



TRIKOUPIS Nikolaos, TE-CRG-CI

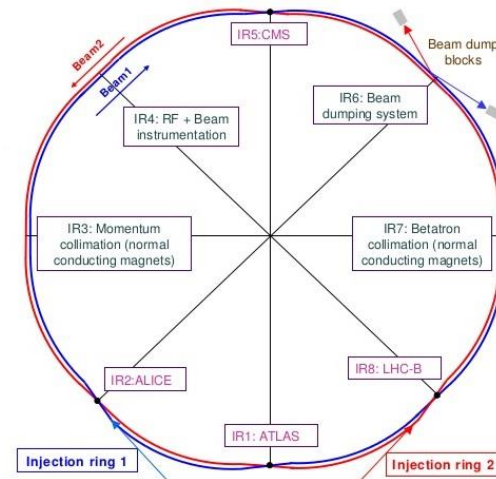
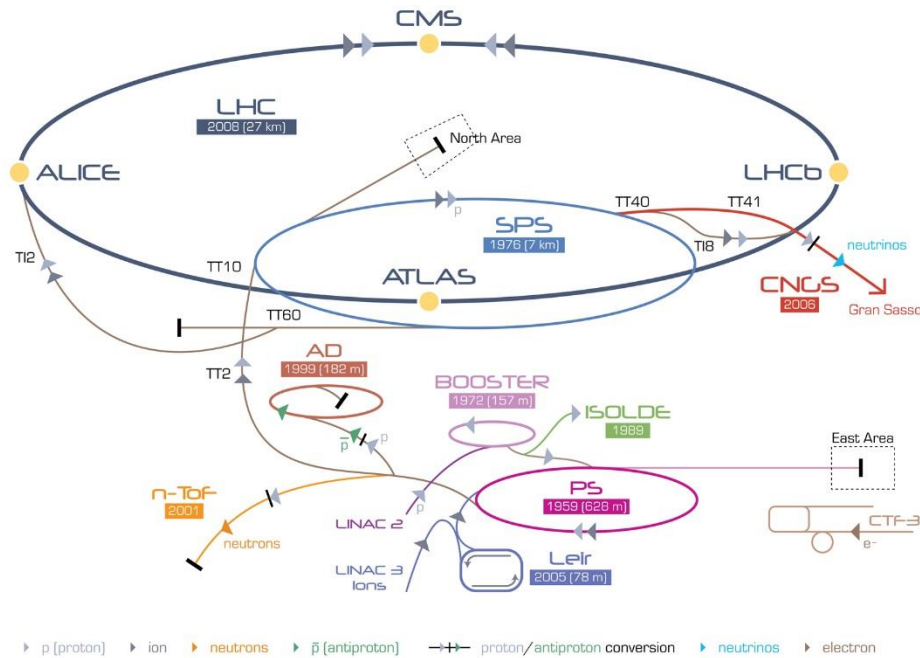
# **Introduction to Cryogenics and Radiation Tolerant Instrumentation Electronics**

***Aug/Sep 2017 – Greek Teachers Program***

# Σύνοψη θεμάτων

- LHC, διπολικοί μαγνήτες και υπεραγωγιμότητα.
- Κρυογενικά υγρά, υπέρρευστο ήλιο και εφαρμογή στον LHC.
- Κρυογενικοί αισθητήρες.
- Επιπτώσεις της ακτινοβολίας στα ηλεκτρονικά.
- Σχεδίαση ανθεκτικών ηλεκτρονικών συστημάτων για τα κρυογενικά του LHC.

# Το σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN και ο LHC



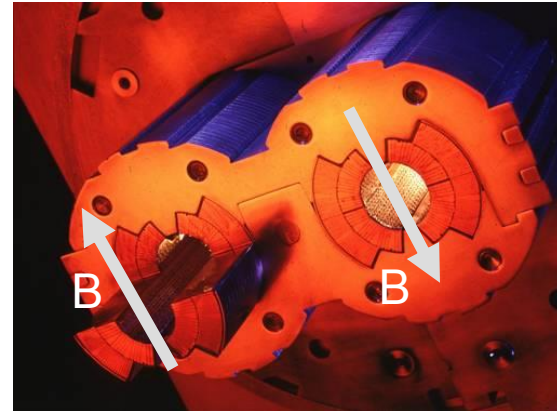
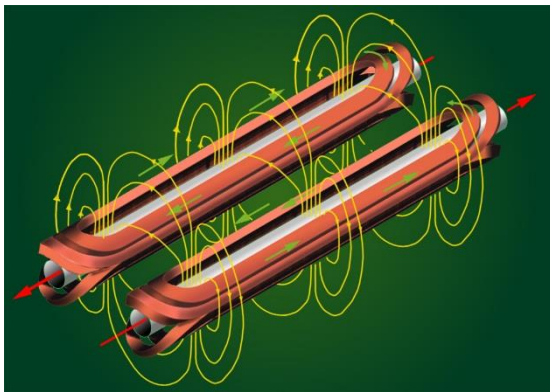
LHC: 27 km



## Μαγνήτες

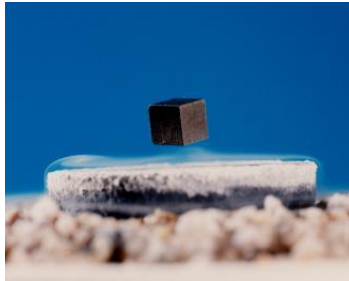
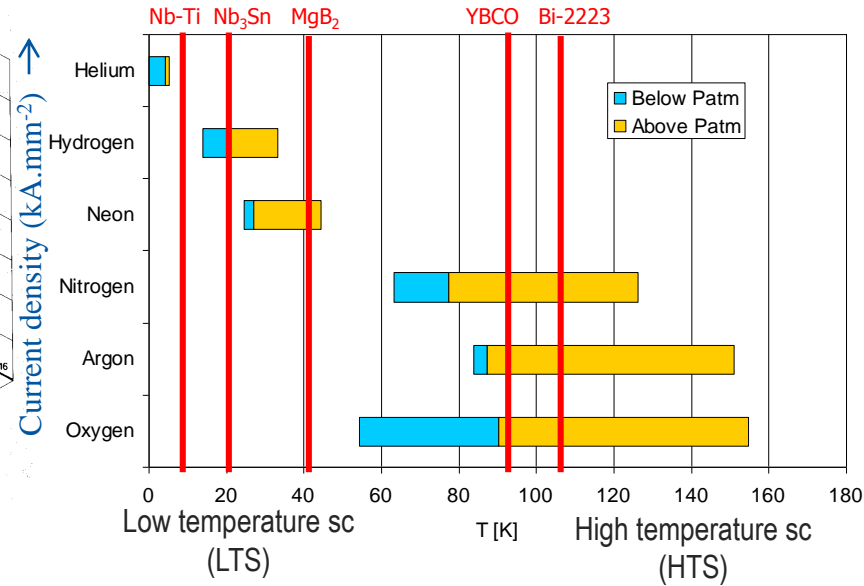
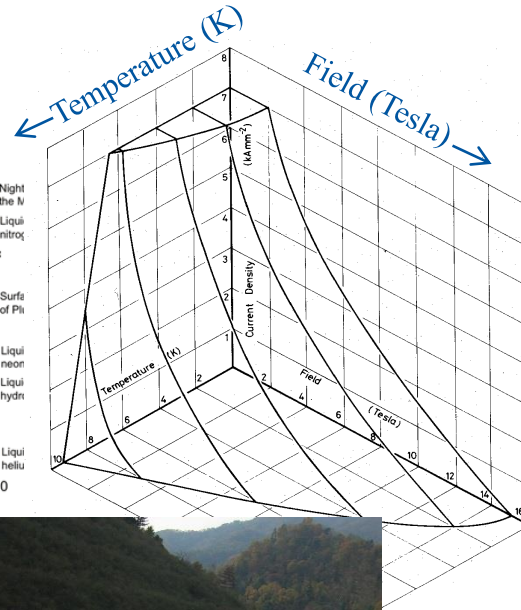
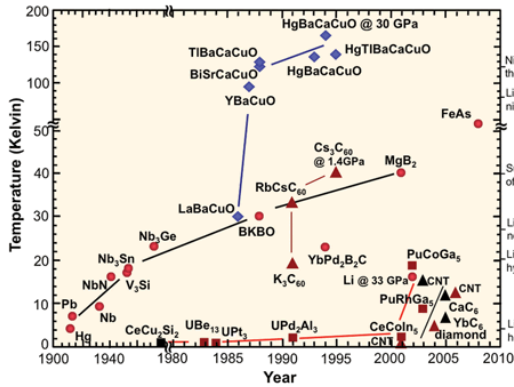
- Διπολικό (1232, 35t) για στρέψη της δέσμης αδρονίων.
- Τετραπολικό για focus/defocus.
- 6,8,12,... –πολικό για διορθώσεις.

# Διπολικοί μαγνήτες



- Για 14 TeV (7 TeV ανά δέσμη) και  $r = 2680\text{m}$ : 8.33 Tesla μαγνητικό πεδίο διπόλων με 11.850 Amperes.
- Αναγκαία η χρησιμοποίηση υπεραγώγιμων καλωδίων.

# Υπεραγωγιμότητα - Όρια δράσης κρυογενικών υγρών



Κρυογενικά υγρά:  
Ρευστά σε θερμοκρασίας  $\leq -180^\circ\text{C}$  93.15K

Οι υπεραγωγοί είναι υλικά που επιτρέπουν την διέλευση του ρεύματος με μηδενική αντίσταση. Ιδιότητα που ανακαλύφθηκε το 1911 από τον Ολλανδό Heike Kamerlingh Onnes.

Κράμα Νιοβίου-Τιτανίου (1962) (Niobium-titanium, NbTi)

Υπεραγώγιμο για  $T < 10\text{ K}$  και  $H < 15\text{ T}$ .

Συμβατό με τις προδιαγραφές του LHC και εφικτό να κατασκευαστεί σε βιομηχανική κλίμακα.

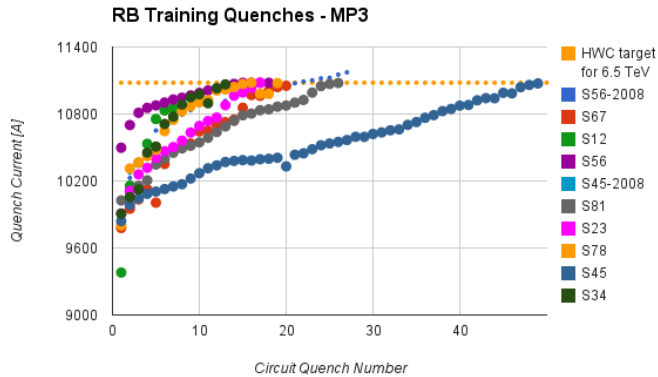


# «Εκπαίδευση» μαγνητών, «quench» και το QPS

Μεγάλες δυνάμεις εντός των μαγνητών:  $> \sim 2 \cdot 10^6$  N/m.

Quench: Η μετάβαση των τυλιγμάτων ενός μαγνήτη από υπεραγώγιμη σε ομική κατάσταση.

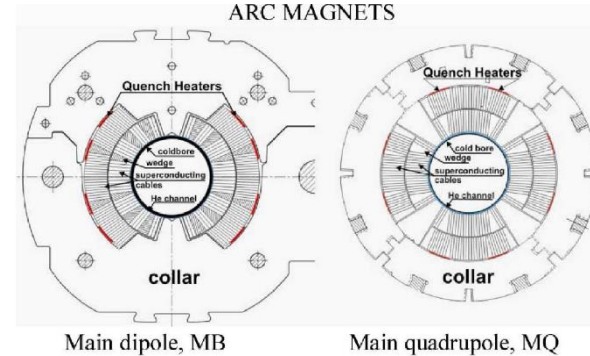
Ένα quench μπορεί να προκληθεί από 1 millijoule  $\rightarrow$  1-cent € από 5 cm.



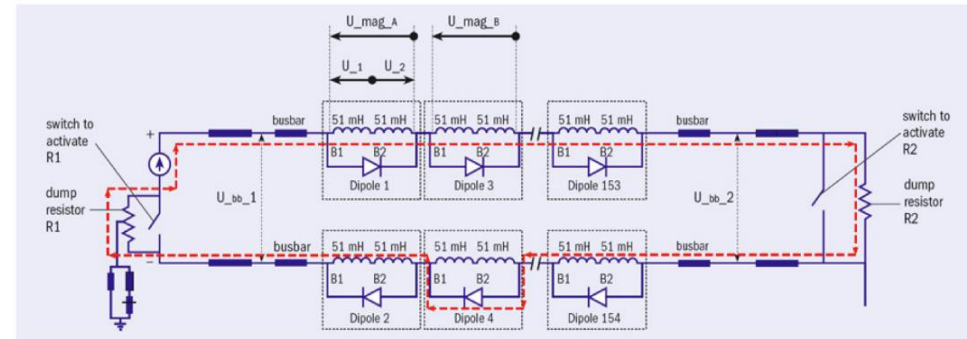
154 διπολικοί μαγνήτες εν σειρά  
Αύξηση ενέργειας  $\rightarrow$  μεγαλύτερες δυνάμεις  $\rightarrow$  μικροσκοπικές κινήσεις τυλιγμάτων  $\rightarrow$  quench!

1.29 GJ αποθηκευμένη ενέργεια ανά τομέα.  
Ενέργεια ενός μόνο μαγνήτη μπορεί να λιώσει 14 Kg μετάλλου.

## QPS: Quench Protection System

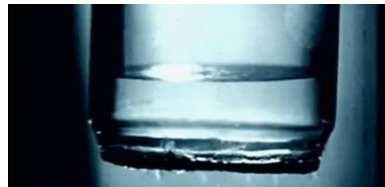
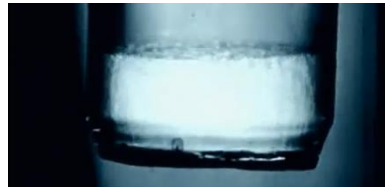
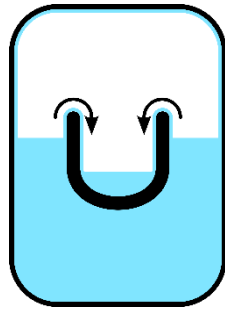
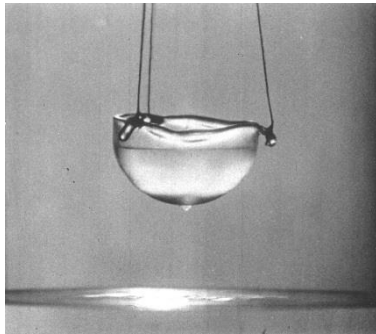


- Quench:
- 1) ενεργοποίηση συστήματος QPS
  - 2) ενεργοποίηση θερμικών αντιστάσεων
  - 3) τυλίγματα σε ωμική κατάσταση
  - 4) ενέργεια μοιράζεται σε όλο το μαγνήτη
  - 5) αφαίρεση αποθηκευμένης ενέργειας

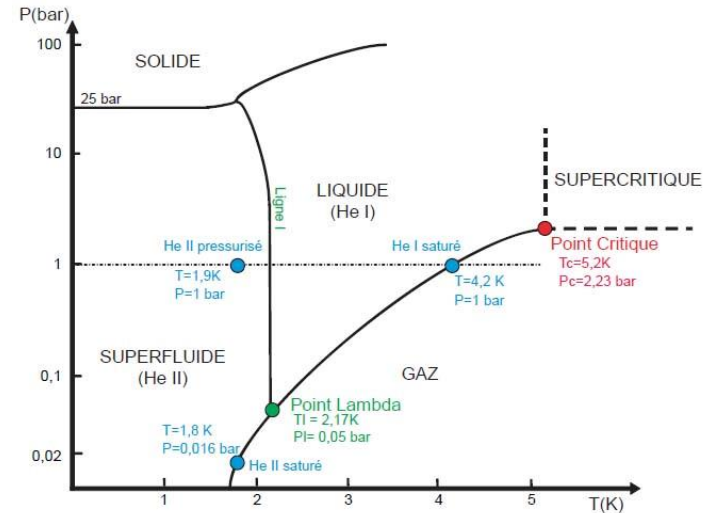


Μετά από ένα quench  $\rightarrow$  Σταδιακή (100's sec) αφαίρεση ενέργειας όλων των μαγνητών του τομέα.

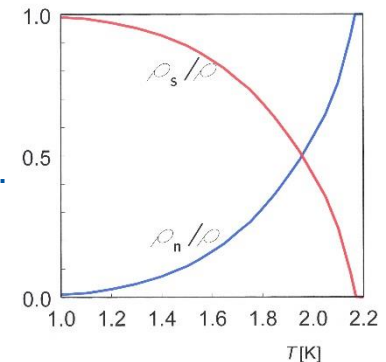
# Υπέρρευστο ήλιο (superfluid helium)



1937, Kapitsa et al.

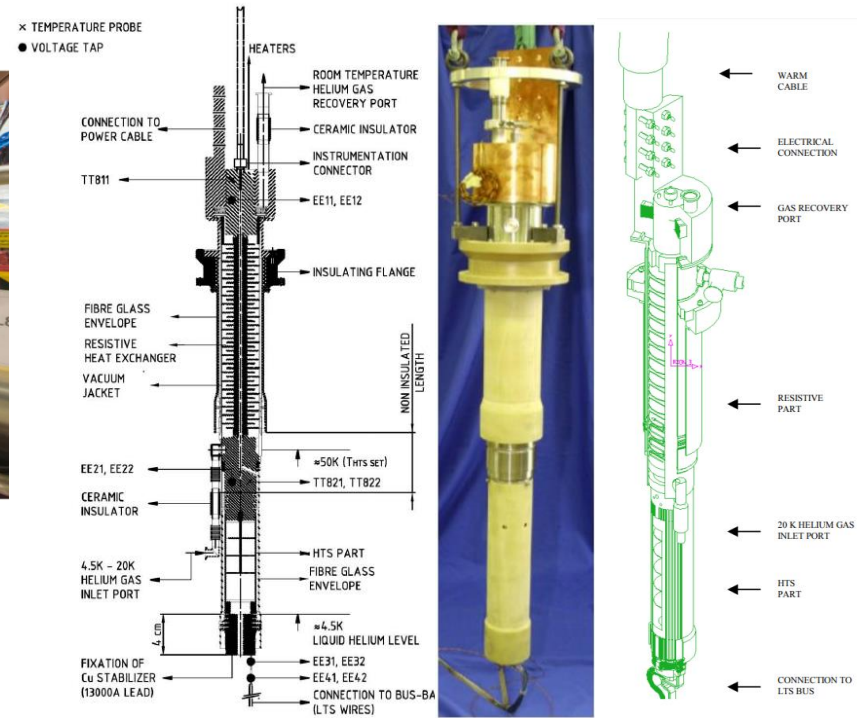
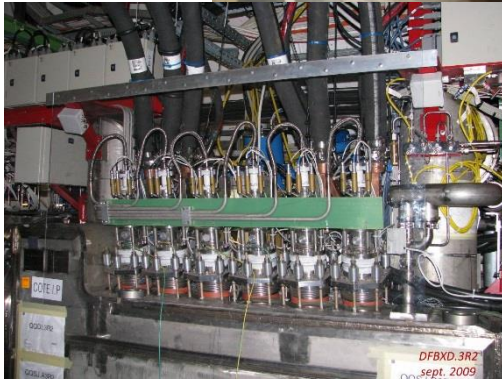


- Το ήλιο είναι υγρό για θερμοκρασίες  $T < 4.2\text{K}$ .
- Μετατρέπεται σε υπέρρευστο (για ένα %) όταν  $T < 2.17\text{K}$  ( $-270.98^\circ\text{C}$ ) ( $^4\text{He}$ ).
  - Π.χ για  $1.5\text{K}$  έχουμε  $\sim 90\%$  υπέρρευστο. Γράφημα δεξιά για normal/superfluid %.
- Υγρό με μηδενικό ιξώδες και μηδενική εντροπία.
- Καλύπτει όλες τις επιφάνειες του δοχείου και διαφεύγει από πορώδεις επιφάνειες.
- Μεγάλη ικανότητα απαγωγής θερμότητας.





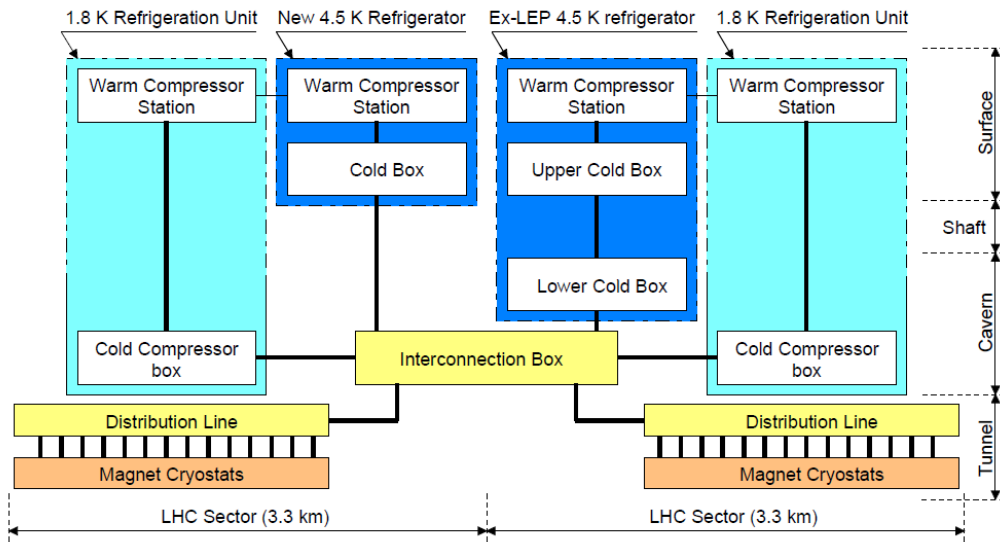
# Current leads



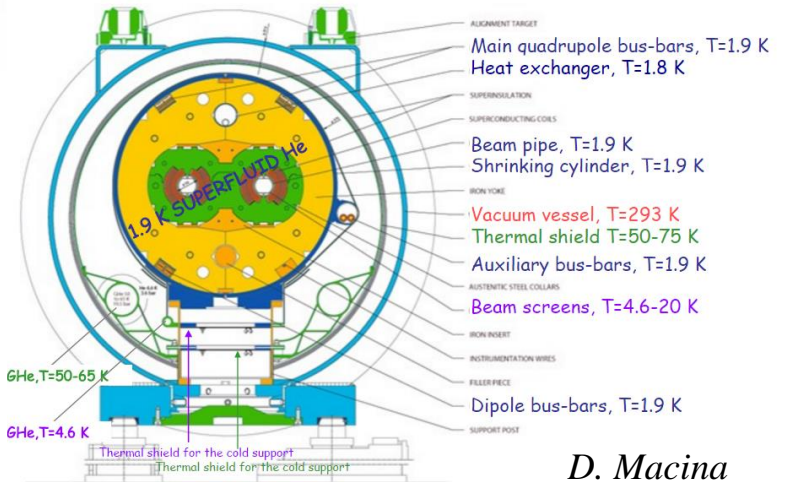
- Συστήματα τροφοδοσίας και μετάβαση από θερμοκρασίας δωματίου στα 4.5 K.
- ~ 3300 current leads για τροφοδοσία 60 A - 13000 A.
- Ελαχιστοποίηση μεταφοράς θερμότητας στο υγρό ήλιο 4.5 K.
- Για ρεύματα  $\geq 600$  A χρησιμοποιούνται HTS (High Temperature Superconductor).

# Κρυογενικά στον LHC

Typical LHC even point

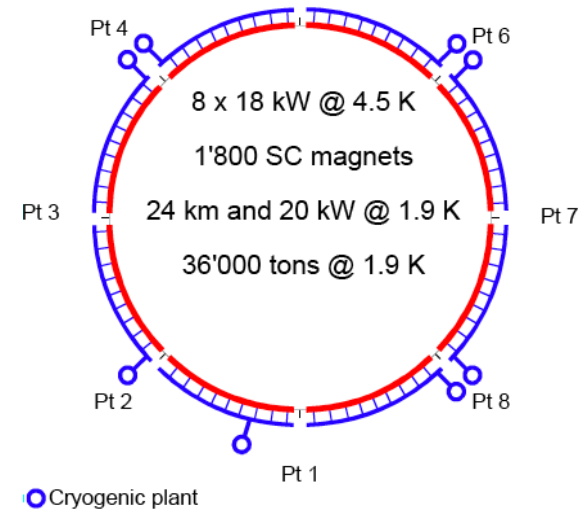


## LHC dipole cross-section



*D. Macina*

Pt 5



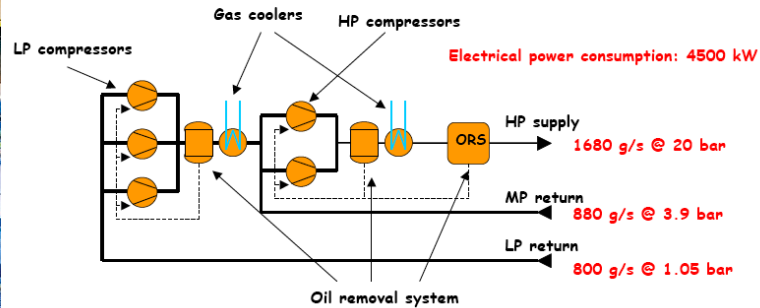
Συνολική κατανάλωση ισχύος: 40 MW.

- Υπεραγωγιμότητα + υπέρρευστο ήλιο → Μαγνήτες: 1.9 K (-271.25°C).
- 120 τόνοι ήλιου για να ψυχθούν 36.000 τόνοι μαγνητών.

# Κρυογενικές εγκαταστάσεις του LHC



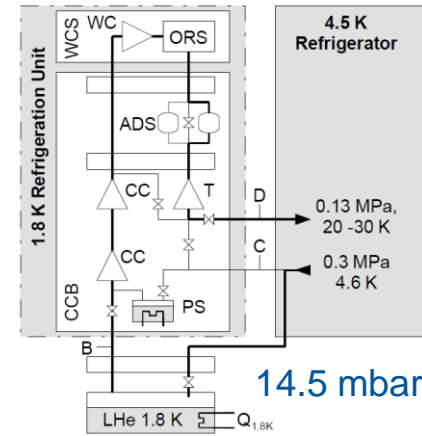
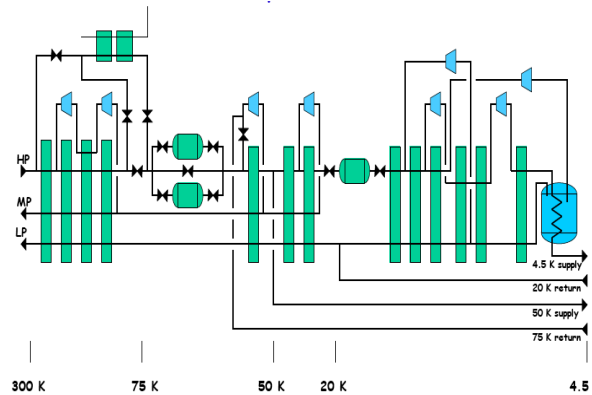
LHC warm compressor station



Δεξαμενές αποθήκευσης ηλίου



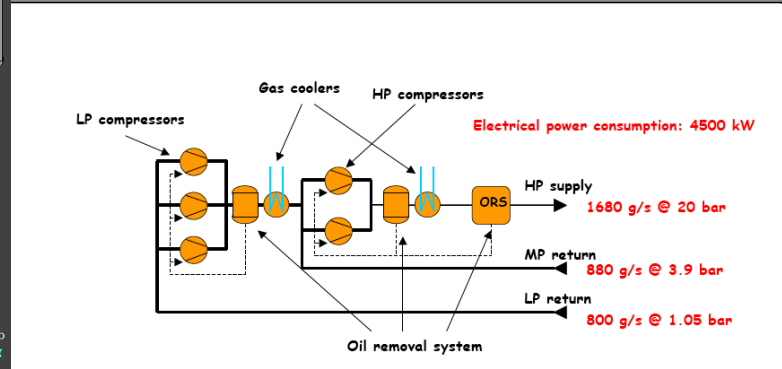
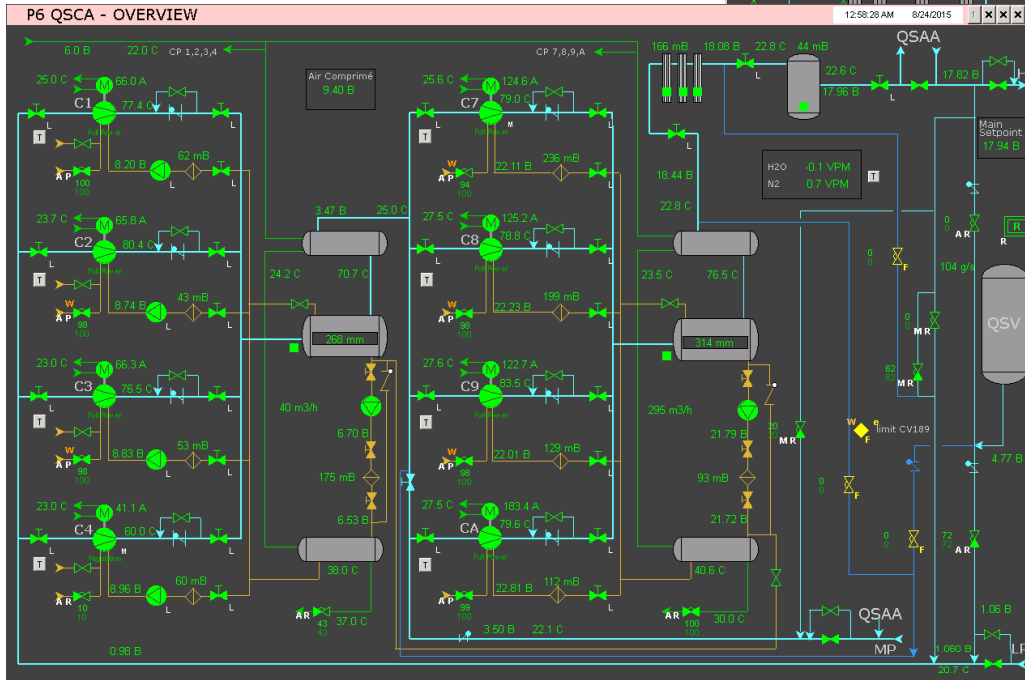
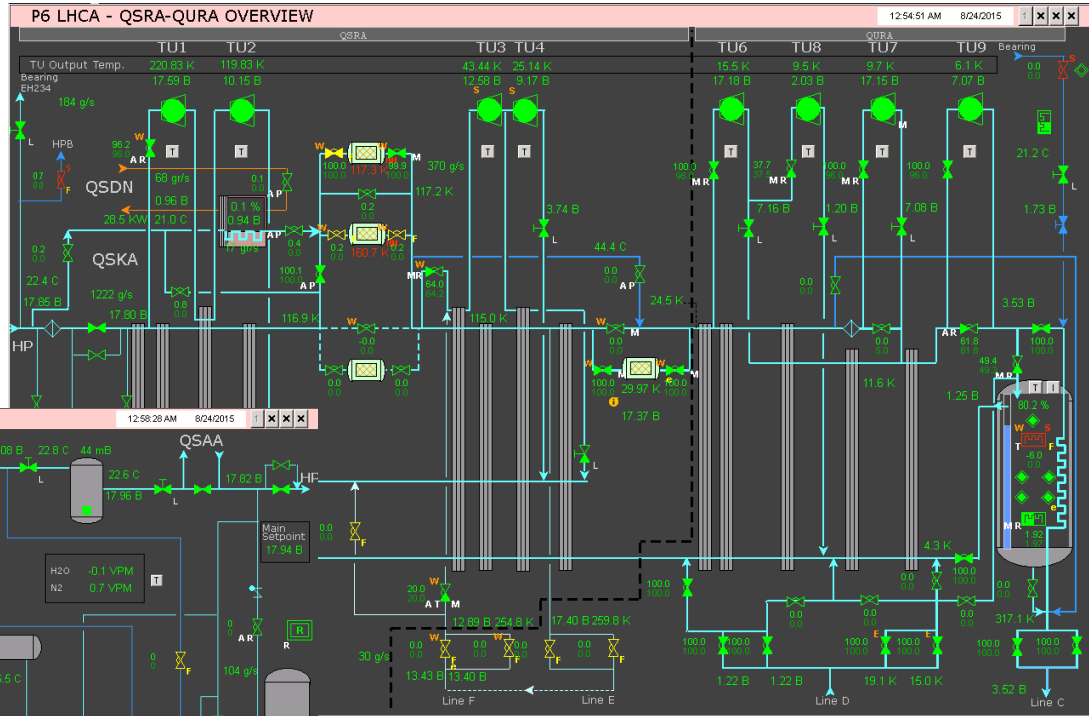
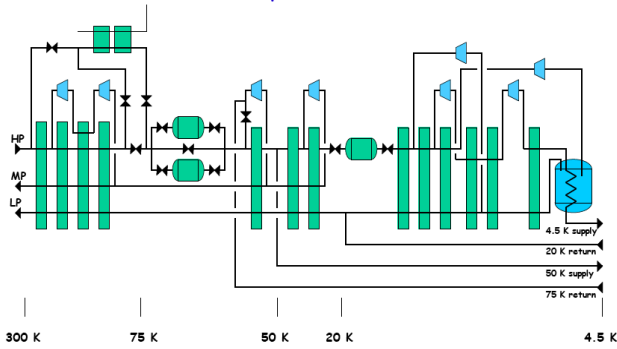
Cold box του 18 kW refrigerator @ 4.5 K



2.4 kW 1.8 K refrigeration unit

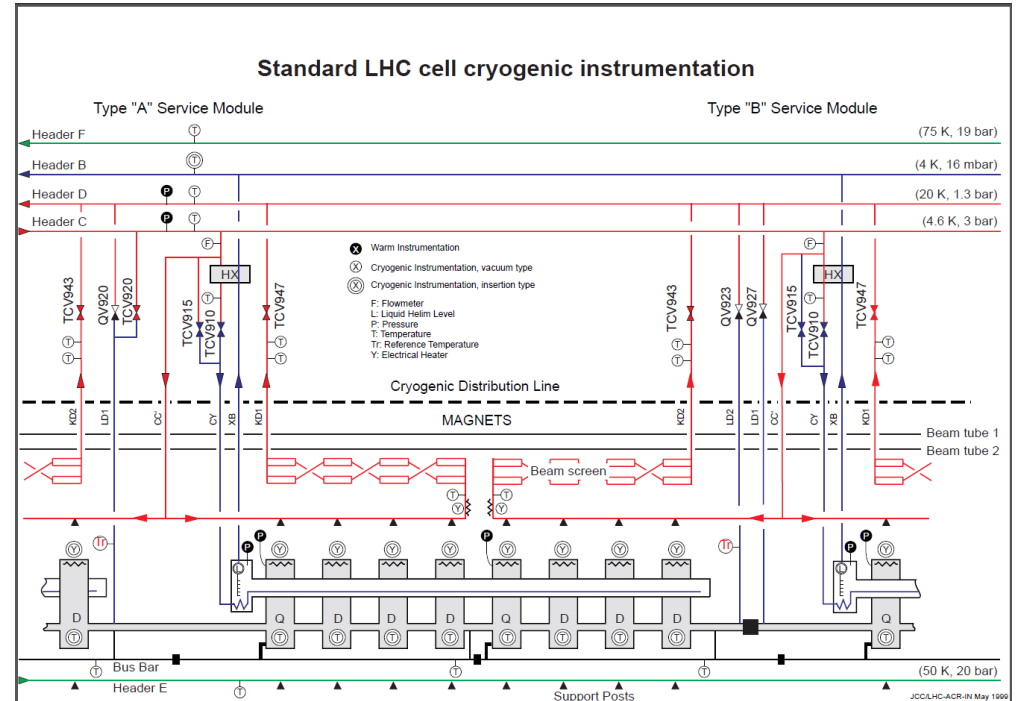
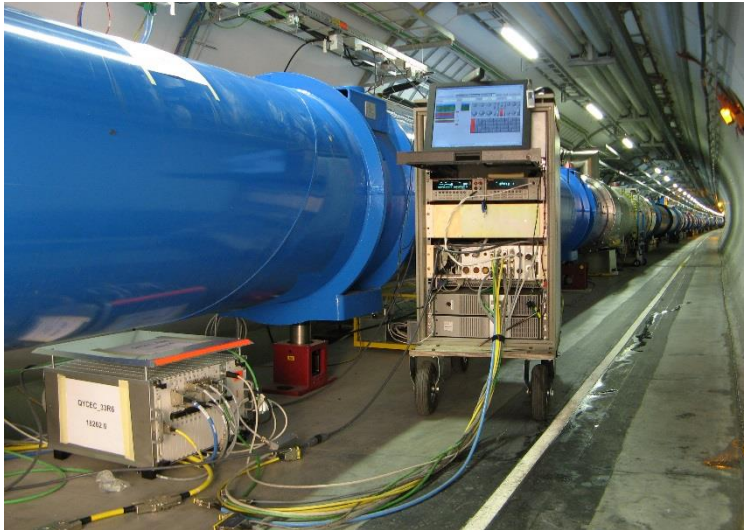


# Οθόνες χειριστών για refrigerator/compressor



# TE-CRG-CI

TE: Technology department  
 CRG: Cryogenics group  
 CI: Cryolab & Instrumentation section



800 WorldFIP crates

## Ενεργά κανάλια:

6500 Θερμοκρασία

800 Πίεση

500 Στάθμη υγρού ηλίου

2000 Θερμαντικές αντιστάσεις

1100 Μηχανικοί διακόπτες (I/O)

## Δραστηριότητες:

- Υποστήριξη υπάρχουσας υποδομής.
- Επίλυση σφαλμάτων.
- Σχεδίαση νέων συστημάτων.

# Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας

$$\log_{10} T(R) = \sum_0^9 A_i * \frac{1}{(\log_{10} R)^i}$$

equivalent to:

$$T(R) = 10^{\left(\sum_0^9 A_i * \frac{1}{(\log_{10} R)^i}\right)}$$

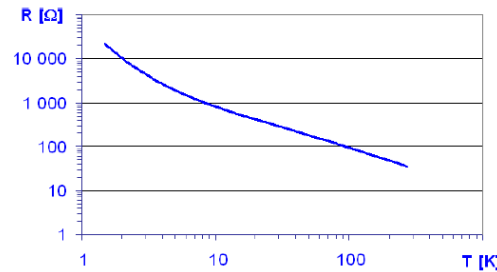
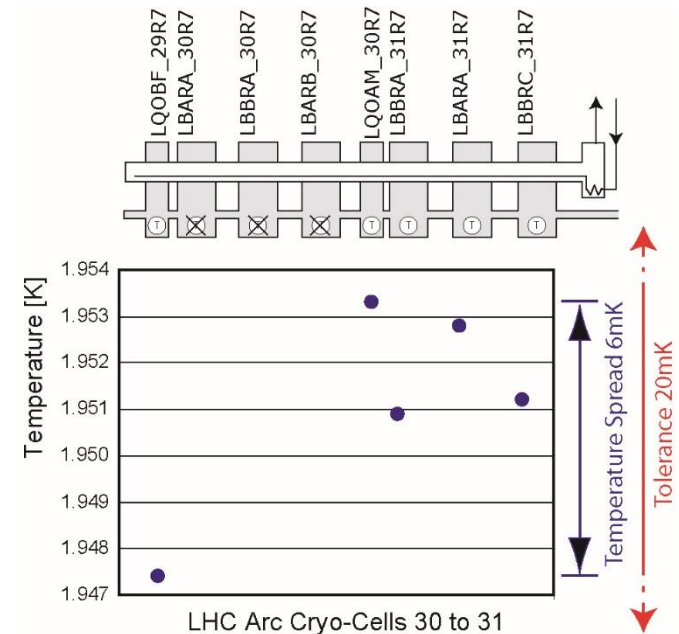


Figure 2 Example of a fit curve, T(R), log scale

The residuals obtained by using function  $T(R)$ , are within the uncertainty requirements given in Table 2.

Table 2 Uncertainty requirements as a function of the temperature range (including electronics and sensors uncertainty)

	Temperature Range [K]					
	1.6-2.2	2.2-4	4-6	6-25	20-50	50-300
<b>Uncertainty</b>	± 0.01 K	± 0.02 K	± 0.03 K	± 1 K	± 5 K	± 5 K

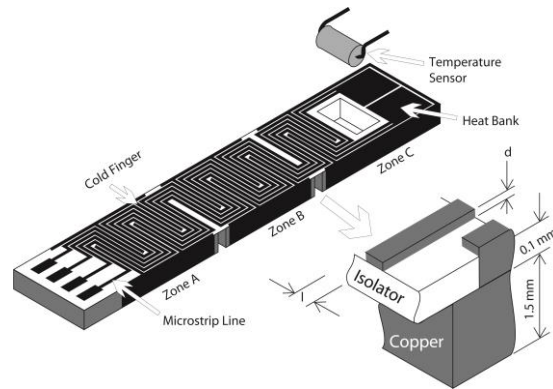
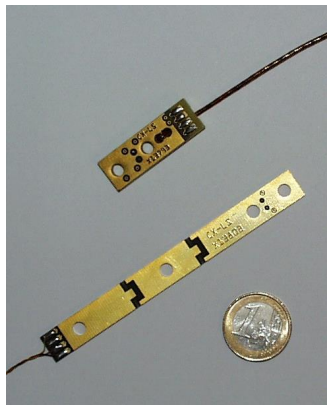
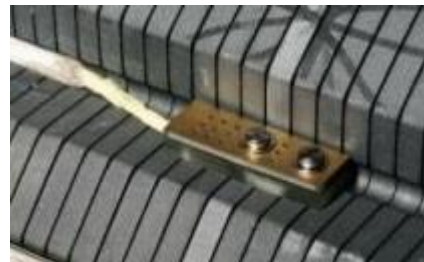


LHC Arc Cryo-Cells 30 to 31



# Το θερμόμετρο

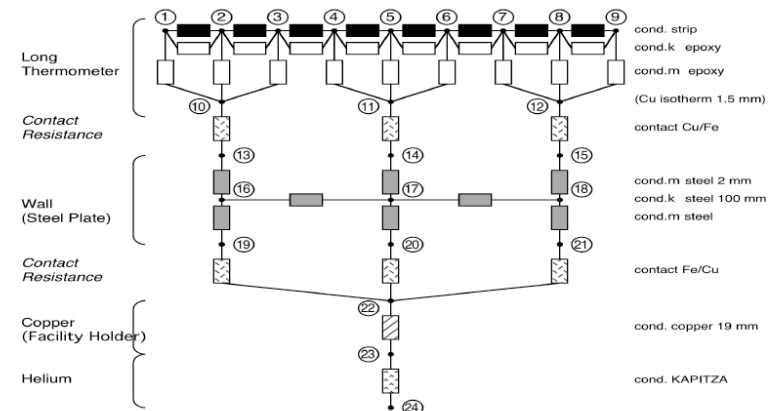
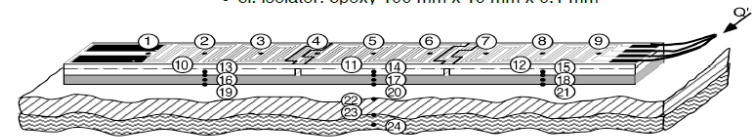
Θερμόμετρο = αισθητήρας + βάση (thermometric block)



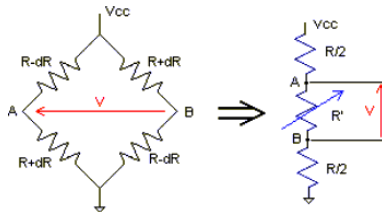
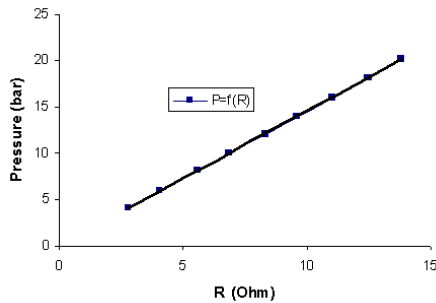
## Design

PCB technique => known technique => low cost, big series possible

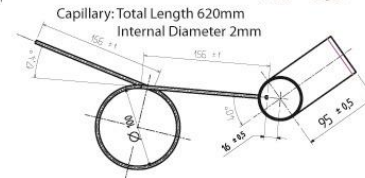
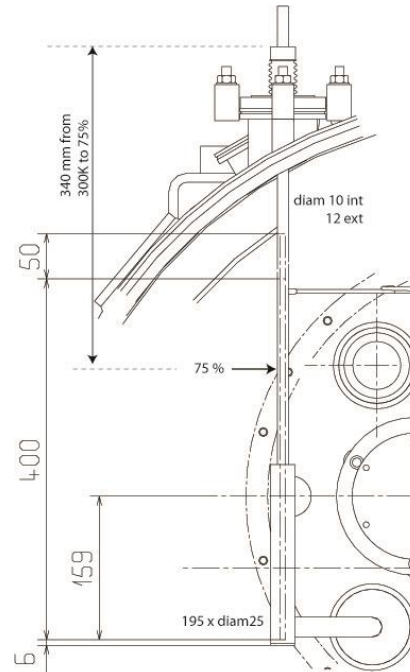
- strip: Cu , 700 mm x 0.1 mm x 0.01 mm
- el. isolator: epoxy 100 mm x 10 mm x 0.1 mm



# Αισθητήρες στάθμης ηλίου και πίεσης

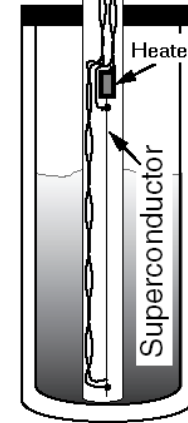


Αισθητήρας πίεσης



Αισθητήρας στάθμης LHe  
Υπεραγώγιμο καλώδιο.

Voltage Measurement and Current injection



Αλλαγή αισθητήρα στάθμης LHe

# Τα cryogenics instrumentation στον LHC

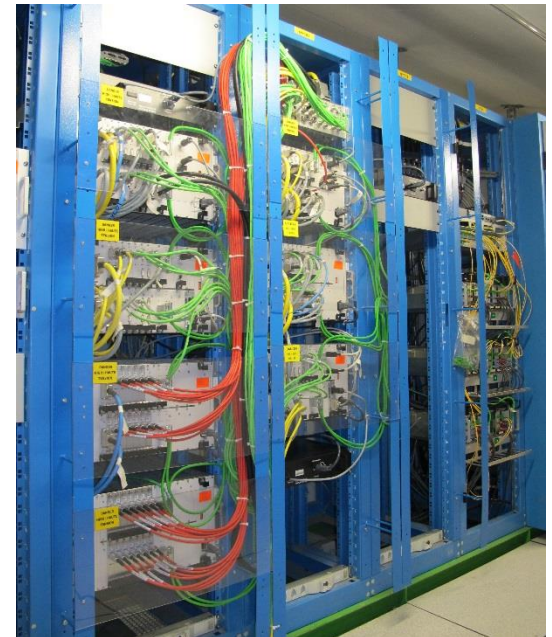
Κατά τον αρχικό σχεδιασμό αποφασίστηκε να τοποθετηθούν τα ηλεκτρονικά:

- A) Κάτω από τους μαγνήτες για τα καμπύλα τμήματα.
- B) Στους χώρους μειωμένης ακτινοβολίας για τα ευθύγραμμα τμήματα.

*Λόγω μεγάλου κόστους καλώδιωσης και πιθανών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.*

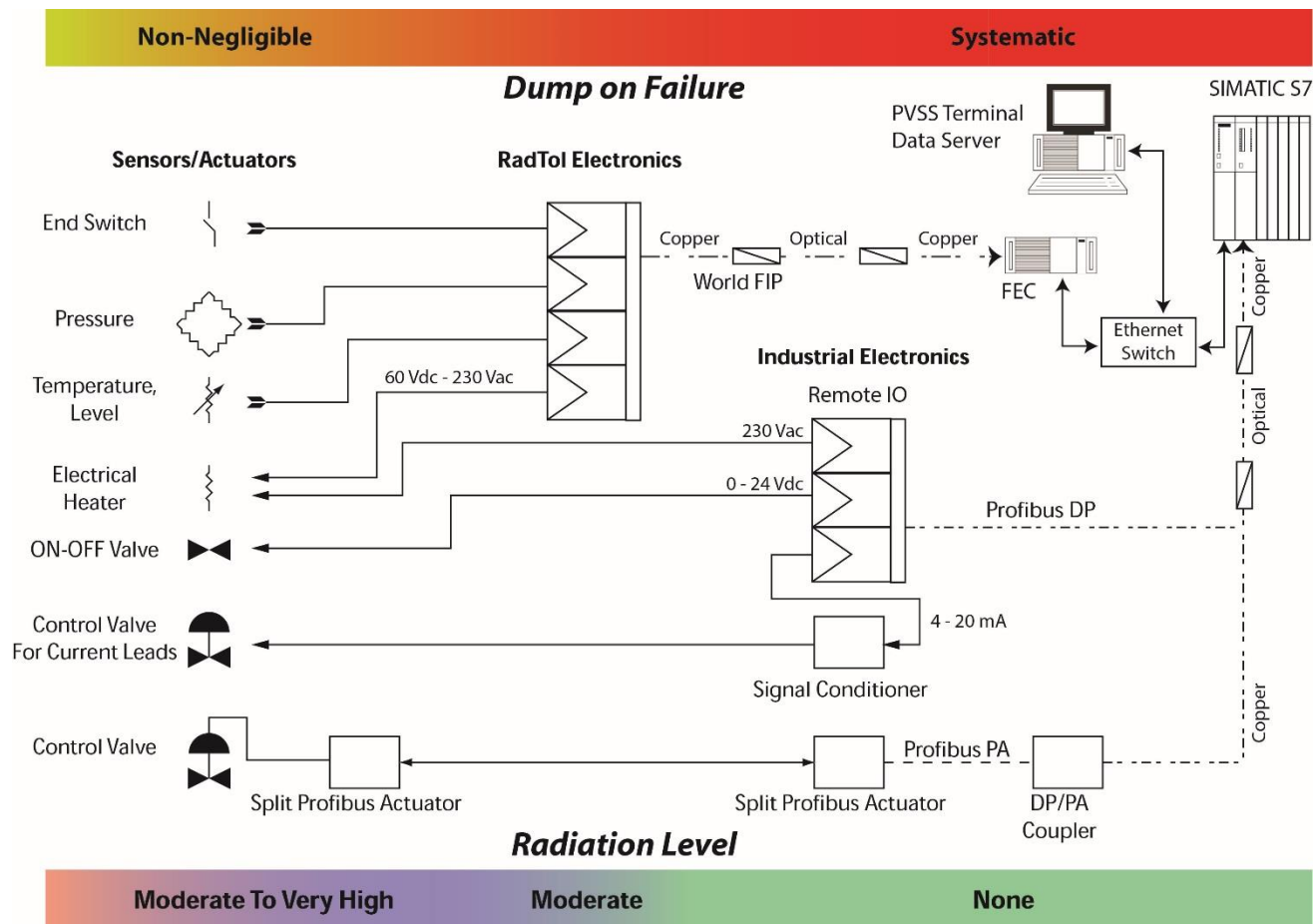


Κάτω από τους διπολικούς μαγνήτες



Σε υπόγειους χώρους μειωμένης ακτινοβολίας

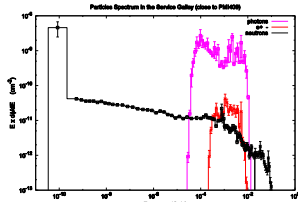
# Κρυογενικά συστήματα: Αισθητήρες & Αυτόματος έλεγχος



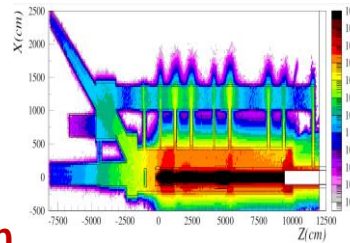
- Οι αισθητήρες δοκιμάστηκαν για την αντοχή τους στην ακτινοβολία κατά τον αρχικό σχεδιασμό.
- Τα ανθεκτικά στην ακτινοβολία ηλεκτρονικά σχεδιάστηκαν για τους υπόγειους χώρους του LHC.

# Φυσική ακτινοβολιών και επιπτώσεις στα ηλεκτρονικά

## Ενέργεια σωματιδίων

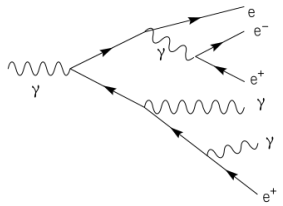


$h > 20 \text{ MeV}$



**Radiation Field**

$n, h, e, \dots > 100 \text{ KeV}$



**EM cascade**

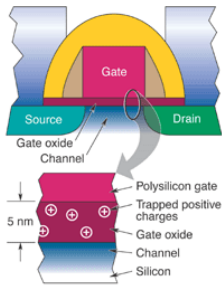
## Σφάλματα & Βλάβες σε ημιαγωγούς

**Single Event Effects**

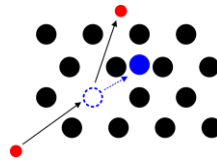
**Effect in the Device**

**Dose (TID)**

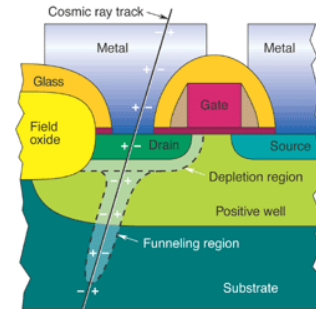
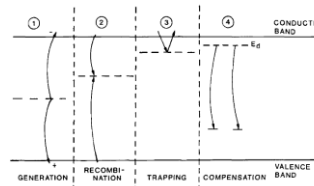
**Displacement Damage**



**TID**



**DD**



**SEEs**

**TID:** Συσσώρευση ιονίζουσας δόσης → Δημιουργία ζευγών electron-hole. Αλλαγή των χαρακτηριστικών λειτουργίας (π.χ. Transistors/Mosfets).

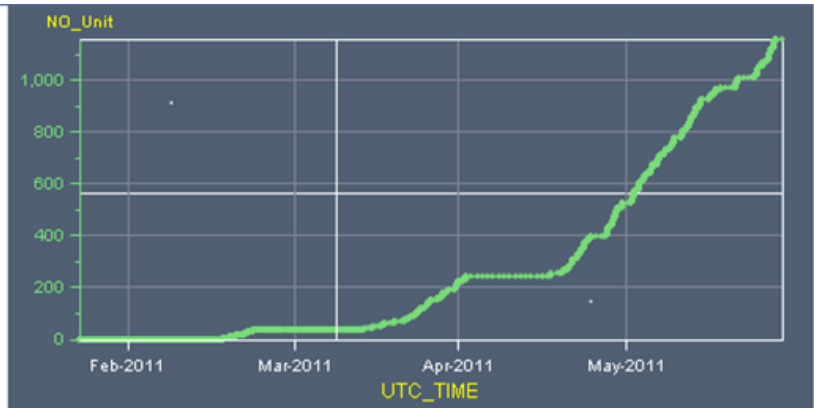
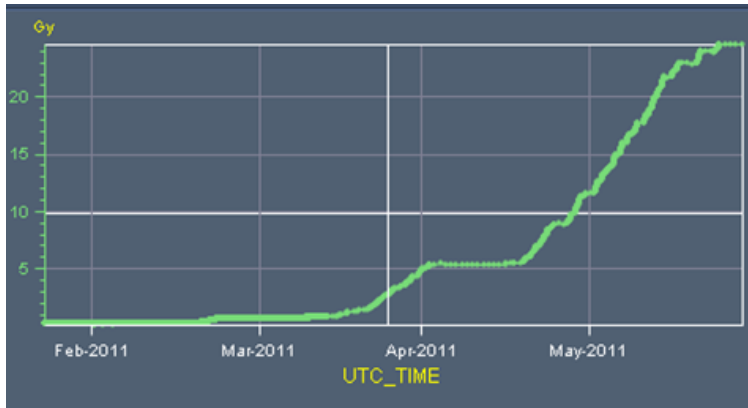
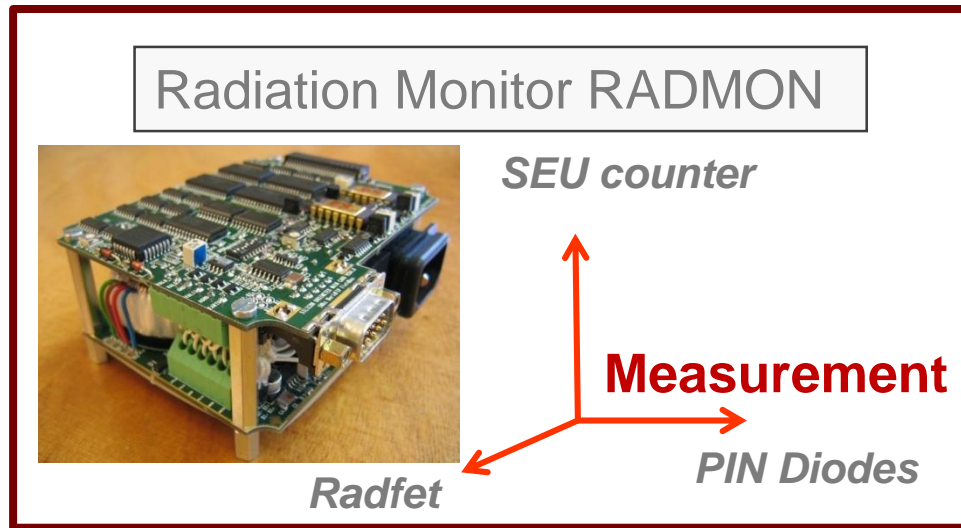
**DD:** Συσσώρευση σφαλμάτων λόγω συγκρούσεων/μετατοπίσεων ατόμων στο πλέγμα. Αλλαγή των ιδιοτήτων του υλικού (πχ. Ενέργεια μετάβασης).

**SEEs:** Στατιστικό φαινόμενο: Μεταβατικό/Μόνιμο/Καταστροφικό. Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων → Πιθανότητα ενεργοποίησης κυκλωμάτων.

*J. Scarpulla et al.*

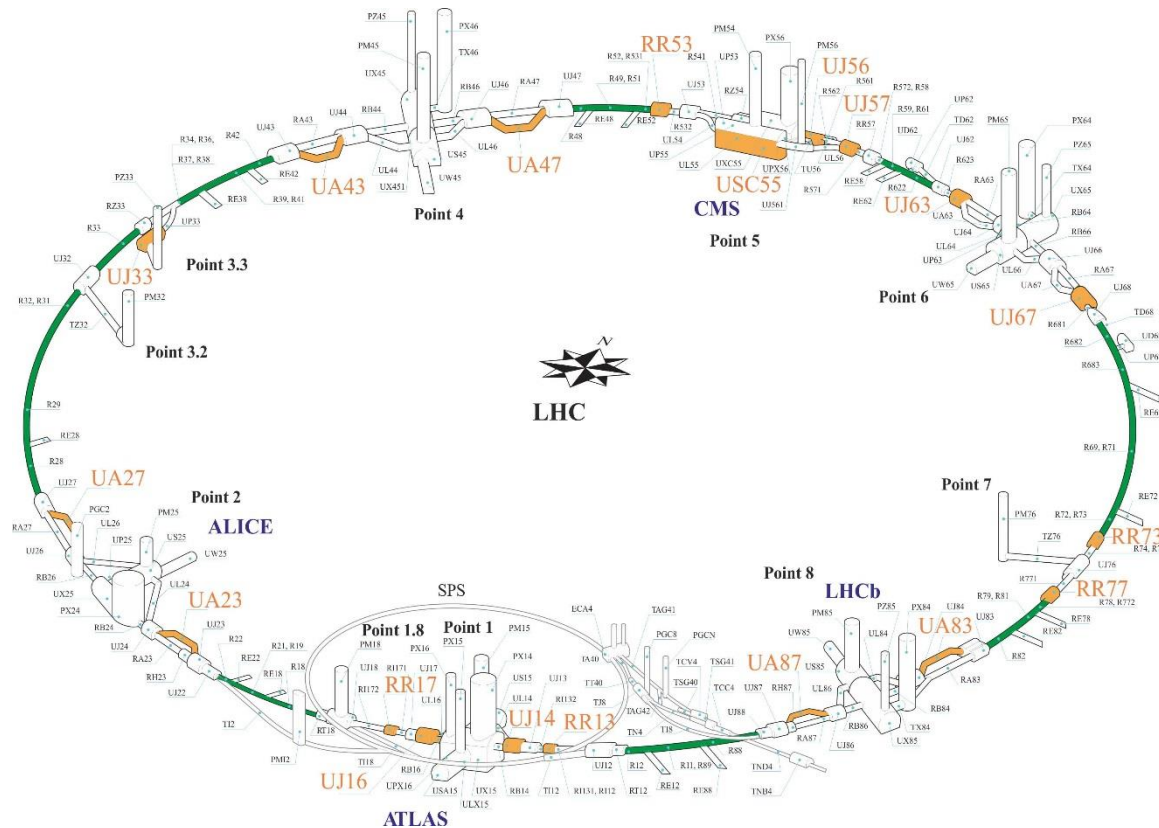


# Μετρητές ακτινοβολίας στον LHC

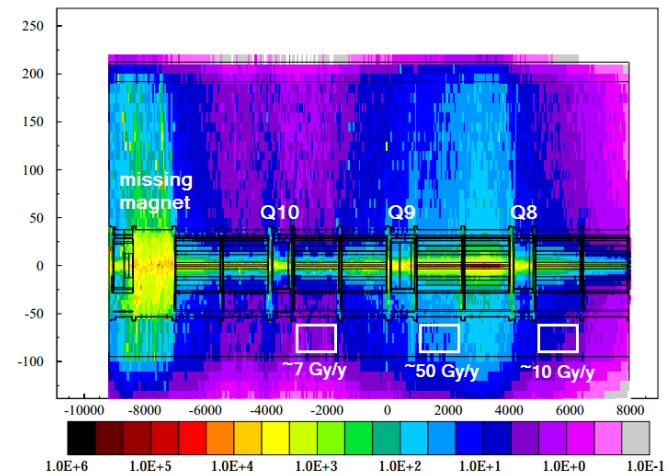
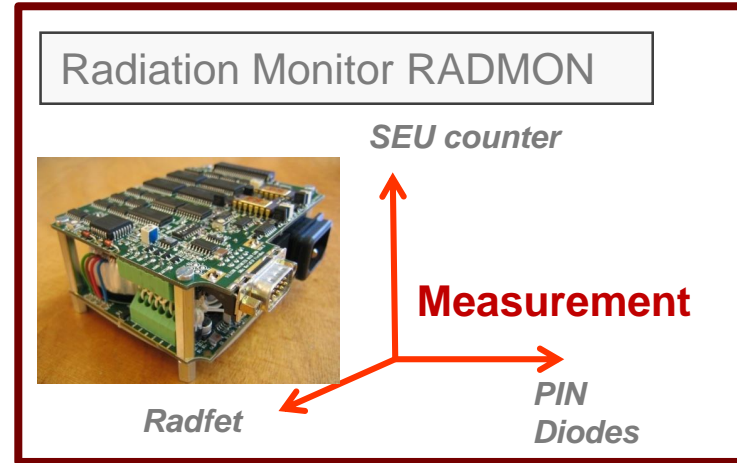




# CRYO instrumentation - Τοποθεσίες ηλεκτρονικών συστημάτων

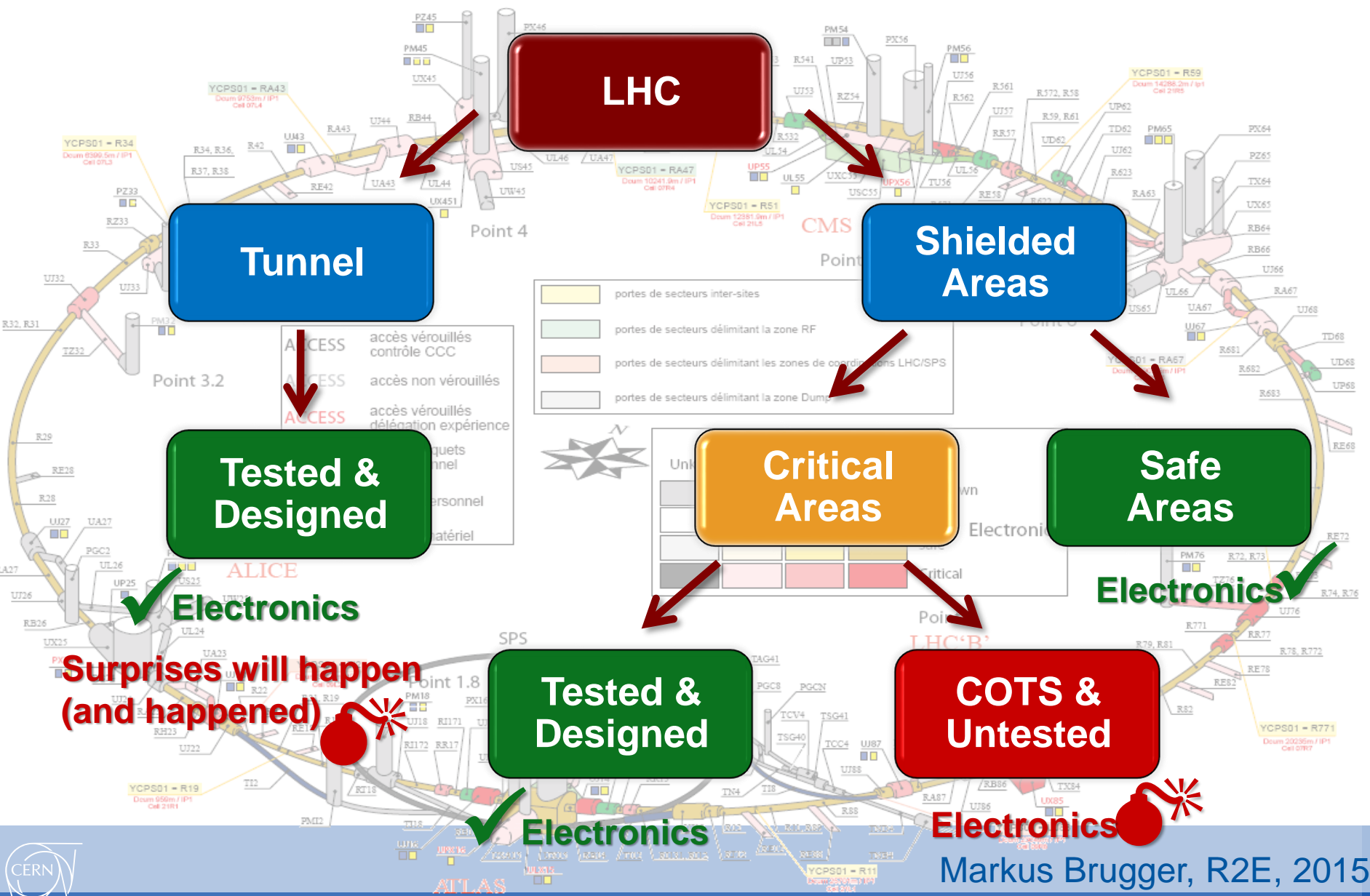


Δοκιμές αντοχής μέχρι τα 1000 Gy



FLUKA Simulations  
Fynbo, Stevenson, 2002

# The LHC Challenge



**LHC**

**Tunnel**

**Shielded Areas**

**Tested & Designed**

**Critical Areas**

**Safe Areas**

**Surprises will happen (and happened)**

**Tested & Designed**

**COTS & Untested**

**Electronics**

**Electronics**

**Electronics**

**Electronics**



Markus Brugger, R2E, 2015

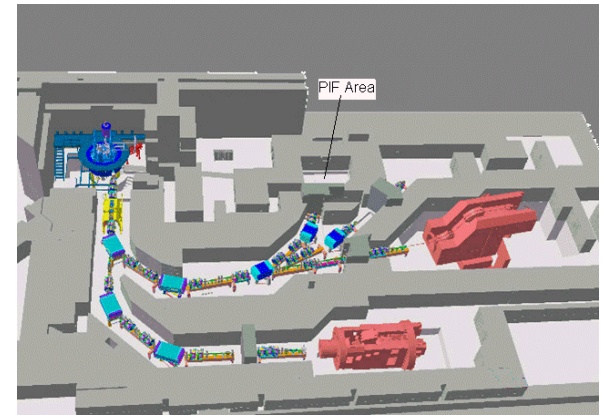
# Εγκαταστάσεις δοκιμών αντοχής στην ακτινοβολία



CNRAD, CNGS, CERN  
400 GeV/c πρωτόνια σε στόχο  
άνθρακα/μόλυβδο.  
Μικτό περιβάλλον ακτινοβολίας.  
(Πλέον εκτός λειτουργίας)



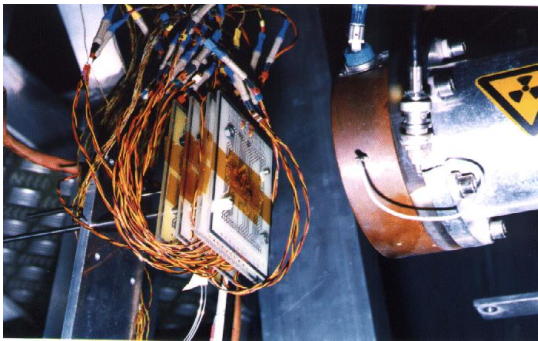
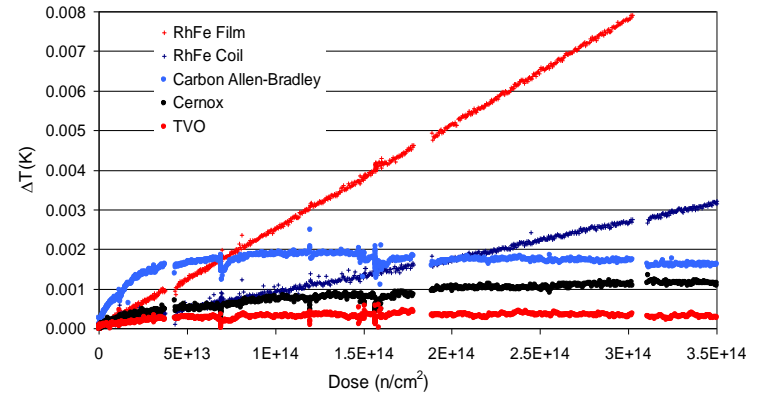
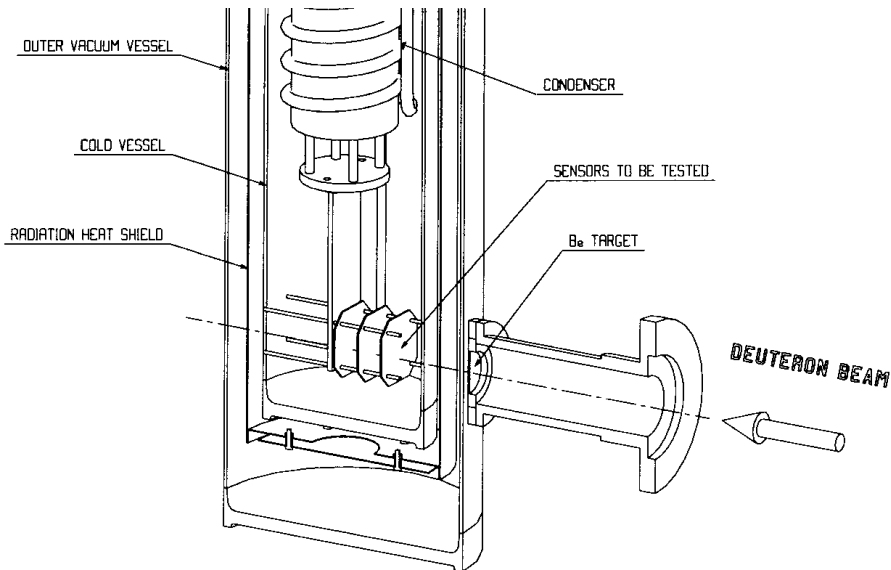
CHARM, CERN  
24 GeV/c πρωτόνια σε ποικιλία στόχων.  
Μεγάλη ποικιλία περιβάλλοντων ακτινοβολίας.



PIF, PSI, Villigen, CH  
Παρασιτική εγκατάσταση σε κλινική  
πρωτονοθεραπείας.  
Πρωτόνια: 230 MeV

**Και διάφορες άλλες εγκαταστάσεις με νετρόνια, ακτίνες γάμμα, κλπ**

# Δοκιμές στους αισθητήρες



## Δοκιμές σε αισθητήρες:

- Θερμοκρασίας
- Πίεσης
- Στάθμης υγρού ηλίου

Δοκιμές στα SARA (Grenoble, FR) και CERI (Orleans, FR)

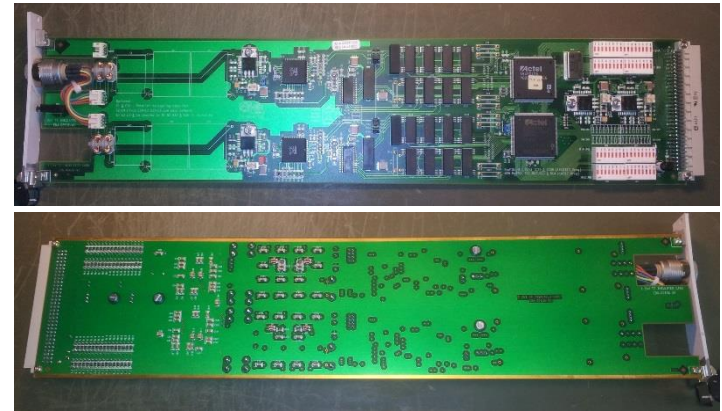


# 2 νέες κάρτες για το Run 2 του LHC

Electrical heaters for the beam screen (EHBS)



TT Insulated 1.2KV  
(for 600A current leads)

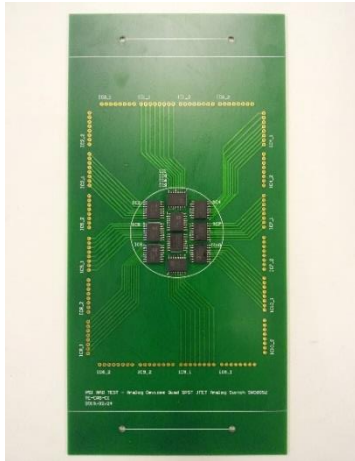


Για το run #2 του LHC, 2 νέες κάρτες σχεδιάστηκαν και εγκαταστάθηκαν.

EHBS (271 κάρτες) σε όλον τον επιταχυντή.

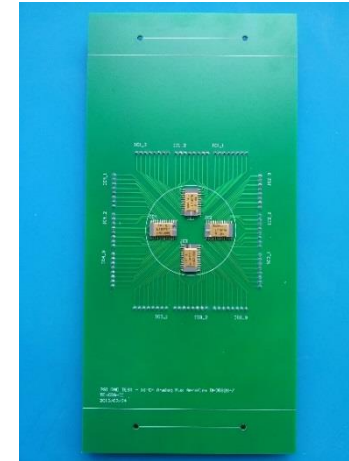
TT cards (765 κάρτες) σε περιοχές με χαμηλότερη ακτινοβολία.

# Επιλογή ηλεκτρονικών



Κοινά ηλεκτρονικά  
Commercial Off The Shelf (COTS)

- + \$ (€), Φθηνά
- Αμφίβολη ανθεκτικότητα στην ακτινοβολία
- Αναγκαίες δοκιμές
- + Διαθεσιμότητα
- + Χωρίς περιορισμούς



Σχεδιασμένα ηλεκτρονικά  
για ανθεκτικότητα στην ακτινοβολία

- + \$\$\$ (€ € €), Ακριβά
  - + Ανθεκτικά στην ακτινοβολία
  - + Απαιτούνται ελάχιστες δοκιμές
  - Διαθεσιμότητα
  - - Περιορισμοί περί όπλων\*
- \* ITAR (International Traffic in Arms Regulations)

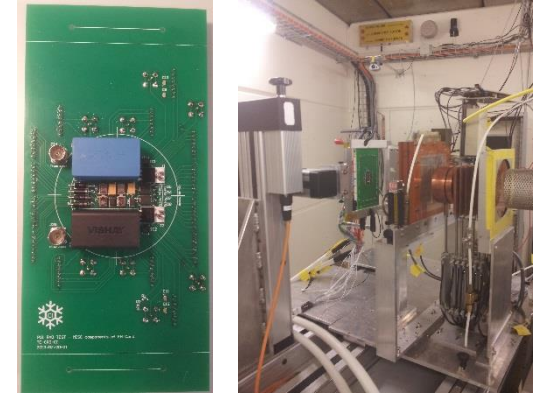
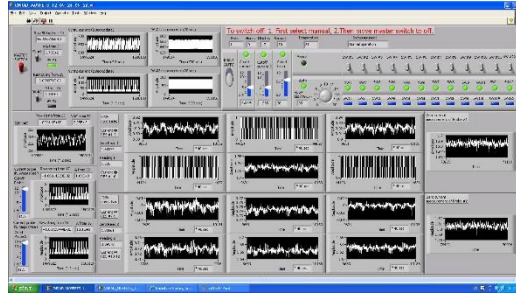
- Προσπάθεια για χρήση μόνο COTS λόγω μεγάλου αριθμού εξαρτημάτων και κόστους.
- Οι εταιρείες ανθεκτικών ηλεκτρονικών δεν ξέρουν πως να κοστολογήσουν μεγάλες ποσότητες.
- Αφίβωλη η τελική έγκριση και η μελλοντική διαθεσιμότητα των ανθεκτικών ηλεκτρονικών.
- Επιλογή ανθεκτικών ηλεκτρονικών μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις.
- Η ανθεκτικότητα των κοινών ηλεκτρονικών εξαρτάται από τη σειρά παραγωγής ακόμη κι εντός της ίδιας εταιρείας.



# Δοκιμές μεμονωμένων ηλεκτρονικών



CNRAD/CNGS  
Mixed-Field  
JUN-DEC/2012



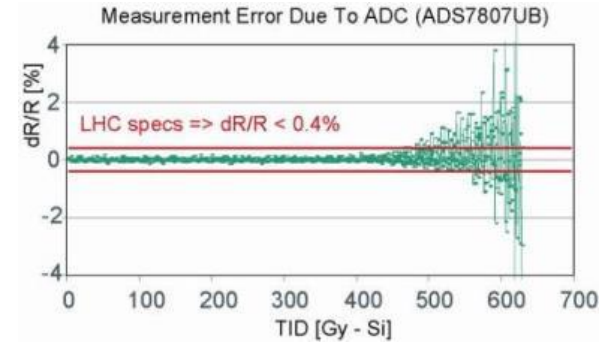
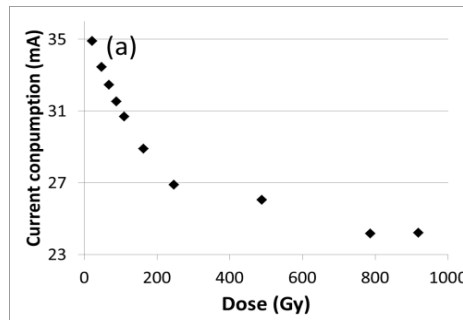
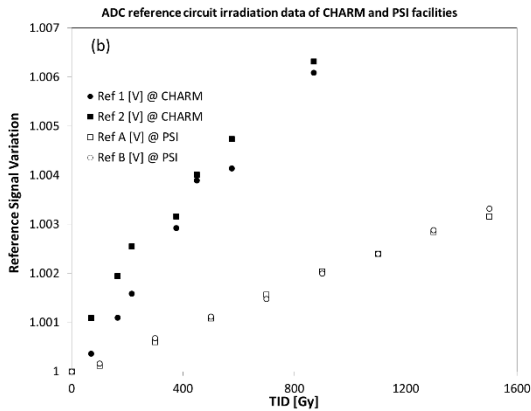
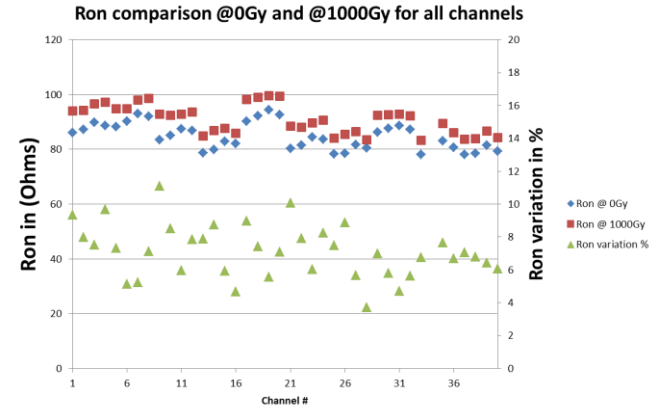
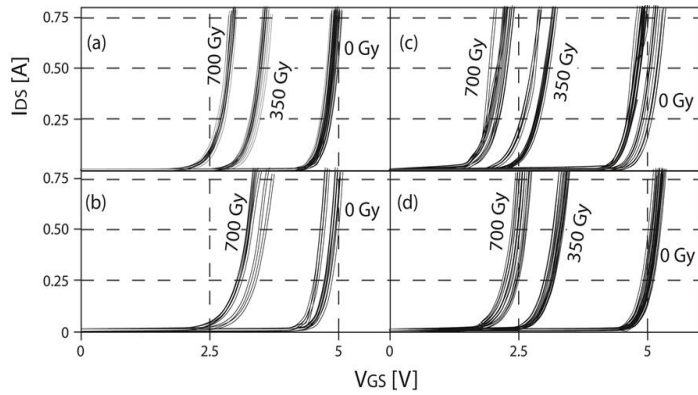
PSI (230 MeV p) FEB/2013  
(TID, SEE, DD)



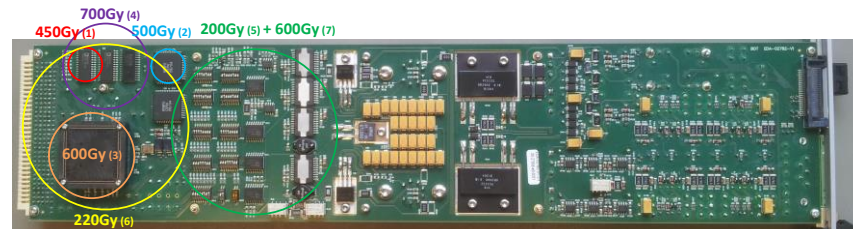
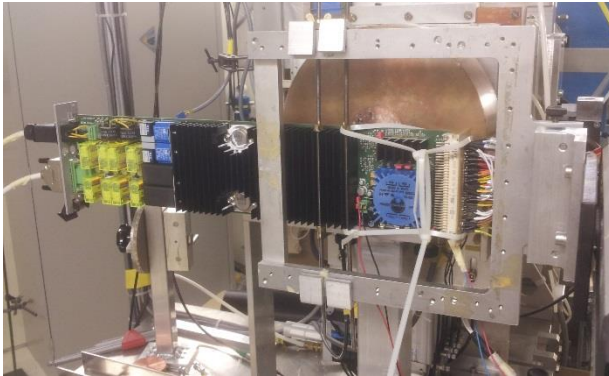
Multiple components  
PSI, JUL/2013

Η εύρεση ανθεκτικού COTS πολυπλέκτη οδήγησε σε εξοικονόμηση >450 CHF/κάρτα  
Σε ένα προτζεκτ: 200 KCHF.

# Επίδραση ακρινοβολίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά - παραδείγματα



# Δοκιμές στο πρωτότυπο



Prototype board  
PSI, NOV/2013

## Τεχνικές μείωσης επιπτώσεων ακτινοβολίας

Triple Modular Redundancy (TMR)  
Κωδικοποίηση, Φιλτράρισμα,  
Safe state-machines  
Watchdogs

Λογισμικό/Φιλτράρισμα

Επανεκκίνηση λογισμικού

Διακοπή τροφοδοσίας

Διορθώσεις υλικού

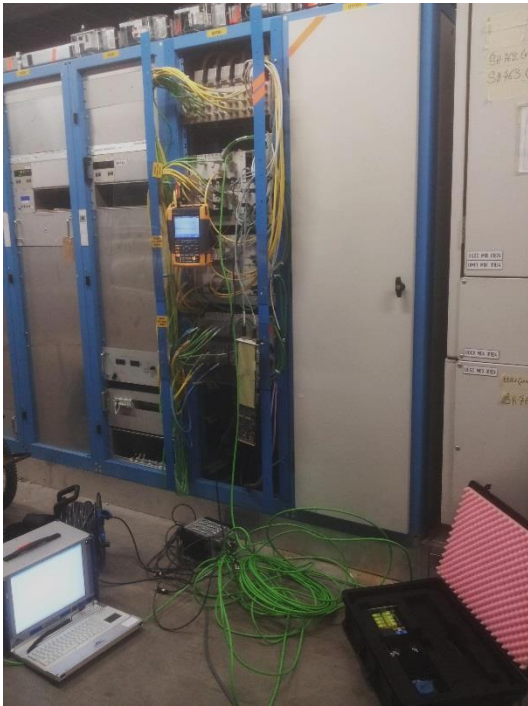
Ανώτερο λογισμικό

Παρεμβάσεις ειδικού

+ άλλα (πχ. Antifuse FPGA, down-clocking, safe statemachines, ...)



# Επιβεβαίωση καλής λειτουργίας και έγκριση για παραγωγή

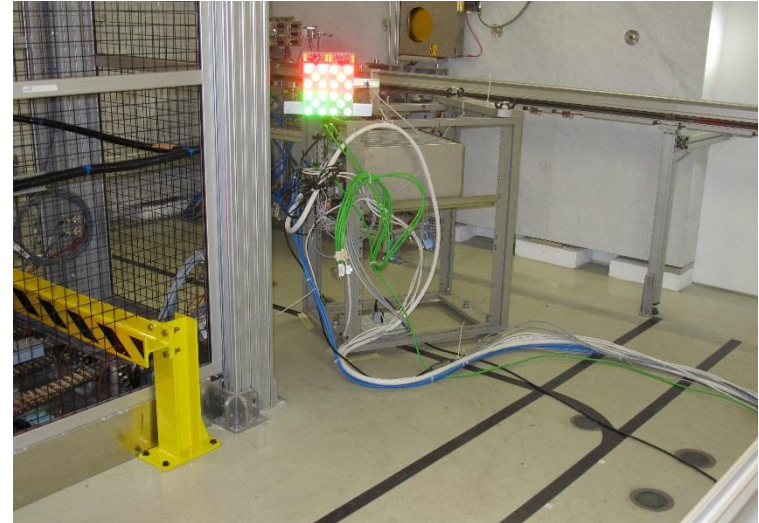
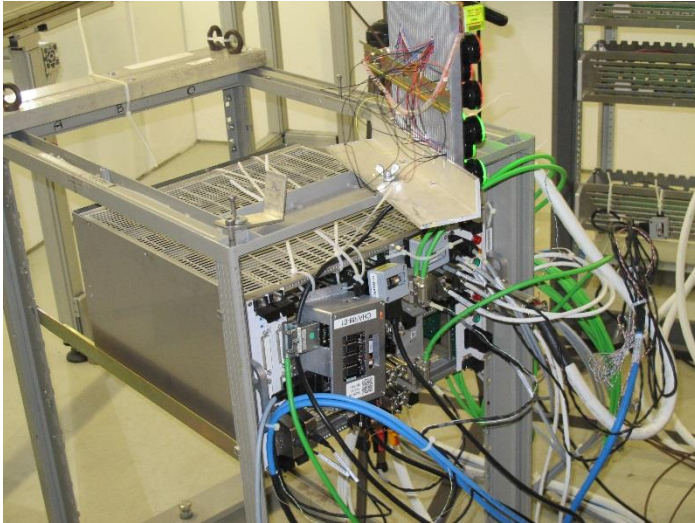


Testing EHBS at P8 (UA87; QYC01&QYC04) crates with long cables (50m&100m) and external load.



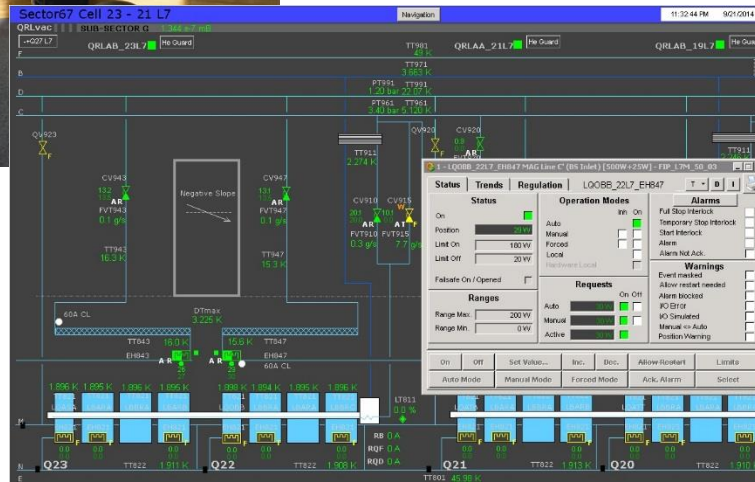
Remote online tests and PLC tests.

# Επιβεβαίωση ανθεκτικότητας (στην ακτινοβολία) σειράς παραγωγής

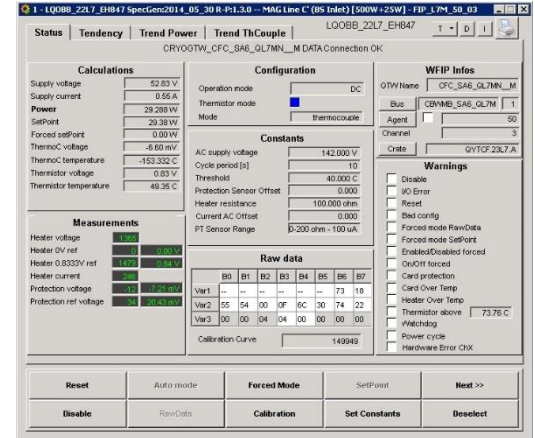


Δοκιμές στο CHARM, CERN σε στατιστικό δείγμα καρτών

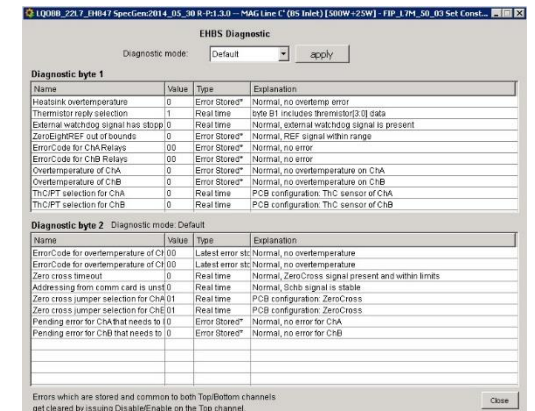
# Οθόνες απεικόνισης και χειρισμού



Οθόνες χειριστών, αυτοματοποιημένο σύστημα, 1 χειριστής 24/7.  
Στόχος: Συνεχής διαθεσιμότητα χωρίς σφάλματα.



## Οθόνη αισθητήρων (expert)



## Οθόνη αντιμετώπισης σφαλμάτων



# Ερωτήσεις



[www.cern.ch](http://www.cern.ch)