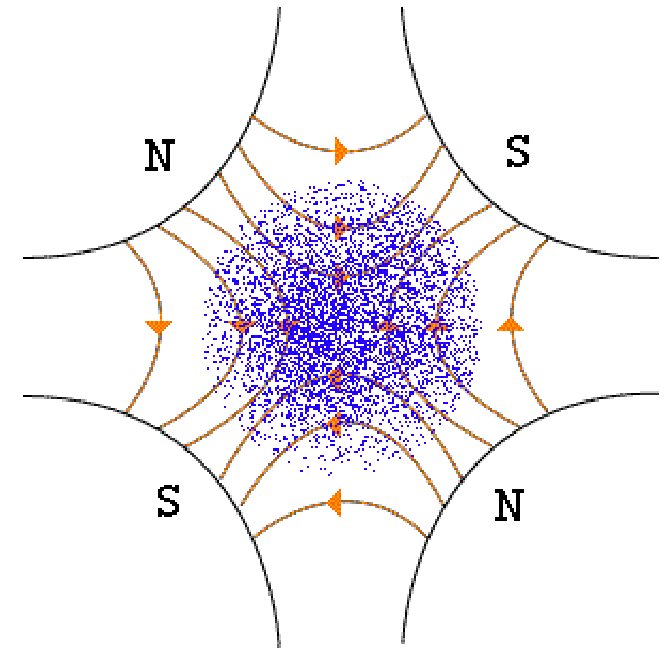
Μαγνήτες καμπύλωσης (Bending Magnets)

στο Tevatron and LHC είναι υπεραγώγιμοι μαγνήτες που βασίζονται σε μια σχεδίαση $\cos \theta$:



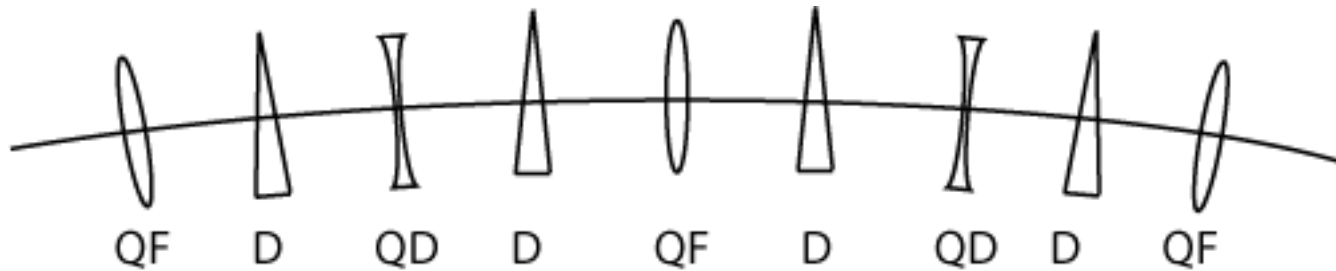
Μαγνήτες εστίασης (Focusing Magnets)

- ένας τετραπολικός μαγνήτης εστιάζει στη μια διάσταση, και αποκλίνει στην άλλη
- σωματίδια πάνω στον άξονα δεν επηρεάζονται!
- Μια σειρά από μαγνήτες focusing and defocusing φέρει ένα καθαρό αποτέλεσμα εστίασης



Συγχροτρόνια (Synchrotrons)

- ένα synchrotron είναι ένας περίπου κυκλικός δακτύλιος με μαγνήτες:



- σε κάποιο σημείο ή σε περισσότερα σημεία πάνω στο δακτύλιο, εισάγουμε μια κοιλότητα (cavity) που φέρει ένα ταλαντωμένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο RF
- θέτουμε τη συχνότητα RF τέτοια ώστε κάθε φορά που το σωματίδια περνούν, επιταχύνονται κατά τη διεύθυνση του πεδίου (από κει προκύπτει το όνομα συγχροτρόνιο (synchrotron))

Where We Get Accelerated Particles

- σωματίδια σε ένα συγχροτρόνιο που είναι μακριά από τον κύριο άξονα (ή την κεντρική τροχιά) επιδέχονται δυνάμεις προς εστίαση ή απόκλιση
- Μετά από πολλές περιφορές τα σωματίδια διώχνουν τους τα «εκκεντρικά» σωματίδια
- Η μεγαλύτερη σε ενέργεια μηχανή είναι: το Tevatron στο Fermilab: 960 GeV πρωτόνια συγκρούονται με αντιπρωτόνια
- το 2007 το LHC στο CERN θα ξεκινήσει να δουλεύει στα 7 TeV (= 7000 GeV) με συγκρούσεις πρωτονίων σε πρωτόνια



Fermilab Accelerator Complex: The Tevatron

Fermilab - USA



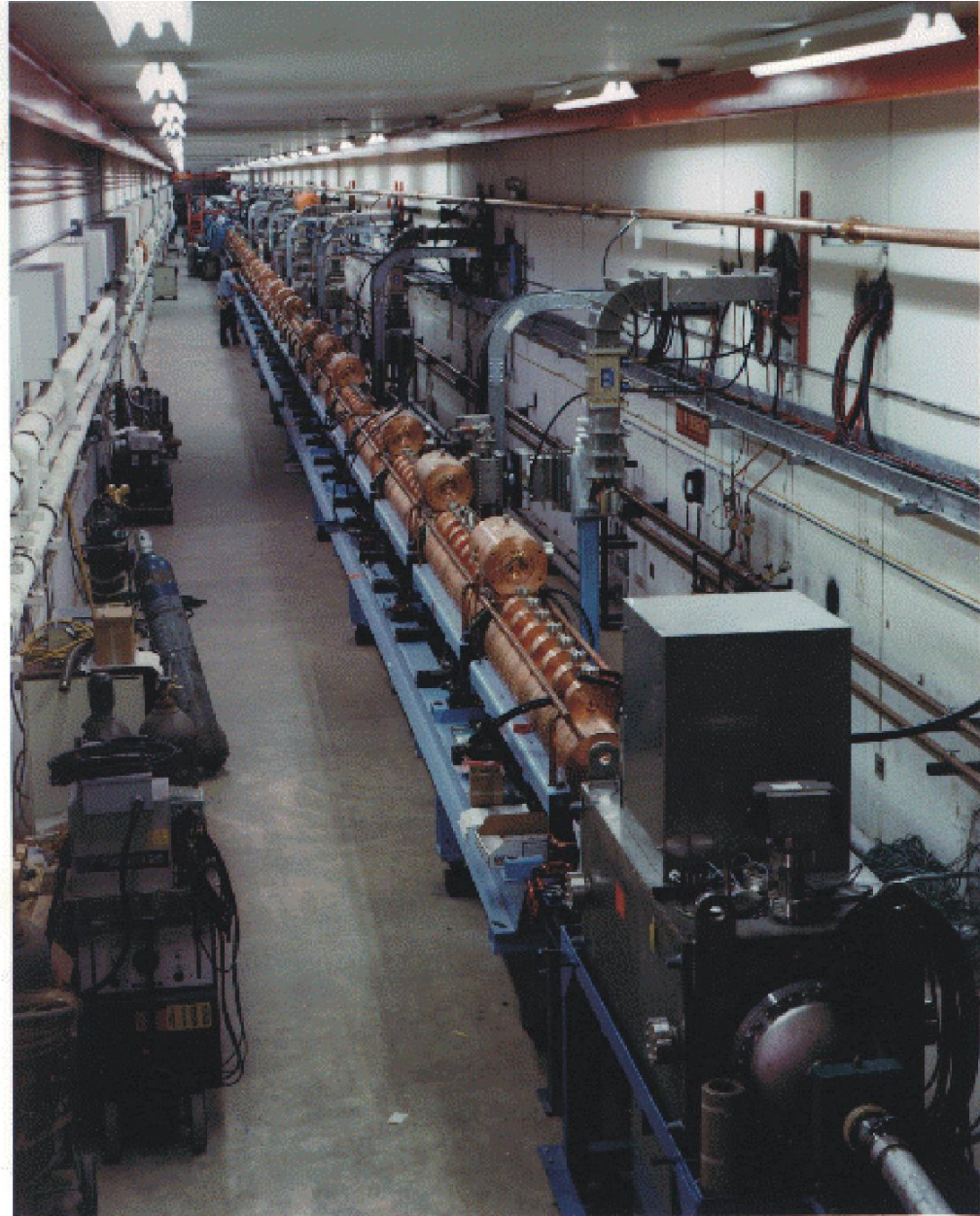
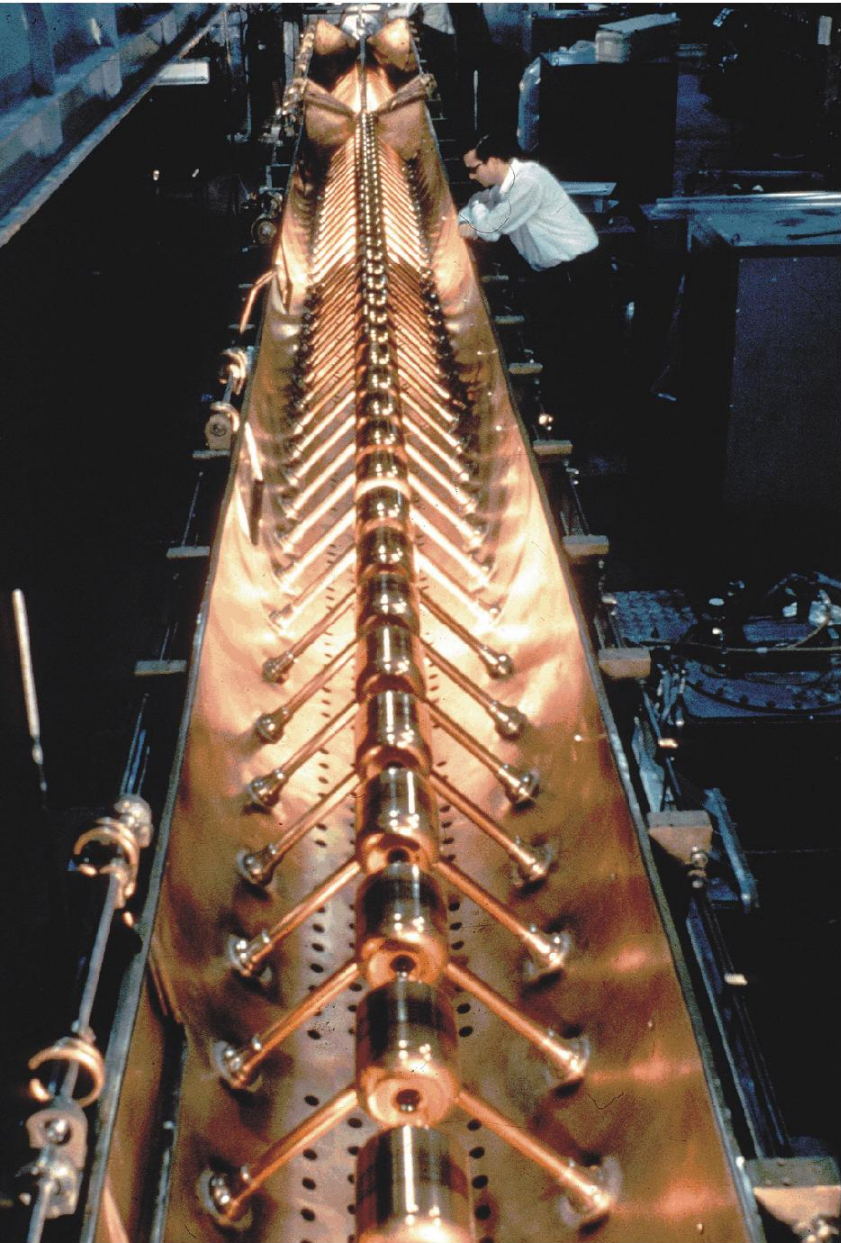


ακτίνα = 4.2 km

περιφέρεια = 27 km

Site of the LHC at CERN in Geneva

Linacs at CERN



Τι είναι το CERN

- Ευρωπαϊκό εργαστήριο για τη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων ή φυσική υψηλών ενεργειών.
- Ιδρύθηκε το 1954 από 12 μέλη → 20 μέλη (2006)
- 6500 επιστήμονες (50% των επιστημόνων ΦΥΕ)
- 500 πανεπιστήμια και πάνω από 80 εθνικότητες
- ασχολείται με καθαρή επιστήμη - βασική έρευνα
- αλλά παίζει ρόλο στην ανάπτυξη τεχνολογίας αιχμής
- εκπαιδεύει τους αυριανούς επιστήμονες μηχανικούς

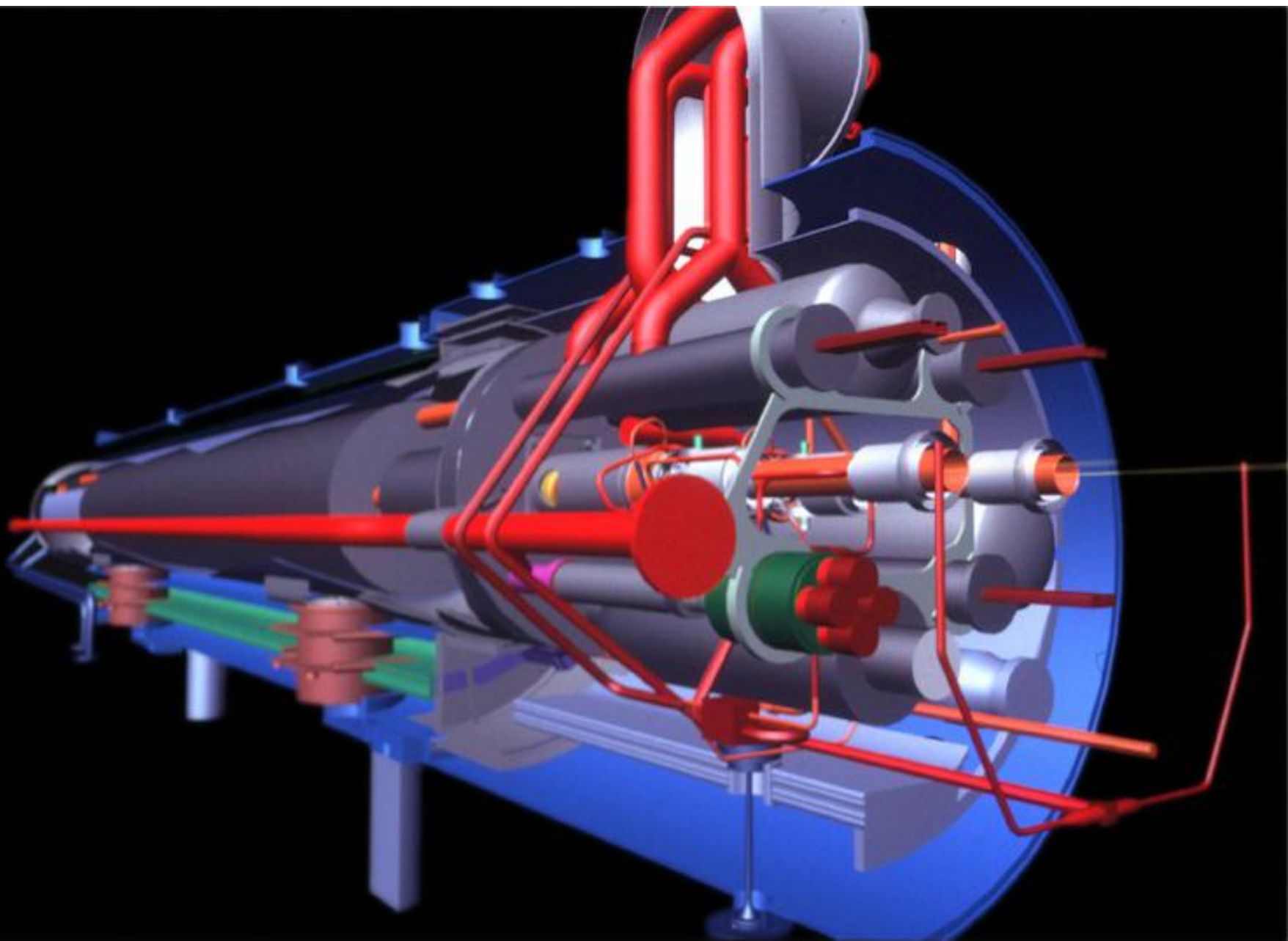
CERN - Europe

ακτίνα = 4.2 km

περιφέρεια = 27 km



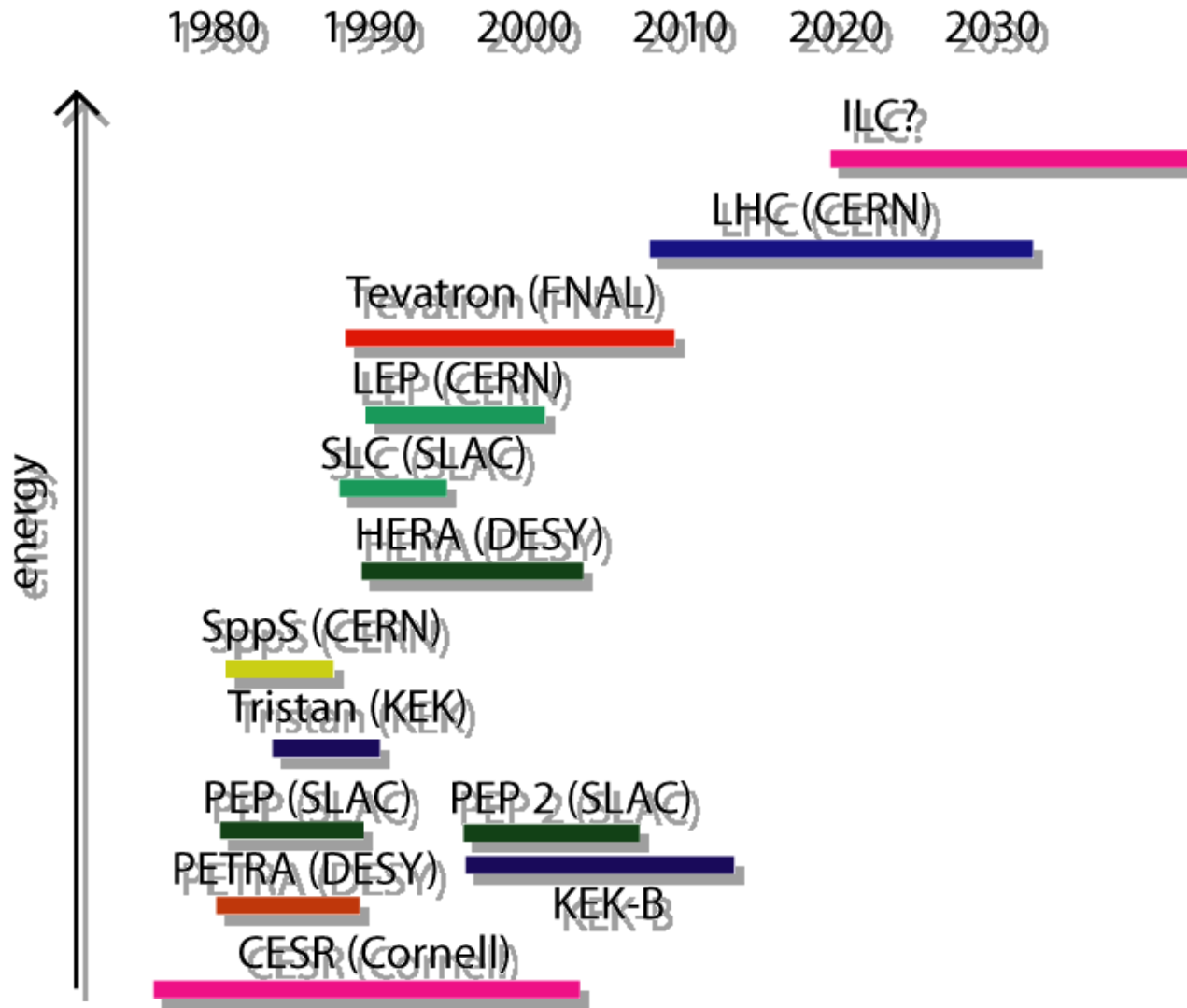
CERN



Global Accelerators

name	where	what	when
LHC	Geneva, Switzerland	pp, 14 TeV	2007+
Tevatron	Batavia, Illinois	pp, 2 TeV	1986-present
LEP 2	Geneva, Switzerland	e^+e^- , 200 GeV	1994-2000
LEP 1	Geneva, Switzerland	e^+e^- , 90 GeV	1989-1994
HERA	Hamburg, Germany	ep, 30x800 GeV	1992-present
PEP-2	Palo Alto, California	e^+e^- , 10 GeV	1998-present
KEK-B	Tsukuba, Japan	e^+e^- , 10 GeV	1998-present

Great Colliders



Ακτινοβολία Συγχροτρονίου (Synchrotron Radiation)

- Ένα σωματίδιο που κινείται σε κυκλική τροχιά σ' ένα μαγνητικό πεδίο ακτινοβολεί ενέργεια σε μορφή φωτονίων
- Για ενεργητικά σχετικιστικά σωματίδια βρίσκουμε ότι η ακτινοβλούμενη ενέργεια ανά περιφορά, είναι:

$$\Delta E \approx \frac{4\pi\alpha\hbar c}{3R} \gamma^4 \propto \frac{E^4}{R}$$

- για πρωτόνια, ο όρος E^4 είναι πολύ μικρότερος από ότι ο αντίστοιχος των e
- Πιθανότατα, δεν θα κτιστεί ένα σύγχροτρον ηλεκτρονίων μεγαλύτερο από το LEP (27 km περιφ)

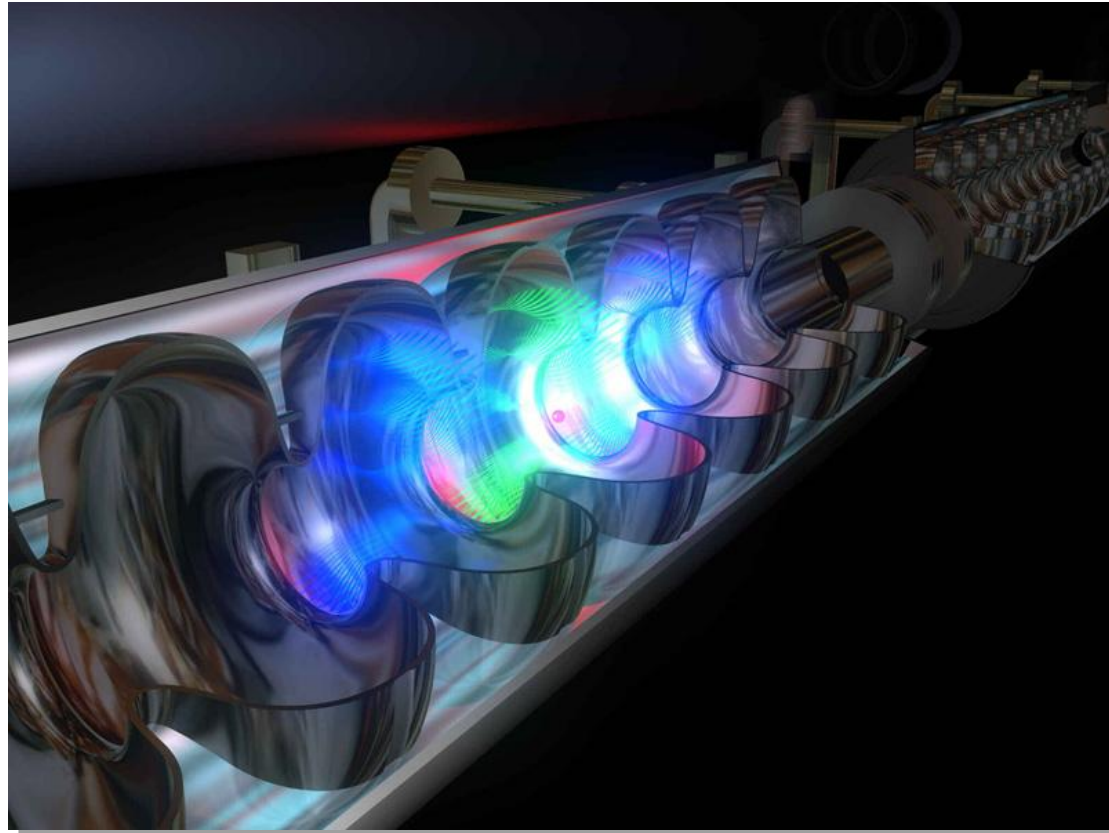
Γραμμικοί Επιταχυντές

Αν τοποθετήσουμε μια σειρά από κοιλότητες RF με διακρήκη πεδία με φασική ταχύτητα περίπου την ταχύτητα του φωτός, ένα φορτισμένο σωματίδιο θα το ακολουθεί:

Μέχρι τώρα έχει επιτευχθεί:

60 MV/m

αν θέλουμε 10^3 GeV
θα χρειαστούμε μια
μηχανή ~20 km



Σταθερού στόχου vs Συγκρουόμενων

- Γιατί συγκρουόμενες δέσμες?
- Παίρνουμε μεγαλύτερη ενέργεια στο κέντρο μάζας με τον επιταχυντή συγκρουομένων δεσμών
- Παίρνουμε περισσότερες συγκρούσεις με τον επιταχυντή σταθερού στόχου
- Σχετικιστική μηχανική: αρχική ορμή p , στόχος μάζας m , $E \gg m_{\text{beam}}$

$$\begin{aligned} m_{cm}^2 &= p_{tot}^2 = (p, 0, 0, E + m)^2 \\ (E + m)^2 - p^2 &= E^2 + 2Em + m^2 - p^2 \approx 2Em \\ m_{cm} &\approx \sqrt{2Em} \end{aligned}$$

Ενεργός διατομή και Φωτεινότητα

- “θεμελιώδης σχέση στις υψηλές ενέργειες”

$$N = L\sigma\epsilon$$

Αριθμός παρατηρημένων γεγονότων

Ολική φωτεινότητα (m^{-2})

Ενεργός διατομή (m^2)

efficiency (acceptance)

- **φωτεινότητα: αριθμός ανά μονάδα σκεδαζόμενης επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου**

Φωτεινότητα στους επιταχυντές

- Ολική φωτεινότητα μετριέται σε fb^{-1} αντίστροφες μονάδες της ενεργούς διατομής:

inverse barns (b^{-1})

- Τυπικές φωτεινότητες:

– Tevatron: $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

– LHC: $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (later: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

- 
- Έχουμε περίπου: $\text{year} = 10^7 \text{ seconds}$, επομένως

• $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} = 1 \text{ fb}^{-1}/\text{year}$

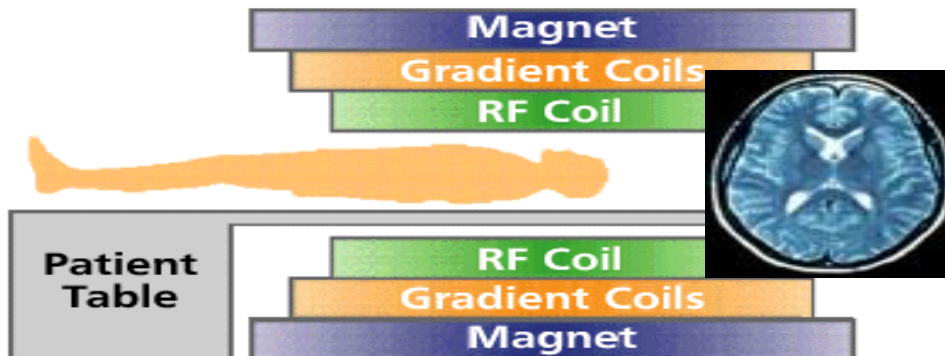
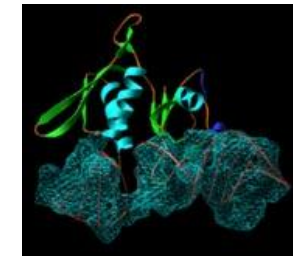
Ιατρικές Εφαρμογές με Επιταχυντές

Θεραπεία Νετρονίων στο Fermilab



Θεραπεία πρωτονίων at Loma Lina

Light Sources, imaging DNA, Viruses, proteins



Υπεραγωγίμοι μαγνήτες για MRI

Tandem-accelerator

(Povh et al., N & P)

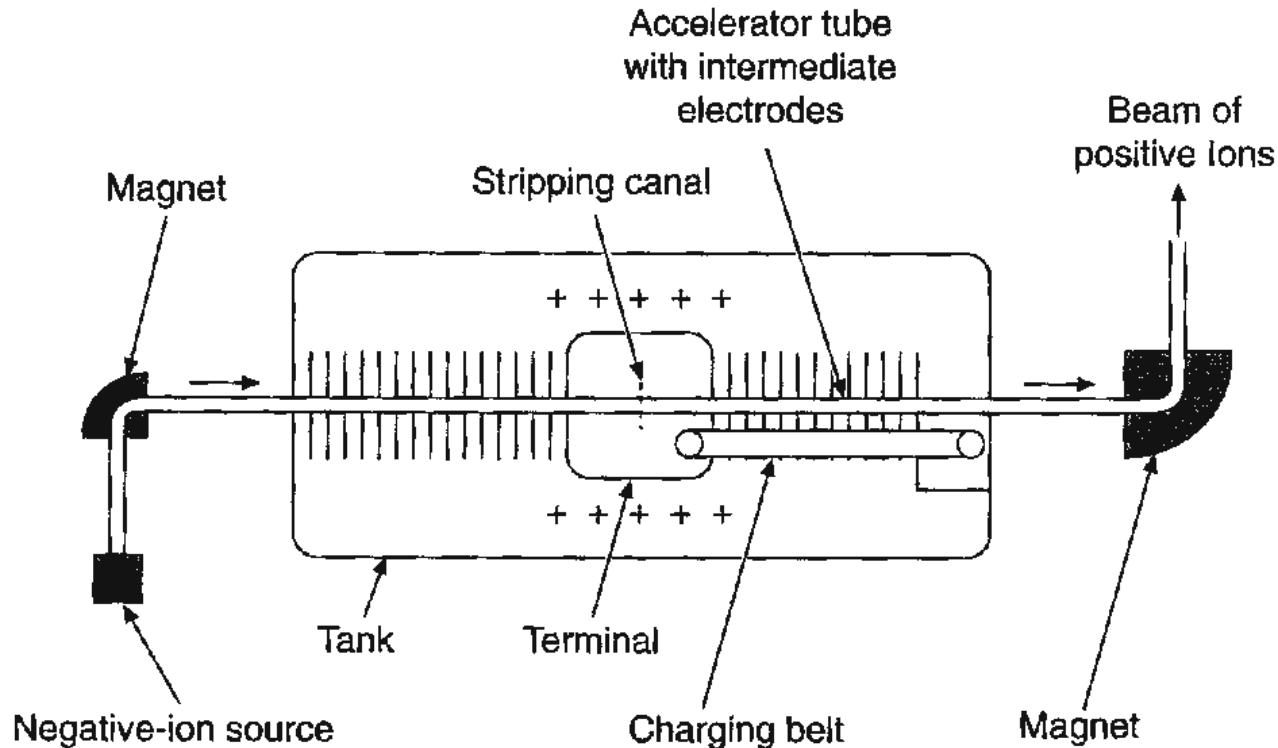
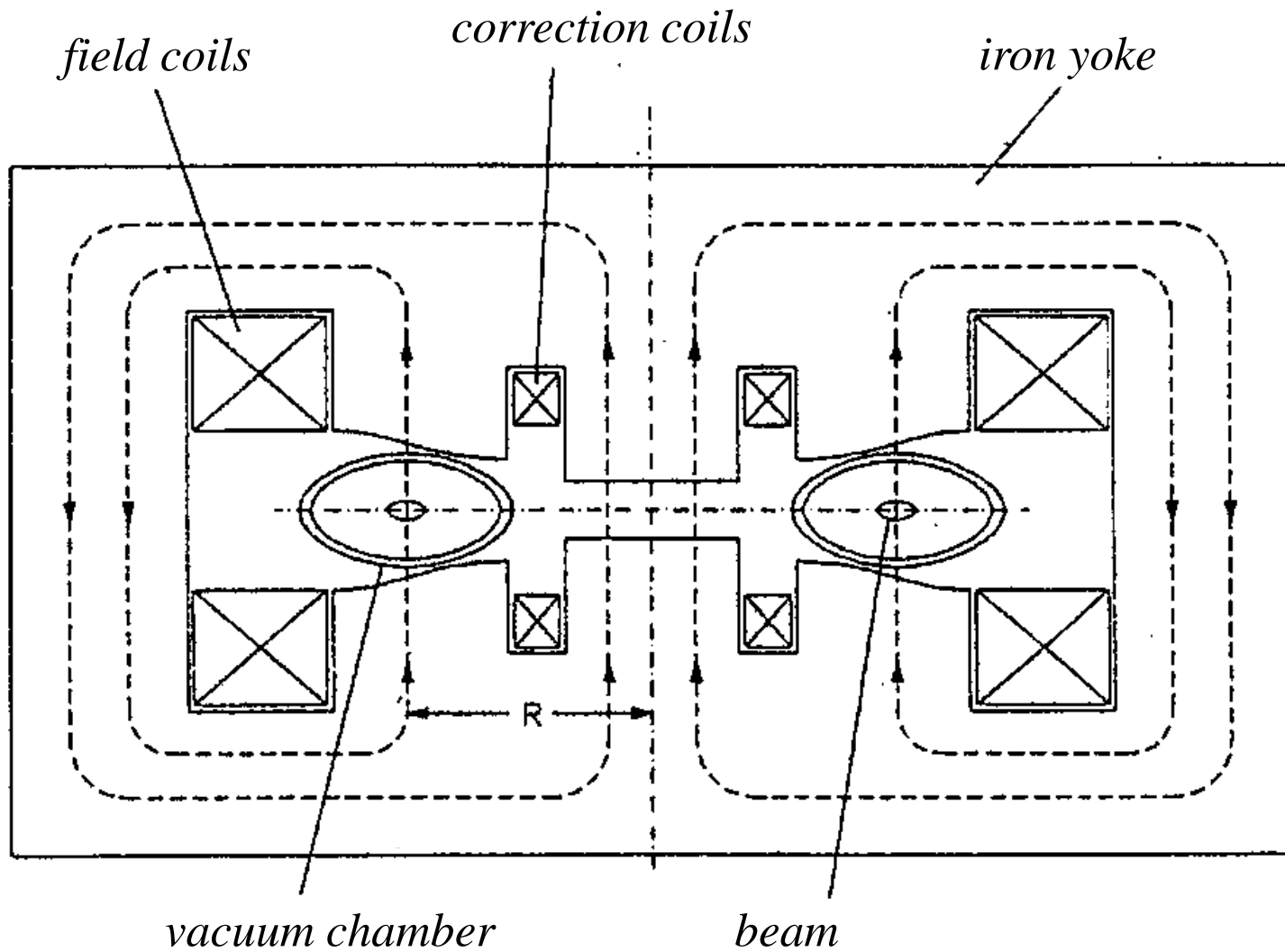
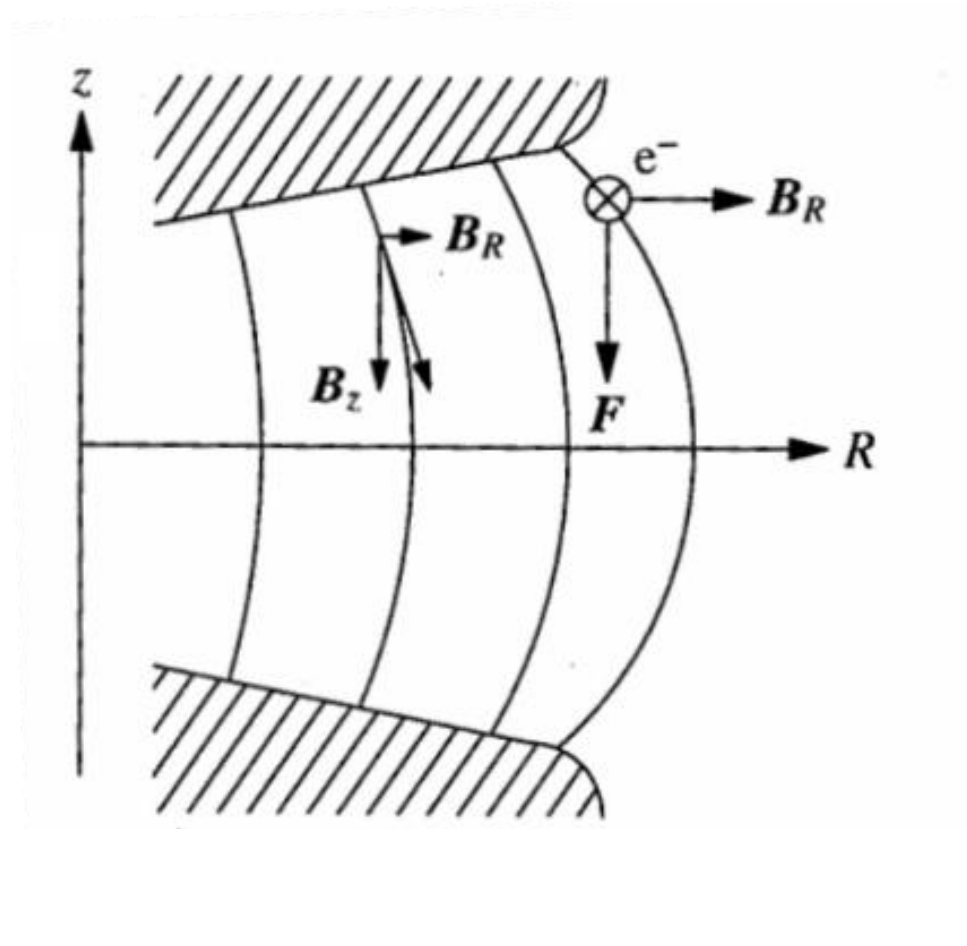


Fig. A.1. Sketch of a tandem Van de Graaff accelerator. Negative ions are accelerated from the left towards the terminal where some of their electrons are stripped off and they become positively charged. This causes them to now be accelerated away from the terminal and the potential difference between the terminal and the tank is traversed for a second time.

The Betatron

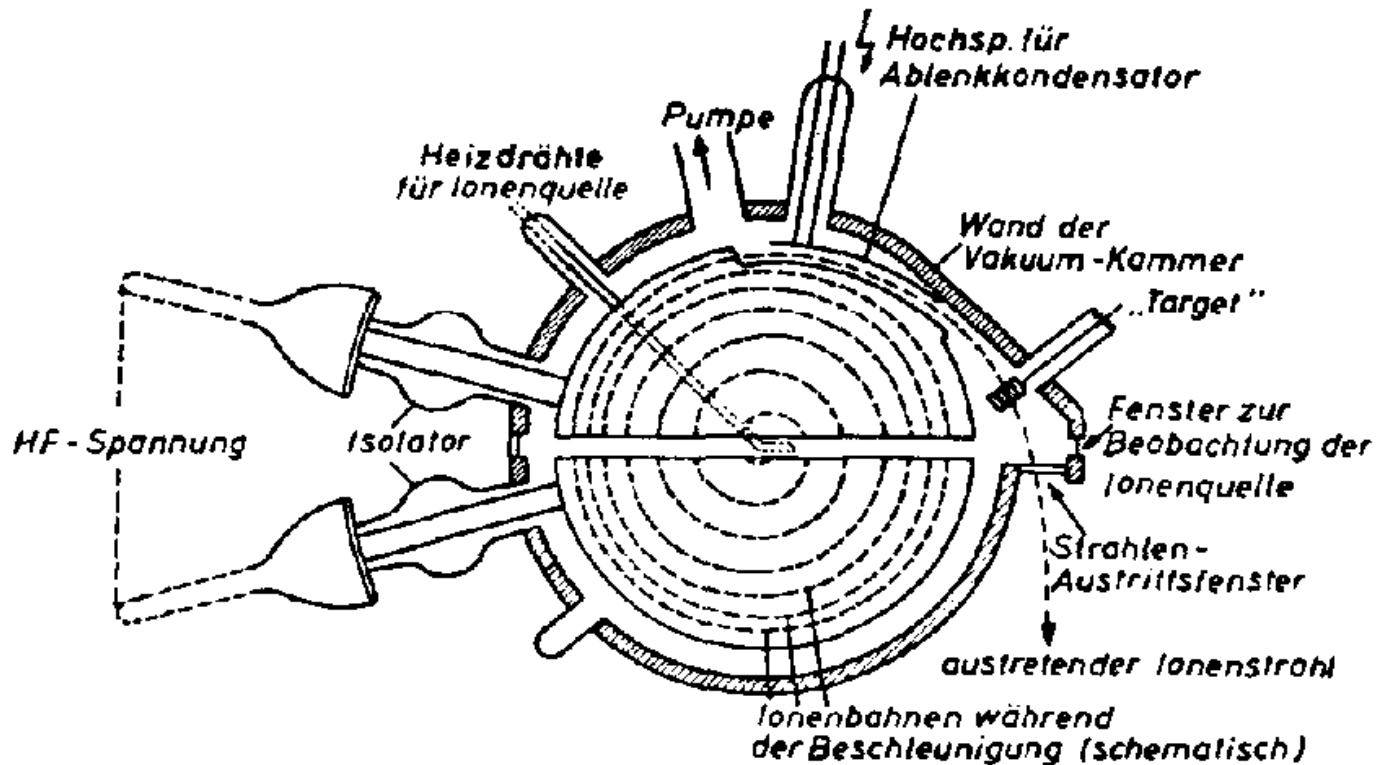


Axial stability



Cyclotron

(Wille, Teilchenbeschleuniger)



Schnitt

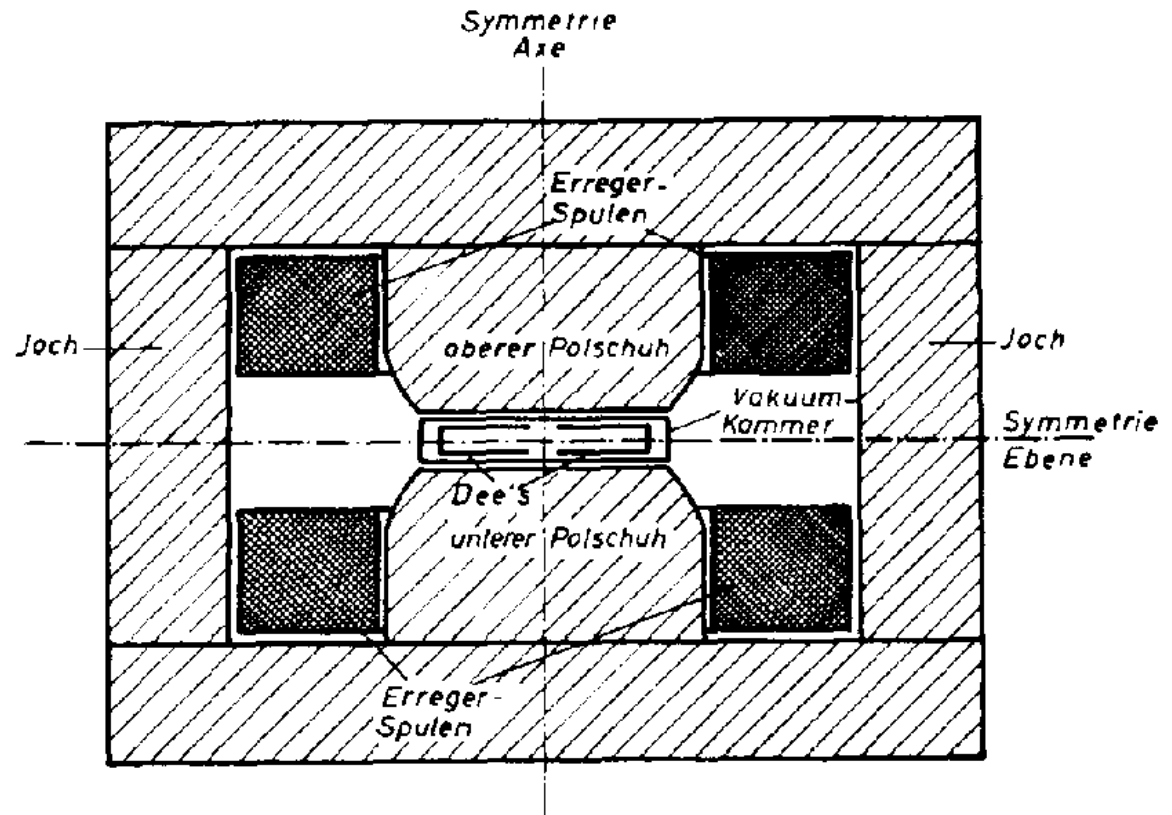


Abb. 43: Gesamtaufbau eines Cyclotrons
Schnitt durch die Symmetrieachse
(schematisch)

One of the first Cyclotrons...

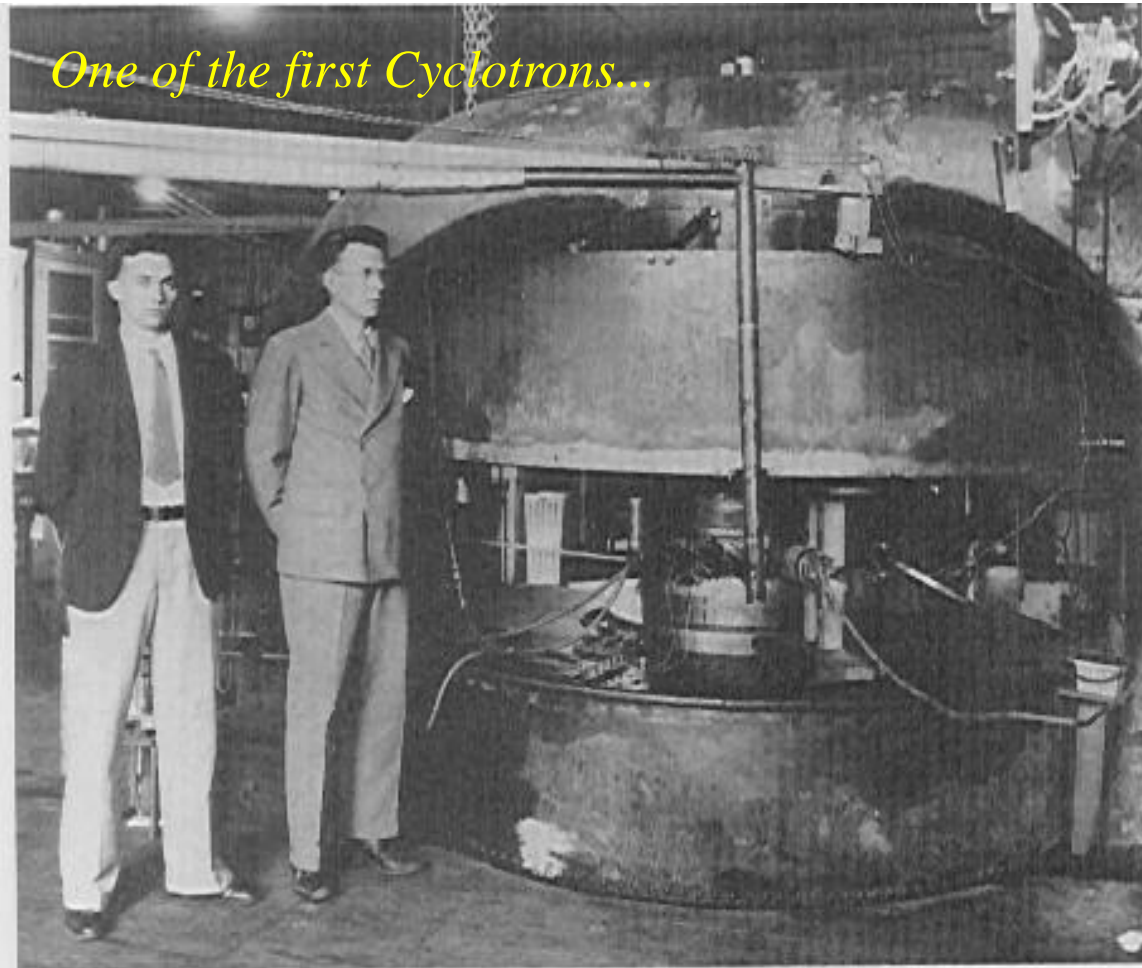


Abb. 11.7 M. S. Livingston und E. O. Lawrence im ersten Strahlenlabor der *University of California* in Berkeley neben dem 37-inch-Zyklotron. Ursprünglich maß das Zyklotron 27 inch, es wurde aber auf 37 inch vergrößert und zur Messung des magnetischen Moments von Neutronen sowie zur Herstellung des ersten künstlichen Elements, Technetium, eingesetzt.
(Lawrence Berkeley Laboratory)

... and a little bit later

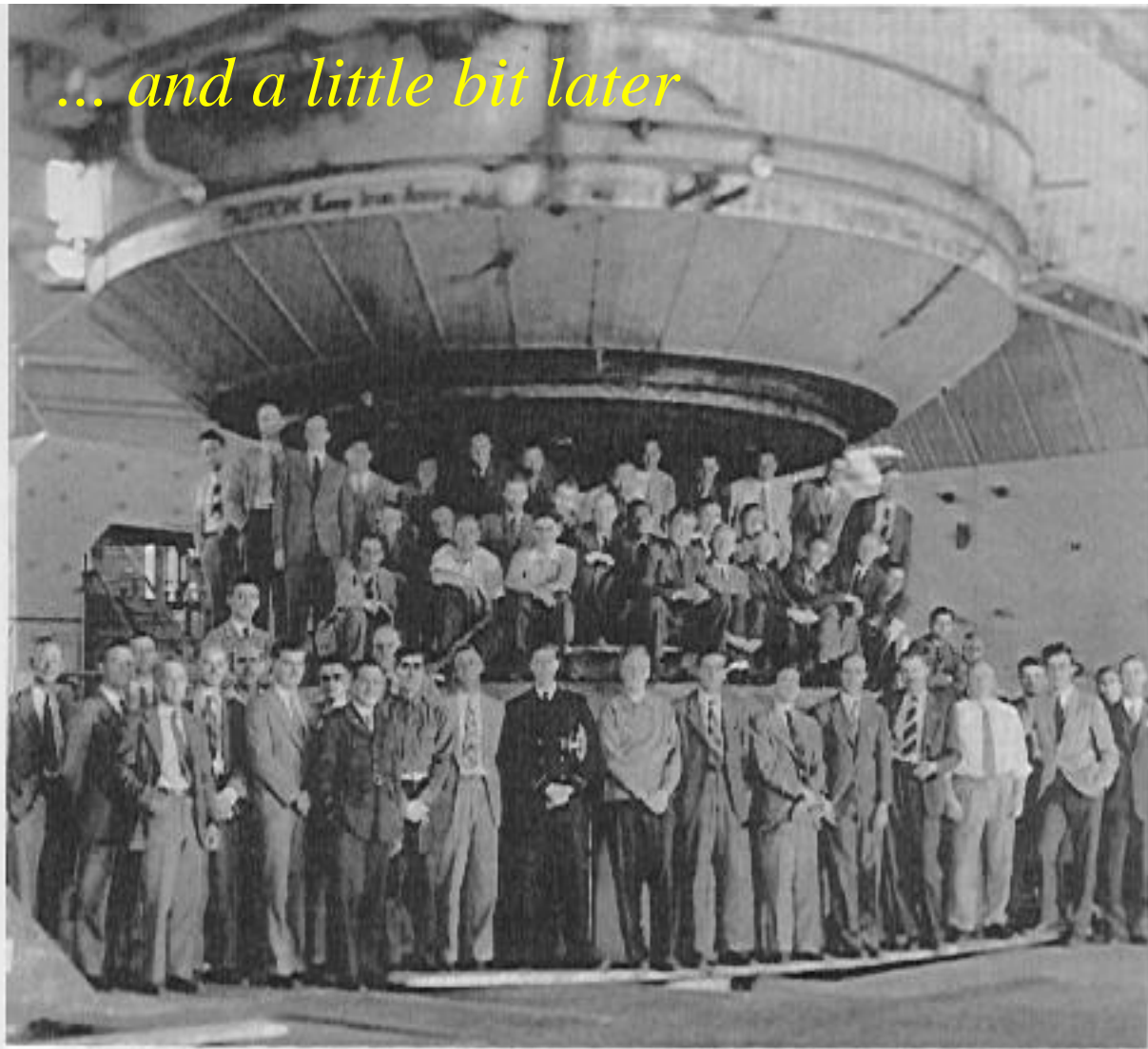


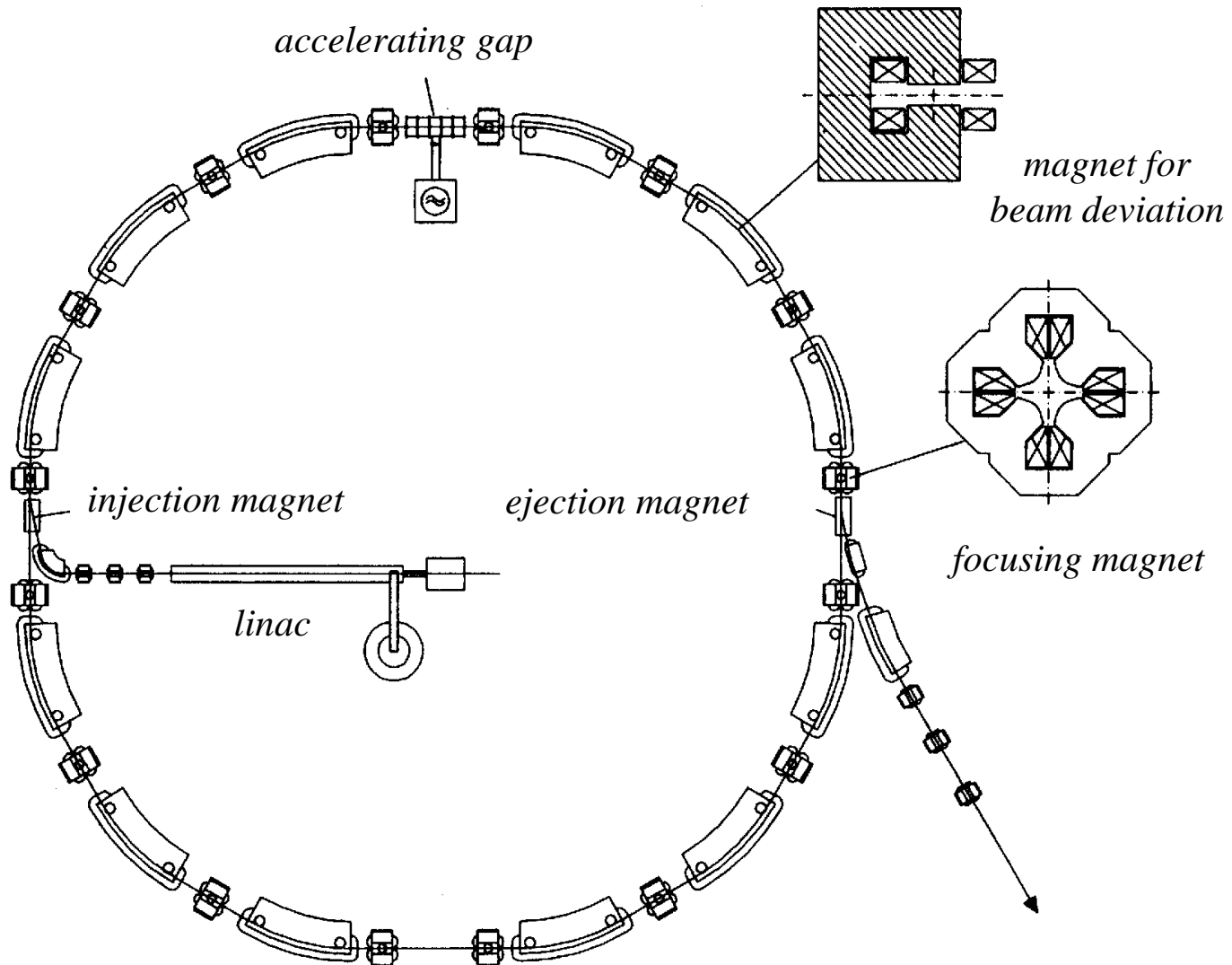
Abb. 11.9 Das nach dem Krieg gebaute 184-inch-Synchrozyklotron mit einem Teil der an seinem Bau beteiligten Belegschaft. Mit dieser Maschine wurden die ersten künstlichen Mesonen erzeugt. (Lawrence Berkeley Laboratory)

The isochrone- cyclotron at PSI



Synchrotron

(Wille, Teilchenbeschleuniger)



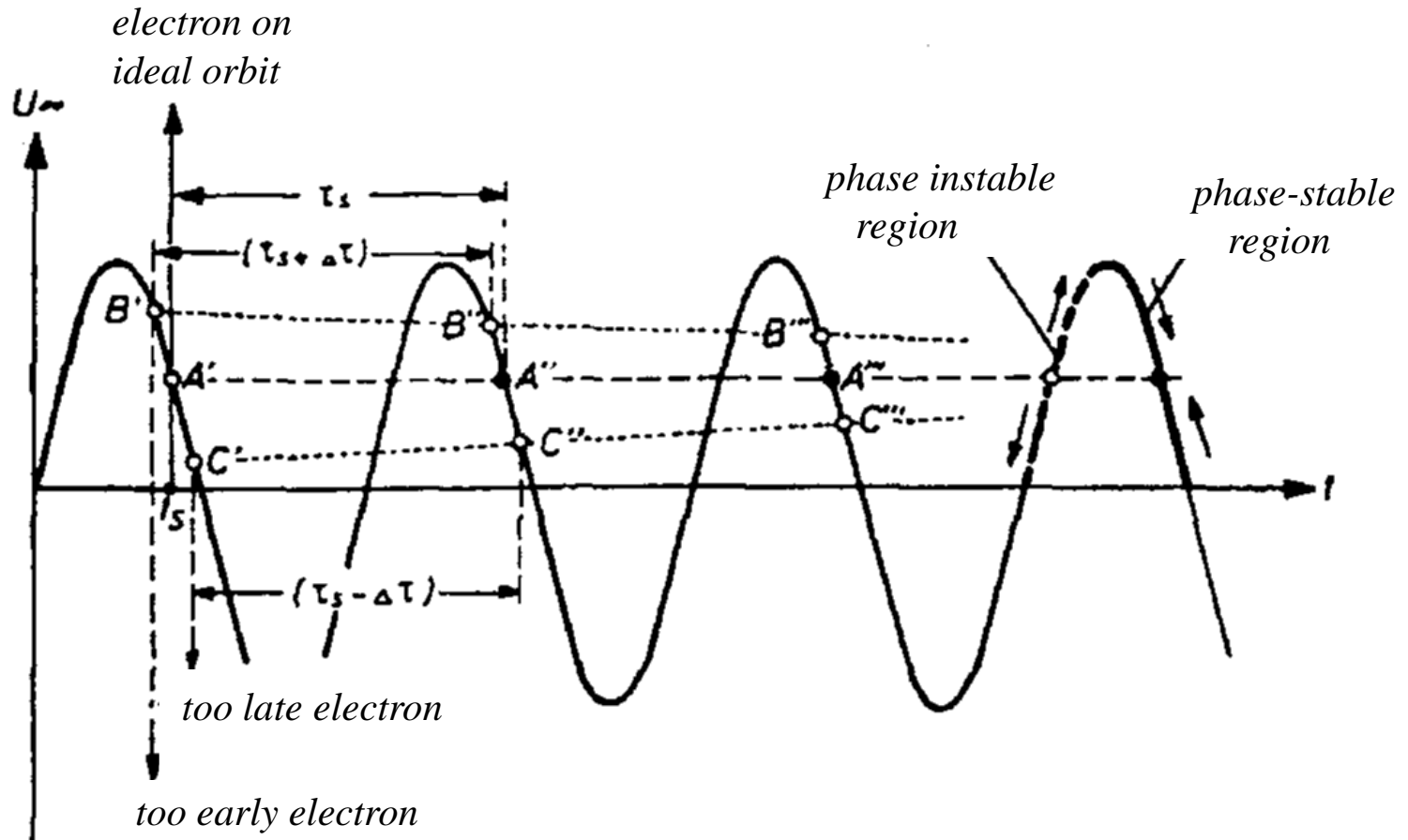
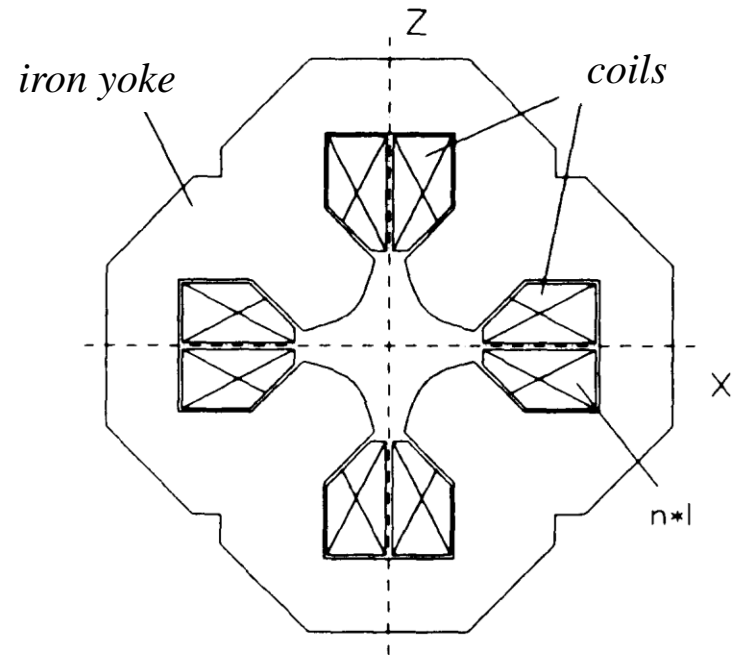
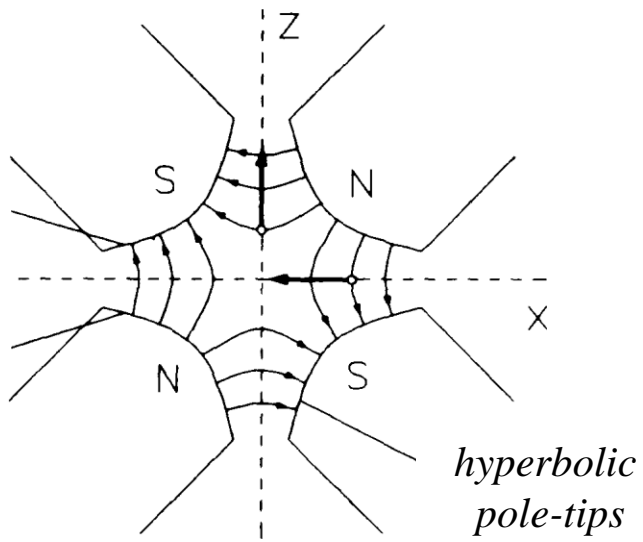
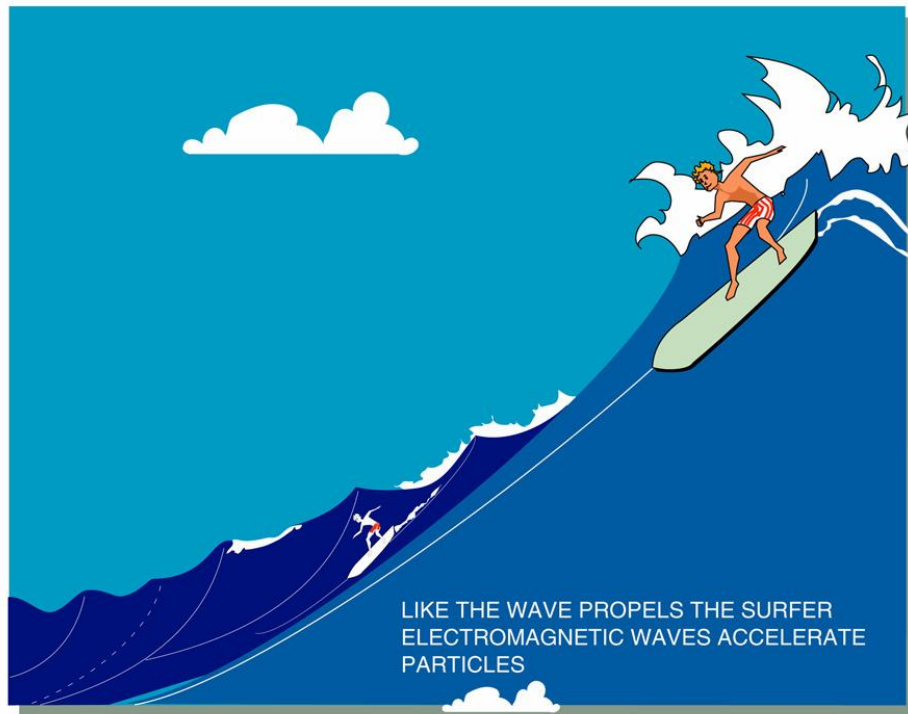
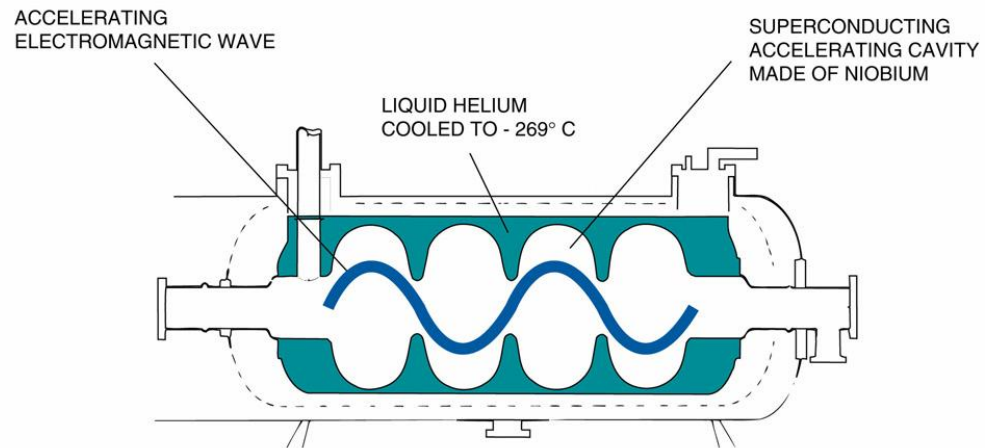


Abb. 2.18: Phasendiagramm für Synchrotron (aus [Ko55])





THE USE OF SUPRACONDUCTIVITY TO INCREASE PERFORMANCES AND CONSIDERABLY REDUCE ELECTRICITY CONSUMPTION

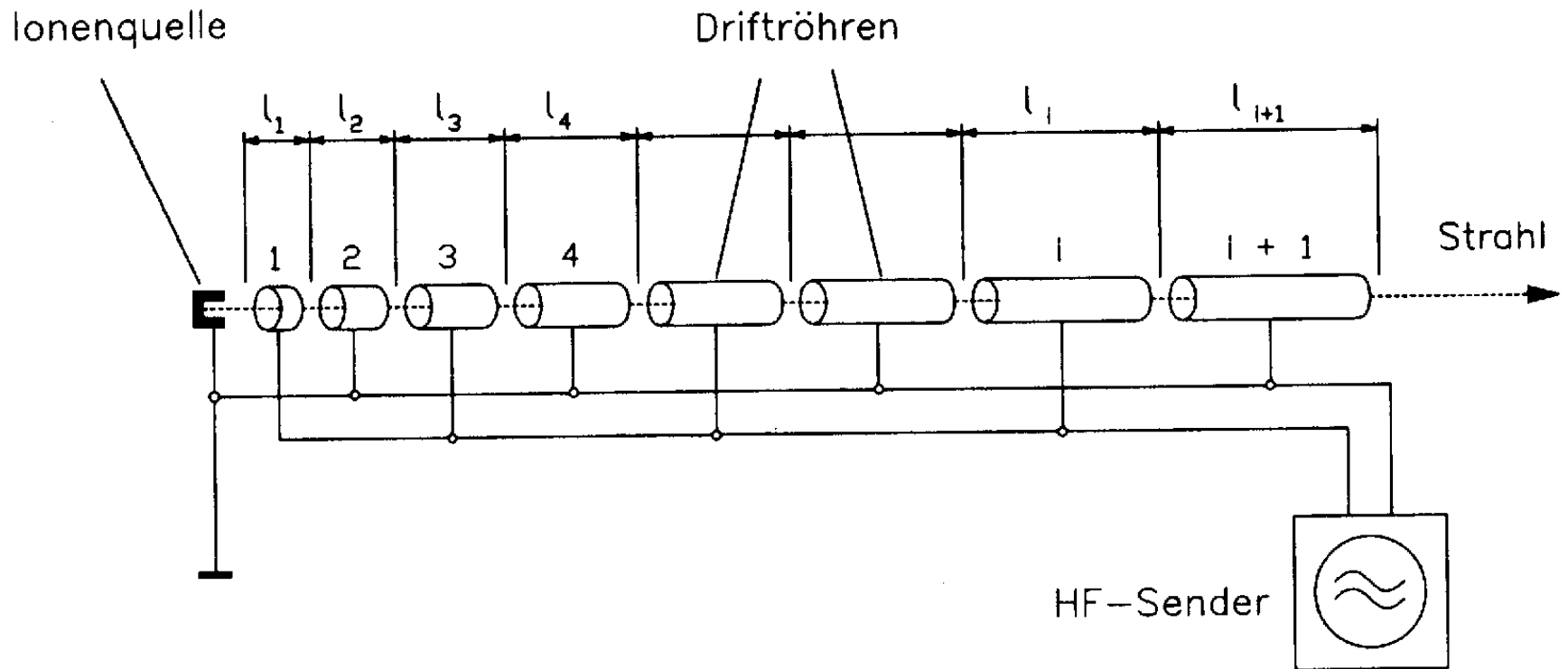




Lear (CERN)

Proton-Linac

(Wille, Teilchenbeschleuniger)



Collider

(Wille, Teilchenbeschleuniger)

