

Επιταχυντές και Ανιχνευτές στην Πυρηνική και Σωματιδιακή Φυσική

Κ.Κορδάς Δ. Σαμψωνίδης

Διαλεξη 5η

Περιεχόμενα

Μέχρι τώρα έχουμε δει:

- Κυματοδηγοί – κοιλότητες συντονισμού
- Γραμμικός Επιταχυντής
- Κυκλικοί επιταχυντές
 - Betatron
 - Cyclotrons
 - Synchrotrons
- Μαγνήτες
- Θεώρημα Liouville

Κυκλικοί Επιταχυντές

Συγχρονισμός μεταξύ ταλαντώμενων ηλεκτρικών πεδίων επιτάχυνσης και της συχνότητας περιστροφής των σωματιδίων

A. Cyclotron

1. Uniform-Field Cyclotron
2. Azimuthally-Varying-Field (AVF) Cyclotron
3. Separated-Sector Cyclotron
4. Spiral Cyclotron
5. Superconducting Cyclotron

B. Betatron

C. Synchrotron

1. Weak Focusing Synchrotron
2. Strong Focusing Synchrotron
 - Alternating Gradient Synchrotron (AGS).
 - Separated Function Synchrotron.
3. Storage Ring
4. Collider

Όρια για p/ions σε Linacs

Τα στοιχεία επιτάχυνσης και οι πηγές ισχύος είναι ακριβά και χρησιμοποιούνται για ένα πέρασμα της δέσμης

Για μεγαλύτερες ενέργειες οι linacs γίνονται πολύ μεγάλοι

($\sim 2\text{MeV/m} \rightarrow 200\text{ MeV protons} \rightarrow 100\text{m}$)

Ενέργεια δέσμης δεν αλλάζει

Σωματίδια με διαφορετικό Z/A δύσκολα επιταχύνονται.

Δεν μπορεί να αποθηκευτεί η δέσμη

Μπορεί να δώσει μια “περίπου” συνεχή δέσμη

Όρια για **cyclotrons**

Για υψηλές ενέργειες οι μαγνήτες γίνονται τεράστιοι

-Superconducting cyclotrons

Για σχετικιστικά σωματρία χάνεται η συνθήκη συγχρονισμού

-Synchro-cyclotrons

Ακόμη και με βελτιώσεις περιορισμός στην ενέργεια ($p < 1\text{GeV}$)

Ενέργεια δέσμης είναι σταθερή (fixed)

Δεν μπορεί να αποθηκευτεί η δέσμη

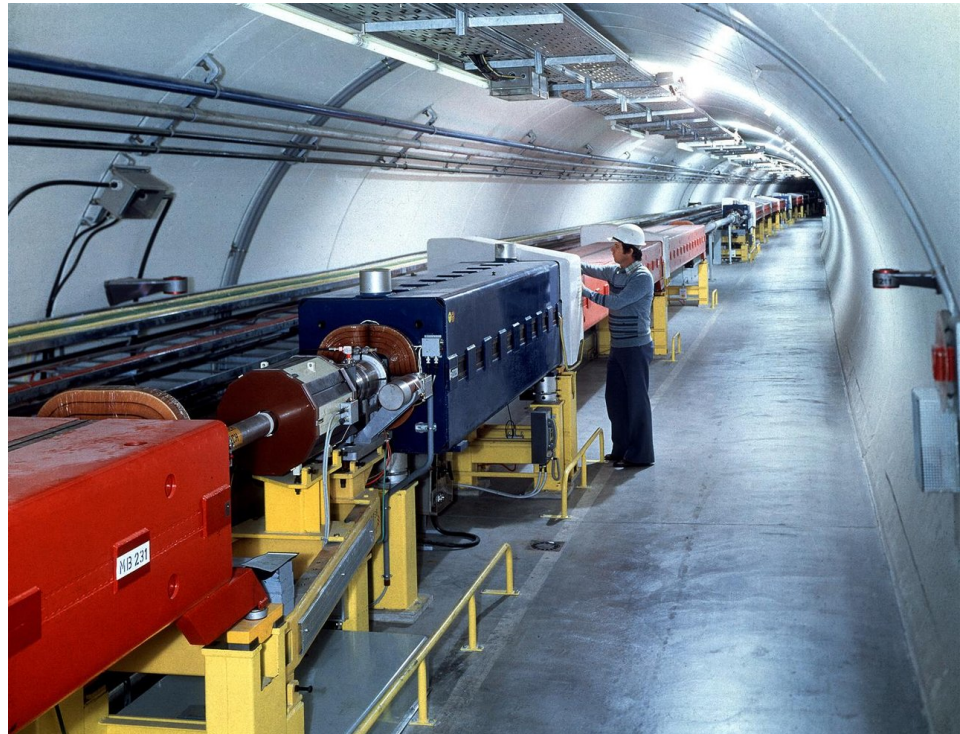
Μπορεί να δώσει μια “περίπου” συνεχή δέσμη

Synchrotrons / Storage Rings / Colliders

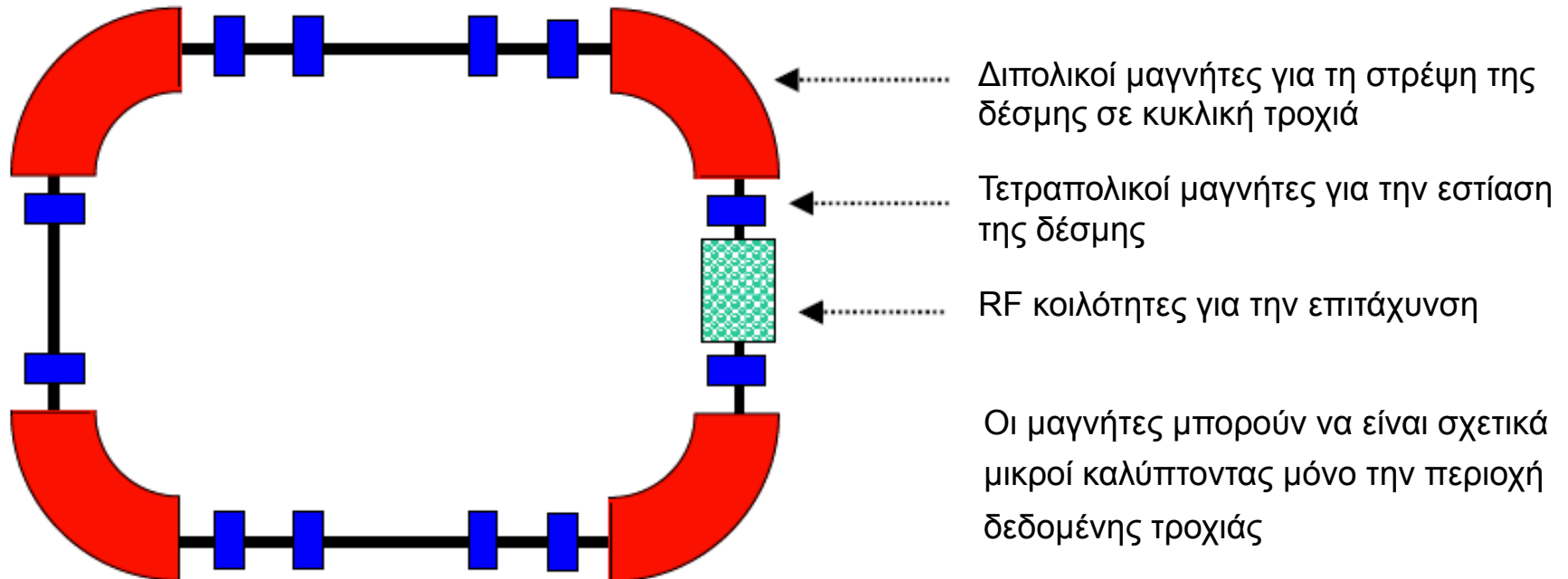
Wideroe 1943, McMillan, Veksler 1944,
Courant, Livingston, Snyder 1952

Βασική Ιδέα:

- Ορίζεται μια κυκλική τροχιά των σωματιδίων,
- η δέσμη των σωματιδίων διατηρήτε σε τροχιά κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης,
- οι μαγνήτες τοποθετούνται στην τροχιά για να καθοδηγούν και να εστιάζουν τη δέσμη.

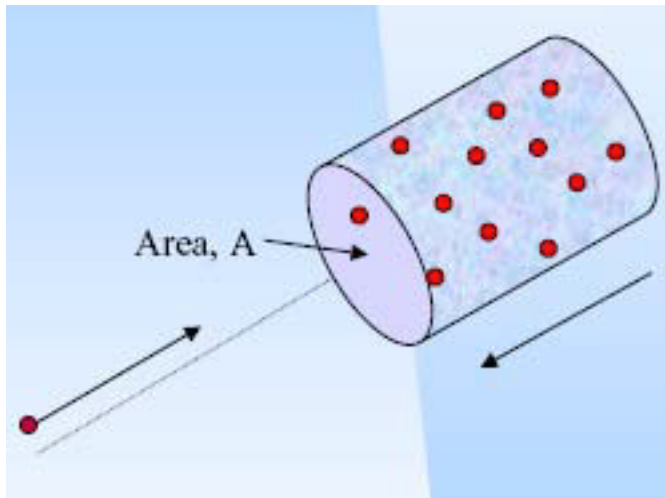


Synchrotrons



- Σε αντίθεση με το γραμμικό (Linac) και το cyclotron η δέσμη μπορεί να αποθηκευτεί για μεγαλύτερη χρονική περίοδο
- Σωματίδια με διαφορετικό Z/A μπορούν να επιταχυνθούν
- Η τελική ενέργεια εξόδου μπορεί εύκολα να αλλάξει

Luminosity (Φωτεινότητα)



Μέτρο του ρυθμού της αντίδρασης ανά μονάδα ενεργούς διατομής.

Δύο κυλινδρικά πακέτα (bunches) με επιφάνεια A . Κάθε σωματίδιο στο ένα πακέτο βλέπει ένα μέρος $N\sigma/A$ του άλλου πακέτου.

(σ =interaction cross section).

Ο αριθμός των αλληλεπιδράσεων των δύο πακέτων είναι $N^2\sigma/A$.

Έστω ότι συναντώνται f φορές/s

Ρυθμός αντίδρασης $R = f N^2\sigma/A$,

Luminosity
$$L = f \frac{N^2}{A}$$

Fermilab

p-pbar collider $L \sim 10^{30} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

LHC $L \sim 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Τροχιά

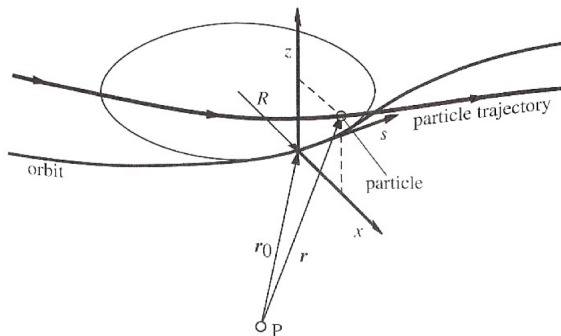
- Τα σωματίδια της δέσμης ακολουθούν την κλειστή τροχιά συνεχώς μέχρι την να επιτευχθεί η επιθυμητή ενέργεια.
- Οι τροχιές μεμονωμένων σωματιδίων μέσα στη δέσμη παρουσιάζουν μικρές γωνιακές αποκλίσεις οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην απώλειά τους αν δεν υπάρξει μια διαδικασία εστίασης.

το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή κοντά στην ιδανική τροχιά

$$B_z(x) = B_{z0} + \frac{dB_z}{dx}x + \frac{1}{2!} \frac{d^2B_z}{dx^2}x^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3B_z}{dx^3}x^3 + \dots$$

$$\frac{e}{p} B_z(x) = \frac{1}{R} + kx + \frac{1}{2!} m x^2 + \frac{1}{3!} o x^3 + \dots$$

= δίπολο + τετράπολο + εξάπολο + οκτάπολο



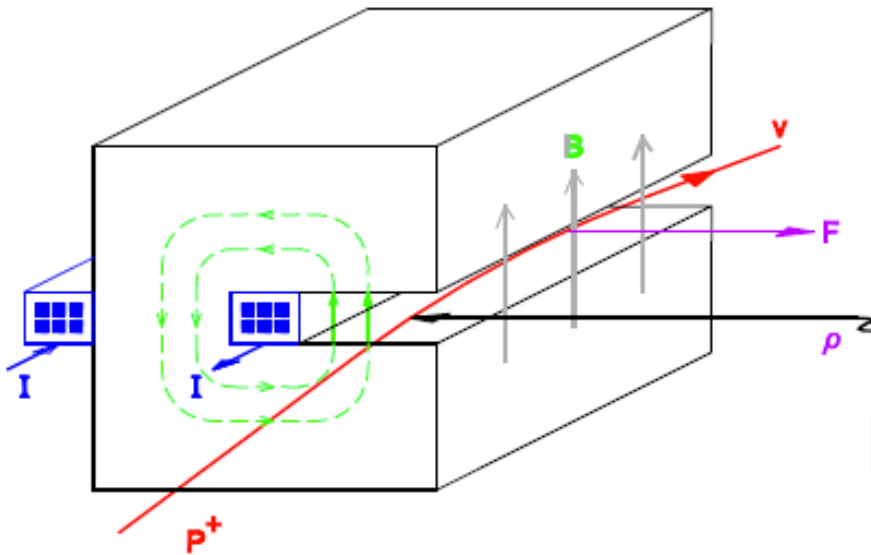
κινούμενο σύστημα συντεταγμένων

Το μαγνητικό πεδίο γύρω από τη δέσμη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα άθροισμα μαγνητικών πολυπόλων

Διπολικοί μαγνήτες

• Ένα δίπολο παράγει ένα ομογενές (κατακόρυφο) μαγνητικό πεδίο B

• Η δύναμη Lorentz είναι η κεντρομόλος δύναμη που κάμπτεται την τροχιά της δέσμης.



$$F_{\text{radial direction}}: evB = mv^2/\rho$$

$$B\rho = mv/e = m_0c\beta\gamma/e = p/e$$

Magnetic rigidity \propto Relativistic momentum

• Διαφορές μεταξύ ιόντων (Z, A) και πρωτονίων:

- Για πρωτόνια (φορτίο e , μάζα m_0): $B\rho = m_0c\beta\gamma/e$
- Για ιόντα (φορτίο Ze , μάζα Am_0): $B\rho = (A/Z) m_0c\beta\gamma/e$
- Για την ίδια ορμή/νουκλεόνιο, η δέσμη των ιόντων είναι ποιά δύσκαμπτη

Διπολικοί μαγνήτες

• Κατά την επιτάχυνση αυξάνει η ορμή (και με $BR = p/e$) πρέπει να αυξάνεται αντίστοιχα και το μαγνητικό πεδίο ώστε τα σωματίδια να διατηρούνται σε τροχιά.

Σε αντίθεση με το κύκλοτρο όπου το B =σταθερό και η R αυξάνει.

• Σαν αποτέλεσμα το σύγχροτρο δεν μπορεί να δώσει συνεχή δέσμη, η χρονική δομή της δέσμης αντανακλά στην αύξηση του μαγνητικού πεδίου ($\sim \text{Hz}$)

• Τα μαγνητικά δίπολα καθορίζουν την “ιδανική” τροχιά του σύγχροτρου και θεωρητικά ένα σωματίδιο θα κυκλοφορούσε για πάντα. Αλλά

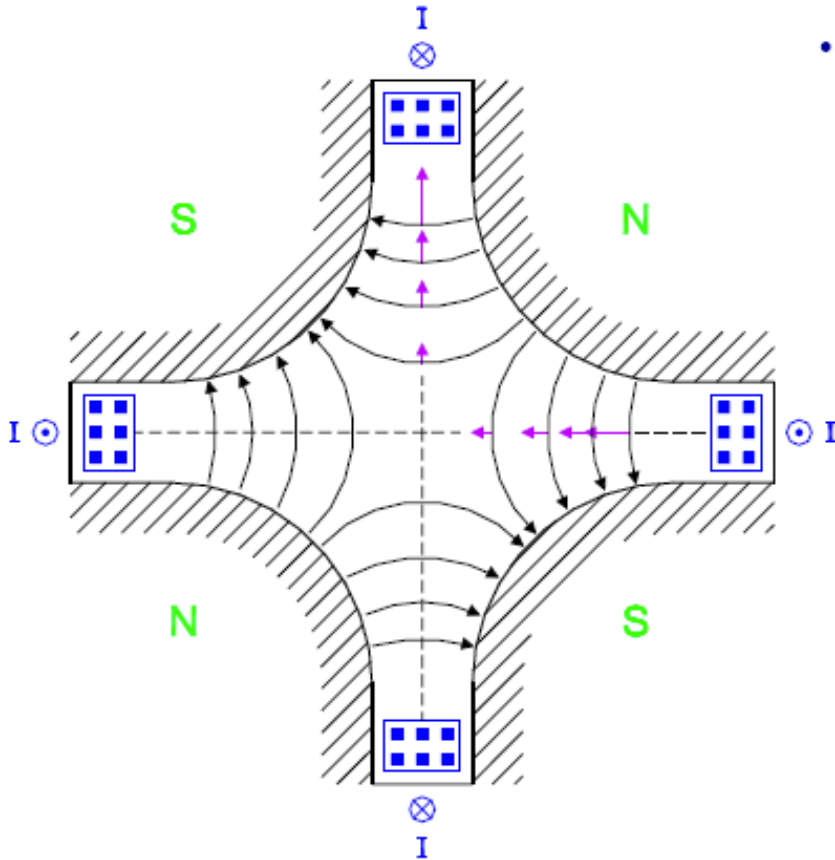
Η δέσμη αποτελείται από πολλά σωματίδια τα οποία έχουν μικρές αποκλίσεις από την ιδανική τροχιά .

Τα μαγνητικά πεδία των διπόλων έχουν μικρές ατέλειες

Τα δίπολα έχουν αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση....

• Άρα τελικά χρειαζόμαστε εστίαση για να σταθεροποιήσουμε τη δέσμη και να την διατηρήσουμε μέσα στη μηχανή

Εστίαση: Τετράπολα



$$F_x = -g \cdot x$$

$$F_y = g \cdot y$$

Η δύναμη αυξάνει γραμμικά σε σχέση με την μετατόπιση από το κέντρο.

Δυστυχώς, το αποτέλεσμα είναι αντίθετο στα δύο επίπεδα (Οριζόντιο και Κάθετο)

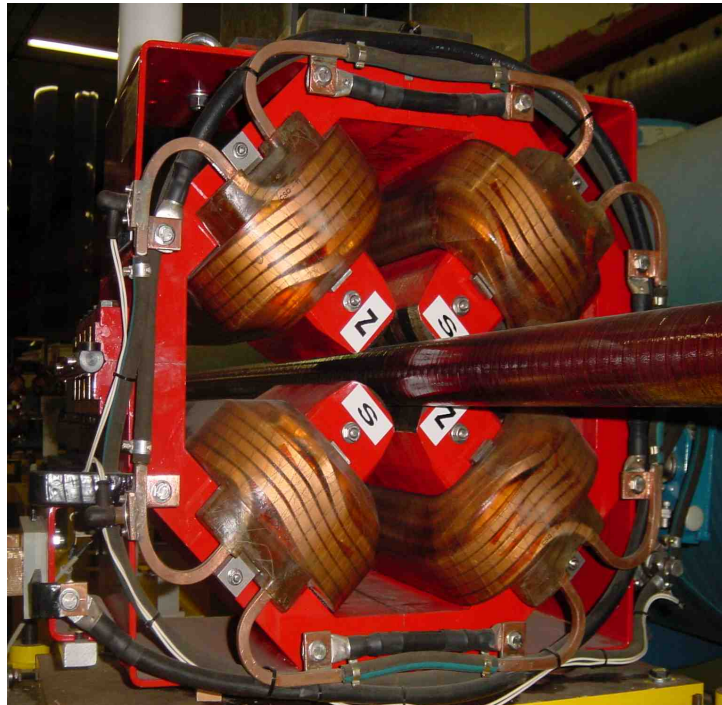
Ο τετραπολικός μαγνήτης όταν εστιάζει στο οριζόντιο επίπεδο, αποεστιάζει στο κάθετο επίπεδο, (και αντίστροφα).

Οι οπτικοί φακοί είναι είτε συγκλίνοντες (εστίαση) είτε αποκλίνοντες (αποεστίαση)

Οι μαγνητικοί φακοί εστιάζουν στο ένα επίπεδο αλλά συγχρόνως αποεστιάζουν στο κάθετο επίπεδο.

..... αλλά αυτό δεν είναι πρόβλημα γιατί

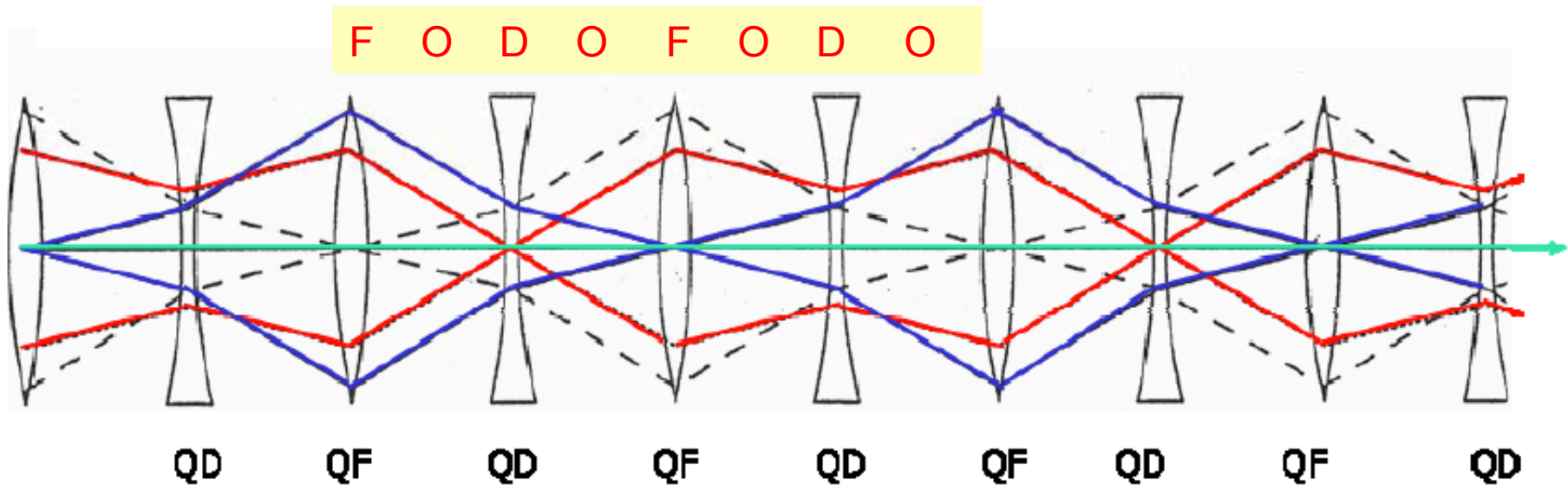
Τετράπολα



Εναλλασσόμενη εστίαση

Εναλλασσόμενοι μαγνητικοί φακοί (τετράπολα), συγκλίνοντες (εστίαση) και αποκλίνοντες (αποεστίαση) έχουν ένα συνολικό αποτέλεσμα εστίασης.

Απλοϊκή εξήγηση : Το μέγεθος της δέσμης αυξάνει όταν περνάει από ένα στοιχείο αποεστίασης, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρότερων δυνάμεων όταν περνάει από το επόμενο εστιακό στοιχείο.



Τα σωματίδια της δέσμης πραγματοποιούν ταλαντώσεις γύρω από την ονομαστική τροχιά.

Εξίσωση κίνησης

Η εξίσωση κίνησης ενός σωματιδίου σε ένα μαγνητικό πεδίο

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{e}{m} (\dot{\mathbf{r}} \times \vec{B})$$

Θεωρώντας ότι το μαγνητικό πεδίο έχει μόνο εγκάρσιες συνιστώσες

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

οι εξισώσεις είναι της μορφής

$$x'' + k(s)x = 0$$

Η γενική λύση είναι της μορφής

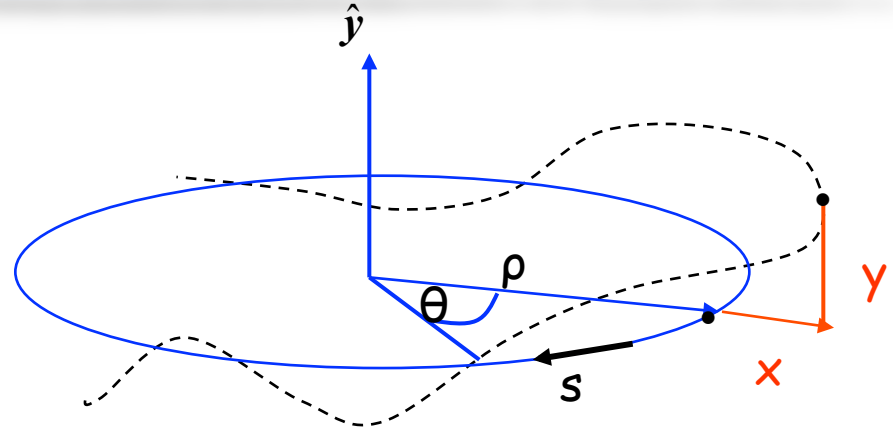
$$x(s) = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\beta(s)} \cos(\Psi(s) + \phi)$$

ε σταθερά, emittance
 $\beta(s)$ εξαρτάται από την εστίαση, θέση

Εξίσωση κίνησης

* Η Εξίσωση κίνησης στο οριζόντιο επίπεδο:

$$x'' + x \left(\frac{1}{\rho^2} + k \right) = 0$$



x = πλάτος ταλάντωσης τροχιάς σωματιδίου

x' = γωνία της τροχιάς του σωματιδίου σε σχέση με την ονομαστική τροχιά.

* Η Εξίσωση κίνησης στο κατακόρυφο επίπεδο:

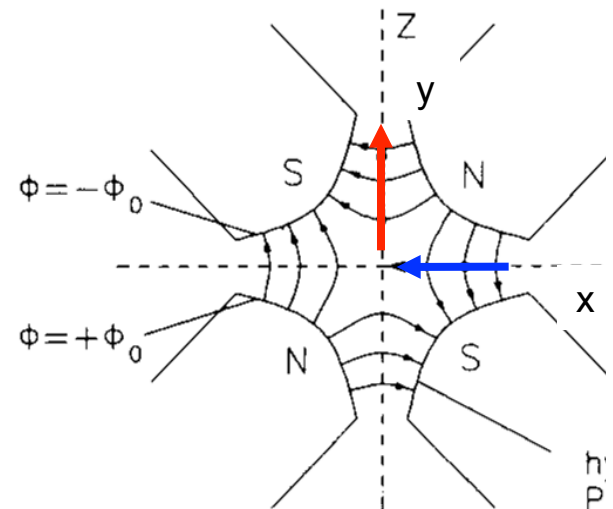
$$\frac{1}{\rho^2} = 0$$

Χωρίς δίοπλα ... γενικά ...

$$k \leftrightarrow -k$$

Το τετραπολικό πεδίο αλλάζει πρόσημο

$$y'' - k y = 0$$



Εξίσωση κίνησης

$$x(s) = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\beta(s)} \cos(\Psi(s) + \phi)$$

τα σωματίδια εκτελούν ταλαντώσεις βήτατρου με πλάτος το οποίο εξαρτάται από τη θέση στην τροχιά

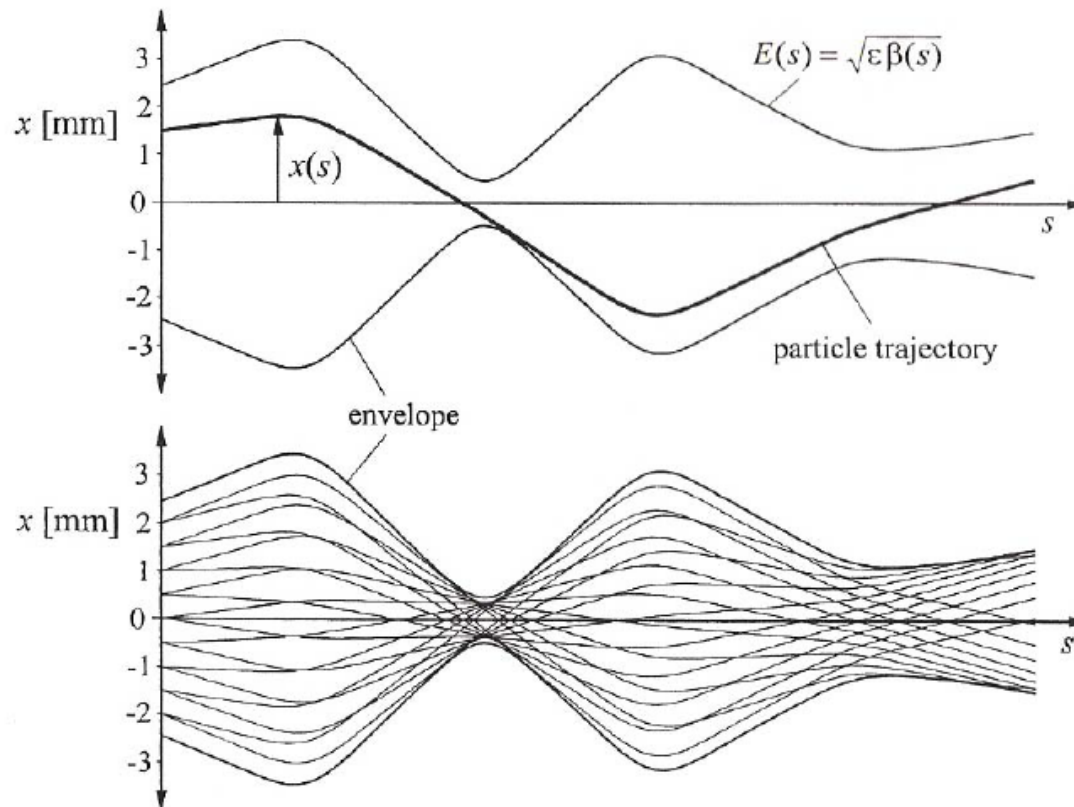
$$E(s) = \sqrt{\varepsilon \beta(s)}$$

ε	σταθερά , emittance
$\beta(s)$	εξαρτάται από την εστίαση, θέση

Η E είναι μια μέτρηση της διατομής της δέσμης στο σημείο s .
Τα σωματίδια της δέσμης πραγματοποιούν εγκάρσιες κινήσεις γύρω από την ιδανική τροχιά πάντα μέσα σε μια περιοχή (φάκελο) που ορίζεται από την $E(s)$

Εξίσωση κίνησης

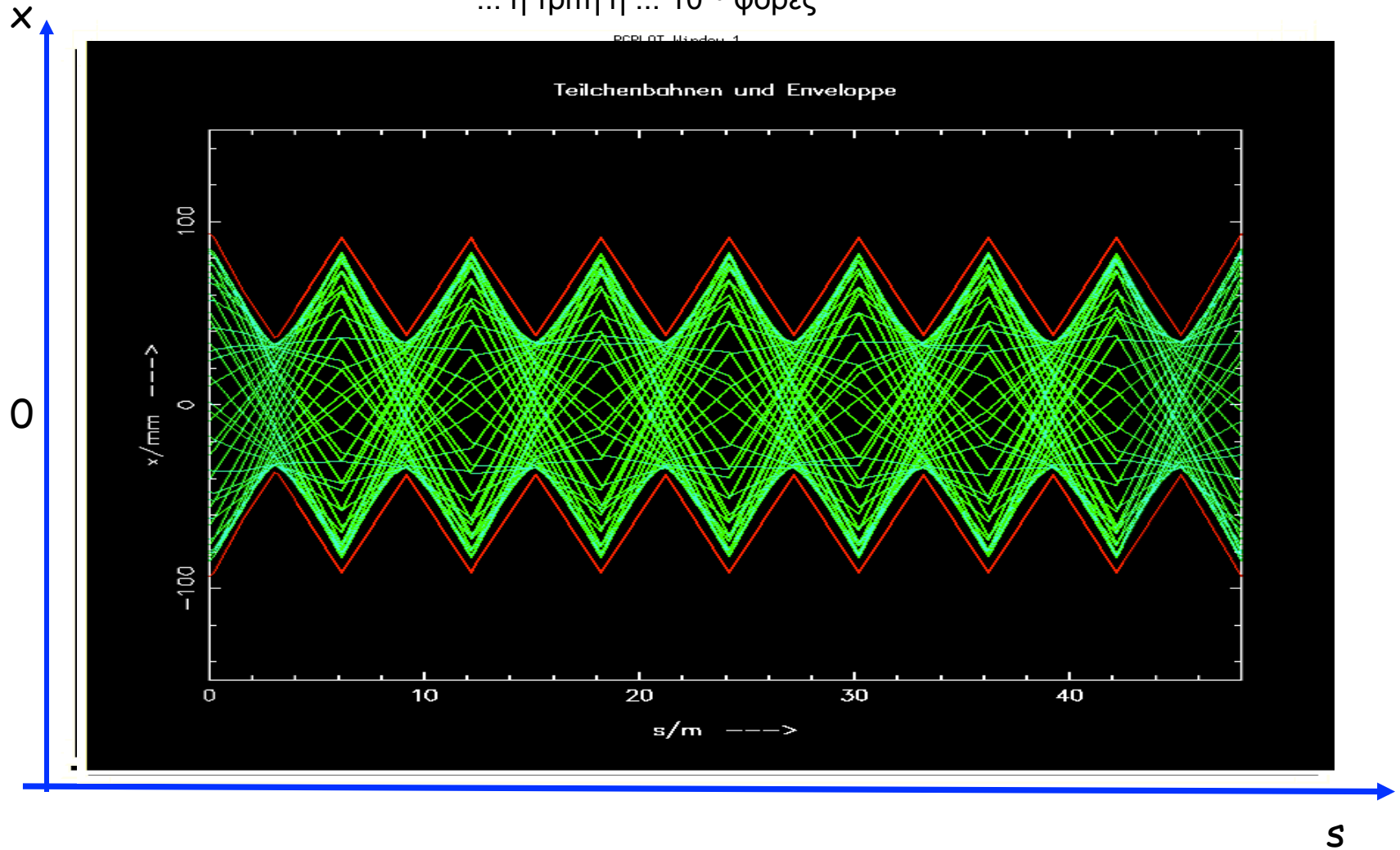
$$E(s) = \sqrt{\varepsilon\beta(s)}$$



Τροχιά σωματιδίου

Ερώτηση: Τι θα γίνει αν το σωματίδιο περάσει για δεύτερη φορά ;

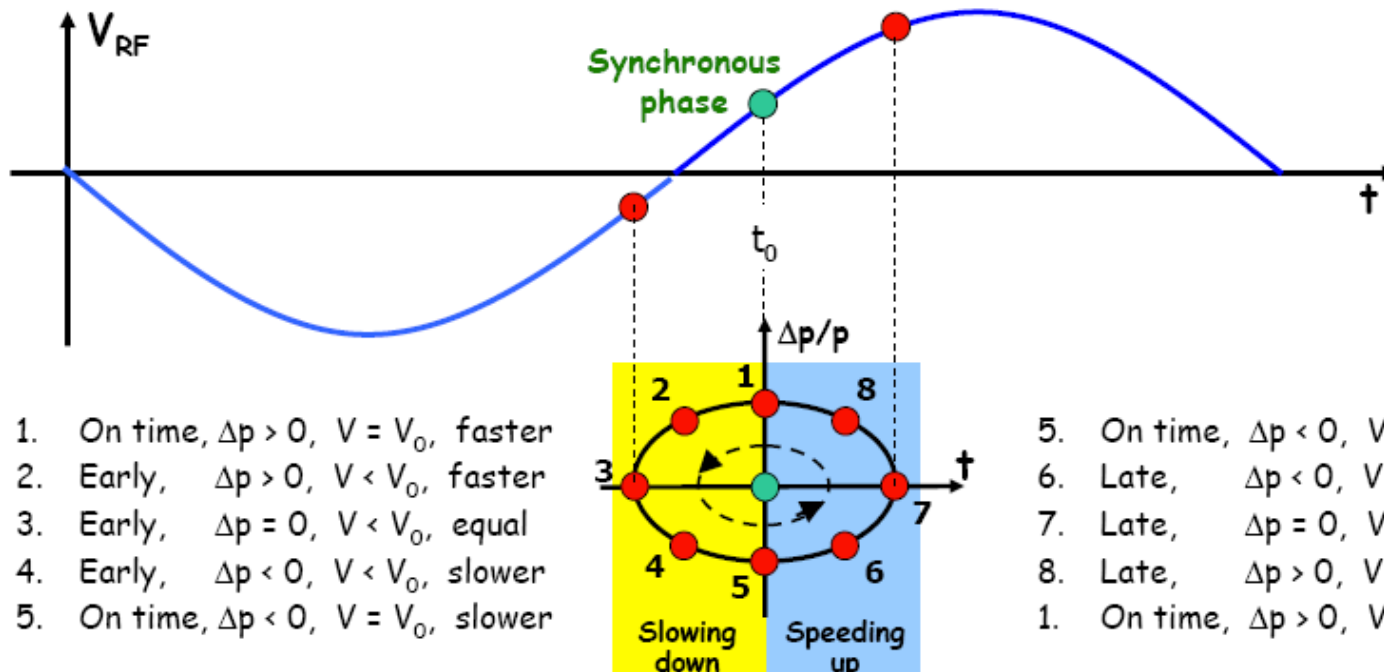
... ή τρίτη ή ... 10^{10} φορές



Διαμήκης κίνηση - Synchrotron oscillations

Synchrotrons (proton/ion)

Τα σωματίδια με μεγαλύτερη ορμή (ταχύτερα) έχουν μικρότερους χρόνους περιστροφής. Το “ιδεατό” σωματίδιο θα πρέπει να φτάνει πάντα στην ίδια RF φάση στην κοιλότητα σε κάθε περιστροφή (σύγχρονο σωματίδιο)



1. On time, $\Delta p > 0$, $V = V_0$, faster
2. Early, $\Delta p > 0$, $V < V_0$, faster
3. Early, $\Delta p = 0$, $V < V_0$, equal
4. Early, $\Delta p < 0$, $V < V_0$, slower
5. On time, $\Delta p < 0$, $V = V_0$, slower

5. On time, $\Delta p < 0$, $V = V_0$, slower
6. Late, $\Delta p < 0$, $V > V_0$, slower
7. Late, $\Delta p = 0$, $V > V_0$, equal
8. Late, $\Delta p > 0$, $V > V_0$, faster
1. On time, $\Delta p > 0$, $V = V_0$, faster

Αρχή της σταθερότητας φάσης.

Τα σωματίδια πραγματοποιούν ταλαντώσεις ως προς τη φάση και ως προς την ενέργεια γύρω από σύγχρονες τιμές οι οποίες είναι σταθερές.

Ταλαντώσεις σύγχροτου

Δυνάμεις εστίασης και τροχιές σωματιδίων

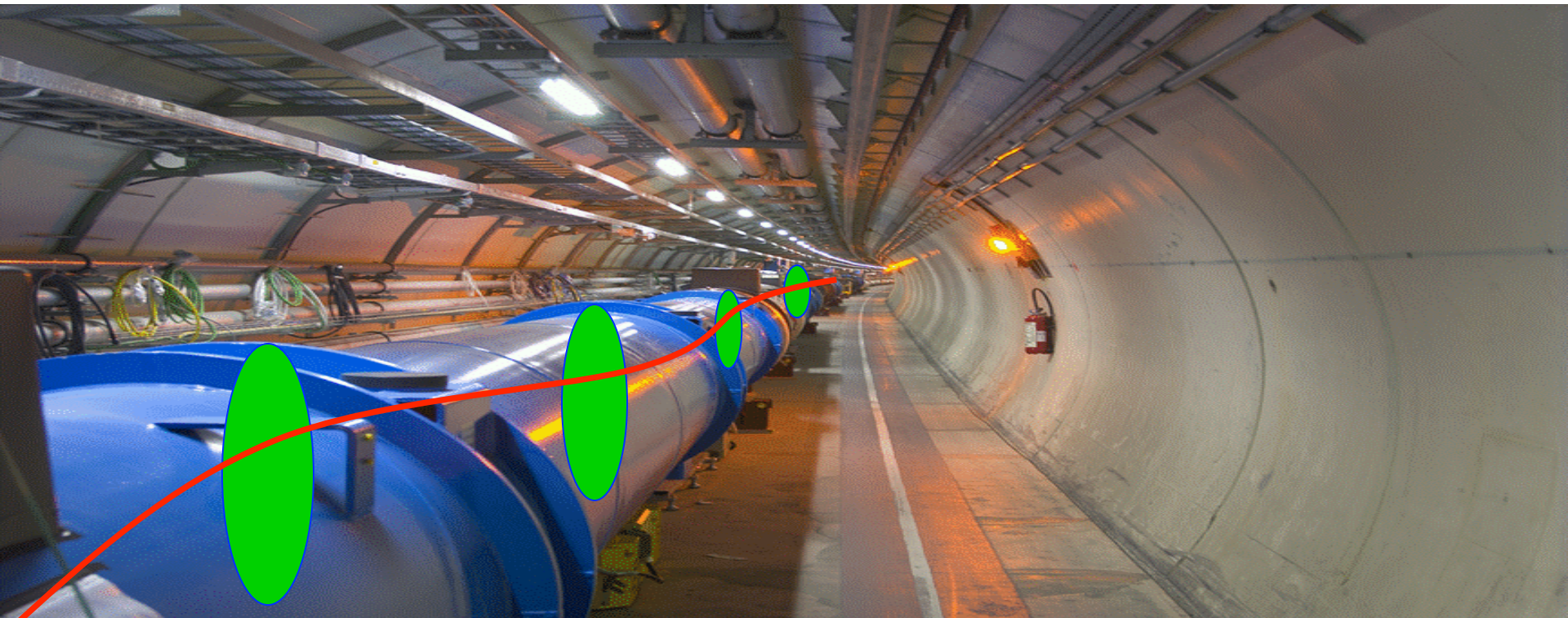
normalise magnet fields to momentum (remember: $B\rho = p / q$)

Dipole Magnet

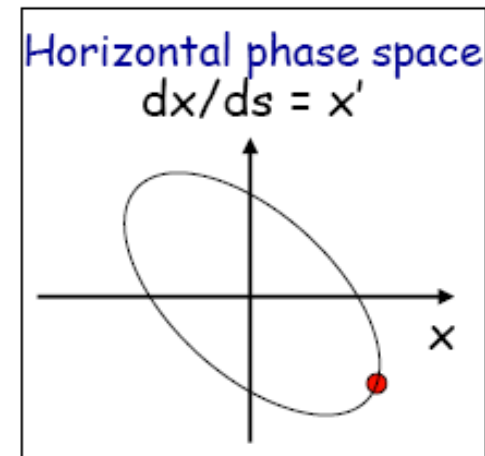
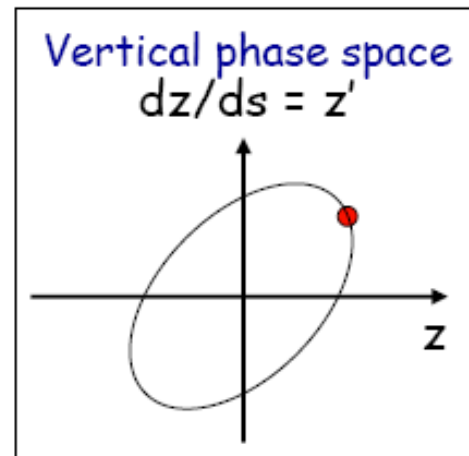
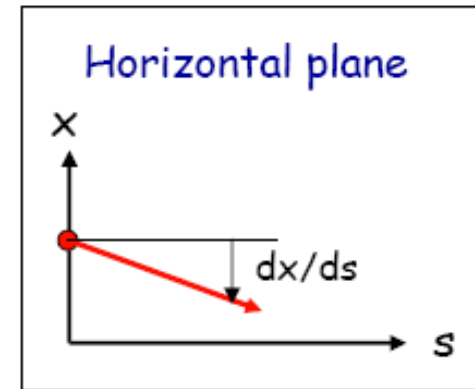
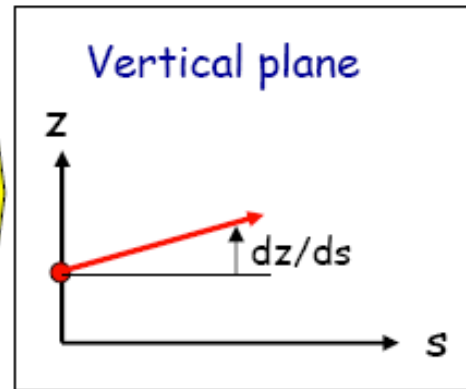
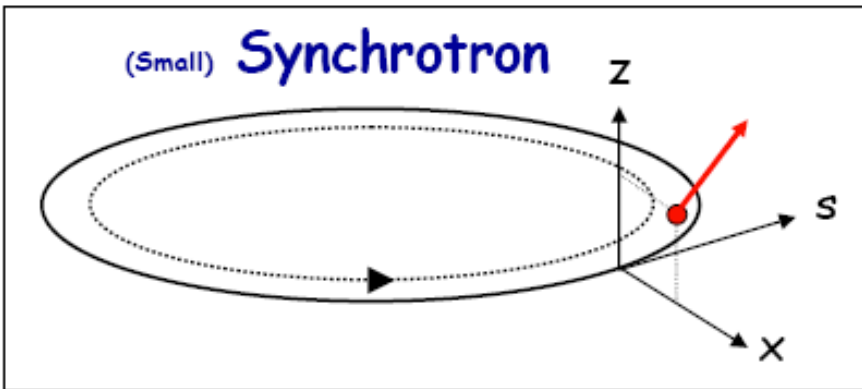
$$\frac{B}{p/q} = \frac{B}{B\rho} = \frac{1}{\rho}$$

Quadrupole Magnet

$$k := \frac{g}{p/q}$$



Εγκάρσιος - Χώρος Φάσεων



- Περιγραφή ΕΝΟΣ σωματιδίου
 - Προβολή στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο.
 - Συντεταγμένες στο χώρο των φάσεων (x, x') , (z, z') .
- Για πολλές περιστροφές (στο ίδιο σημείο της τροχιάς)
 - Έλλειψη στο χώρο των φάσεων
 - Εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες της μηχανής

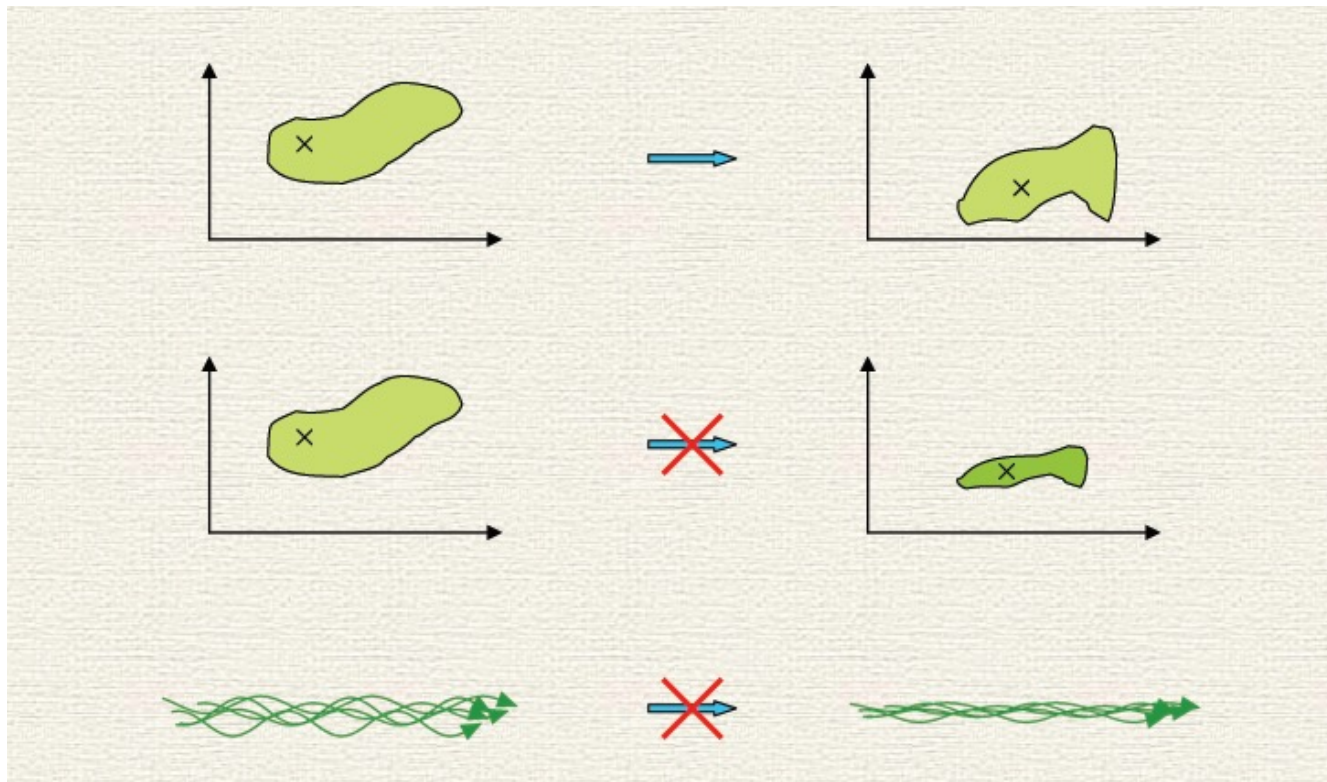
Παρατηρώντας σε διάφορα σημεία κατά μήκος της μηχανής, η έλλειψη αλλάζει σχήμα αλλά διατηρεί το εμβαδόν που περικλείει στο χώρο των φάσεων

Θεώρημα Liouville

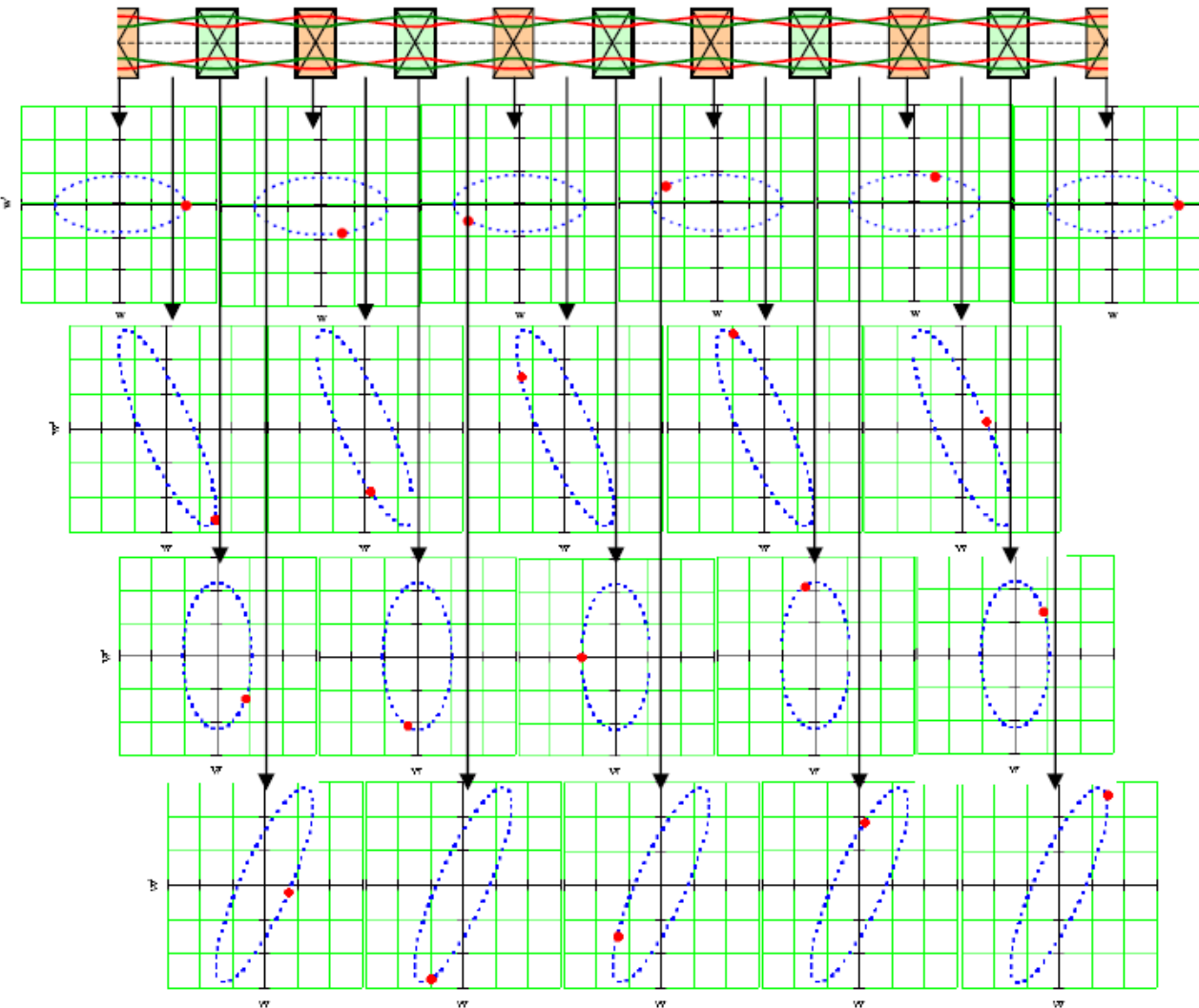
“κάτω από την επίδραση διατηρητικών δυνάμεων, η πυκνότητα των σωματιδίων στο χώρο των φάσεων είναι σταθερή.”

Η πυκνότητα στο χώρο των φάσεων κατά μήκος της τροχιάς ενός σημείου δεν αλλάζει με το χρόνο

Η επιφάνεια της δέσμης στο χώρο των φάσεων δεν αλλάζει με κανένα μαγνητικό ή ηλεκτροστατικό πεδίο



Σωματίδιο σε διάταξη FODO



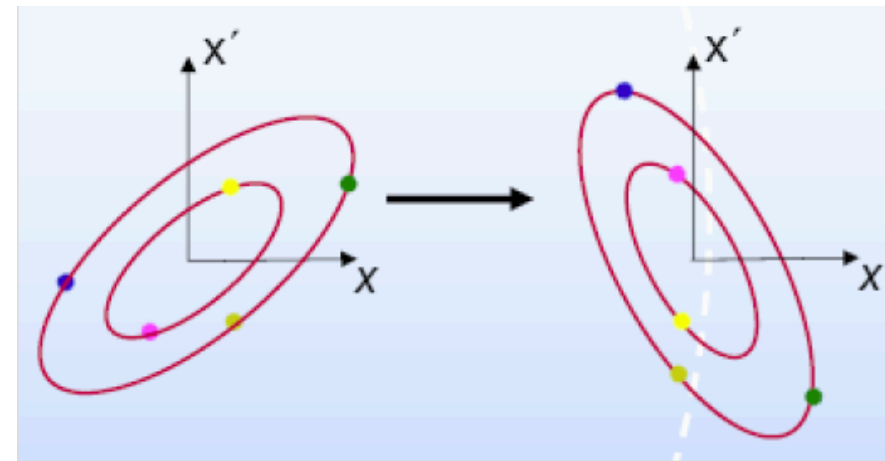
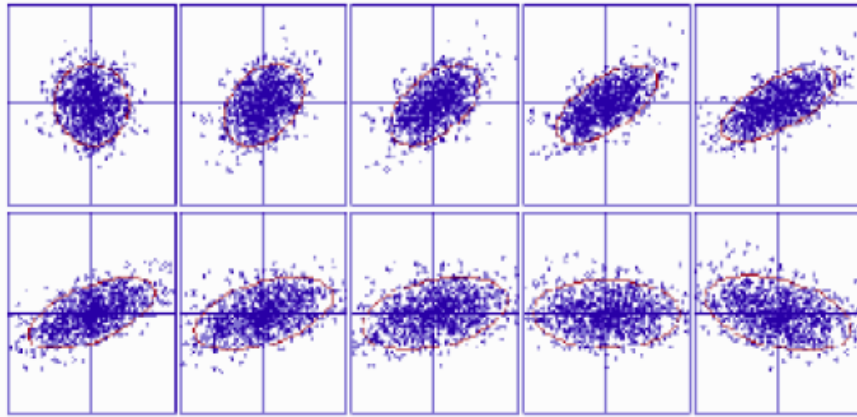
Στο ίδιο σημείο του πλέγματος (FODO) το σωματίδιο κινείται πάνω σε μια έλλειψη.

Η έλλειψη είναι διαφορετική από σημείο σε σημείο μέσα στο πλέγμα.

(αναφέρεται σε σωματίδιο και όχι σε δέσμη)

Εγκάρσιος χώρος φάσεων

Η έλλειψη περιστρέφεται μέσα στους μαγνήτες και επεκτείνεται μεταξύ των μαγνητών διατηρώντας την επιφάνεια σταθερή.



- General equation of ellipse is

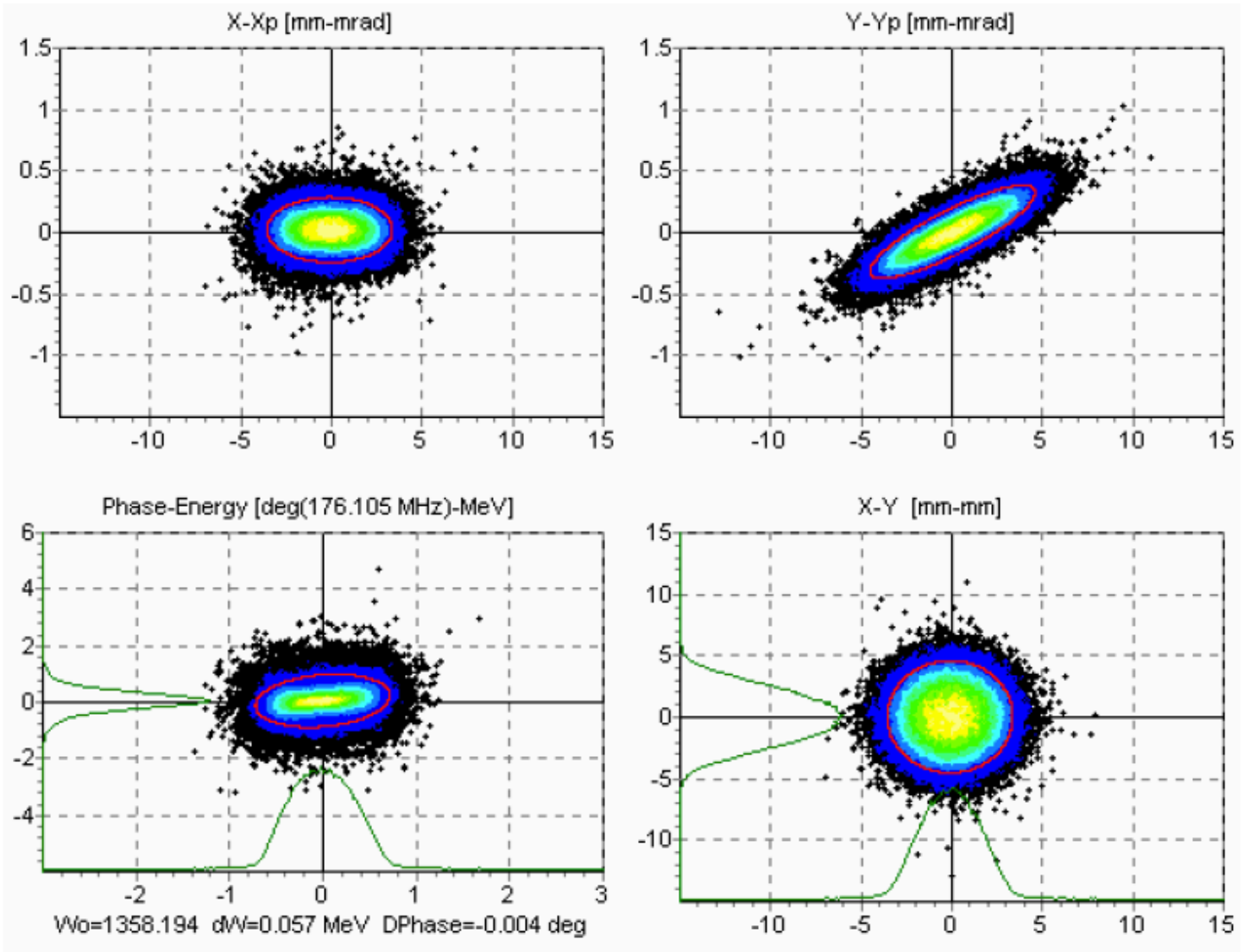
$$\beta x'^2 + 2\alpha x x' + \gamma x^2 = \varepsilon$$

- α, β, γ are functions of distance (Twiss parameters), and ε is a constant. Area = $\pi\varepsilon$.
- For non-linear beams can use 95% emittance ellipse or RMS emittance

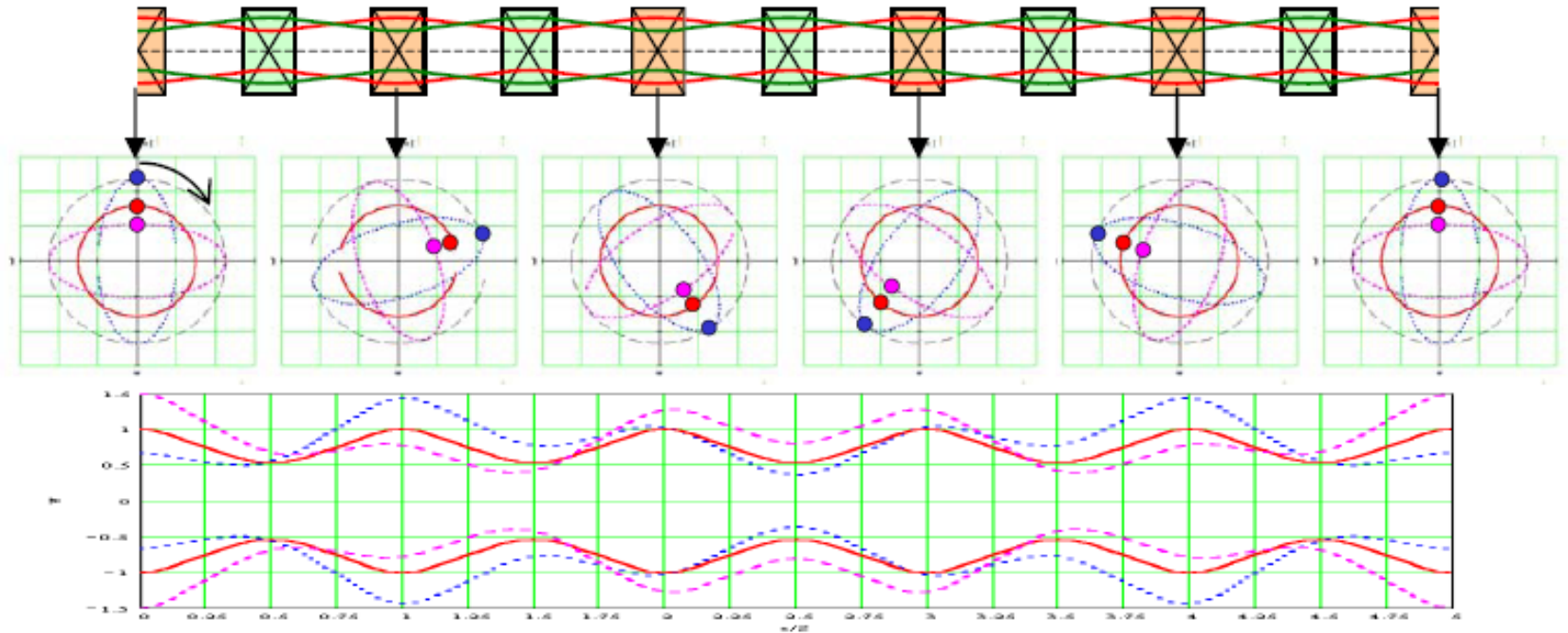
$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2}$$

(statistical definition)

Εγκάρσιος χώρος φάσεων



Matched - Mismatched



Η δέσμη θεωρείται “ταιριαστή” (matched), όταν το ίδιο σχήμα του χώρου των φάσεων της δέσμης αναπαράγεται σε κάθε περίοδο.

Η εξέλιξη του φακέλου που περιβάλλει τη δέσμη είναι περιοδική και όσο το δυνατόν πιο ομαλή.

Μη γραμμικές δυνάμεις

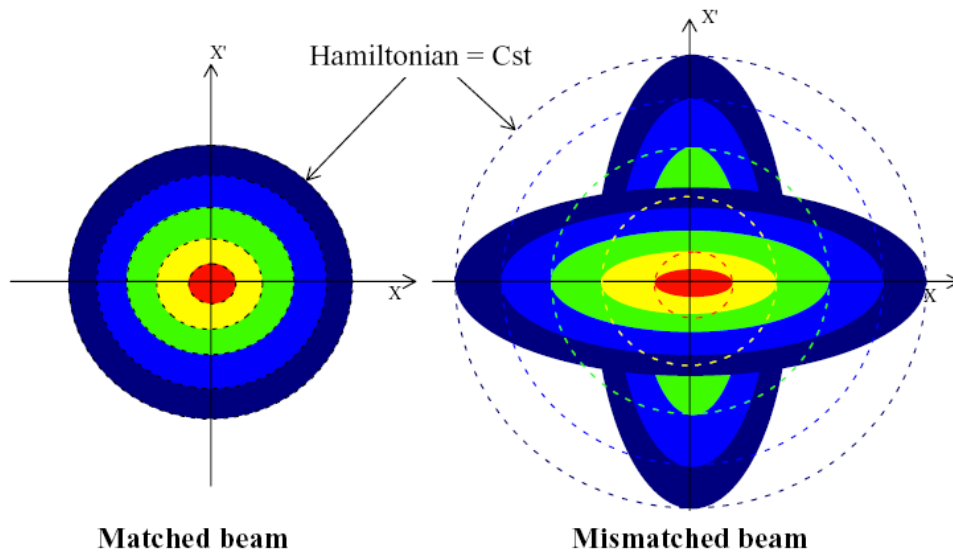


Figure 11 : Matched (left) and mismatched (right) beam in linear forces

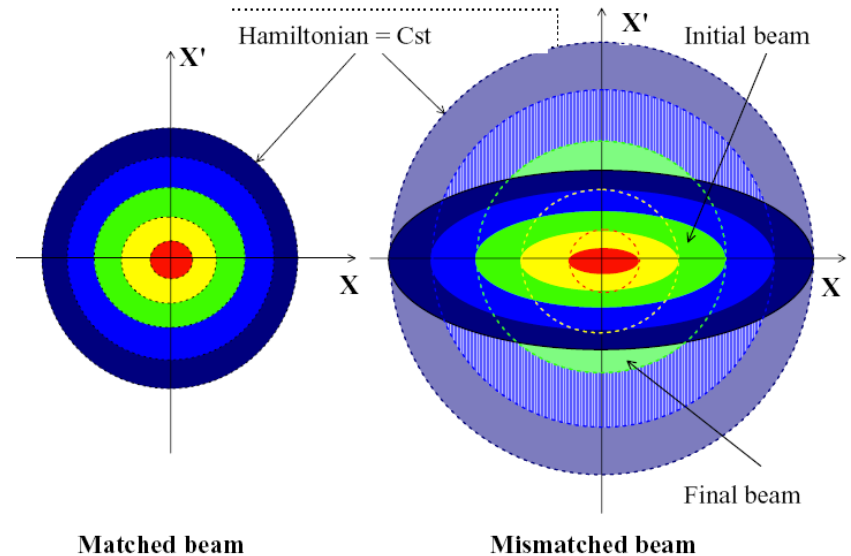


Figure 13 : Matched (left) and mismatched (right) beam in non linear forces

Όταν υπάρχουν μη γραμμικές δυνάμεις (εξωτερικές ή δυνάμεις από φορτία χώρου) η δέσμη χάνει το «ταίριασμα» (mismatched).

Τα σωματίδια της δέσμης δεν περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα και φυσικά αυξάνει η emittance.

Το φαινόμενο είναι γνωστό σαν beam filamentation. Μετά από αρκετό χρόνο ο χώρος των φάσεων της δέσμης είναι γεμάτος από σωματίδια.

Μη γραμμικές δυνάμεις

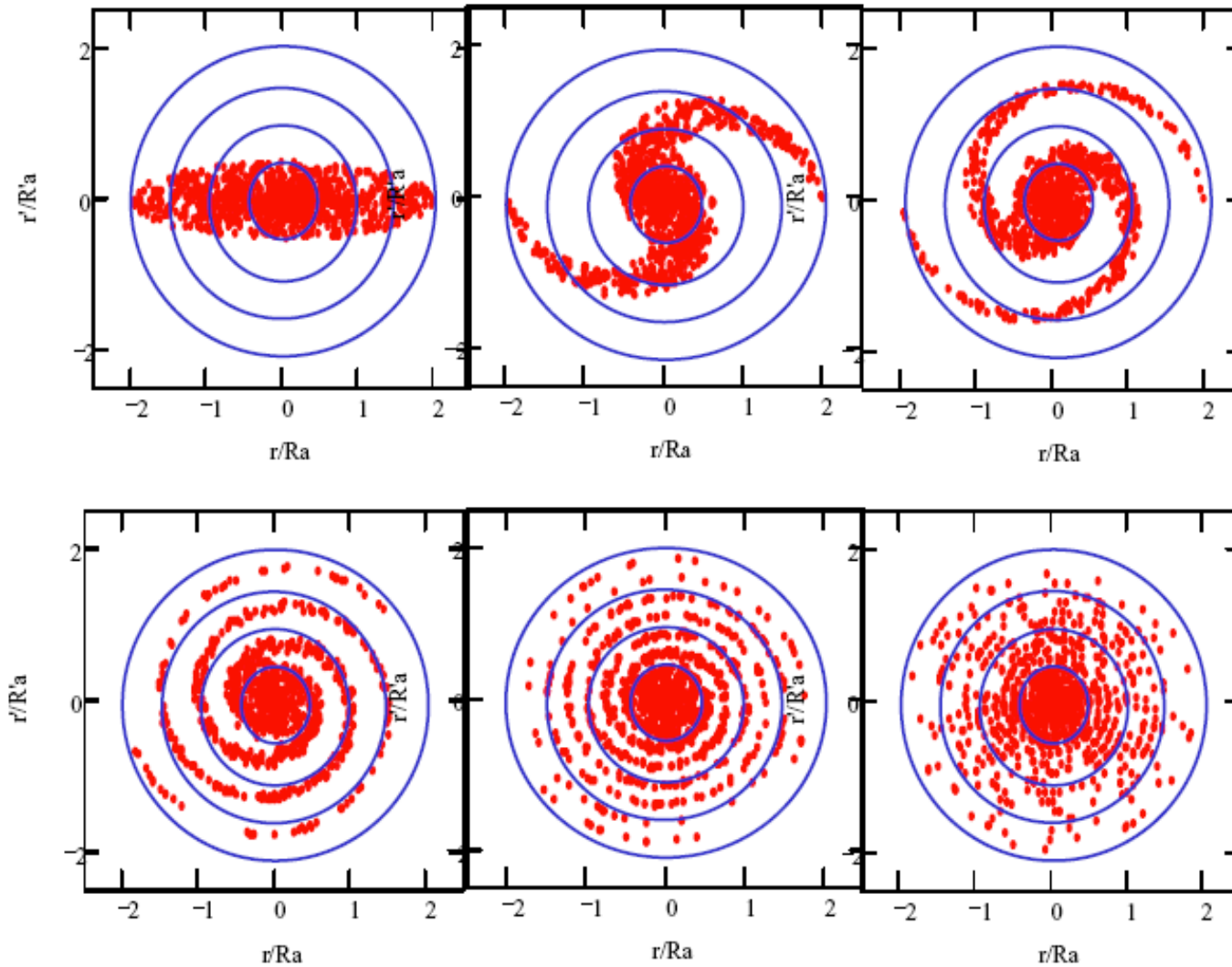
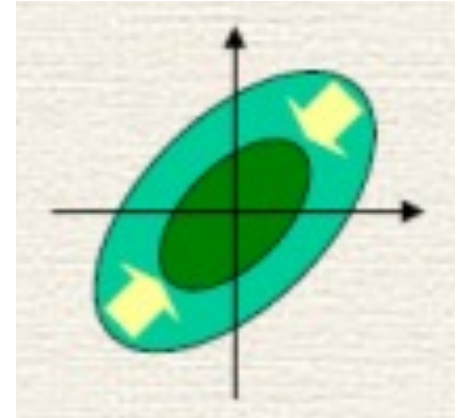


Figure 12 : Filamentation of mismatched beam in non linear force

Ψύξη της δέσμης (beam cooling)

Η διασπορά της ορμής, εγκάρσια και διαμήκους, των σωματιδίων της δέσμης μπορεί να θεωρηθεί μια θερμική κίνηση και η ψύξη της δέσμης σημαίνει μείωση της διασποράς της ορμής.

Μειώνοντας τη διασπορά αυξάνεται η πυκνότητα του χώρου των φάσεων.



Η Ψύξη χρησιμοποιείται για:

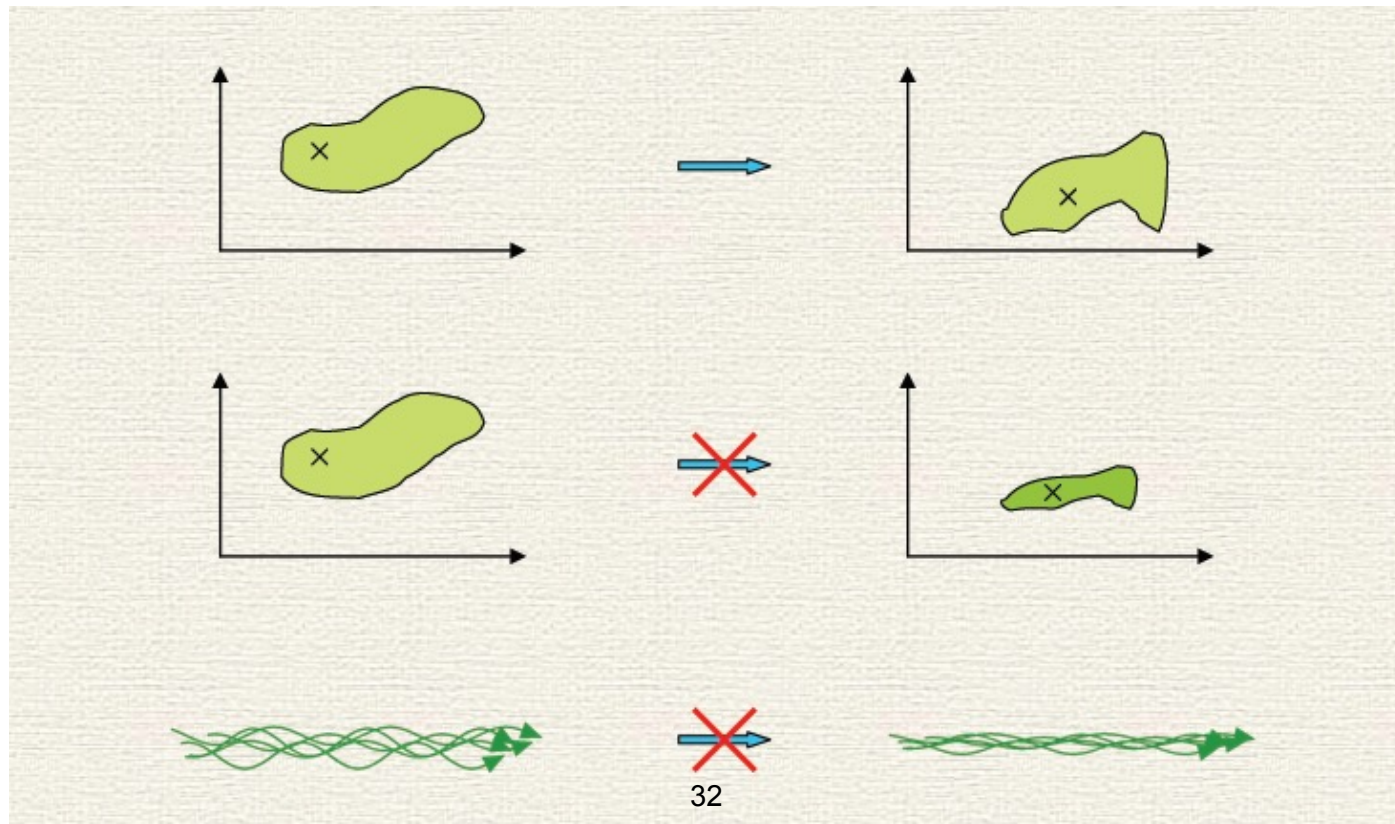
- Αύξηση των αντιπρωτονίων για την αύξηση του ρεύματος της δέσμης
- Αύξηση της φωτεινότητας.
- Βελτίωση ακρίβειας μετρήσεων.
- Έλεγχο emittance με μείωση επιτάχυνσης.

Θεώρημα Liouville

“κάτω από την επίδραση διατηρητικών δυνάμεων, η πυκνότητα των σωματιδίων στο χώρο των φάσεων είναι σταθερή.”

Η πυκνότητα στο χώρο των φάσεων κατά μήκος της τροχιάς ενός σημείου δεν αλλάζει με το χρόνο

Η επιφάνεια της δέσμης στο χώρο των φάσεων δεν αλλάζει με κανένα μαγνητικό ή ηλεκτροστατικό πεδίο



Θεώρημα Liouville και Ψύξη της δέσμης

Σύμφωνα με το θεώρημα του Liouville η ψύξη της δέσμης δεν είναι δυνατή για χαμιλτονιανά συστήματα, (δυνάμεις προερχόμενες από δυναμικά).

Επιπλέον δεν μπορούν να εισαχθούν (injected) νέα σωμάτια σε ένα πλήρη χώρο φάσεων.

Το μόνο που επιτρέπεται είναι η αλλαγή στη μορφή του χώρου των φάσεων.

Όμως,

επιτρέπεται με δυνάμεις που εξαρτώνται από την ταχύτητα, δυνάμεις τριβής (μή διατηρητικές), ηλεκτρόνια, ακτινοβολία, Laser,...

Η ψύξη είναι δυνατή.

Μέθοδοι ψύξης της δέσμης

Για διαφορετικού τύπου δέσμες χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι.

Τρεις τύποι ψύξης έχουν υλοποιηθεί κυρίως:

- **Radiation cooling**, τα ηλεκτρόνια “αυτό”-ψύχονται εκπέμποντας ακτινοβολία.
- **Electron cooling**, για χαμηλή/μέση ενέργεια πρωτονίων και αντιπρωτονίων.
- **Stochastic cooling** για μέση/υψηλή ενέργεια πρωτονίων, αντιπρωτονίων και ιόντων.

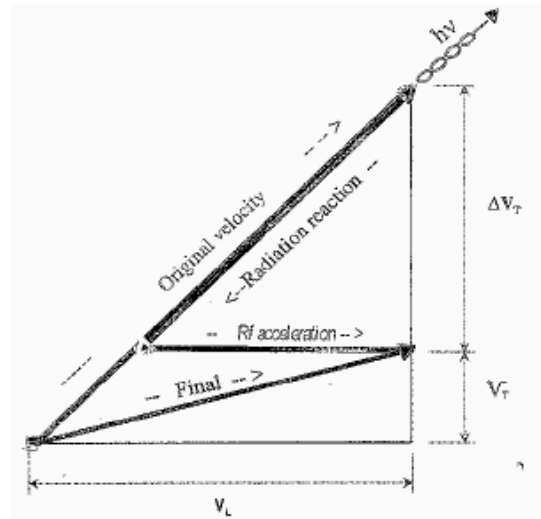
- Laser cooling για δέσμες ιόντων.
- Ionization cooling, σύντομα για δέσμες μιονίων.

Radiation Cooling

Η ακτινοβολία σύγχροτρου που εκπέμπεται από ένα ηλεκτρόνιο που κινείται σε μια καμπύλη τροχιά έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας και άρα της ταχύτητας του ηλεκτρονίου.

Η ακτινοβολία εκπέμπεται κυρίως στην εμπρόσθια κατεύθυνση. Η συνεχής εκπομπή της ακτινοβολίας σύγχροτρου οδηγεί σε μια δύναμη τριβής στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης.

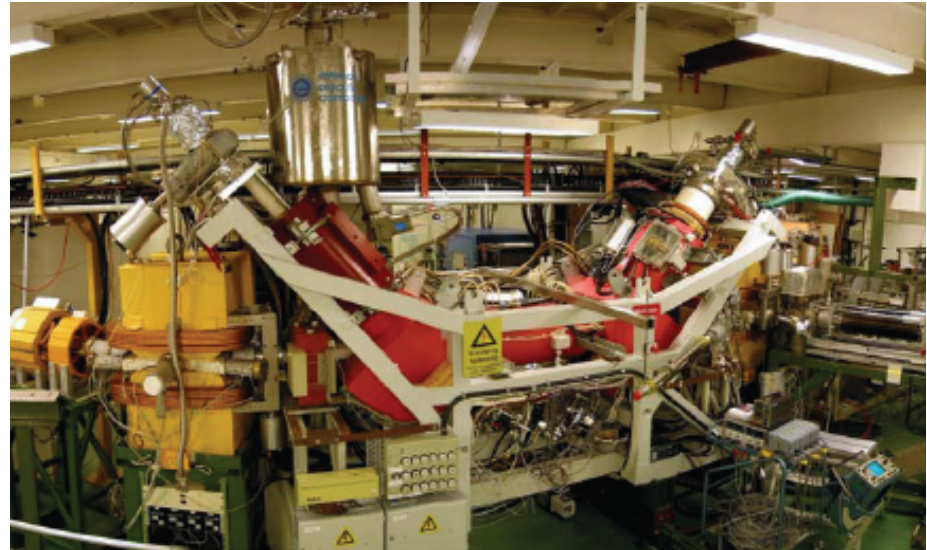
Η ενεργειακή απώλεια αποκαθίσταται και η δύναμη τριβής αντισταθμίζεται από το RF-σύστημα.



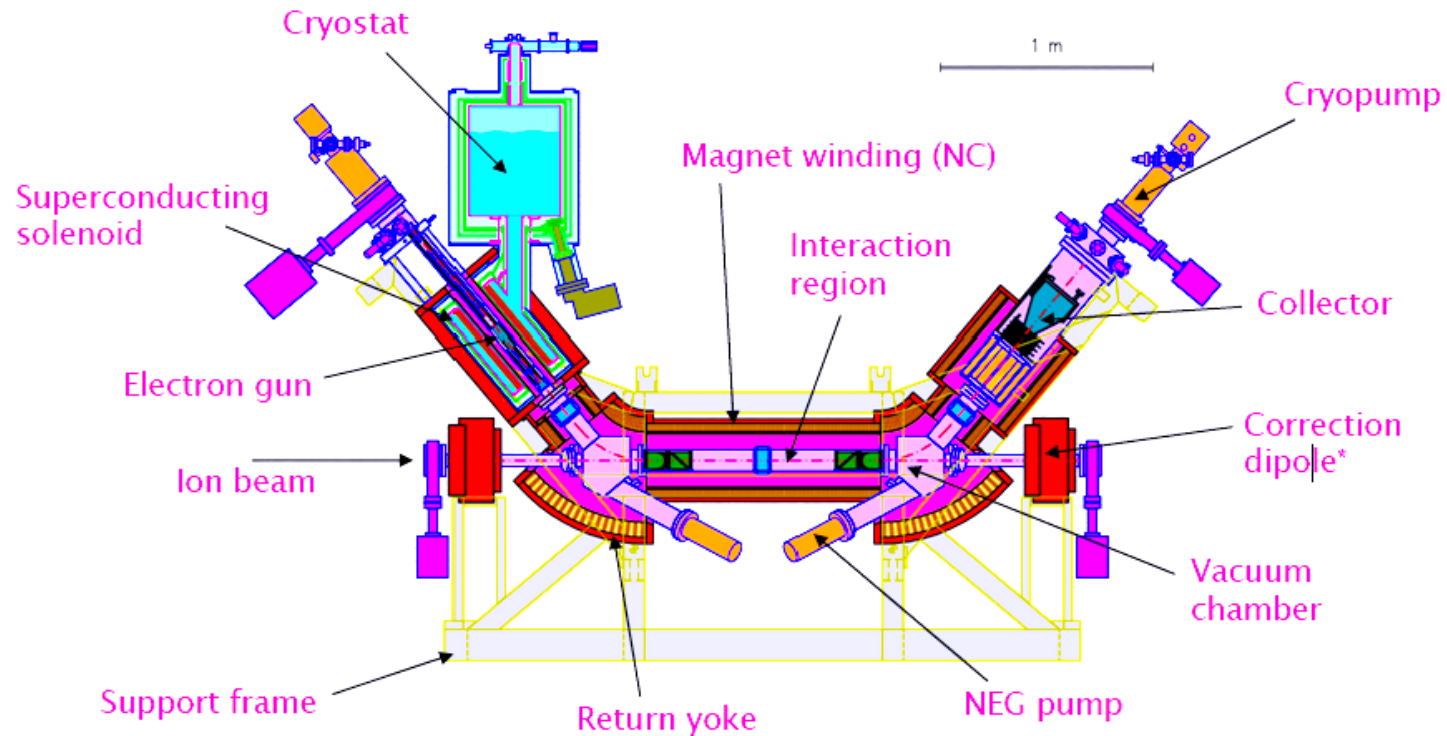
The principle of transverse cooling by synchrotron radiation (transverse velocities exaggerated)

Electron Cooling

Electron cooling είναι σαν να καταβρέχεις τα θερμά ιόντα με ψυχρά ηλεκτρόνια. Η θερμότητα μεταφέρεται από τα ιόντα της δέσμης στα ψυχρά ηλεκτρόνια μέσω αλληλεπιδράσεων Coulomb.



Electron Cooling



Βασικά, η ψύξη των ηλεκτρονίων λειτουργεί ως εξής:

- Η ταχύτητα των ηλεκτρονίων γίνεται ίση με τη μέση ταχύτητα των ιόντων.
- Τα ιόντα μέσω των σκεδάσεων Coulomb με το "αέριο" των ηλεκτρονίων χάνουν ενέργεια, η οποία μεταφέρεται από τα ιόντα στα ηλεκτρόνια που κινούνται στην ίδια διεύθυνση μέχρι που επιτυγχάνεται η θερμική ισορροπία.

Electron Cooling

- Σε μια μακροσκοπική εικόνα, η θερμότητα μεταφέρεται από μια καυτή δέσμη ιόντων σε μια κρύα δέσμη ηλεκτρονίων
- Η μικροσκοπική εικόνα περιλαμβάνει τις αλληλεπιδράσεις Coulomb και δυαδικές συγκρούσεις
- Δυνάμεις τριβής στα ιόντα.
- Χρονική κλίμακα από milliseconds μέχρι hours
- Δύσκολος για τις υψηλές ενέργειες και τις καυτές ιονικές δέσμες.
- Hardware είναι κυρίως μαγνήτες (υψηλής ποιότητας), οπτικές διατάξεις ηλεκτρονίων με το πυροβόλο και το συλλέκτη, και κενό
- Σε λειτουργία στα CERN, GSI, Heidelberg, Jülich, Århus, Stockholm, Uppsala, Tokyo, Chiba, και σύντομα Fermilab and Lanzhou



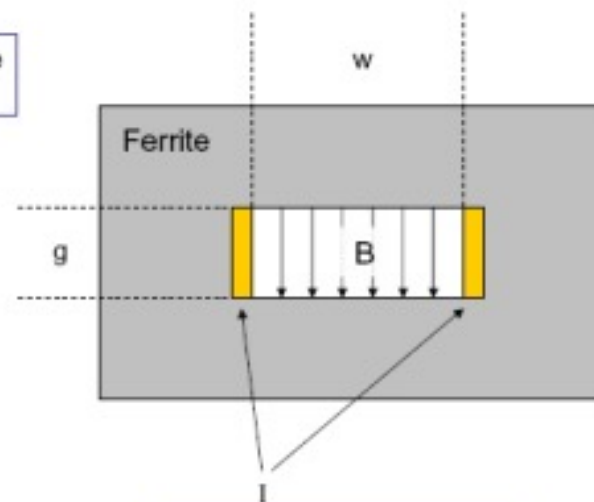
Stochastic Cooling

Το θεώρημα του Liouville φυσικά δεν ισχύει εάν μια εξωτερική συσκευή ανιχνεύει τις θέσεις σωματιδίων και τα μετακινεί σε καλύτερες τροχιές.

Η Stochastic cooling χρησιμοποιεί beam pickups και kickers για να πραγματοποιήσει την ψύξη.

Kicker

Pulsed magnet with very fast rise time
(100ns – few μ s)



$$B = \mu_0 I / g$$

$$L = \mu_0 w l / g \quad (\text{magnet length } l)$$

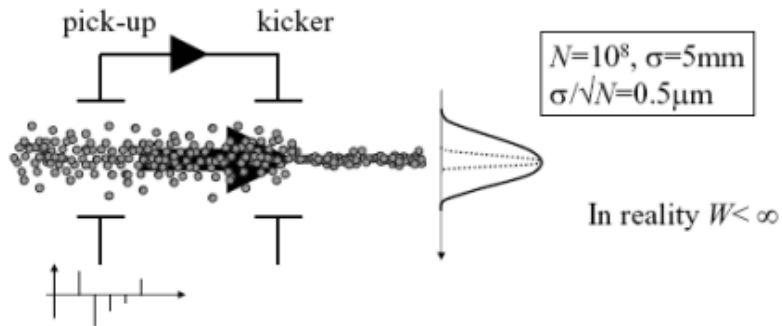
$$dl/dt = v/L$$

Typically 3kA in 1 μ s rise time

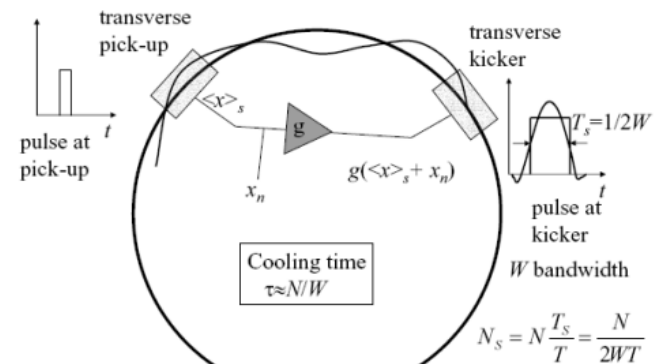
Longitudinal Stochastic Cooling

Stochastic cooling

Liouville: Cooling is not possible with electromagnetic forces deflecting the particles (continuous fluid, or $N=\infty$).
 When single particles can be observed, and a corresponding correction applied, cooling is possible!
 This is the secret of stochastic cooling!



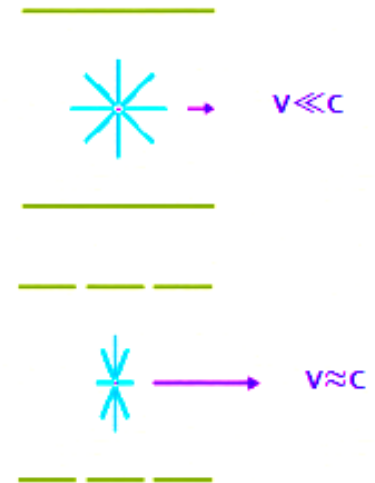
Stochastic cooling



Stochastic Cooling vs. Electron Cooling

Stochastic cooling works best with relativistic particles because one can then reach higher bandwidths, up to 4–8 GHz. This is because the particles move rapidly past the detectors and kickers and because their charge distribution is Lorentz contracted.

In a “small accelerator” with, e.g., $v=0.1c$ and pickup length $l=0.1$ m, the maximum bandwidth will be in the order of v/l or 300 MHz. In this sense, stochastic cooling is complementary to electron cooling.



Other differences and similarities

- Stochastic cooling is faster for weak beams than for intense beams, while electron cooling is independent of beam intensity.
- Stochastic cooling is better for hot beams, because of better signal, while electron cooling gets slower for hot beams.
- With both methods, highly charged ions cool faster. In stochastic cooling because of better signal-to-noise ratio.
- Electron cooling is easier in case of variable beam velocities.

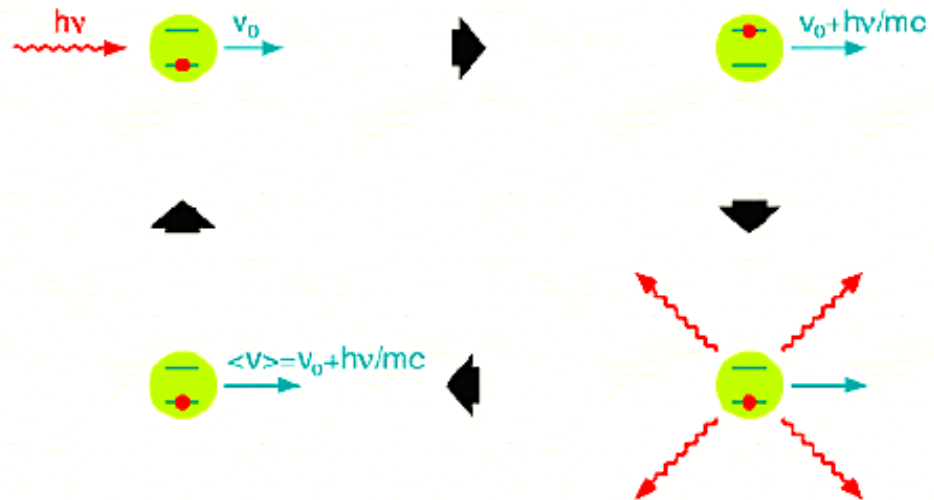
Laser Cooling

In laser cooling, a velocity-dependent (non-conservative!) force is obtained when ions absorb photons, and thus momentum, depending on their velocity through the Doppler shift.

Momentum is absorbed from one direction but re-emitted isotropically. A net momentum transfer results.

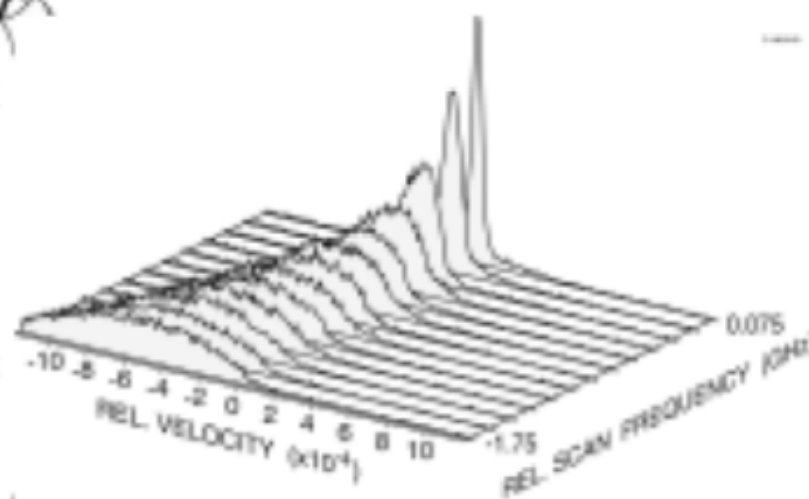
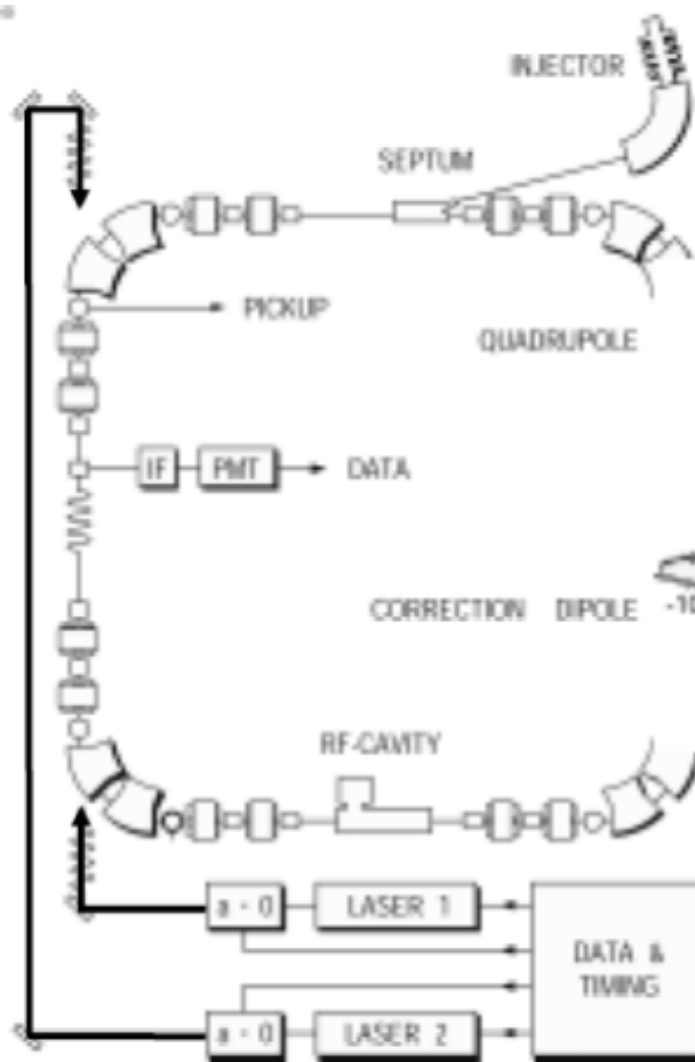
Laser cooling works with ions having closed, two-state transitions at optical wavelengths (or transitions that are Doppler shifted to optical wavelengths).

Laser cooling requires specific ions, is difficult transversally, but is strong and faster than electron or stochastic cooling.



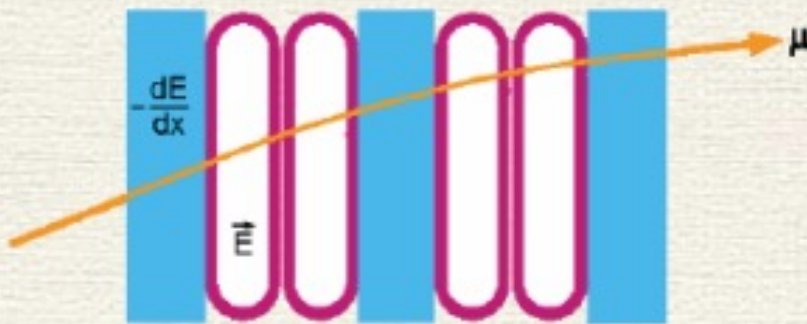
Laser cooling in ASTRID

03/04/00



Ionization (Muon) Cooling

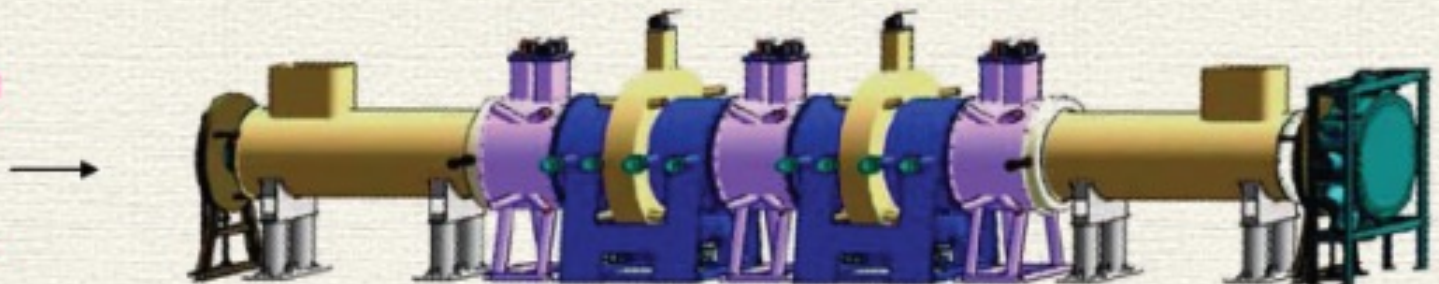
With ionization cooling, all momentum components are reduced when the particles pass through matter, but longitudinal momentum only is restored in rf cavities. The net result is a reduction of transverse momentum.



Ionization cooling only works with muons. Hadrons make nuclear reactions and electrons produce bremsstrahlung. Also, emittance increase due to scattering must not dominate over the cooling effect.

Longitudinal cooling through dispersion and wedge absorbers.

MICE, Muon Ionization Cooling Experiment



	Stochastic	Electron	Radiation	Laser	Ionisation
Species	all	ions	e^-/e^+	some ions	muons
Favoured beam velocity	high	medium $0.01 < \beta$ $\beta < 0.1$	very high $\gamma > 100$	any (but Doppler)	any
Favoured beam intensity	low	any	any	any	any
Cooling time	$N \cdot 10^{-8}$ s	$10-10^{-2}$ s	$>10^{-3}$ s	$10^{-4}-10^{-5}$ s	10^{-6} s
Favoured beam temperature	high	low	any	low	any

Πρόβλημα

LHC Design Magnet current: $I=11850$ A

and the machine is 27 km long !!!

Ohm's law: $U = R * I$, $P = R * I^2$

Problem:

reduce ohmic losses to the absolute minimum

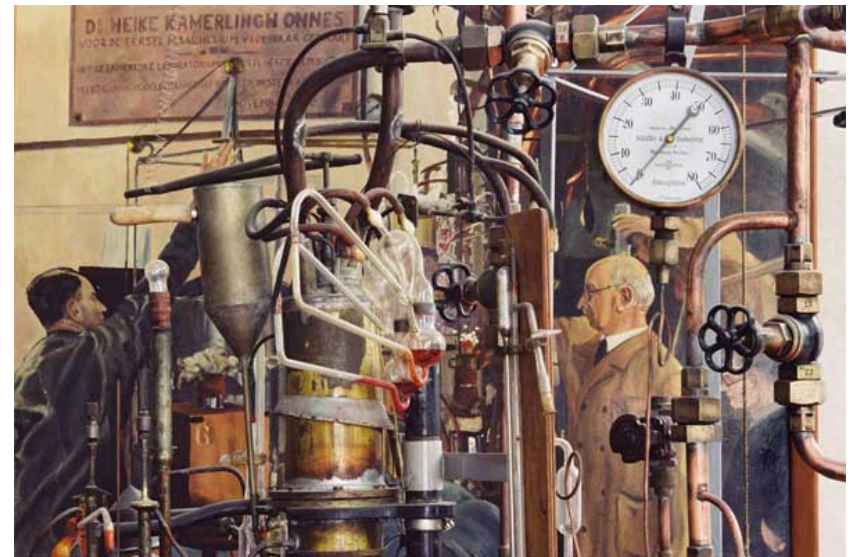
Georg Simon Ohm



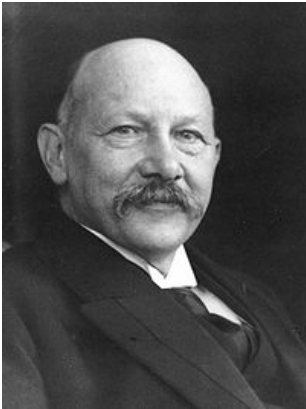
Born

17 March 1789
Erlangen, Germany

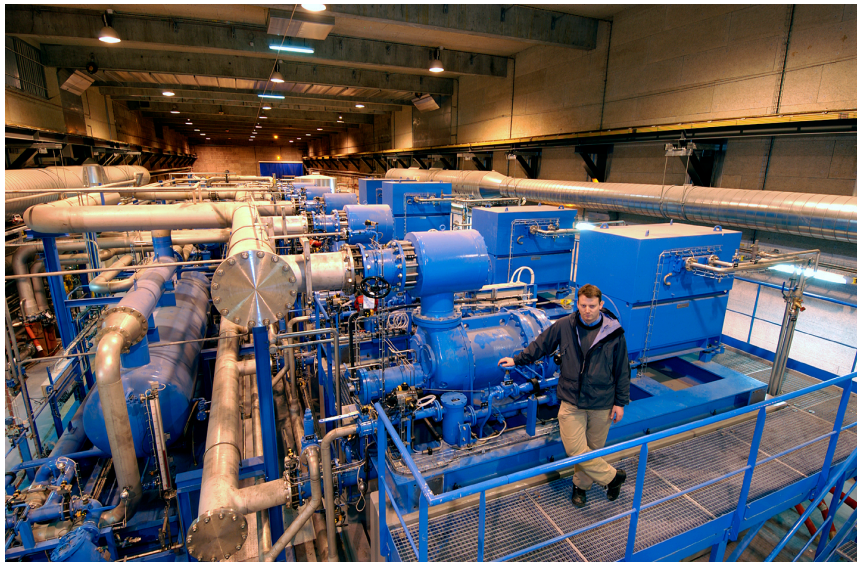
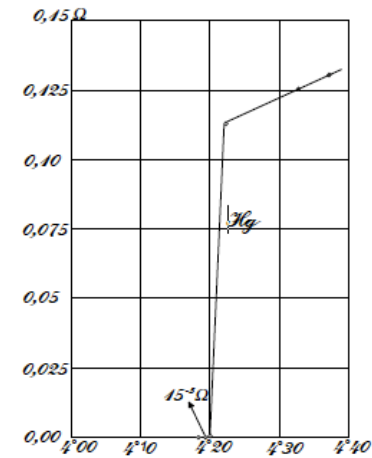
The Solution:
super conductivity



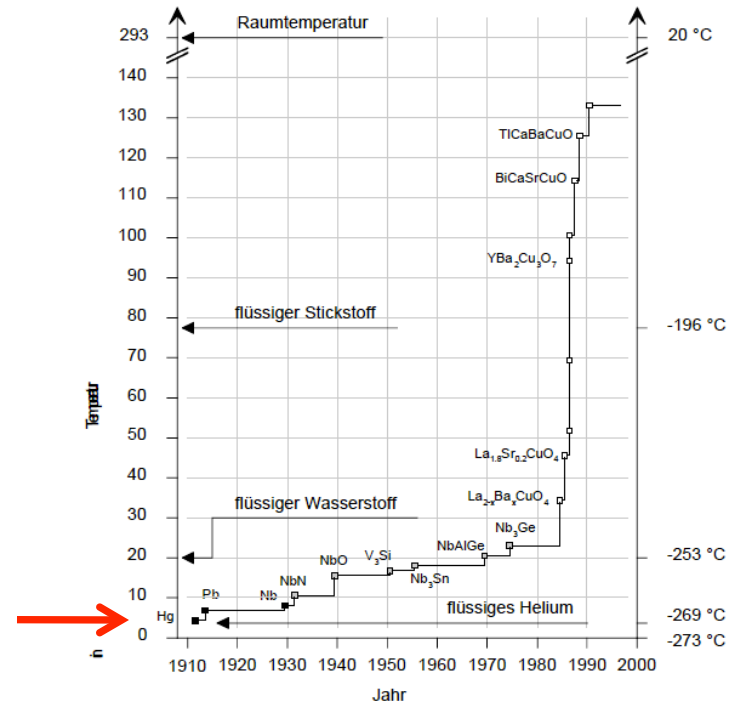
Super Conductivity



discovery of sc. by
H. Kamerling Onnes,
Leiden 1911

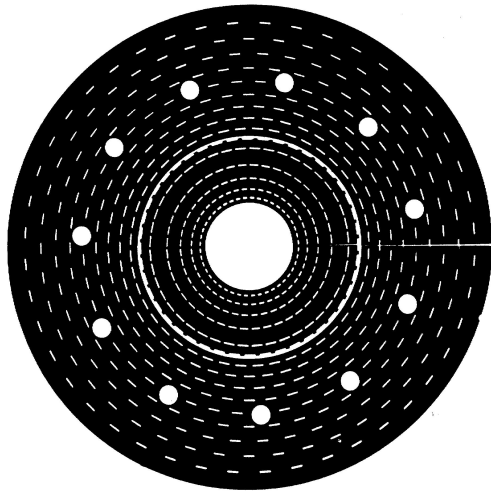


LHC 1.9 K cryo plant



We need SC magnets!

- Iron dominated magnets limited by iron saturation at 2 T!
- Permanent magnets practically limited in the range 1-2 T
- Copper (or Al) dominated magnets 50-100 T but for ms !!!



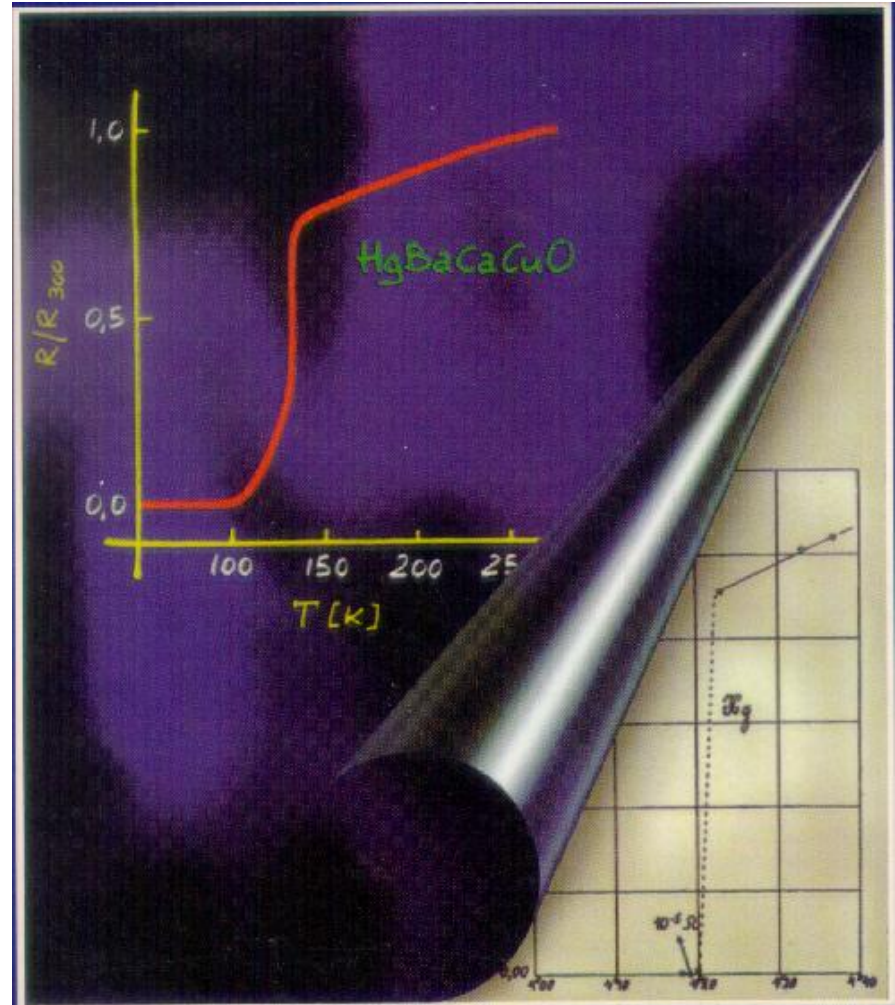
Disk of Bitter magnets (up);

pulsed cryogenic magnet for 40 T-5 ms

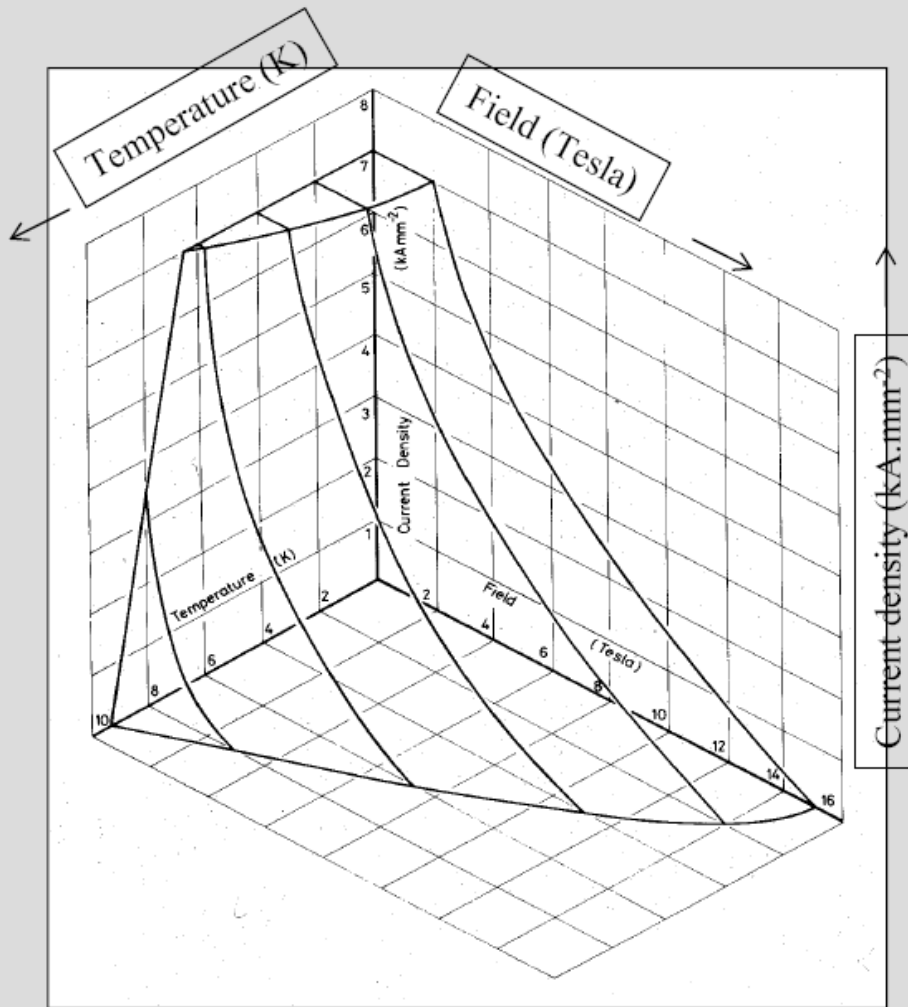


Superconductivity: zero R

- 1908 First helium liquefaction by Heike Kammerlingh-Onnes in the Netherlands.
- 1911 H. Kammerlingh-Onnes discovered superconductivity: zero electrical resistance in a mercury sample (~ 4 K) (Nobel in 1913)
- 1986 : Bednorz and Muller discovered Cu oxides
- 1988: BSCCO (Bi-Sr-Ca-Cu-O) 110 K
- Hg: record $T_c \approx 135$ K
- 2001 new class: MgB_2 $T_c \approx 30$ K



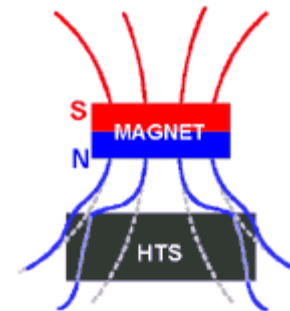
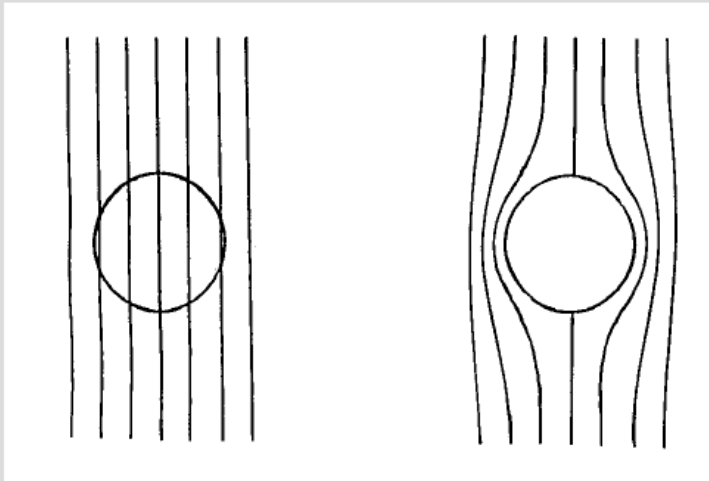
The critical surface of niobium titanium



- Niobium titanium **NbTi** is the standard 'work horse' of the superconducting magnet business
- it is a ductile alloy
- picture shows the **critical surface**, which is the boundary between superconductivity and normal resistivity in 3 dimensional space
- superconductivity prevails everywhere below the surface, resistance everywhere above it
- we define an upper critical field B_{c2} (at zero temperature and current) and critical temperature T_c (at zero field and current) which are characteristic of the alloy composition
- critical current density depends on processing

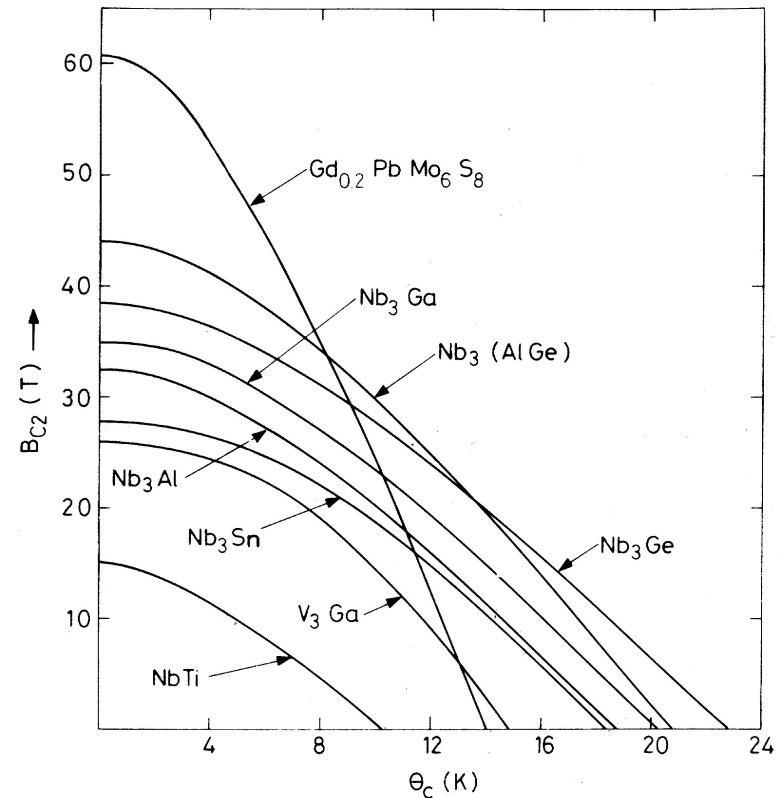
Critical Field B_c :

Type 1 superconductors show the **Meissner effect**. Field is expelled when sample becomes superconducting

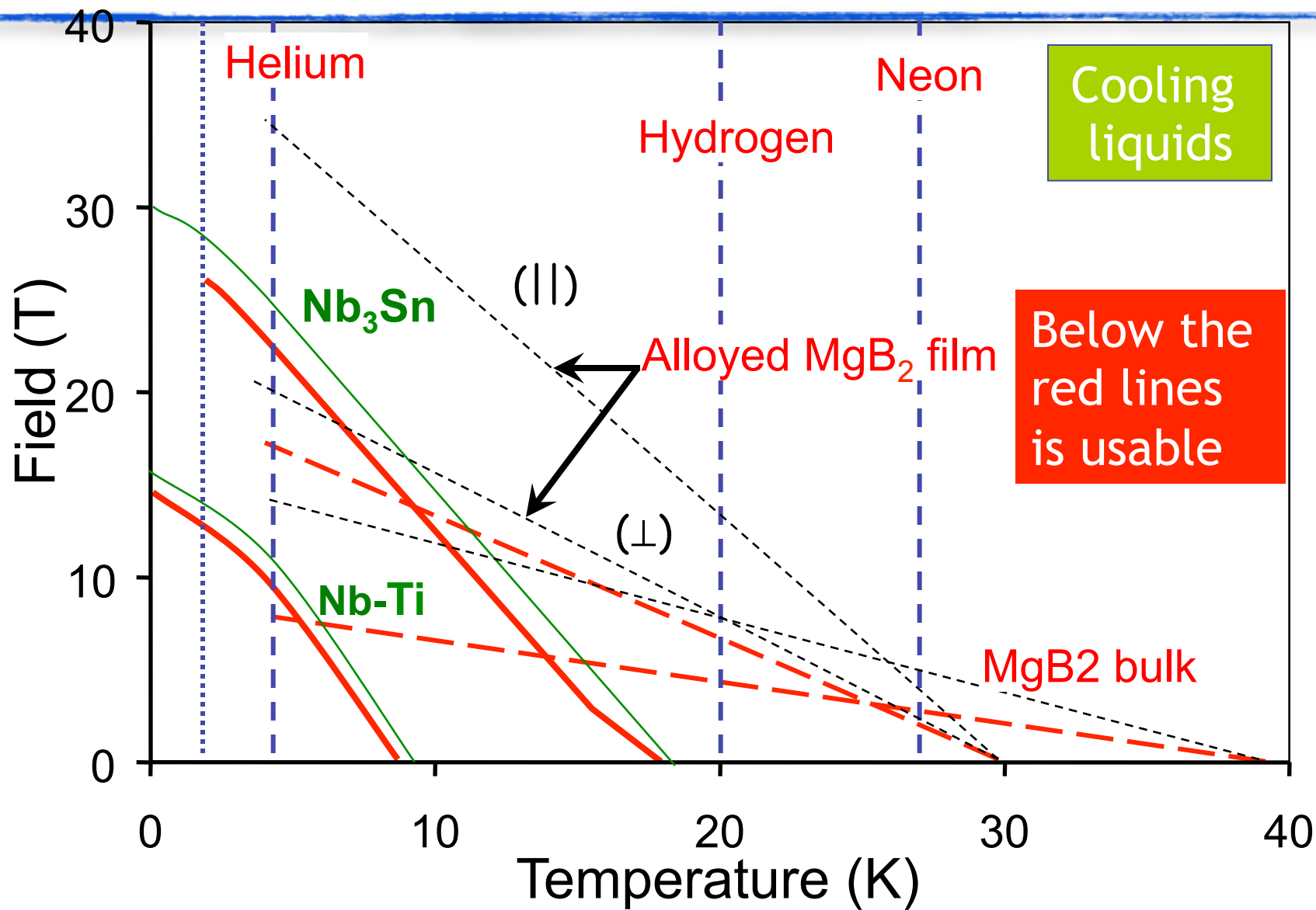


Critical Field

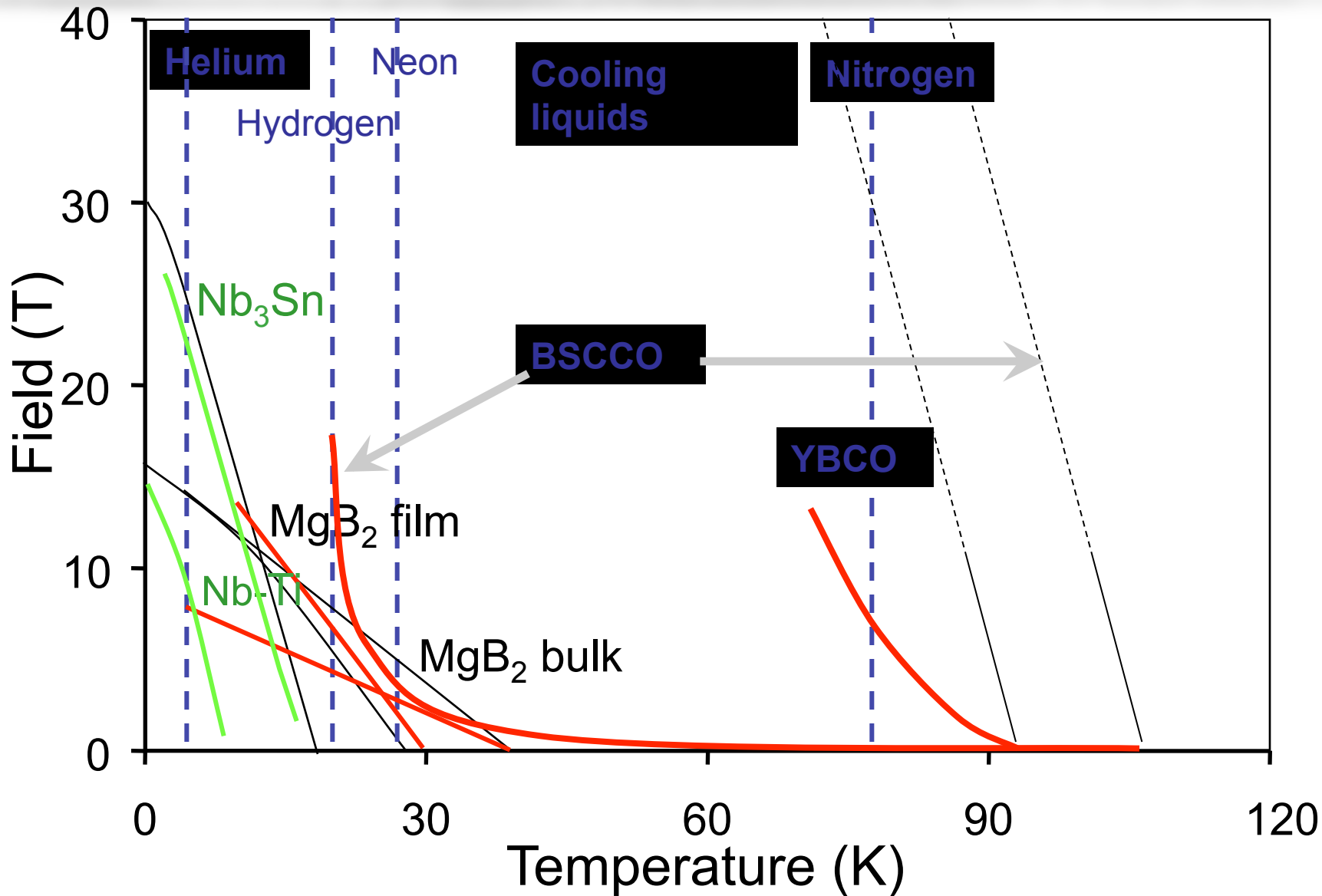
- A Sc is not a simple perfect conductor
- J_{sc} is limited by magnetic field (and T!!)
- The first Sc materials (pure element) had B_c of 10-100 mT !!
- In the 1950-60s alloys were discovered with B_c of 10-20 T !!!
- Ceramic HTS have B_c 100 T
- MgB_2 has B_c around 15 T



H*-T plane for LTS



H*-T plane for LTS and HTS



Electrons and Synchrotron Radiation

Τα σωματίδια ακτινοβολούν όταν επιταχύνονται. Έτσι τα φορτισμένα σωματίδια που κινούνται στα μαγνητικά δίπολα ενός πλέγματος σε ένα κυκλικό επιταχυντή εκπέμπουν την ακτινοβολία στην εφαπτόμενη διεύθυνση της τροχιάς τους.

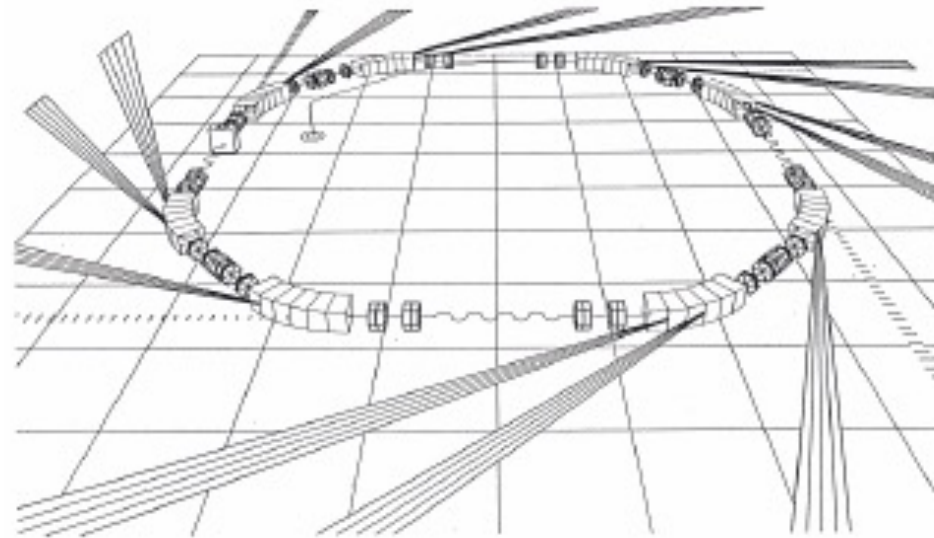
Μετά από μία στροφή σ'ένα κυκλικό επιταχυντή, η συνολική ενέργεια που χάνεται σε ακτινοβολία σύγχροτρου είναι:

$$\Delta E [\text{GeV}] = \frac{6.034 \times 10^{-18}}{\rho [\text{m}]} \left(\frac{E [\text{GeV}]}{m_0 [\text{GeV} / c^2]} \right)^4$$

Μάζα πρωτονίου : Μάζα ηλεκτρονίου = 1836.

Για την ίδια ενέργεια και ακτίνα ,

$$\Delta E_e : \Delta E_p \approx 10^{13}$$



Synchrotron Radiation

Σε επιταχυντές ηλεκτρονίων, ισχυρή εξάρτηση της ακτινοβολούσας ενέργειας από την ενέργεια της δέσμης.

Οι απώλειες πρέπει να αντισταθμίζονται από τις κοιλότητες.

Τεχνολογικό όριο στη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παρέχει μια κοιλότητα, πάνω όριο για την ενέργεια των ηλεκτρονίων σε ένα επιταχυντή:

Καλύτερα να έχεις μεγαλύτερο επιταχυντή για την ίδια ισχύ από τις RF κοιλότητες σε υψηλές ενέργειες.

Για να διπλασιαστεί η ενέργεια με τις ίδιες κοιλότητες θα απαιτούνταν μια μηχανή 16 φορές μεγαλύτερη.

π.χ. LEP με 50 GeV electrons, $\rho=3.1$ km, περίμετρο =27 km:
Energy loss per turn is 0.18 GeV per particle

Η ενέργεια υποδιπλασιάζεται μετά από 650 περιστροφές, σε χρόνο 59 ms.

Synchrotron Radiation

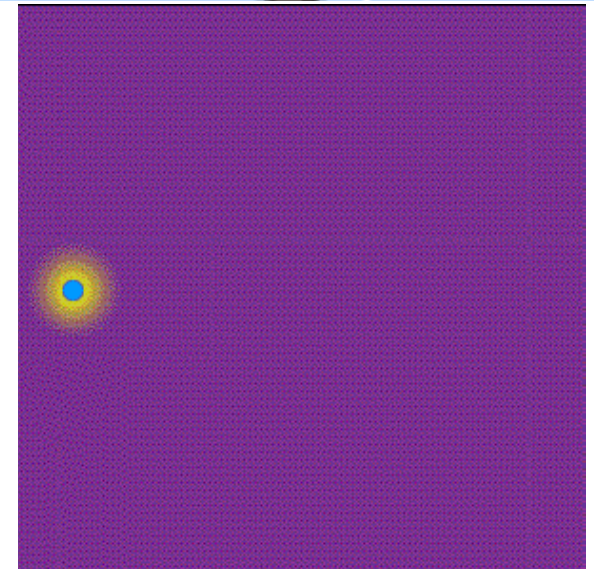
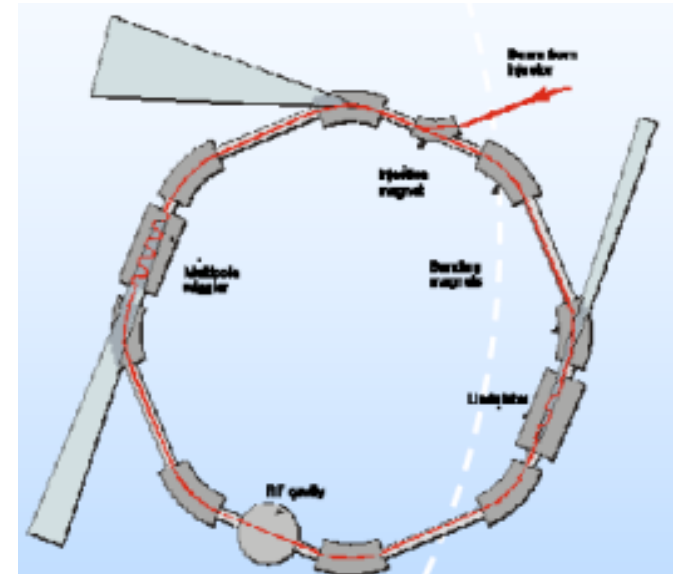
Η ακτινοβολία παράγεται μέσω σε ένα κίνο

$$\theta \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{511}{E[\text{keV}]} \quad \text{for speeds close to } c$$

Για ηλεκτρόνια στην περιοχή μεταξύ 90 MeV και 1 GeV,

θ είναι στην περιοχή 10^{-4} - 10^{-5} degs.

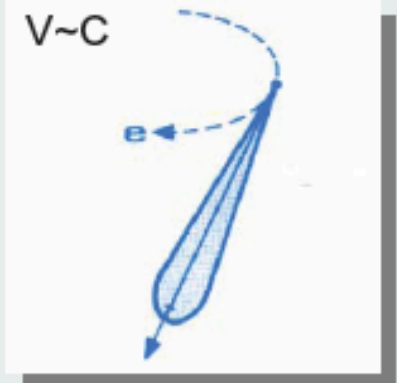
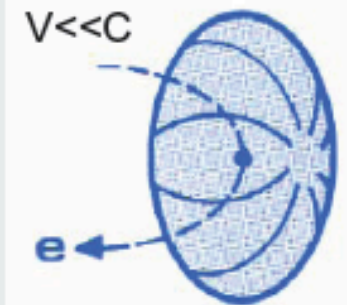
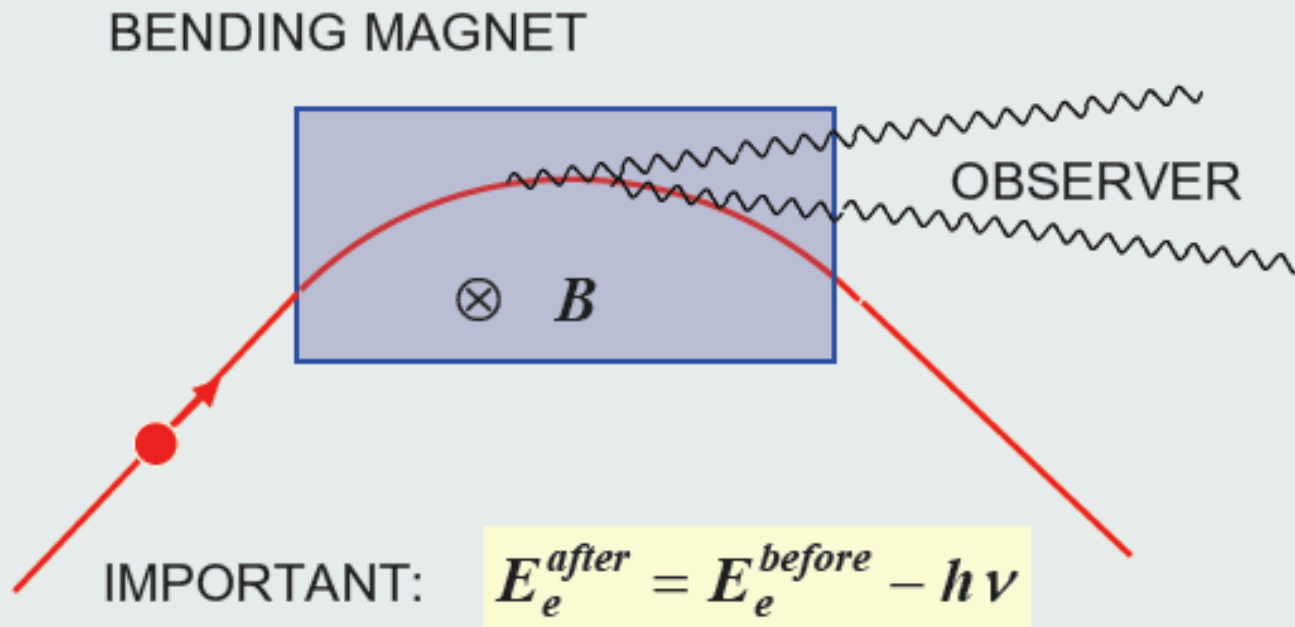
Τόσο λεπτές δέσμες μπορούν να κατευθυνθούν με μεγάλη ακρίβεια σε ένα στόχο (πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία)



Synchrotron Radiation

Τα επιταχυνόμενα φορτισμένα σωματίδια εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Το προεξάρχον φαινόμενο προέρχεται από την εγκάρσια επιτάχυνση, καθώς κάμπτεται η τροχιά στο μαγνητικό πεδίο.

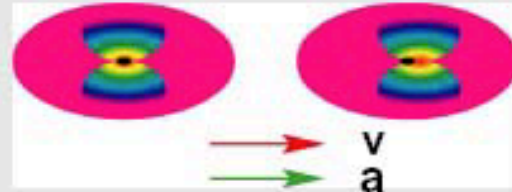


Due to the emission the energy of the particle is changed !

Synchrotron Radiation

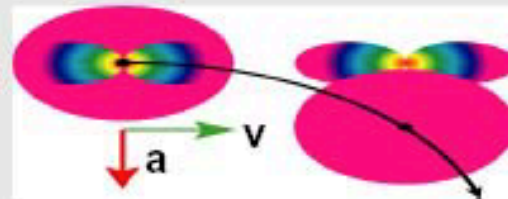
1898 Liénard:

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 \gamma^6}{4\pi\epsilon_0 c} \left[\dot{\vec{\beta}}^2 - \left(\vec{\beta} \times \dot{\vec{\beta}} \right)^2 \right]$$



LONGITUDINAL:

Radiation field cannot separate itself from the Coulomb field



TRANSVERSE:

Radiation field quickly separates itself from the Coulomb field

$$P \sim \frac{\gamma^4}{\rho^2}$$

POWER emitted:

$$E = \int_0^{T_0} P dt \sim \frac{\gamma^4}{\rho}$$

ENERGY
lost per turn:

Synchrotron Radiation

The POWER of the emitted radiation is increasing with the 4th power of the Lorentz factor!

$$P \sim \frac{\gamma^4}{\rho^2}$$

Since:
$$\gamma = 1 + \frac{E_k}{E_o} \approx \frac{E_k}{E_o} = \frac{eU}{E_o}$$

E_o Rest energy

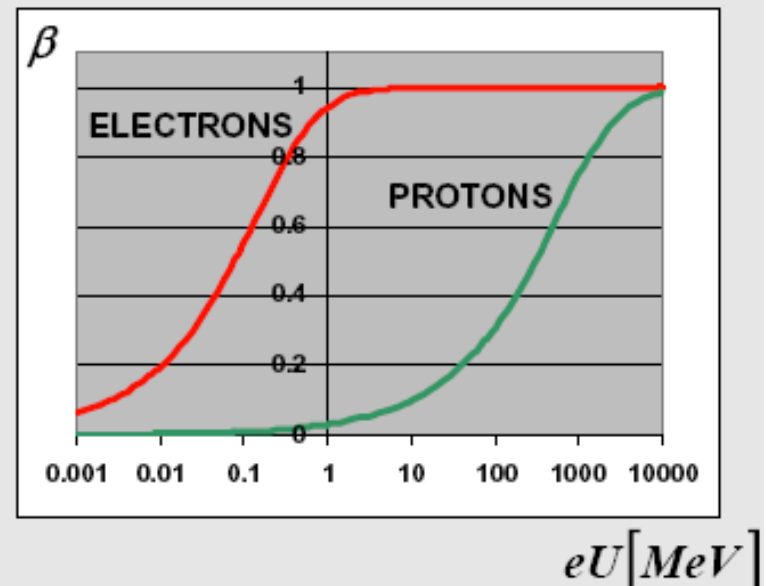
E_k Kinetic energy

U Accelerating voltage

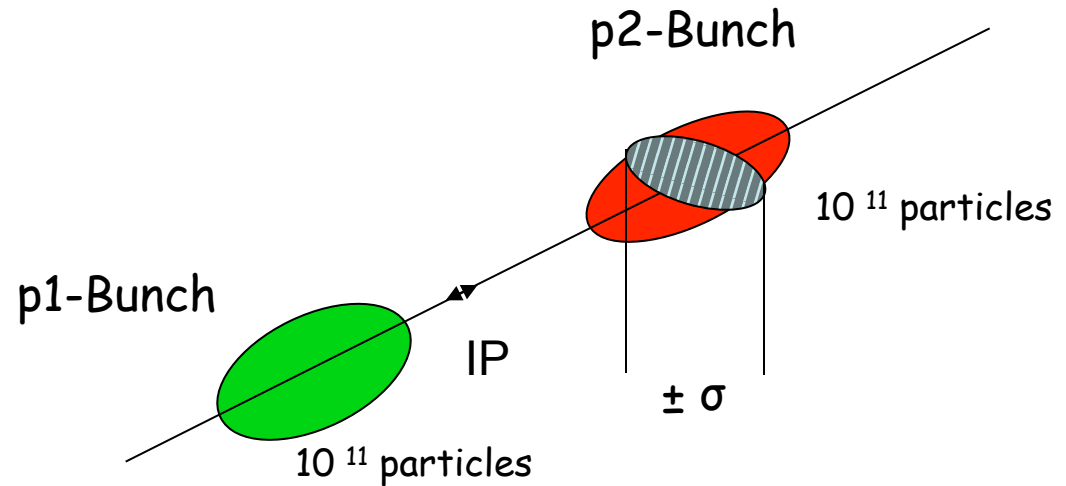
Predominately particles with low masses are suitable for the use in light sources.

ELECTRONS, POSITRONS

$$\beta = \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \quad \rightarrow$$



10.) Luminosity



Example: Luminosity run at LHC

$$\beta_{x,y} = 0.55 \text{ m}$$

$$f_0 = 11.245 \text{ kHz}$$

$$\epsilon_{x,y} = 5 * 10^{-10} \text{ rad m}$$

$$n_b = 2808$$

$$\sigma_{x,y} = 17 \text{ } \mu\text{m}$$

$$L = \frac{1}{4\pi e^2 f_0 n_b} * \frac{I_{p1} I_{p2}}{\sigma_x \sigma_y}$$

$$I_p = 584 \text{ mA}$$

$$L = 1.0 * 10^{34} \text{ } 1 / \text{cm}^2 \text{ s}$$

Synchrotrons ως Collider Rings (1960 ...):

Beam energies

1. ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

total energy $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$

→ $cp = \sqrt{E^2 - m_0^2 c^4} = \sqrt{(\gamma m_0 c^2)^2 - (m_0 c^2)^2} = \sqrt{\gamma^2 - 1} m_0 c^2$

→ $cp = \gamma\beta * m_0 c^2$

2.) Συγκρουόμενα σωματίδια

Ενέργεια ηρεμίας σωματιδίου $E_0^2 = (m_0 c^2)^2 = E^2 - p^2 c^2$

Ενέργεια κέντρου μάζας ενός συστήματος σωματιδίων:

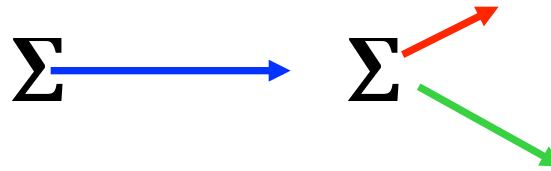
$$E_{cm}^2 = \left(\sum_i E_i \right)^2 - \left(\sum_i cp_i \right)^2$$

ΔΥΟ Συγκρουόμενα σωματίδια

$$E_{cm}^2 = (\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2)^2 c^4 - (cp_1 + cp_2)^2$$

$$E_{cm}^2 = (\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2)^2 c^4 - (\gamma_1 \beta_1 m_1 + \gamma_2 \beta_2 m_2)^2 c^4$$

1) proton beam on fixed proton



$$E_{cm}^2 = (\gamma_1 + 1)^2 m_p^2 c^4 - (\gamma_1 \beta_1 m_1)^2 c^4$$

$$m_1 = m_2 = m_p \quad \gamma_2 = 1 \quad \beta_2 = 0$$

$$E_{cm}^2 = (\gamma_1 + 1)^2 m_p^2 c^4 - (\gamma_1^2 - 1) * m_p^2 c^4$$

$$E_{cm}^2 = 2(\gamma_1 - 1) * m_p^2 c^4$$

$$E_{cm} = \sqrt{2(\gamma_1 - 1)} * m_p c^2$$

Discovery of the Quarks: electron beam on fixed proton / neutron target

Taylor/Kendall/Friedman: Discovery of the Quark structure of protons and neutrons 1966-1978 1990 Nobel Price

2 : particle anti-particle collider

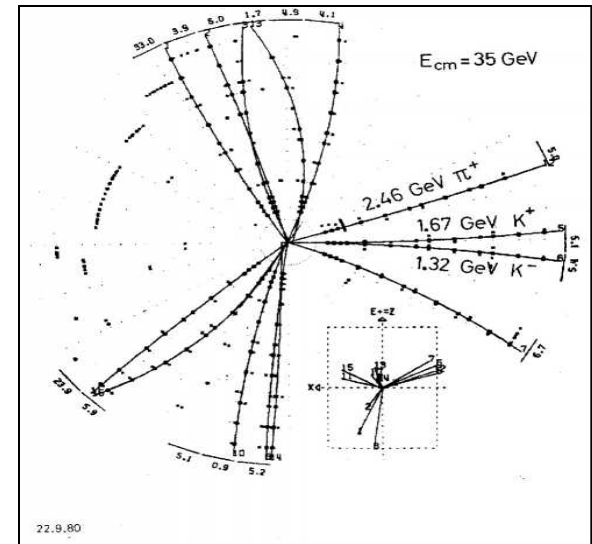
e^+ / e^- , p / \bar{p} , m^+ / m^-

- * store both counter rotating particle beams in the same magnet lattice
- * no conservation of quantum numbers required

$$E_{cm}^2 = (\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2)^2 c^4 - (\cancel{cp_1} + \cancel{cp_2})^2$$

Σ

$$E_{cm} = 2\gamma mc^2$$

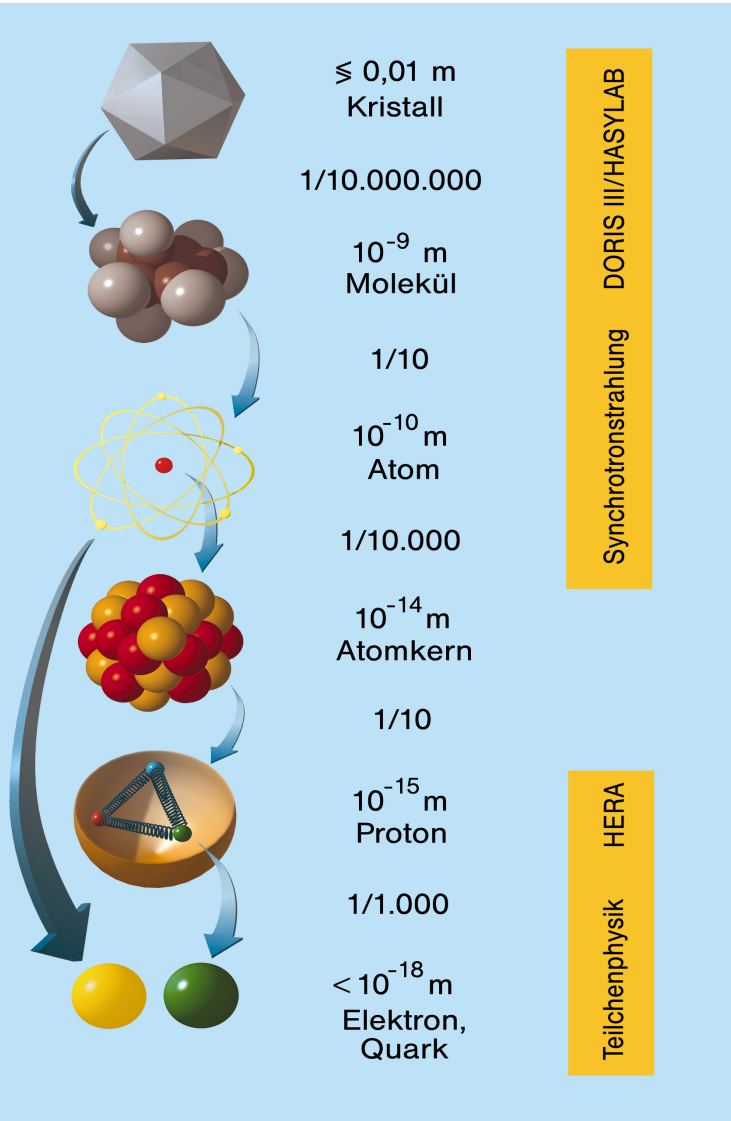


1979 PETRA Collider at DESY
discovery of the gluon

- Colliders:**
- * working at highest energies ("cm")
 - * store the particles for long time in an accelerator
 - * bring two beams into collision
 - * particle density !!
 - * preparation / technical design / field qualities are extreme

Storage Rings for Structure Analysis

Structure of Matter



synchrotron light: nm

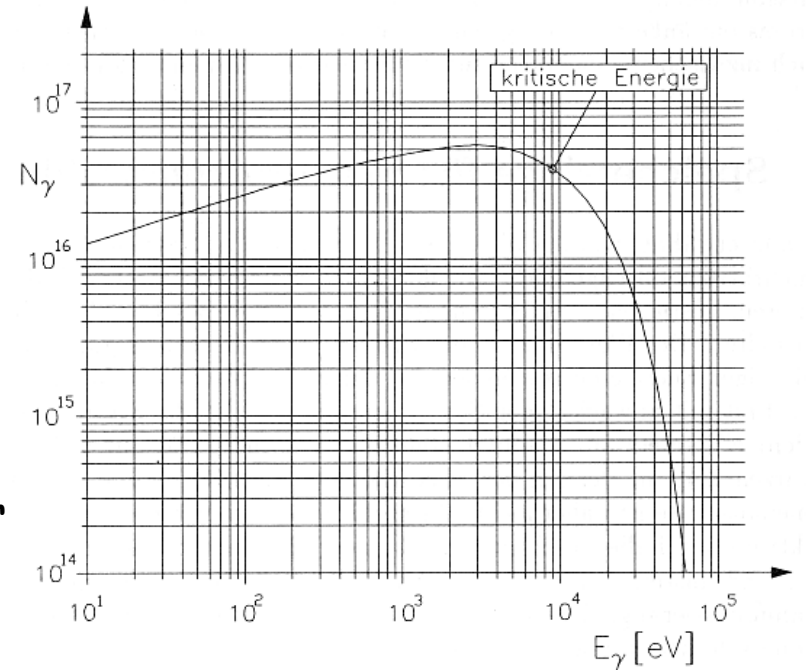
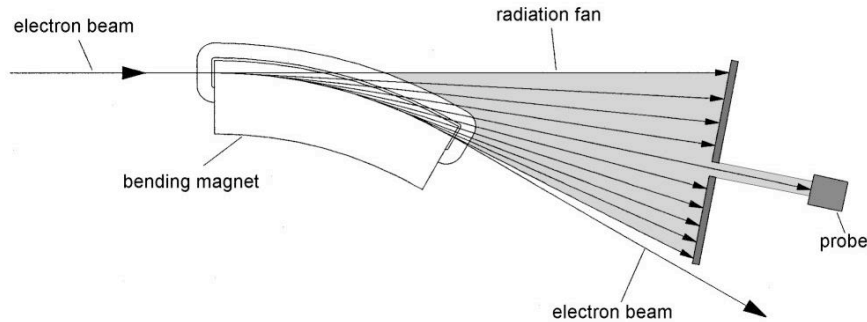
electron scattering: Å ... 10⁻¹⁸ m

de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{ch}{E}$$

$$E \approx pc$$

7.) Electron Storage Rings Production of Synchrotron Light



$$P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} * \frac{1}{(m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R^4}$$

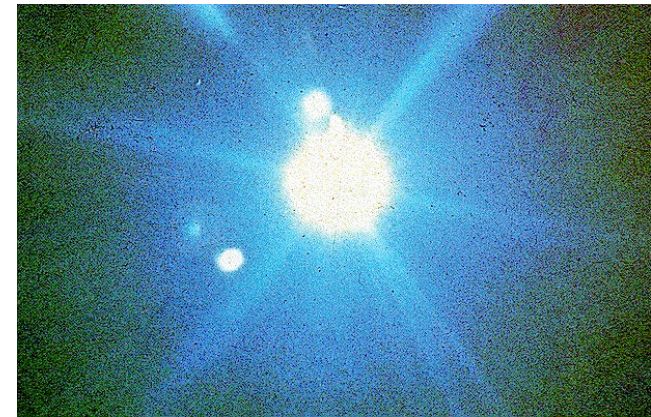
Radiation Power

$$\Delta E = \frac{e^2}{3\epsilon_0 (m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R}$$

Energy Loss per turn

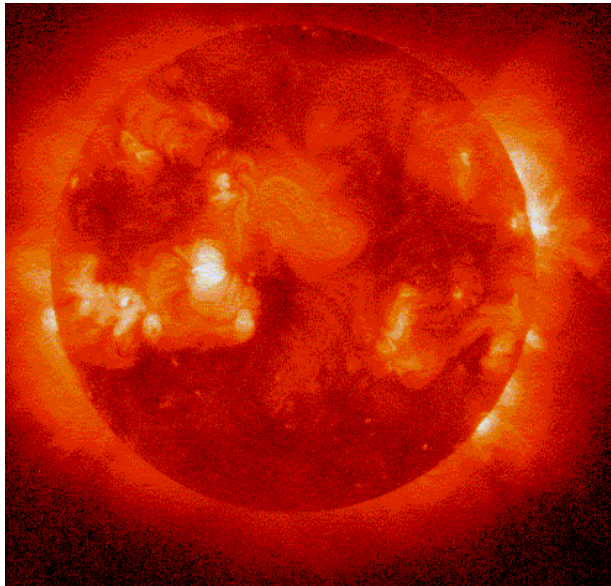
$$\omega_c = \frac{3c\gamma^3}{2R}$$

„typical Frequency“
of emitted light



Application of Synchrotron Light Analysis at Atoms & Molecules

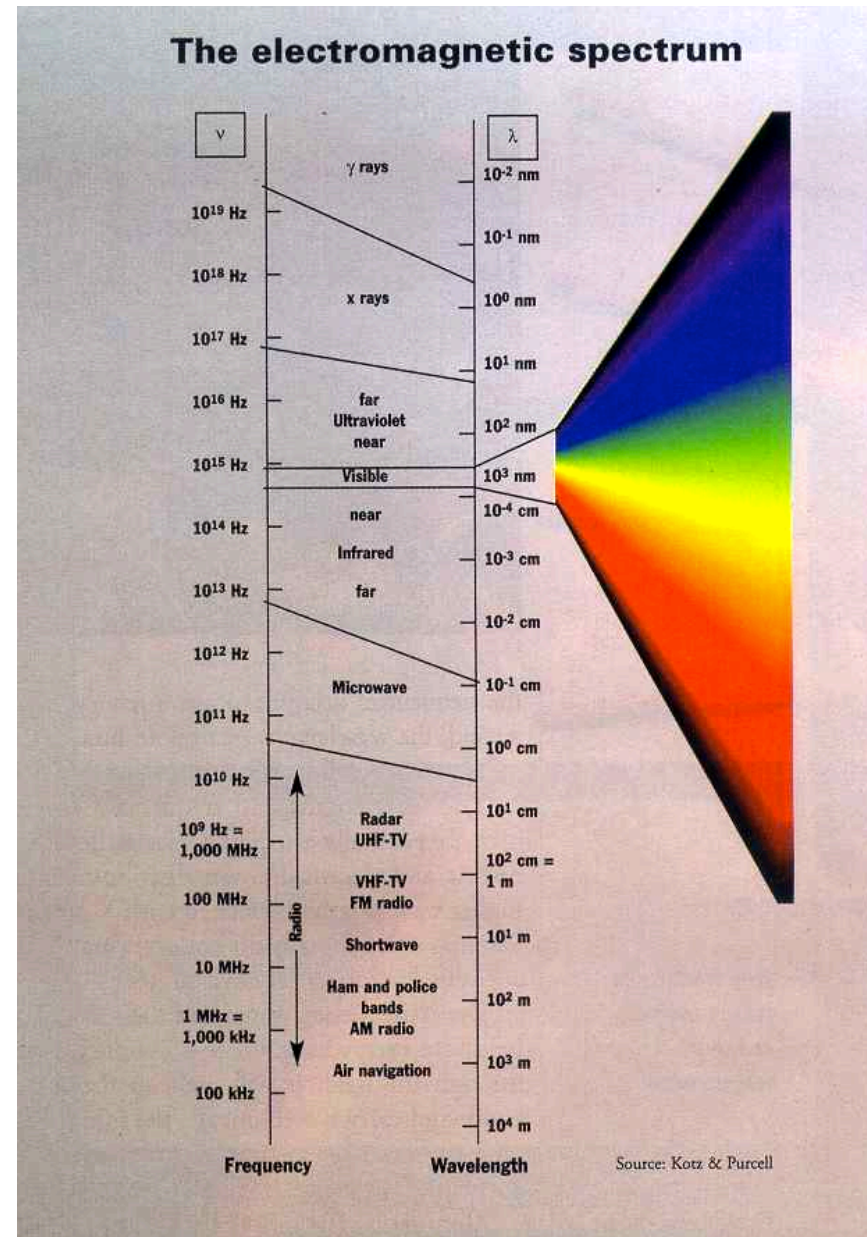
The electromagnetic Spectrum:



having a closer look at the sun ...

Light:

$\lambda \approx 400 \text{ nm} \dots 800 \text{ nm}$
1 Oktave



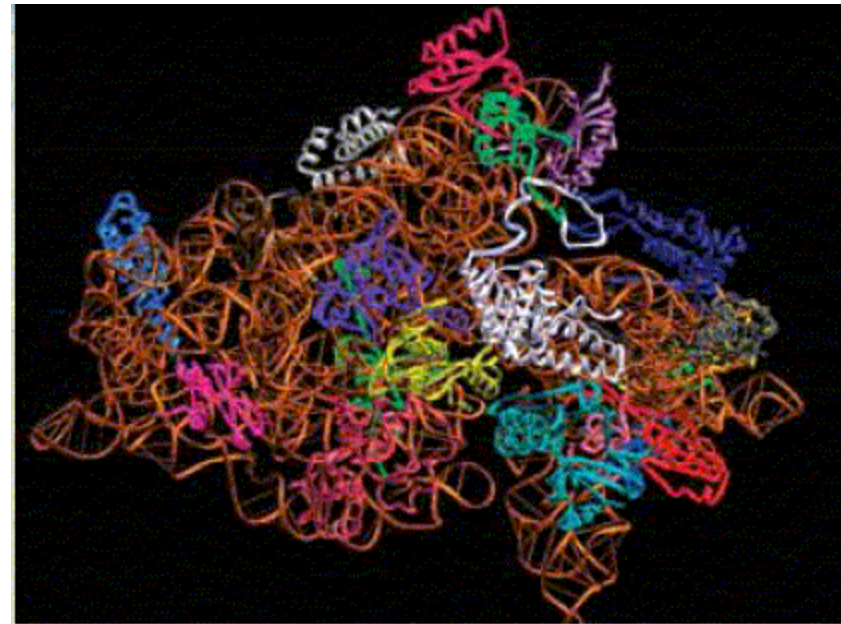
Analysis of Cell structures

Structure of a Ribosom

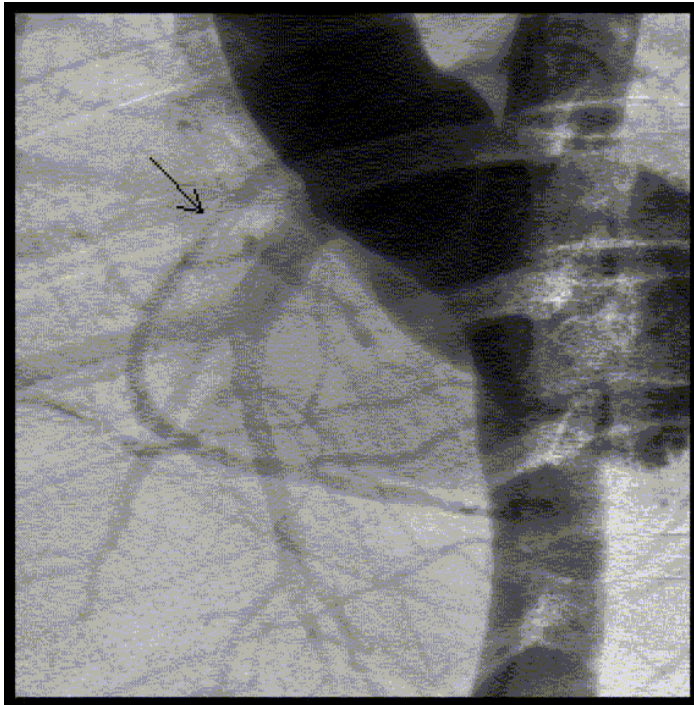
Ribosomen are responsible for the protein production in living cells.

The structure of these Ribosom molecules can be analysed using brilliant synchrotron light from electron storage rings

(Quelle: Max-Planck-Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie)



Structure of the ribosome, the "protein factory" in living cells



Angiographie

x-ray method applicable for the imaging of coronar heart arteria

$$E_{cm}^2 = (\gamma_1 + 1)^2 m_p^2 c^4 - (\gamma_1^2 - 1) m_p^2 c^4$$

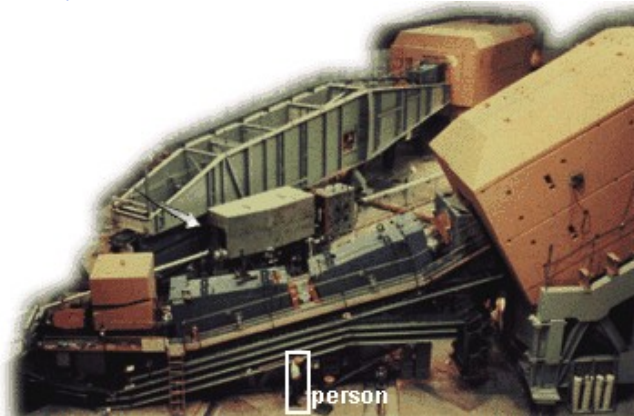
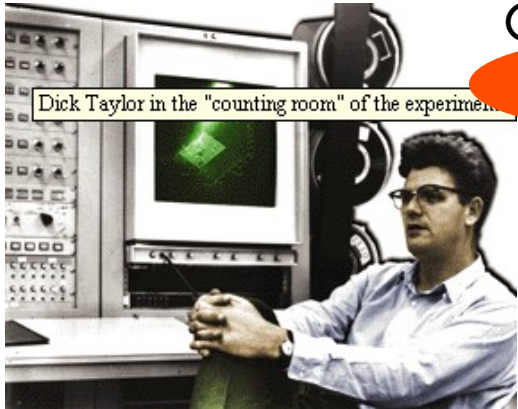
$$E_{cm}^2 = 2(\gamma_1 - 1) m_p^2 c^4$$

$$E_{cm} = \sqrt{2(\gamma_1 - 1)} m_p c^2$$

Discovery of the Quarks: electron beam on fixed proton / neutron target

Taylor/Kendall/Friedman: Discovery of the Quark structure of protons and neutrons

1966-1978 1990 Nobel Price

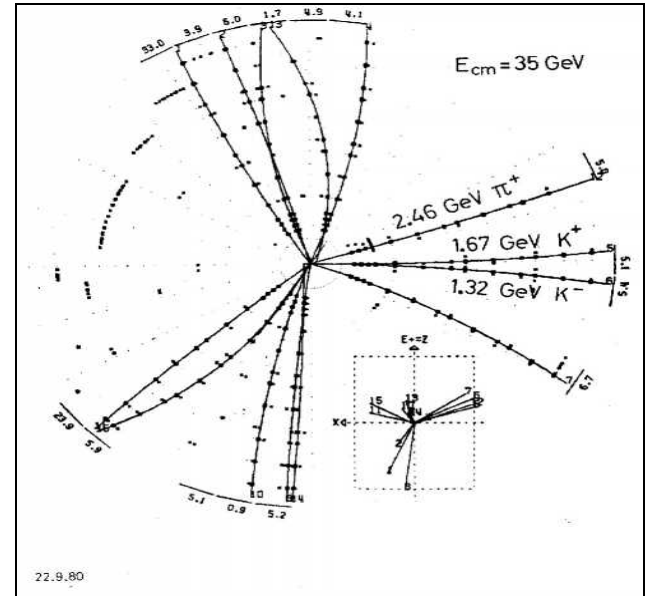
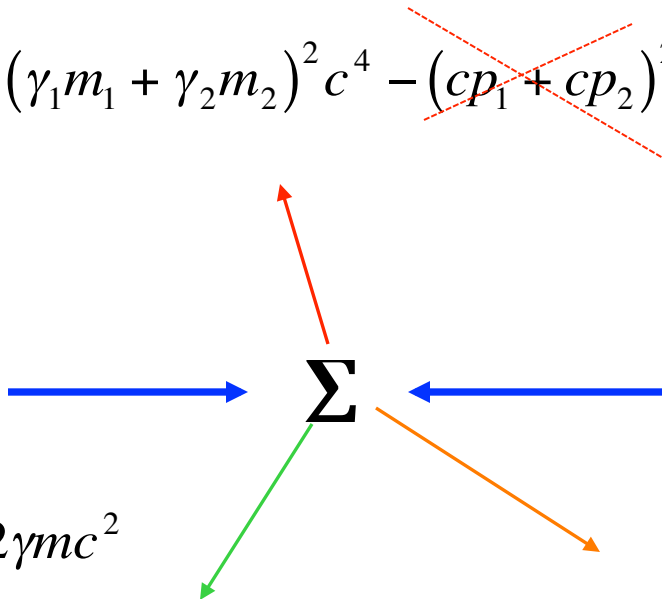


Example 2 : particle anti-particle collider e^+ / e^- , p / \bar{p} , m^+ / m^-

- * store both counter rotating particle beams in the same magnet lattice
- * no conservation of quantum numbers required

$$E_{cm}^2 = (\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2)^2 c^4 - (\cancel{cp_1} + \cancel{cp_2})^2$$

$$E_{cm} = 2\gamma mc^2$$



1979 PETRA Collider at DESY
discovery of the gluon

- Colliders:**
- * working at highest energies ("cm")
 - * store the particles for long time in an accelerator
 - * bring two beams into collision
 - * particle density !!
 - * preparation / technical design / field qualities are extreme

