



TRIKOUPIS Nikolaos, TE-CRG-IC

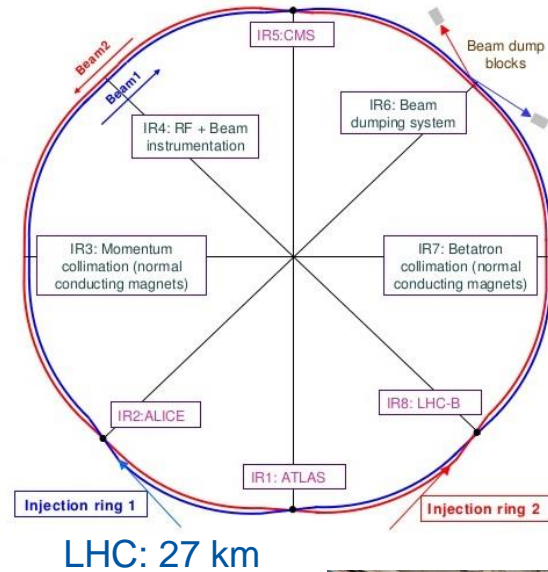
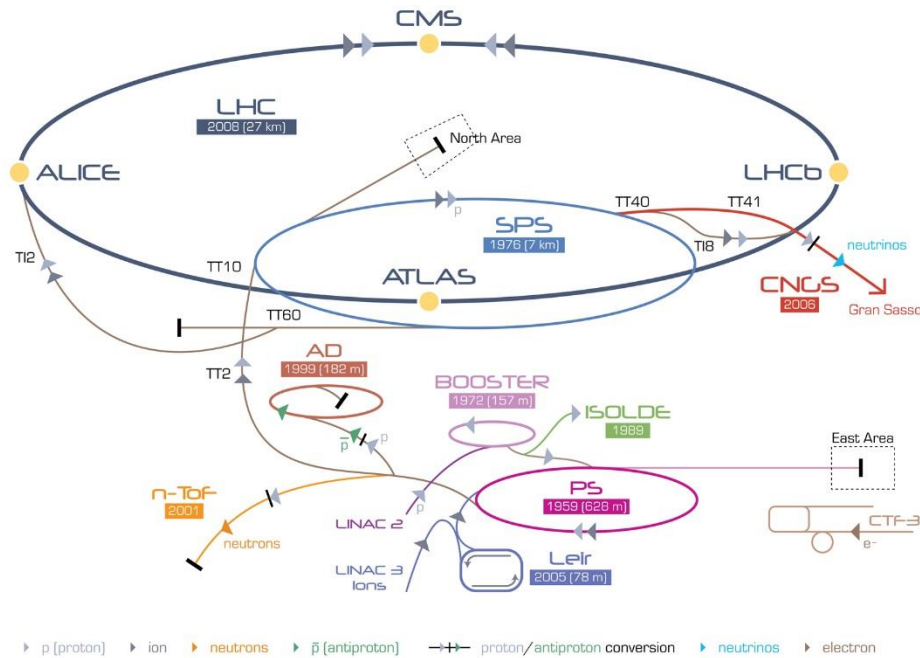
Introduction to Cryogenics and Radiation Tolerant Instrumentation Electronics

Aug 2022 – 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.

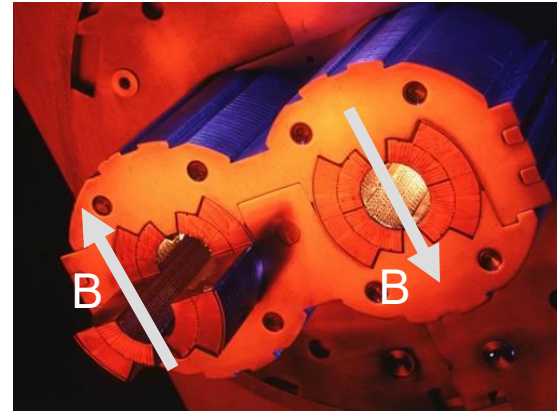
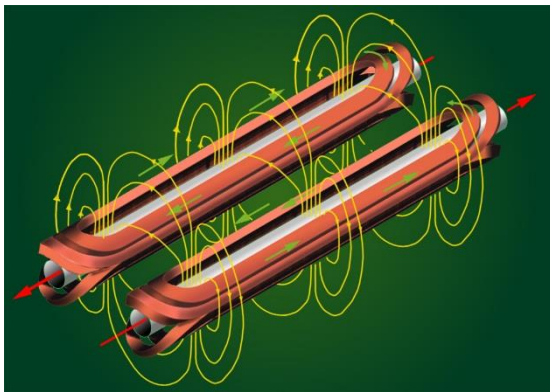
Το σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN και ο LHC



Μαγνήτες

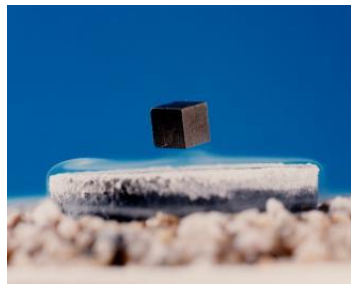
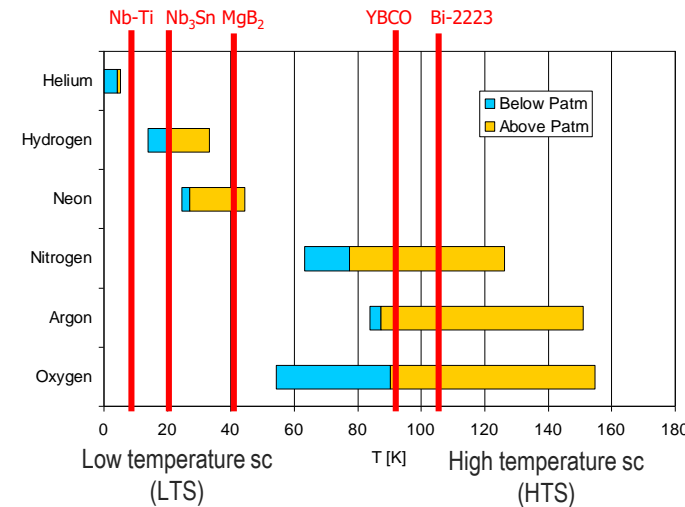
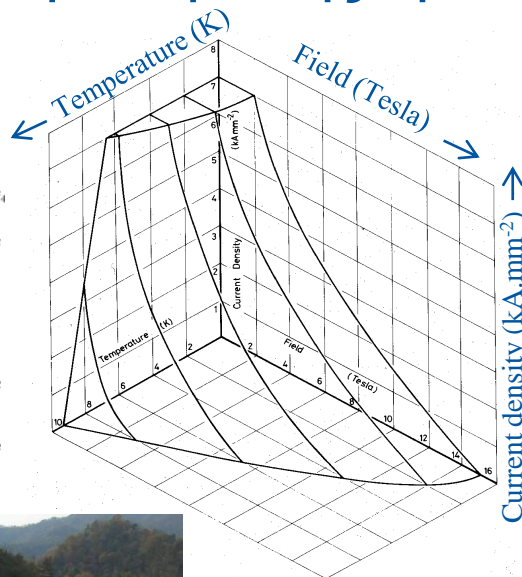
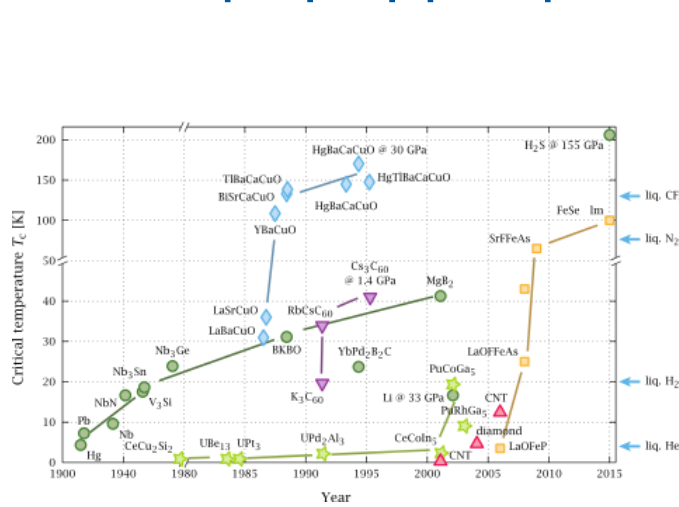
- Διπολικό (1232, 35t) για στρέψη της δέσμης αδρονίων.
- Τετραπολικό για focus/defocus.
- 6,8,12,... -πολικό για διορθώσεις.

Διπολικοί μαγνήτες



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

Για τον LHC 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.

Για τον HL-LHC Κράμα Νιοβίου-Κασσίτερου (1954) (Niobium-tin, Nb₃Sn) για 11T με τη διαδικασία παραγωγής να είναι πολύπλοκη.

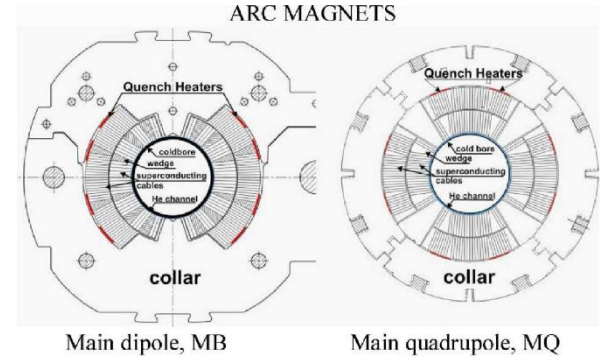
«Εκπαίδευση» μαγνητών, «quench» και το QPS

Μεγάλες δυνάμεις εντός των μαγνητών: $> \sim 2 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ ($\sim > 200$ τόνοι ανα μέτρο).

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

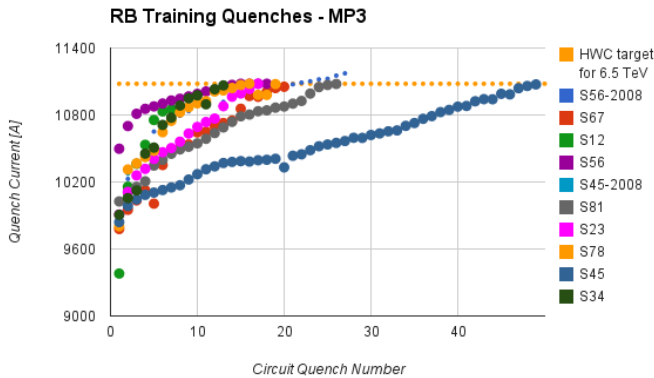
Ένα quench μπορεί να προκληθεί από 1 millijoule \rightarrow 1-cent € από 5 cm.

QPS: Quench Protection System



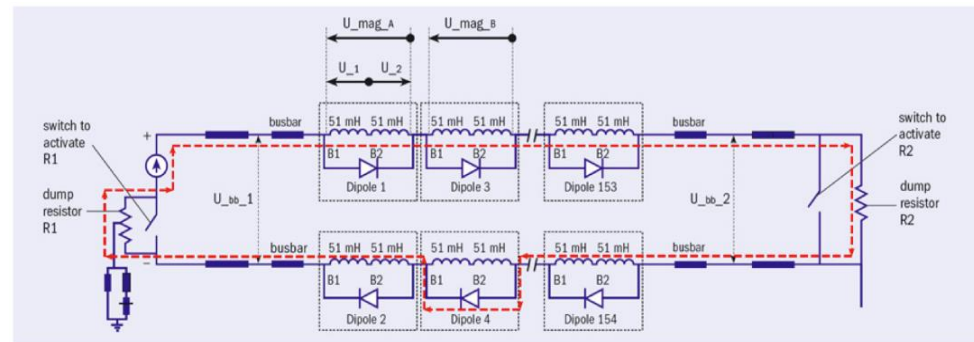
Quench:

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



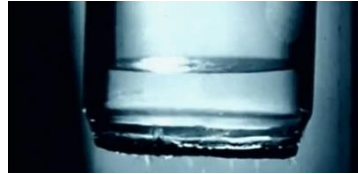
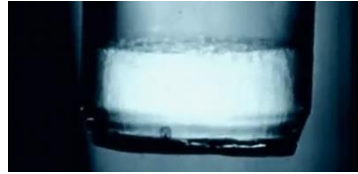
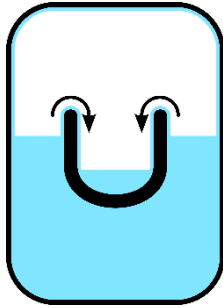
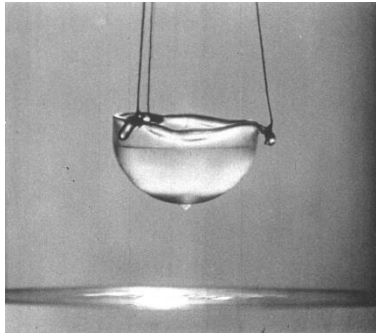
154 διπολικοί μαγνήτες εν σειρά
Αύξηση ενέργειας \rightarrow μεγαλύτερες δυνάμεις \rightarrow
μικροσκοπικές κινήσεις τυλιγμάτων \rightarrow quench!

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

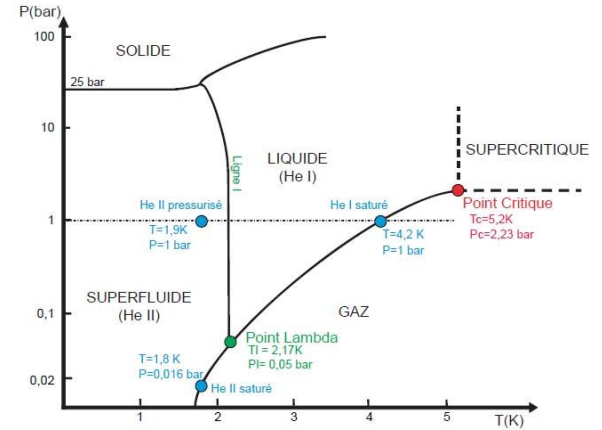


Μετά από ένα quench \rightarrow Σταδιακή (100's sec) αφαίρεση ενέργειας όλων των μαγνητών του τομέα.

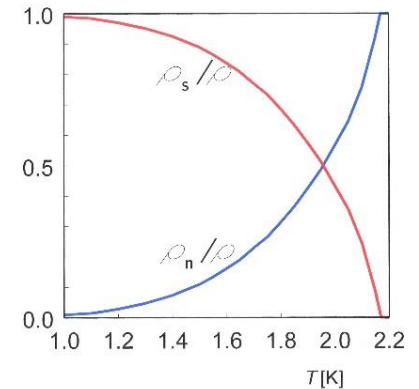
Υπέρρευστο ήλιο (superfluid helium)



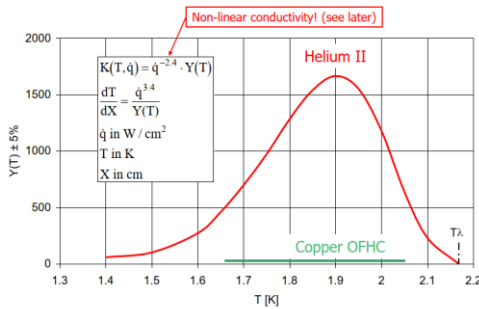
1937, Kapitsa et al.



- Το ήλιο είναι υγρό για θερμοκρασίες $T < 4.2\text{K}$.
- Μετατρέπεται σε υπέρρευστο (για ένα %) όταν $T < 2.17\text{K}$ (-270.98°C) (^4He).
 - Π.χ για 1.5K 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.



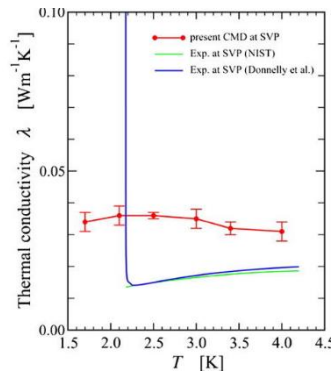
Equivalent thermal conductivity of He II p



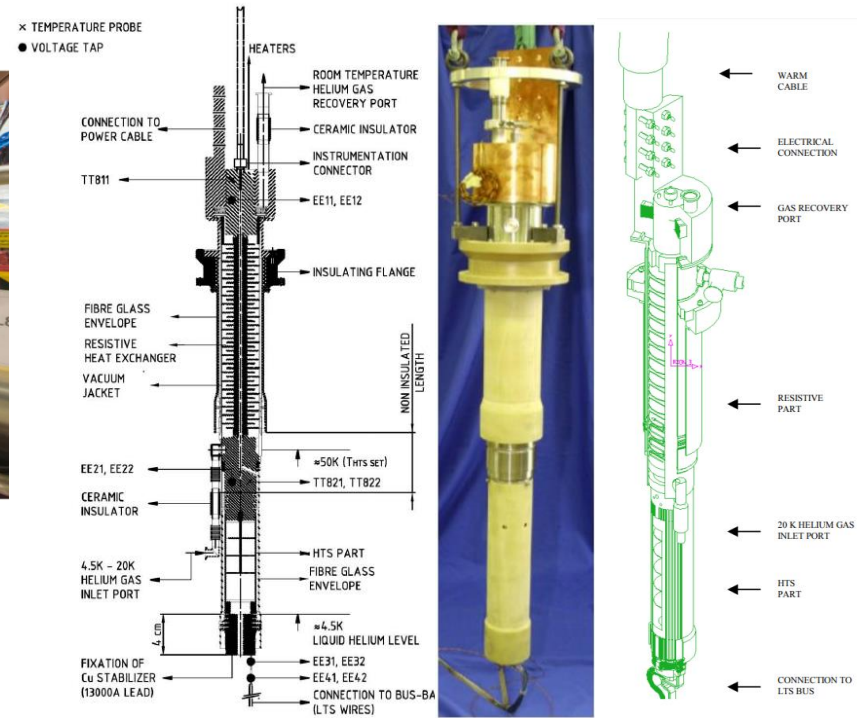
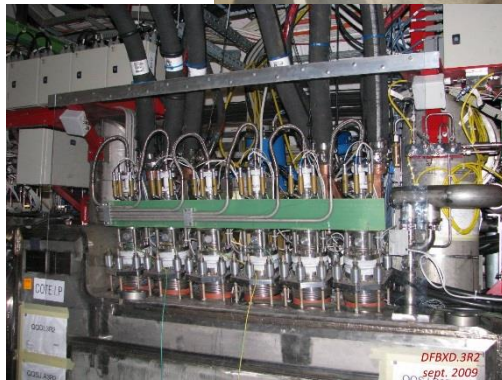
Ph. Lebrun

Introduction to superfluid helium

33



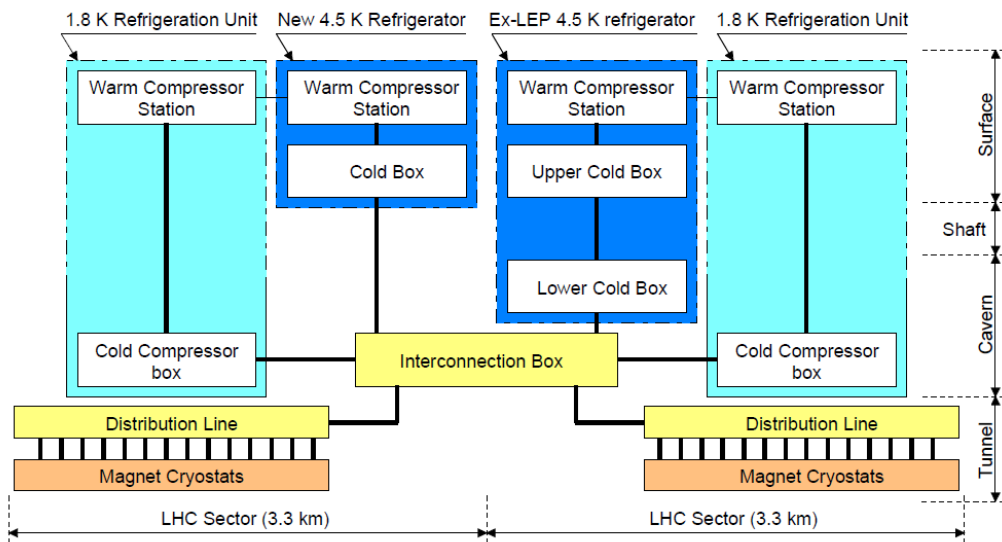
Current leads



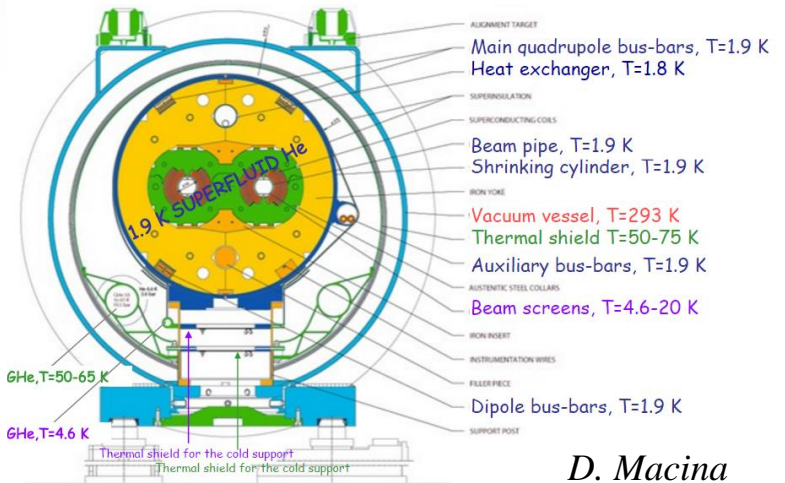
- Συστήματα τροφοδοσίας και μετάβαση από θερμοκρασίας δωματίου στα 4.5 K.
- ~ 3300 current leads για τροφοδοσία 60 A - 13000 A.
- Ελαχιστοποίηση μεταφοράς θερμότητας στο υγρό ήλιο 4.5 K.
- Για ρεύματα ≥ 600 A χρησιμοποιούνται HTS (High Temperature Superconductor).

Κρυογενικά στον LHC

Typical LHC even point

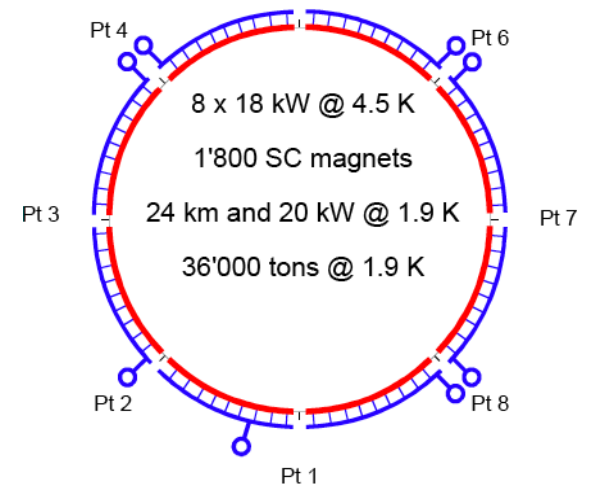


LHC dipole cross-section



D. Macina

Pt 5



● Cryogenic plant

Συνολική κατανάλωση ισχύος: 40 MW.

- Υπεραγωγιμότητα + υπέρρευστο ήλιο → Μαγνήτες: 1.9 K (-271.25°C).
- 120 τόνοι ηλίου για να ψυχθούν 36.000 τόνοι μαγνητών.
- Απώλειες: ~800 kg/month/LHC.

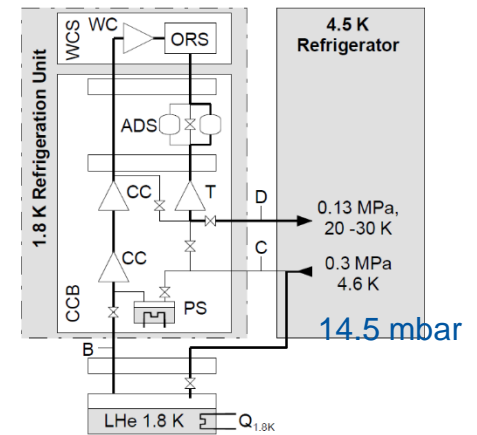
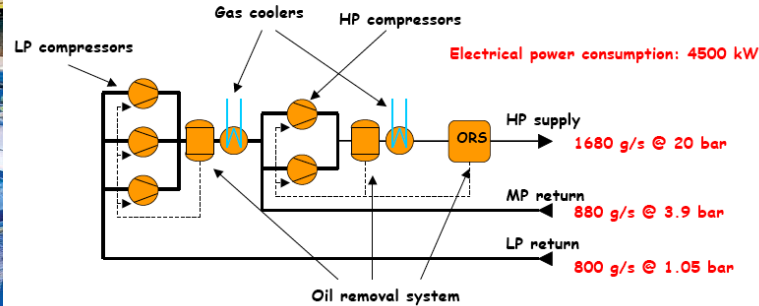
Κρυογενικές εγκαταστάσεις του LHC



Δεξαμενές αποθήκευσης ηλίου

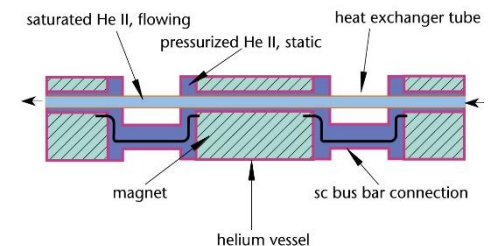


LHC warm compressor station

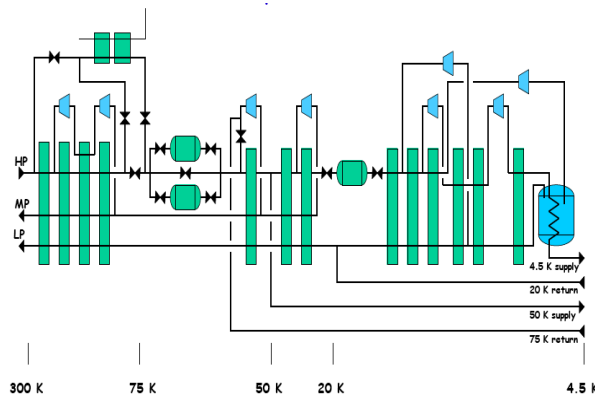


2.4 kW 1.8 K refrigeration unit

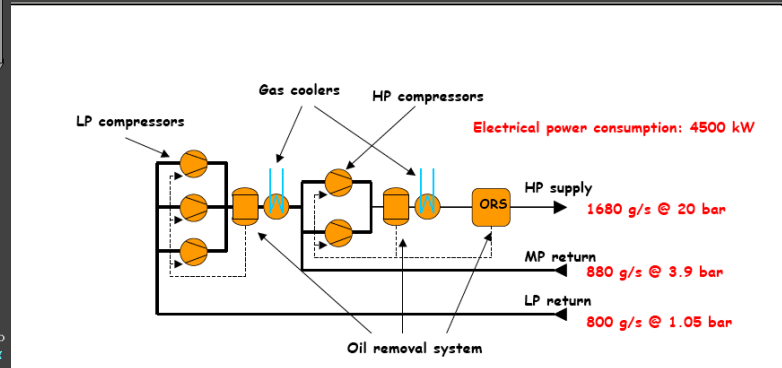
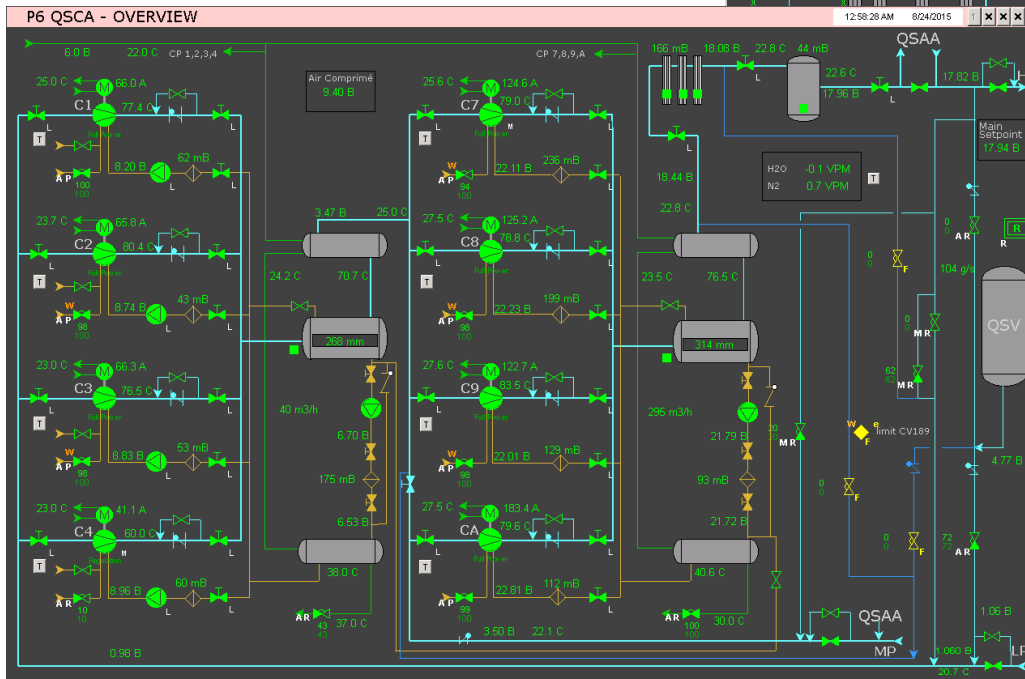
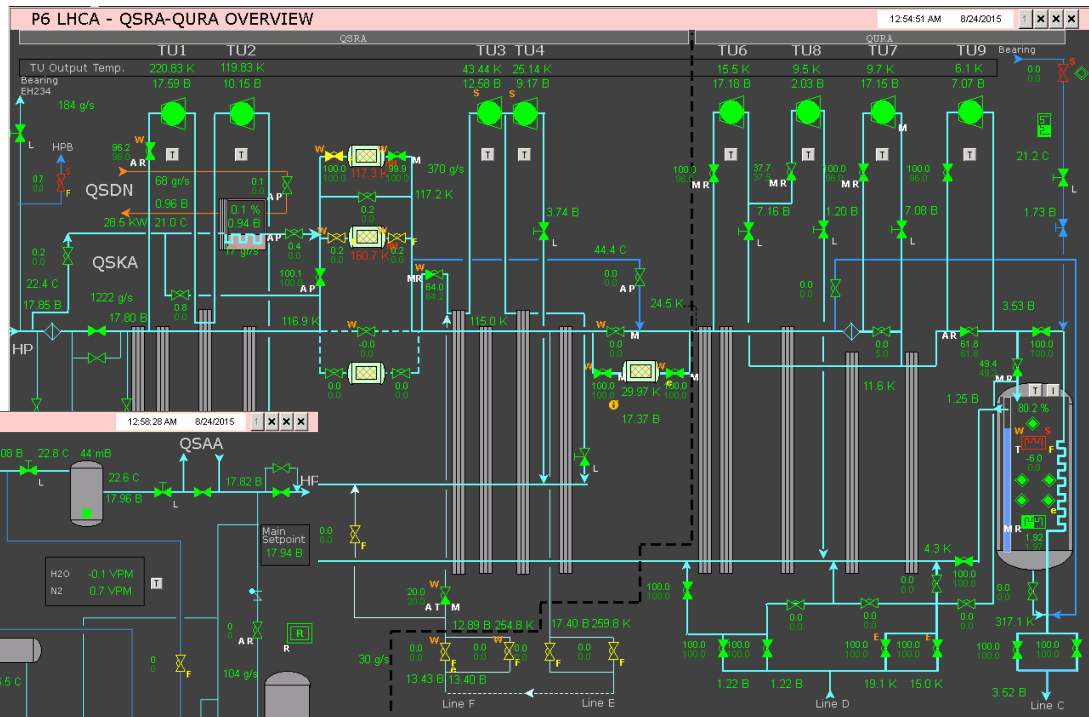
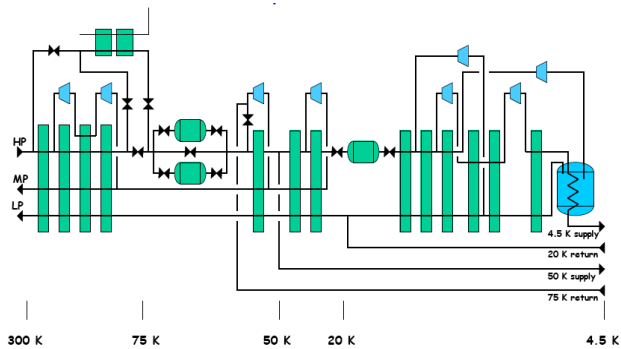
LHC magnet string cooling scheme



Cold box του 18 kW refrigerator @ 4.5 K

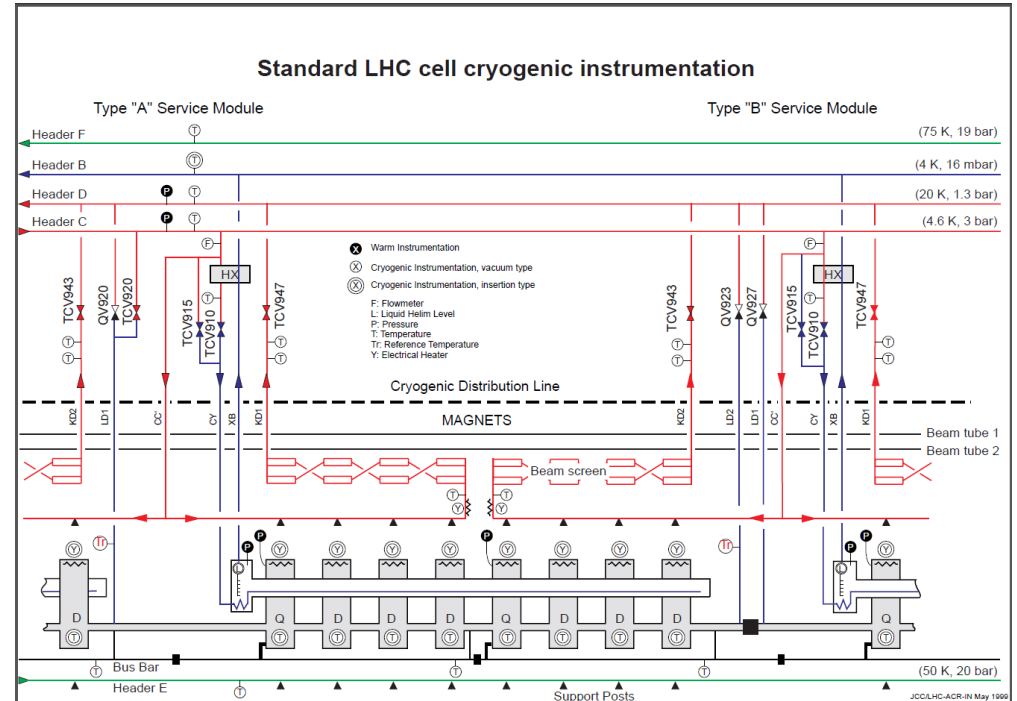
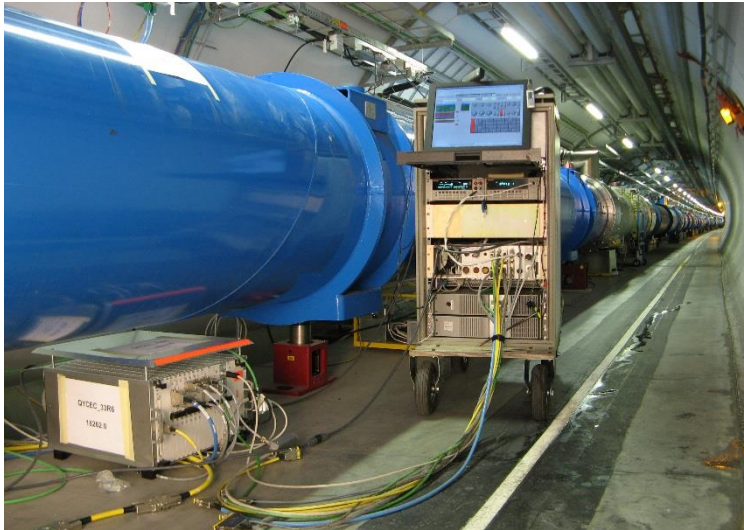


Οθόνες χειριστών για refrigerator/compressor



TE-CRG-IC

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



800 WorldFIP crates

Ενεργά κανάλια:

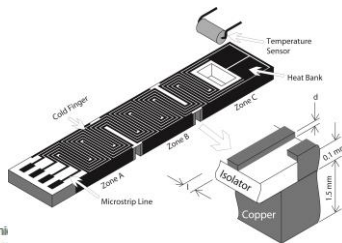
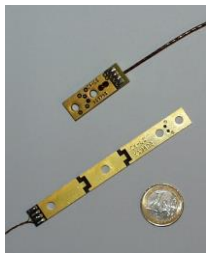
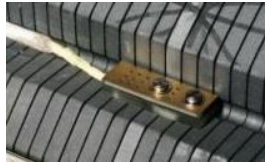
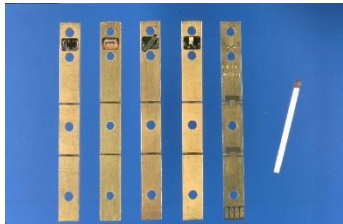
6500 Θερμοκρασία
 800 Πίεση
 500 Στάθμη υγρού ηλίου
 2000 Θερμαντικές αντιστάσεις
 1100 Μηχανικοί διακόπτες (I/O)

Δραστηριότητες:

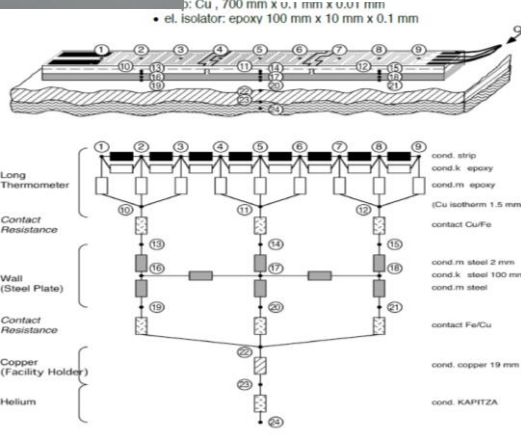
- Υποστήριξη υπάρχουσας υποδομής.
- Επίλυση σφαλμάτων.
- Σχεδίαση νέων συστημάτων.

Το θερμόμετρο

Θερμόμετρο = αισθητήρας + βάση (thermometric block)



=> known technol
 • Cu, 700 mm x 0.1 mm x 0.1 mm
 • el. isolator: epoxy 100 mm x 10 mm x 0.1 mm



equivalent to:

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

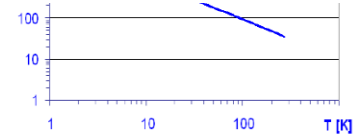
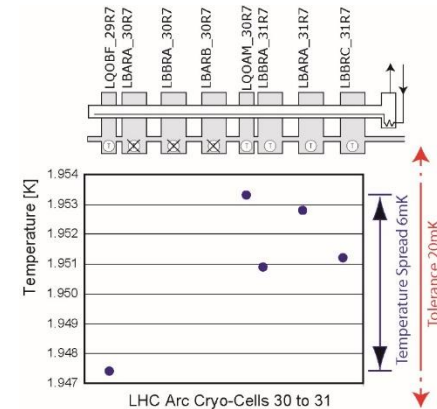


Figure 2 Example of a fit curve. T(R), log scale

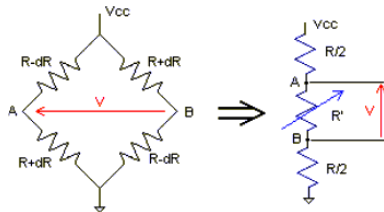
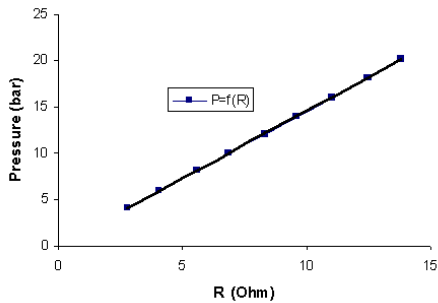
The residuals obtained by using function T(R), are within the uncertainty requirements given in Table 2.

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

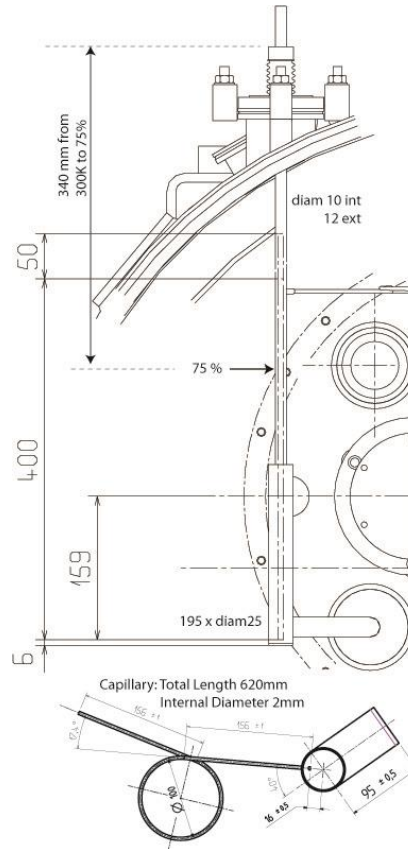
	Temperature Range [K]					
	1.6-2.2	2.2-4	4-6	6-25	20-50	50-300
Uncertainty	± 0.01 K	± 0.02 K	± 0.03 K	± 1 K	± 5 K	± 5 K



Αισθητήρες στάθμης ηλίου και πίεσης

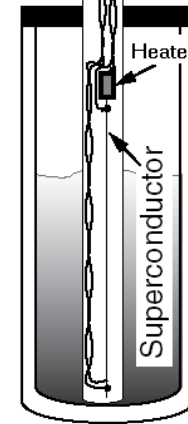


Αισθητήρας πίεσης



Αισθητήρας στάθμης LHe
Υπεραγώγιμο καλώδιο.

Voltage Measurement and Current injection



Αλλαγή αισθητήρα στάθμης LHe

Τα cryogenics instrumentation στον LHC

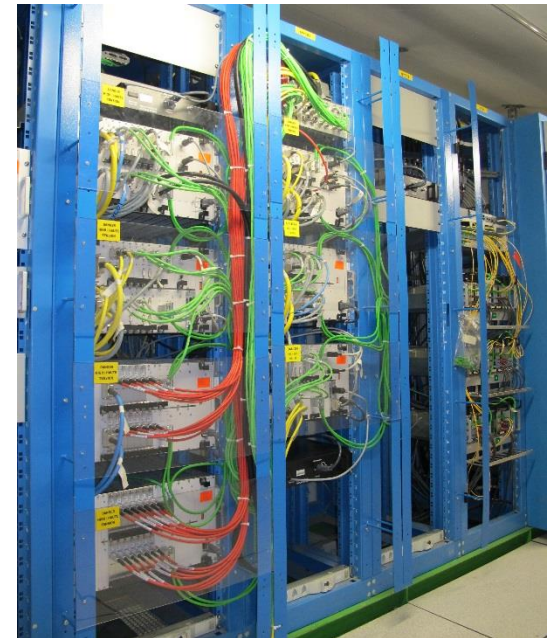
Κατά τον αρχικό σχεδιασμό αποφασίστηκε να τοποθετηθούν τα ηλεκτρονικά:

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

Λόγω μεγάλου κόστους καλωδίωσης και πιθανών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

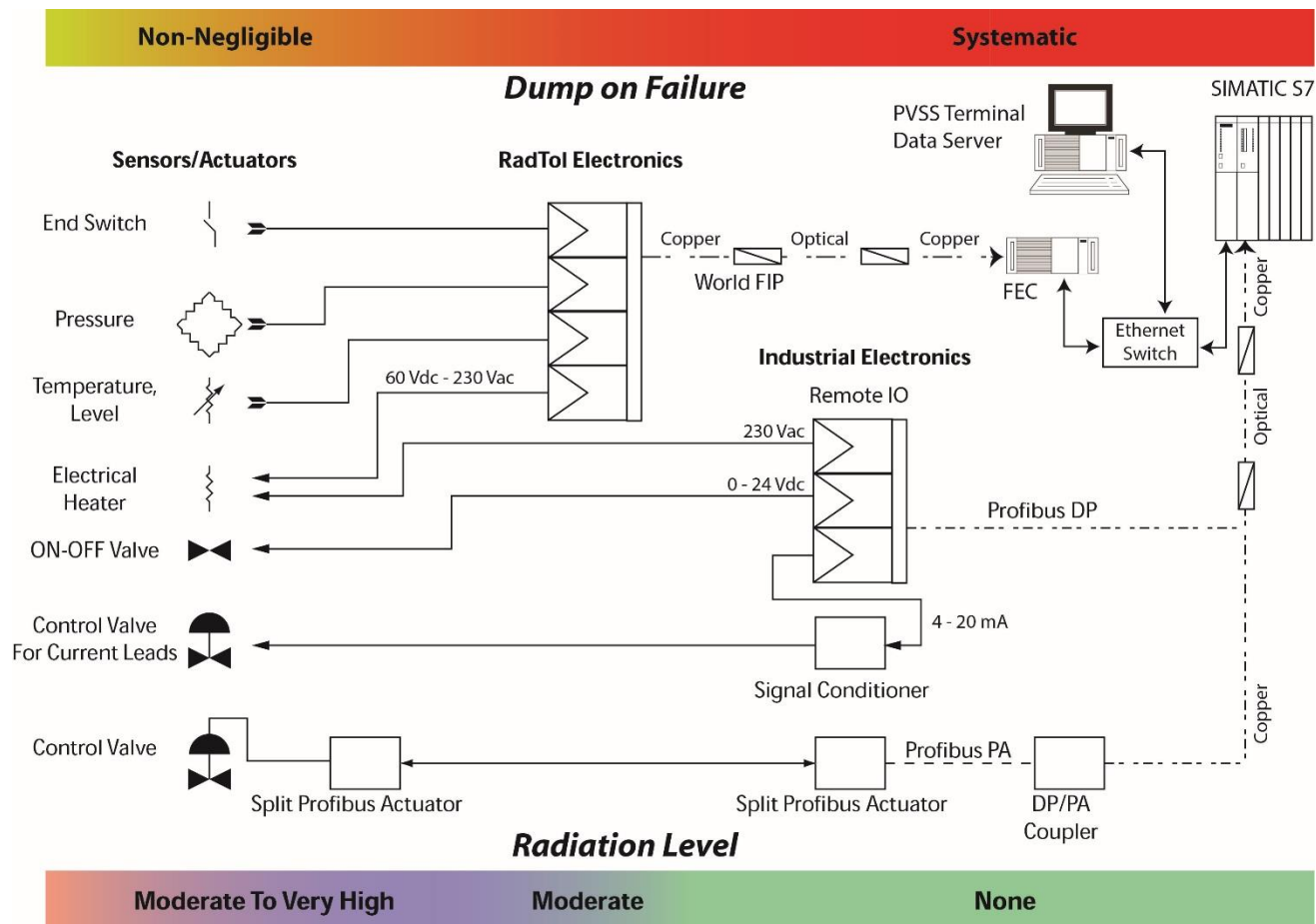


Κάτω από τους διπολικούς μαγνήτες



Σε υπόγειους χώρους μειωμένης ακτινοβολίας

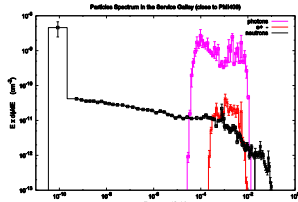
Κρυογενικά συστήματα: Αισθητήρες & Αυτόματος έλεγχος



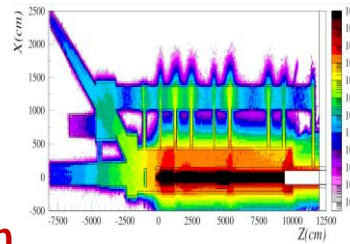
- Οι αισθητήρες δοκιμάστηκαν για την αντοχή τους στην ακτινοβολία κατά τον αρχικό σχεδιασμό.
- Τα ανθεκτικά στην ακτινοβολία ηλεκτρονικά σχεδιάστηκαν για τους υπόγειους χώρους του LHC.

Φυσική ακτινοβολιών και επιπτώσεις στα ηλεκτρονικά

Ενέργεια σωματιδίων

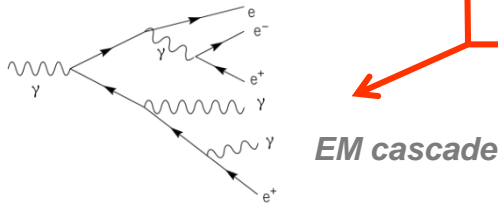


$h > 20 \text{ MeV}$



Radiation Field

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



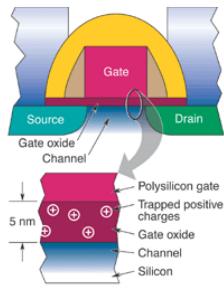
Σφάλματα & Βλάβες σε ημιαγωγούς

Single Event Effects

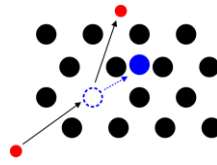
Effect in the Device

Dose (TID)

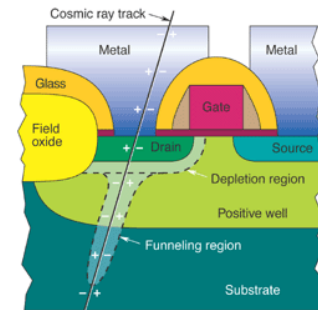
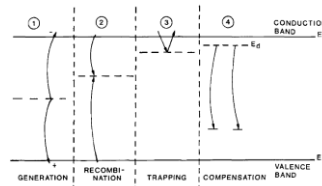
Displacement Damage



TID



DD

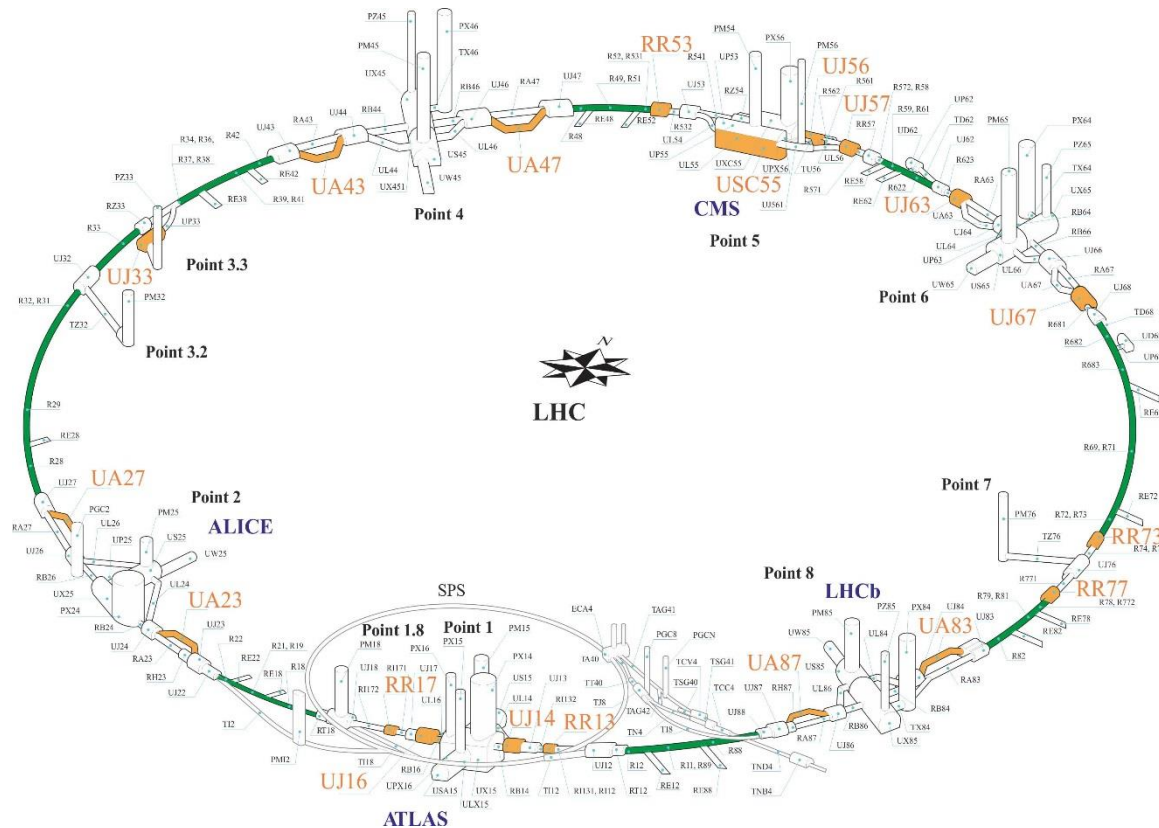


SEEs

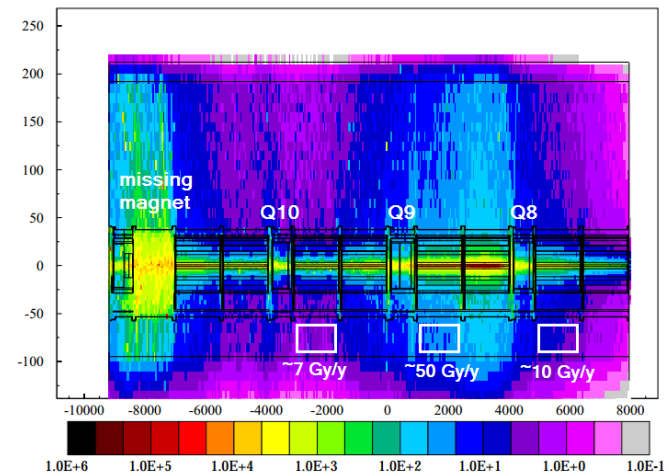
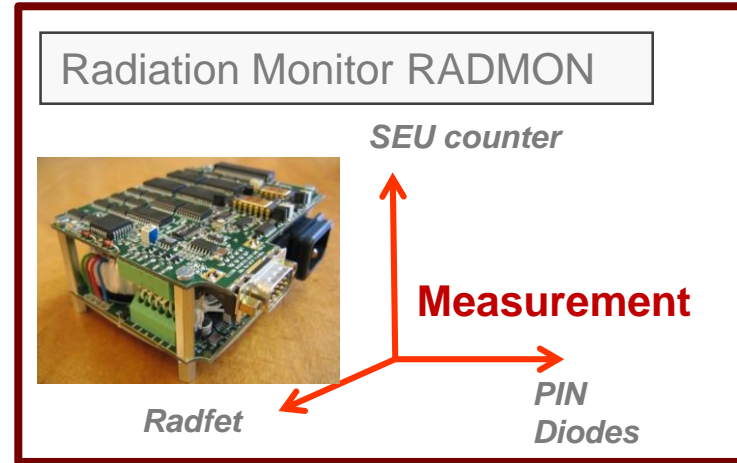
- TID:** Συσσώρευση ιονίζουσας δόσης → Δημιουργία ζευγών electron-hole. Αλλαγή των χαρακτηριστικών λειτουργίας (π.χ. Transistors/Mosfets).
- DD:** Συσσώρευση σφαλμάτων λόγω συγκρούσεων/μετατοπίσεων ατόμων στο πλέγμα. Αλλαγή των ιδιοτήτων του υλικού (πχ. Ενέργεια μετάβασης).
- SEEs:** Στατιστικό φαινόμενο: Μεταβατικό/Μόνιμο/Καταστροφικό. Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων → Πιθανότητα ενεργοποίησης κυκλωμάτων.

J. Scarpulla et al.

CRYO instrumentation - Τοποθεσίες ηλεκτρονικών συστημάτων



Δοκιμές αντοχής μέχρι τα 1000 Gy



FLUKA Simulations
Fynbo, Stevenson, 2002

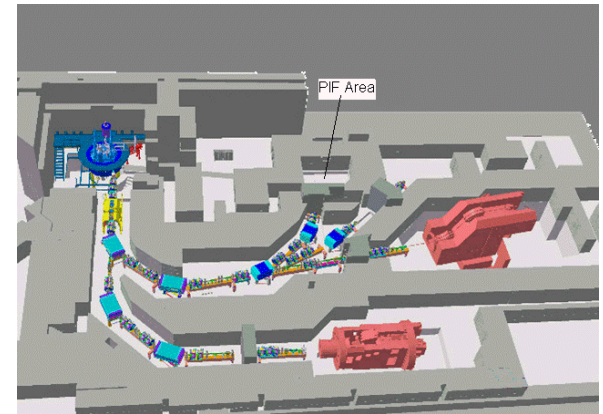
Εγκαταστάσεις δοκιμών αντοχής στην ακτινοβολία



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



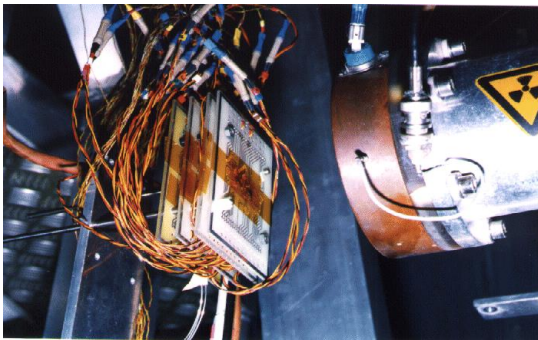
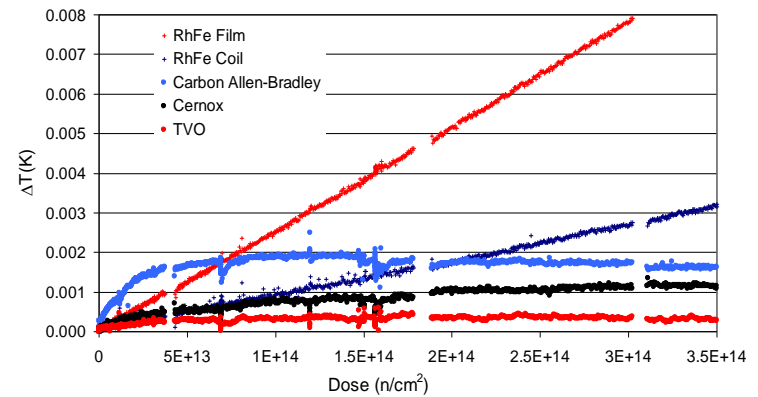
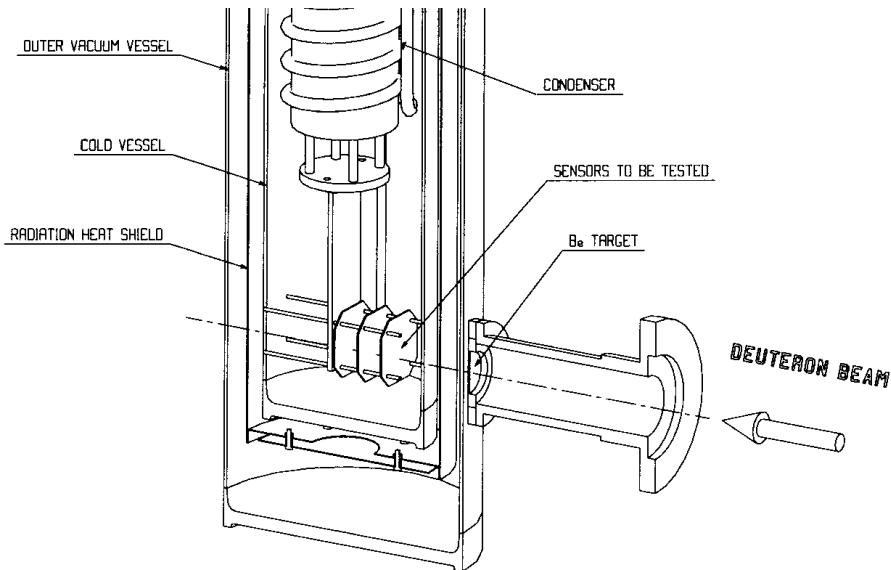
CHARM, CERN
24 GeV/c πρωτόνια σε ποικιλία στόχων.
Μεγάλη ποικιλία περιβάλλοντων ακτινοβολίας.



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

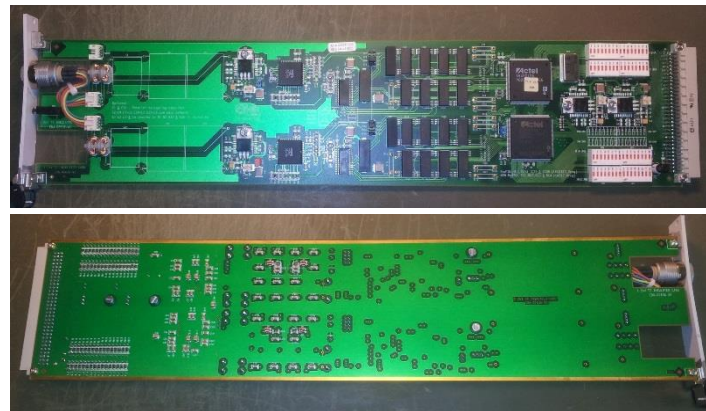
Δοκιμές στα SARA (Grenoble, FR) και CERI (Orleans, FR)

2 νέες κάρτες για το Run 2 του LHC

Electrical heaters for the beam screen (EHBS)



TT Insulated 1.2KV
(for 600A current leads)

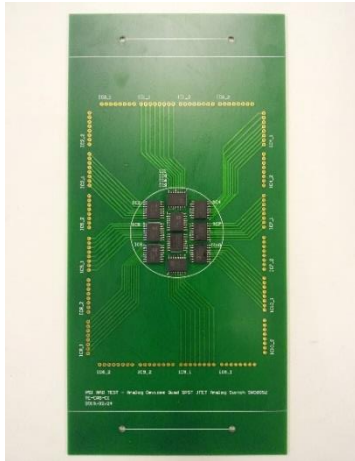


Για το run #2 του LHC, 2 νέες κάρτες σχεδιάστηκαν και εγκαταστάθηκαν.

EHBS (271 κάρτες) σε όλον τον επιταχυντή.

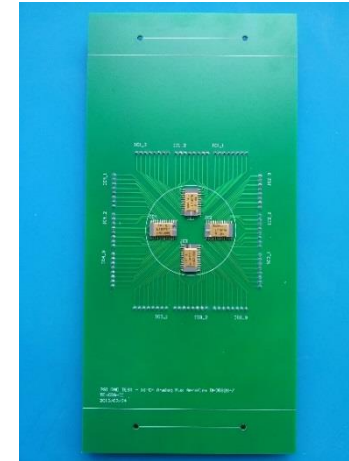
TT cards (765 κάρτες) σε περιοχές με χαμηλότερη ακτινοβολία.

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

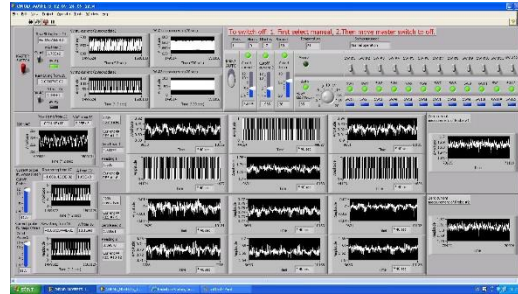
- + \$\$\$ (€ € €), Ακριβά
 - + Ανθεκτικά στην ακτινοβολία
 - + Απαιτούνται ελάχιστες δοκιμές
 - Διαθεσιμότητα
 - - Περιορισμοί περί όπλων*
- * *ITAR (International Traffic in Arms Regulations)*

- 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.

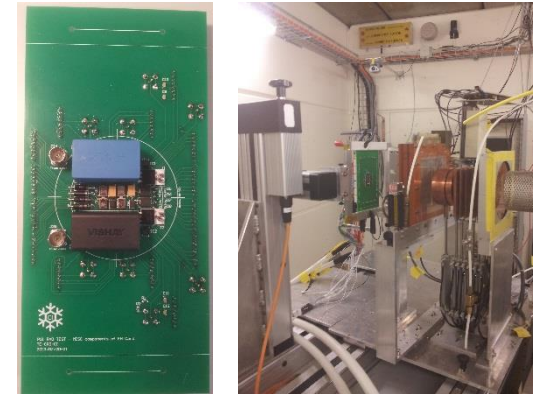
Δοκιμές μεμονωμένων ηλεκτρονικών



CNRAD/CNGS
Mixed-Field
JUN-DEC/2012



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

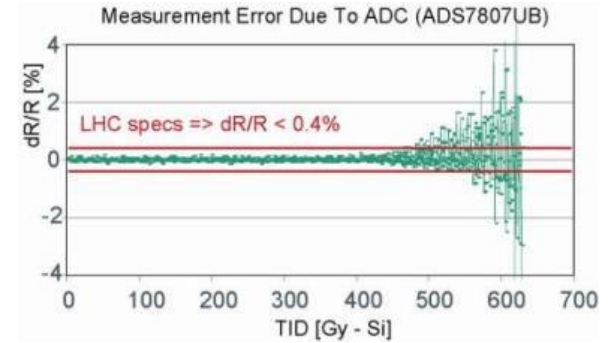
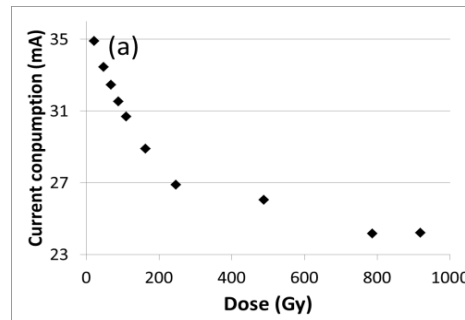
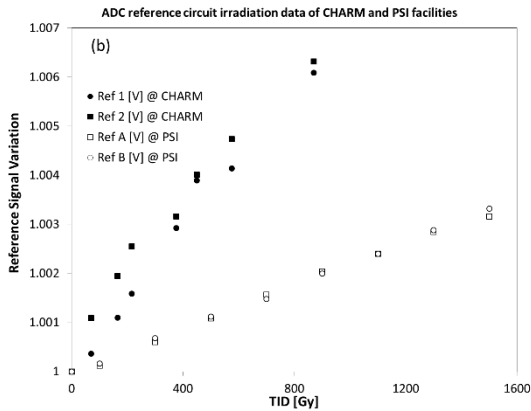
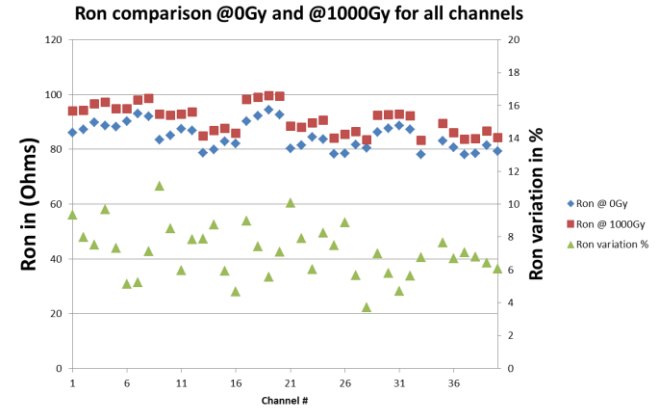
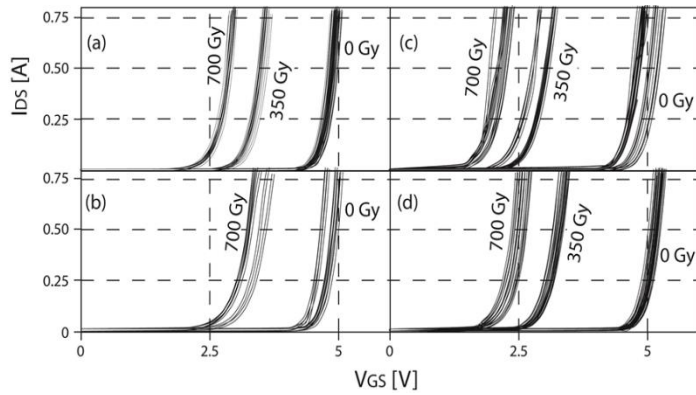


PSI (230 MeV p) FEB/2013
(TID, SEE, DD)

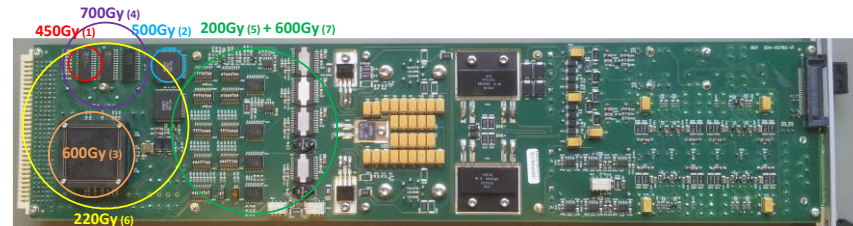
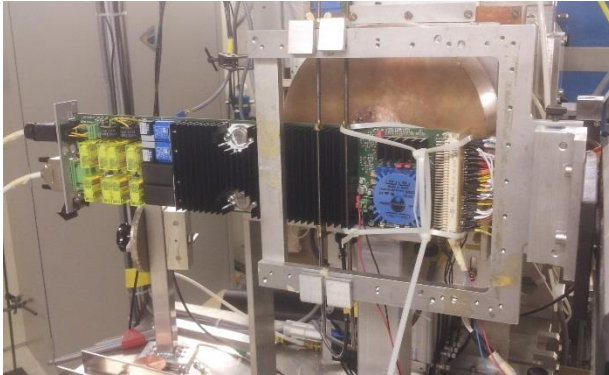


Multiple components
PSI, JUL/2013

Επίδραση ακρινοβολίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά - παραδείγματα

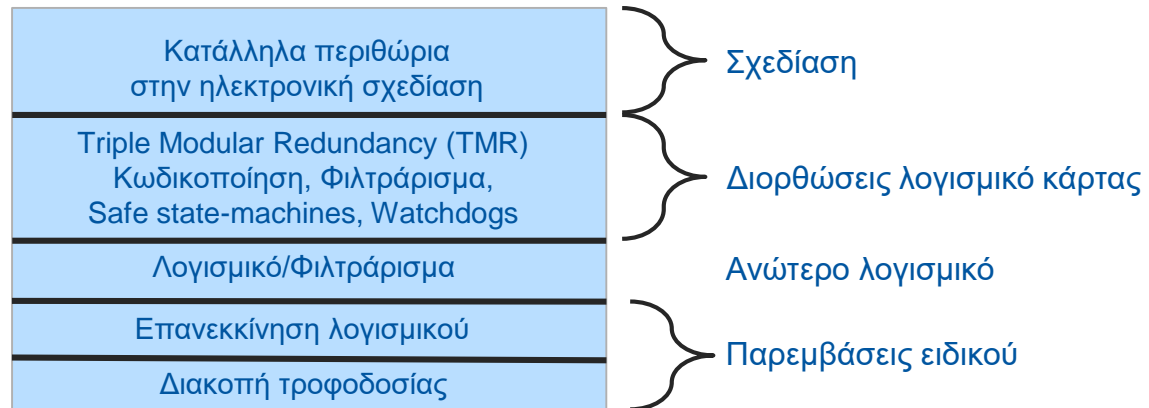


Δοκιμές στο πρωτότυπο



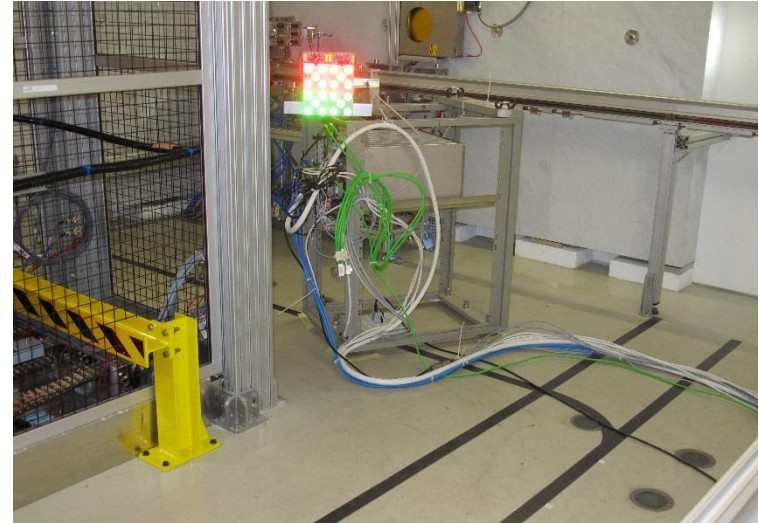
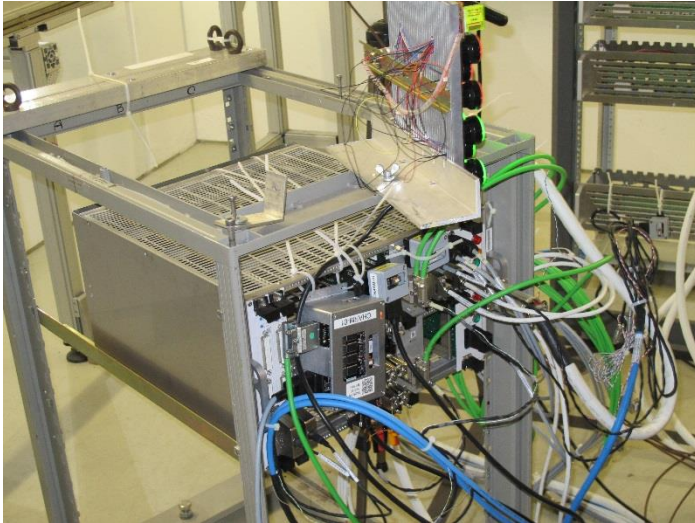
Prototype board
PSI, NOV/2013

Τεχνικές μείωσης επιπτώσεων ακτινοβολίας



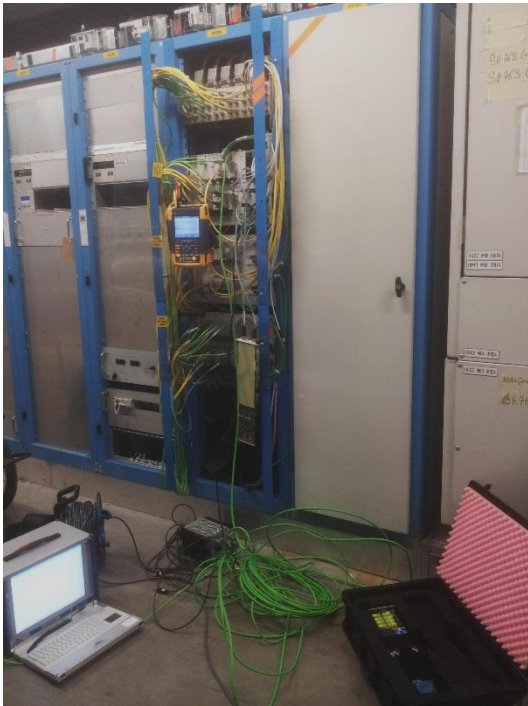
+ άλλα (πχ. Antifuse FPGA, down-clocking, safe statemachines, ...)

Επιβεβαίωση ανθεκτικότητας (στην ακτινοβολία) σειράς παραγωγής



Δοκιμές στο CHARM, CERN σε στατιστικό δείγμα καρτών

Επιβεβαίωση καλής λειτουργίας και έγκριση για παραγωγή

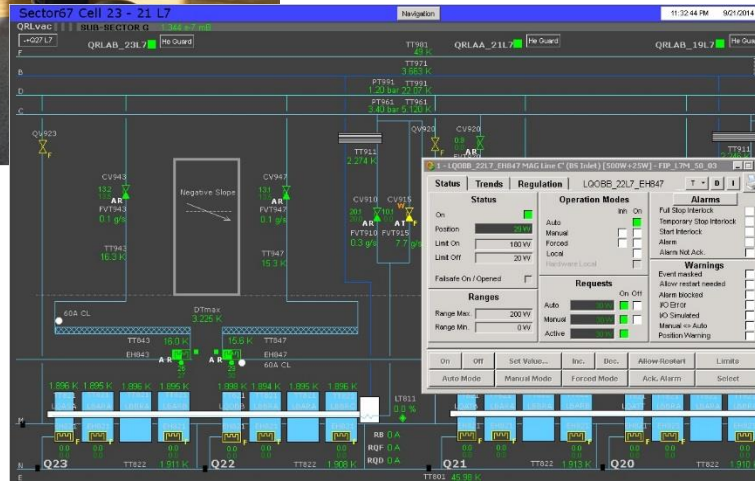
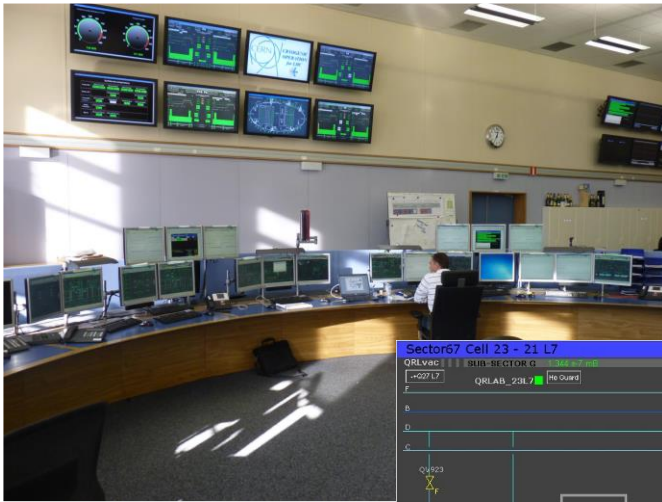


Testing EHBS at P8 (UA87; QYC01&QYC04)
crates with long cables (50m&100m) and external load.

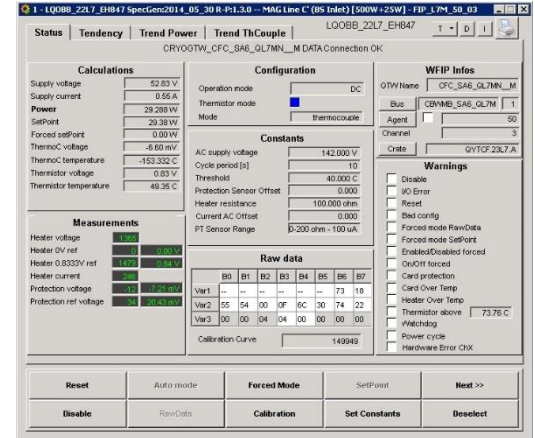


Remote online tests
and PLC tests.

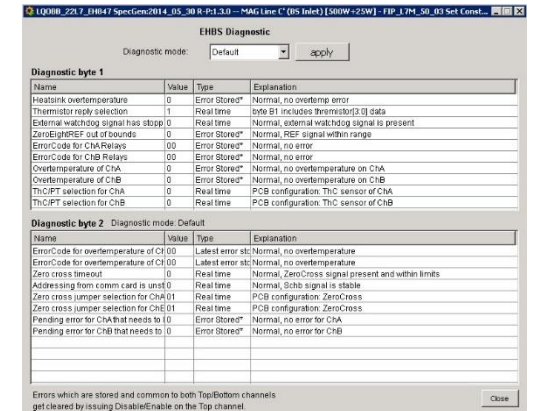
Οθόνες απεικόνισης και χειρισμού



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



Οθόνη αισθητήρων (expert)



Οθόνη αντιμετώπισης σφαλμάτων

Ερωτήσεις



www.cern.ch