

Ο μεγάλος Αδρονικός Επιταχυντής LHC

Μιχάλης Κορατζίνος

Greek NTP programme,
Απρίλιος 2016



Πρόλογος

- Το LHC (μαζί με τους ανιχνευτές του) είναι η μεγαλύτερη και πολυπλοκότερη μηχανή που έχει κατασκευάσει ποτέ ο άνθρωπος
 - 10000 μαγνήτες
 - 1700 ηλεκτρικά κυκλώματα
 - 27 χιλιόμετρα
 - Λειτουργία σε -271°C
- Θα ρίξουμε μια πολύ γρήγορη ματιά στη λειτουργία του και στα γεγονότα της τελευταίας διετίας

Επιταχυντές

- Η μελέτη της φύσης σήμερα είναι βασικά η μελέτη σπάνιων φυσικών διαδικασιών – οι λιγότερο σπάνιες έχουν ήδη ερευνηθεί.
- Επιταχυντές σαν τον LHC χρησιμοποιούνται ως **εργοστάσια παραγωγής σπανίων διαδικασιών** της φύσης
- Αυτές οι διαδικασίες γίνονται λιγότερο σπάνιες όσο υψηλότερη **ενέργεια** έχουμε στη διάθεσή μας
- Όσο πιο πολλές συγκρούσεις έχουμε, τόσο πιο πολλά ενδιαφέροντα γεγονότα μπορούμε να παράγουμε → **φωτεινότητα**

Μέγεθος και περιπλοκότητα

- Υψηλές ενέργειες → μεγάλο μέγεθος επιταχυντών και ανιχνευτών
- Σπάνιες διεργασίες → πολυπλοκότητα
- Πολυπλοκότητα και μέγεθος → χρόνος και κόστος
- Από τις πρώτες συζητήσεις μέχρι την τελευταία φυσική: 50 χρόνια!

Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN

Lake Geneva

Geneva
Airport

CERN LAB 2 (France)

CERN LAB 1 (Switzerland)



Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN

Large Hadron Collider
(LHC, 2008)

27km long
150m underground

Lake Geneva

Geneva
Airport

CERN LAB 2 (France)

Super Proton Synchrotron
(SPS, 1976)

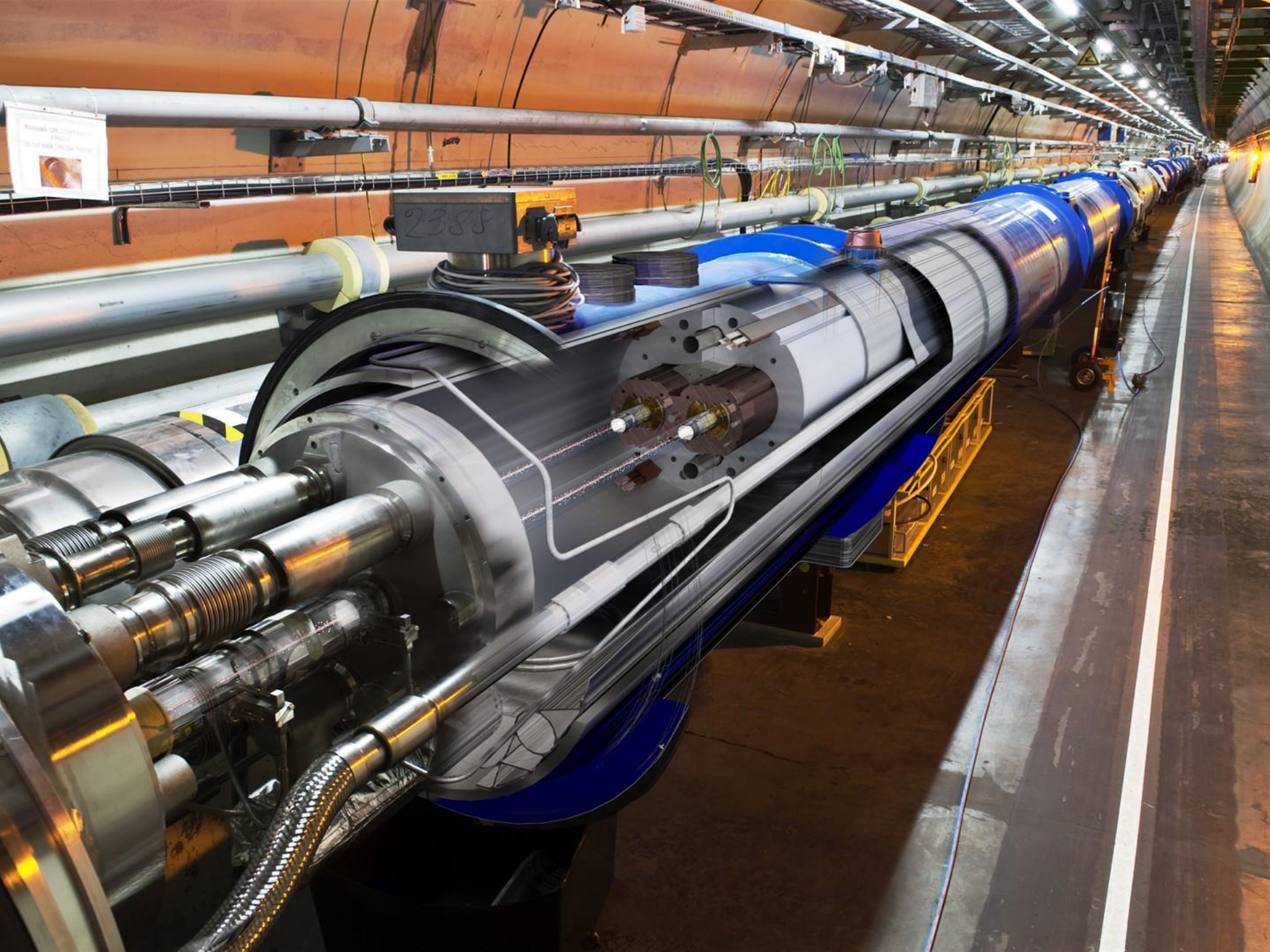
Proton Synchrotron
(PS, 1959)

CERN LAB 1 (Switzerland)



Σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN





Φωτεινότητα

- Ο αριθμός γεγονότων δίνεται από την εξίσωση

$$\frac{N}{\Delta t} = L[cm^{-2} \cdot s^{-1}] \cdot \sigma[cm^2]$$

Όπου:

L = φωτεινότητα

σ = ενεργός διατομή

Και η φωτεινότητα

$$L = \frac{N^2 \cdot f \cdot n_b}{4\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Όπου:

N = αριθμός σωματιδίων ανά πακέτο

f = συχνότητα περιστροφής

n_b = αριθμός πακέτων ανά δέσμη

σ_x, σ_y = μέγεθος δέσμης στο σημείο σύγκρουσης

Ένας επιταχυντής πάντα
προσπαθεί να
μεγιστοποιήσει την
φωτεινότητα

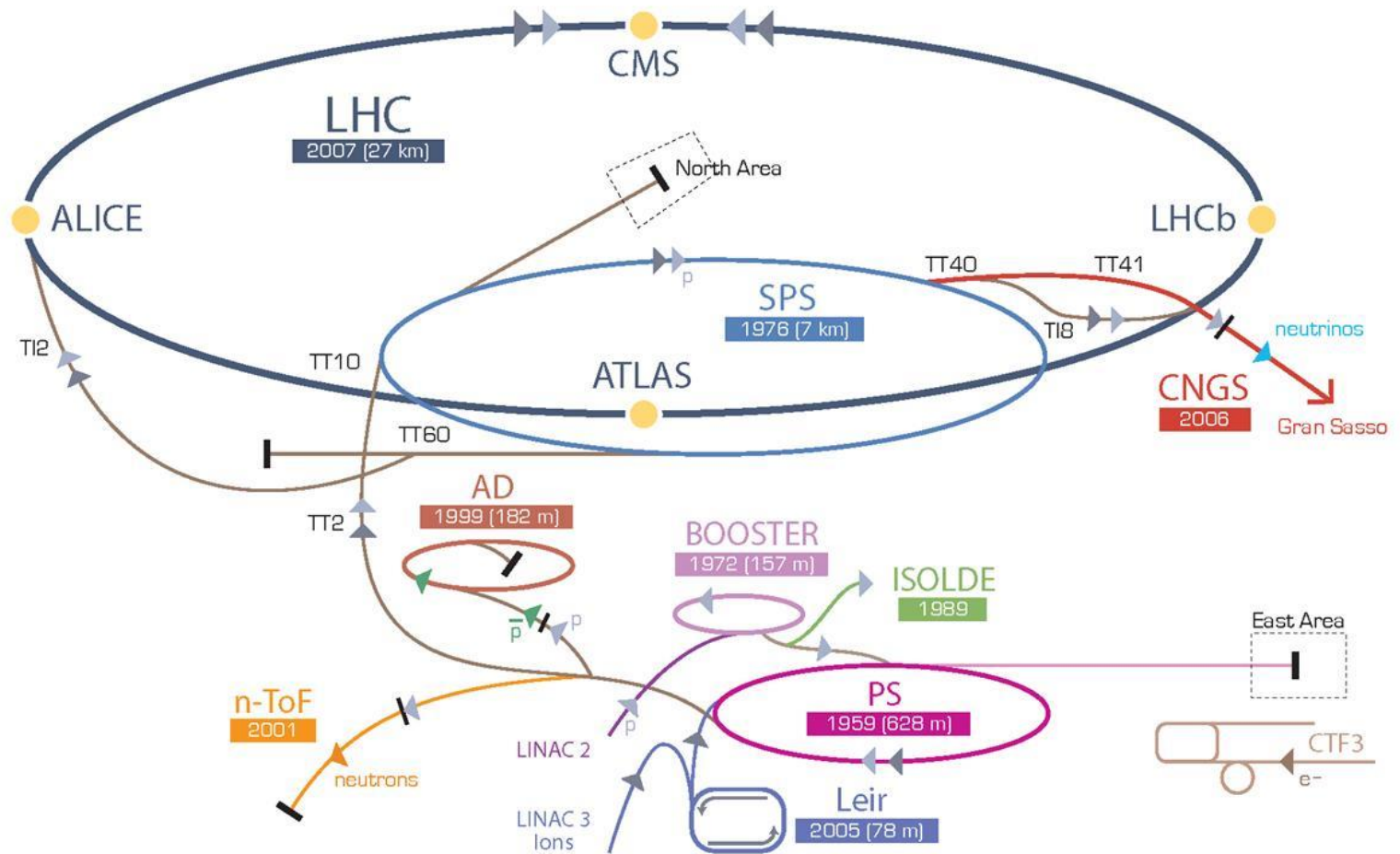
Το LHC στην ιστορία του CERN

- 1982 : Πρώτες σπουδές για το LHC
- 1983 : Ανακάλυψη του σωματιδίου Z στο SPS
- 1985 : Βραβείο Νόμπελ για τους C. Rubbia και S. van der Meer
- 1989 : Αρχή λειτουργίας του LEP (εργοστάσιο παραγωγής σωματιδίων Z)
- 1994 : Έγκριση του LHC από το συμβούλιο του CERN
- 1996 : Τελική απόφαση για έναρξη κατασκευής του LHC
- 1996 : Λειτουργία LEP στα 100 GeV (εργοστάσιο παραγωγής σωματιδίων W)
- 2000 : Τέλος λειτουργίας του επιταχυντή LEP
- 2002 : Απομάκρυνση υλικού LEP από το τούνελ
- 2003 : Αρχή εγκατάστασης του LHC
- 2005 : Αρχή πιστοποίησης υλικού (hardware commissioning)
- 2008 : Πρώτη δέσμη, ατύχημα
- 2009: Πρώτες συγκρούσεις
- 2012: Ανακάλυψη σωματιδίου Higgs. Βραβείο Νόμπελ για τους F. Englert και P. Higgs (2013)

Το σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN

- Ένας επιταχυντής είναι εξειδικευμένη μηχανή
- Συνήθως ο παλιότερος χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τον πιο καινούριο
 - PS: 1 με 20 GeV
 - SPS: 20 με 450 GeV
 - LHC: 450 GeV με 7 TeV

CERN Accelerator Complex



▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} [antiproton] ↔ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

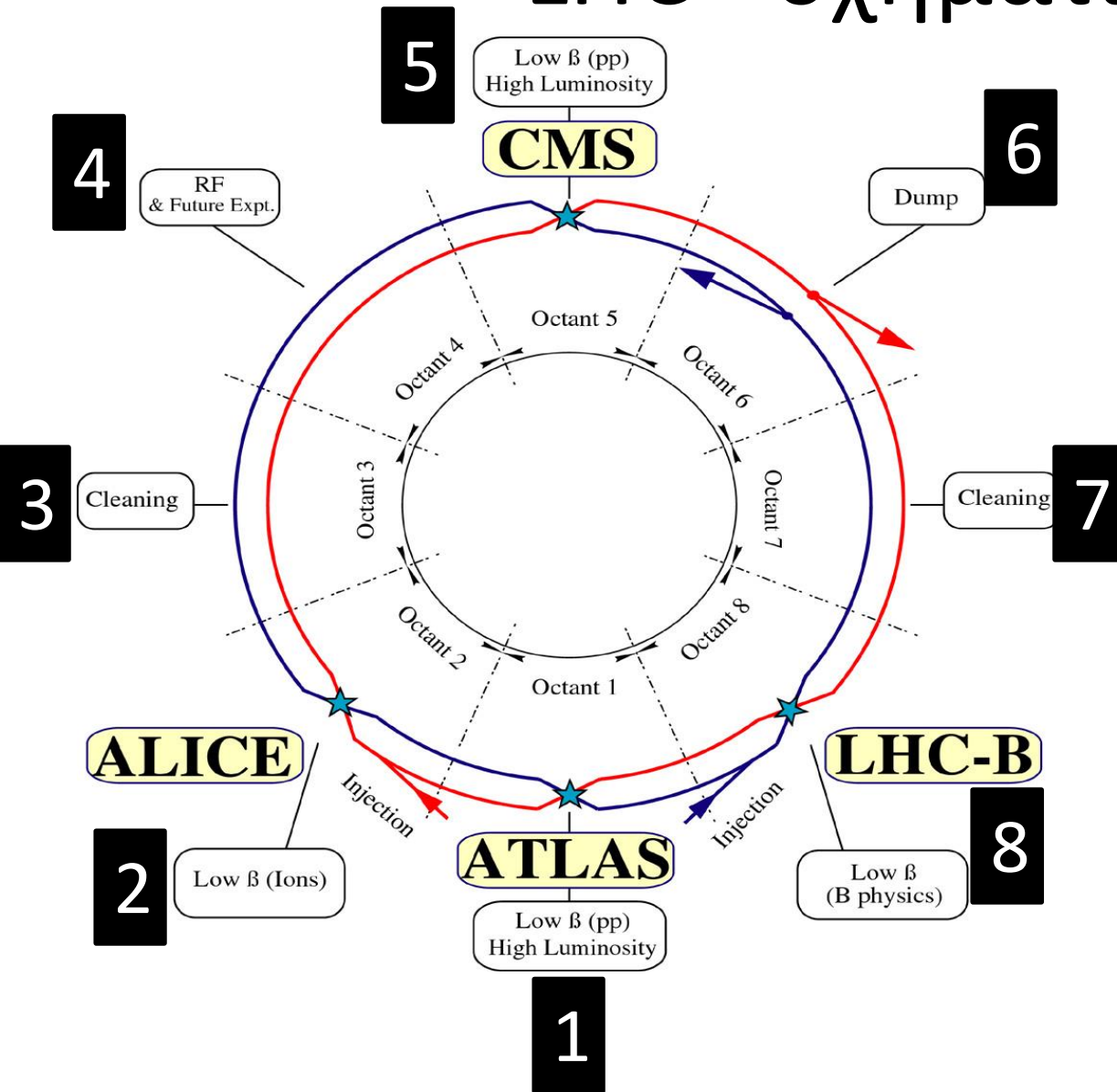
Τα βασικά συστατικά ενός επιταχυντή

- Η δέσμη – ένα ή περισσότερα πακέτα
- Ο σωλήνας της δέσμης (κενό)
- Διπολικοί μαγνήτες (κυκλική τροχιά)
- Τετραπολικοί μαγνήτες (εστίαση)
- Επιταχυντικές κοιλότητες

Παράμετροι του LHC

| | |
|----------------------------|-----------------------|
| • Σωματίδια επιτάχυνσης | Πρωτόνια, βαρέα ιόντα |
| • Τελική ενέργεια | 7 TeV / c |
| • Ενέργεια έκχυσης | 450 GeV / c |
| • Περιφέρεια | 26658.883 m |
| • Συχνότητα περιστροφής | 11.245 kHz |
| • Αριθμός πακέτων | 2808 |
| • Σωματίδια ανά πακέτο | 1.15×10^{11} |
| • Αριθμός διπόλων | 1232 |
| • Διπολικό πεδίο στα 7 TeV | 8.33 T |
| • Αριθμός μαγνητών | 9600 |
| • Αριθμός κυκλωμάτων | 1766 |

LHC - σχηματικό



Οκτώ στροφές (arcs) και οκτώ ευθείες (LSS long straight sections):

Point 1: **Atlas**

Point 2: **Alice**, injection

Point 3: Καθάρισμα ορμής

Point 4: Επιτάχυνση

Point 5: **CMS**

Point 6: Απόρριψη δέσμης

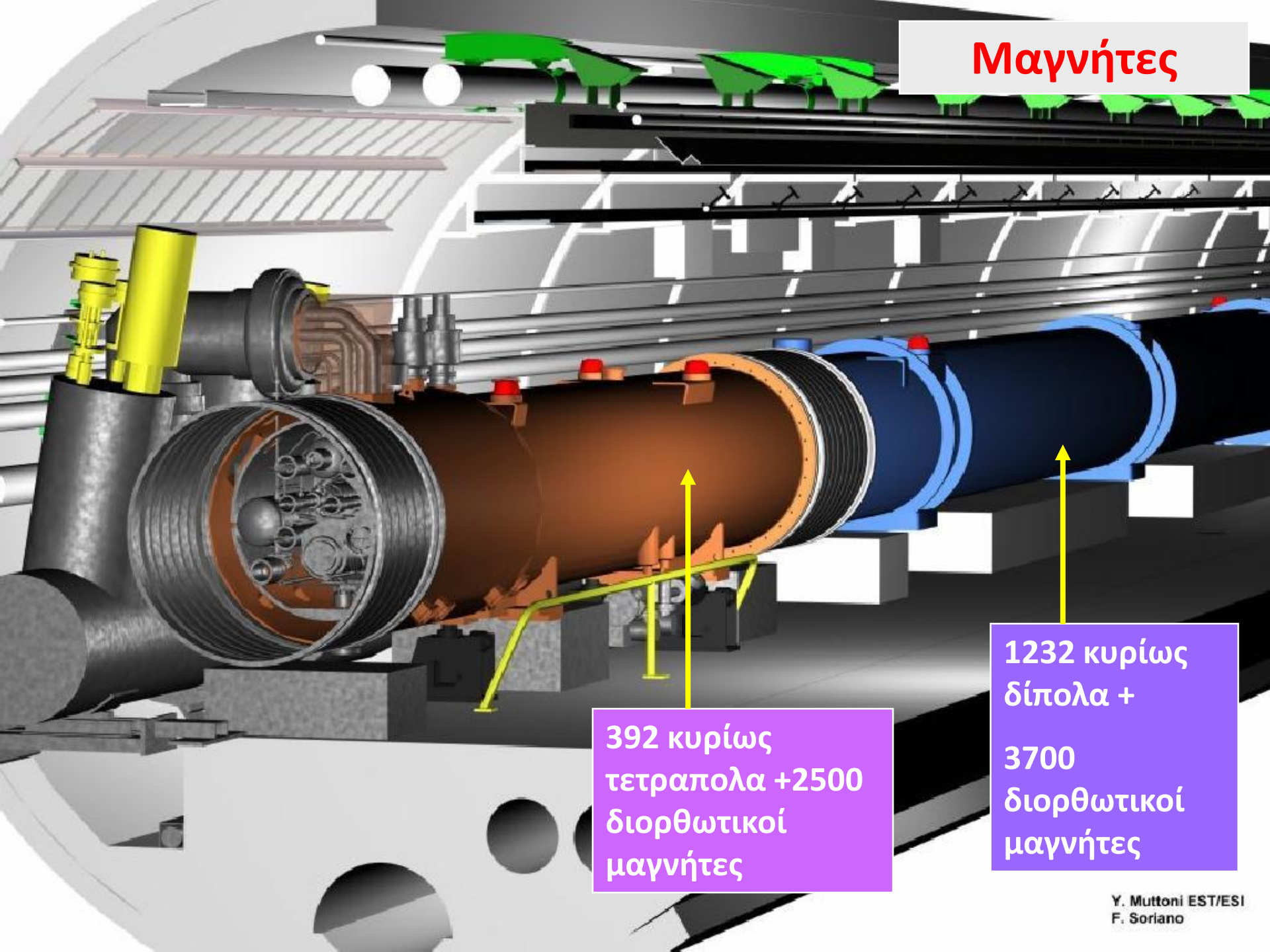
Point 7: Καθάρισμα θέσης

Point 8: **LHCb**, injection

LHC: Άποψη του τούνελ



Μαγνήτες



392 κυρίως
τετραπολα +2500
διορθωτικοί
μαγνήτες

1232 κυρίως
δίπολα +
3700
διορθωτικοί
μαγνήτες

Κρυογενικό σύστημα

Σύνδεση με την κύρια γραμμή

26 km κρυογενική γραμμή διαμοίρασης

Υπέρ-υγρό ήλιο στους 1.9 K, εναλλακτης θερμότητας για 110m

Κενό

Κενό δέσμης για δεσμη 1 +
δεσμη 2

Κενο μόνωσης για τους
μαγνητες

Κενο μόνωσης για τη
κρυογενική γραμμή

Ηλεκτρονικά

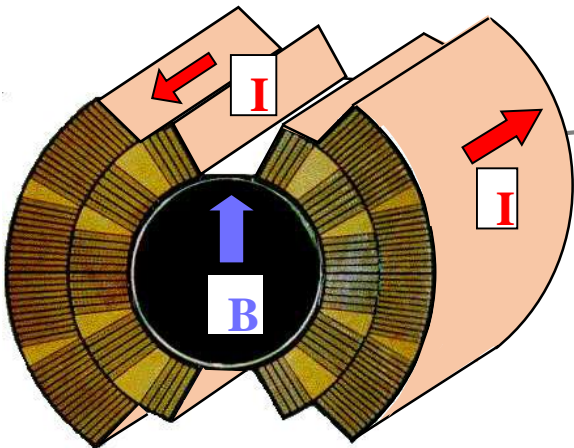
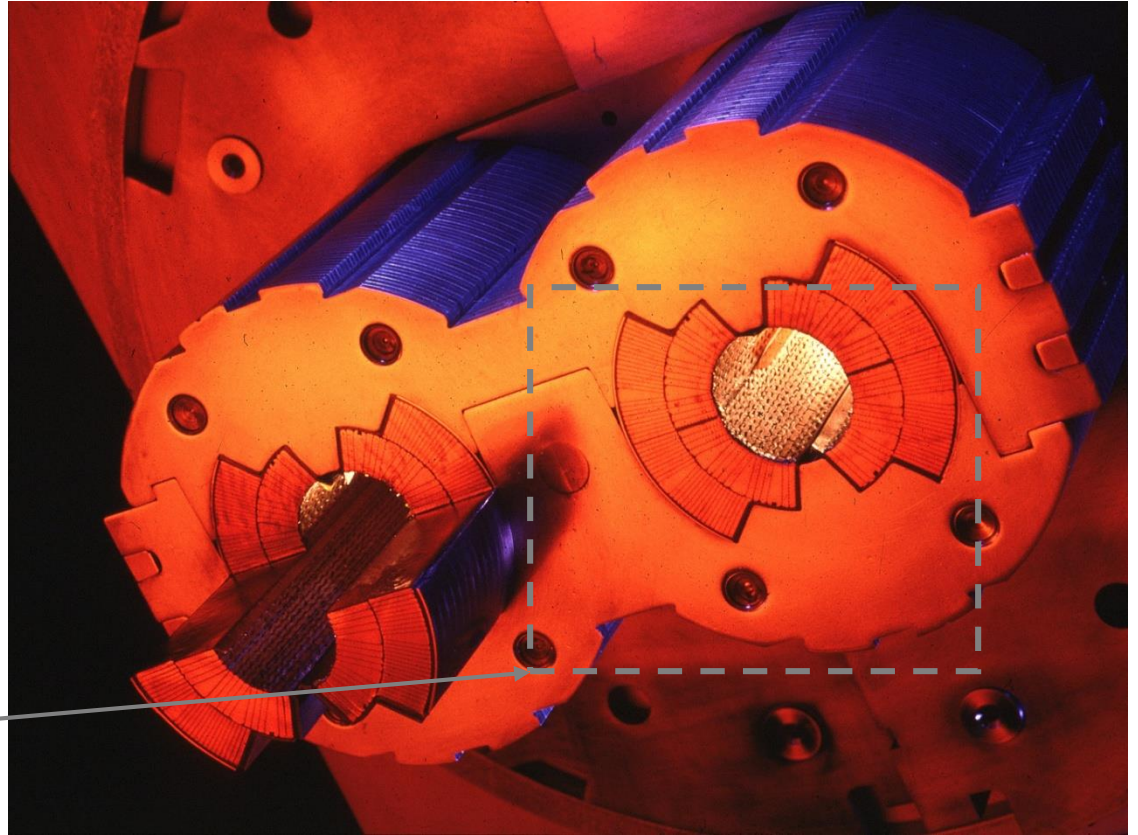


Αρκετές χιλιάδες ηλεκτρονικών συσκευών
(με αντοχή στη ραδιενέργεια) για:

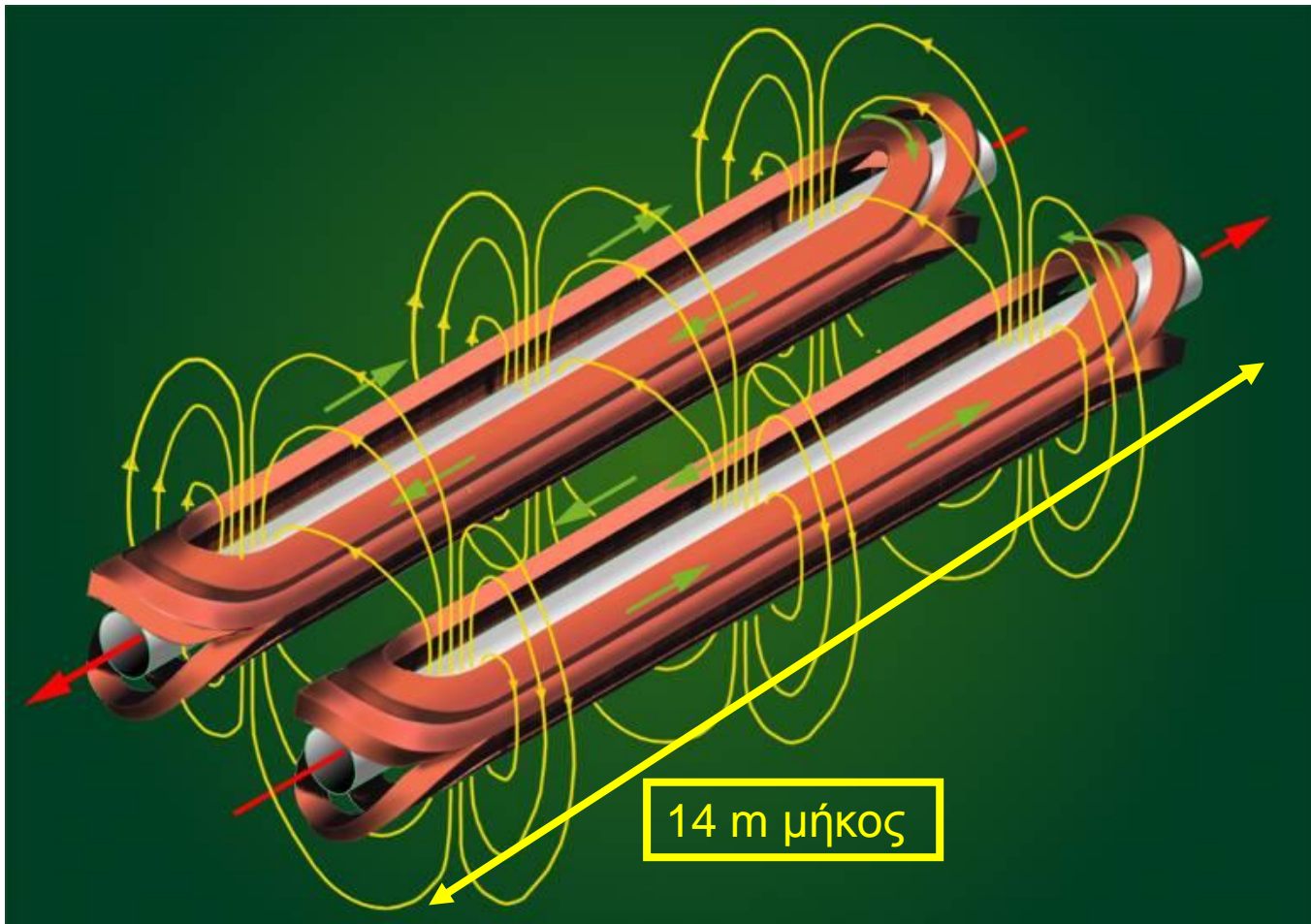
**Ασφάλεια μαγνητών, εναλλακτες ισχύος
(τροφοδοτικά) για διορθωτικούς μαγνήτες
και λοιπά όργανα (για δέσμη, κενό,
κρυογενική)**

Τα δίπολα του LHC

- Το πιο δύσκολο (και ακριβό) κομμάτι της μηχανής
- Σχεδιασμός 'δυο σε ένα'
- Πολύ υψηλά μαγνητικά πεδία (8T)
- Πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (1.9K)



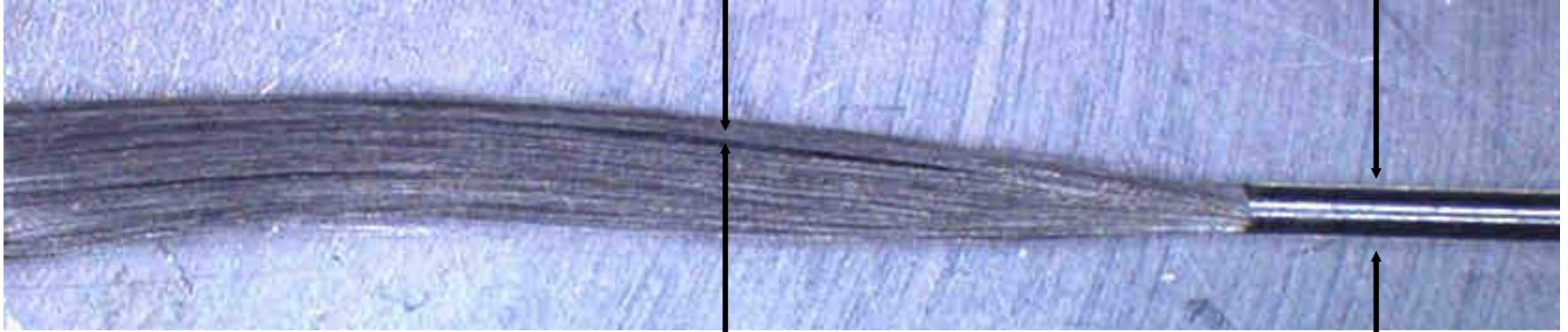
Τα δίπολα του LHC



Υπεραγωγίμο καλώδιο

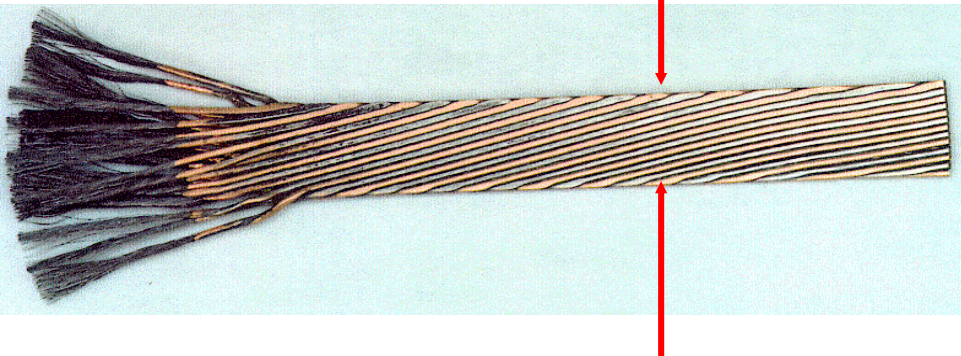
Διάμετρος νήματος $\varnothing 6 \mu\text{m}$

Διάμετρος καλωδίου $\varnothing 1 \text{ mm}$

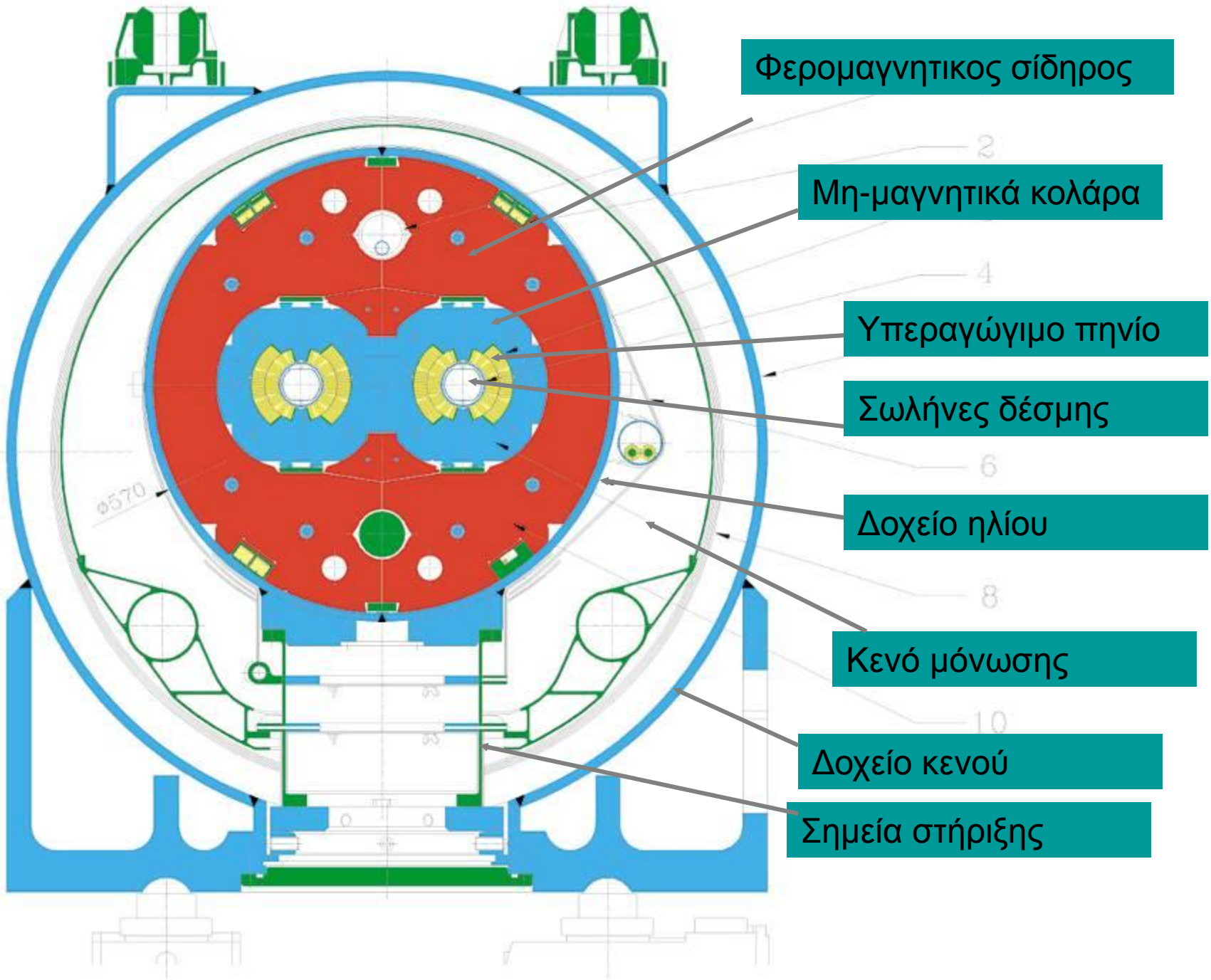


Τυπική τιμή ρεύματος για λειτουργία σε 8 T και 1.9 K: 800 A

πάχος 15 mm



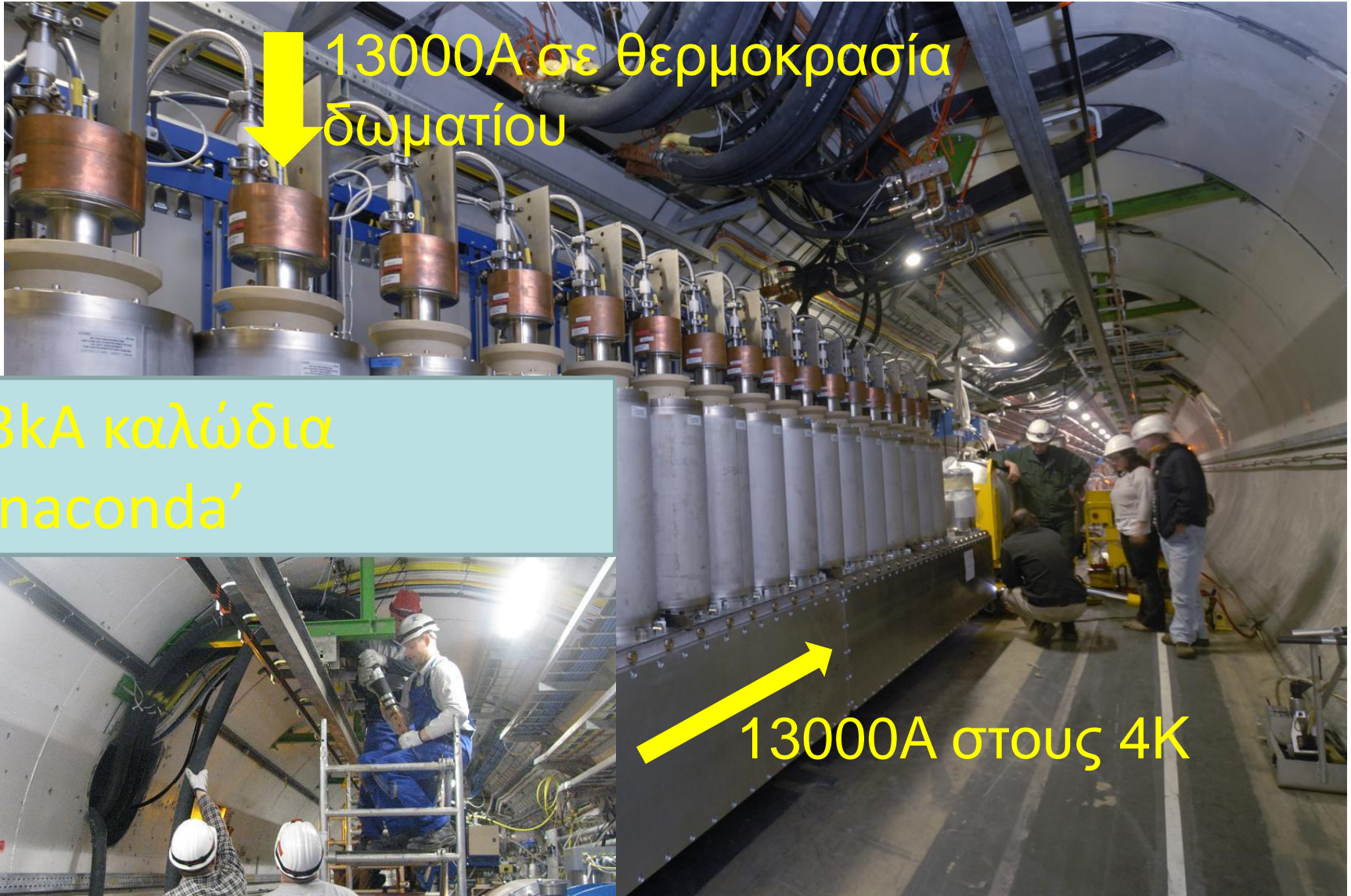
Rutherford cable



Κύρια χαρακτηριστικά διπόλων

- Μήκος 14.3 m
- Αριθμός διπόλων 1232
- Πεδίο στα 450 GeV 0.535 T
- Πεδίο στα 7 TeV 8.33 T
- Ακτίνα απόκλισης 2803.95 m
- Ρεύμα στα 7 TeV 11800 A
- Καλώδιο Nb-Ti
- Βάρος 35T
- Θερμοκρασία λειτουργίας 1.9K

Τροφοδοσία



Μεταφορά



...με την ιλιγγιώδη
ταχύτητα των 3km/h...

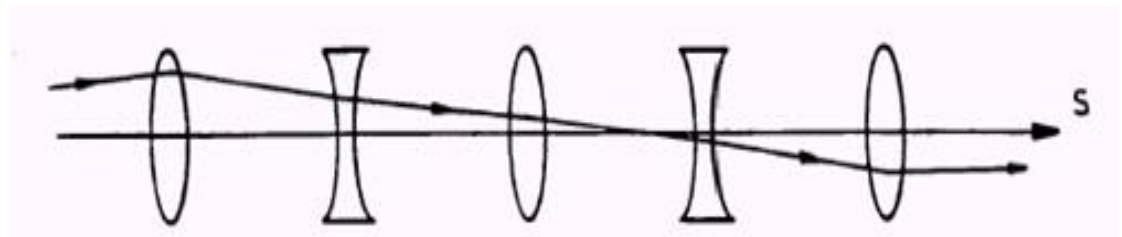
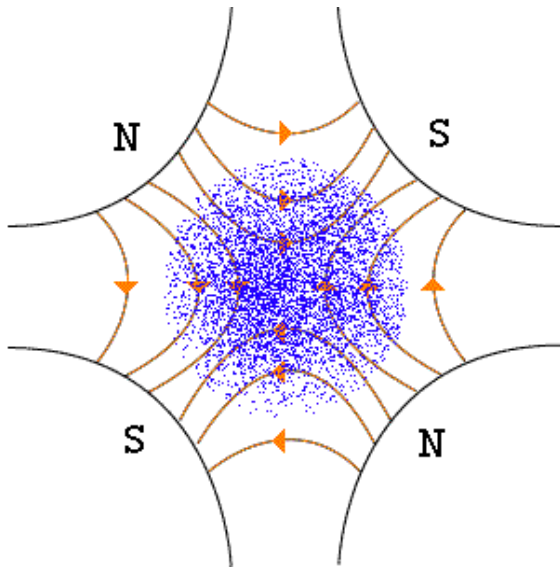
**SPEED
LIMIT
3**

Μεταφορά ενός διπόλου στο



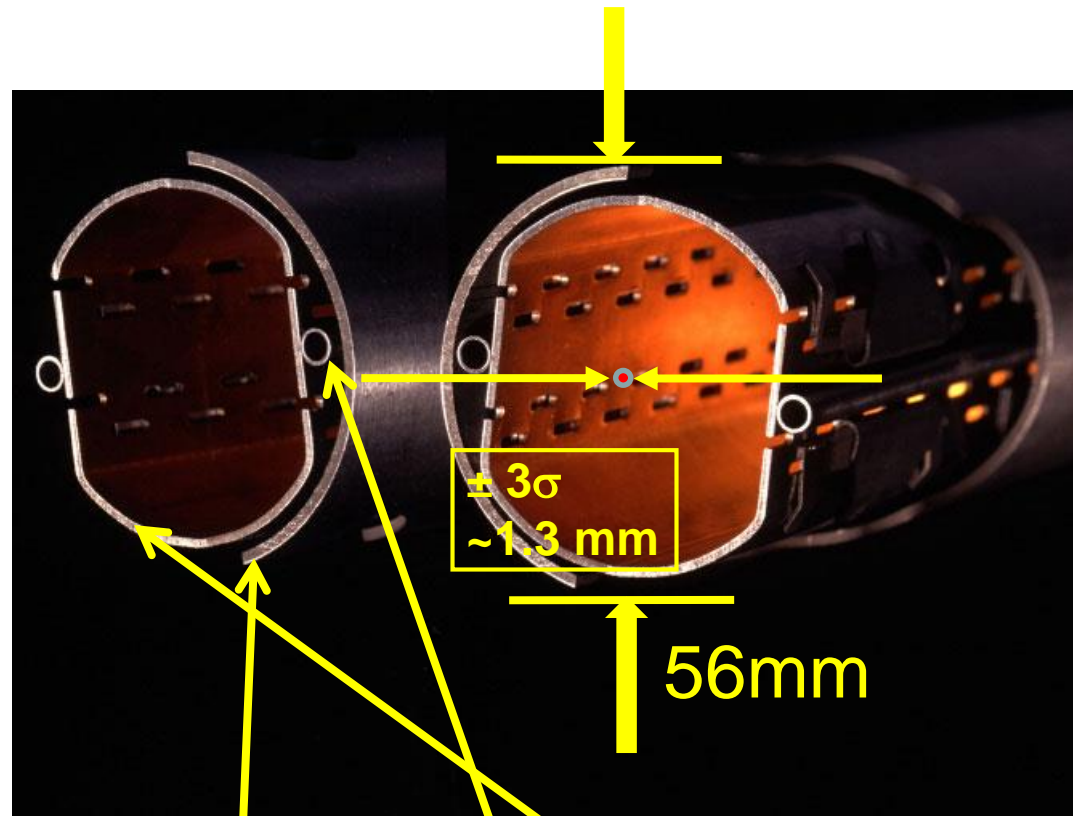
Τετραπολικοί μαγνήτες

- Απαραίτητοι για την εστίαση της δέσμης – «ισχυρή εστίαση»
- Ένας τετραπολικός μαγνήτης δρα σαν συγκεντρωτικός φακός σε ένα επίπεδο και αποκεντρωτικός στο άλλο
- Η ιδέα της ‘ισχυρής εστίασης’ εφευρέθηκε από τον Ν. Χριστόφιλο το 1950 (ΗΠΑ)



Το κενό

- Ιδιαίτερα χαμηλό κενό για να αποφεύγουμε παρασιτικές συγκρούσεις
- Πίεση = 10^{-10} Torr
- Καλύτερο κενό από τη Σελήνη



Σωλήνας κενού

Παραπέτασμα δέσμης

Σωλήνας ψύξης

Ασφάλεια μηχανής

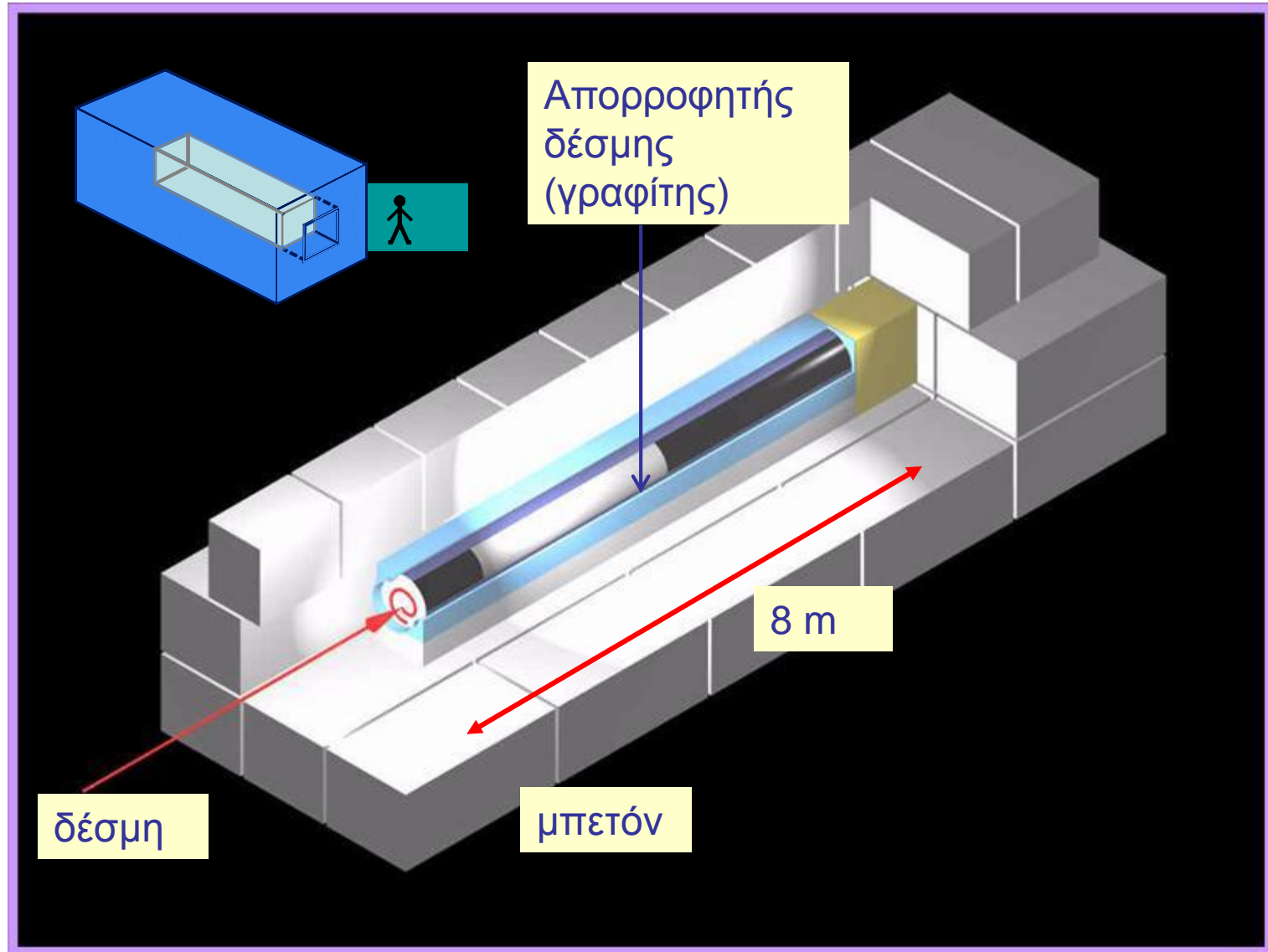
- Το LHC είναι μια μηχανή που η αποθηκευμένη ενέργεια είναι χωρίς προηγούμενο

Η αποθηκευμένη ενέργεια στους μαγνήτες στα 7TeV είναι **9.4GJ** - ίση με την κινητική ενέργεια ενός αεροπλανοφόρου τύπου Νιμιτς σε ταχύτητα μάχης (35 κόμβοι)

Ακόμα και η ενέργεια της δέσμης είναι τεράστια: **360MJ** - ίση με την κινητική ενέργεια του θωρηκτού Αβερωφ σε ταχύτητα μάχης (16 κομβοι)



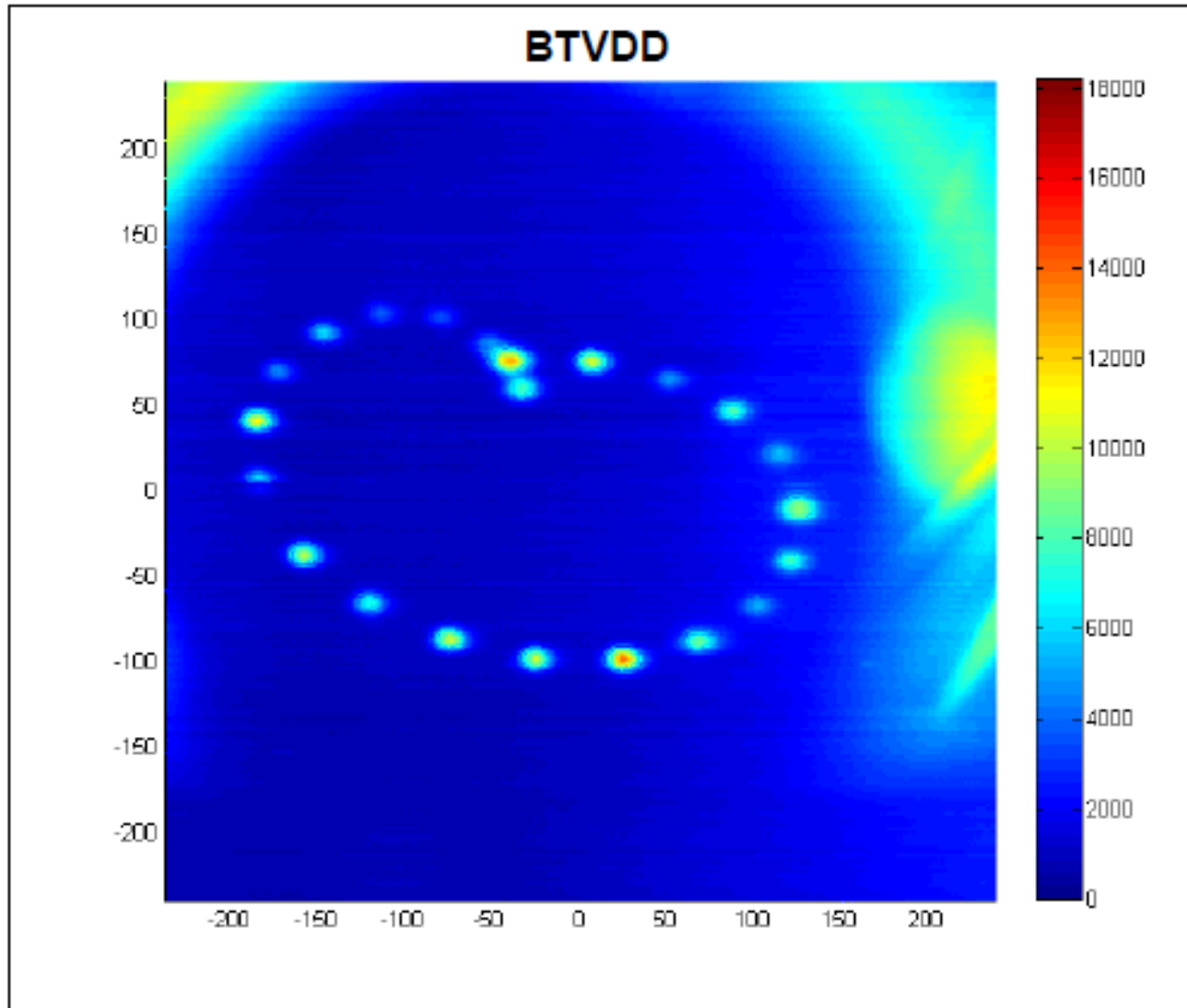
Περιοχή απόρριψης δέσμης



Σύστημα απόρριψης δέσμης

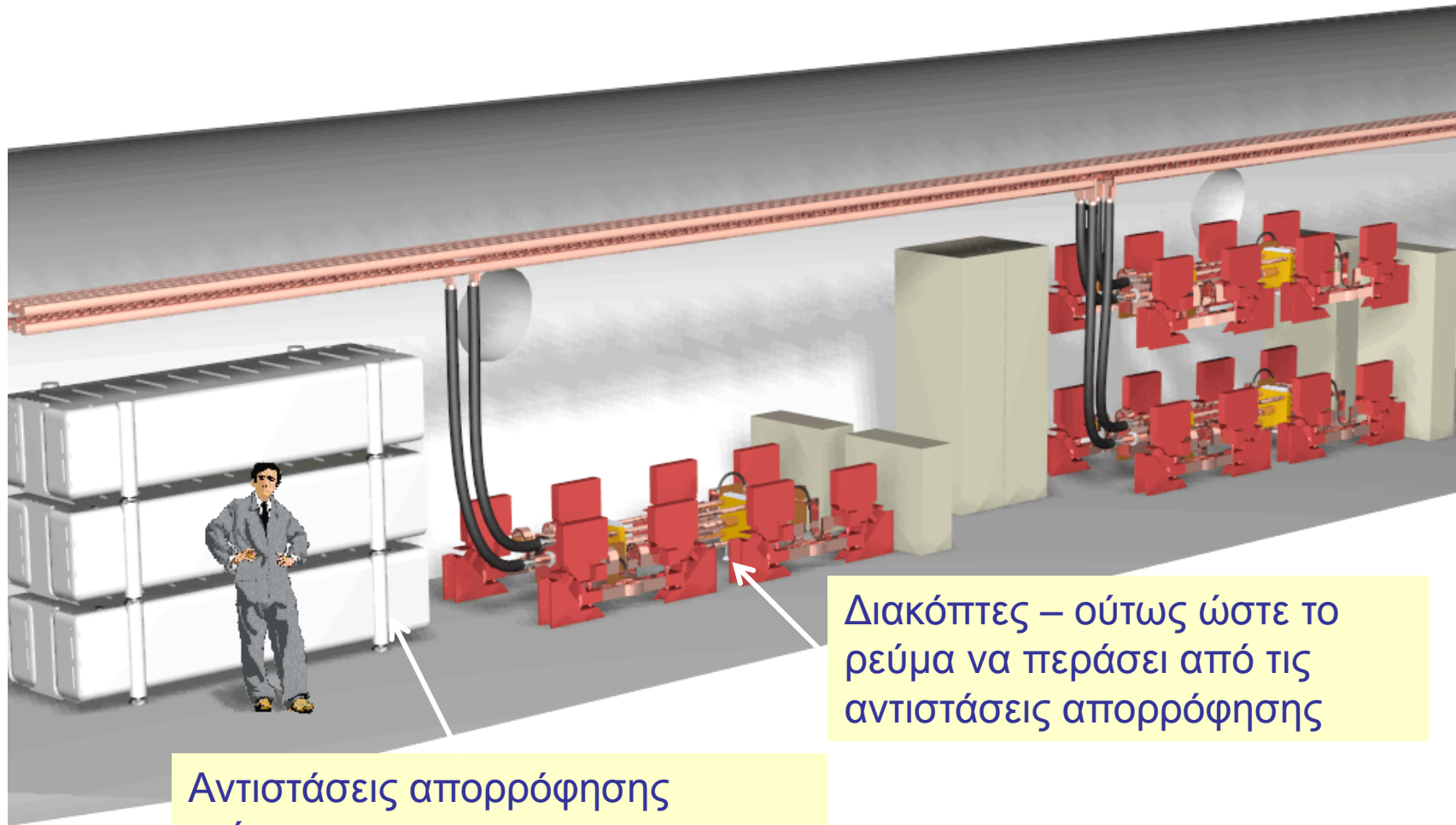


Σύστημα απόρριψης δέσμης



- Οθόνη μπροστά από το τον απορροφητή
- Η κάθε κουκκίδα αντιστοιχεί σε ένα πακέτο πρωτονίων
- Η δέσμη αλλοιώνεται για να μοιραστεί η ενέργεια σε μεγαλύτερη επιφάνεια

Σύστημα εξαγωγής ενέργειας

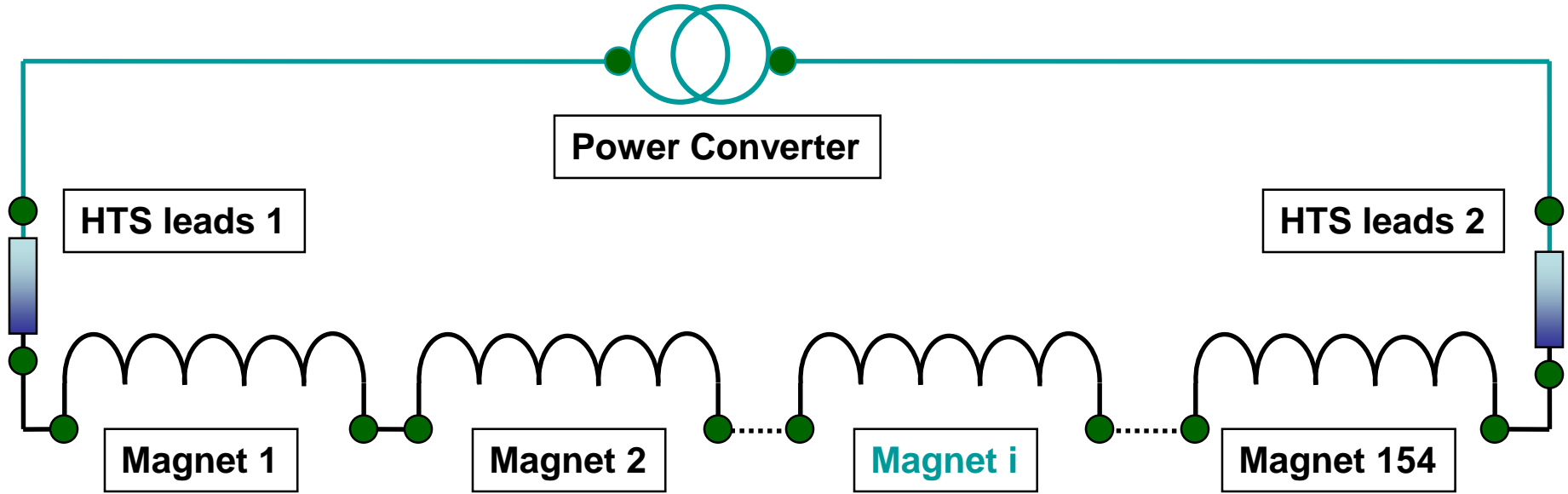


Αντιστάσεις απορρόφησης
ενέργειας

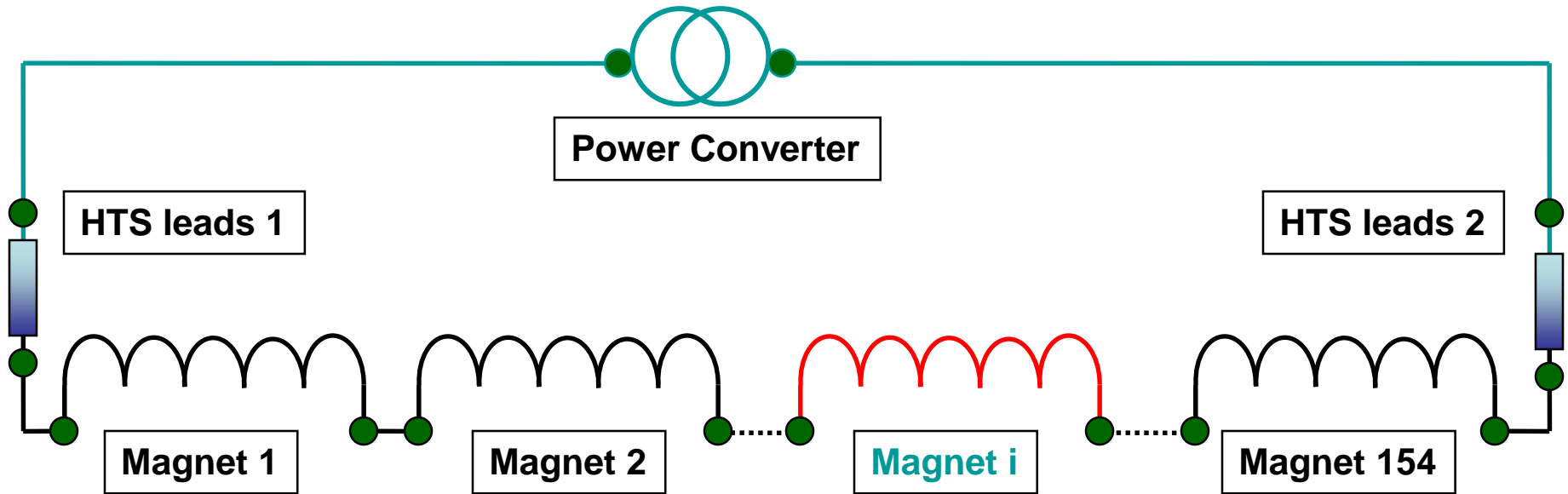
Διακόπτες – ούτως ώστε το
ρεύμα να περάσει από τις
αντιστάσεις απορρόφησης

Facilities in the UA's
for LHC Main Dipole and QF/QD circuits

Τροφοδοσία 1/8 του LHC (154 δίπολα)

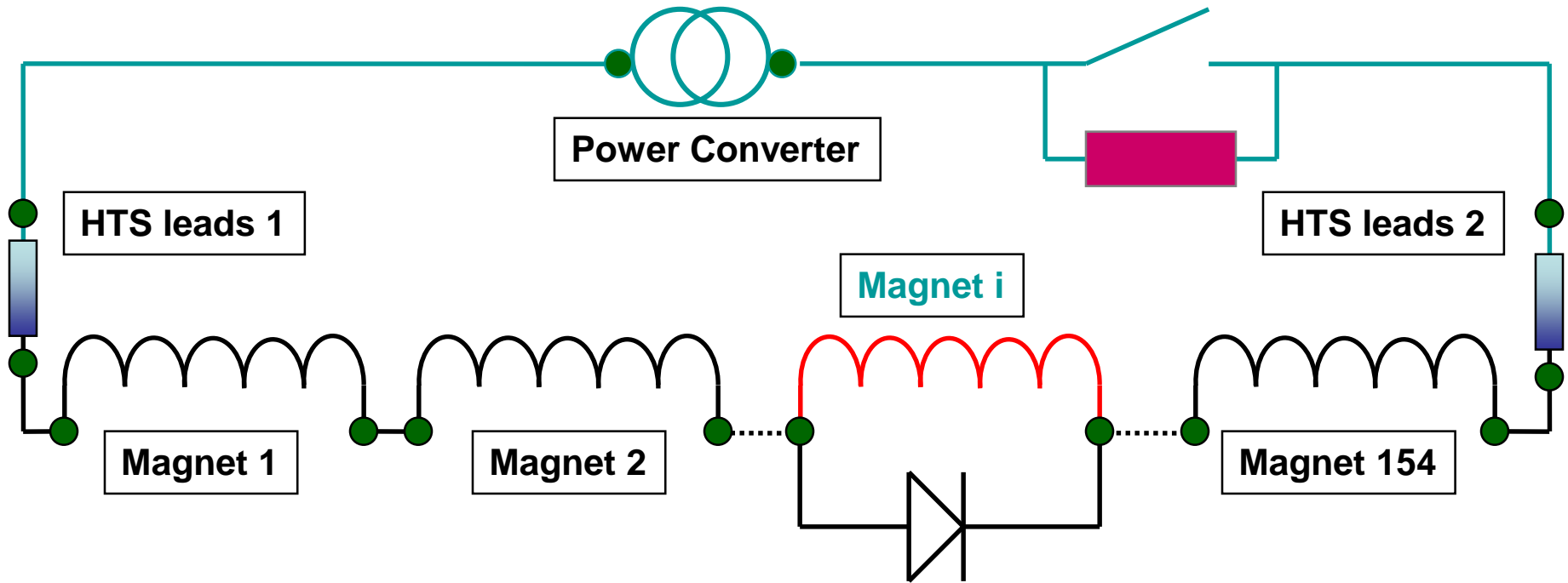


Σβέση (Quench) – Ταχεία εξαγωγή ενέργειας ...



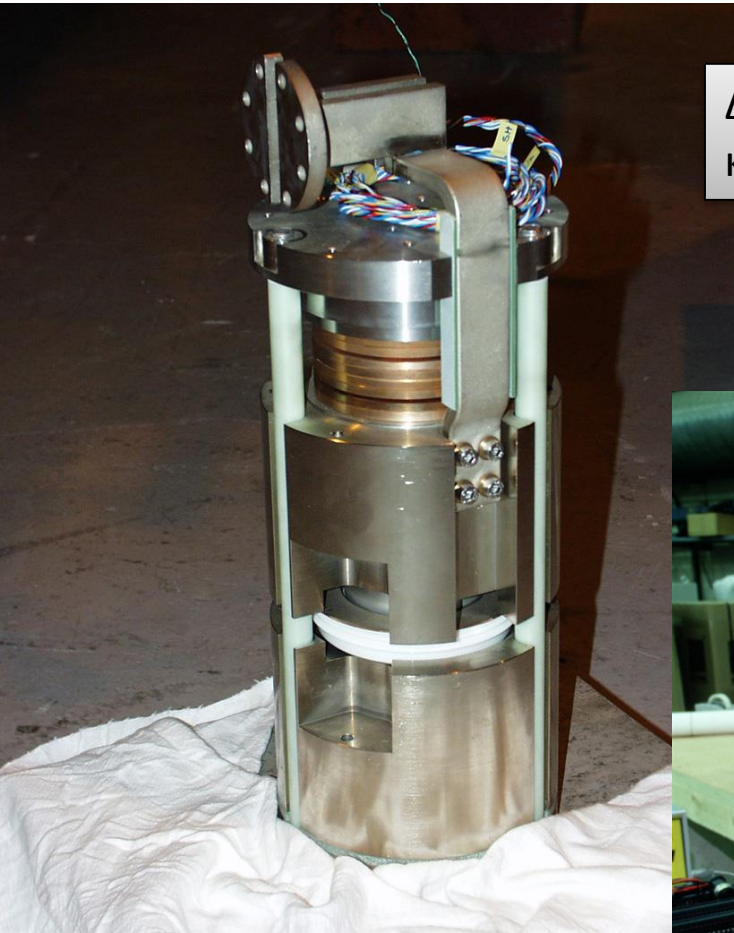
- Ας υποθέσουμε πως ένας μαγνήτης χάνει την υπεραγωγιμότητα του (πρόβλημα θερμοκρασίας ή θέρμανσης λόγω πρόσκρουσης δέσμης)

Τα συστήματα προστασίας στο LHC

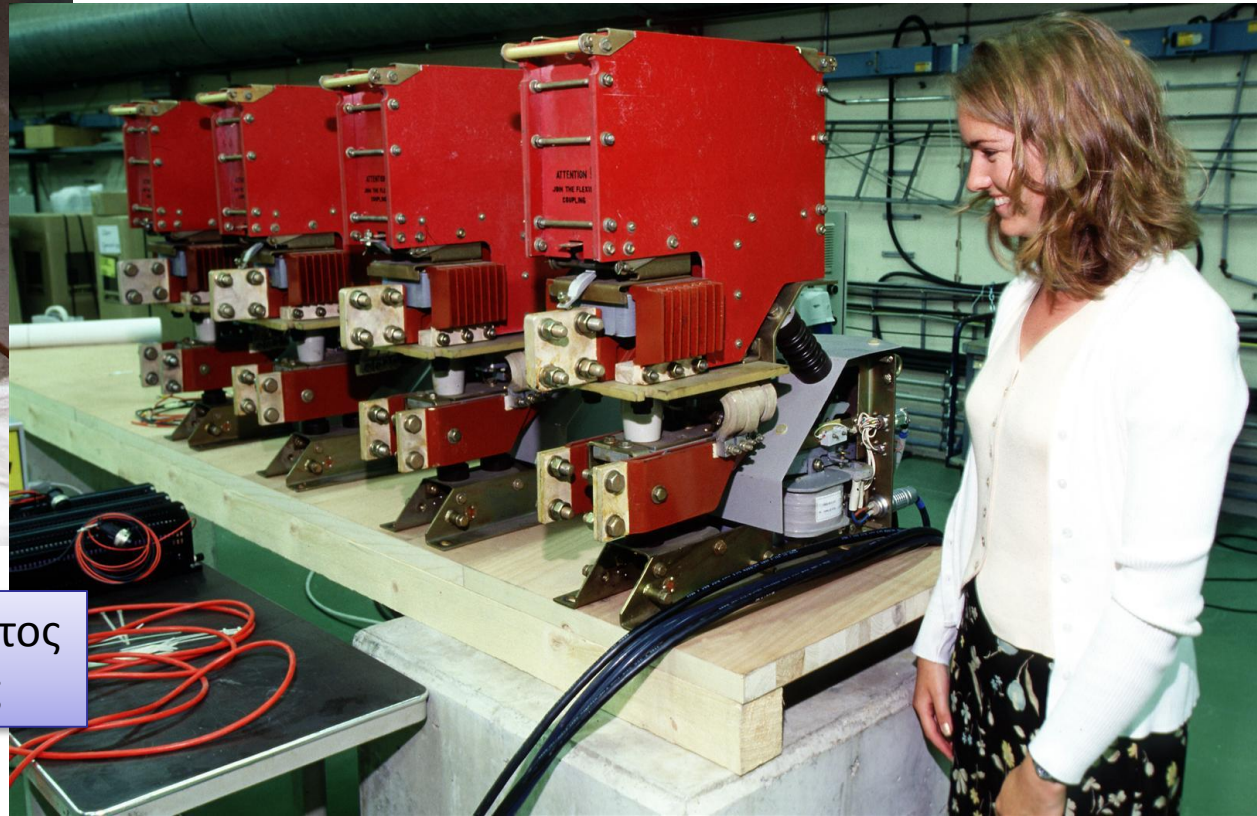


- Όταν ένας μαγνήτης χάνει την υπεραγωγιμότητά του, οι «θερμαντήρες σβέσης» ανάβουν σε αυτό το μαγνήτη για ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας
- Το ρεύμα σε αυτό το μαγνήτη μηδενίζεται σε περίπου 200 ms
- Το ρεύμα σε όλους τους άλλους μαγνήτες περνά από τη δίοδο παράκαμψης
- Ο διακόπτης του κυκλώματος ανοίγει και το ρεύμα στο κύκλωμα μειώνεται εκθετικά με σταθερά 100 δευτερόλεπτων

Ασφάλεια μαγνητών



Δίοδοι (μια για
κάθε μαγνήτη)



Διακόπτες συστήματος
εξαγωγής ενέργειας

Ασφάλεια μαγνητών

Δωμάτιο διακόπτη απαγωγής ενέργειας 13 kA



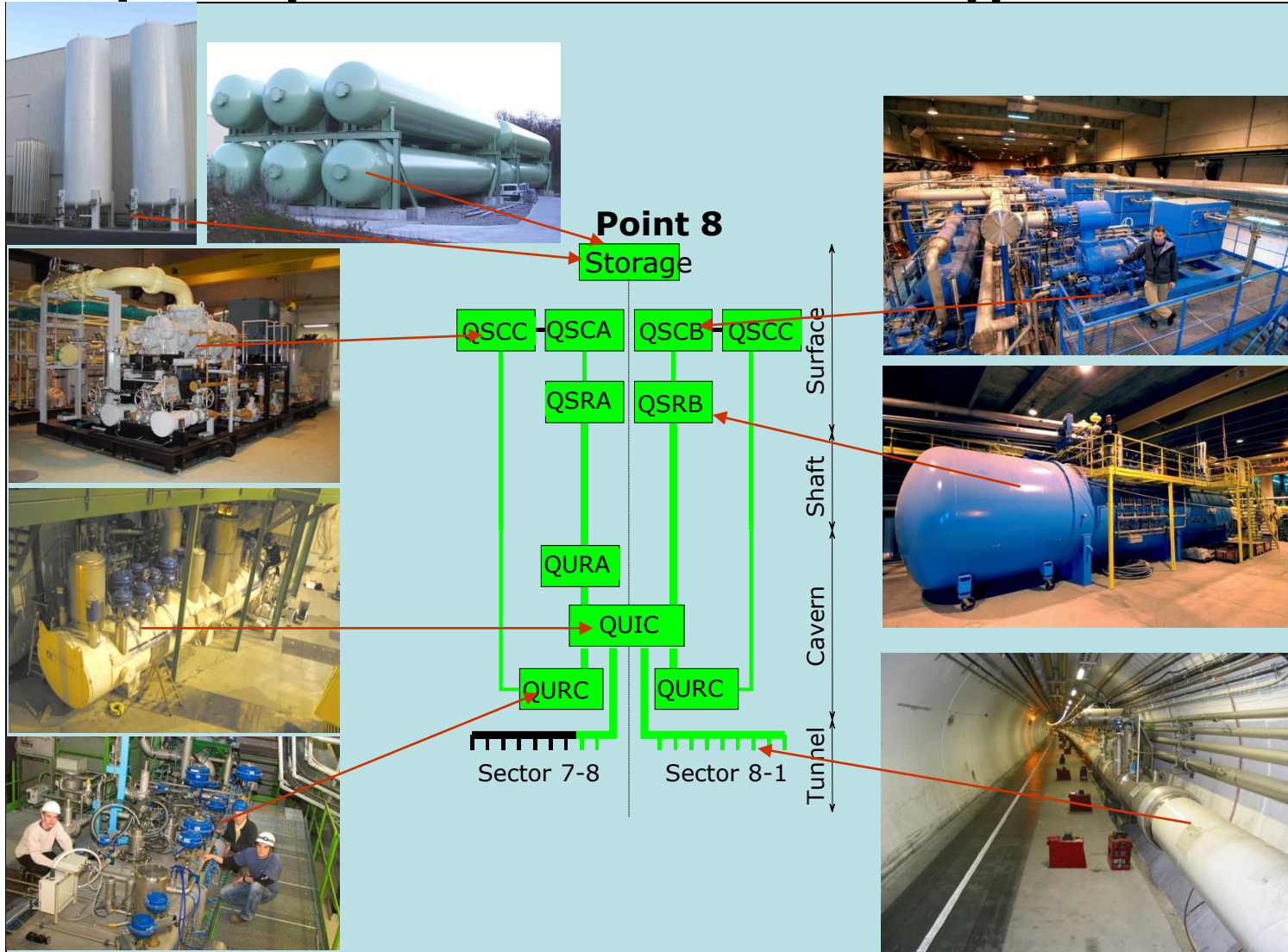
Αντιστάσεις απαγωγής ενέργειας



Κρυογενικό σύστημα

- Οι πρωτεύοντες διπολικοί μαγνήτες δουλεύουν σε θερμοκρασία 1.9K
- Ο λόγος είναι
 - Όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία, τόσο πιο υψηλό το κρίσιμο ρεύμα σε ένα υπεραγωγό μαγνήτη, και άρα τόσο υψηλότερο το μαγνητικό πεδίο
 - Σε αυτή τη θερμοκρασία το υγρό ηλίο γίνεται υπέρ-υγρό(με πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα)
- Όμως το ηλίο βράζει στους 4.5K
- Ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα με τέσσερα εργοστάσια ψύξης, το καθένα από τα οποία έχει δυο υποσύστημα:
 - Ένα 'συμβατικό' που ψύχει στους 4.5K
 - Ένα δεύτερο που δουλεύει σε πίεση 15mbar

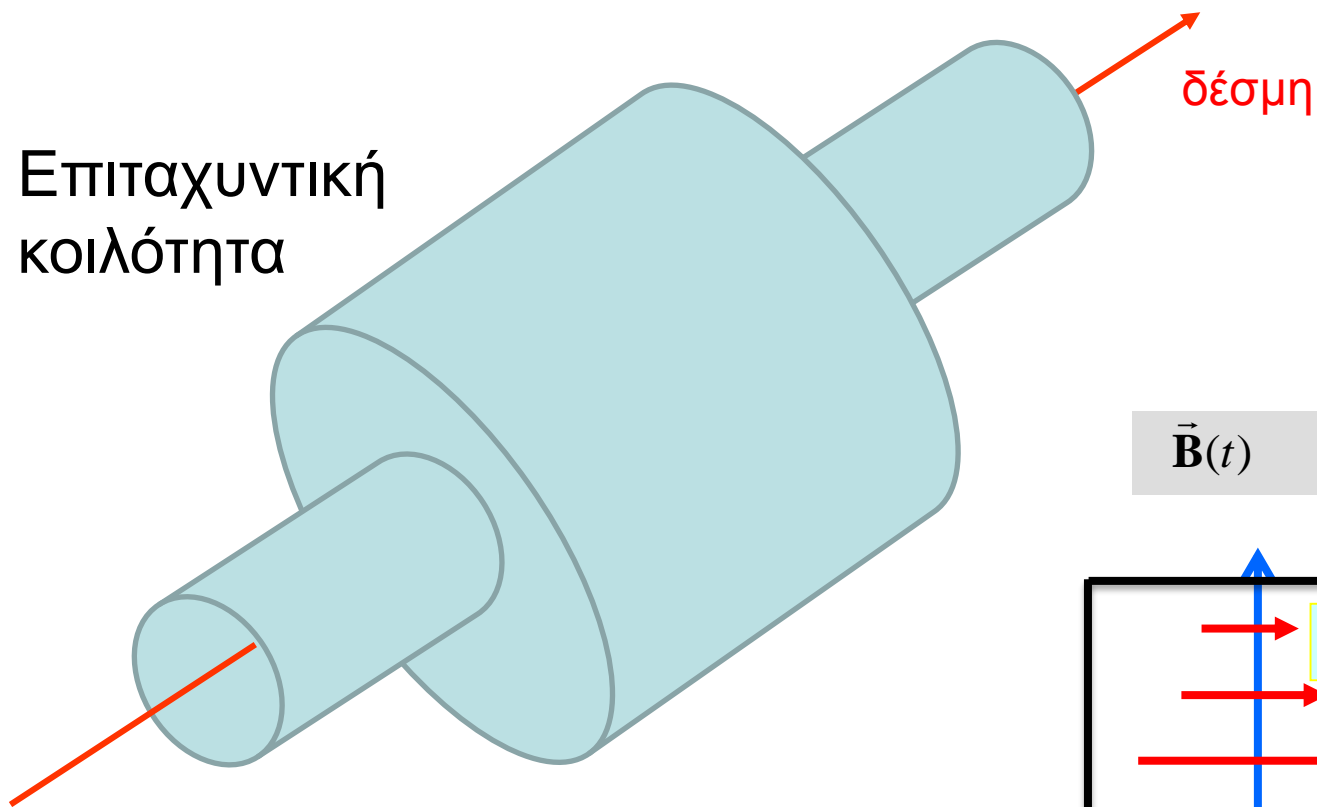
Κρυογενικά υποσυστήματα



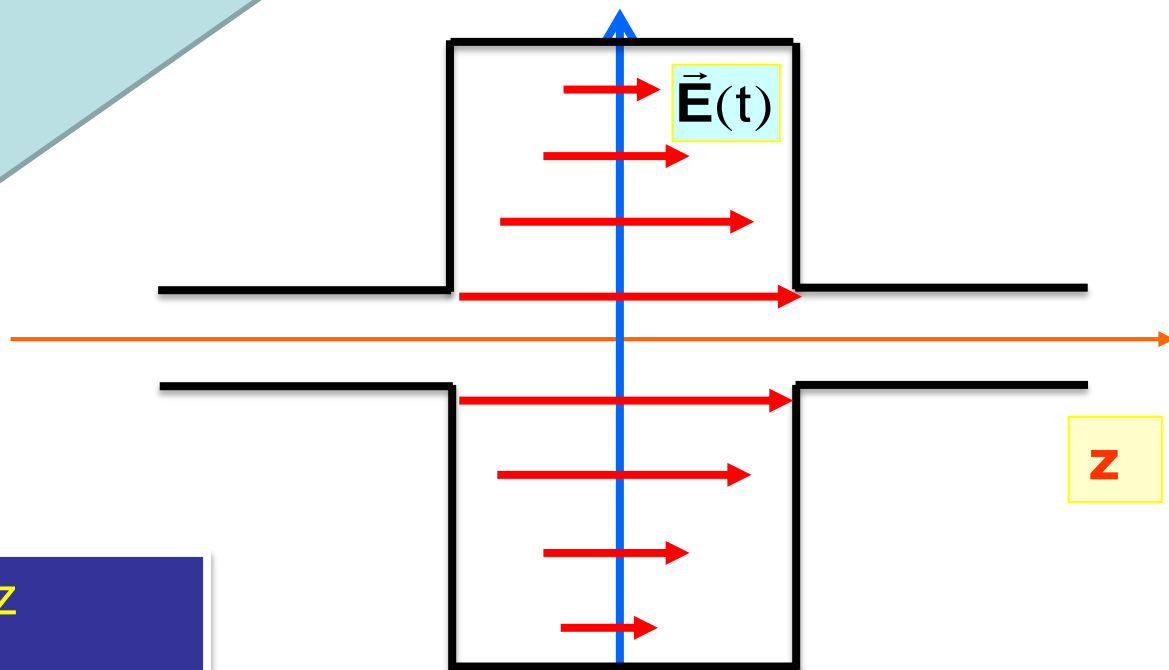
Επιτάχυνση

- Ο περισσότερος χρόνος σε έναν «συγκρουστή» σαν τον LHC ξοδεύεται σε σταθερή μέγιστη ενέργεια.
- Η επιτάχυνση της δέσμης γίνεται από ένα σημείο του επιταχυντή – στο σημείο 6. (από κάθε σημείο του επιταχυντή η δέσμη περνά 11,000 φορές το δευτερόλεπτο, άρα η όποια επιτάχυνση γίνεται «λίγο και πάλι».
- Ο χρόνος της επιτάχυνσης από την ενέργεια έγχυσης στη μέγιστη ενέργεια (γύρω στα 15-20 λεπτά) έχει να κάνει με το πόσο γρήγορα μπορούν να αυξήσουν το μαγνητικό τους πεδίο οι διπολικοί μαγνήτες.
- Η επιτάχυνση επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών επιταχυντικών κοιλοτήτων
- Αρχή λειτουργίας (σύγχροτρον): ένα σωματίδιο που φτάνει στην επιταχυντική κοιλοότητα αργά – και άρα υπολείπεται σε ενέργεια –, επιταχύνεται . Αν φτάσει νωρίς – και άρα έχει παραπάνω ενέργεια από όση πρέπει – επιβραδύνεται.

Επιταχυντική
κοιλότητα



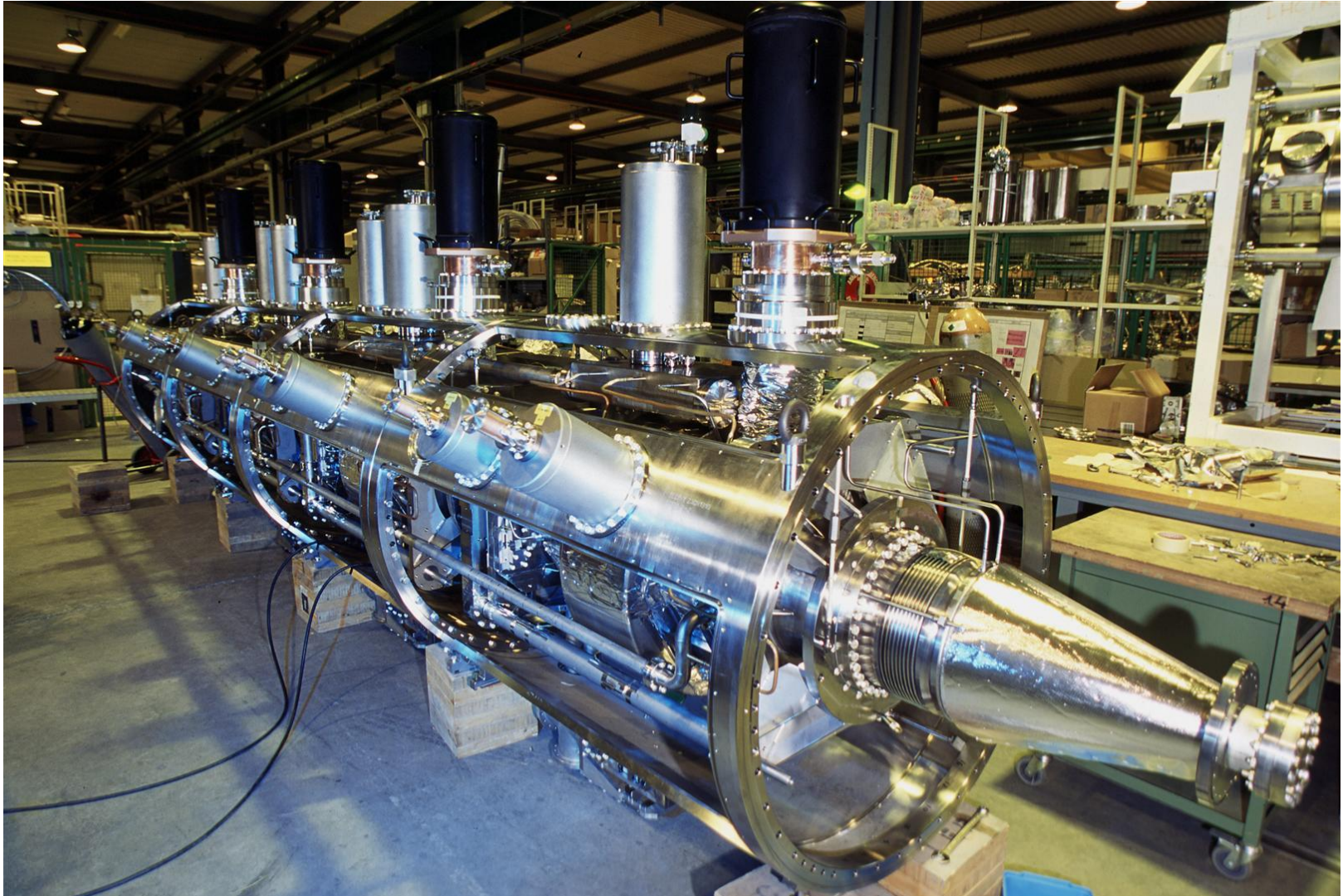
$\vec{B}(t)$ orthogonal



LHC RF συχνότητα 400 MHz

Συχνότητα περιστροφής 11246 Hz

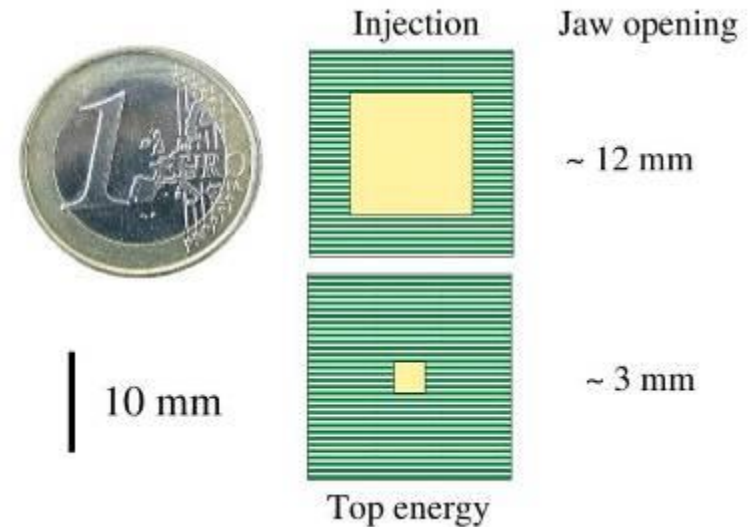
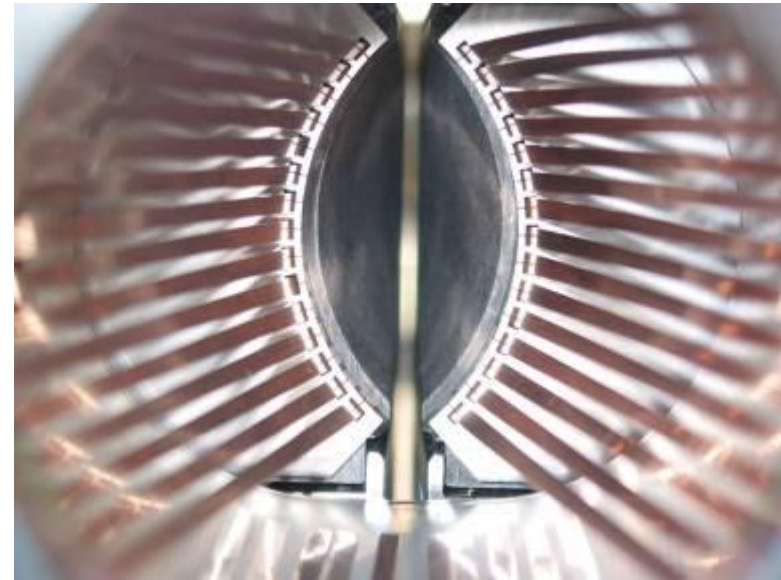
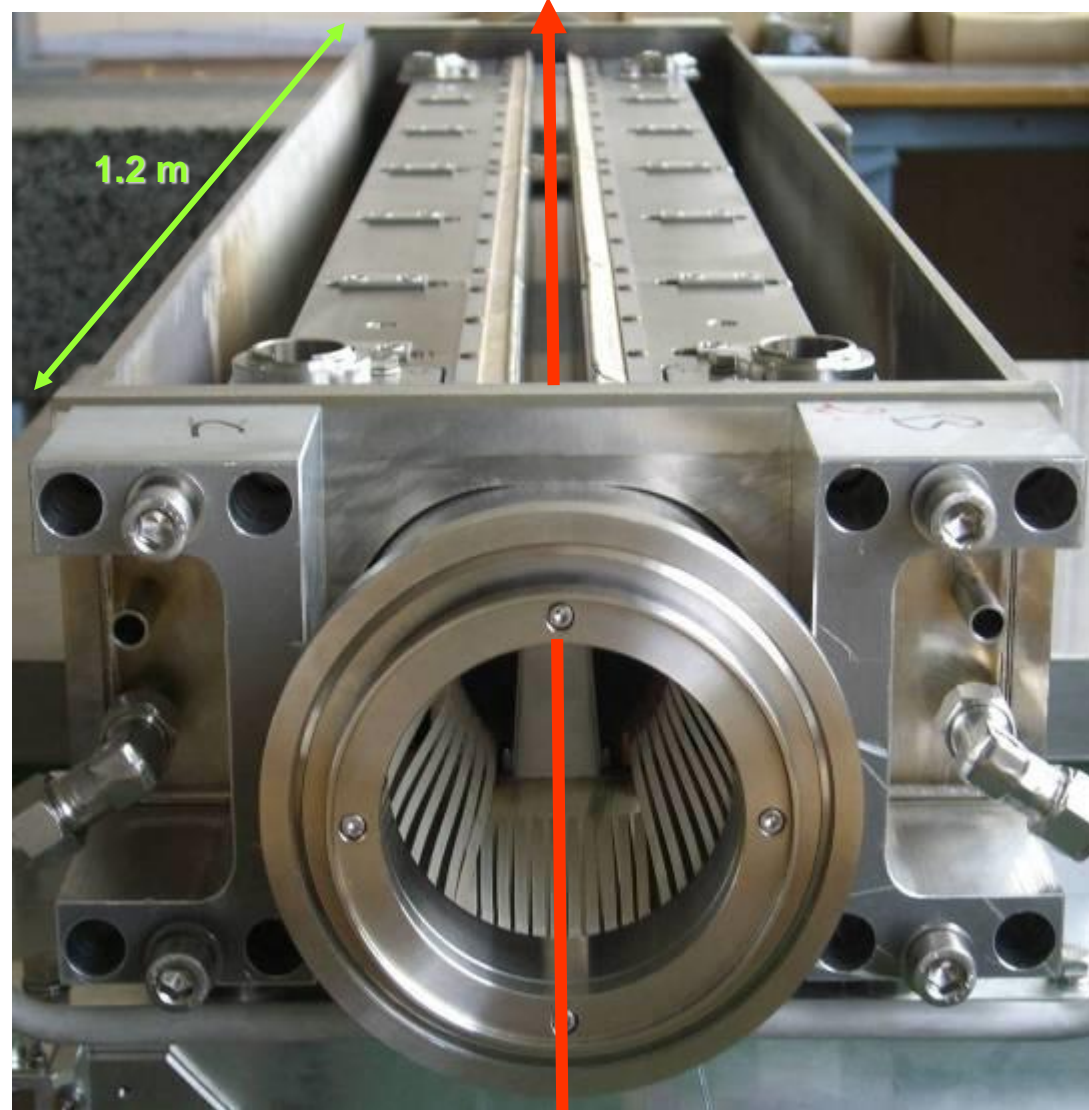
Επιταχυντικές κοιλότητες



Ευθυγράμμιση – collimators και BLMs

- Πρωτόνια που αποκλίνουν (κατά πολλά σίγμα) από τη δέσμη πρέπει να σταματήσουν πριν χτυπήσουν κάποιο ευαίσθητο σημείο του επιταχυντή → LHC Collimation system
- Τα collimators έχουν «σαγόνια» που μπορούν να πλησιάσουν τη δέσμη ή να απομακρυνθούν, ανάλογα με την περίπτωση.
- Το χάσιμο πρωτονίων παρακολουθείται από μια πλειάδα ανιχνευτών (Beam Loss Monitors – BLMs)

The LHC Collimator



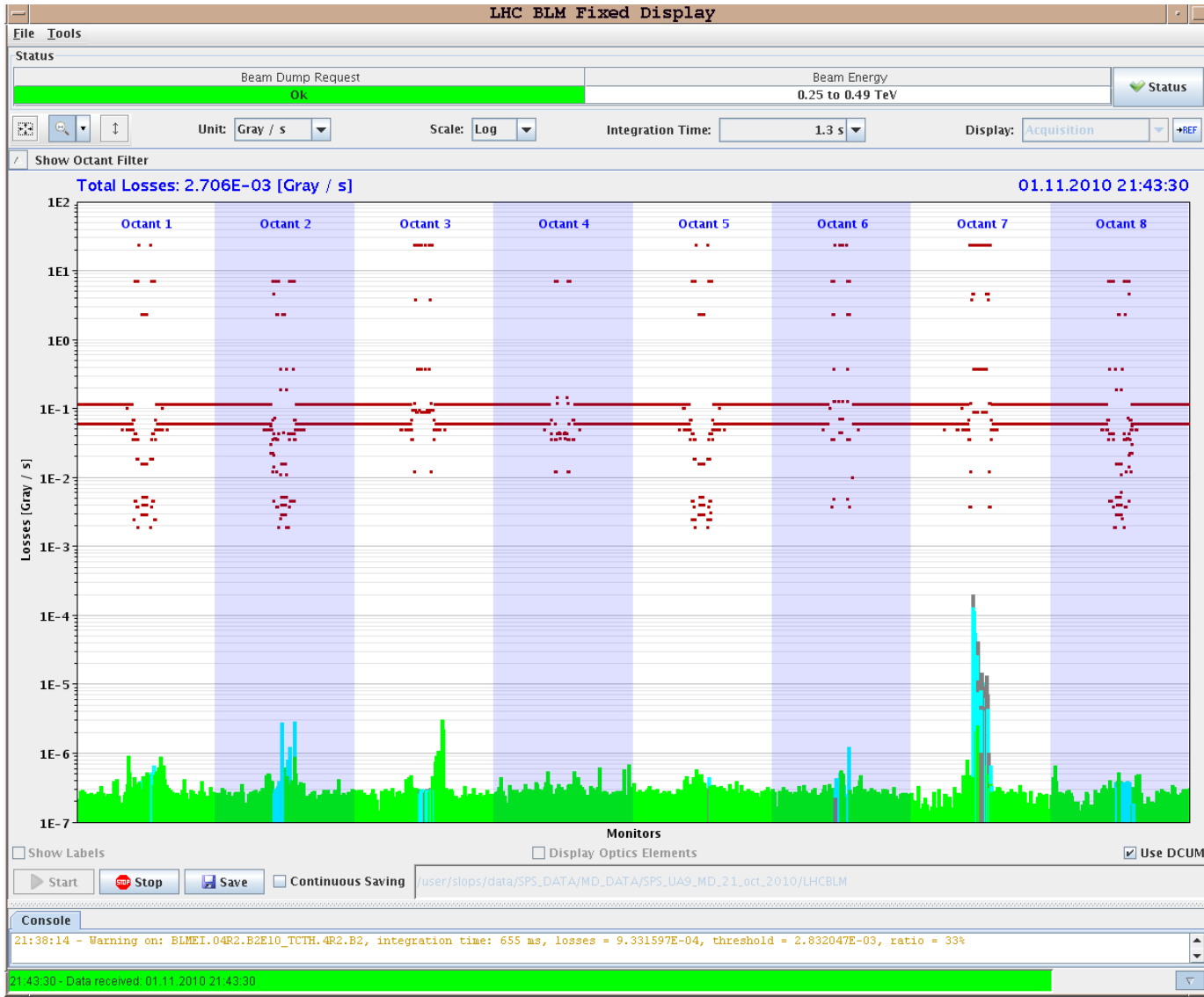
360 MJ proton beam

Beam loss monitors

- Περίπου 3600 θάλαμοι ιονισμού κατανεμημένοι κατά τακτά διαστήματα γύρω από τον επιταχυντή για να ανιχνεύουν απώλειες δέσμης. Χρόνος απόκρισης μισή στροφή (40 μ s). Αν οι απώλειες είναι μεγαλύτερες από κάποιο κατώφλι, δίνουν σήμα για απόρριψη δέσμης



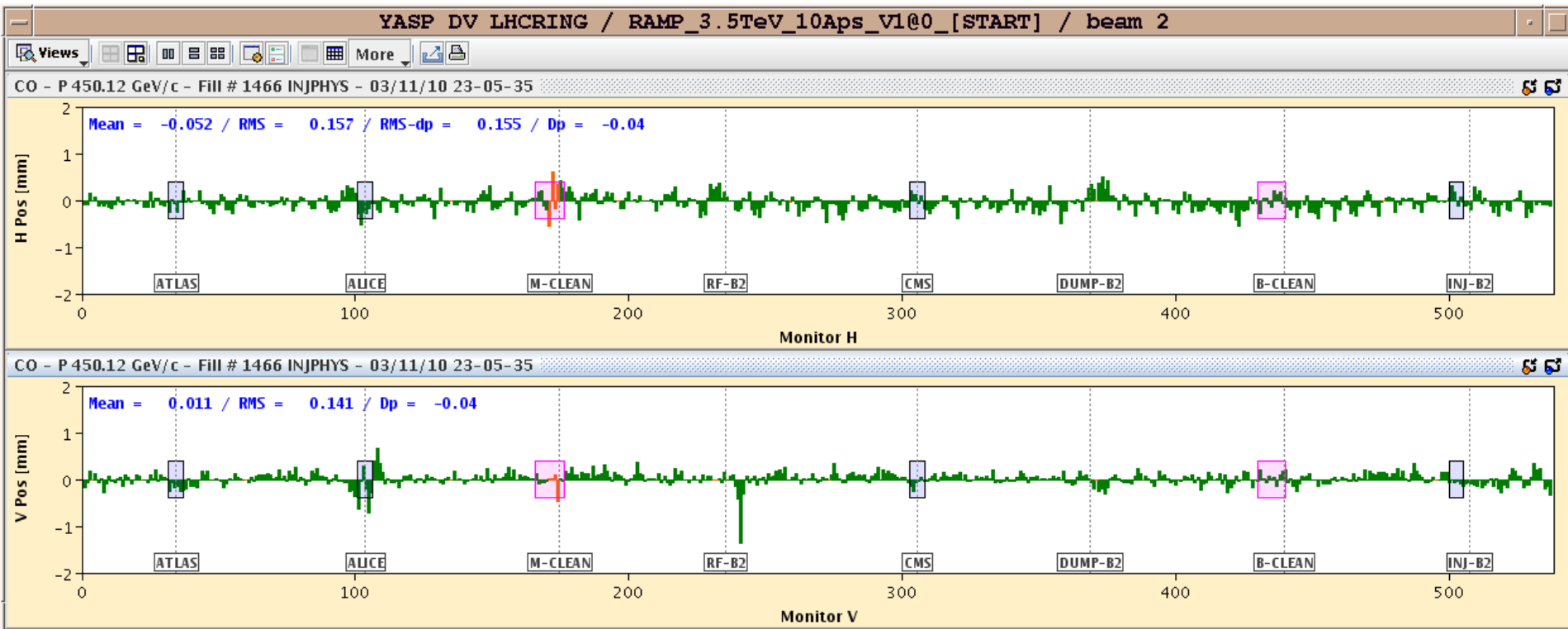
Beam Loss Monitors – BLMs



Τροχιά της δέσμης

- Η τροχιά της δέσμης παρακολουθείται από εκατοντάδες ανιχνευτές θέσης δέσμης (beam position monitors – BLMs).
- Η τροχιά διορθώνεται από μια σειρά από μικρούς διορθωτικούς μαγνήτες (dipole orbit correctors)
- Το RMS της τροχιάς της δέσμης είναι πολλές φορές καλύτερο από 200 μικρά.

Τροχιά δέσμης

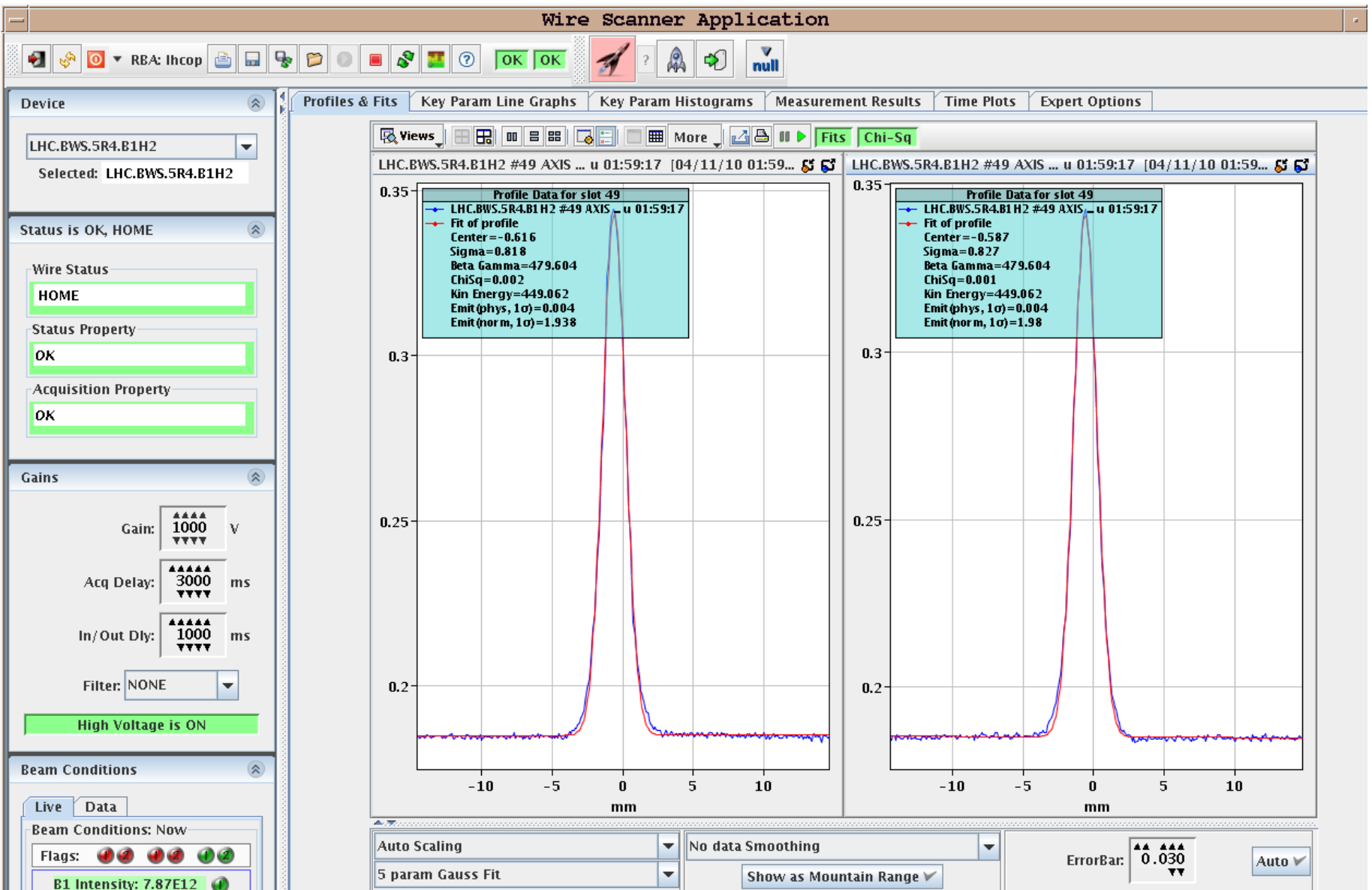


Οριζόντιος αξονας: 27 χιλιόμετρα. Κάθετος αξονας: 2 χιλιοστά

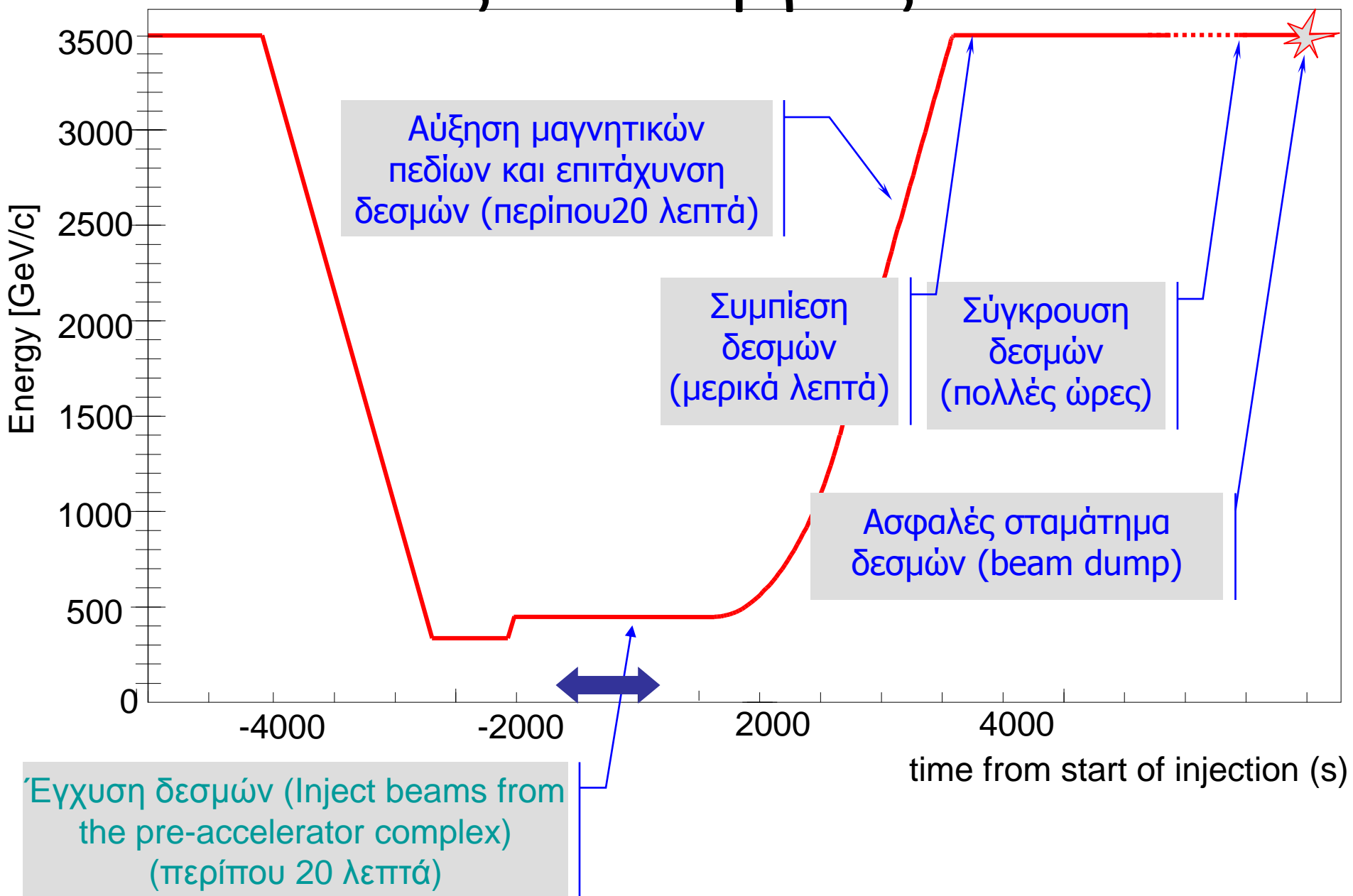
Μέγεθος δέσμης

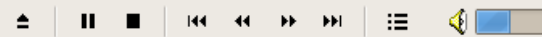
- Το μέγεθος της δέσμης εξαρτάται από το σημείο του επιταχυντή.
- Είναι ελάχιστο στα σημεία των συγκρούσεων (και μέγιστο μερικές δεκάδες μέτρα πριν)
- Το μέγεθος της δέσμης το μετράμε κυρίως με το “wire scanner” – ένα λεπτό σηματάκι που περνάει γρήγορα μέσα από τη δέσμη

Μέγεθος δέσμης



Ο κύκλος λειτουργίας του LHC



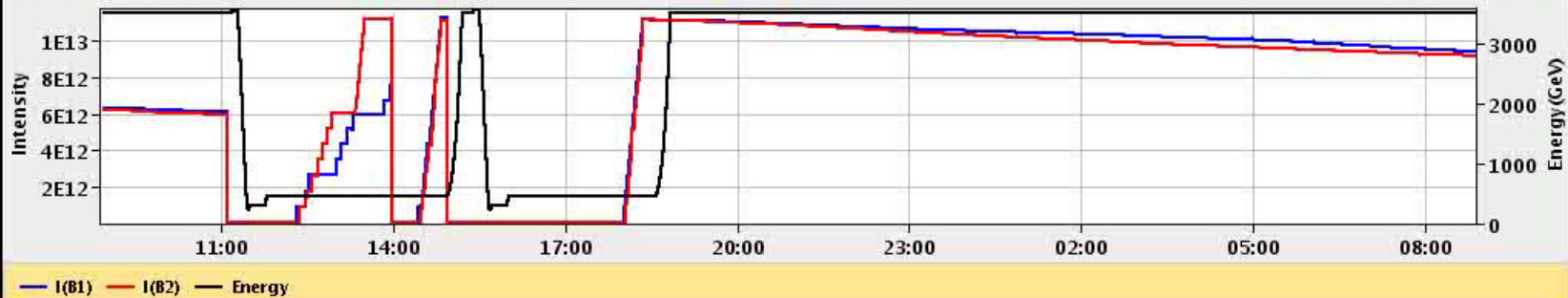


26-Sep-2010 08:57:40 Fill #: 1372 Energy: 3500 GeV I(B1): 9.42e+12 I(B2): 9.19e+12

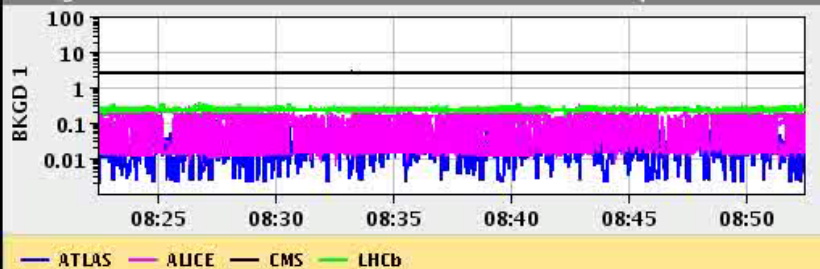
| | ATLAS | ALICE | CMS | LHCb |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Experiment Status | PHYSICS | PHYSICS | PHYSICS | PHYSICS |
| Instantaneous Lumi (ub.s) ⁻¹ | 14.093 | 0.036 | 13.352 | 12.665 |
| BRAN Luminosity (ub.s) ⁻¹ | 13.861 | 0.043 | 15.303 | 14.062 |
| Fill Luminosity (nb) ⁻¹ | 1091.3 | 2.2 | 1037.9 | 1001.7 |
| BKGD 1 | 0.025 | 0.021 | 2.610 | 0.216 |
| BKGD 2 | 45.000 | 0.100 | 0.002 | 5.439 |
| BKGD 3 | 1.000 | 0.005 | 0.000 | 0.122 |

LHCb VELO Position **IN** Gap: 0.0 mm **STABLE BEAMS** TOTEM: **STANDBY**

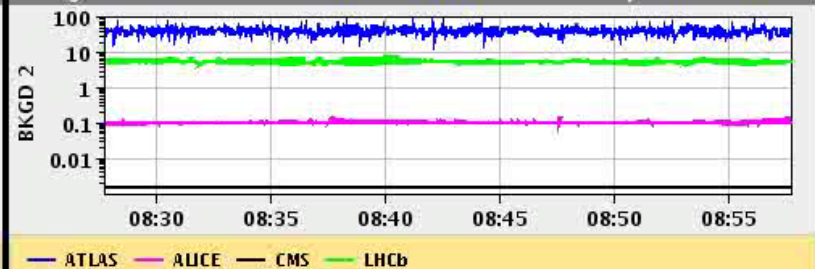
Performance over the last 24 Hrs Updated: 08:36:37



Background 1 Updated: 08:36:39



Background 2 Updated: 08:41:56



Τέλος

Η ιστορία από το 2008
μέχρι σήμερα

Η 10 Σεπτεμβρίου 2008

- 250 δημοσιογράφοι
- 30 τηλεοπτικά κανάλια
- Εκατομμύρια τηλεθεατές
- ...κάναμε κάτι για πρώτη φορά, με καμία εγγύηση ότι θα δουλέψει
- Η ιδέα ήταν να στείλουμε δυο δέσμες δεξιόστροφα και αριστερόστροφα στη μηχανή, προσπαθώντας να πετύχουμε μια πλήρη περιστροφή

Η αγωνία



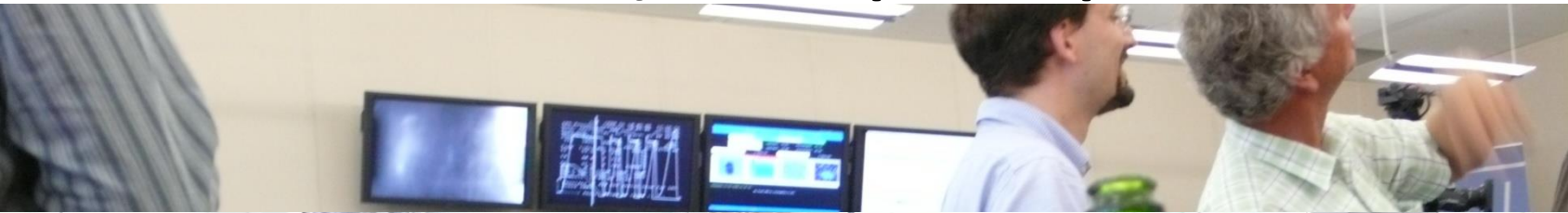
Όλα πράσινα!



Η δικαίωση



Ακλούθησαν πανηγυρισμοί και ξεκούραση...



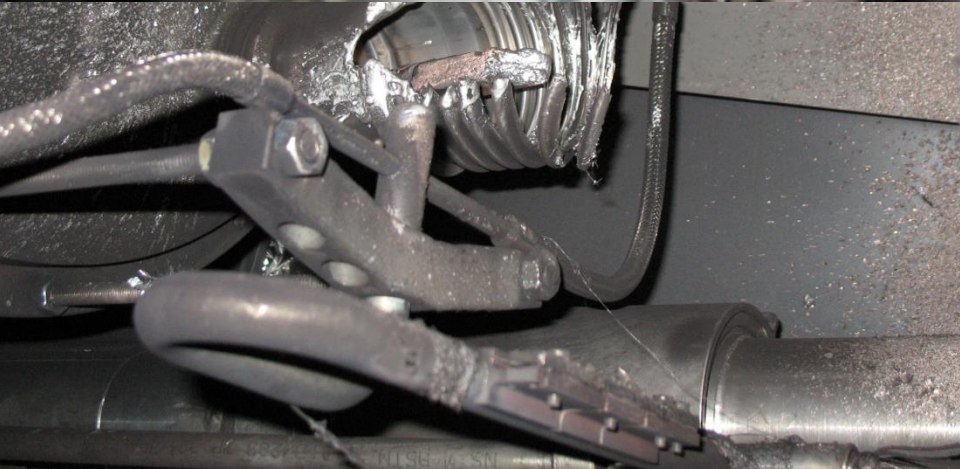
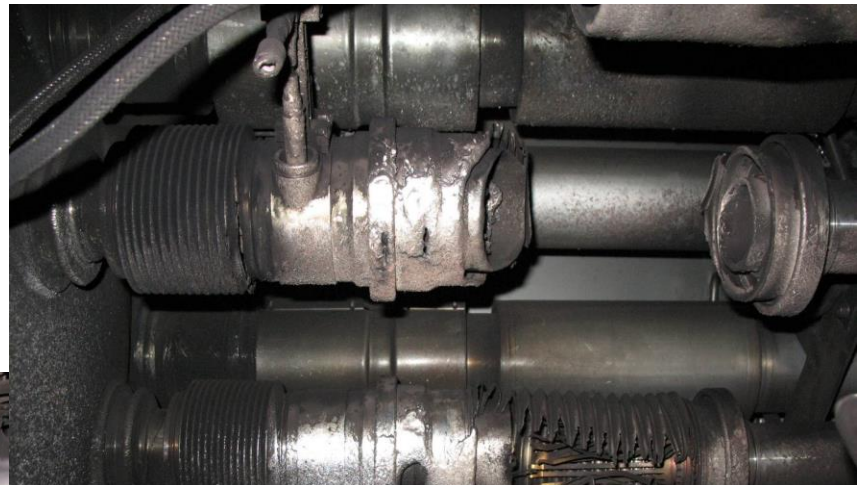
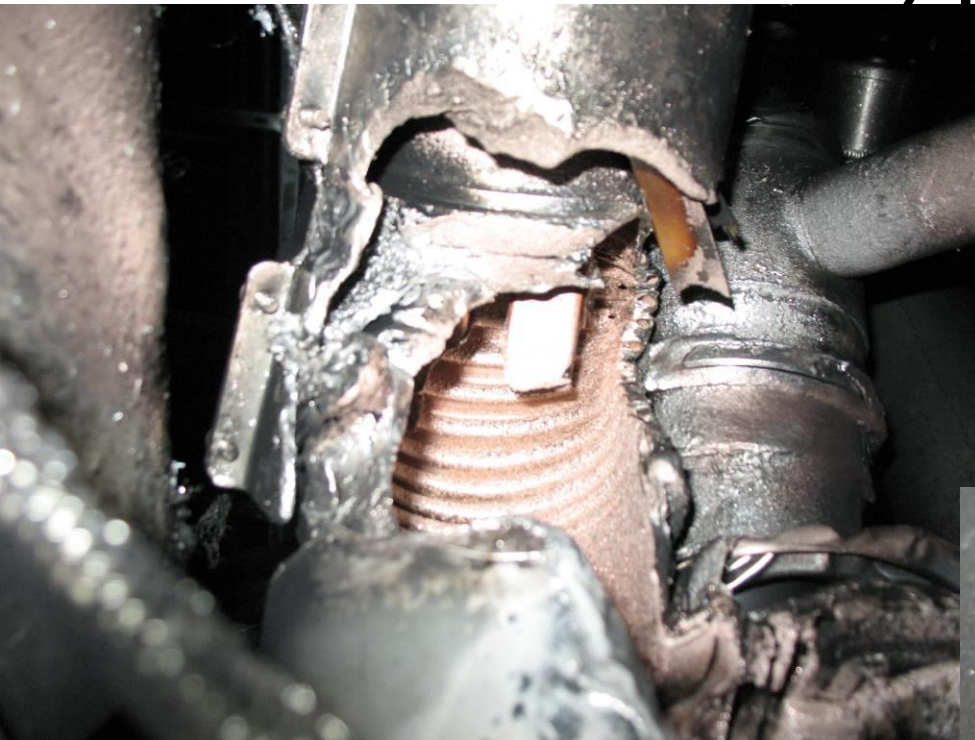
Δυστυχώς, 9 μέρες αργότερα...



Το ατύχημα της 19^{ης} Σεπτεμβρίου του 2008

- Το LHC έχει 10000 συγκολλήσεις υπεραγωγίμου καλωδίου υψηλού ρεύματος – όλες έχουν γίνει επί τόπου στο τούνελ.
- Μια από αυτές της κολλήσεις δεν είχε γίνει σωστά.
- Η κόλληση άνοιξε όταν στη μηχανή υπήρχαν 600MJ αποθηκευμένης ενέργειας – 70% από αυτή την ενέργεια αναλώθηκε στο τούνελ, δημιουργώντας ηλεκτρικά τόξα, εξατμίζοντας μέταλλο και μετακινώντας μαγνήτες από την θέση τους.

Η ζημιά



Η 7ημιό II

ημ



Τότε καταλάβαμε πως ο δρόμος
της επαναλειτουργίας θα ήταν
μακρύς...







Και με το τέλος της βραδιάς
ενθουσιασμός!



Τα πειράματα είδαν τα πρώτα
γεγονότα...



...και η προηγούμενη εικόνα έκανε
το γύρο του κόσμου και βρήκε
μιμητές...



Τα πράγματα συνέχισαν να βελτιώνονται

- 20 Νοεμβρίου: το LHC βλέπει πάλι δέσμες
- 30 Νοεμβρίου: συγκρούσεις σε 1.2+1.2TeV (καινούριο παγκόσμιο ρεκόρ)
- 30 Μαρτίου: πρώτες συγκρούσεις σε 3.5+3.5TeV
- Από τότε, μια σειρά από καινούρια ρεκόρ φωτεινότητας η οποία σταδιακά αυξάνεται κατά πολλές τάξεις μεγέθους μέχρι $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ένας παράγοντας 50 απομένει μέχρι να φτάσει την τιμή σχεδίασης)

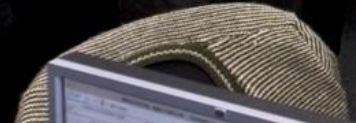




LHC First Physics
LHCb control room



LHCb Experiment

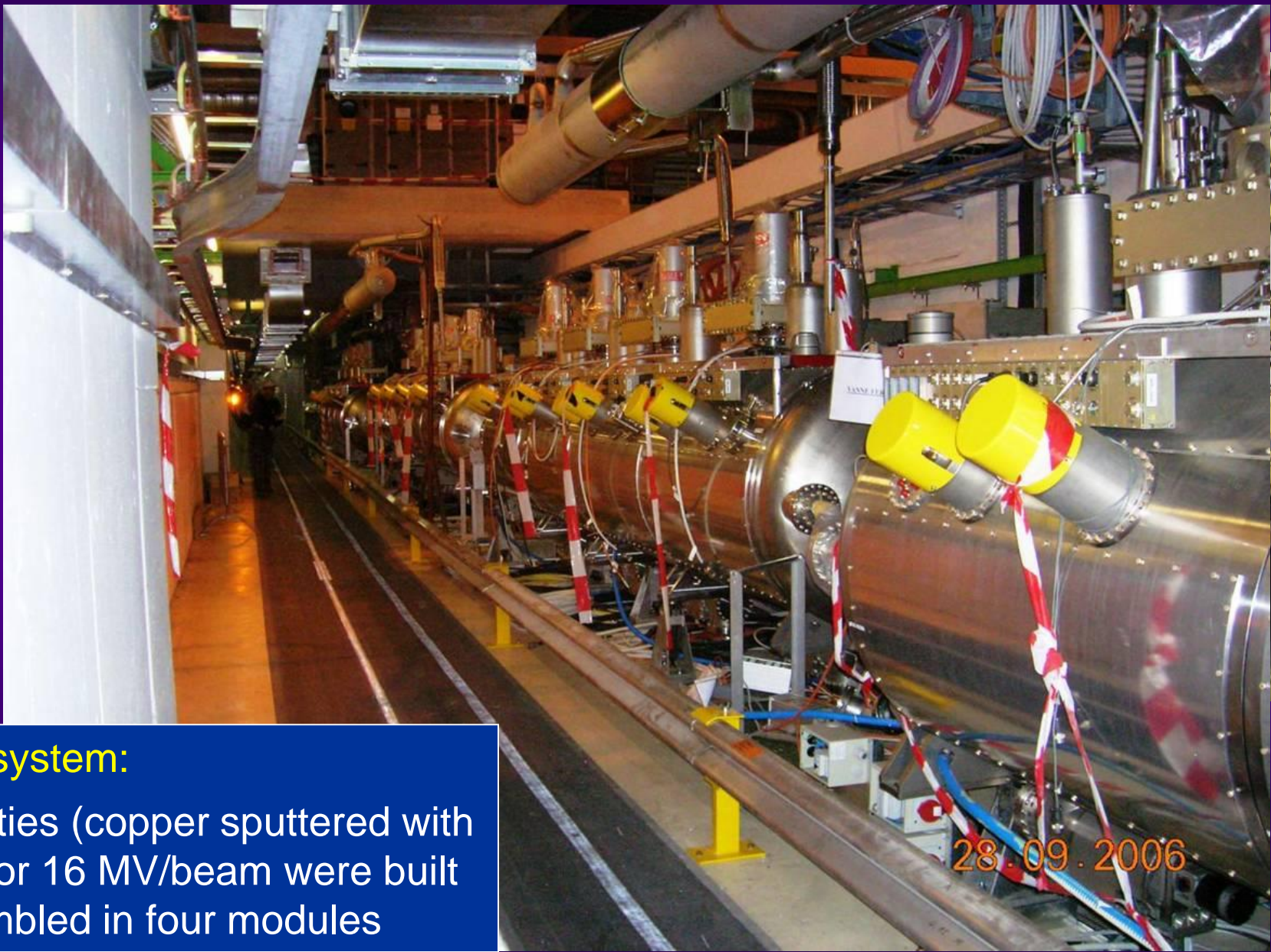


Το μέλλον

- 2010: τα πρώτα αποτελέσματα – το LHC έχει δει όλα τα σωματίδια που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα
- 2012: ανακάλυψη σωματιδίου Higgs
- Επόμενη δεκαετία: ελπίζουμε σε πολλή φυσική και πολλές ανακαλύψεις!

Τέλος

RF systems: 400 MHz



400 MHz system:

16 sc cavities (copper sputtered with niobium) for 16 MV/beam were built and assembled in four modules

28.09.2006

Operational margin of a superconducting magnet

Applied Magnetic Field [T]

