

# Εισαγωγή στους Επιταχυντές

**Σοφία Κώστογλου**

Τμήμα Δέσμεων – Ομάδα Φυσικής Επιταχυντών CERN

ALICE

ATLAS

LHCb



Greek Private Educators Visit to CERN 2024

07/05/2024

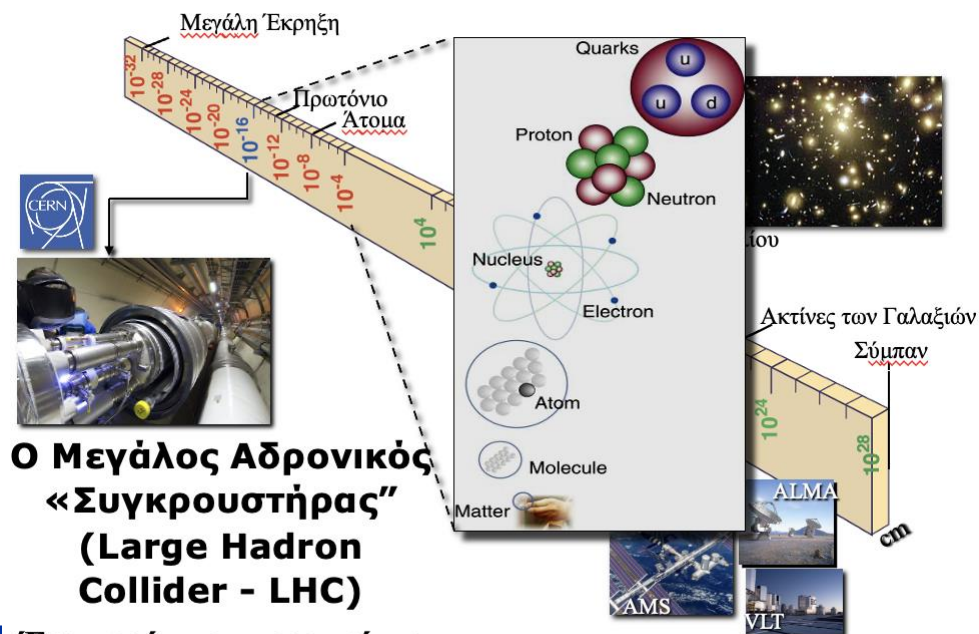
# Τι είναι ένας επιταχυντής

- Οι επιταχυντές είναι «μηχανές» που επιταχύνουν φορτισμένα σωματίδια (πρωτόνια, ηλεκτρόνια,..) με ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε μεγάλες ταχύτητες, συχνά **σχεδόν ίσες με την ταχύτητα του φωτός!**
- Οι δέσμες αυτές είτε προσκρούουν σε ένα στόχο είτε συγκρούονται με σωματίδια που κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση.

Γιατί?

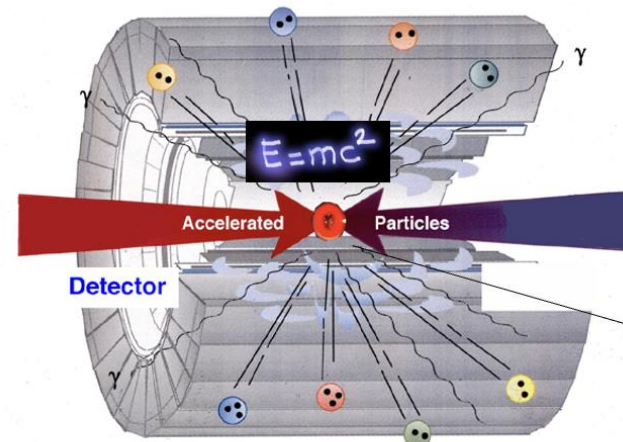
# Τι είναι ένας επιταχυντής

- Μέσω αυτών των κρούσεων, μπορούμε να μελετήσουμε την **δομή της ύλης** και να **παράγουμε νέα σωματίδια** που ανιχνεύονται από τους ανιχνευτές στα σημεία της κρούσης.
- Συνθήκες παρόμοιες με τις συνθήκες **στην αρχή της δημιουργίας του Σύμπαντος**.



Ο Μεγάλος Αδρονικός «Συγκρουστήρας» (Large Hadron Collider - LHC)

Ένα τεράστιο μικροσκόπιο



1) Δημιουργία πολύ ενεργητικών σωματιδίων (επιταχυντές)

2) **Σύγκρουση** σωματιδίων (συνθήκες της Μεγάλης Έκρηξης - Big Bang)

3) Προσδιορισμός των παραγόμενων σωματιδίων με **Ανιχνευτές**

# Τι είναι ένας επιταχυντής

- Με αυτόν τον τρόπο επαληθεύουμε θεωρίες, ανακαλύπτουμε νέα σωματίδια πέρα από το καθιερωμένο πρότυπο, εξελίσσουμε νέες τεχνολογίες.
- Ο μεγαλύτερος και πιο ισχυρός επιταχυντής βρίσκεται στο CERN και είναι το αποτέλεσμα ταυτόχρονης εξειδίκευσης σε θέματα φυσικής, μηχανικής, πληροφορικής, τεχνολογίας και πολλών άλλων ειδικοτήτων.



# Εφαρμογές επιταχυντών



Πέρα από την έρευνα φυσικής

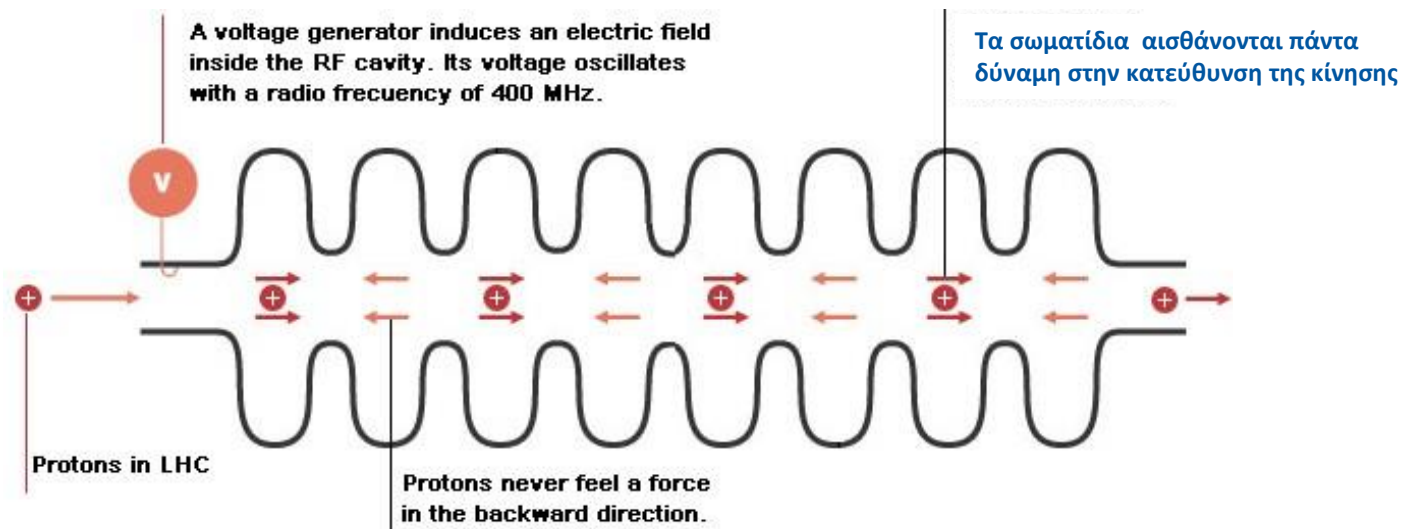
- Ιατρική: για απεικόνιση (όπως τομογραφία) και θεραπεία (όπως θεραπεία καρκίνου).
- Βιομηχανικές εφαρμογές (όπως αποστείρωση και αλλαγή των ιδιοτήτων υλικών)
- Τέχνη (όπως προσδιορισμός ηλικίας αντικειμένων)
- ..

# Εφαρμογές επιταχυντών

- Στο CERN δημιουργήθηκε το **World Wide Web (WWW)** για να διευκολύνει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επιστημόνων [info.cern.ch](http://info.cern.ch), δωρεάν σε όλους ως ελεύθερο λογισμικό.
- **Worldwide LHC computing GRID**: παγκόσμια υποδομή σε παραπάνω από 40 χώρες που επιτρέπει την αποθήκευση, διανομή και ανάλυση του τεράστιου όγκου δεδομένων του LHC σε πραγματικό χρόνο από τουλάχιστον 10000 φυσικούς.
- **LHC@home**: Πλατφόρμα από εθελοντές που παρέχουν πρόσβαση στους προσωπικούς τους υπολογιστές για προσομοιώσεις και ανάλυση δεδομένων του LHC.

# Τύποι επιταχυντών

- **Γραμμικοί (LINAC):**
  - Επιταχύνουν τα σωματίδια σε **ευθεία γραμμή** με RF κοιλότητες.
  - Ένα **πέρασμα** της δέσμης μέσα από τον επιταχυντή.



# Τύποι επιταχυντών

- **Γραμμικοί (LINAC):**
  - Επιταχύνουν τα σωματίδια σε **ευθεία γραμμή** με RF κοιλότητες.
  - **Ένα πέρασμα** της δέσμης μέσα από τον επιταχυντή.
- **Κυκλικοί:**
  - Τα σωματίδια κινούνται σε **κυκλική τροχιά**.
  - **Πολλές περιστροφές** της δέσμης γύρω από τον επιταχυντή.
  - Χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες, θα επικεντρωθούμε στα **σύγχροτρα**: όσο αυξάνεται η ενέργεια της δέσμης αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο προκειμένου να διατηρηθεί η δέσμη στην κυκλική τροχιά.

$$\frac{1}{\rho[m]} = 0.3 \frac{B[T]}{\beta E[GeV]}$$

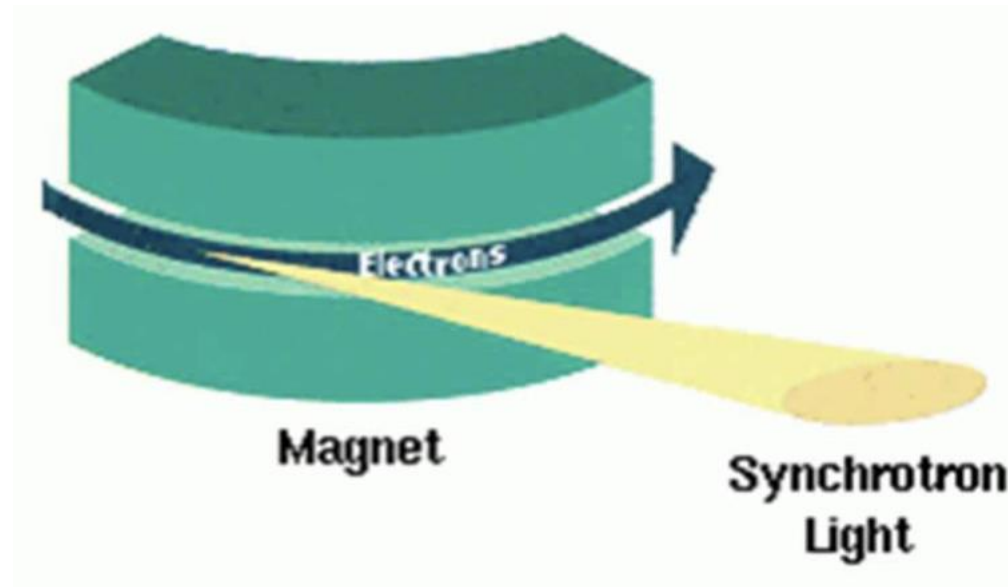


# Τύποι επιταχυντών

- **Γραμμικοί (LINAC):**
  - Επιταχύνουν τα σωματίδια σε **ευθεία γραμμή** με *RF κοιλότητες*.
  - **Ένα πέρασμα** της δέσμης μέσα από τον επιταχυντή.
- **Κυκλικοί:**
  - Τα σωματίδια κινούνται σε **κυκλική τροχιά**.
  - **Πολλές περιστροφές** της δέσμης γύρω από τον επιταχυντή.
  - Χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες, θα επικεντρωθούμε στα **σύγχροτρα**: όσο αυξάνεται η ενέργεια της δέσμης αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο προκειμένου να διατηρηθεί η δέσμη στην κυκλική τροχιά.
  - Όταν η δέσμη φτάσει την μέγιστη ενέργεια, γίνεται **συγκρουστήρας (collider)**.

# Ακτινοβολία συγχρότρου

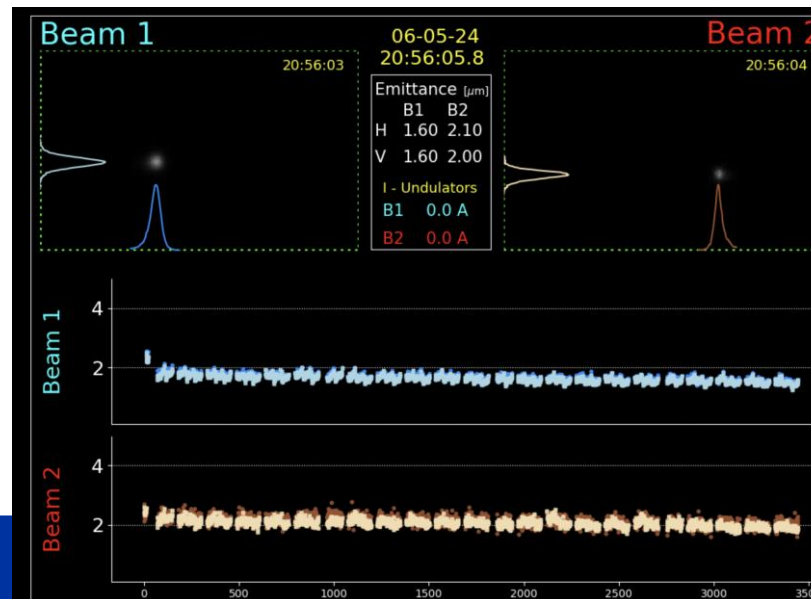
- **Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία** που παράγεται όταν φορτισμένα σωματίδια κινούνται σε **κυκλικές τροχιές** εντός μαγνητικού πεδίου.



- Είναι **ανάλογη της ενέργεια της δέσμης** και **αντιστρόφως ανάλογη της μάζας**: Όσο μικρότερη είναι η μάζα του σωματιδίου και όσο μεγαλύτερη η ενέργεια, τόσο περισσότερη ακτινοβολία συγχρότρου παράγεται.

# Ακτινοβολία συγχρότρου

- Η ενέργεια που χάνεται από το σύστημα πρέπει να επιστραφεί προκειμένου να διατηρήσουμε την ενέργεια της δέσμης σταθερή.
- Χρησιμοποιείται σε synchrotron light sources για διάφορες εφαρμογές όπως έρευνα υλικών, χημεία και βιολογία (όπως ESRF στην Grenoble, Γαλλία ή PSI στο Villigen, Ελβετία).
- Στον LHC, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της διατομής της δέσμης.



# Βασικά συστατικά ενός επιταχυντή

- Δυο βασικές λειτουργίες ενός επιταχυντή
  - Να αυξήσει την ενέργεια της δέσμης.
  - Να διατηρήσει τη δέσμη σε συγκεκριμένη τροχιά.

## Πώς?

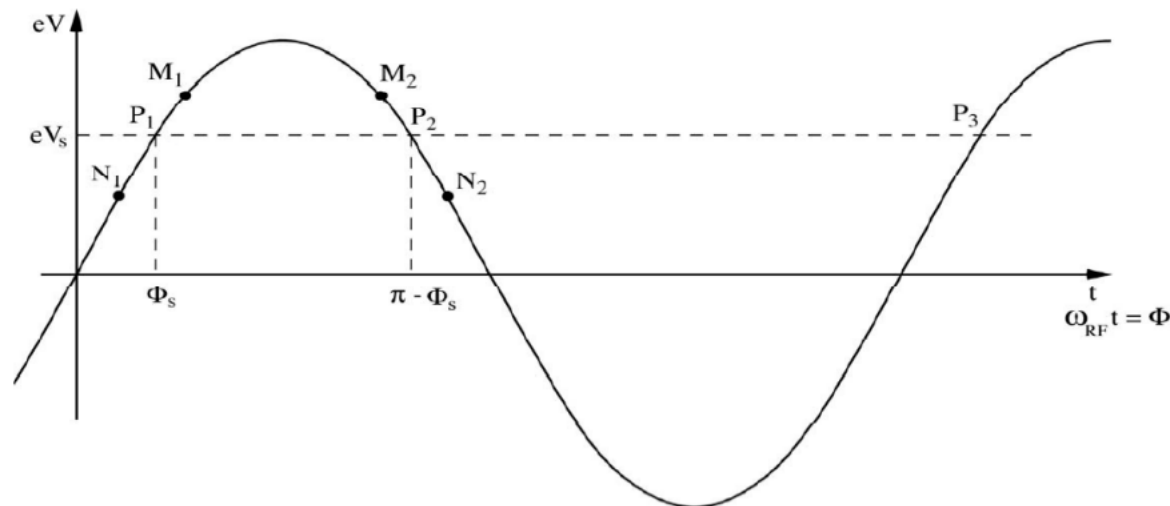
- Επιταχύνουμε τη δέσμη (και επιστρέφουμε την ενέργεια που χάθηκε λόγω ακτινοβολίας συγχρότρου) με **ηλεκτρικά πεδία**.
- Στρέφουμε τη δέσμη και την διατηρούμε σε συγκεκριμένη τροχιά με **μαγνητικά πεδία**.

# Επιτάχυνση

- Επιτάχυνση επιτυγχάνεται με **κοιλότητες ραδιοσυχνοτήτων** (RF cavities).

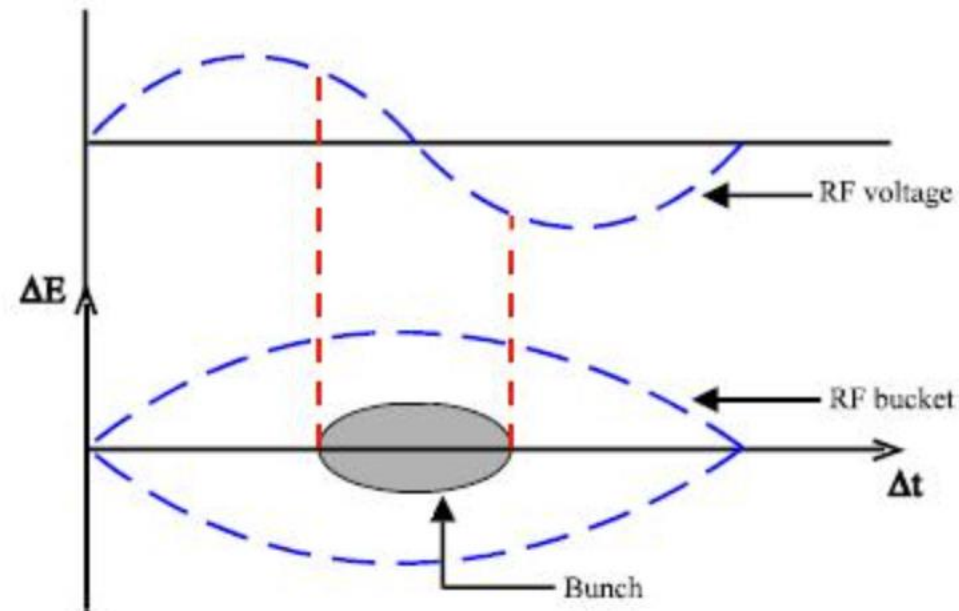
$$\Delta E = W = q\hat{V} \sin(\omega_{RF}t) = q\hat{V} \sin \phi$$

- Το «**σύγχρονο**» σωματίδιο με φάση  $\phi_s$  λαμβάνει ακριβώς την ενέργεια που χρειάζεται.
- Ένα σωματίδιο που θα φτάσει **νωρίτερα** θα πάρει **λιγότερη** ενέργεια, ένα σωματίδιο που φτάνει **αργότερα** θα πάρει **μεγαλύτερη** ενέργεια.



# Επιτάχυνση

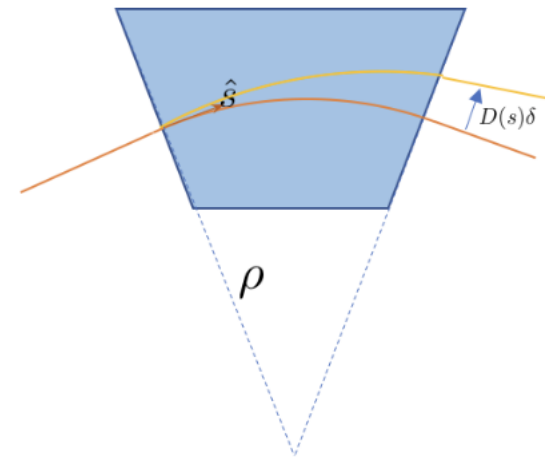
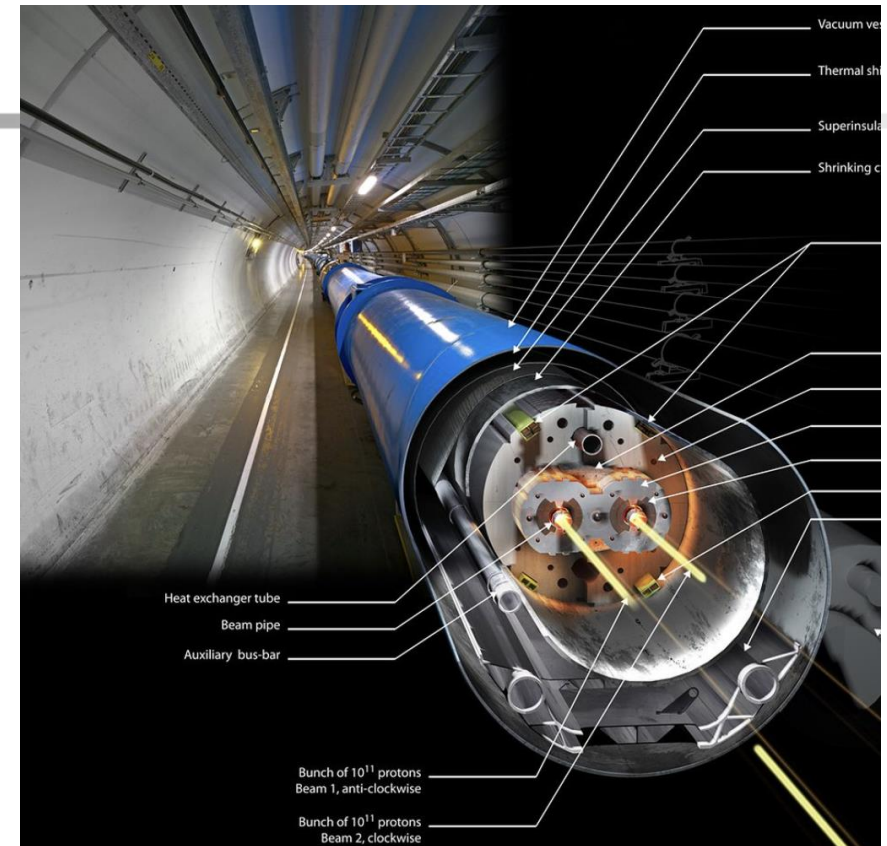
- Η δέσμη δεν μπορεί να είναι συνεχής αλλά πρέπει να είναι οργανωμένη σε πακέτα σωματιδίων (**bunches**).
- Συγχρονισμός με τη συχνότητα περιστροφής της δέσμης.
- Συνολικά, 3564 bunches σε απόσταση 25 ns, συνήθως όμως  $\sim 2000$  bunches.



# Μαγνήτες

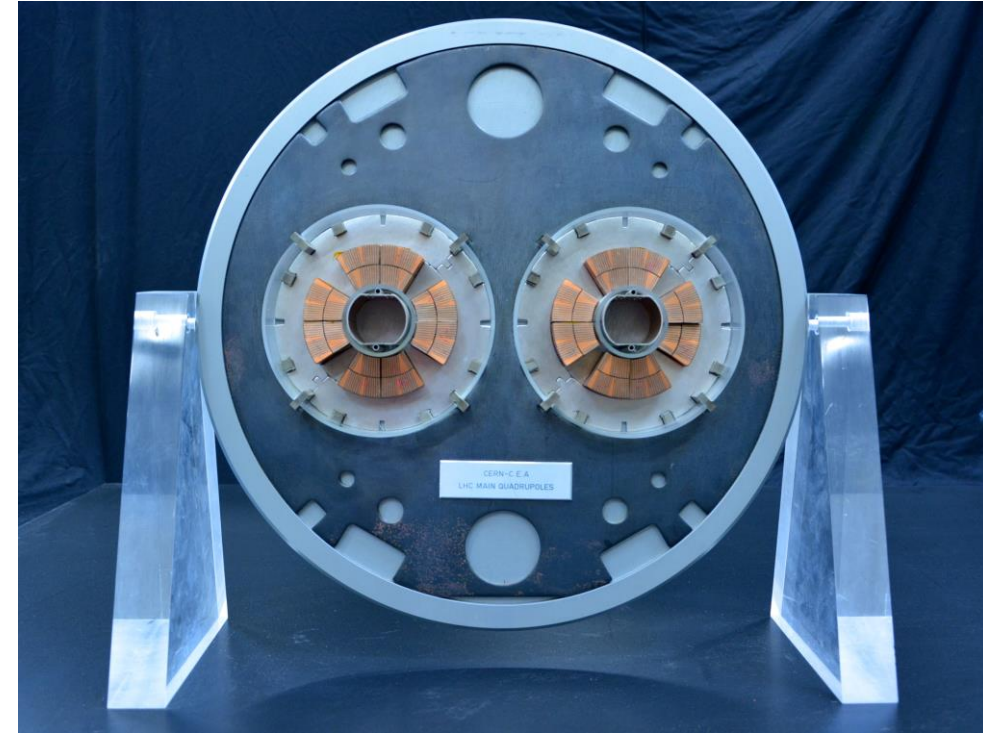
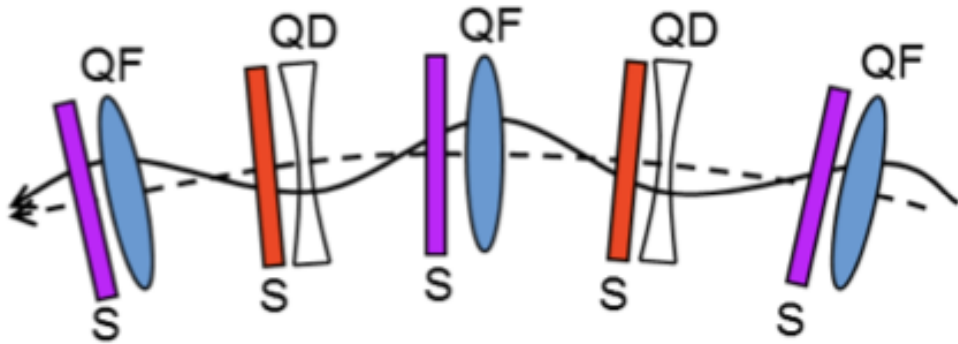
## ■ Δίπολα:

- Στρέφουν την δέσμη σε **κυκλική τροχιά**.
- Στον LHC: δυο θαλάμους κενού για τις δυο δέσμες, 15m/δίπολο, **1232 δίπολα**.
- **Υπεραγωγιμότητα**: σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, υψηλό ηλεκτρικό ρεύμα με μηδενική αντίσταση. Απαραίτητο για υψηλά μαγνητικά πεδία όπως 8T στον LHC.
- **Διασπορά**: σωματίδια με μεγαλύτερη ενέργεια στρέφονται λιγότερο!



# Μαγνήτες

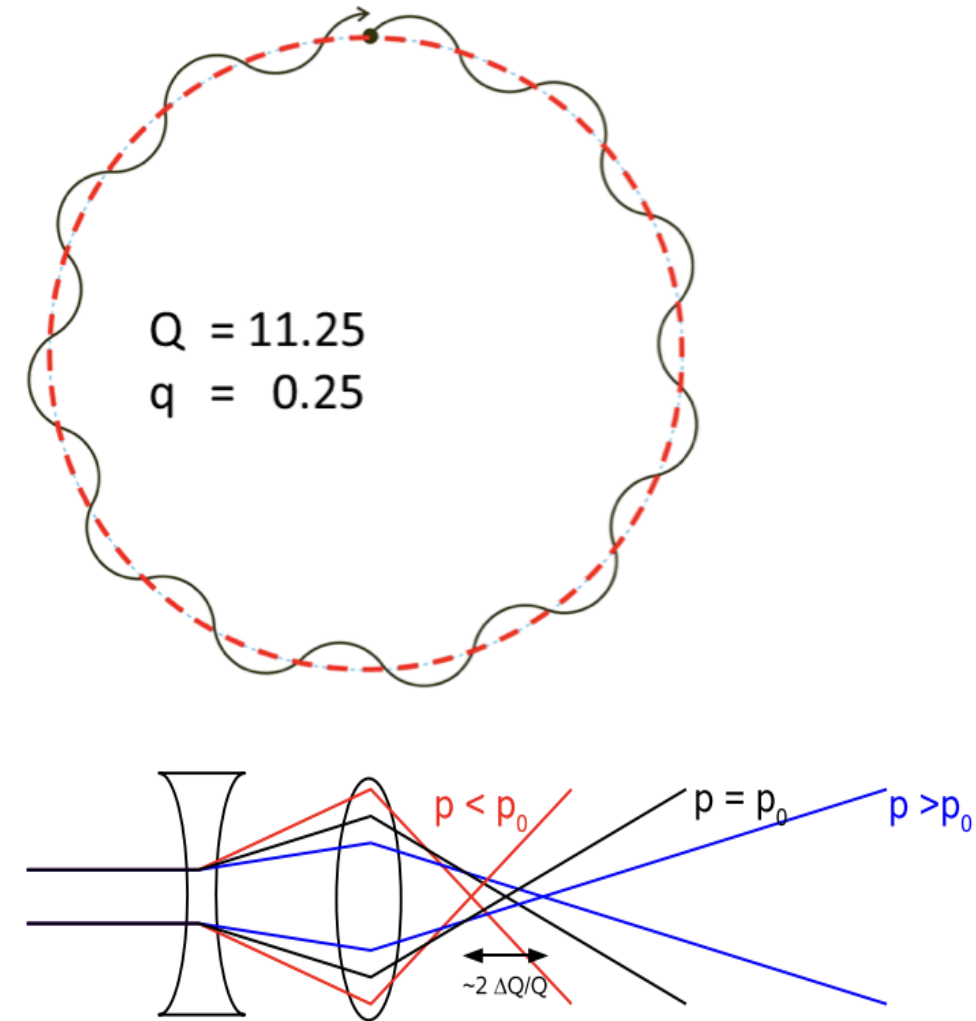
- Τετράπολα:
  - Για τον έλεγχο της **φυσικής απόκλισης** της δέσμης.
  - Για την **εστίαση της δέσμης** σε πολύ μικρή διατομή στα σημεία αλληλεπίδρασης του LHC .





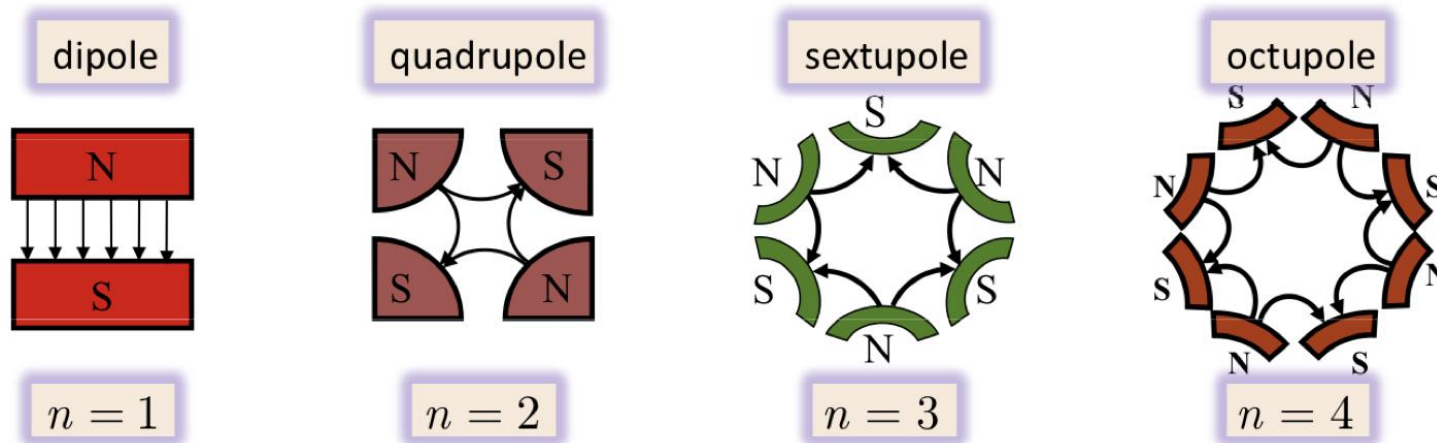
# Μαγνήτες

- Τετράπολα:
  - Για τον έλεγχο της **φυσικής απόκλισης** της δέσμης.
  - Για την **εστίαση της δέσμης** σε πολύ μικρή διατομή στα σημεία αλληλεπίδρασης του LHC .
  - Η περιοδική κίνηση οδηγεί στην **βητατρονική συχνότητα**: κάθε σωματίδιο κινείται με συγκεκριμένη συχνότητα σε μια περιστροφή γύρω από τον επιταχυντή.
  - **Χρωματικότητα**: σωματίδια με μεγαλύτερη ενέργεια θα επικεντρωθούν λιγότερο!



# Μη-γραμμικοί μαγνήτες

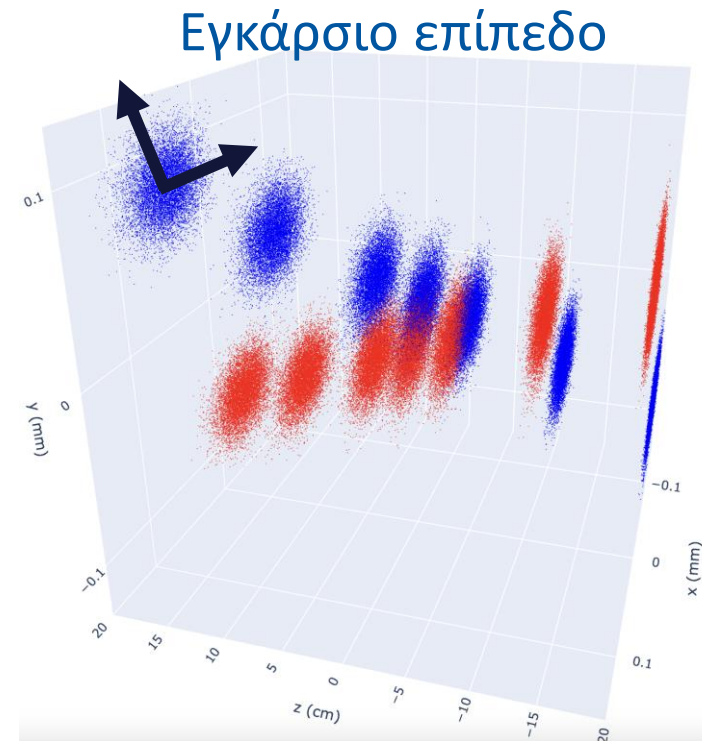
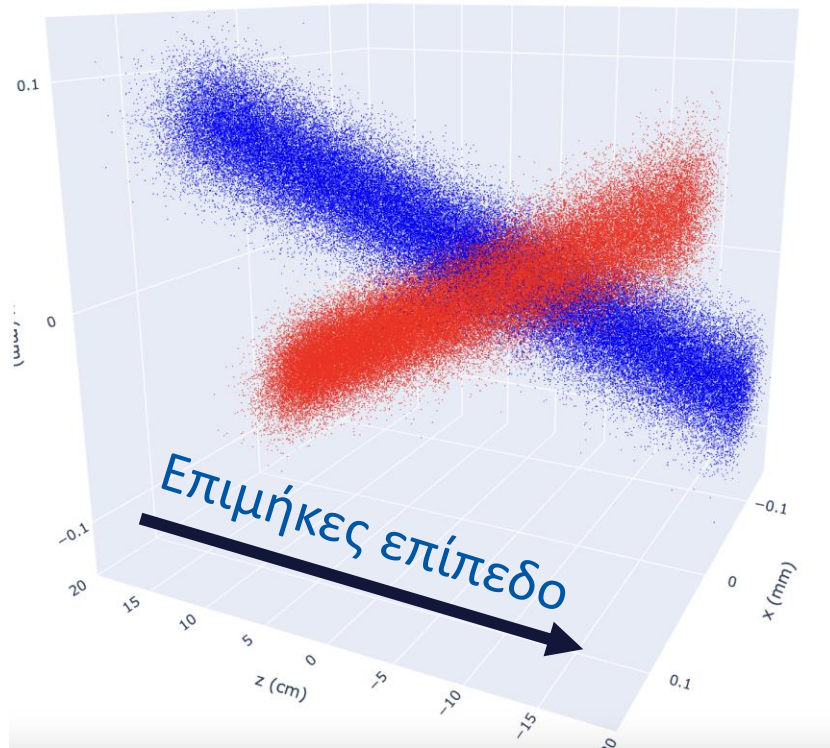
- Πέρα από τα δίπολα και τετράπολα, απαραίτητοι για τη λειτουργία των επιταχυντών είναι και οι **μη-γραμμικοί μαγνήτες**:
  - **Εξάπολα**: εάν τοποθετηθούν σε μέρη με διασπορά, διόρθωση και έλεγχος της χρωματικότητας.
  - **Οκτάπολα**: κάθε σωματίδιο θα έχει διαφορετική βητατρονική συχνότητα και αποφεύγεται η συλλογική κίνηση της δέσμης.



# Μη-γραμμικοί μαγνήτες

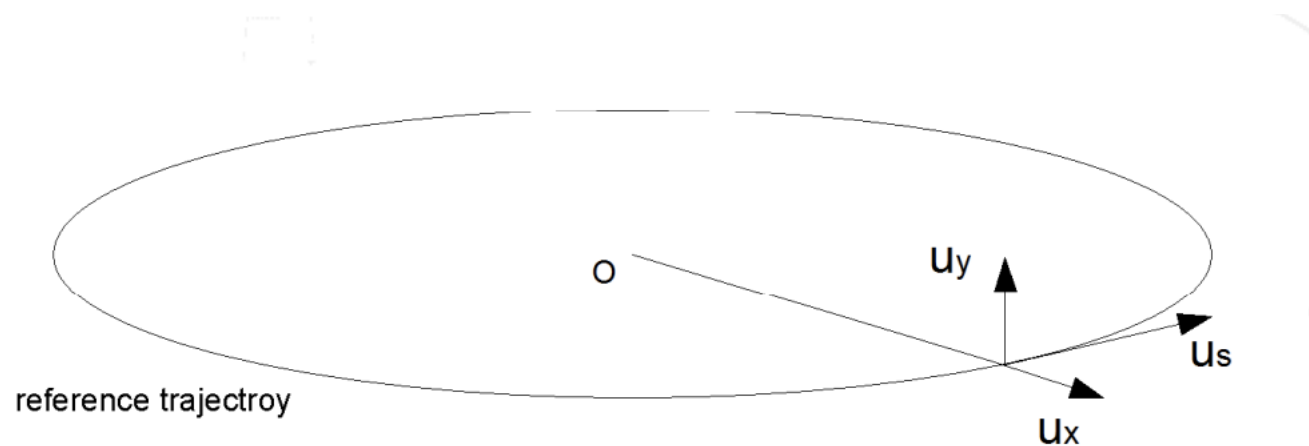
- Πέρα από τα δίπολα και τετράπολα, απαραίτητοι για τη λειτουργία των επιταχυντών είναι και οι **μη-γραμμικοί μαγνήτες**:
  - **Εξάπολα**: εάν τοποθετηθούν σε μέρη με διασπορά, διόρθωση και έλεγχος της χρωματικότητας.
  - **Οκτάπολα**: κάθε σωματίδιο θα έχει διαφορετική βητατρονική συχνότητα και αποφεύγεται η συλλογική κίνηση της δέσμης.
- Εάν και απαραίτητοι, οι μη γραμμικοί μαγνήτες εισάγουν πολλές δυσκολίες στην **δυναμική της δέσμης**.

# Η δυναμική της δέσμης



# Η δυναμική της δέσμης

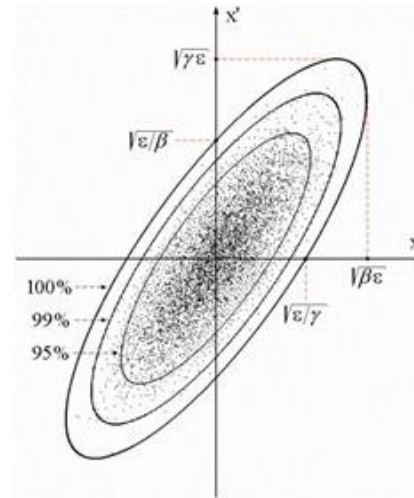
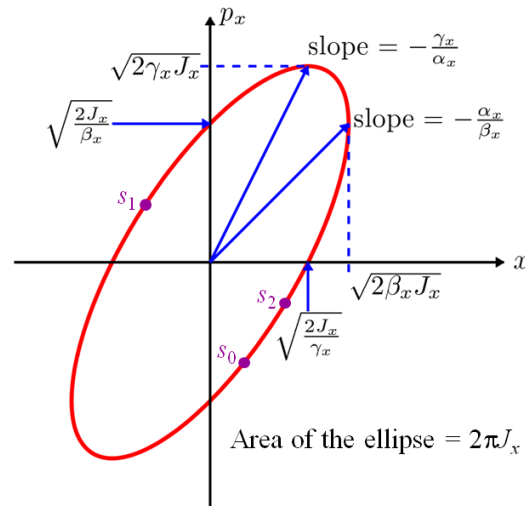
- Στο επιμήκες επίπεδο:
  - Στον LHC, η δέσμη πραγματοποιεί **11245.5 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο** γύρω από το τούνελ των 27 km ή 1 εκατομμύριο στροφές σε 1.5 λεπτό!
  - Τα σωματίδια ταξιδεύουν στην απόσταση Γη-Ήλιος 7 φορές την ώρα.



# Η δυναμική της δέσμης

- Στο εγκάρσιο επίπεδο:
  - Το κάθε σωματίδιο κινείται σε τροχιά έλλειψης στον φασικό χώρο  $(x, p_x)$  με τη βητατρονική του συχνότητα.
  - Το σχήμα της έλλειψης εξαρτάται από τις παραμέτρους Twiss.
  - Συνολικά, ο όγκος του φασικού χώρου διατηρείται (υπό προϋποθέσεις), η εκπεμπτικότητα παραμένει σταθερή στον χρόνο.

$$J_x = \gamma_x x^2 + 2\alpha_x x p_x + \beta_x p_x^2$$



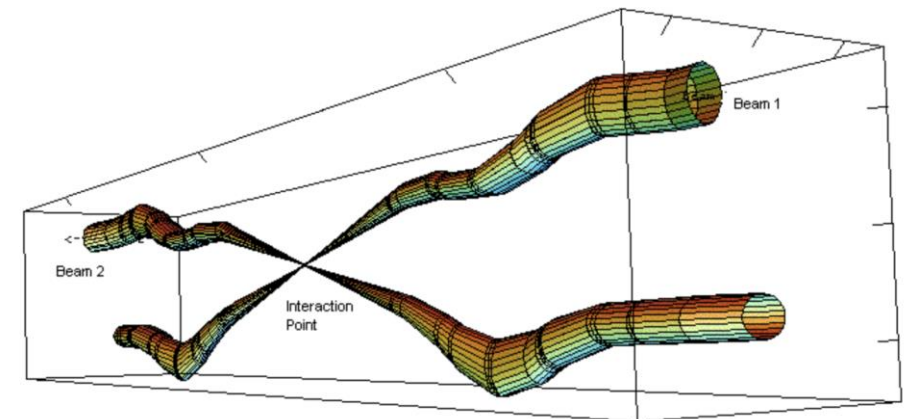
# Απόδοση ενός επιταχυντή

- **Φωτεινότητα**: ρυθμός παραγωγής γεγονότων όταν οι δέσμες συγκρούονται στο κέντρο των ανιχνευτών.

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

- Στόχος είναι να έχουμε:
  - Μικρές δέσμες στα σημεία της κρούσης: μικρό μέγεθος δέσμης σημαίνει μικρή εκπεμπτικότητα και μικρή συνάρτηση  $\beta$ .
  - Δέσμες με μεγάλο αριθμό σωματιδίων.

**Φωτεινές δέσμες!**



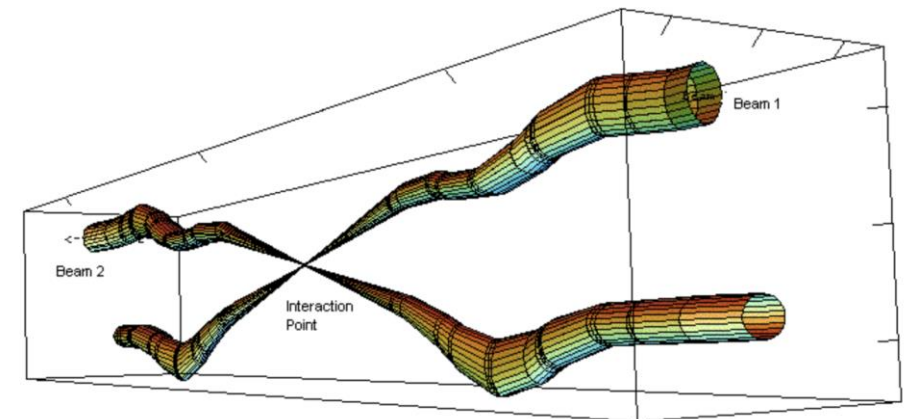
# Απόδοση ενός επιταχυντή

- **Φωτεινότητα**: ρυθμός παραγωγής γεγονότων όταν οι δέσμες συγκρούονται στο κέντρο των ανιχνευτών.

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

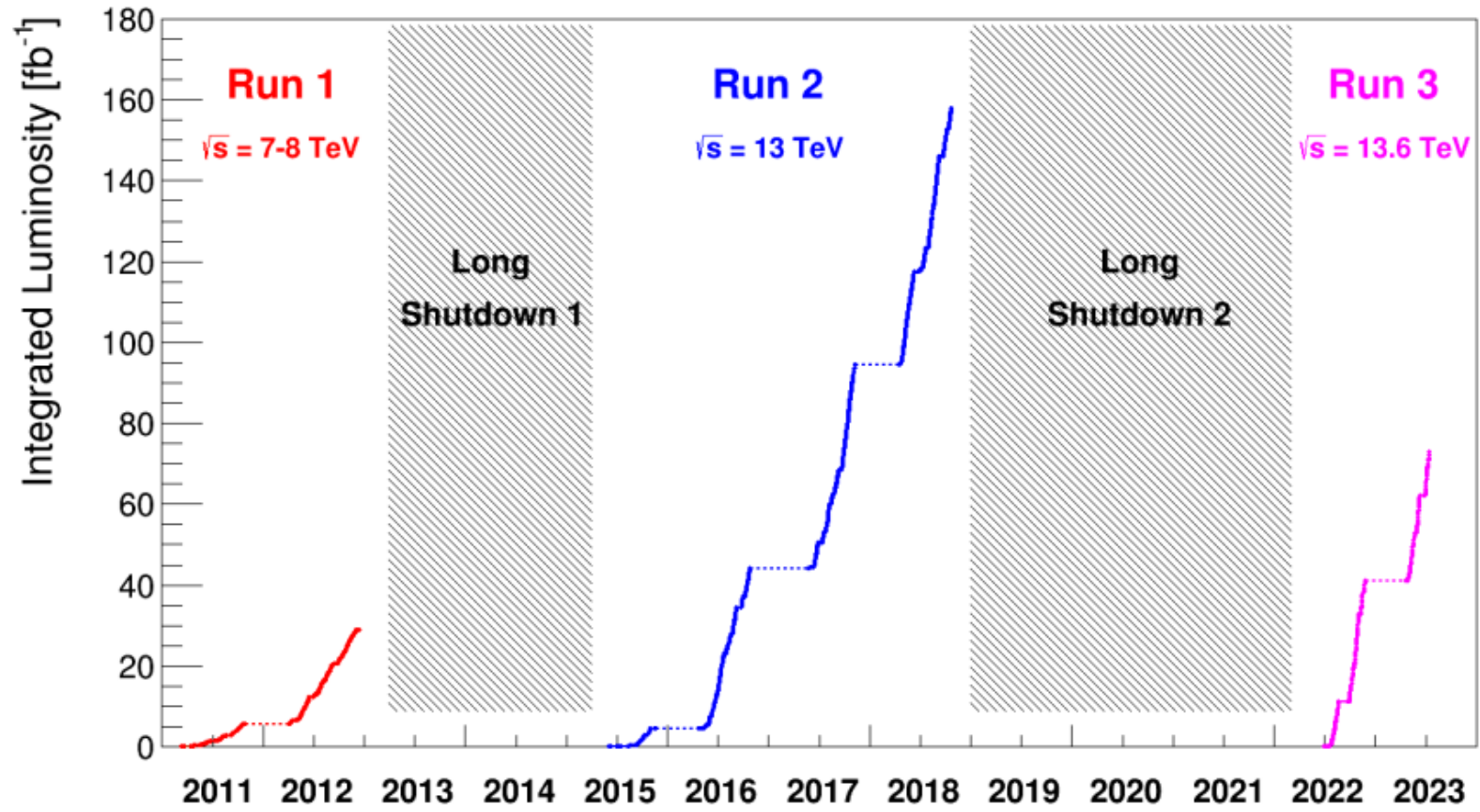
- Στόχος είναι να έχουμε:
  - Μικρές δέσμες στα σημεία της κρούσης: μικρό μέγεθος δέσμης σημαίνει μικρή εκπεμπτικότητα και μικρή συνάρτηση  $\beta$ .
  - Δέσμες με μεγάλο αριθμό σωματιδίων.

**Φωτεινές δέσμες!**



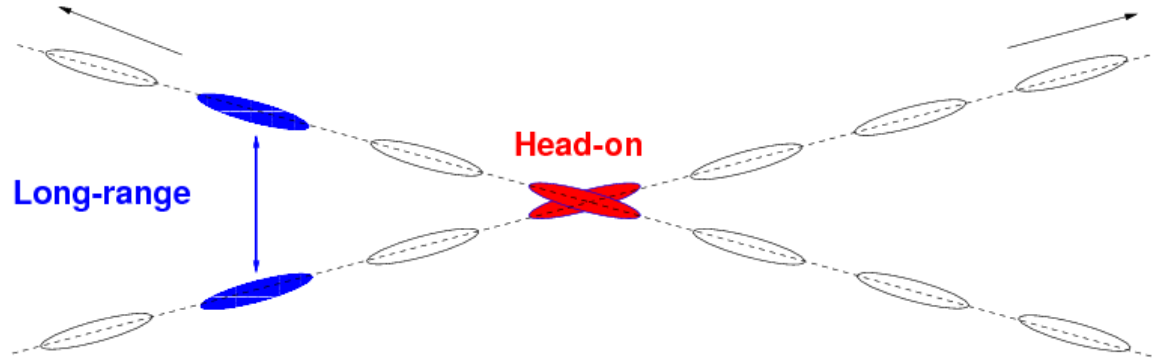


# Απόδοση του μεγάλου επιταχυντή αδρονίων



# Φαινόμενα δέσμης-δέσμης

- Ένα από τα πιο σύνθετα φαινόμενα στον LHC: όταν μια δέσμη συναντάει την δέσμη που κινείται σε αντίθετη φορά, **αλληλεπιδρά με το ηλεκτρομαγνητικό της πεδίο**.
- Οδηγεί σε:
  - Απώλειες σωματιδίων.
  - Αύξηση του μεγέθους της δέσμης.
  - Αλλάζει τη βητατρονική συχνότητα των σωματιδίων, συχνότητες μερικών σωματιδίων ίσες με συχνότητες συντονισμού.
  - Σύνθετα μη γραμμικά φαινόμενα: η κρούση γίνεται υπο γωνία προκειμένου να περιορίζονται οι συγκρούσεις στο σημείο των ανιχνευτών → διαφορετικό αντίκτυπο σε κάθε bunch από φαινόμενα δέσμης-δέσμης.

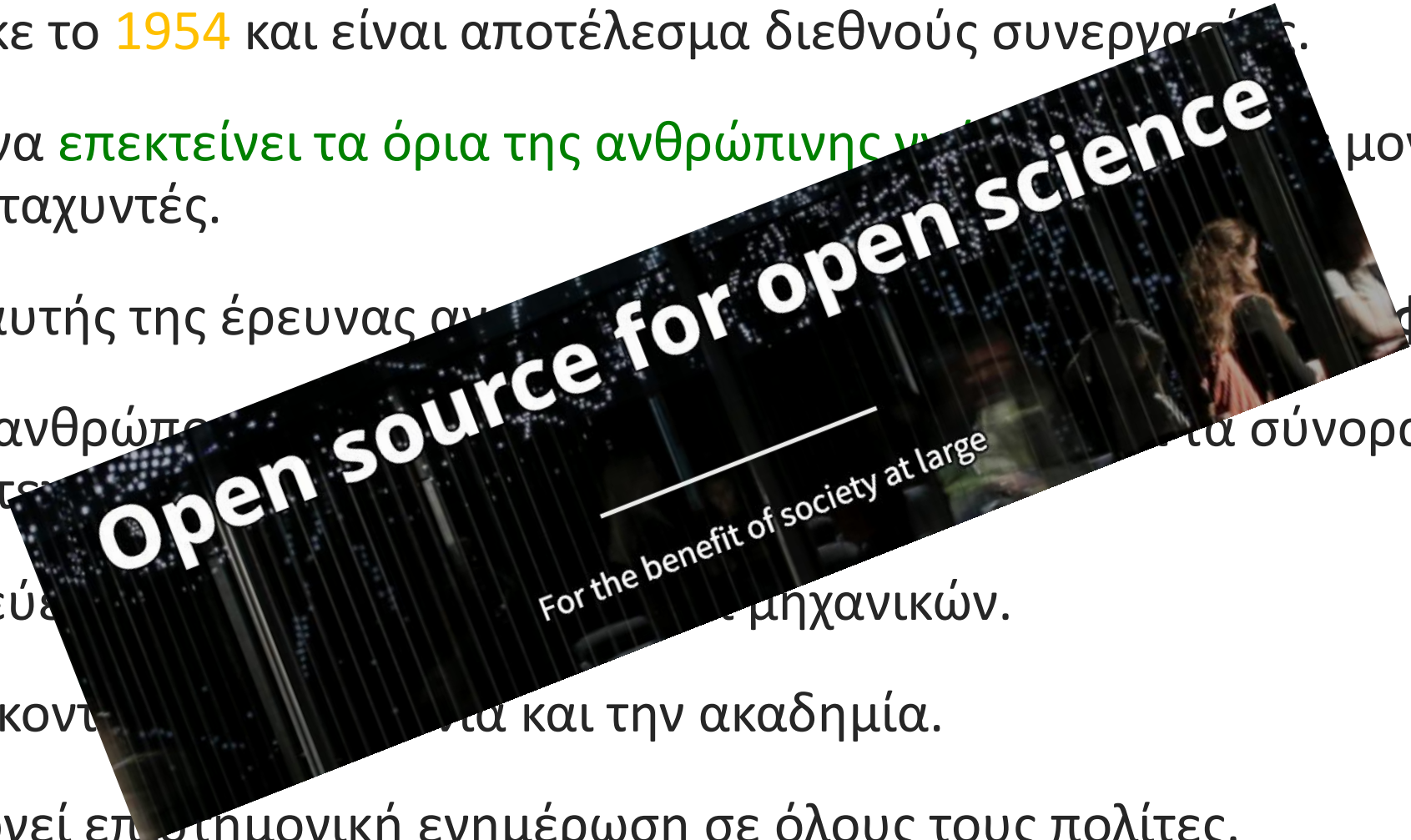


# Η αποστολή του CERN

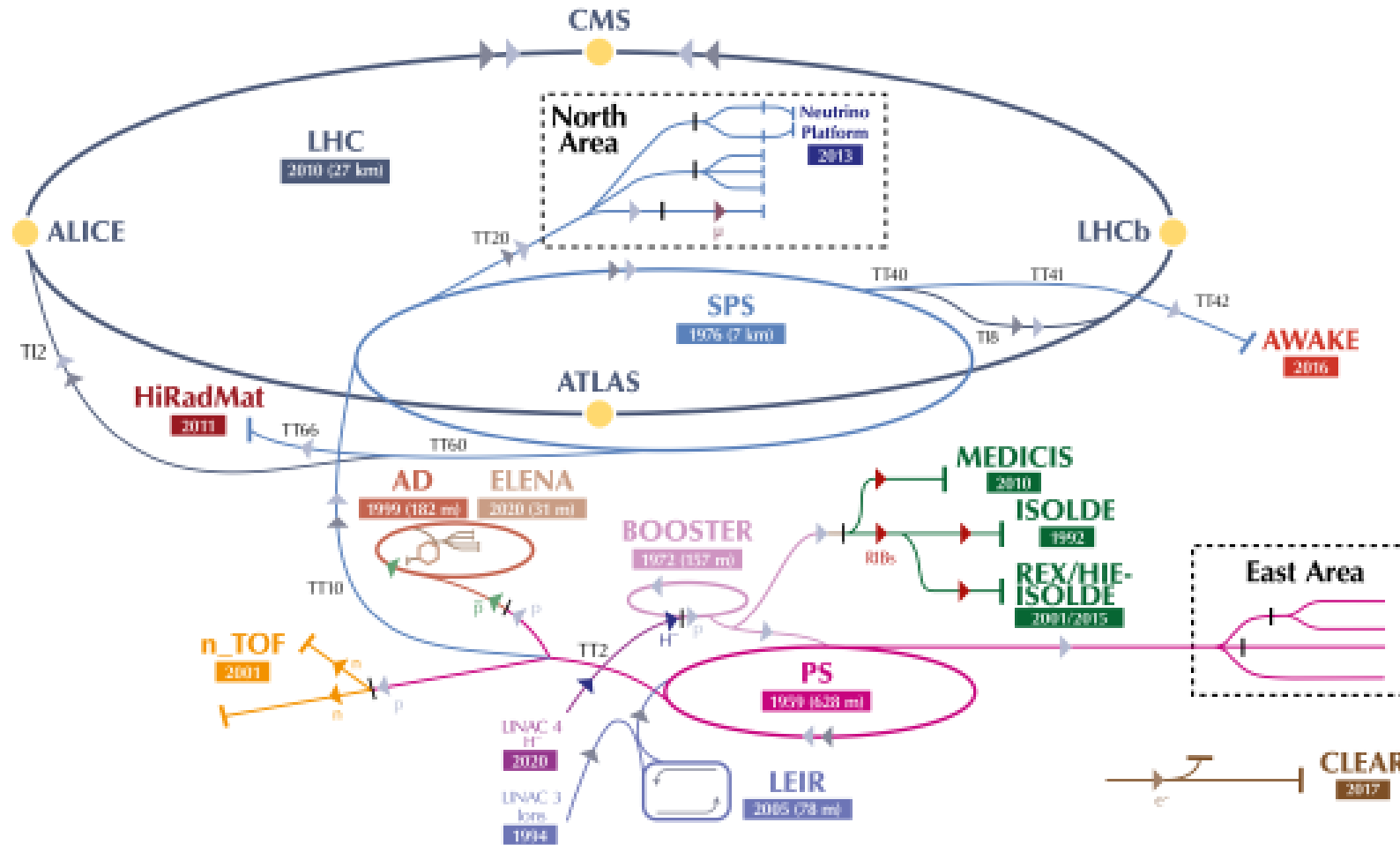
- Ιδρύθηκε το 1954 και είναι αποτέλεσμα διεθνούς συνεργασίας.
- Στόχος να επεκτείνει τα όρια της ανθρώπινης γνώσης μέσω μιας μοναδικής σειράς από επιταχυντές.
- Μέσω αυτής της έρευνας αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες προς όφελος όλων.
- Ενώνει ανθρώπους από όλο τον κόσμο για να προωθήσει τα σύνορα της επιστήμης και της τεχνολογίας.
- Εκπαιδεύει τις νέες γενιές φυσικών και μηχανικών.
- Φέρνει κοντά την βιομηχανία και την ακαδημία.
- Καλλιεργεί επιστημονική ενημέρωση σε όλους τους πολίτες.

# Η αποστολή του CERN

- Ιδρύθηκε το 1954 και είναι αποτέλεσμα διεθνούς συνεργασίας.
- Στόχος να επεκτείνει τα όρια της ανθρώπινης γνώσης με μοναδικής σειράς από επιταχυντές.
- Μέσω αυτής της έρευνας αναζητούμε τον κοινό φελος όλων.
- Ενώνει ανθρώπους από διαφορετικά κράτη και τα σύνορα της επιστήμης και της τεχνολογίας.
- Εκπαιδεύει νέους επιστήμονες και μηχανικών.
- Φέρνει κοντά τον κόσμο και την ακαδημία.
- Καλλιεργεί επιστημονική ενημέρωση σε όλους τους πολίτες.

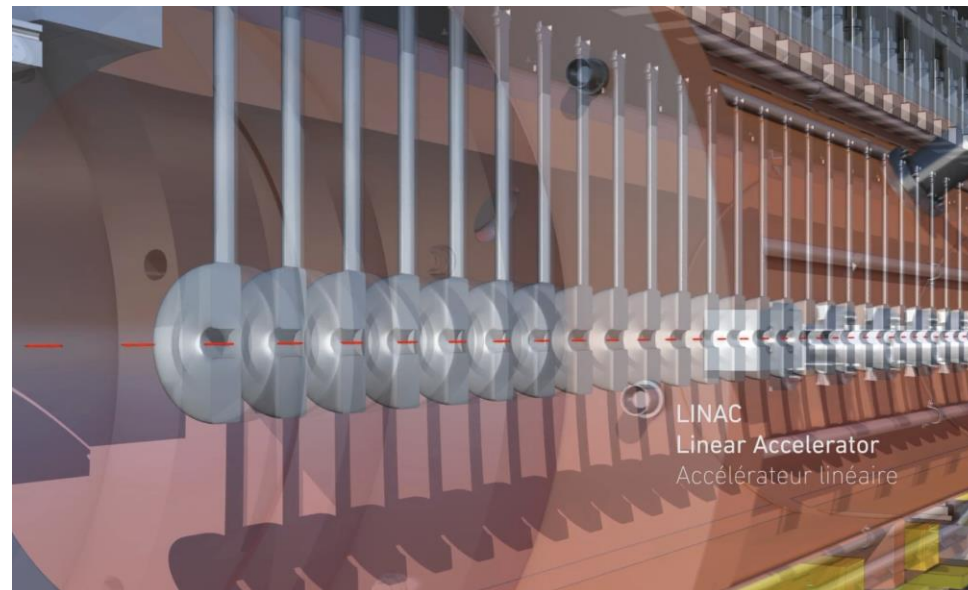


# Σύμπλεγμα επιταχυντών στο CERN



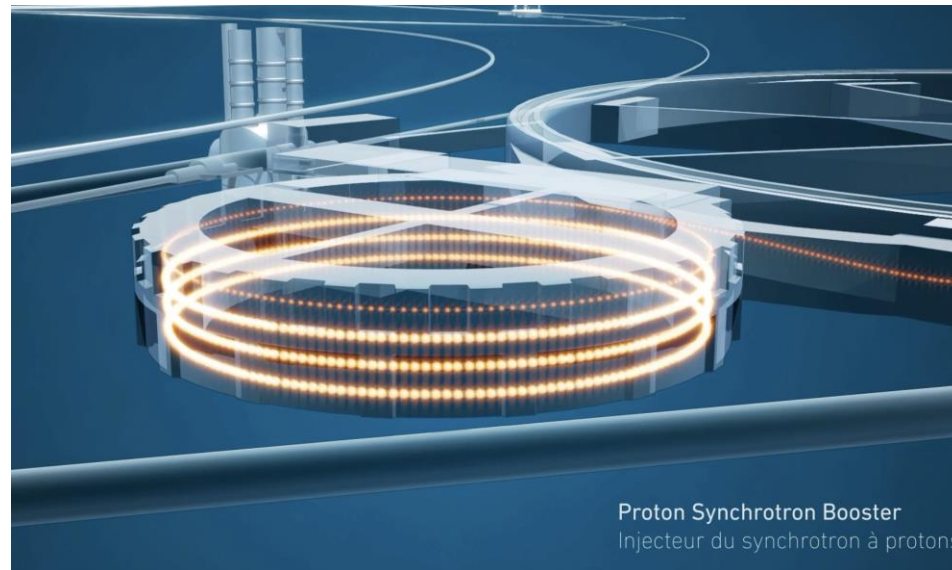
# Σύμπλεγμα επιταχυντών στο CERN

- Μια αλληλουχία επιταχυντών που επιταχύνουν τη δέσμη σταδιακά σε μεγαλύτερες ενέργειες.
- Injectors:
  - **LINAC 4:** γραμμικός επιταχυντής, πρώτο στάδιο επιτάχυνσης, η πηγή των πρωτονίων.



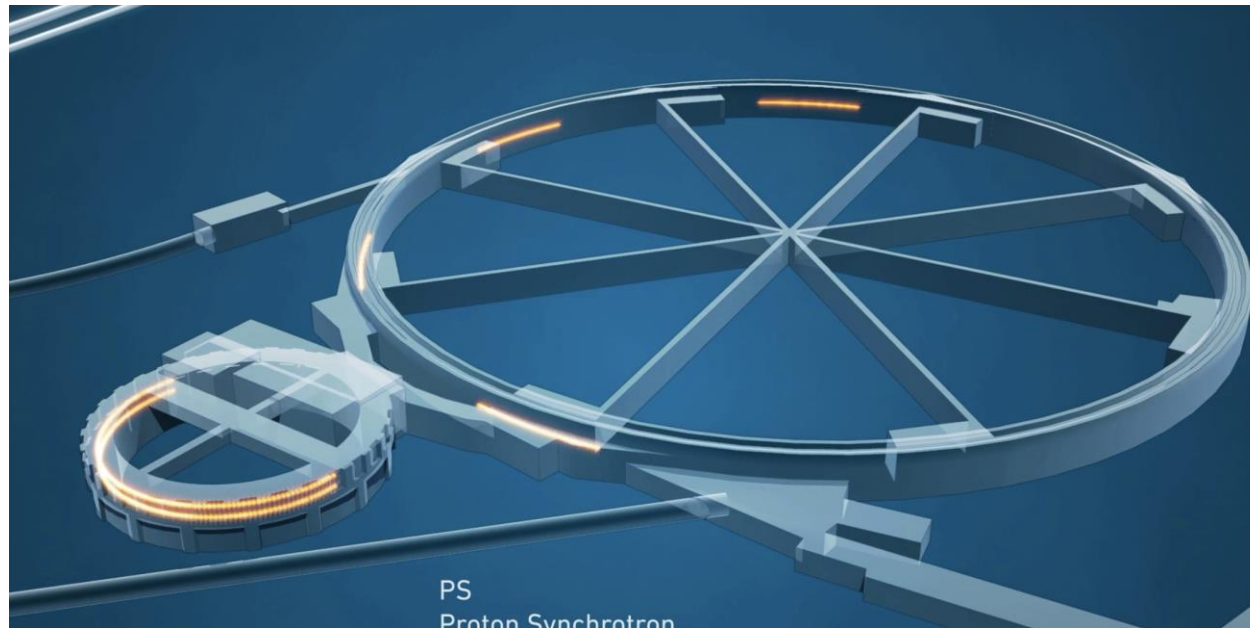
# Σύμπλεγμα επιταχυντών στο CERN

- Μια αλληλουχία επιταχυντών που επιταχύνουν τη δέσμη σταδιακά σε μεγαλύτερες ενέργειες.
- Injectors:
  - **Proton Synchrotron Booster (PSB)**: πρώτος κυκλικός επιταχυντής, 160 MeV → 2 GeV



# Σύμπλεγμα επιταχυντών στο CERN

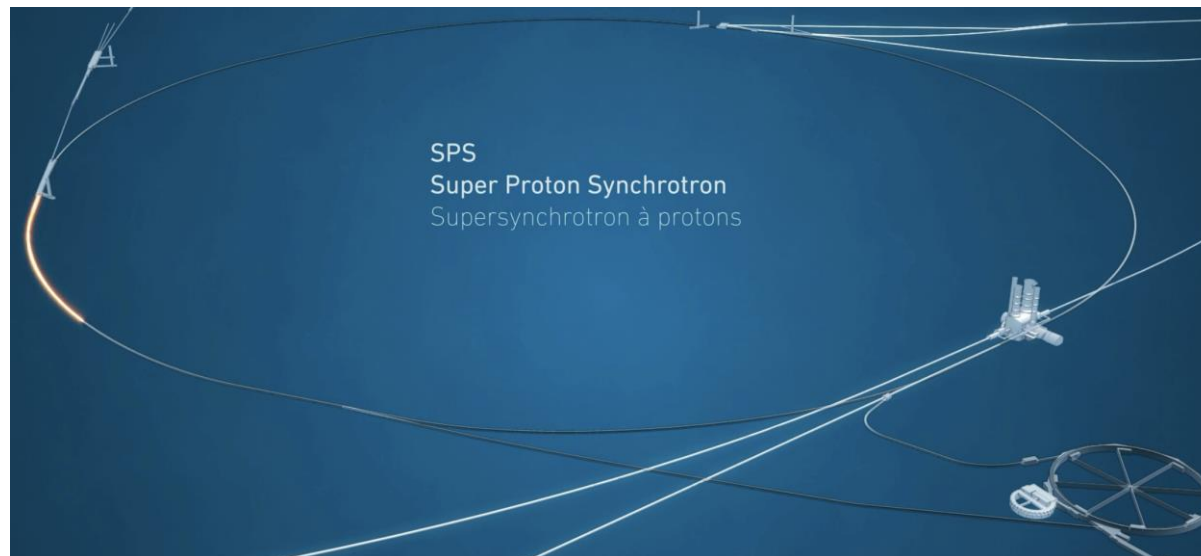
- Μια αλληλουχία επιταχυντών που επιταχύνουν τη δέσμη σταδιακά σε μεγαλύτερες ενέργειες.
- Injectors:
  - **Proton Synchrotron (PS)**: λειτουργεί από το 1959, 2 GeV → 26 GeV





# Σύμπλεγμα επιταχυντών στο CERN

- Μια αλληλουχία επιταχυντών που επιταχύνουν τη δέσμη σταδιακά σε μεγαλύτερες ενέργειες.
- Injectors:
  - **Super Proton Synchrotron (SPS):** 2<sup>ος</sup> μεγαλύτερος επιταχυντής με περίμετρο 7 km, 26 GeV → 450 GeV



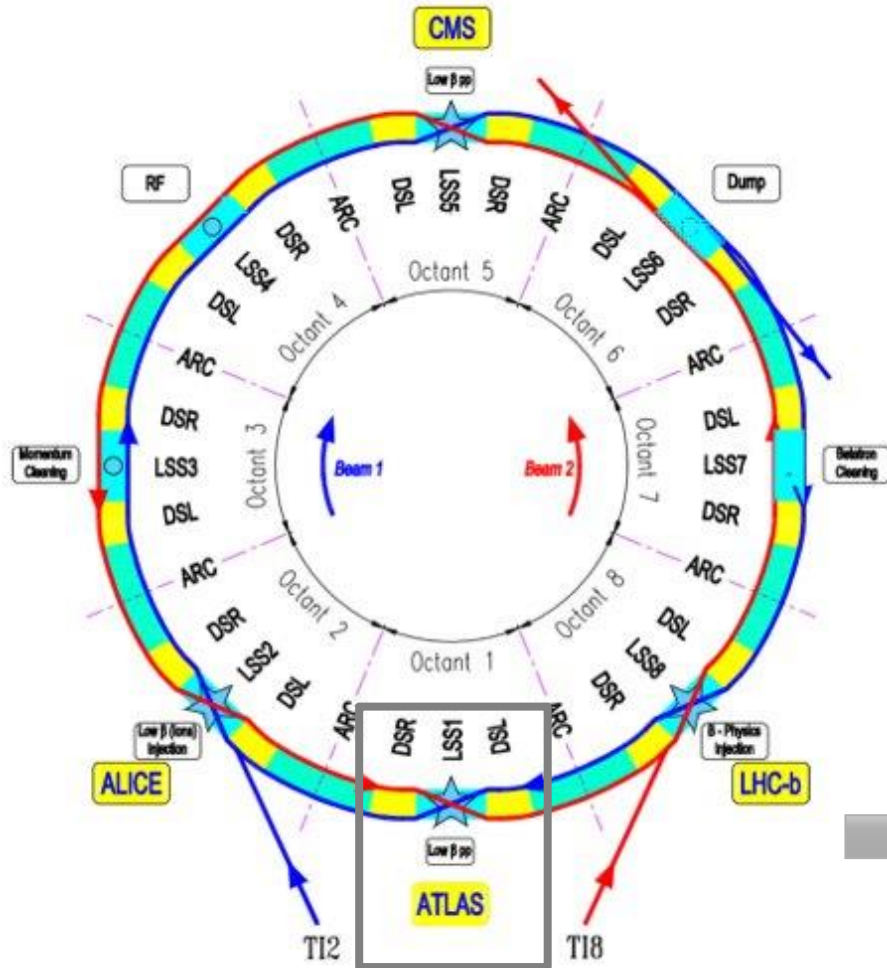
# Σύμπλεγμα επιταχυντών στο CERN

- Μια αλληλουχία επιταχυντών που επιταχύνουν τη δέσμη σταδιακά σε μεγαλύτερες ενέργειες.
- **Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (LHC): 450 GeV → 6.8 TeV**

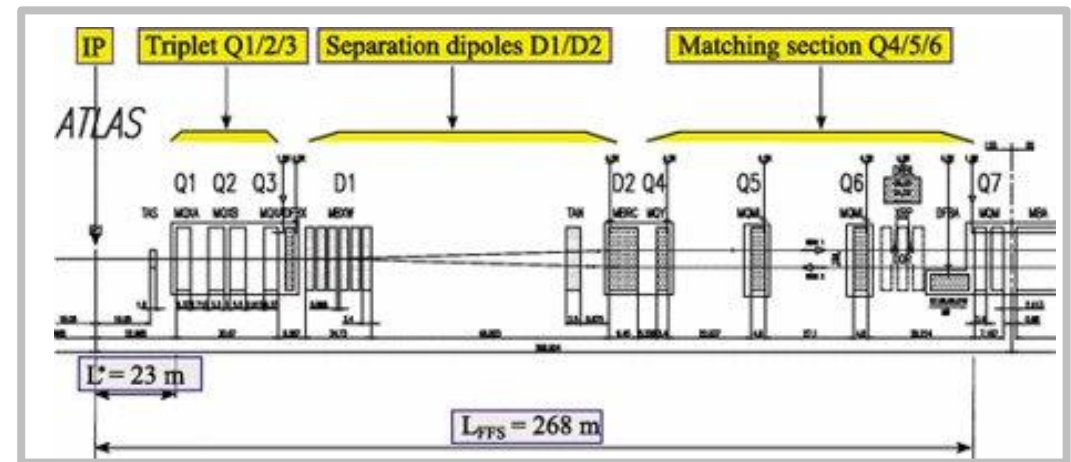


# Ο μεγάλος επιταχυντής αδρονίων

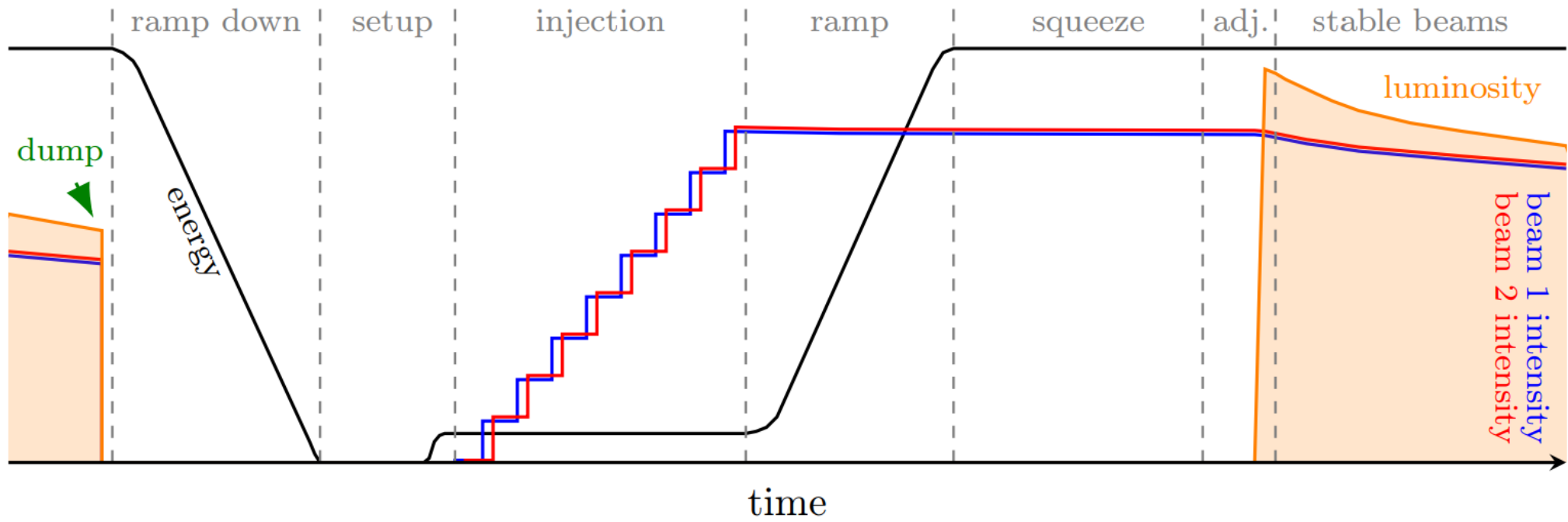
LHC layout



Experimental Interaction Regions (IRs)



# Ο κύκλος του LHC



# Ο LHC τώρα

LHC Page1      Fill: 9605      E: 6799 GeV      t(SB): 03:32:54      06-05-24 20:53:17

## PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS

Energy:	6799 GeV	I B1:	3.13e+14	I B2:	3.12e+14
Beta* IP1:	0.36 m	Beta* IP2:	10.00 m	Beta* IP5:	0.36 m
		Beta* IP8:	2.00 m		
Inst. Lumi [(ub.s) <sup>-1</sup> ]	IP1: 20172.20	IP2: 8.66	IP5: 20597.35	IP8: 1144.68	

**FBCT Intensity and Beam Energy**      Updated: 20:53:15

**Instantaneous Luminosity**      Updated: 20:53:14

**Comments (06-May-2024 17:23:46)**  
 STABLE BEAMS  
  
 IP1/5 B\* lev.  
 IP2/8 sep.lev.  
 XRP IN

BIS status and SMP flags	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	true	true
Stable Beams	true	true

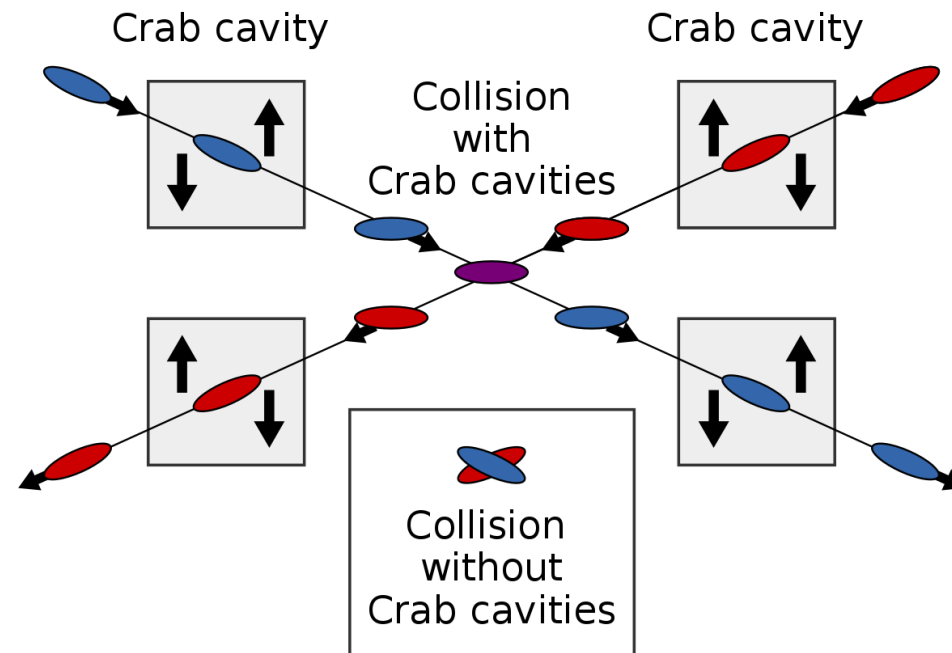
AFS: 25ns\_2352b\_2340\_2004\_2133\_108bpi\_24inj      PM Status B1 ENABLED      PM Status B2 ENABLED

LHC page 1



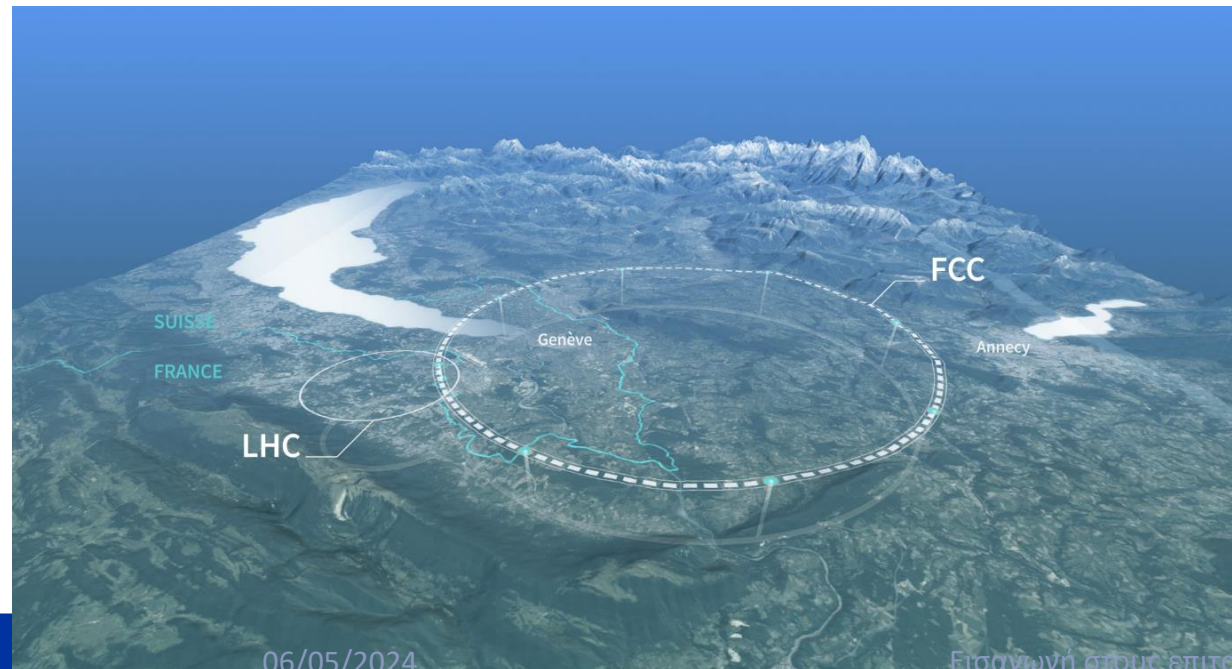
# Μελλοντικοί επιταχυντές

- **High-luminosity LHC:** αναβάθμιση του LHC από το ~2029.
  - Μικρότερο μέγεθος δέσμης στα σημεία των κρούσεων χάρη σε νέα τετράπολα.
  - Καινοτόμες τεχνολογίες όπως Crab Cavities.
  - Πολύ υψηλή φωτεινότητα.



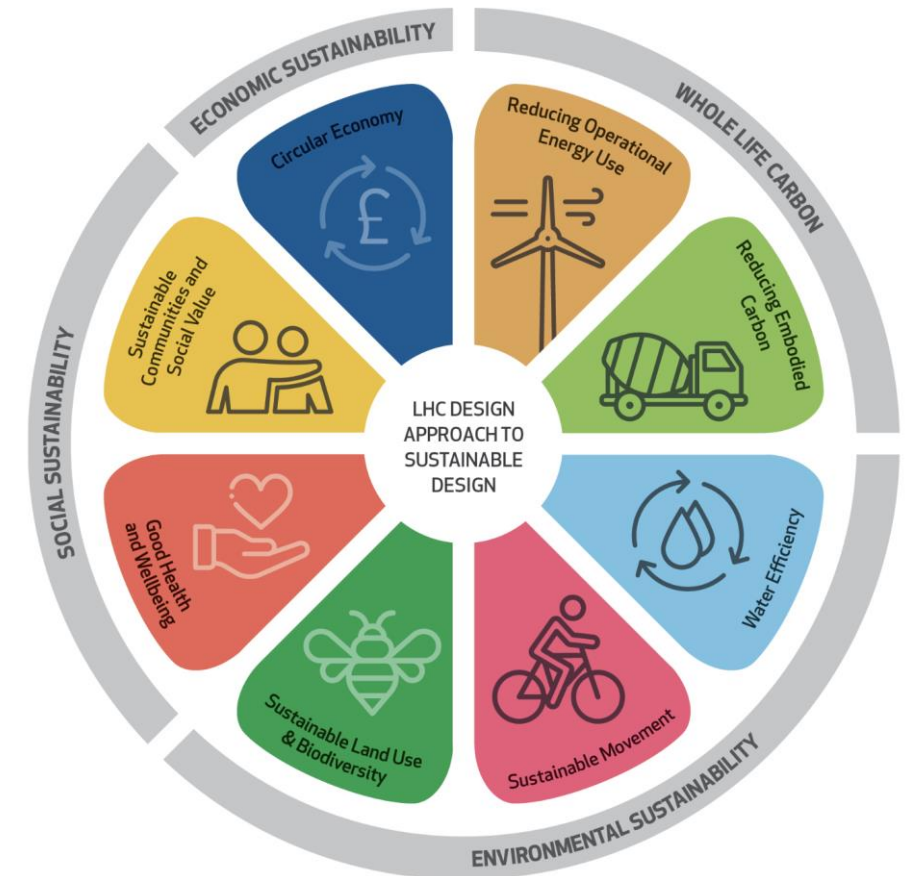
# Μελλοντικοί Επιταχυντές

- **Future Circular Collider (FCC):**
  - Περίμετρος 90.7 km!
  - Συγκρουστήρας λεπτονίων (**FCC-ee**): ενδιάμεσο στάδιο, ~2040 και για ~15 χρόνια
  - Συγκρουστήρας αδρονίων (**FCC-hh**): δεύτερο στάδιο, 100 TeV, ~2070 για ~25 χρόνια.



# Μελλοντικές προκλήσεις: Βιωσιμότητα

- Το CERN επικεντρώνεται στο **πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής**.
- Στόχοι για την **μείωση του αντίκτυπου στο περιβάλλον**, μείωση της δαπανώμενης ενέργειας, αύξηση της επαναχρησιμοποιούμενης ενέργειας και ανάπτυξη τεχνολογιών για την προστασία του πλανήτη.
- ISO 50001 πιστοποίηση από το 2023.
- Υποστηρίζει **net-zero CO<sub>2</sub> by 2050**.





Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας  
sofia.kostoglou@cern.ch