CERN

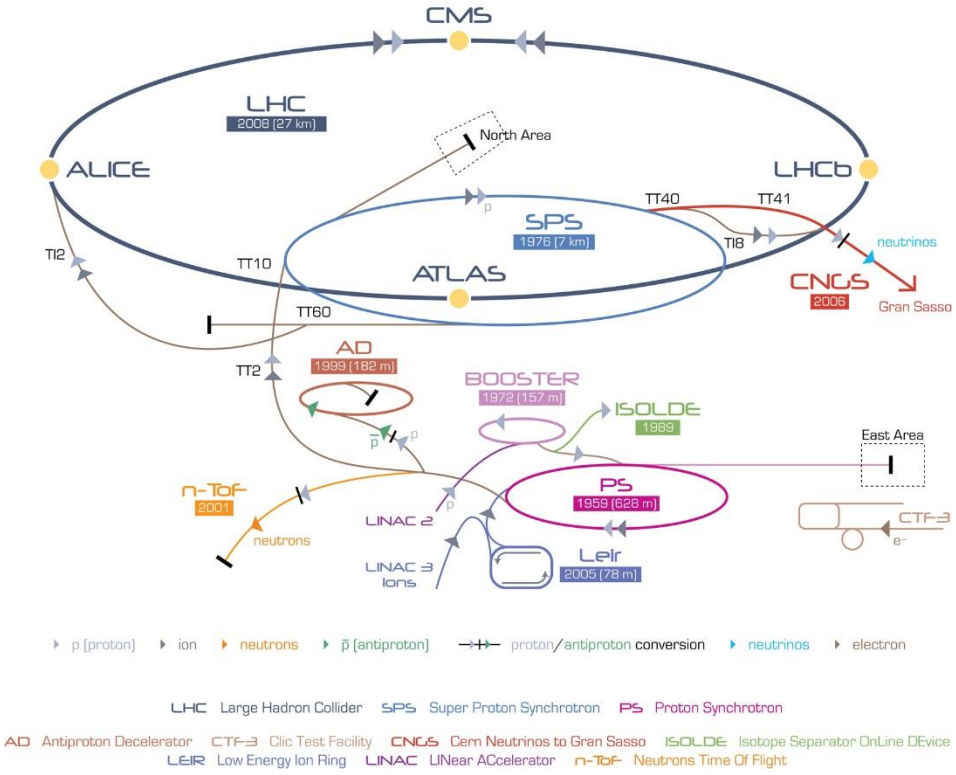
TRIKOUPIS Nikolaos, TE-CRG-CI

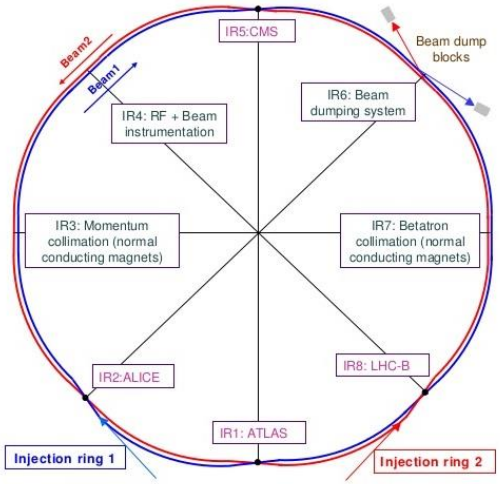
Introduction to Cryogenics and radiation tolerant electronics for the LHC CRYO instrumentation

Σύνοψη θεμάτων

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

Το σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN και ο LHC



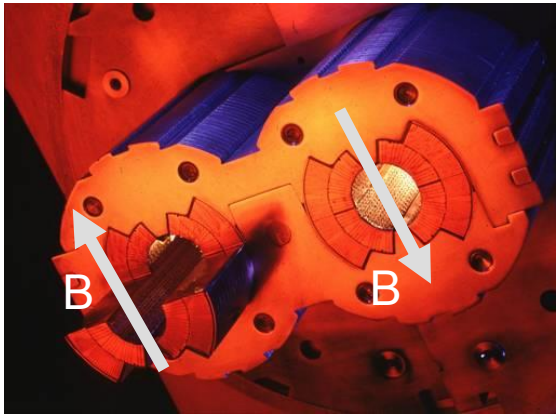


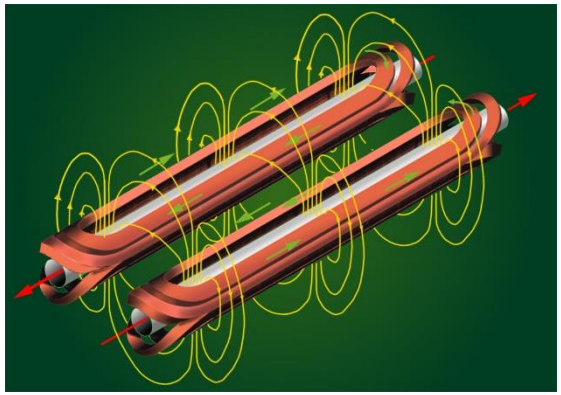
LHC: 27 Km

Μαγνήτες

- Διπολικοί για στρέψη της δέσμης αδρονίων.
- Τετραπολικοί για focus/defocus.
- 6,8,12,.. –πολικοί για διορθώσεις.

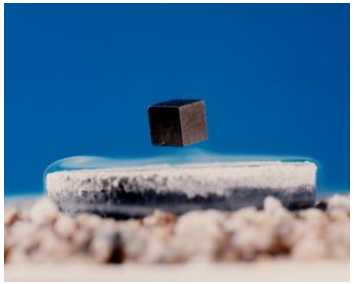
Διπολικοί μαγνήτες

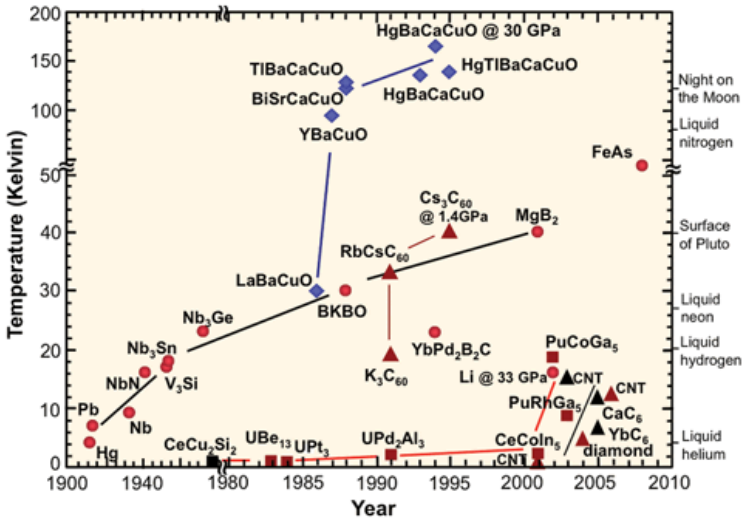


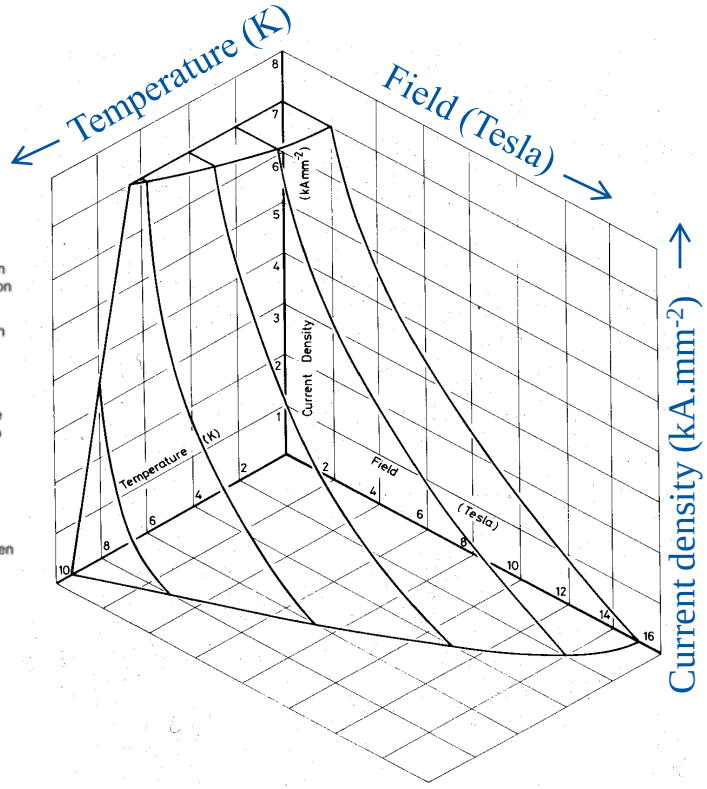


- Για 14 TeV (7 TeV ανά δέσμη) και r = 2680m: 8.33 Tesla μαγνητικό πεδίο διπόλων με 11.850 Amperes.
- Αναγκαία η χρησιμοποίηση υπεραγώγιμων καλωδίων.

Υπεραγωγιμότητα





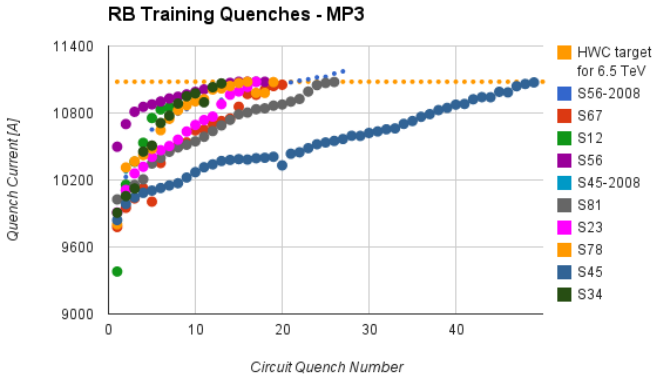


Οι υπεραγωγοί είναι υλικά που επιτρέπουν την διέλευση του ρεύματος με μηδενική αντίσταση.

Κράμα Νιοβίου-Τιτανίου (Niobium-titanium, NbTi)
Υπεραγώγιμο για T < 10 K και H < 15 T.
Συμβατό με τις προδιαγραφές του LHC και εφικτό να κατασκευαστεί σε βιομηχανική κλίμακα.

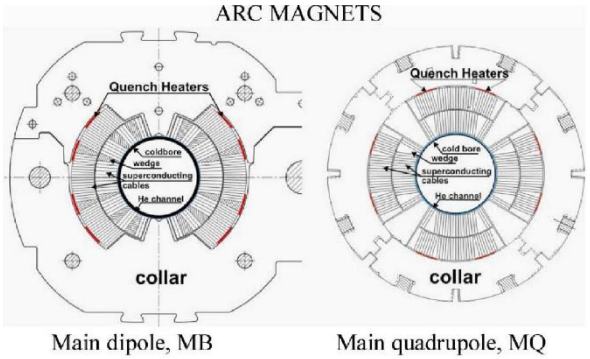
«Εκπαίδευση» μαγνητών, «quench» και το QPS

Quench: Η μετάβαση των καλωδίων ενός μαγνήτη από υπεραγώγιμη σε ομική κατάσταση.
1 millijoule είναι ικανό να προκαλέσει quench = 1-cent € από 5 cm.

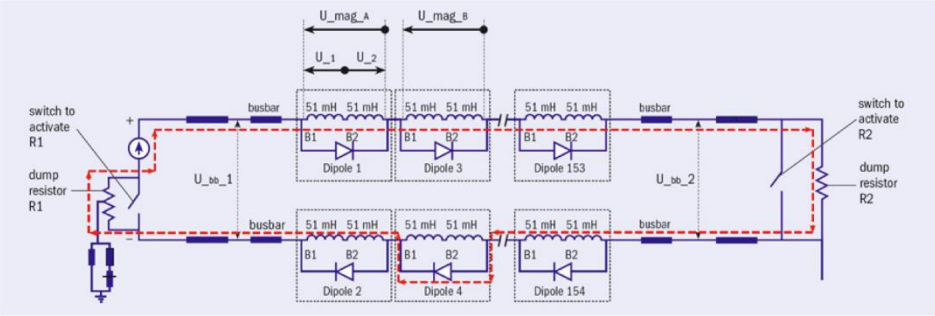


154 διπολικοί μαγνήτες εν σειρά
Αύξηση ενέργειας → μεγαλύτερες δυνάμεις → μικροσκοπικές κινήσεις τυλιγμάτων → quench!

QPS: Quench Protection System

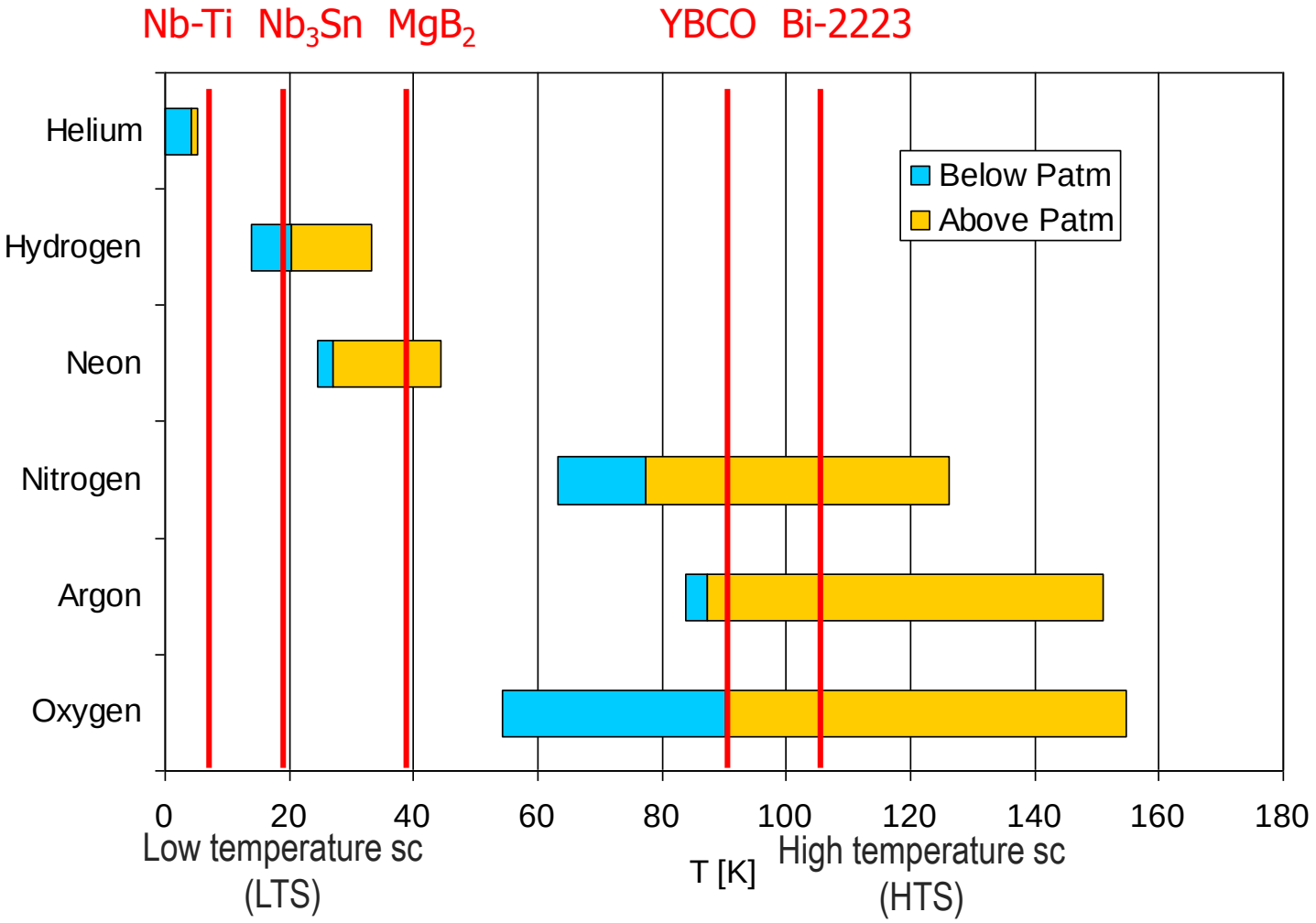


Quench → ενεργοποίηση συστήματος QPS → τυλίγματα σε ομική κατάσταση → ενέργεια μοιράζεται σε όλο το μαγνήτη

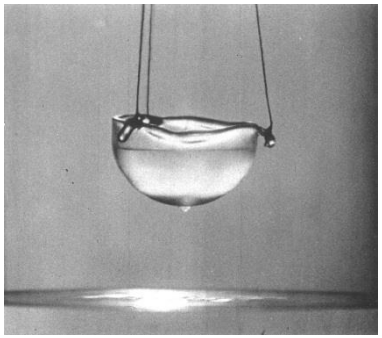


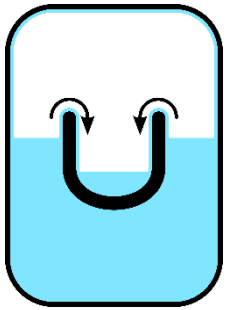
Μετά από ένα quench → Σταδιακή (100's sec) αφαίρεση ενέργειας όλων των μαγνητών του τομέα.

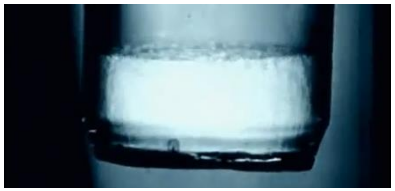
Όρια δράσης κρυογενικών υγρών

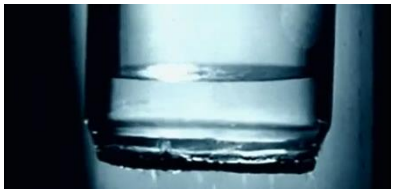


Υπέρρευστο ήλιο (superfluid helium)

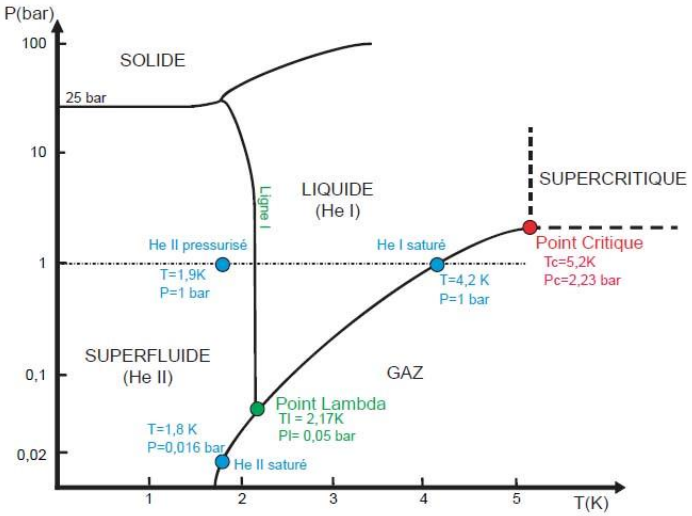




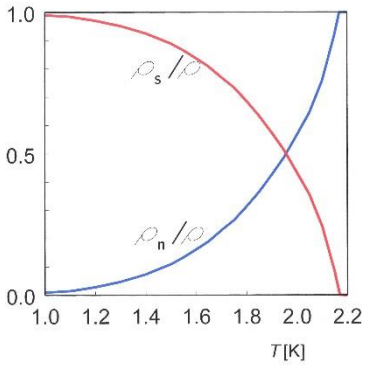




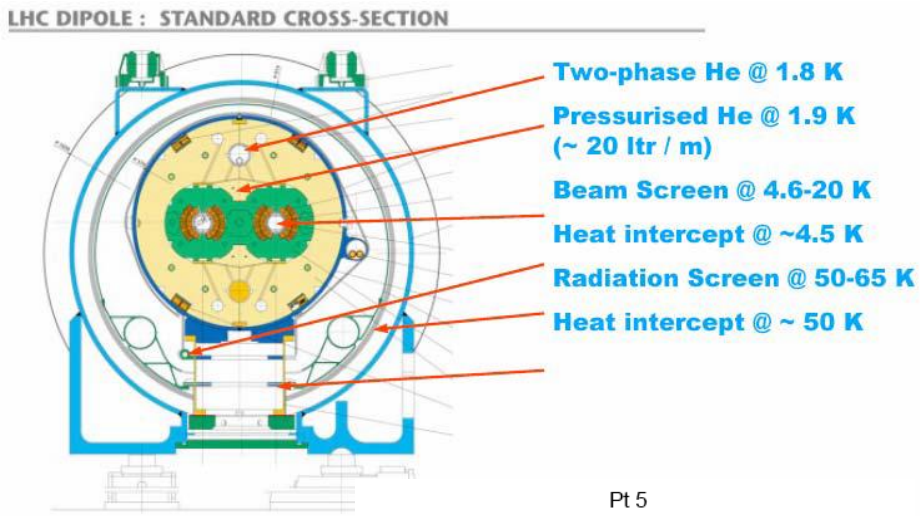
1937, Kapitsa et al.



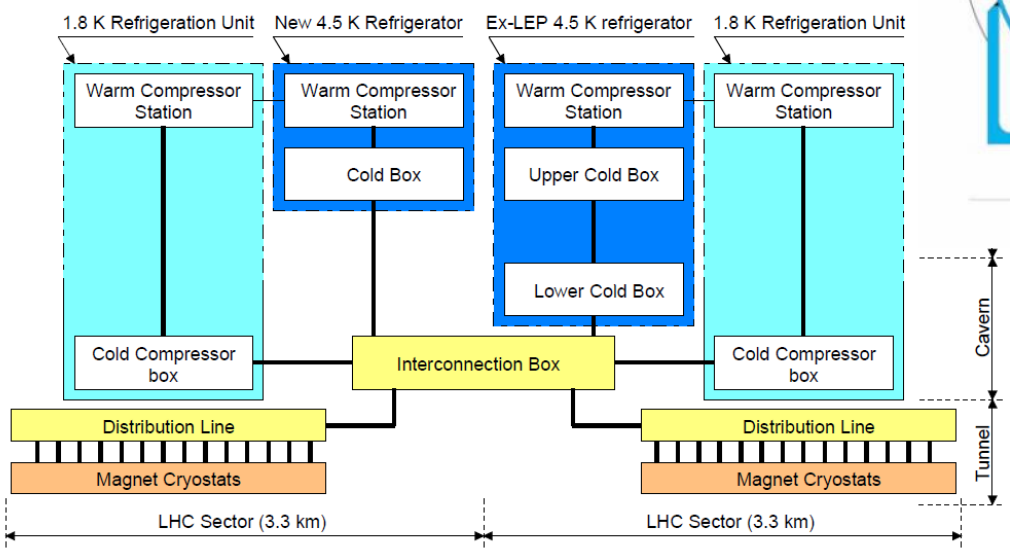
- Το ήλιο είναι υγρό για θερμοκρασίες T <4.2K.
- Μετατρέπεται σε υπέρρευστο (για ένα %) όταν T <2.17K (-270.98°C) (^{4}He).
  - Π.χ για 1.5K έχουμε ~90% υπέρρευστο. Γράφημα δεξιά για normal/superfluid %.
- Υγρό με μηδενικό ιξώδες και μηδενική εντροπία.
- Καλύπτει όλες τις επιφάνειες του δοχείου και διαφεύγει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

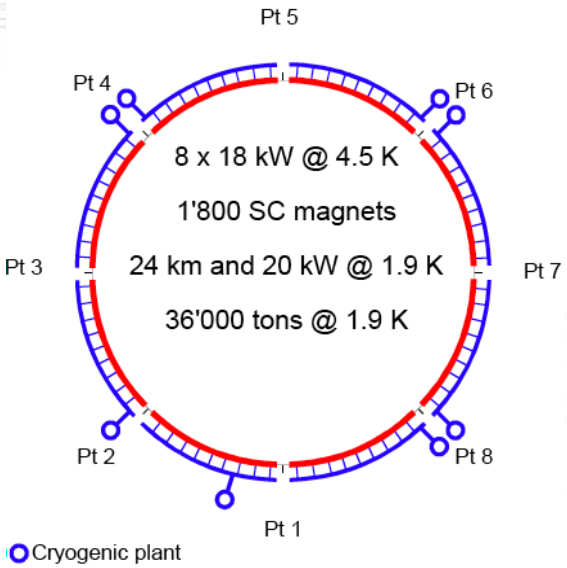


Κρυογενική στον LHC



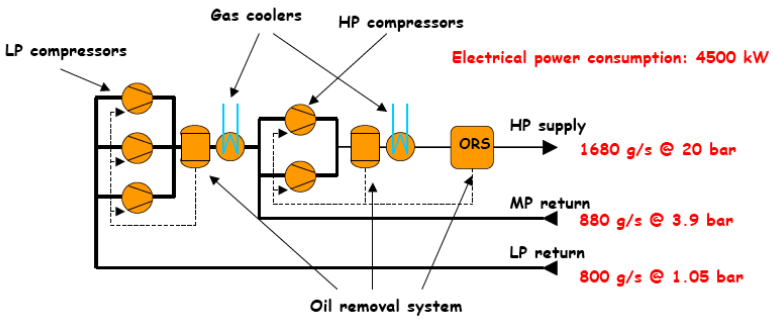
Typical LHC even point



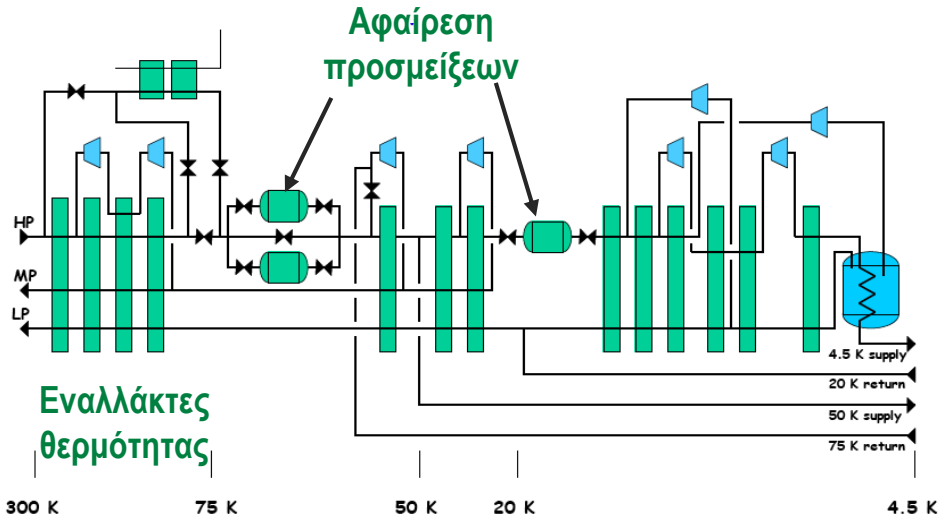


- Υπεραγωγιμότητα + υπέρρευστο ήλιο → Μαγνήτες: 1.9 K (-271.25°C).
- 120 τόνοι ηλίου για να 36.000 τόνους μαγνητών.

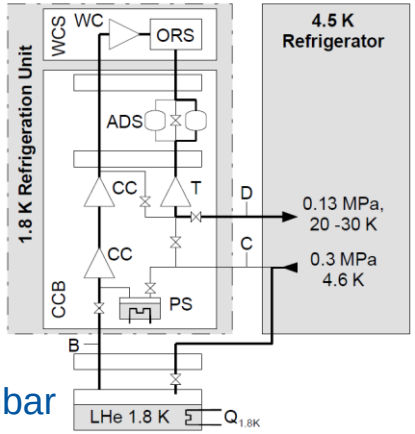
Refrigerators του LHC



Συμπιεστές του 18 kW refrigerator @ 4.5 K



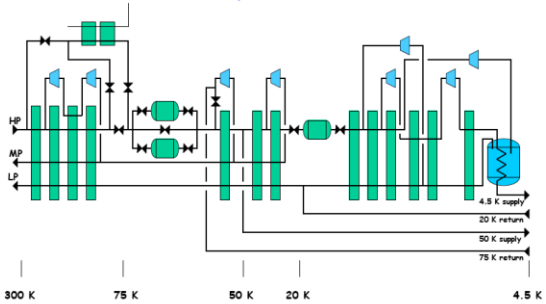
Cold box του 18 kW refrigerator @ 4.5 K

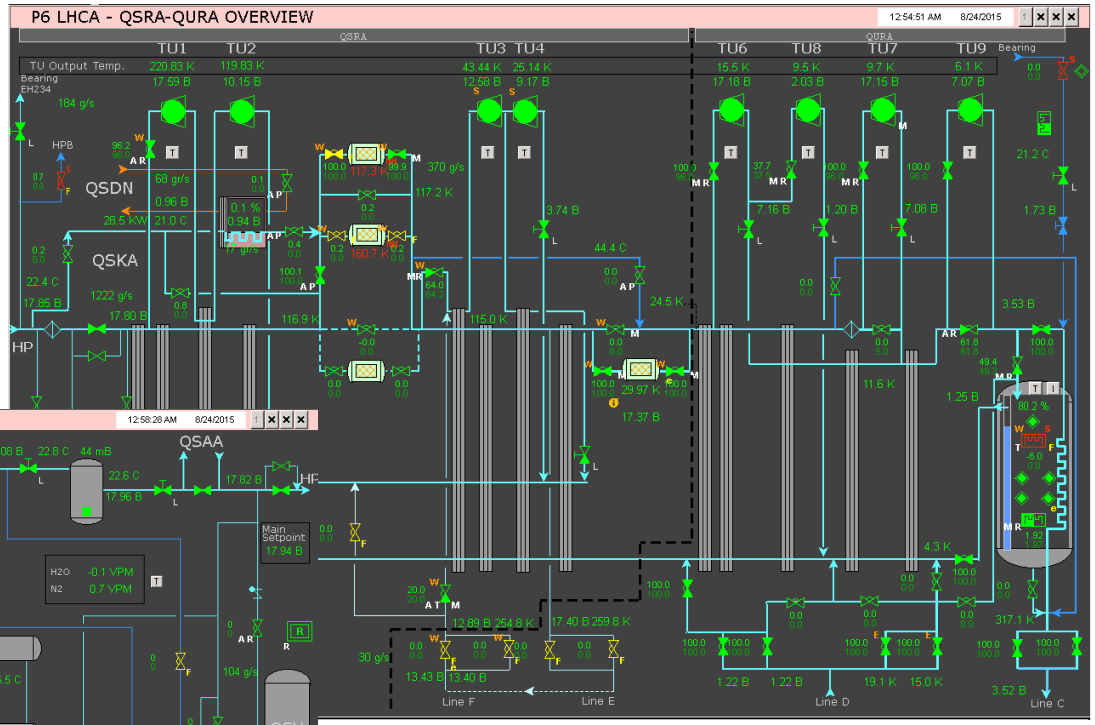


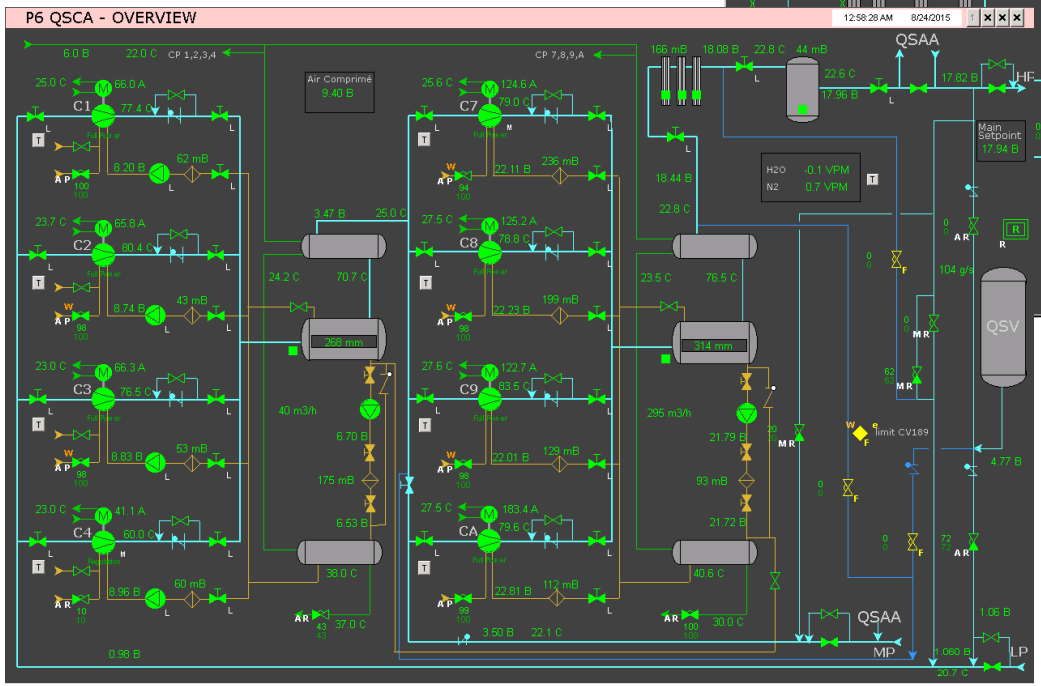
14.5 mbar

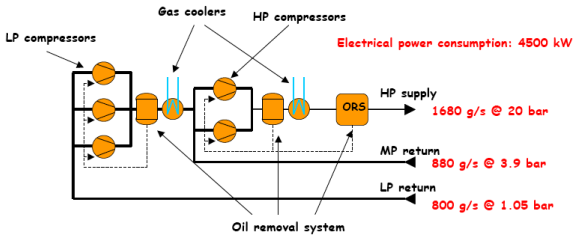
2.4 kW 1.8 K refrigeration unit

Οθόνες χειριστών για 4.5 K refrigerator









Κρυογενικές εγκαταστάσεις του LHC

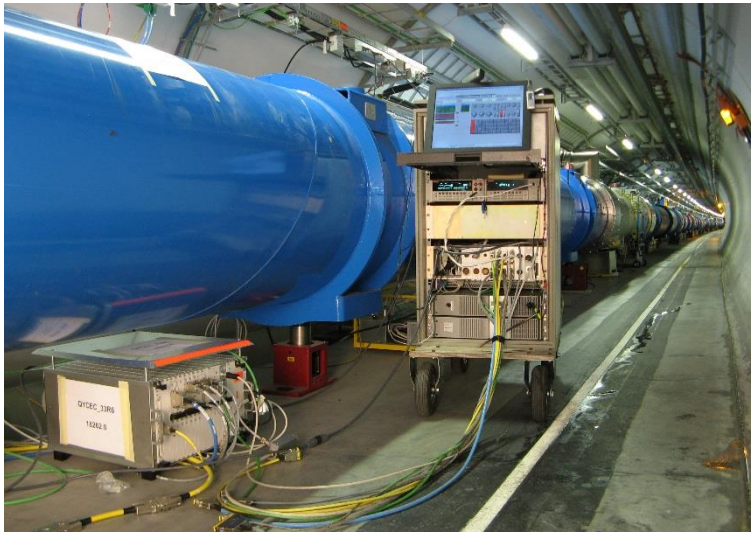
Cold box του 18 kW refrigerator @ 4.5 K

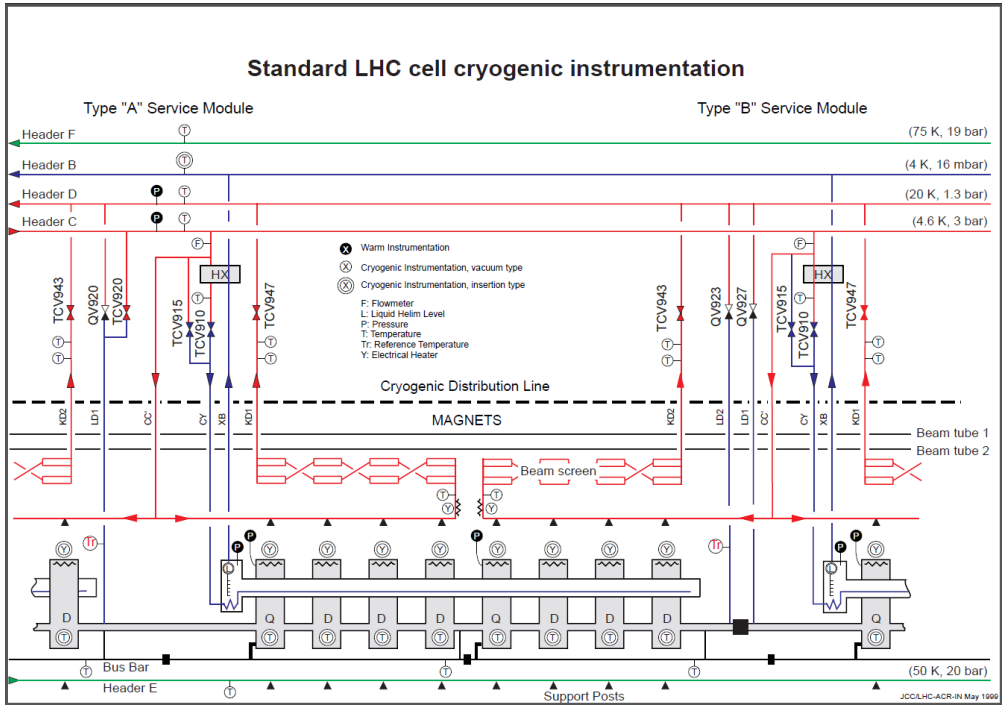
Δεξαμενές αποθήκευσης ηλίου

LHC compressors 18 kW @ 4.5 K

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.

Τα κρυογενικά ηλεκτρονικά στον LHC

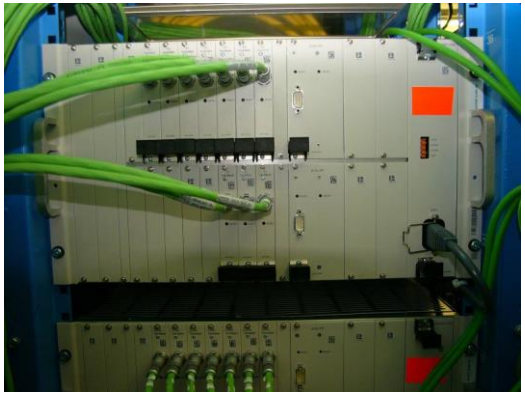
Κατά τον αρχικό σχεδιασμό αποφασίστηκε να τοποθετηθούν τα ηλεκτρονικα:

A) Κάτω από τους μαγνήτες για τα καμπύλα τμήματα.

B) Στους χώρους μειωμένης ακτινοβόλίας για τα ευθύγραμμα τμήματα.

Λόγω μεγάλου κόστους καλώδίωσης και πιθανών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Κάτω από τους διπολικούς μαγνήτες



Σε υπόγειους χώρους μειωμένης ακτινοβολίας

Αισθητήρες θερμοκρασίας

$$\log_{10} T(R) = \sum_{0}^{9} A_i * \frac{1}{(\log_{10} R)^i}$$

equivalent to:

$$T(R) = 10^{\left(\sum_{0}^{9} A_i * \frac{1}{(\log_{10} R)^i}\right)}$$

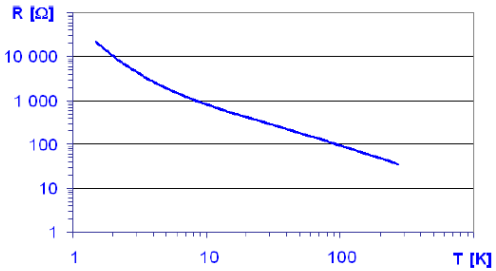
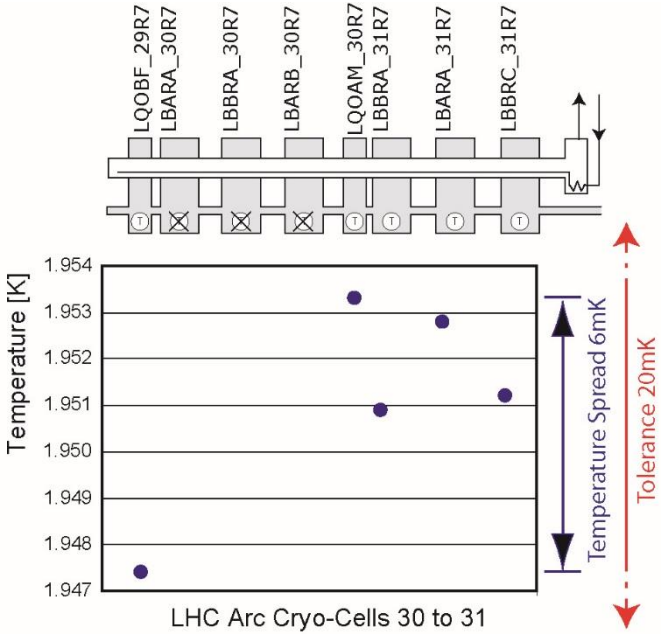


Figure 2 Example of a fit curve, T(R), log scale

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

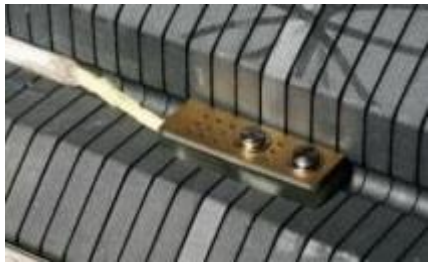
Table 2 Uncertainty requirements as a function of the temperature range (including electronics and sensors uncertainty)

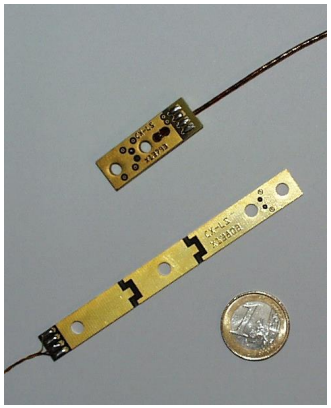
	Temperature Range [K]					
	1.6-2.2	2.2-4	4-6	6-25	20-50	50-300
Uncertainty	± 0.01 K	± 0.02 K	± 0.03 K	± 1 K	± 5 K	± 5 K

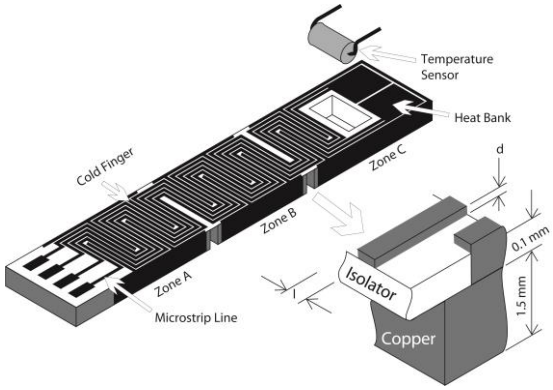


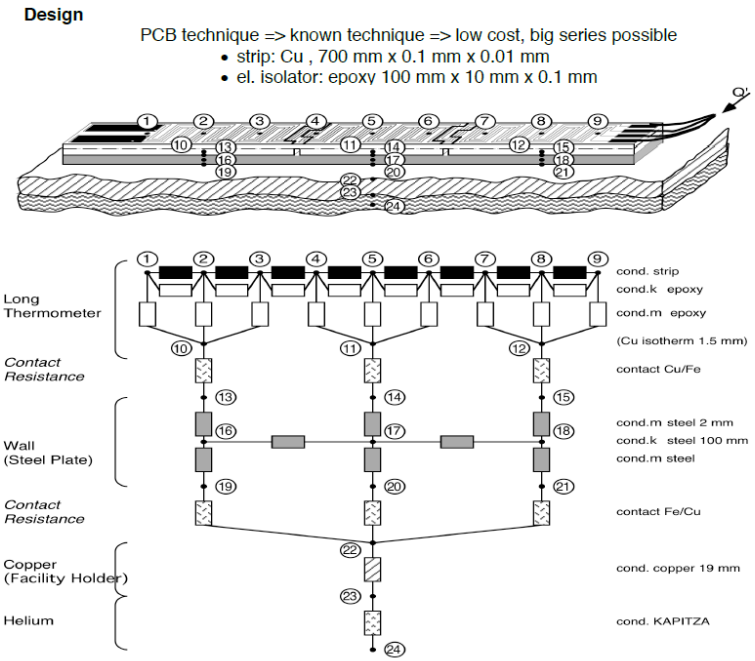
Το θερμόμετρο

Θερμόμετρο = αισθητήρας + βάση (thermometric block)

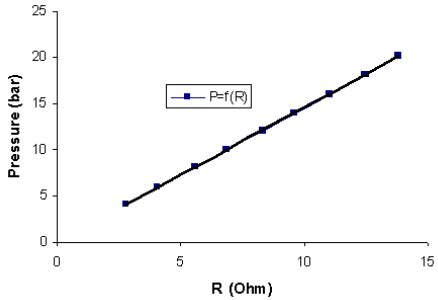


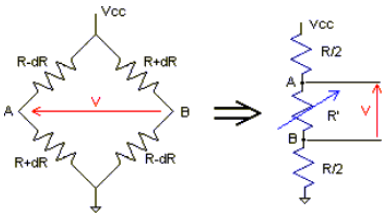




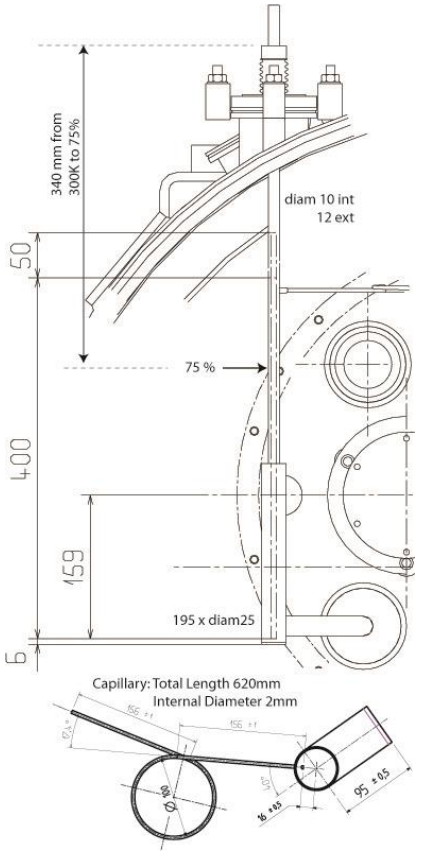


Αισθητήρας στάθμης ηλίου και πίεσης

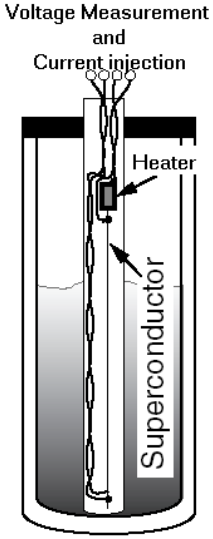




Αισθητήρας πίεσης



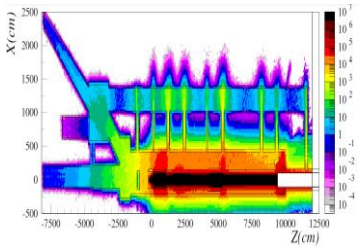
Αισθητήρας στάθμης LHe



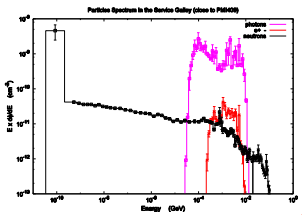
Αλλαγή αισθητήρα στάθμης LHe

Φυσική ακτινοβολιών και επιπτώσεις στα ηλεκτρονικά (1/2)

nuclear cascade



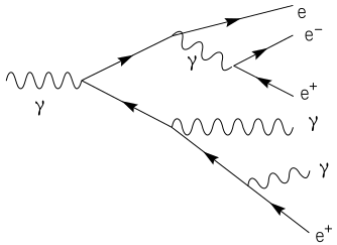
h > 20 MeV



Radiation Field

n, h, e,.. > 100 KeV

EM cascade



Σφάλματα & Βλάβες σε ημιαγωγούς

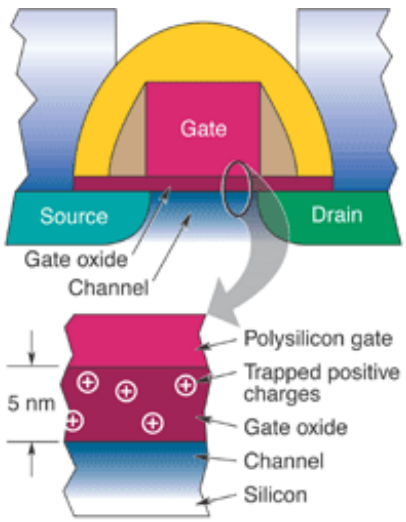
Single Event Effects

Effect in the Device

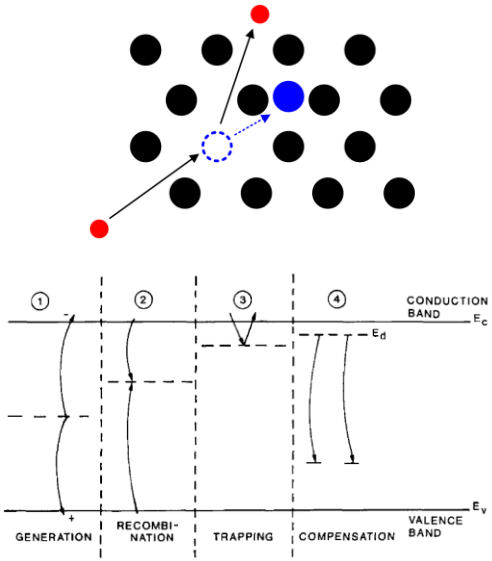
Dose (TID)

Displacement Damage

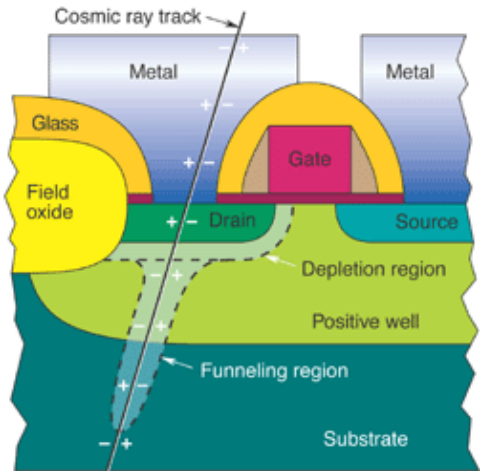
Φυσική ακτινοβολιών και επιπτώσεις στα ηλεκτρονικά (2/2)



TID



DD



SEEs

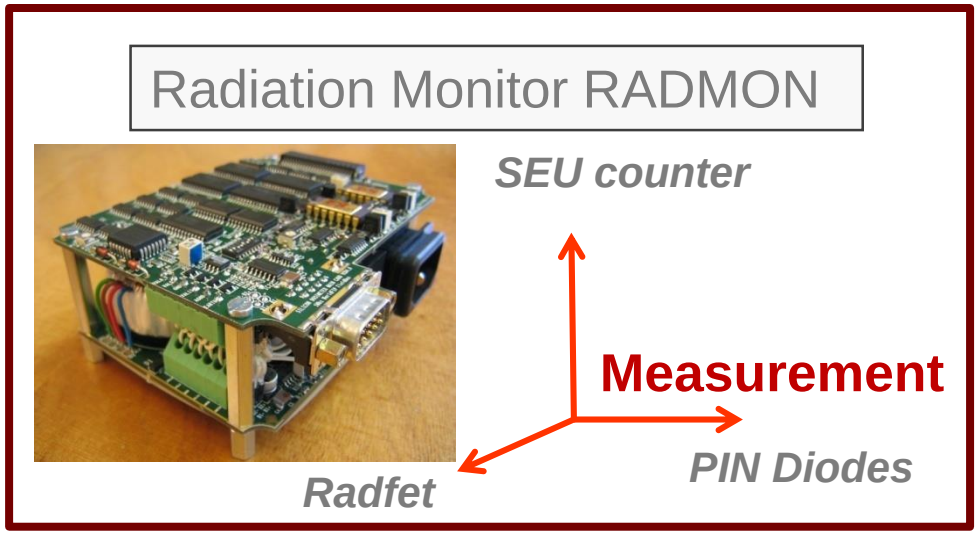
J. Scarpulla et al.

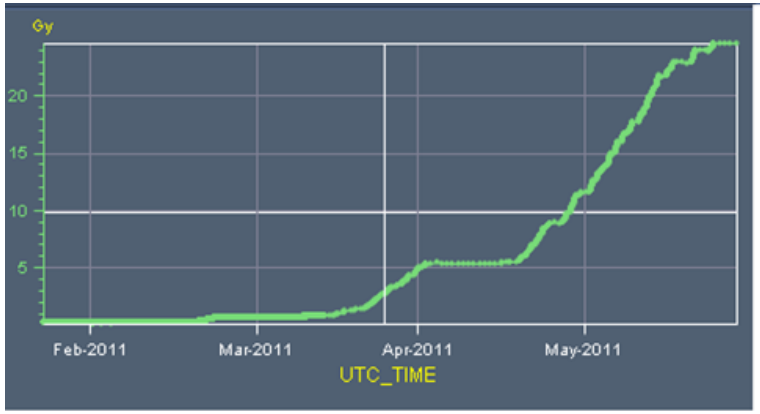
TID: Συσσώρευση ιονίζουσας δόσης → Δημιουργία ζευγών electron-hole.
Αλλαγή των χαρακτηριστικών λειτουργίας (π.χ. Transistors/Mosfets).

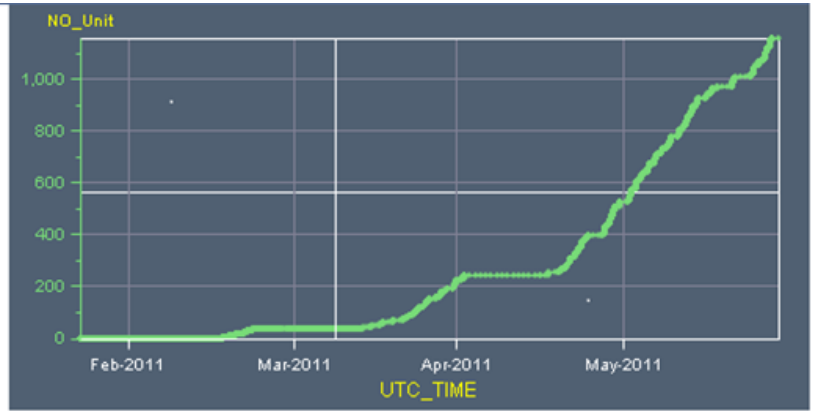
DD: Συσσώρευση σφαλμάτων λόγω συγκρούσεων/μετατοπίσεων ατόμων στο πλέγμα.
Αλλαγή των ιδιοτήτων του υλικού (πχ. Ενέργεια μετάβασης).

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

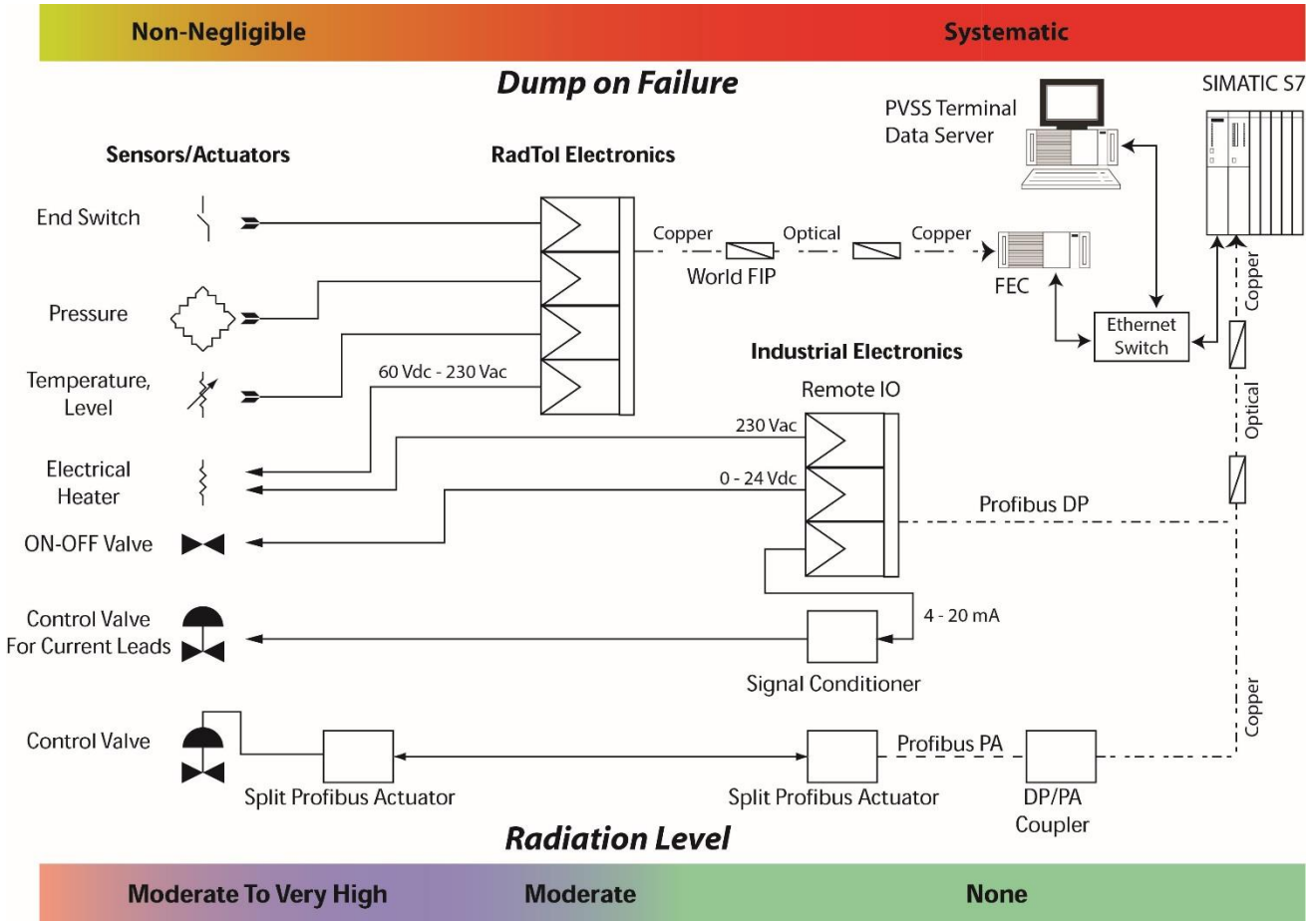
Μετρητές ακτινοβολίας στον LHC





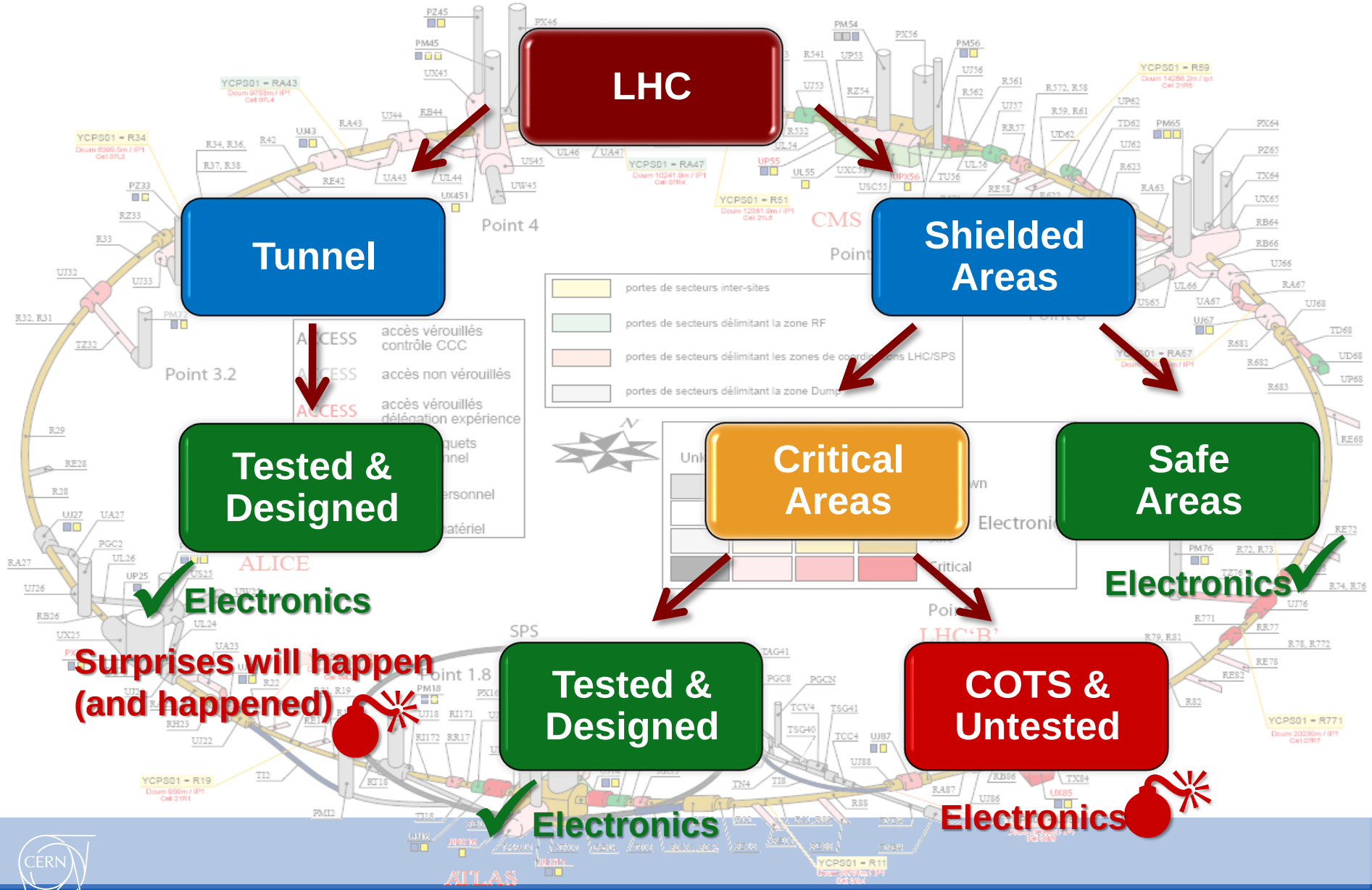


Κρυογενικά συστήματα: Αισθητήρες & Αυτόματος έλεγχος

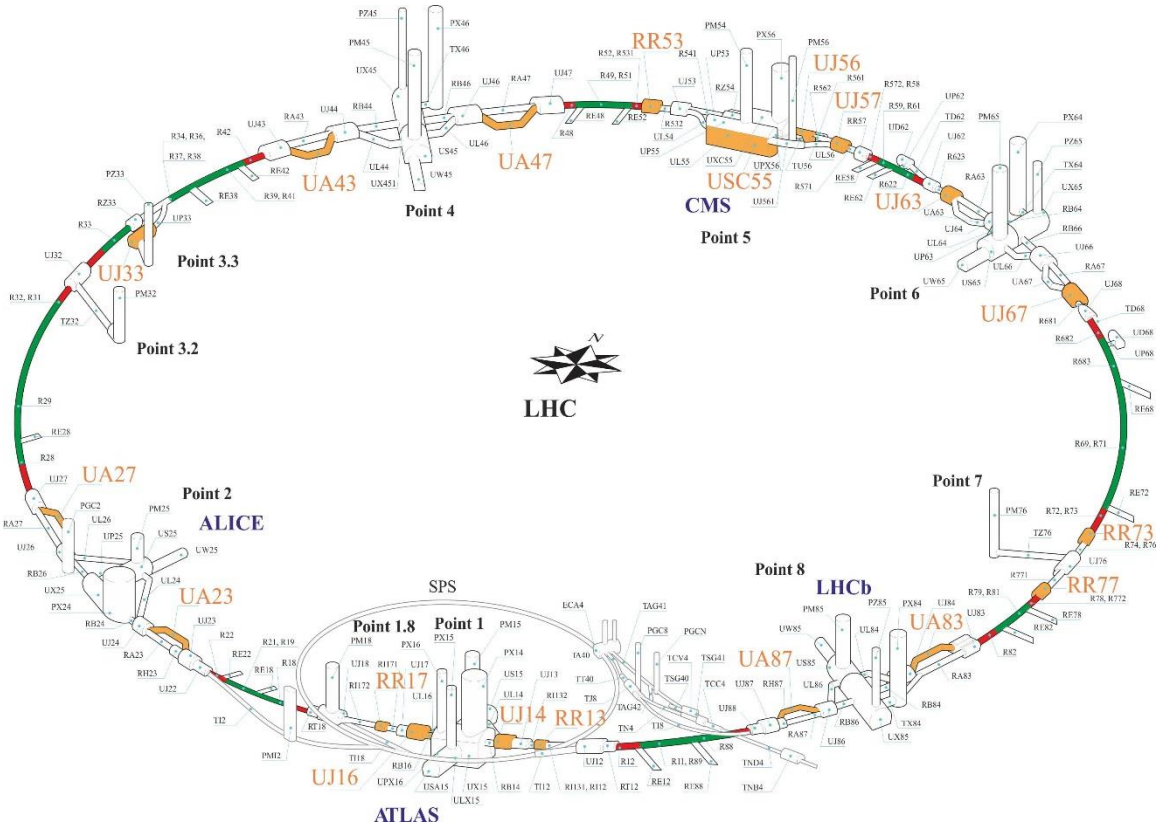


- Οι αισθητήρες δοκιμάστηκαν για την αντοχή τους στην ακτινοβολία κατά τον αρχικό σχεδιασμό.
- Τα ανθεκτικά στην ακτινοβολία ηλεκτρονικά σχεδιάστηκαν για τους υπόγειους χώρους του LHC.

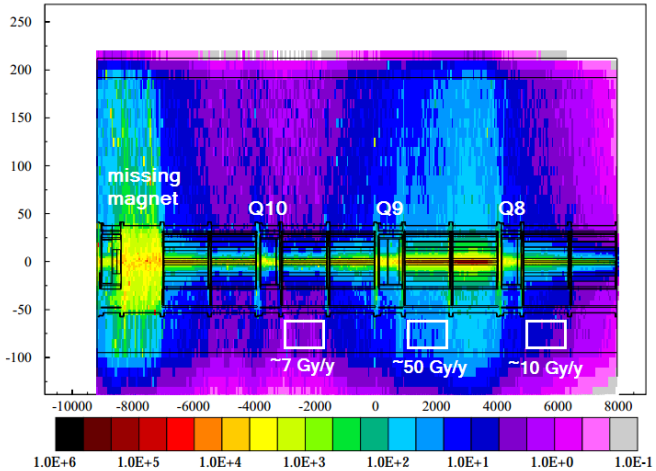
The LHC Challenge



Τοποθεσίες ηλεκτρονικών συστημάτων



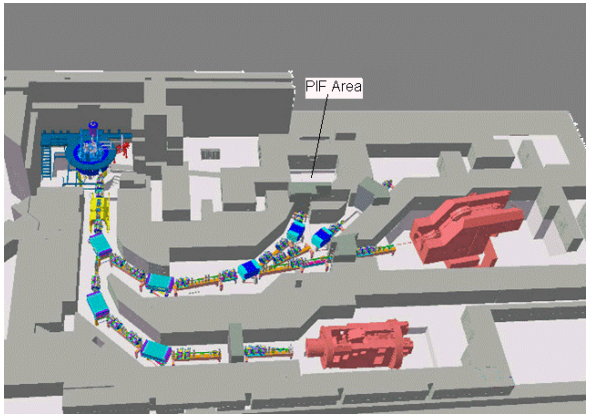
RADMON

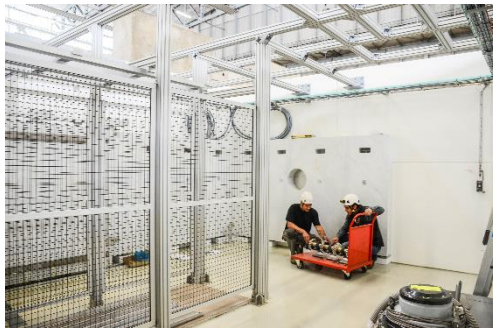


Fynbo, Stevenson, 2002

Δοκιμές αντοχής μέχρι τα 1000 Gy

Εγκαταστάσεις δοκιμών αντοχής στην ακτινοβολία





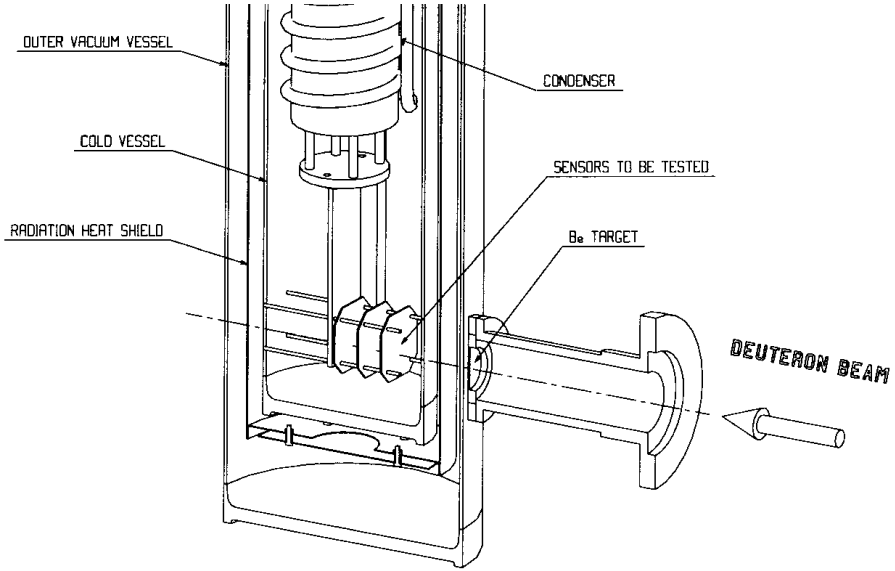
PIF, PSI, Villigen, CH
Παρασιτική εγκατάσταση σε κλινική πρωτονοθεραπείας.
Πρωτόνια: 230 MeV

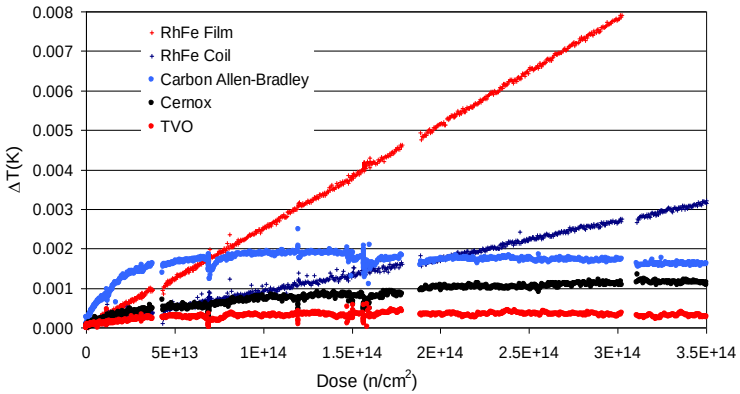
CNRAD, CNGS, CERN
400 GeV/c πρωτόνια σε στόχο άνθρακα/μόλυβδο.
Μικτό περιβάλλον ακτινοβολίας.

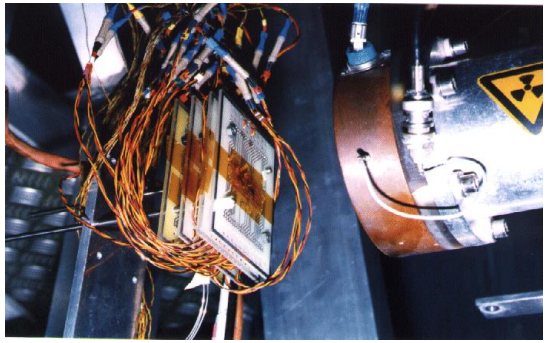
CHARM, CERN
24 GeV/c πρωτόνια σε ποικιλία στόχων.
Μεγάλη ποικιλία περιβάλλοντων ακτινοβολίας.

Και διάφορα άλλα με νετρόνια, ακτίνες γάμμα, κλπ

Δοκιμές στους αισθητήρες







Δοκιμές σε αισθητήρες:

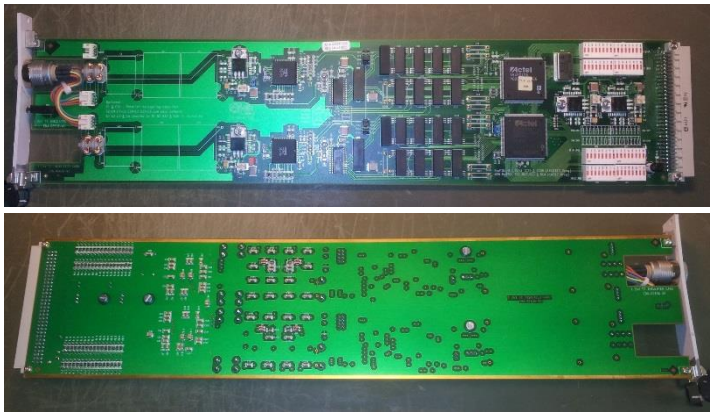
- Θερμοκρασίας
- Πίεσης
- Στάθμης υγρού ηλίου

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)

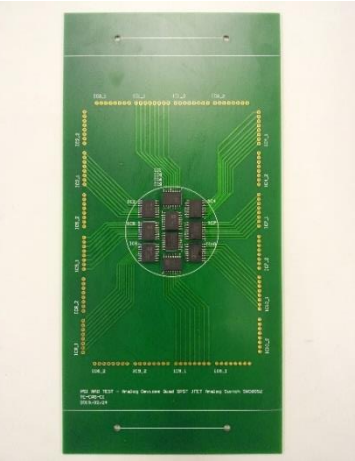
TT Insulated 1.2KV
(for 600A current leads)



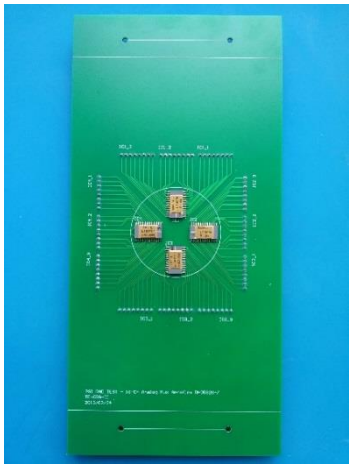
Για το run #2 του LHC, 2 νέες κάρτες σχεδιάστηκαν και εγκαταστάθηκαν.

EHBS (271 κάρτες) σε όλον τον επιταχυντή.
TT cards (765 κάρτες) σε περιοχές με χαμηλότερη ακτινοβολία.

Επιλογή ηλεκτρονικών



Κοινά ηλεκτρονικά
Commercial Of The Shelf (COTS)



Σχεδιασμενα ηλεκτρονικά
για ανθεκτικότητα στην ακτινοβολία

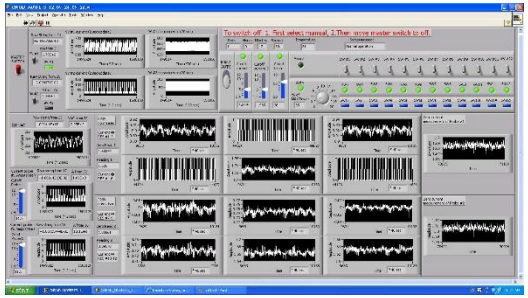
+	$ (€), Φθηνά
-	Αμφίβολη ανθεκτικότητα στην ακτινοβολία
-	Αναγκαίες δοκιμές
+	Διαθεσιμότητα
+	Χωρίς περιορισμούς

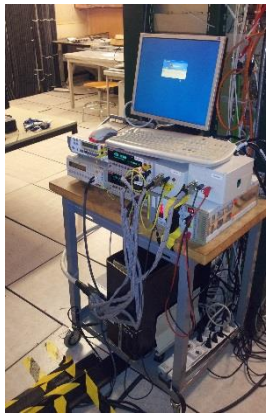
+	$$$ (€ € €), Ακριβά
+	Ανθεκτικά στην ακτινοβολία
+	Απαιτούνται ελάχιστες δοκιμές
-	Διαθεσιμότητα
- -	Περιορισμοί περί όπλων*

* ITAR (International Traffic in Arms Regulations)

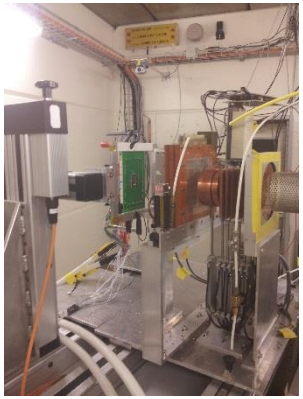
- Προσπάθεια για χρήση μόνο COTS λόγω μεγάλου αριθμού εξαρτημάτων και κόστους.
- Οι εταιρείες ανθεκτικών ηλεκτρονικών δεν ξέρουν πως να κοστολογήσουν μεγάλες ποσότητες.
- Αφίβολή η τελική έγκριση και η μελλοντική διαθεσιμότητα των ανθεκτικών ηλεκτρονικών.
- Επιλογή ανθεκτικών ηλεκτρονικών μονο σε εξαιρετικές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

Δοκιμές μεμονωμένων ηλεκτρονικών

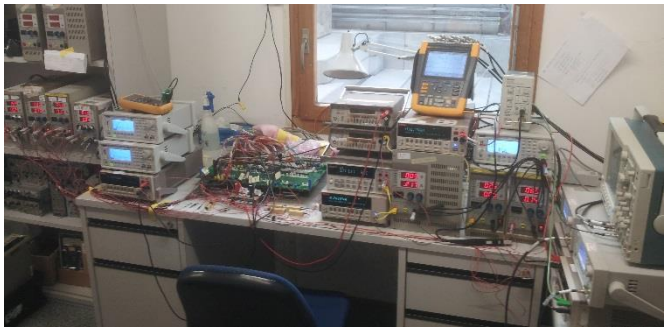




CNRAD/CNGS
Mixed-Field
JUN-DEC/2012



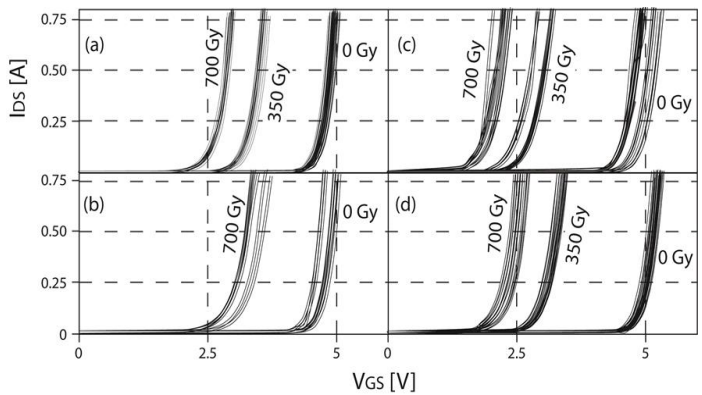
PSI (230 MeV p) FEB/2013
(TID, SEE, DD)

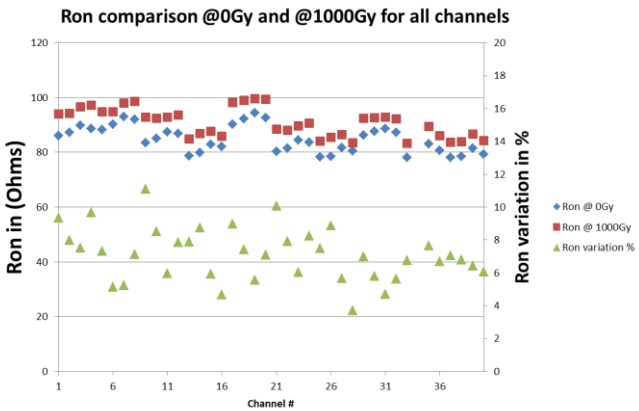


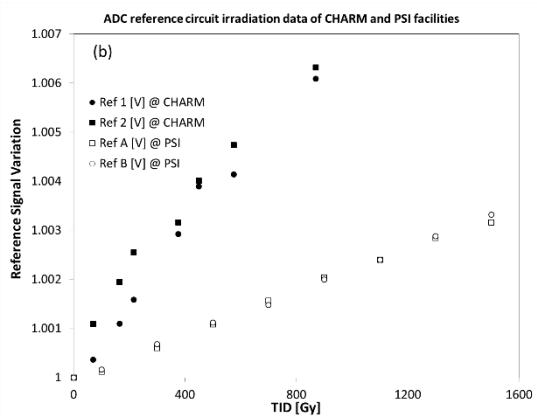
Multiple components
PSI, JUL/2013

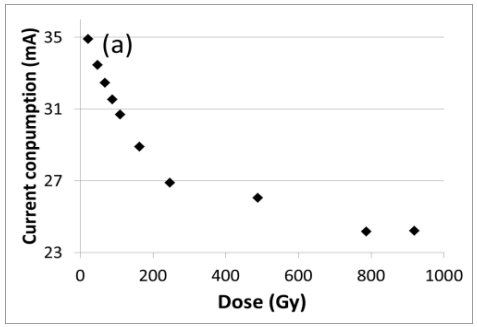
Η εύρεση ανθεκτικού COTS πολυπλέκτη οδήγησε σε εξοικονόνηση >450 CHF/κάρτα
Σε ένα προτζεκτ: 200 KCHF.

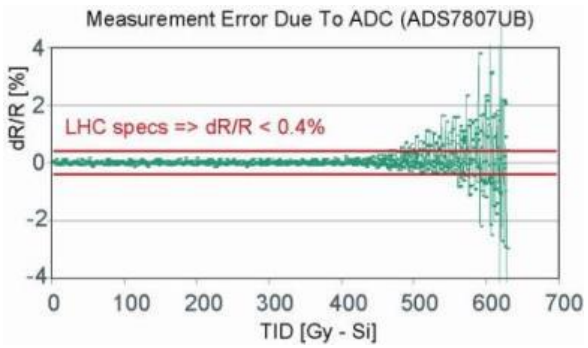
Επίδραση ακρινοβολίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά - παραδείγματα



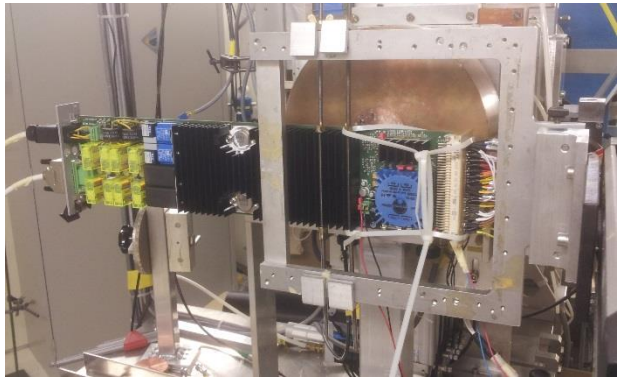


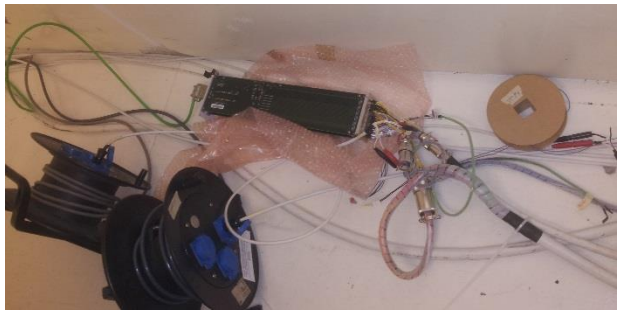


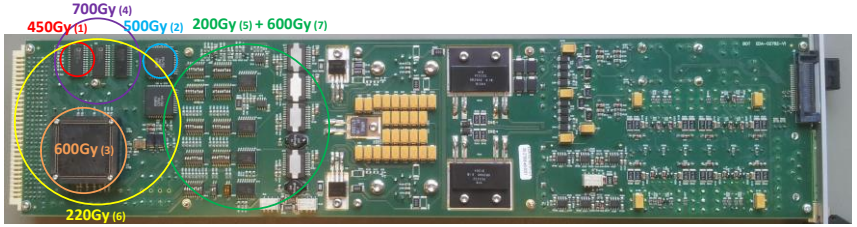




Δοκιμές στο πρωτότυπο







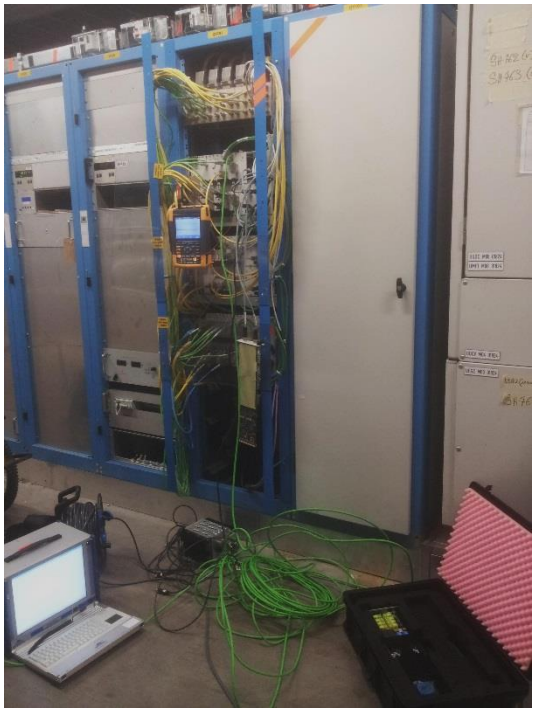
Prototype board
PSI, NOV/2013

Τεχνικές μείωσης επιπτώσεων ακτινοβολίας

Triple Modular Redundancy (TMR) Κωδικοποίηση, Φιλτράρισμα, Safe state-machines Watchdogs	Διορθώσεις υλικού
Λογισμικό/Φιλτράρισμα	Ανώτερο λογισμικό
Επανεκκίνηση λογισμικού Διακοπή τροφοδοσίας	Παρεμβάσεις ειδικού

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

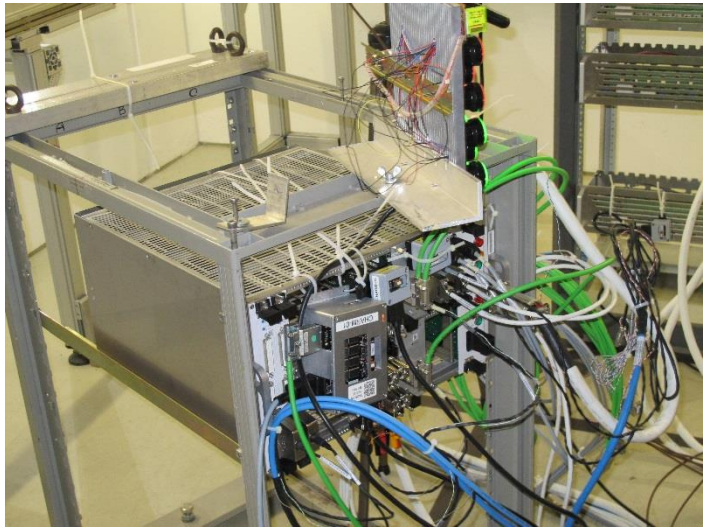
Επιβεβαίωση καλής λειτουργίας και πράσινο φως για παραγωγή

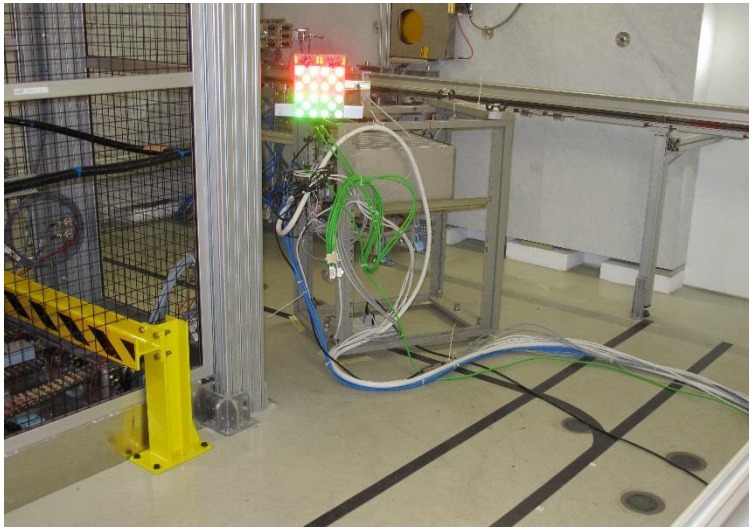


Testing EHBS at P8 (UA87; QYC01&QYC04) crates with long cables (50m&100m) and external load.

Remote online tests and PLC tests.

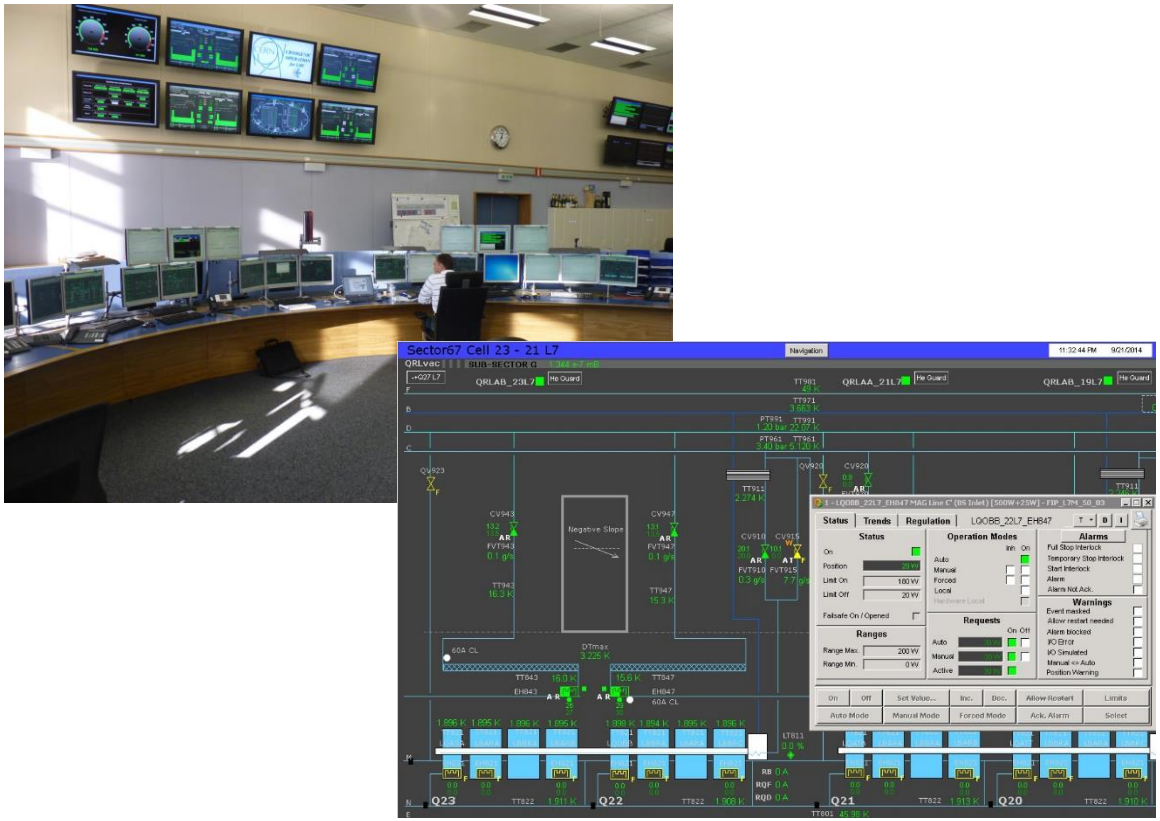
Επιβεβαίωση ανθεκτικότητας παραγωγής



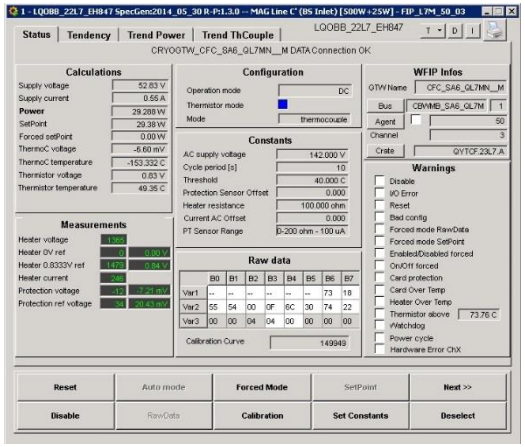


Δοκιμές στο CHARM, CERN σε στατιστικό δείγμα καρτών

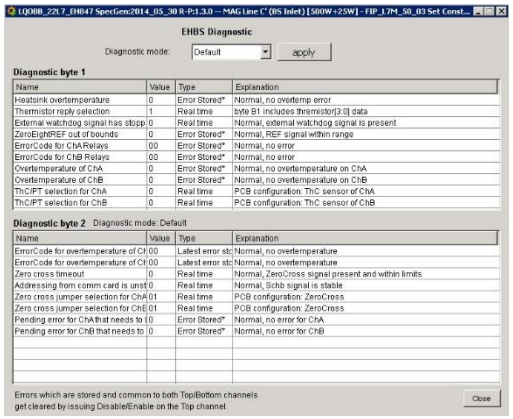
Οθόνες απεικόνισης και χειρισμού



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



Οθόνη αισθητήρων (expert)



Οθόνη αντιμετώπισης σφαλμάτων

CERN

www.cern.ch