

# LHC

Our understanding of the Universe  
is about to change...



Daniel Valúch, CERN  
daniel.valuch@cern.ch

# Large Hadron Collider

- V súčasnosti najväčší a najvýkonnejší urýchľovač častíc
- Postavený v pôvodnom tuneli po odstavenom urýchľovači LEP
- Nachádza sa na Švajčiarsko-Francúzskych hraniciach blízko Ženevy
- Na výstavbe LHC a jeho experimentov sa podieľalo viac ako 10 000 vedcov, fyzikov, inžinierov z desiatok štátov a stoviek inštitúcií z celého sveta

# Large Hadron Collider

- Cieľom LHC je hlavne
  - Pokračovanie vo výskume Štandardného modelu (Higgs, hmotnosť častíc atď.)
  - Teória zjednotenia síl, supersymetria
  - Temná hmota a energia, stále neobjavený druh hmoty?
  - Hmota vs. antihmota vo vesmíre
  - Štúdium kvark-gluónovej plazmy
- LHC je „discovery machine“, fyzici predpokladajú nové závažné objavy

# Large Hadron Collider

- Celkové náklady na výstavbu LHC ~4 mld. Eur

<b>Construction costs</b>	<b>Personnel</b>	<b>Materials</b>	<b>Total</b>
LHC machine and areas <i>including: Machine R &amp; D and injectors, tests and pre-operation</i>	738	2262	3000
CERN share to detectors	523	297	820
LHC computing (CERN share)	52	50	102
<b>Total (MEur)</b>	<b>1313</b>	<b>2609</b>	<b>3922</b>

- Plus každý experiment ~800 mil. Eur, financovaný univerzitami a inštitútmi

# Large Hadron Collider

- Hlavné míľniky v projekte LHC

- 1984: Prvé idey a návrhy
  - 80-te roky: Začali sa skúmať možnosti kryogenika a super vodivosti
  - 1994: Projekt oficiálne schválený
  - 1996: Schválené ciele
  - 1997: Prvý prototyp
  - 1999: Začala sa stavba
  - 2000: Odstavenie
  - 2001: Zememerač GRID
  - 2007: Prvý kompletný sektor vychladený a magnety pod prúdom
  - 2008: Spustenie do prevádzky
- |       |  |
|-------|--|
| 1983: | schválený Superconducting Super Collider<br>87km urýchľovač, 20 TeV / zväzok<br>predpokladané náklady 4.4 mld \$ |
| 1988: | výber miesta (Texas)   |
| 1991: | začiatok výstavby  |
| 1993: | projekt zrušený po vybudovaní 26% tunela a<br>vyčerpaní 270% rozpočtu (23.5 km, 12 mld \$)                       |

# Large Hadron Collider

- 10.9.2008 – spustenie do prevádzky
- 19.9.2008 – vážna technická porucha
- 20.11.2009 – znova spustenie do prevádzky
- 23.11.2009 – prvé zrážky protónov pri 450 GeV
- 30.11.2009 – dosiahnutie rekordnej energie 1.18 TeV
- 30.3.2010 – prvé zrážky protónov pri energii 3.5+3.5 TeV
- 8.11.2010 – prechod na ióny olova
- 7.12.2010 – začiatok zimnej prestávky

# Základné parametre LHC

- Dĺžka 27 km (26 658.883 m)
- Tunel 80-160 m pod povrchom, sklon 1,4°
- Urýchľuje dva protibežné zväzky protónov na energiu 7+7 TeV, alebo zväzky iónov olova ( $^{208}\text{Pb}^{82+}$ ) na celkovú energiu 574+574 TeV
- Plne “obsadený” protónový zväzok sa skladá z 2808 bunchov o dĺžke  $\sim 1,2$  ns a intenzite  $1,15 \times 10^{11}$  ppb

# Základné parametre LHC

- Celková energia obiehajúceho zväzku 350 MJ
- Na naplnenie jedného ringu treba 8-12 injekcií z SPS (~10 minút)
- Urýchlenie trvá 30 – 60 minút
- Obiehajúci zväzok na „flat-top“ desiatky hodín



# Základné parametre LHC

- Energetické nároky ~100 MW (CERN celkovo 200-250 MW)
- Chladienie supratekutým héliom na 1,8 K
- Celkové množstvo hélia 120 ton
- Zväzok dosiahne 99.999 999 1 % rýchlosti svetla a obieha 11 245 krát za sekundu
- Urýchľuje ho napätie 16 MV o frekvencii 400.788 8xx MHz

# Základné parametre LHC

- Urýchľovač rozdelený do 8 sektorov
- 8 prístupových bodov
- V štyroch bodoch sa zväzky pretínajú – experimenty

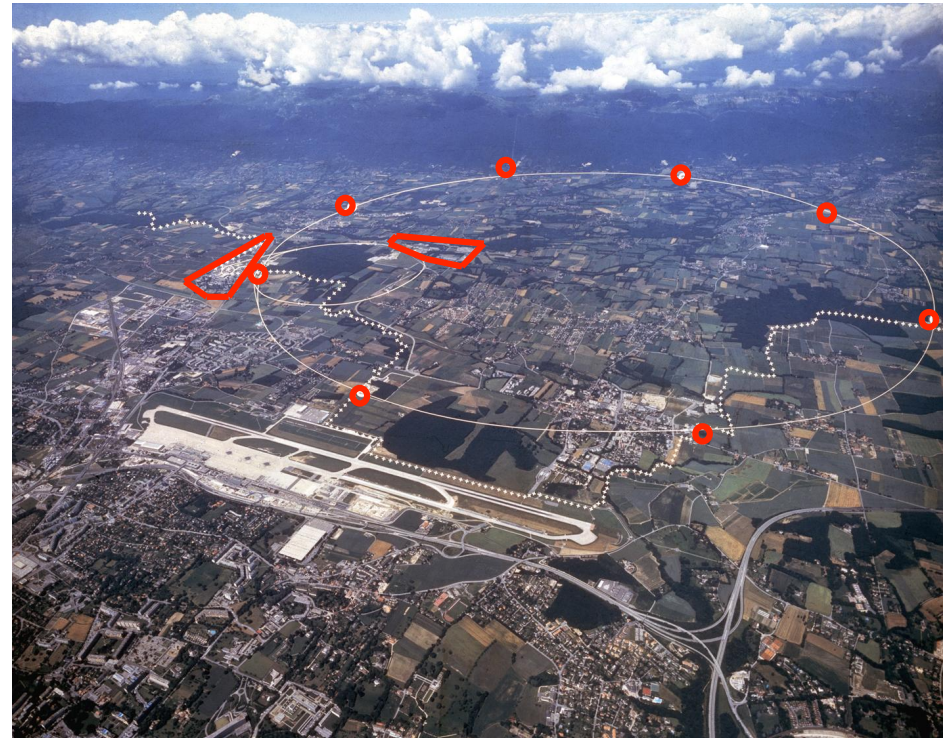
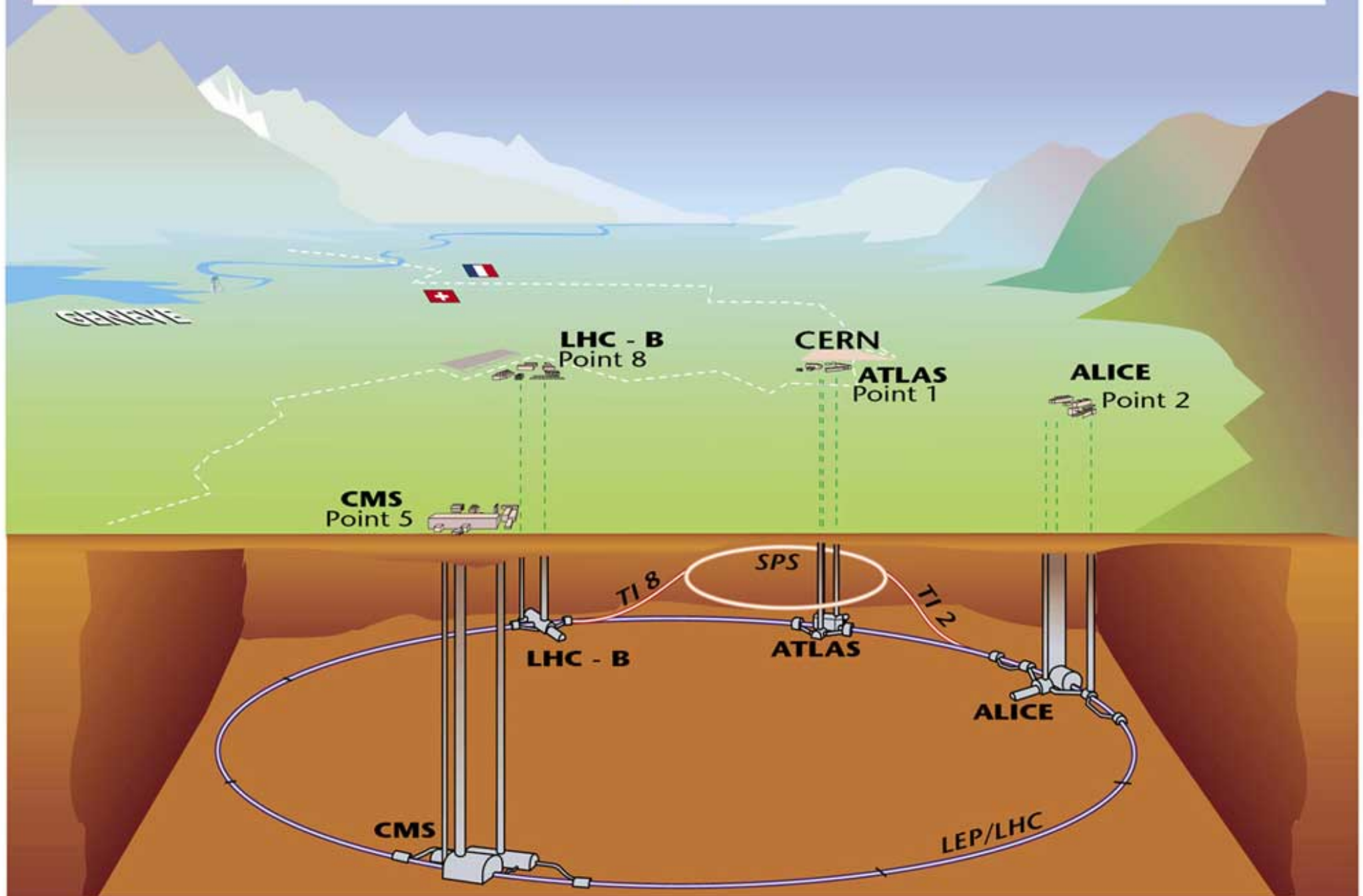


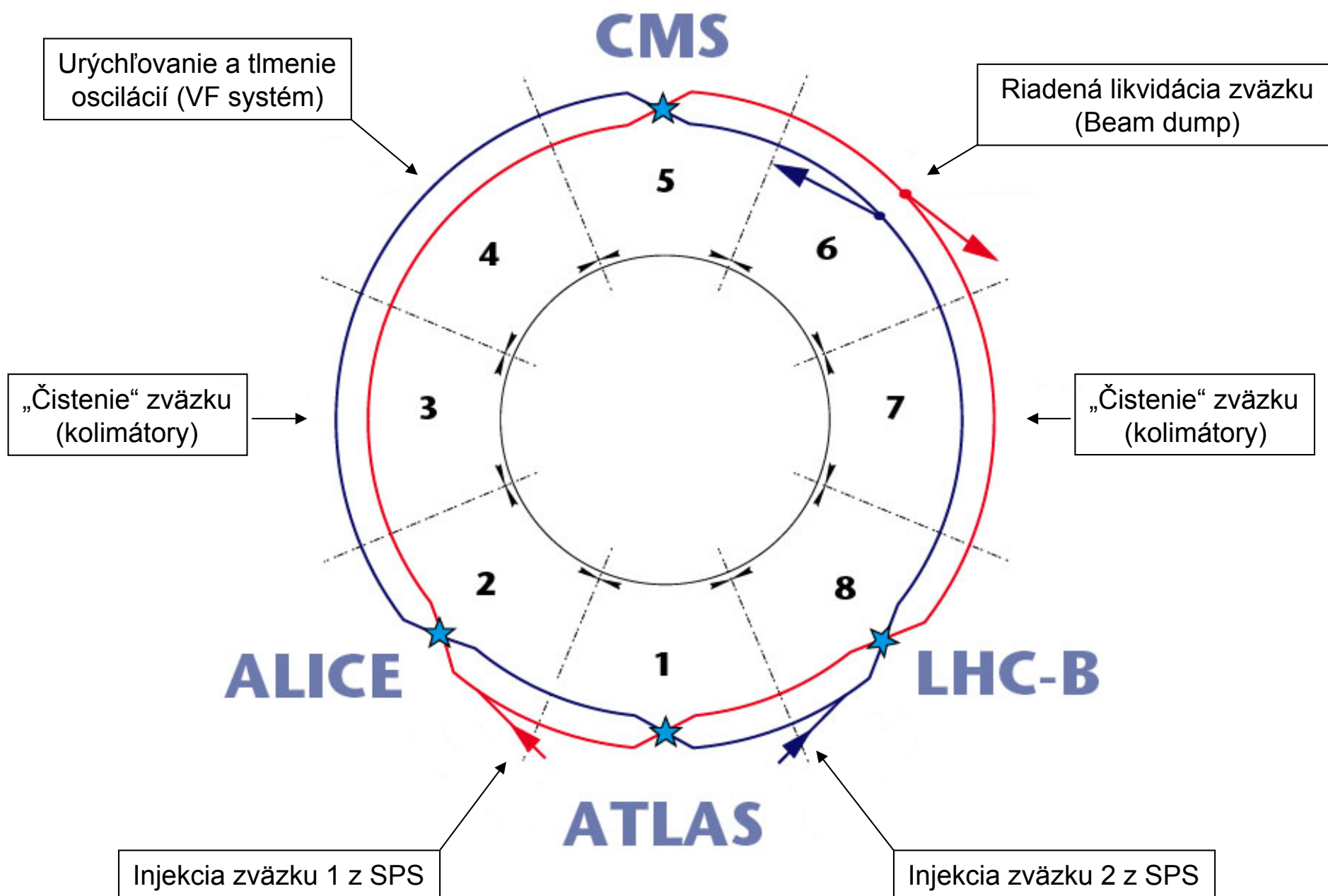


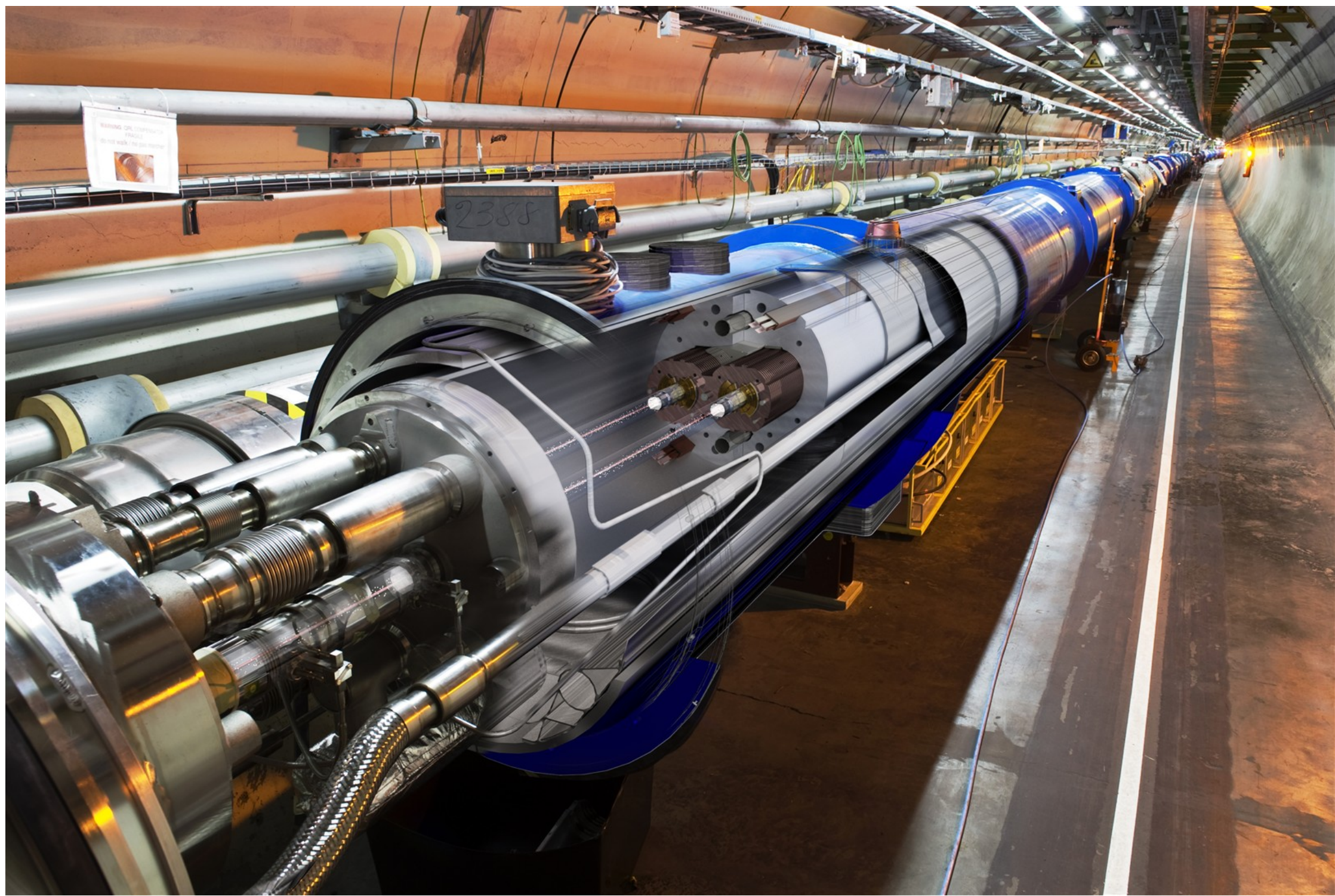
Foto: CERN, <http://cdsweb.cern.ch/collection/Photos>

# Overall view of the LHC experiments.



# Schematické znázornenie urýchľovača LHC

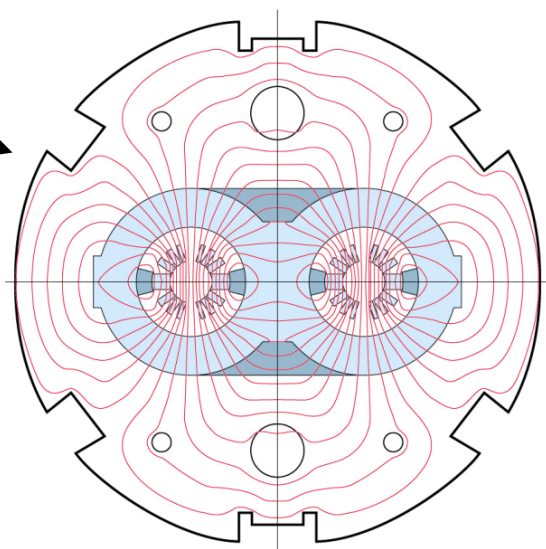




# Magnety a optika

- Zväzok usmerňuje ca. 9600 magnetov rôznych typov
  - z toho 1232 hlavných dipólov (154 v každom oktante)
  - 392 kvadrupólov
  - Tisíce korektorov a magnetov vyšších rádov
- Celková energia uložená v cievkach magnetov LHC >11 GJ
- Chladenie supratekutým héliom na 1,8 K
- Supravodivé káble magnetov sa skladajú z 7  $\mu\text{m}$  hrubých vlákien, ktorých celková dĺžka zodpovedá 5x vzdialenosti zo Zeme ku Slnku a naspäť

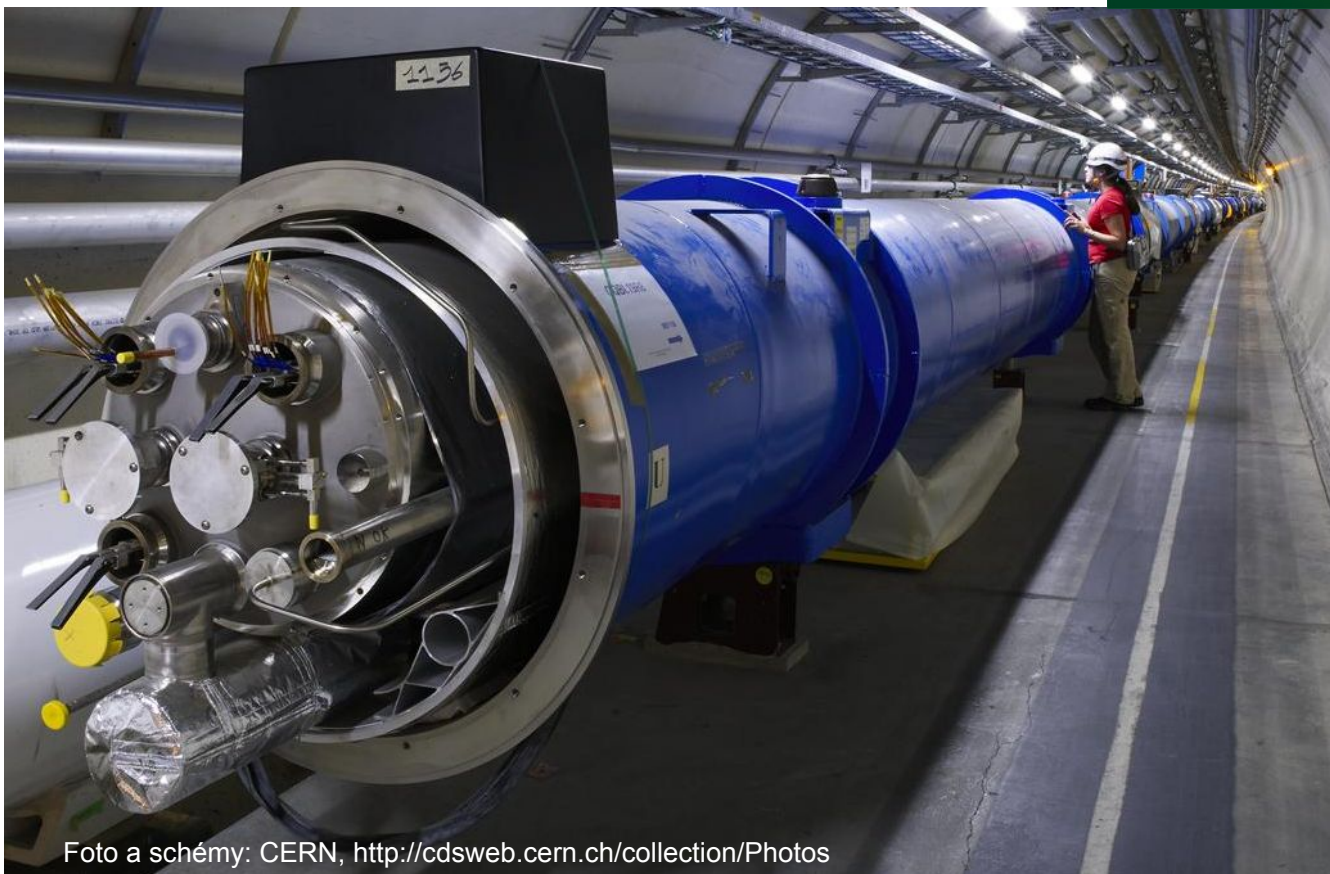
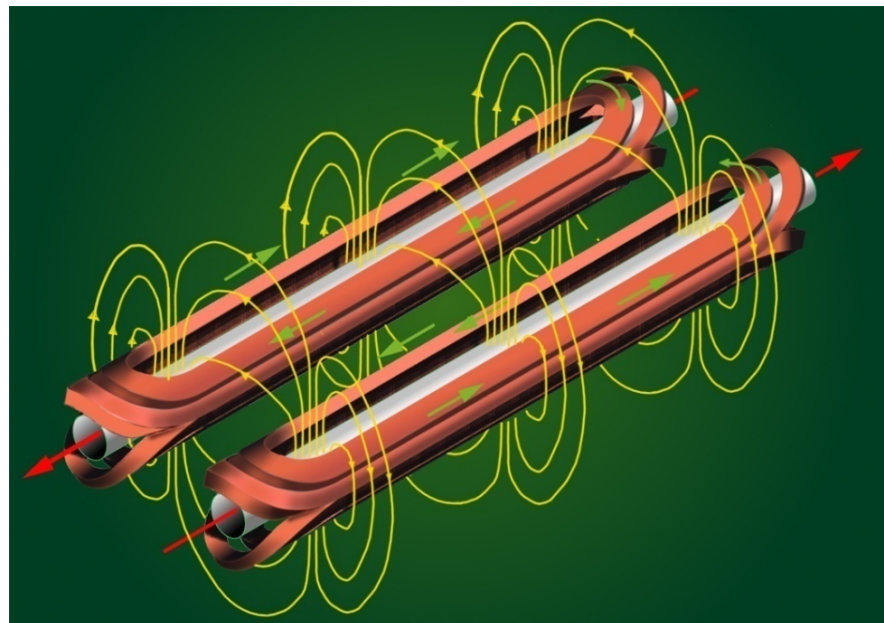
Cievky a  
magnetické pole  
hlavného dipólu



Dipólové magnety  
nainštalované v  
tuneli LHC



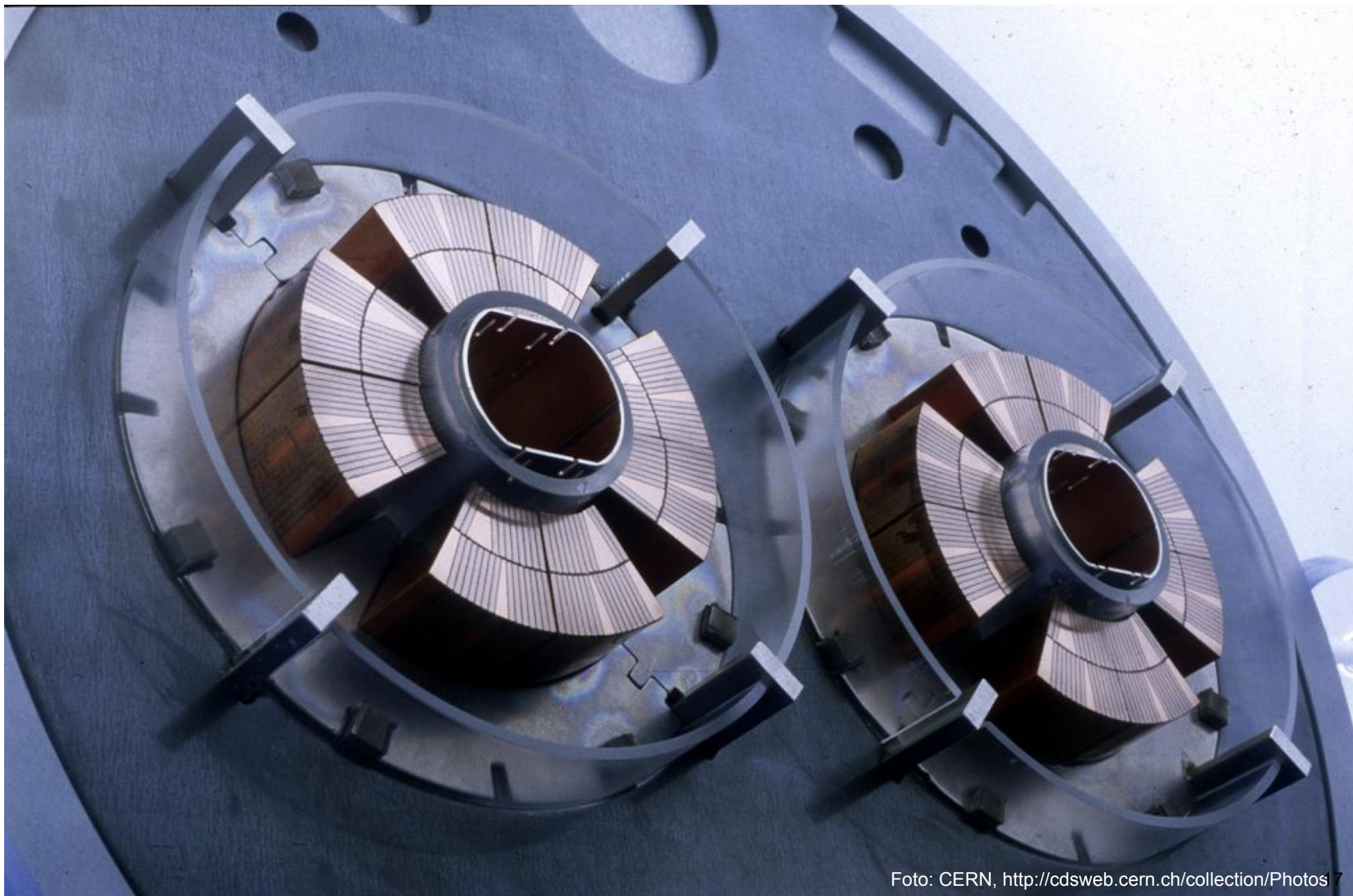
Computed magnetic flux map at  $B_0=10$  Tesla



- Hmotnosť 30 t
- Dĺžka 16.5 m
- Nominálne pole 8.5 T
- Nominálny prúd 12 000 A
- Indukčnosť 98 mH
- Uložená energia 8.2 MJ
- Pracovná teplota 1.8K
- Priemer supravodivých vlákien  $7\mu\text{m}$
- Počet závitov 64
- Prúdová hustota  $6\text{ kA/mm}^2$
- Elektromagnetické sily vo vnútri štruktúry  $2.1\text{ MN/m}$
- Celková dĺžka použitého supravodivého kábla 7 000 km



## Prierez kvadrupólovým magnetom



# Magnety a optika

- Typy magnetov
  - Dipólové, kvadrupólové,
  - Sextupólové, oktapólové
  - Dekapólové
- Nominálne prúdy magnetov
  - 12 kA, 6kA
  - 1200 A, 600 A
  - 120 A, 60A



# LHC superconducting cables

**SC cable 1 - Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.65, Dim. 15.1 x 1.9 [mm],  
No. of strands = 28, strand  $\phi$  = 1.065 mm,  
Used in magnet : MB (main dipole)**



13 kA

**SC cable 2 - Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.95, Dim. 15.1 x 1.48 [mm],  
No. of strands = 36, strand  $\phi$  = 0.825mm,  
Used in magnet : MB (main dipole)**



13 kA

**SC cable 4 - Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.75, Dim. 8.8 x 0.84 [mm], No. of strands = 36, strand  $\phi$  = 0.48mm,  
Used in magnet : MQMC, MQML**



6 kA

**SC cable 5 - Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.75, Dim. 8.3 x 0.845 [mm], No. of strands = 34, strand  $\phi$  = 0.48mm,  
Used in magnet : MQY**



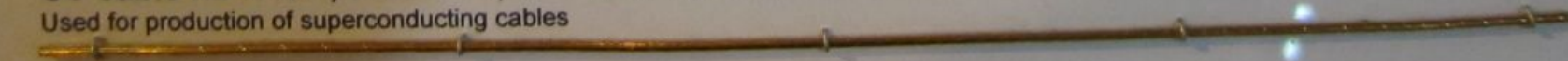
4 kA

**SC cable 6 - Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.25, Dim. 8.3 x 1.275 [mm], No. of strands = 22, strand  $\phi$  = 0.74mm,  
Used in magnet : MQY**



4 kA

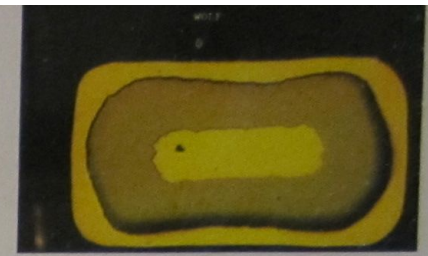
**SC cable Nb47%Ti, Cu/Sc = 5,  $\phi$  = 1.6 mm, filament number = 17, filament diameter = 117  $\mu$ m  
Used for production of superconducting cables**



600 A

**SC wire 4 - Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.65, Dim. 0.97 x 1.65 [mm]**  
Used in corrector magnet : MCBX

1200 A



**SC wire 3 - Nb47%Ti, Cu/Sc > 1.6 – 1.9, Dim. 0.73 x 1.25 [mm]**  
Used in MCB corrector magnets : MCS,MS/MSS, MQT/S, MQTL, MQSX

600 A

**SC wire 2 - Nb47%Ti, Cu/Sc > 4.0 – 4.8, Dim. 0.38 x 0.73 [mm]**  
Used in : MCBC, MCBY, MCO, MCSX, MCTX, MCOX, MCSOX, MCSSX

120 A



**SC wire 1 - Nb47%Ti, Cu/Sc > 4.0 – 4.8, Dim.  $\varnothing$  0.435 [mm]**  
Used in corrector magnet : MCB

60 A

**SC 42 wires cable - Nb47%Ti, outside  $\Phi$  = 17.5 mm, wire: Cu/Sc = 5,  
 $\Phi$  = 1.6 mm, filament number = 17, filament diameter = 117  $\mu$ m**  
Used for auxiliary Line-N

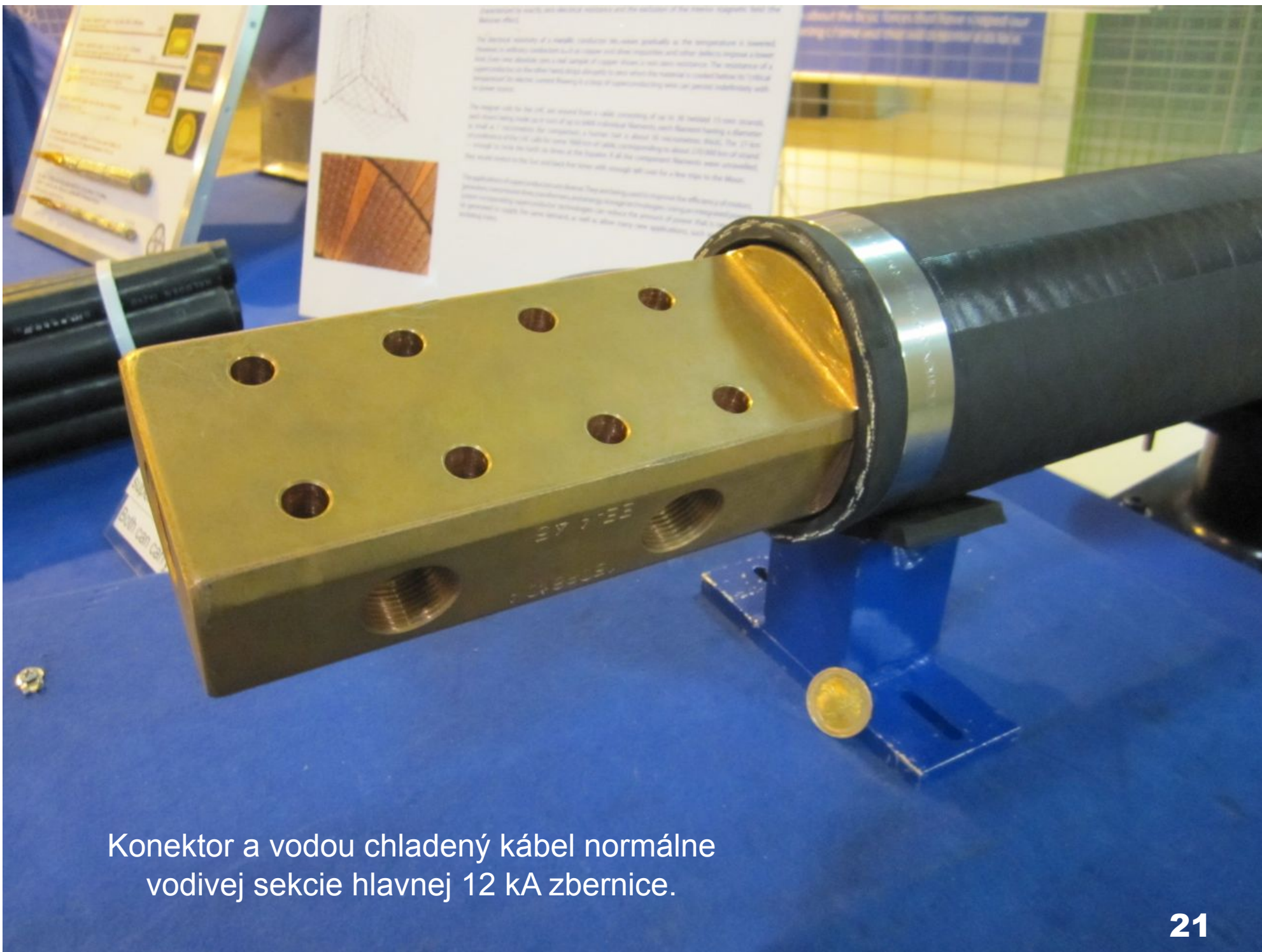
42 x 600 A



**SC cable 3 x 6 kA, one 6 kA cable Nb47%Ti. 13 Sc wires, 7 Cu wires,  
Cu/Sc = 1, one SC wire: filament number=8910, filament  $\varnothing$  6  $\mu$ m**  
Used for powering sc magnets in DS zone

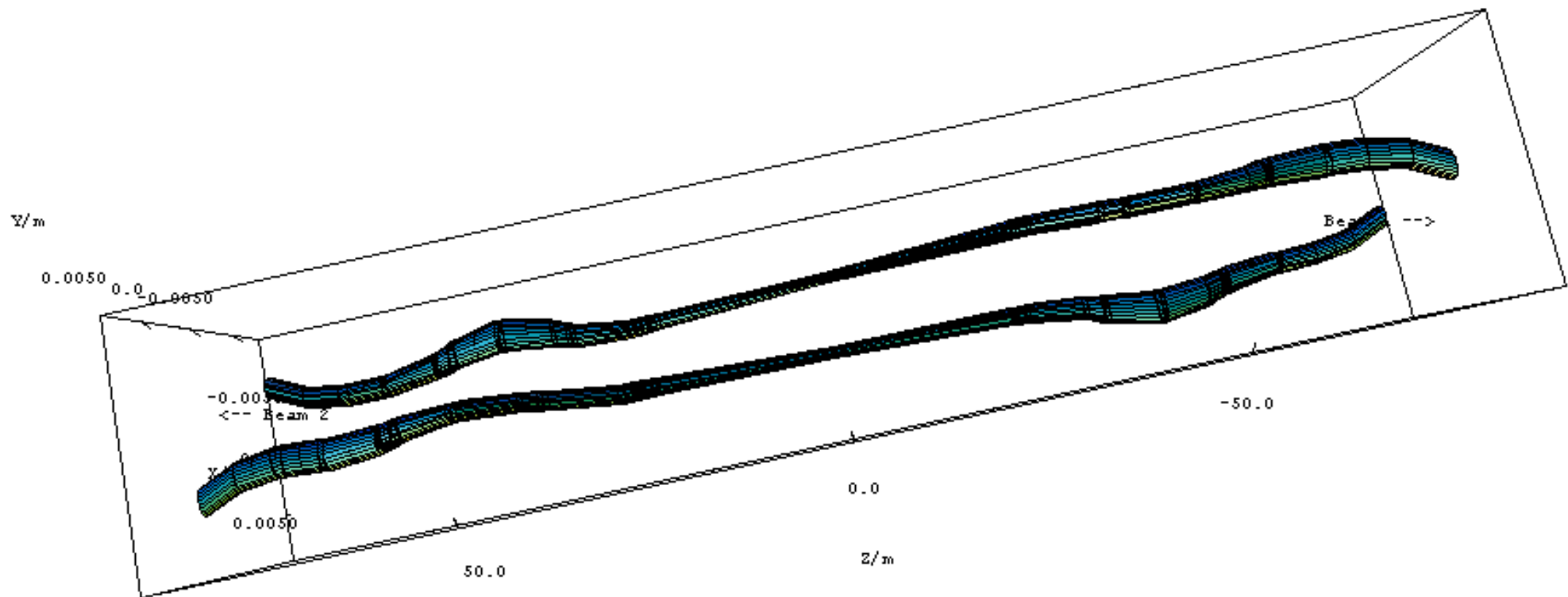
3 x 6 kA



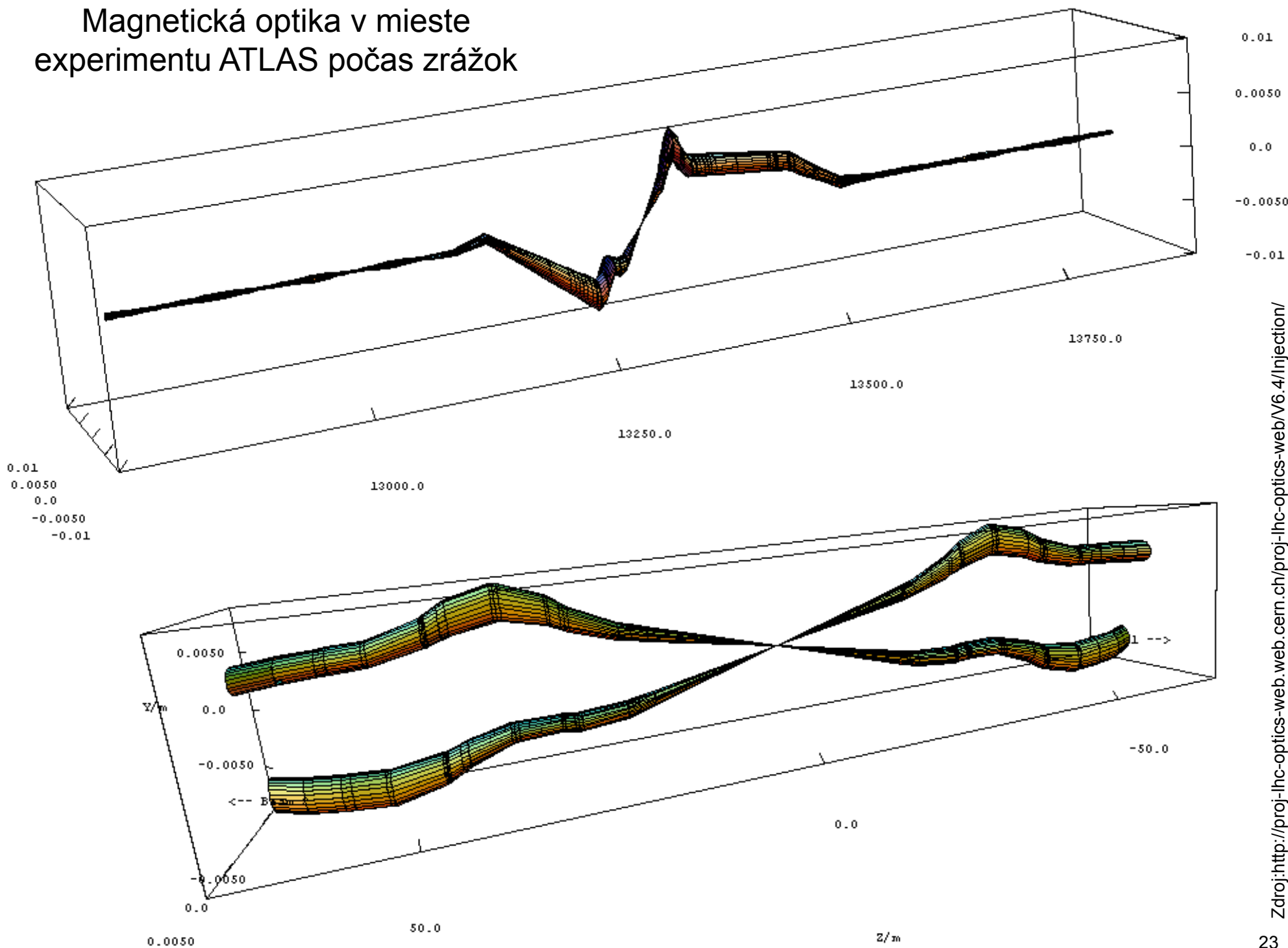


Konektor a vodou chladený kábel normálne vodivej sekcie hlavnej 12 kV zbernice.

# Magnetická optika v mieste experimentu ATLAS počas urýchľovania



# Magnetická optika v mieste experimentu ATLAS počas zrážok



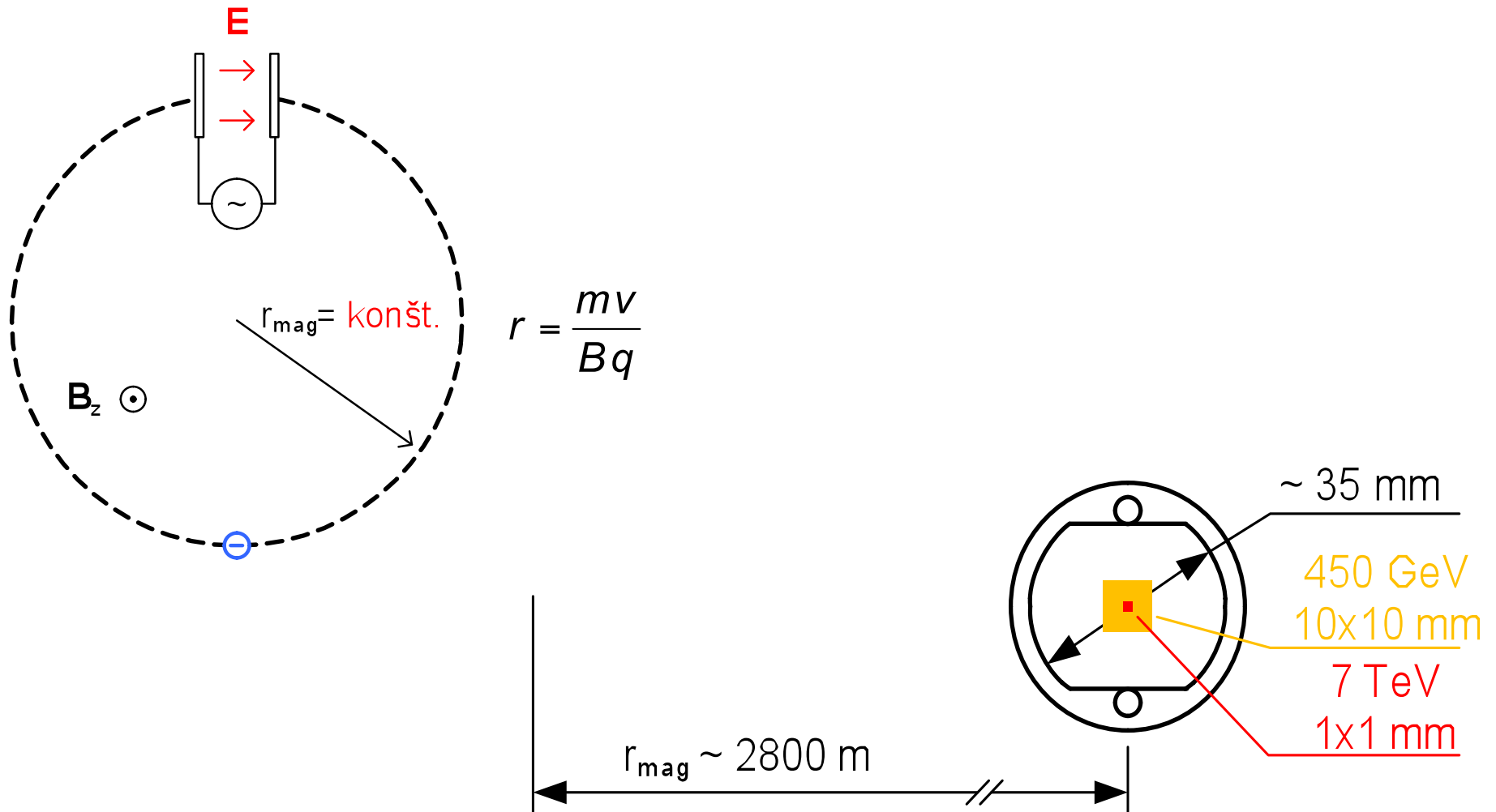
Zdroj: <http://proj-lhc-optics-web.web.cern.ch/proj-lhc-optics-web/V6.4/Injection/IR1.html>

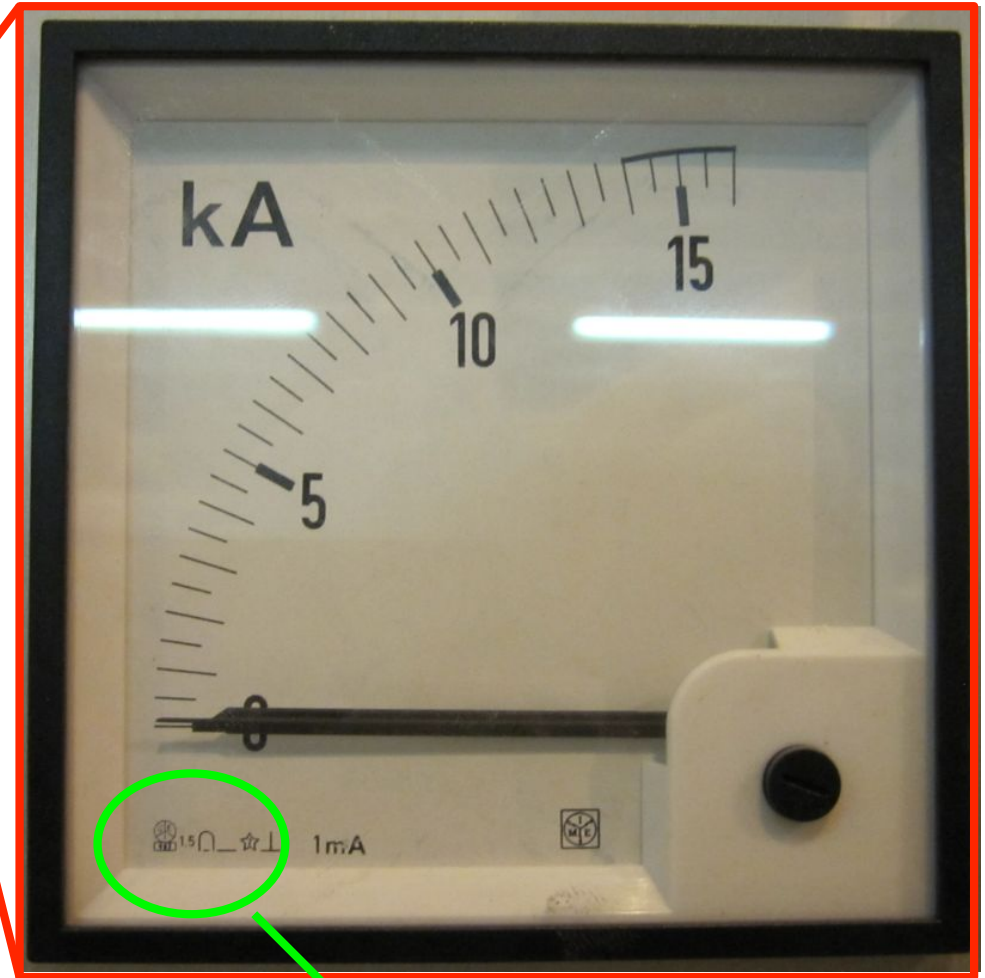
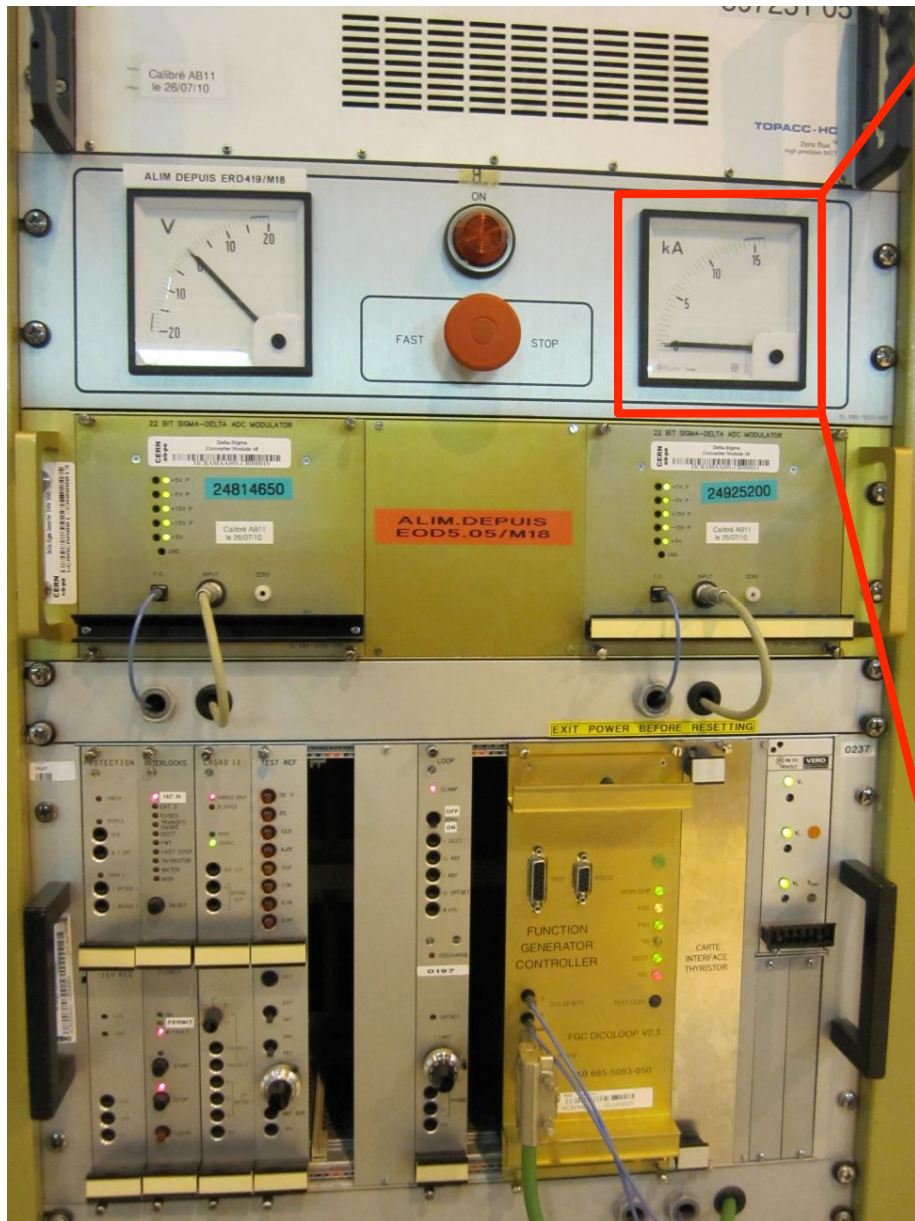
# Magnety a optika

- Pre dosiahnutie polomeru ohybu 2800 m a 7 TeV potrebujeme  
 $B = 8.5$  Tesla (dosiahne sa pri prúde 12 000 A)
- Požadovaná kvalita a presnosť prúdu...

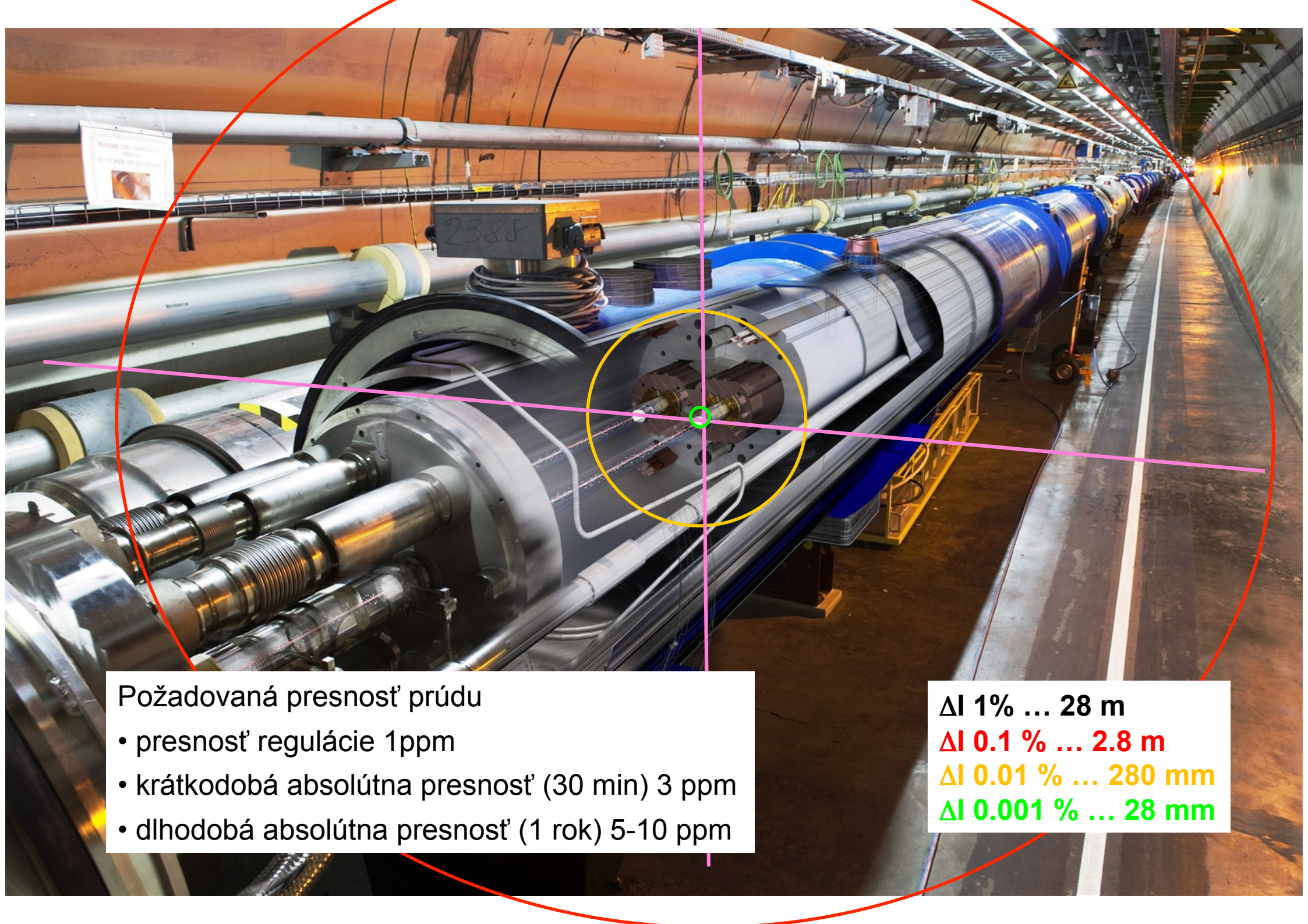


# Magnety a optika





$$r = \frac{mv}{Bq}$$



### Požadovaná presnosť prúdu

- presnosť regulácie 1ppm
- krátkodobá absolútna presnosť (30 min) 3 ppm
- dlhodobá absolútna presnosť (1 rok) 5-10 ppm

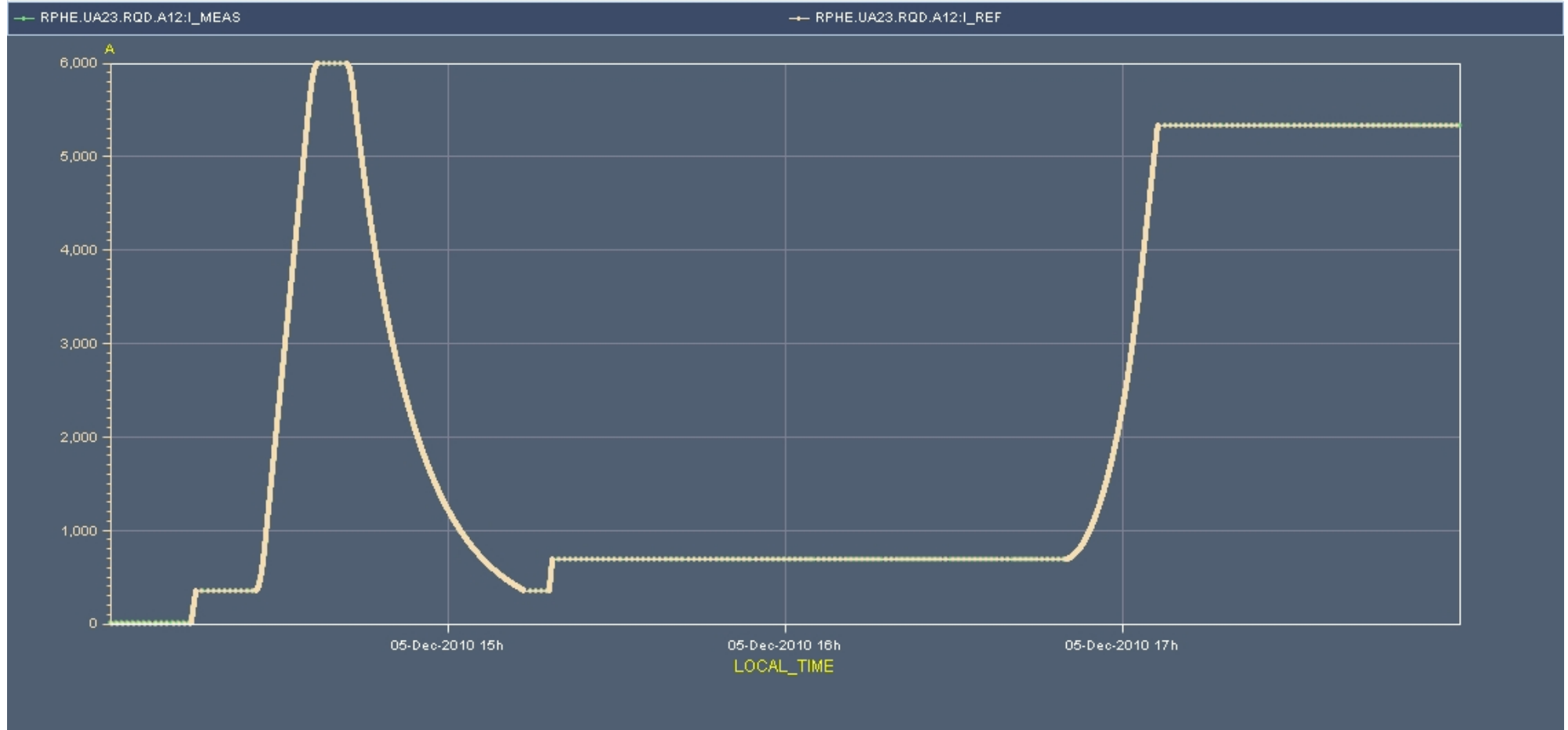
$\Delta I$  1% ... 28 m

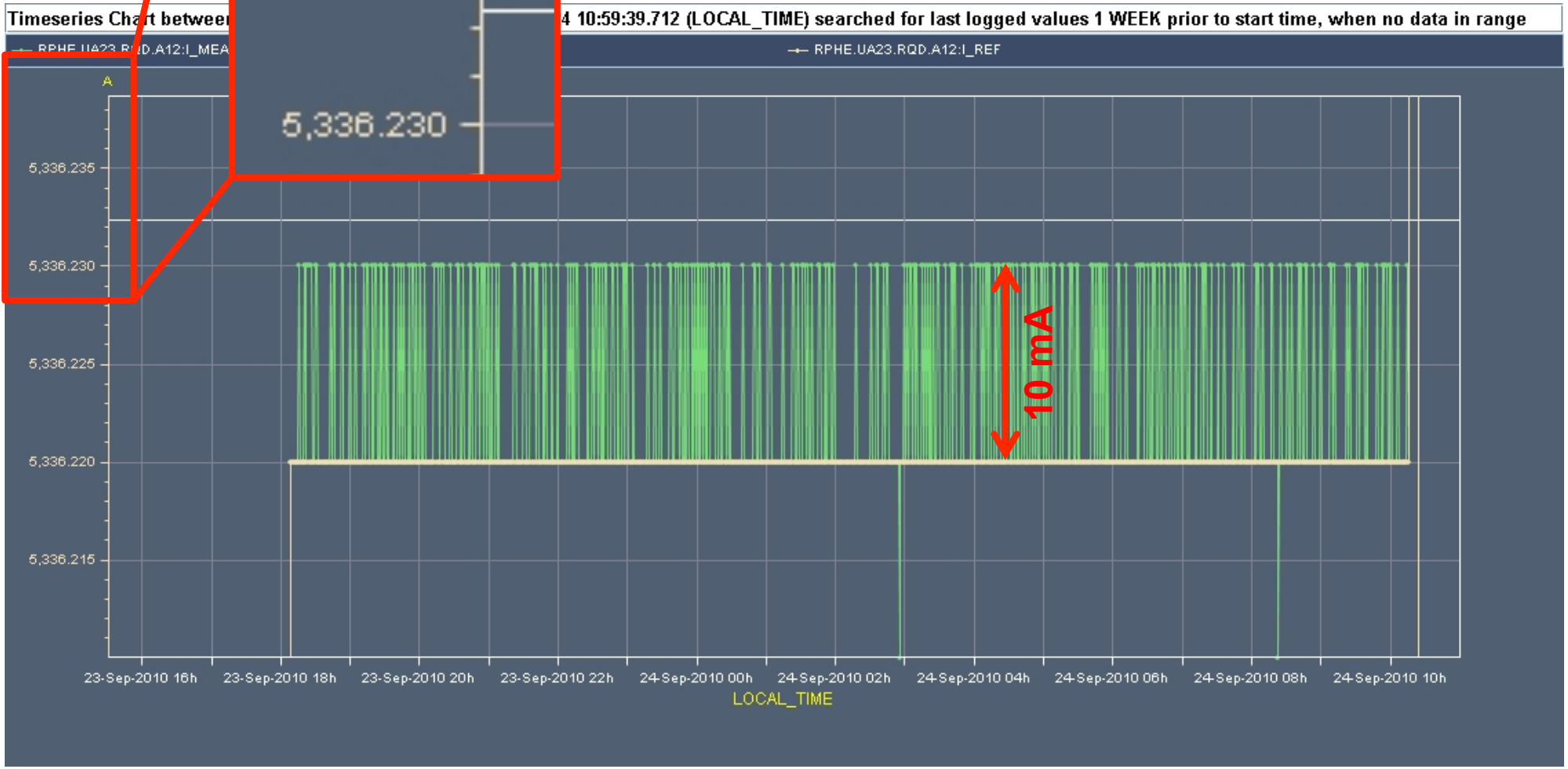
$\Delta I$  0.1 % ... 2.8 m

$\Delta I$  0.01 % ... 280 mm

$\Delta I$  0.001 % ... 28 mm

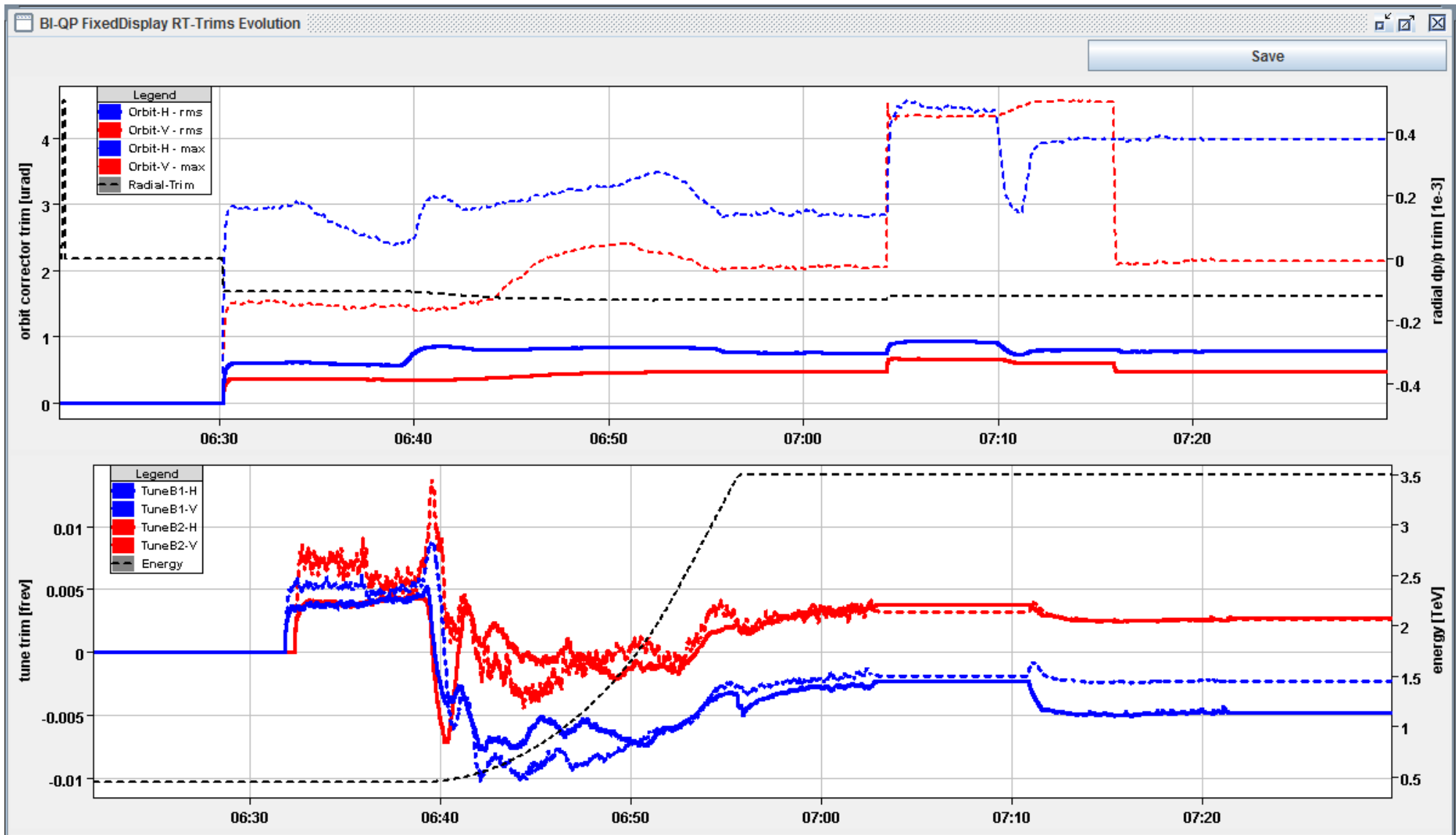
Timeseries Chart between 2010-12-05 14:00:00.000 and 2010-12-05 18:00:00.000 (LOCAL\_TIME)





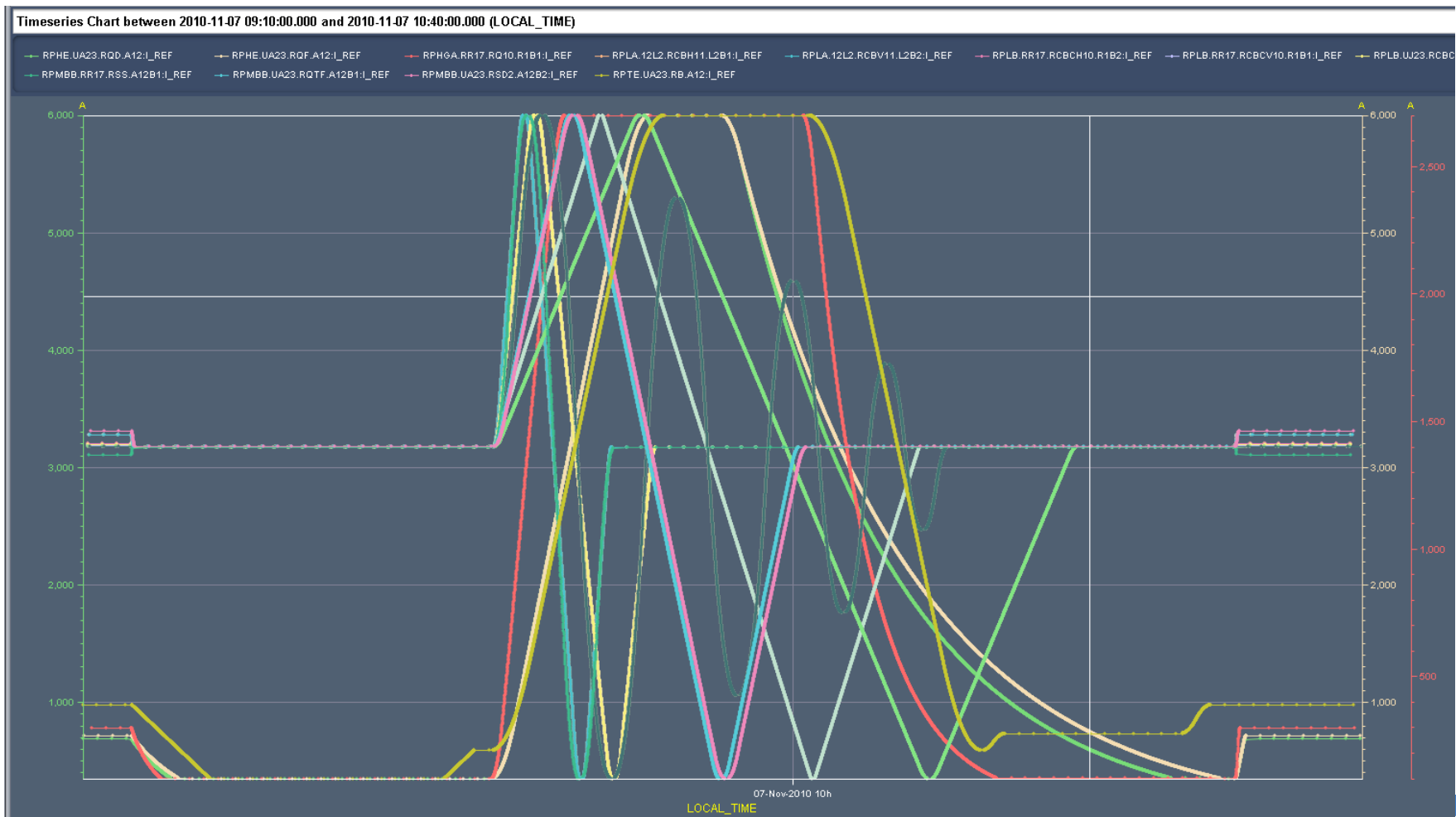
# Magnety a optika

- Supravodivé magnety si „pamätajú“ prúd aký nimi tiekol



# Magnety a optika

- Preto je nutné ich pamäť po každom cykle „vymazať“ tzv. *precycle*

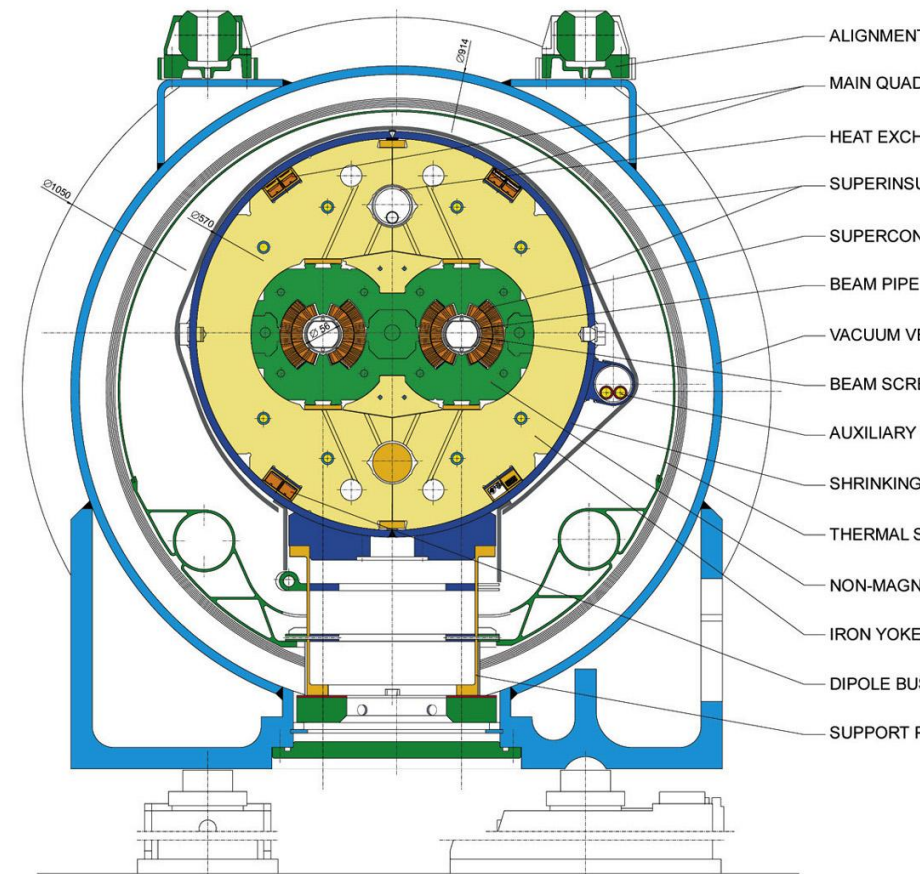


# Vákuový systém

- Hlavné vákuum LHC je čerpané na hodnotu  $10^{-8} - 10^{-9}$  Pa ( $10^{-10} - 10^{-11}$  mbar, ekvivalent  $10^{15}$  molekúl  $H_2/m^3$ )
- Izolačné vákuum supravodivých elementov má objem  $\sim 9000$  m<sup>3</sup> a je čerpané na  $< 10$  Pa, po vychladení na 1,8K sa ustabilizuje na  $10^{-4}$  Pa
- Izolačné vákuum QRL má objem  $\sim 5000$  m<sup>3</sup>

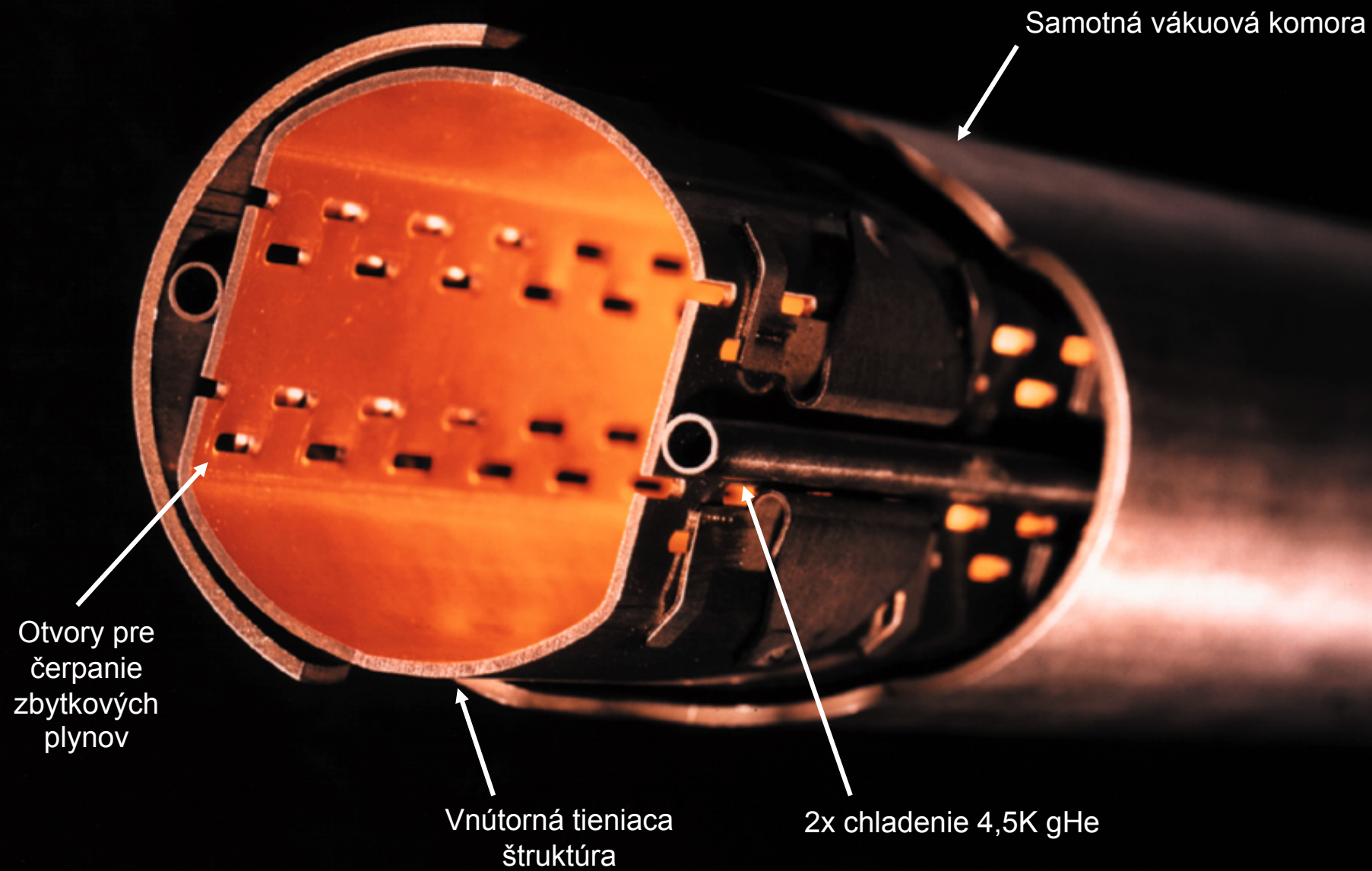
## LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MM - HE107 - 30 04 1999





# Vákuová komora LHC

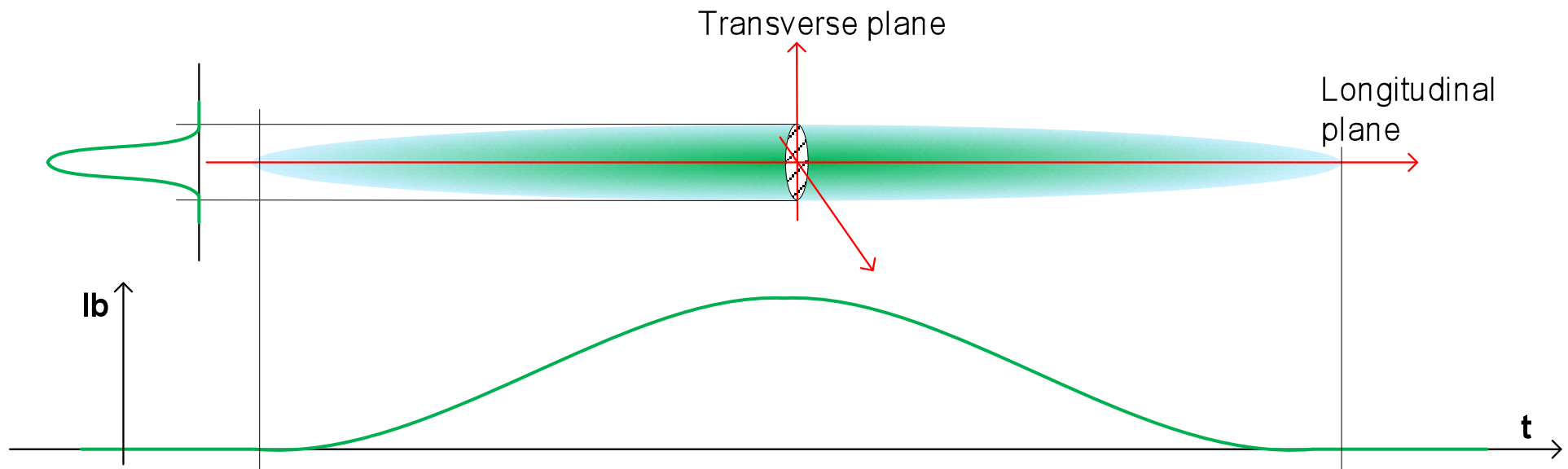


# Vysokofrekvenčný systém

- Pracovná frekvencia 400.788 8xx MHz
- Zväzok obehne LHC každú sekundu 11 245 krát
- 8 supravodivých rezonančných dutín, každá vytvára napätie 2 MV, spolu 16 MV
- Budenie 300 kW klystrónovými zosilňovačmi

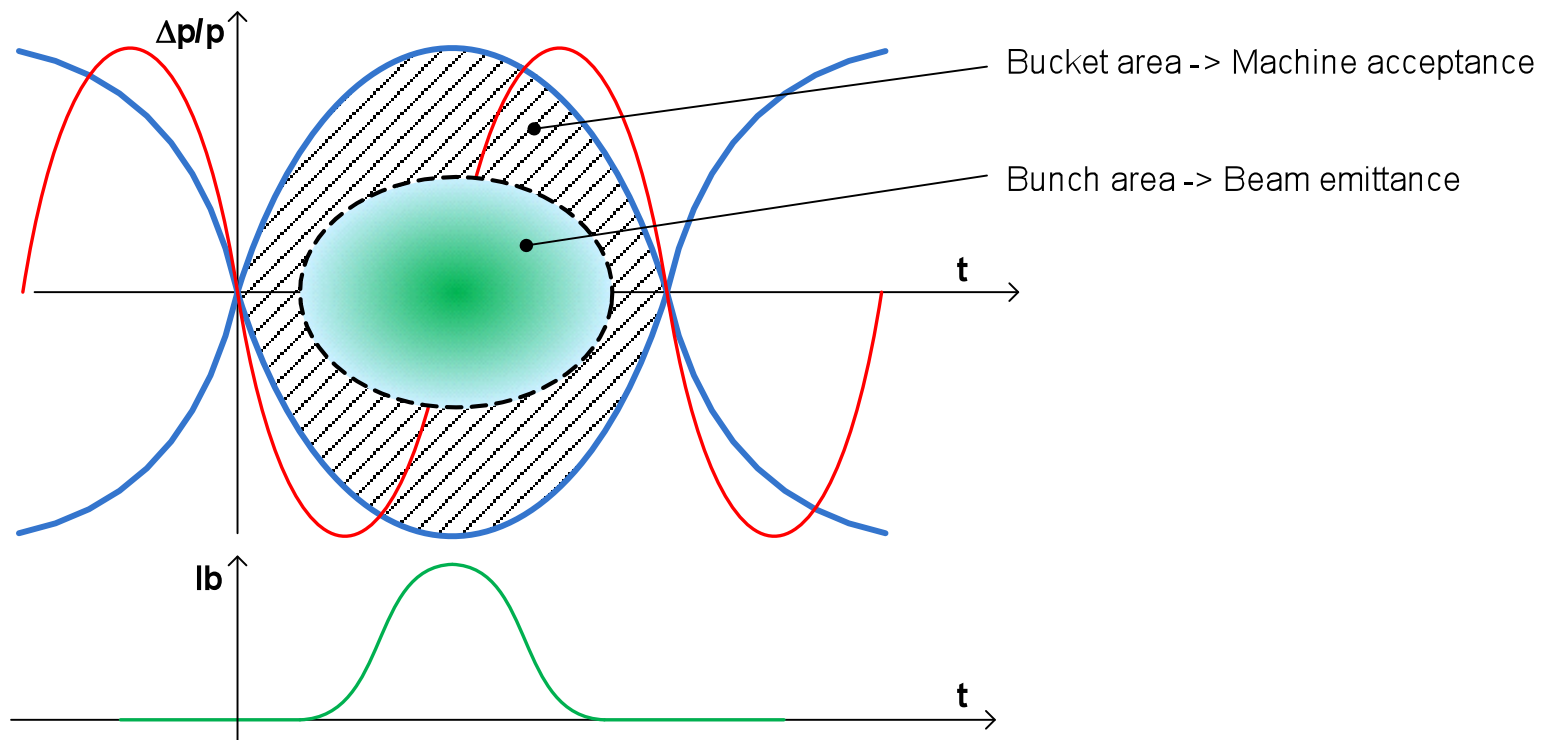
# Vysokofrekvenčný systém

- VF pole zároveň udržuje zväzok vo forme „zhlukov“ (tzv. bunch-ov)



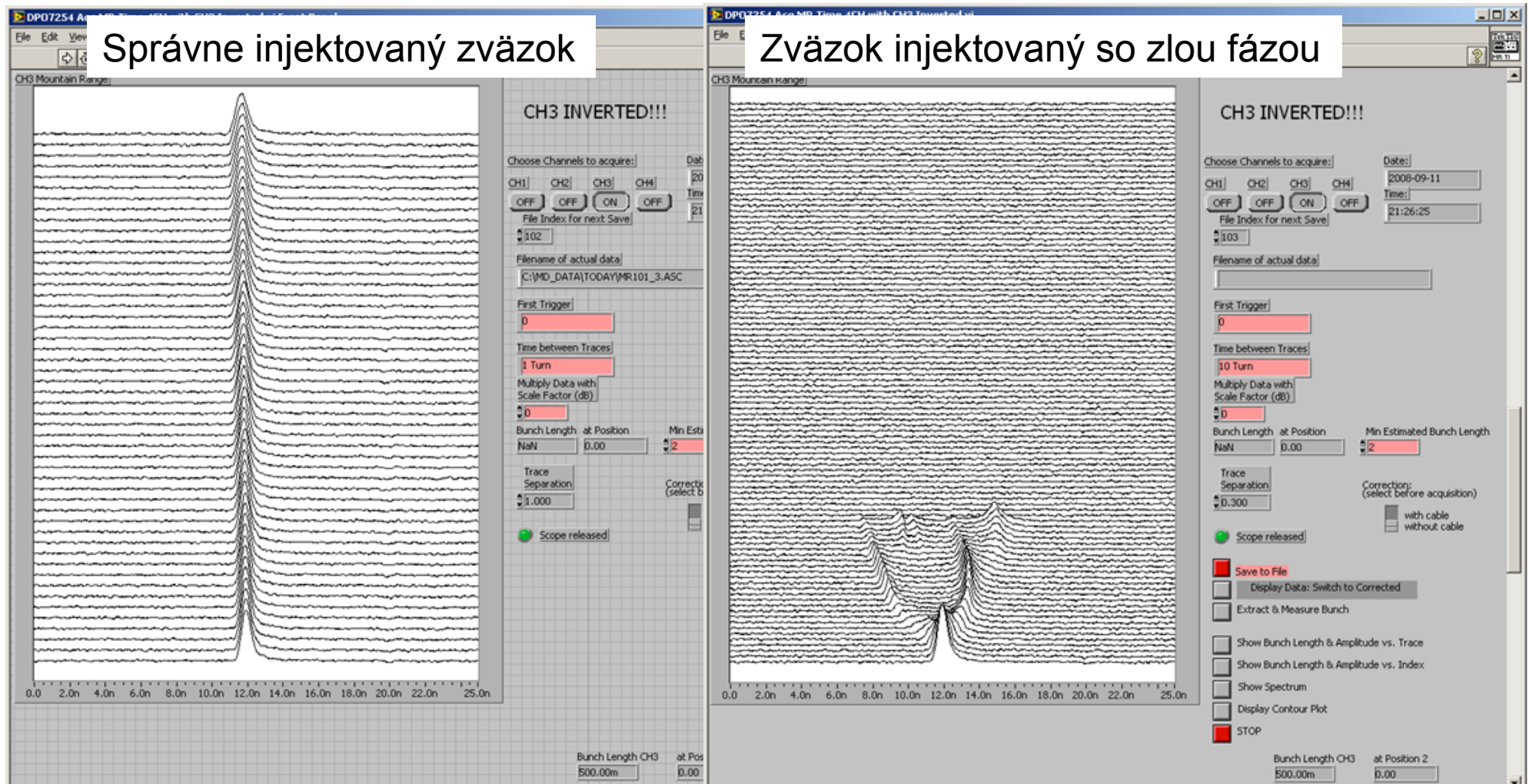
# Vysokofrekvenčný systém

- VF pole vytvára 35 640 pozícií kde môže zväzok „sedieť“ a stabilne obiehať (tzv. RF buckets)



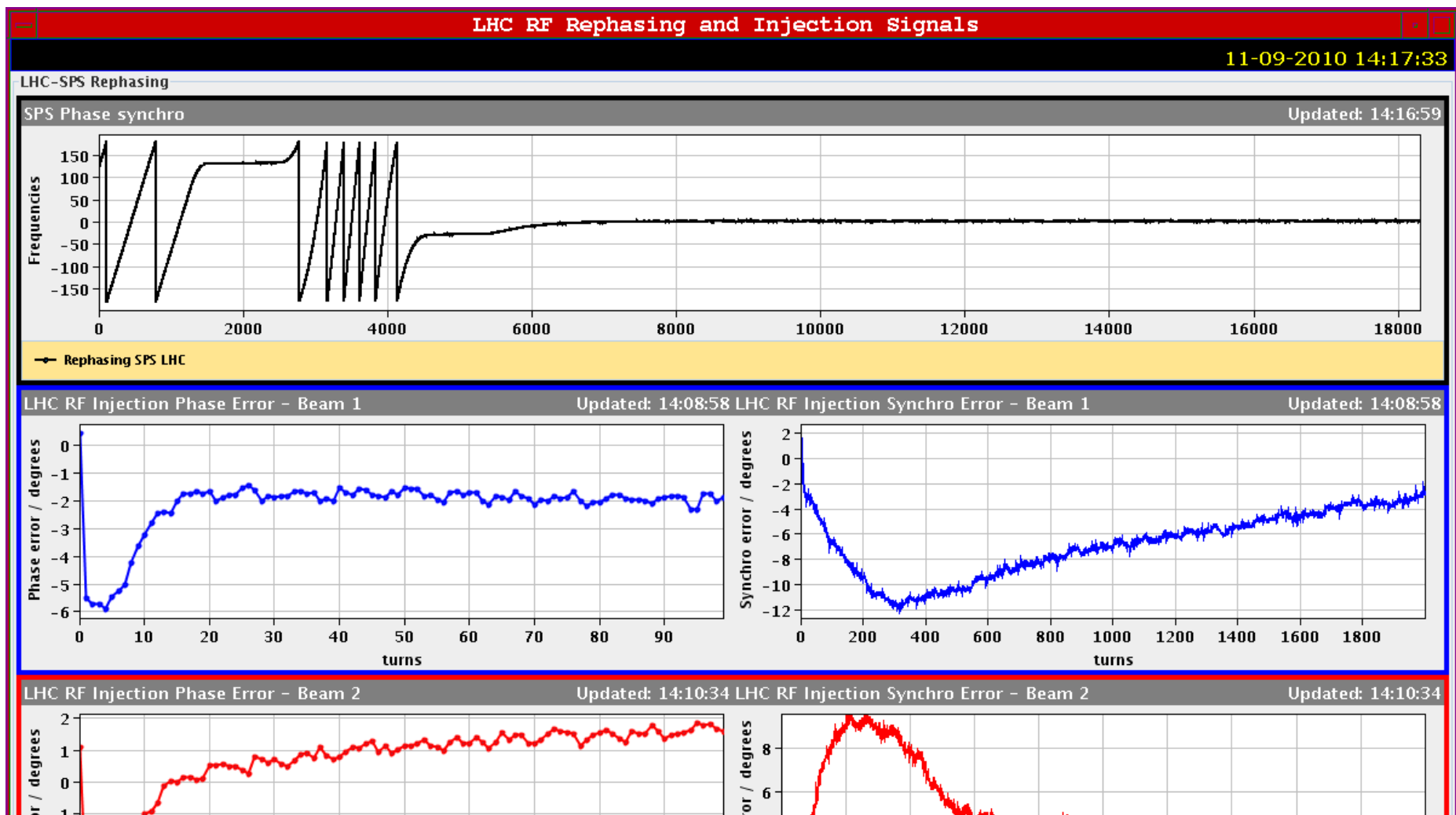
# Vysokofrekvenčný systém

- Zväzok z menšieho urýchľovača sa musí nainjektovať na presne definované miesto do „pripraveného“ bucketu



# Vysokofrekvenčný systém

- Nutná super presná synchronizácia medzi urýchľovačmi v celom komplexe





Vysokofrekvenčné urýchľovacie  
dutiny v kryostatoch

Foto: súkromný archív

Kryomodul so štyrmi urýchľovacími dutinami počas osadzovania hlavných couplerov v čistej komore





# 400 MHz/300 kW klystrónový zosilňovač VF systému LHC

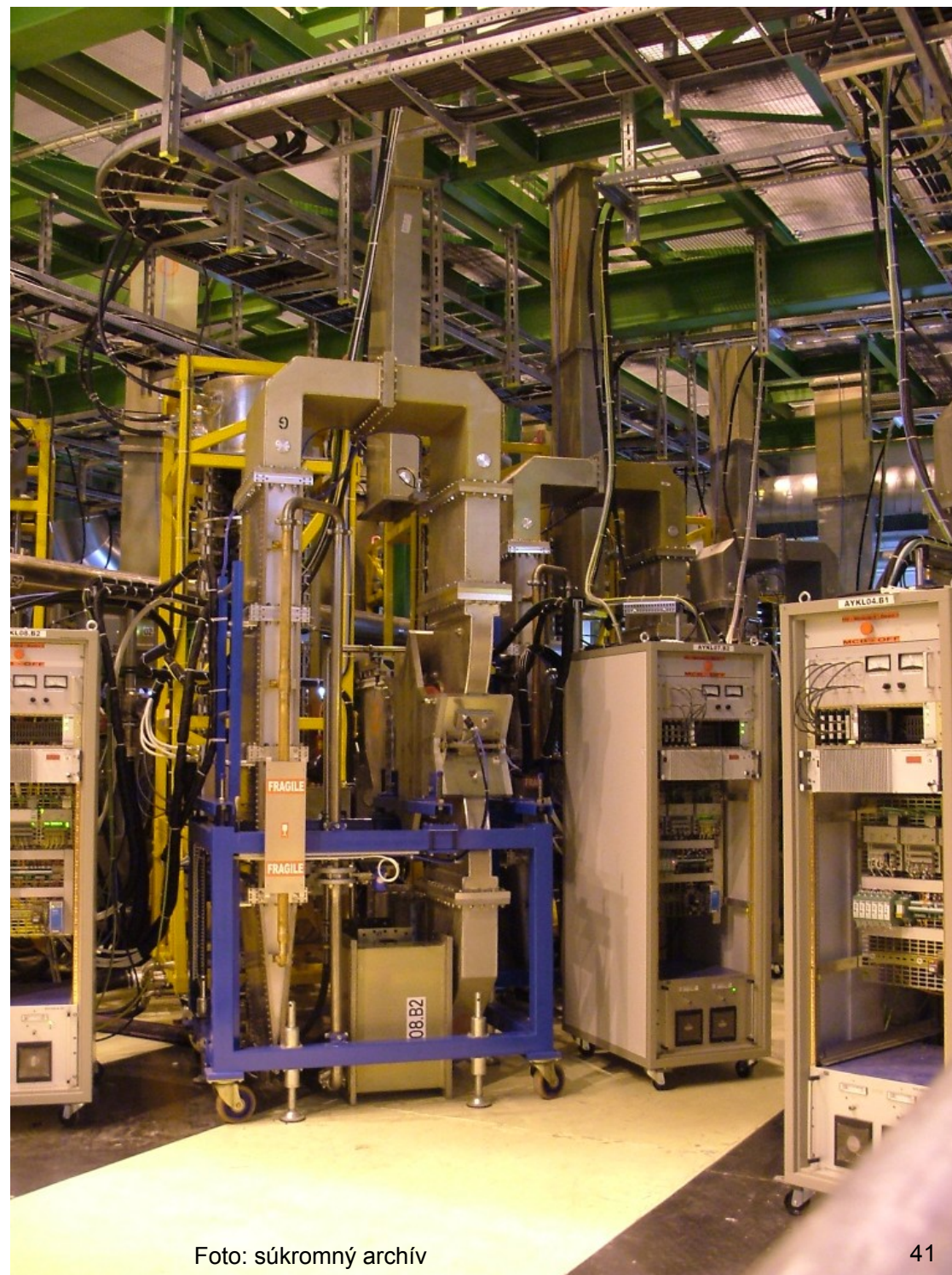
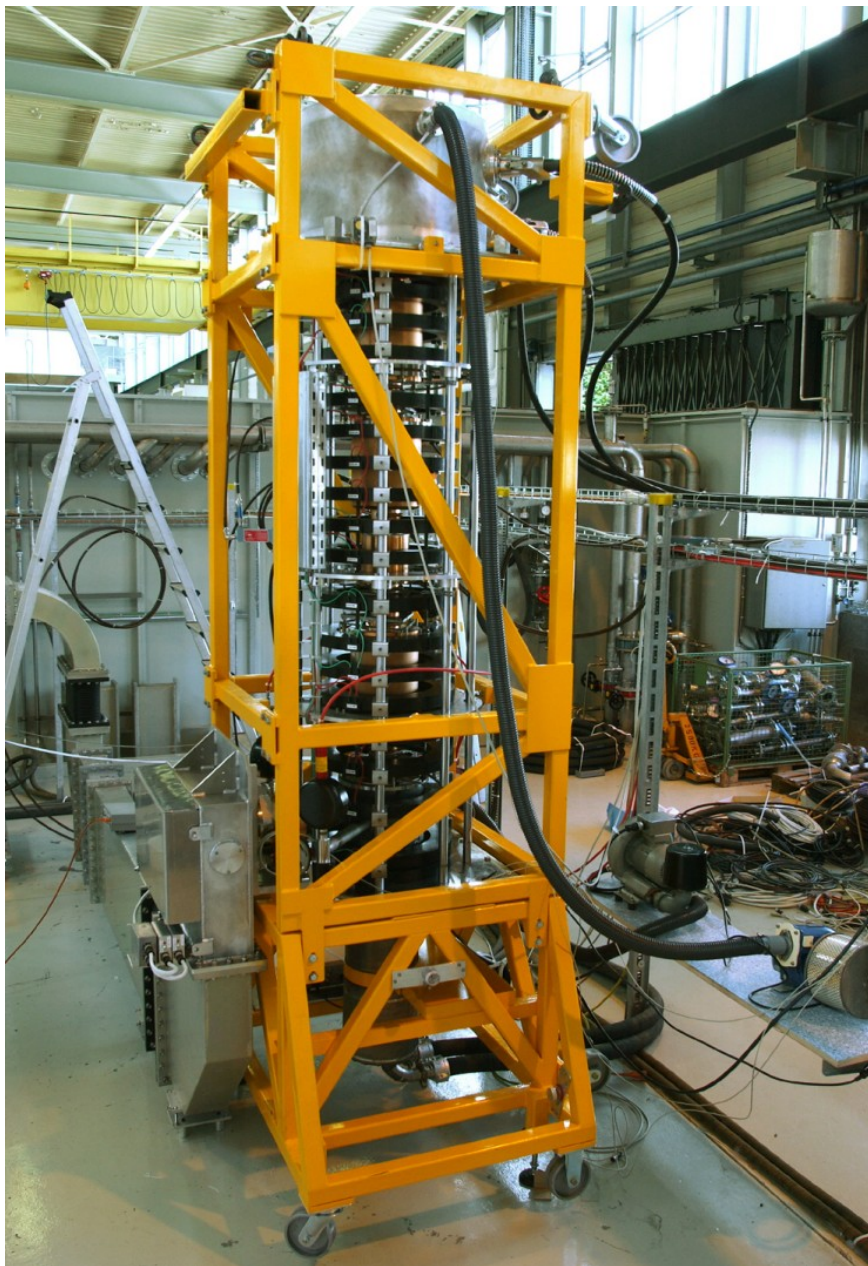
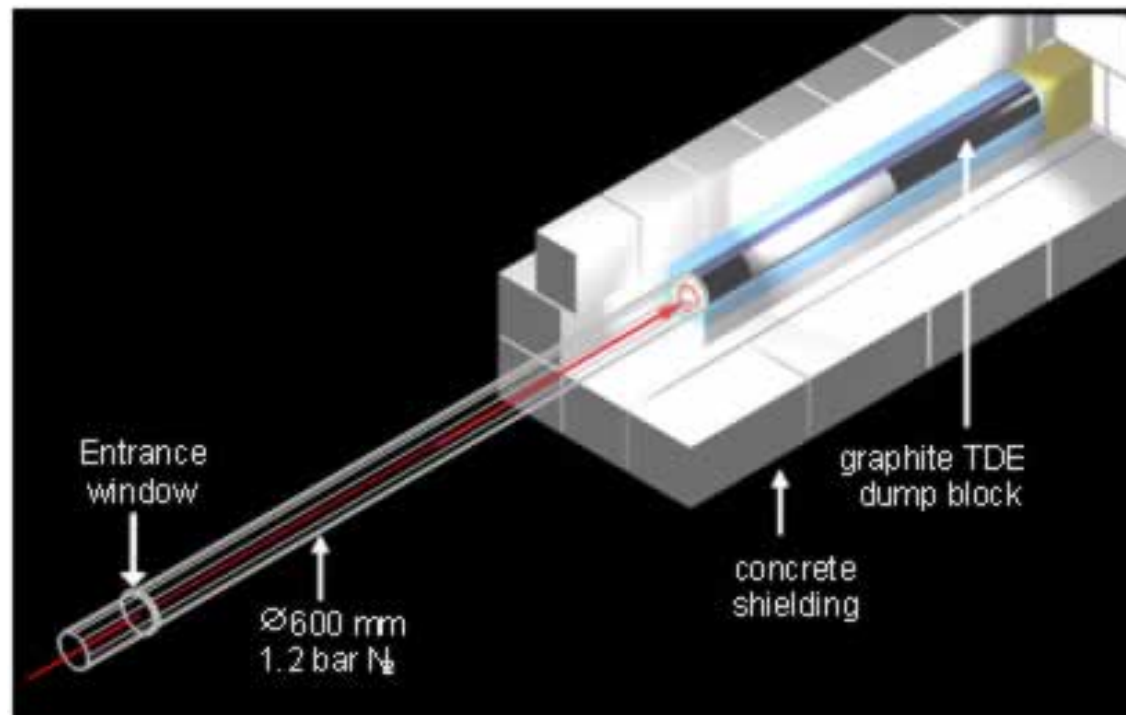


Foto: súkromný archív

# Beam dump

- Obiehajúci zväzok je možné počas  $3 \mu\text{s}$  medzery vychýliť a poslať do absorbéra kde sa kontrolovane zlikviduje
- Absorbér: Vodou chladený uhlíkový valec priemeru 700 mm, dĺžky 7.7 m, nalisovaný do obalu z nerezovej ocele. Tienenie realizované 900 tonami oceľo-betónových blokov.



# Beam dump

- Systém je navrhnutý na celú dobu životnosti LHC, všetka elektronika je niekoľkonásobne istená proti zlyhaniu a aj v prípade zlyhania dokáže zlikvidovať zväzok tak sa nepoškodili iné elementy LHC.
- Systém navrhnutý na počet porúch 1 za 1 000 000 hodín (~100 rokov)
- Plne redundantný systém 15 kicker magnetov, každý spínajú dva FHCT (Fast High Current Thyristor) spínače paralelne, fail-safe spúšť, energia pre plný kick uložená lokálne v kondenzátoroch
- Ak niektorý spínač náhodne zopne odpália sa následne všetky ostatné
- Nábežná hrana magnetu  $2,85 \mu\text{s}$ , nom. prúd  $18,5 \text{ kA}$  z kondenzátora nabitého na  $2\text{-}30 \text{ kV}$ , dĺžka pulzu  $90 \mu\text{s}$ , nasledovaná exponenciálnym poklesom ca.  $1,9\text{ms}$ . Prekmit prúdu počas pulzu  $<10\%$

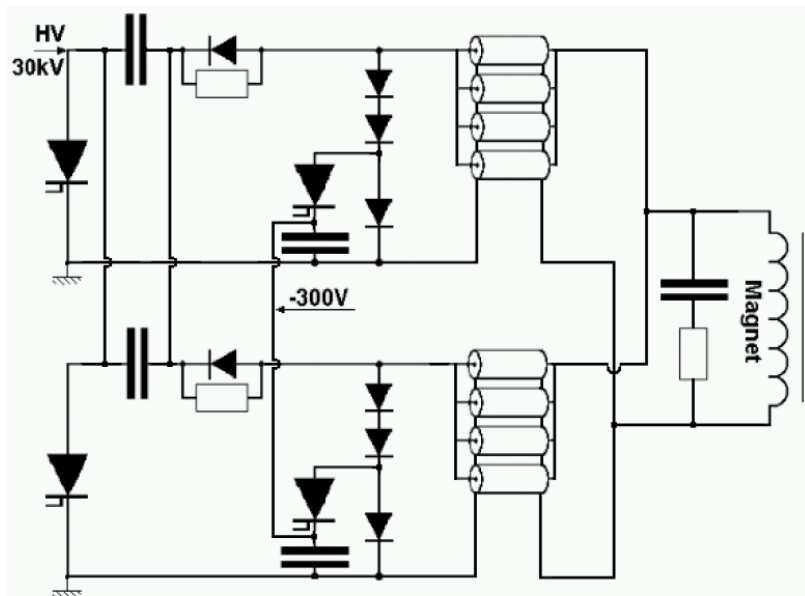
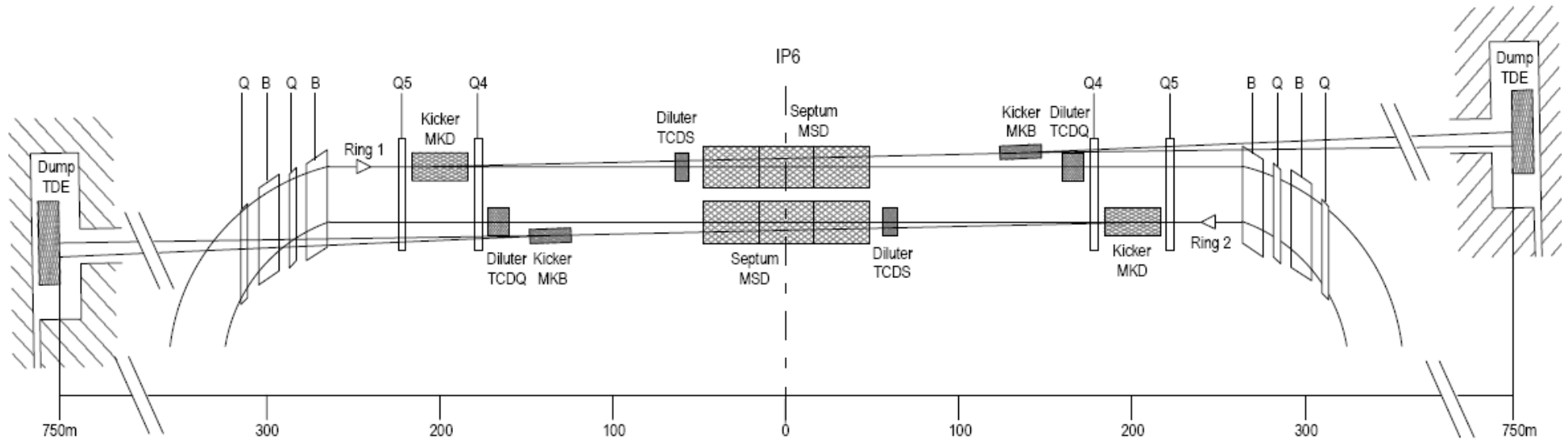
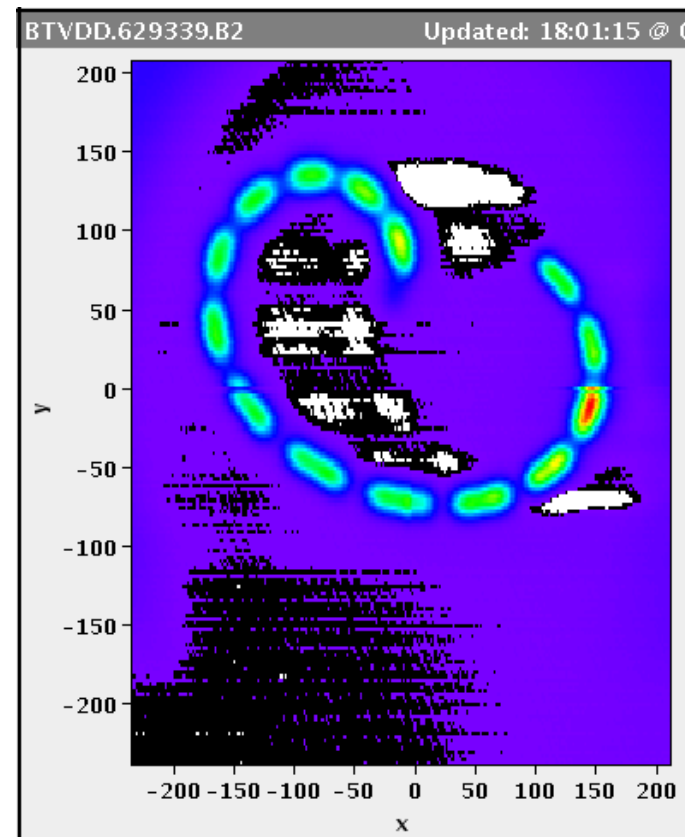


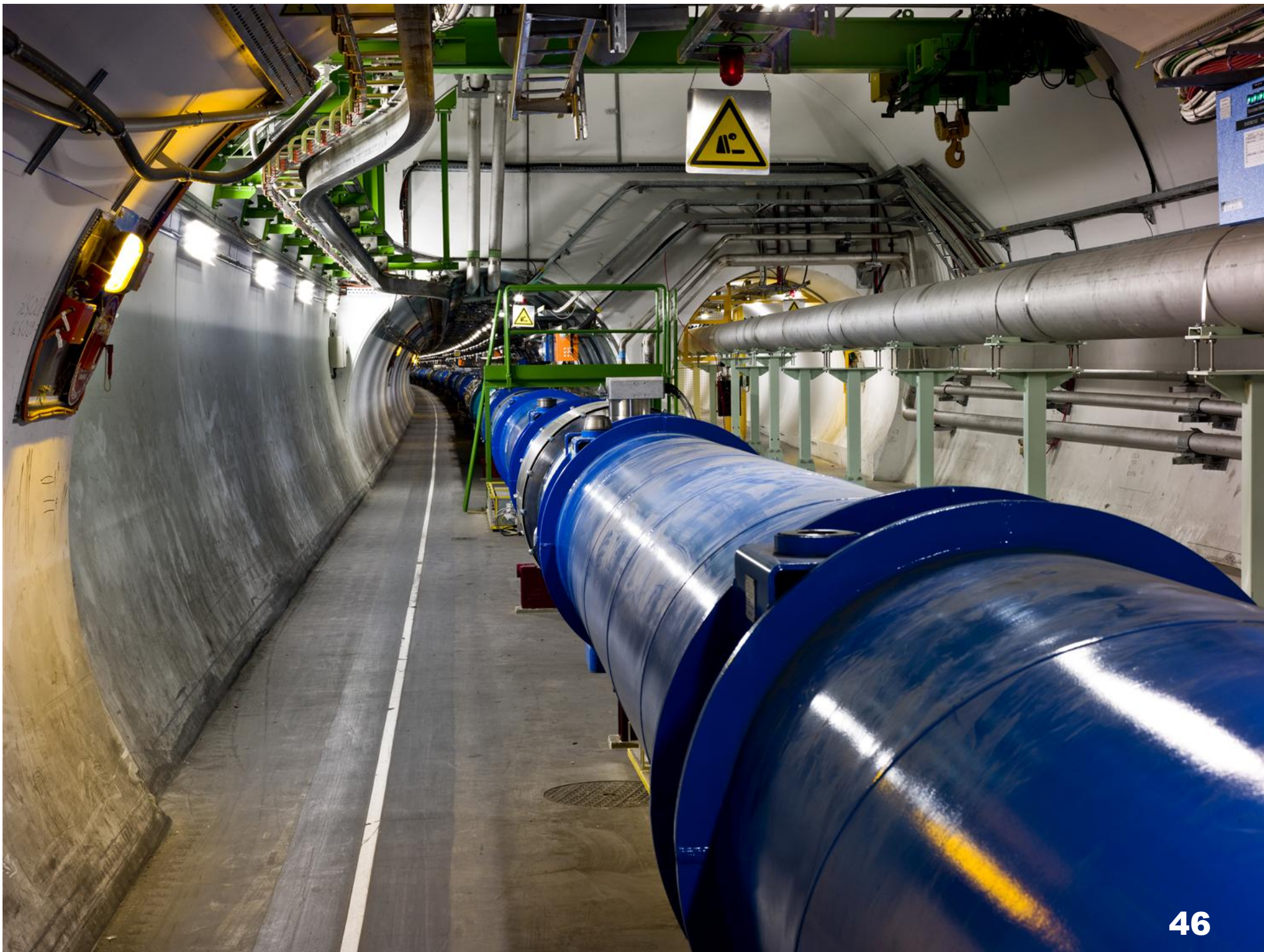
Figure 10.4: Dual branch generator circuit layout.



Obrazky:  
<http://www.iop.org/EJ/journal/-page=extra.lhc/jinst>  
<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/components/beam-dump.htm>

# Beam dump

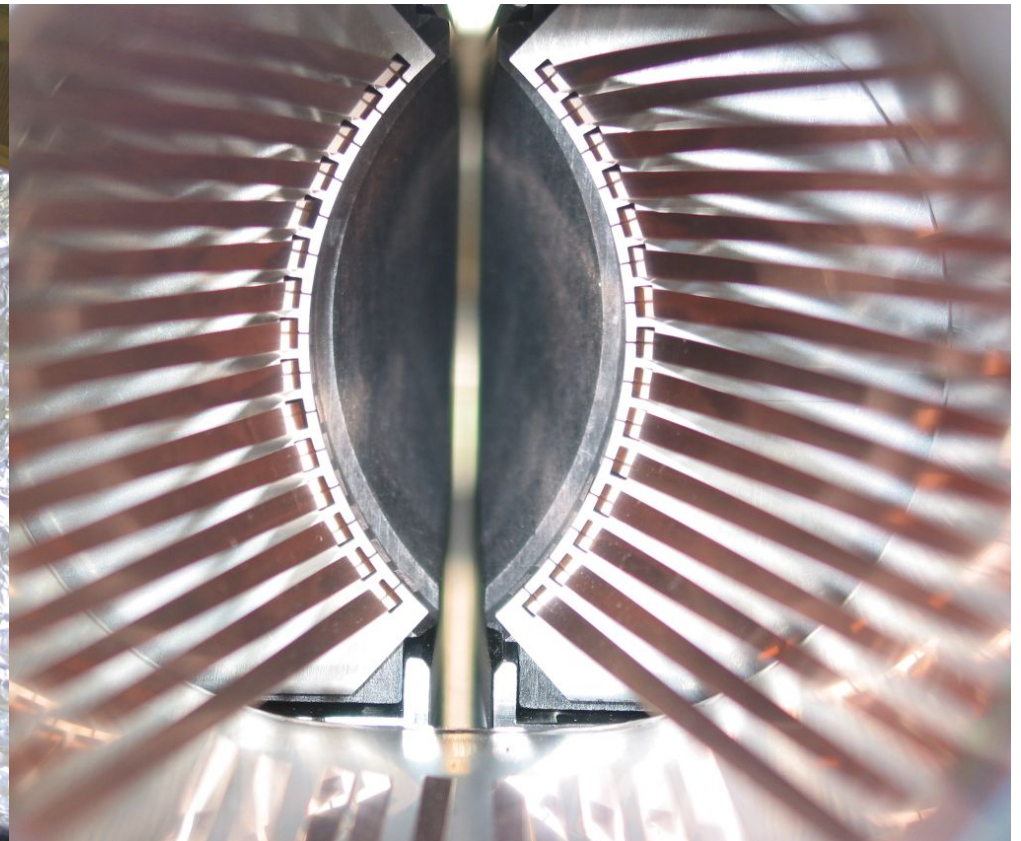






# Kolimátory

- Kontrolovaným spôsobom limitujú apertúru – extrémne dôležitý ochranný systém pre urýchľovač
- Riadia sa dynamicky počas behu a módu urýchľovača





# Kolimátory

Four batches impact (full design case)

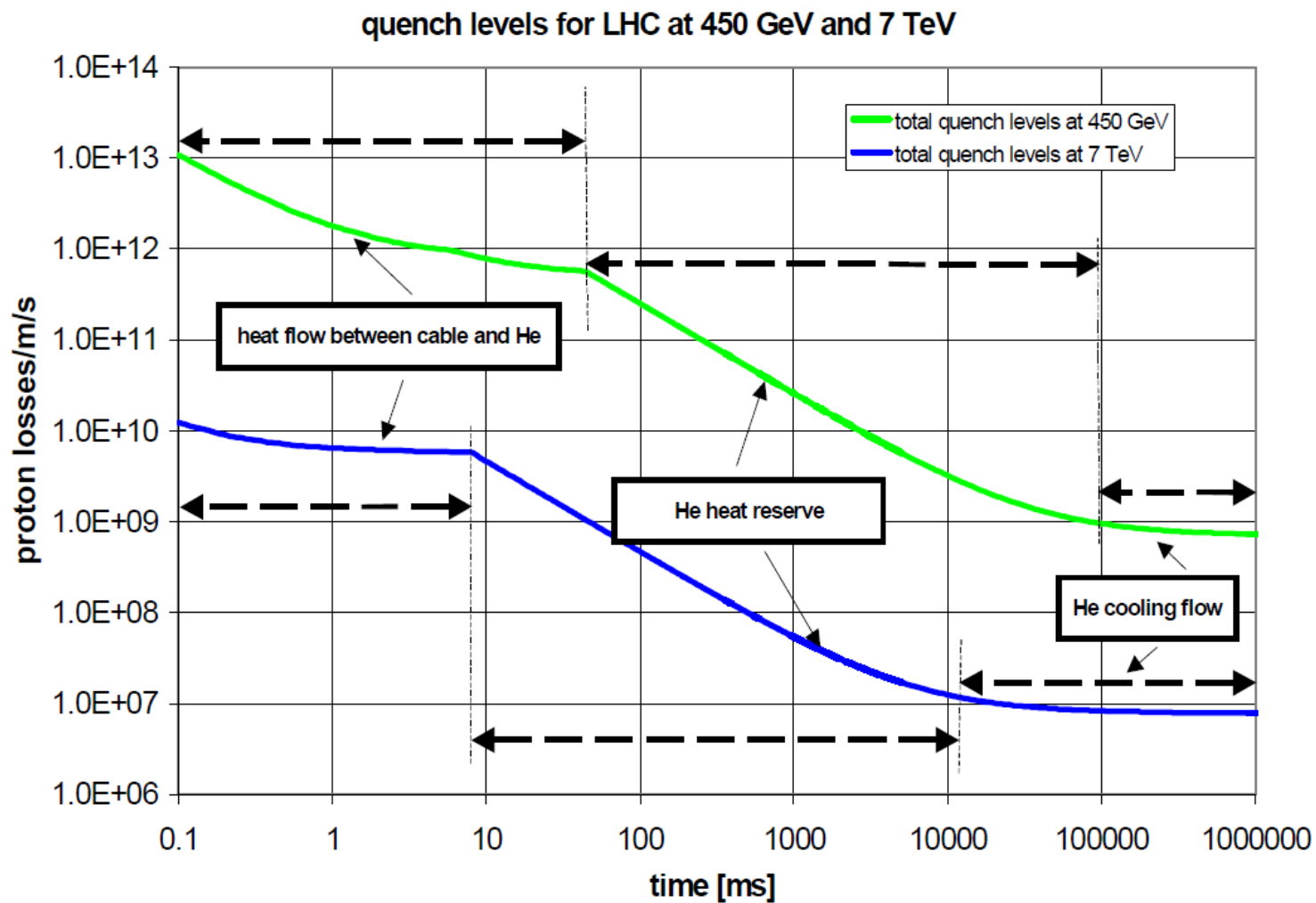
Beam conditions  $3e13$  protons (4 batches), 450 GeV,  $0.7 \times 1.2$  mm<sup>2</sup> (rms)

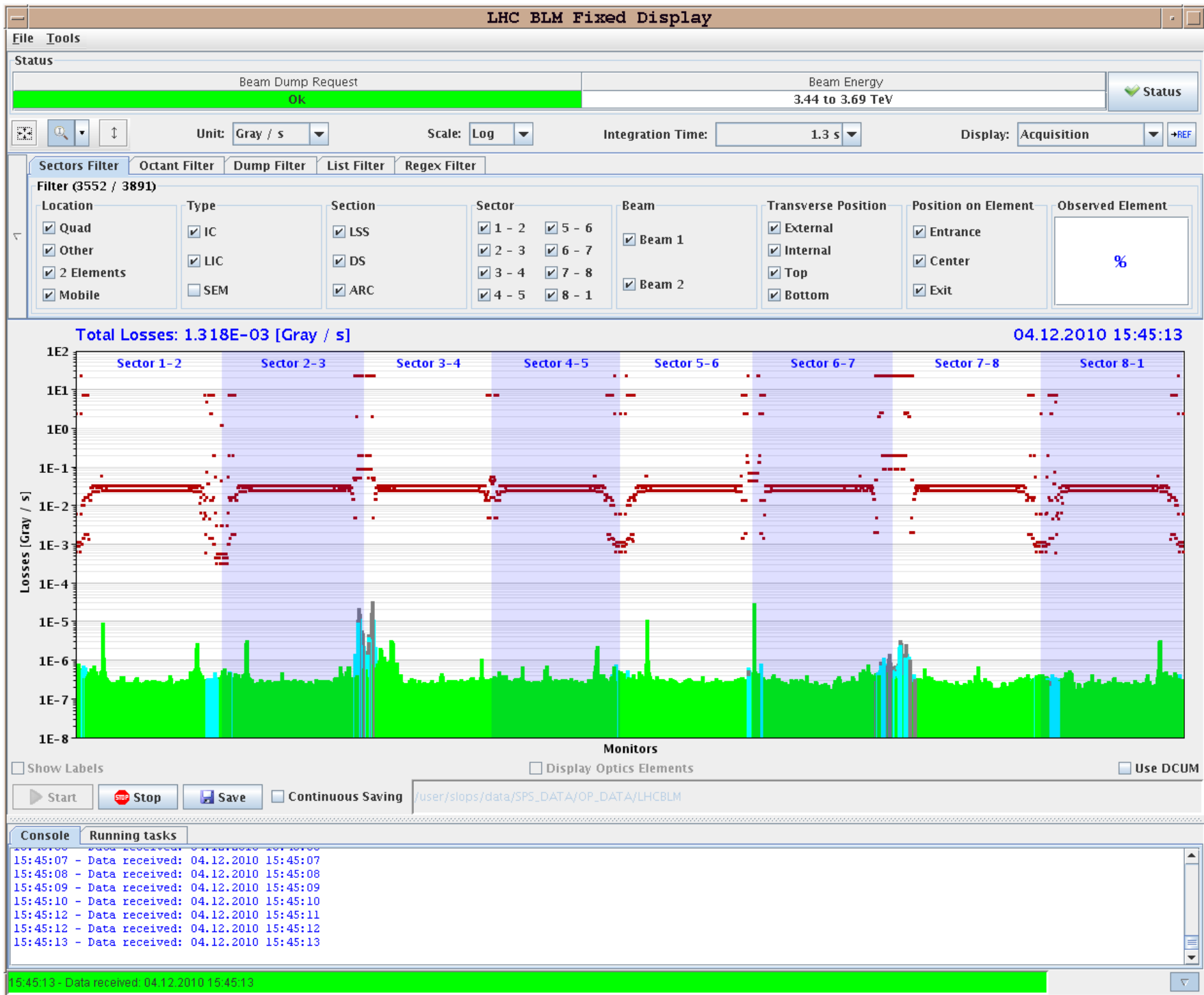
Collimator impact sound beam on carbon-carbon jaw (MP3, WAV)



# Beam Loss Monitors

- Kontinuálne merajú straty zväzku okolo celého ringu





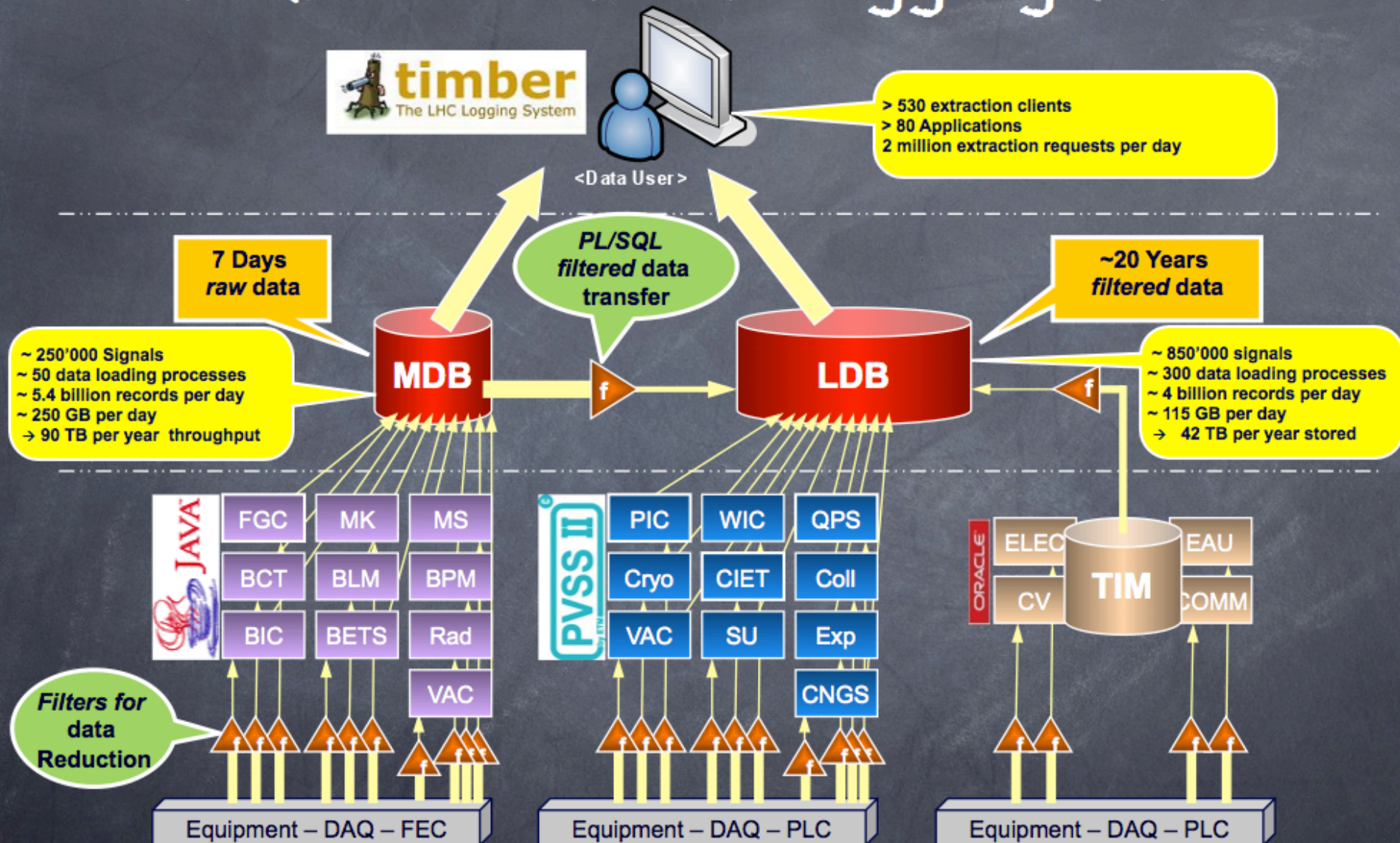
# Záznam prevádzkových parametrov

- LHC je extrémne zložitý systém, ktorý má miliardy prevádzkových parametrov
- Parametre je nutné nastavovať, spravovať, sledovať alebo dodatočne analyzovať
- Bez systému správy a záznamu týchto parametrov by bolo oživovanie, spúšťanie alebo prevádzka nemožná

# Záznam prevádzkových parametrov

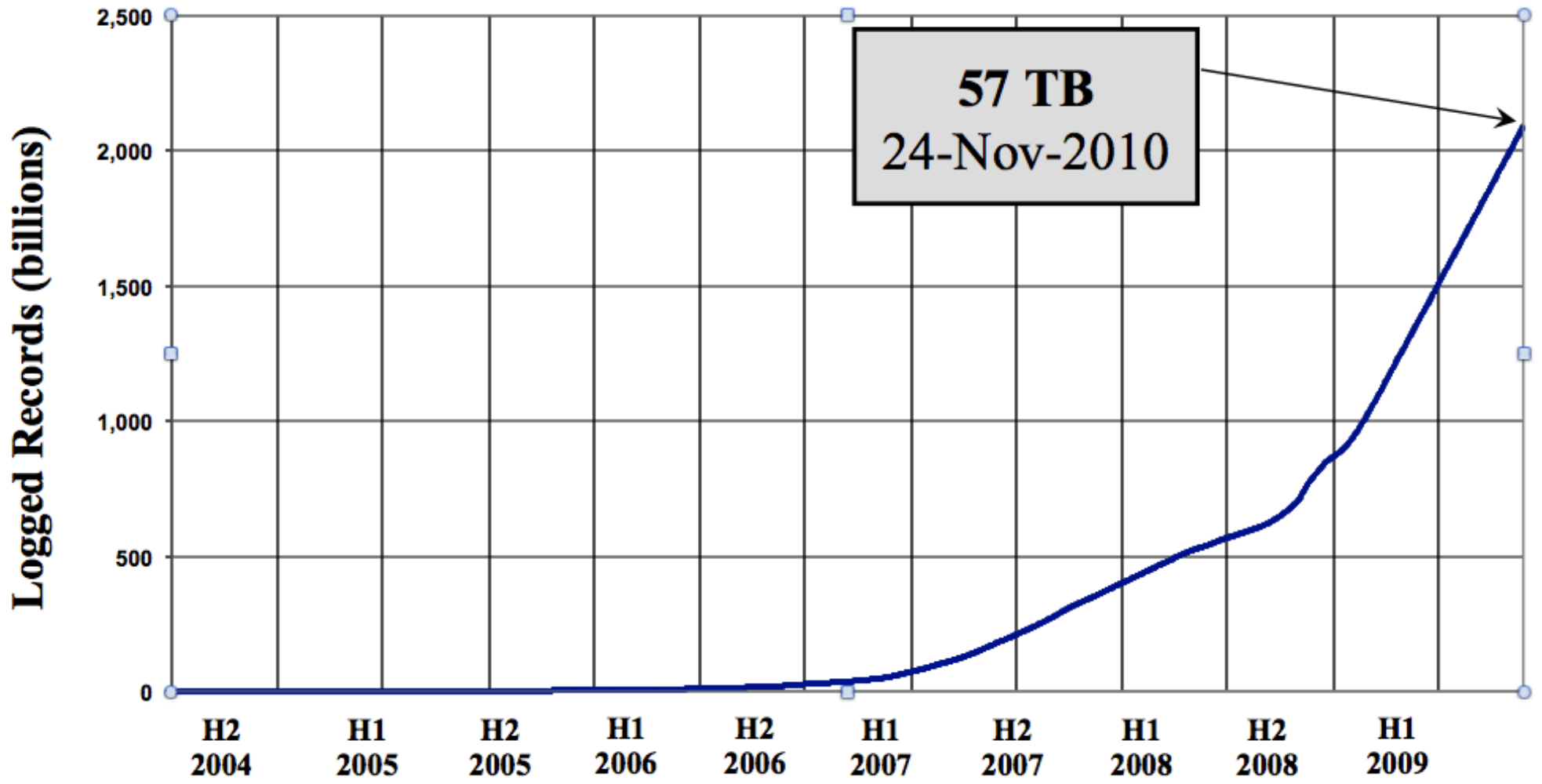
- Systém logovania prevádzkových parametrov TIMBER
  - Nonstop zaznamenáva 850 000 prevádzkových parametrov z tisícov zariadení a systémov
  - Frekvencia záznamu od jedného zdroja do 10 údajov za sekundu
  - Vytvára ~ 5.4 miliardy záznamov za deň (250 GB)
  - 2 milióny žiadostí o extrakciu dát denne
  - 42 TB dát ročne, ktoré sú online dostupné minimálne 20 rokov (po celú dobu života LHC)

# CERN Accelerator Logging Service

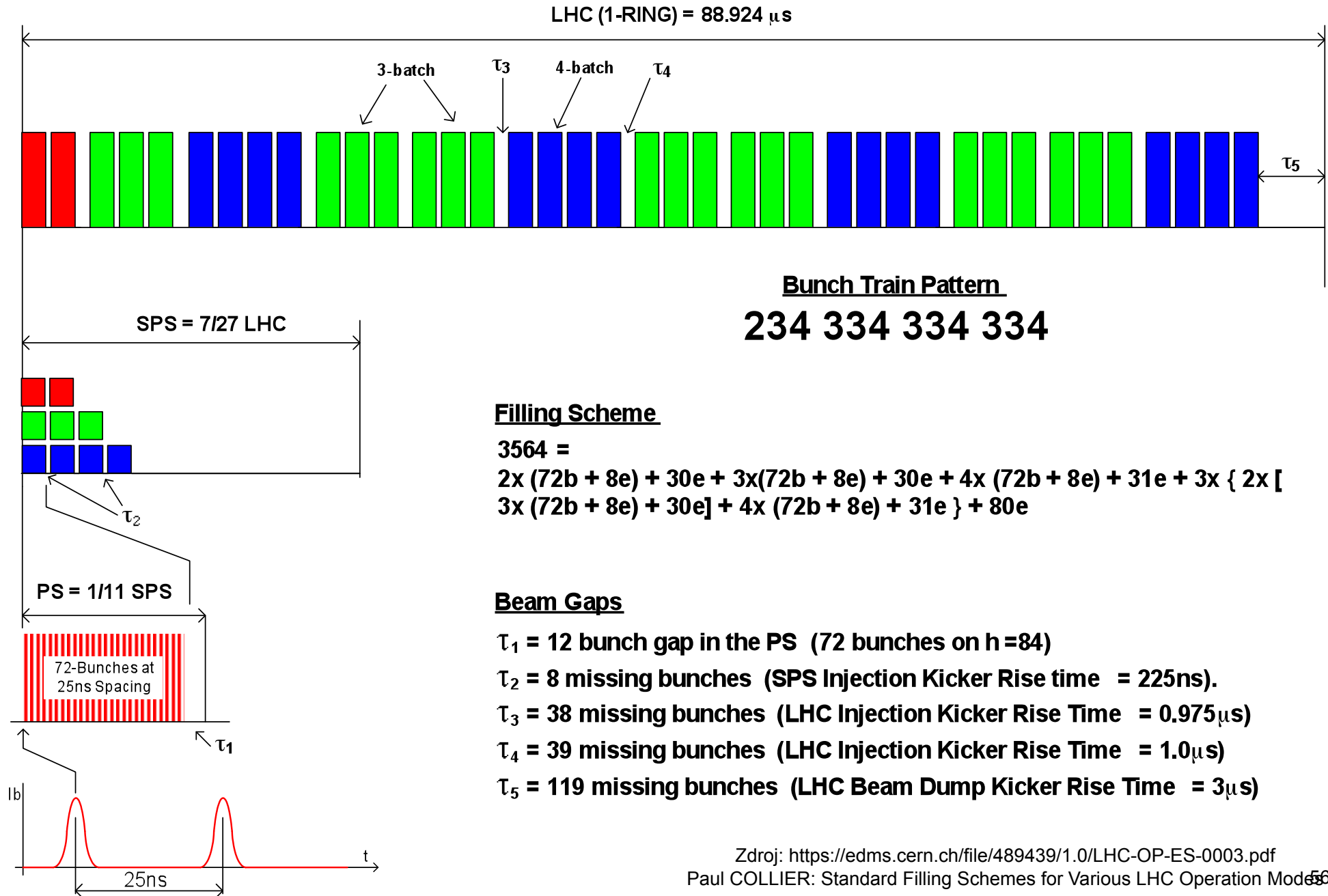


Chris Roderick et al

<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/icaleps2009/papers/wep005.pdf>



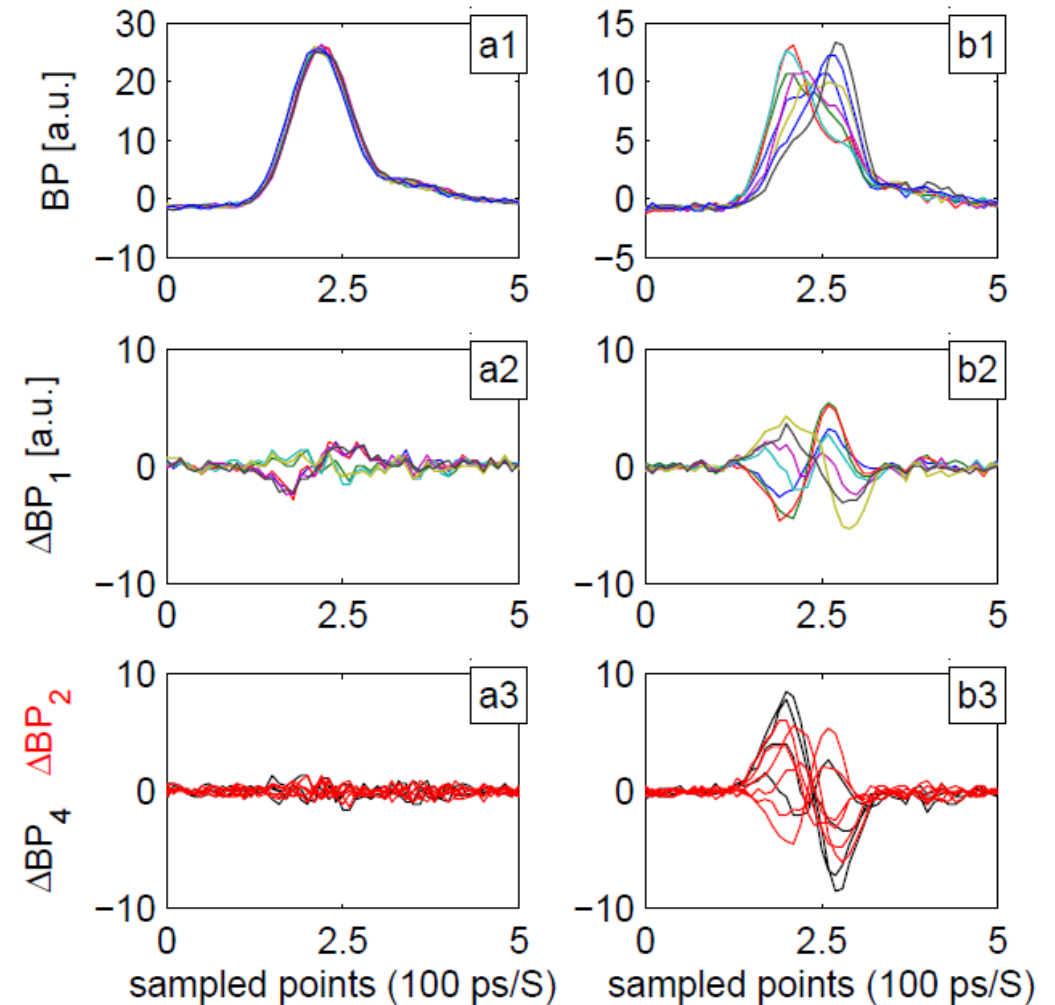
# Plánovaný spôsob „plnenia“ LHC protónmi pri plnej prevádzke





# Beam Quality Monitor

- Kvalita zväzku v SPS je tesne pred extrakciou do LHC skontrolovaná Beam Quality Monitorom
- Nestabilný alebo nekvalitný zväzok nie je extrahovaný do LHC



G. Papotti:

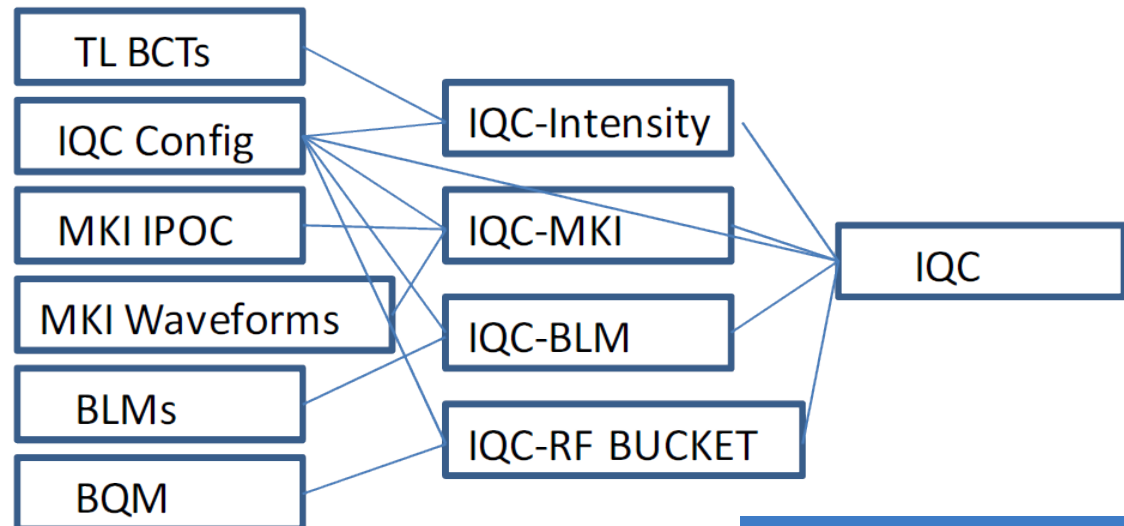
A BEAM QUALITY MONITOR FOR LHC BEAMS IN THE SPS  
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e08/papers/thpc144.pdf>

Figure 3: BPs at FT (a1, b1) and subtracted BPs (a2, b2, a3, b3). Stable bunch (a); non-rigid dipole oscillation (b).

# Injection Quality Check

- Zle nainjektovaný nominálny zväzok do LHC môže vážne poškodiť zariadenie urýchľovača (2 MJ)
- Po každej injekcii do LHC sa zmrazia a vyčítajú post-mortem buffery dôležitých systémov
- Automatická analýza preverí či bol injektovaný zväzok v poriadku

- Varovanie
- Zablokovanie ďalšej injekcie



# Spúšťanie LHC

- Zavážka všetkých elementov do tunela, nastavenie do presnej polohy zememeračmi.
- Inštalácia a prepojenie všetkých magnetov a ostatných elementov v tuneli, RTG a UZ testovanie spojov, mikrovlnné meranie prekážok vo vákuovej komore.
- Elektrické testy polarity atď.

Foto: súkromný archív



Október 2005, LHC Point 4

# Spúšťanie LHC

- Vnútorne vákuum, vypekanie (bake-out), aktivácia getrov vo vákuovej komore
- Izolačné vákuum kryogénneho systému
- Tlakové skúšky kryogénneho systému

Prepoje medzi magnetmi. Počas prevádzky budú ochladené na 1,8 K

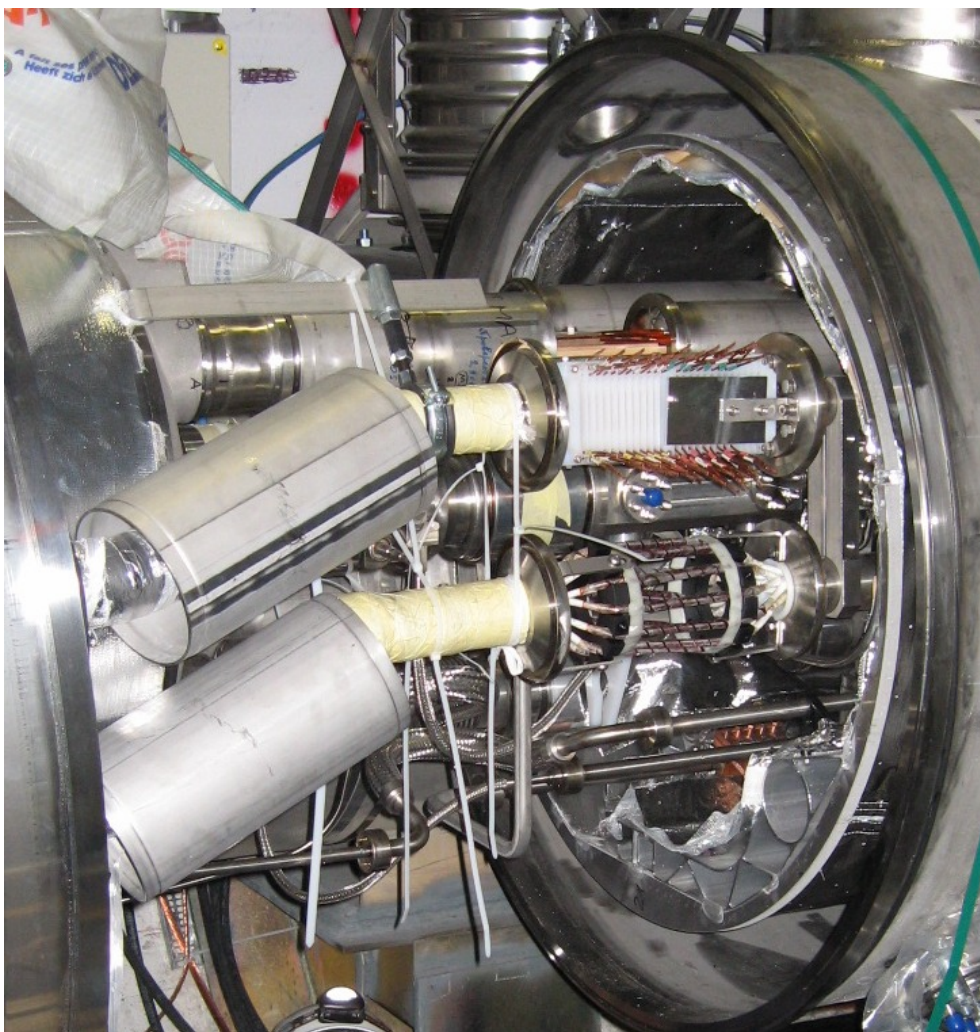
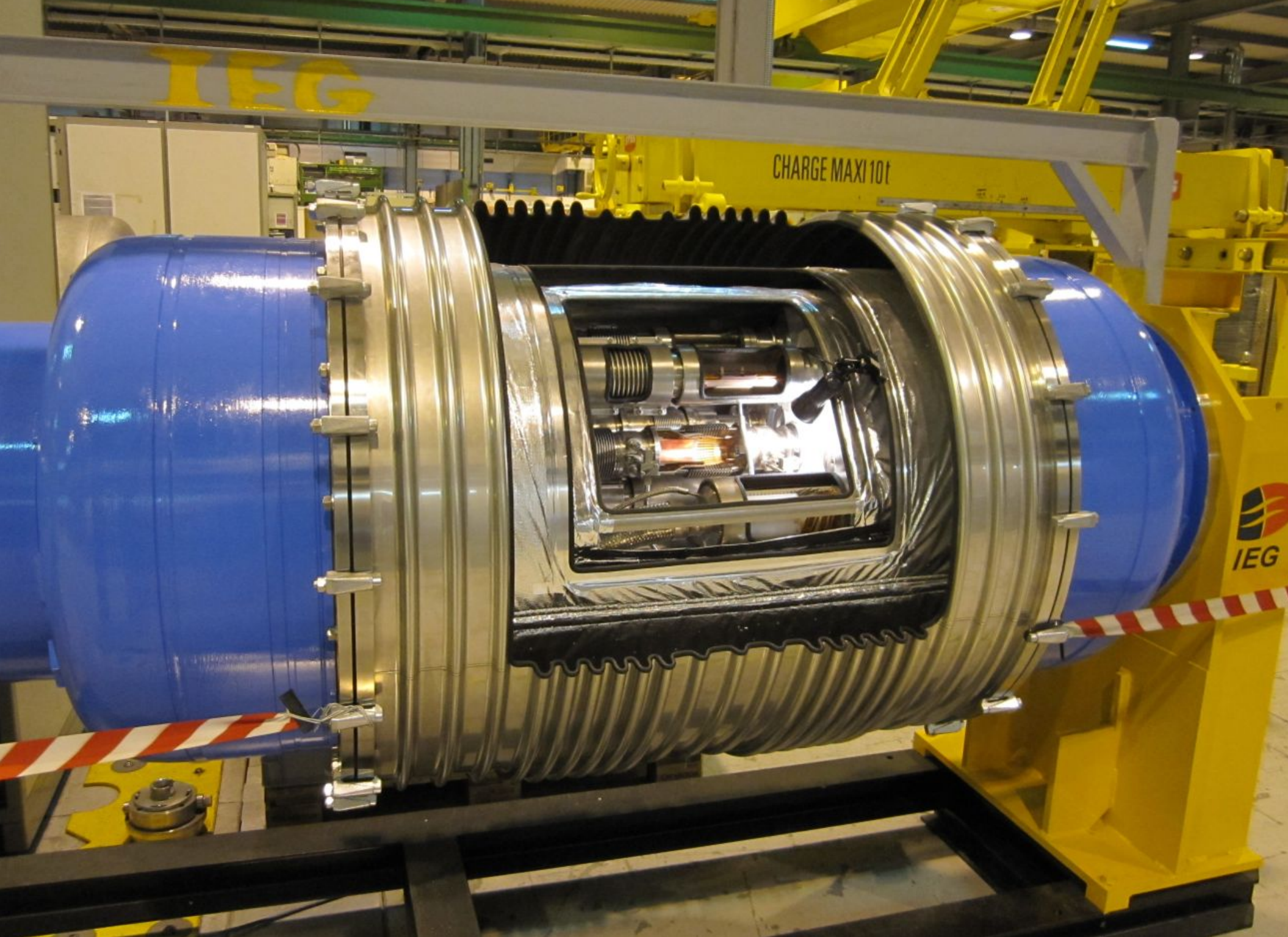


Foto: súkromný archív



IEG

CHARGE MAXI 10t

IEG

# Spúšťanie LHC

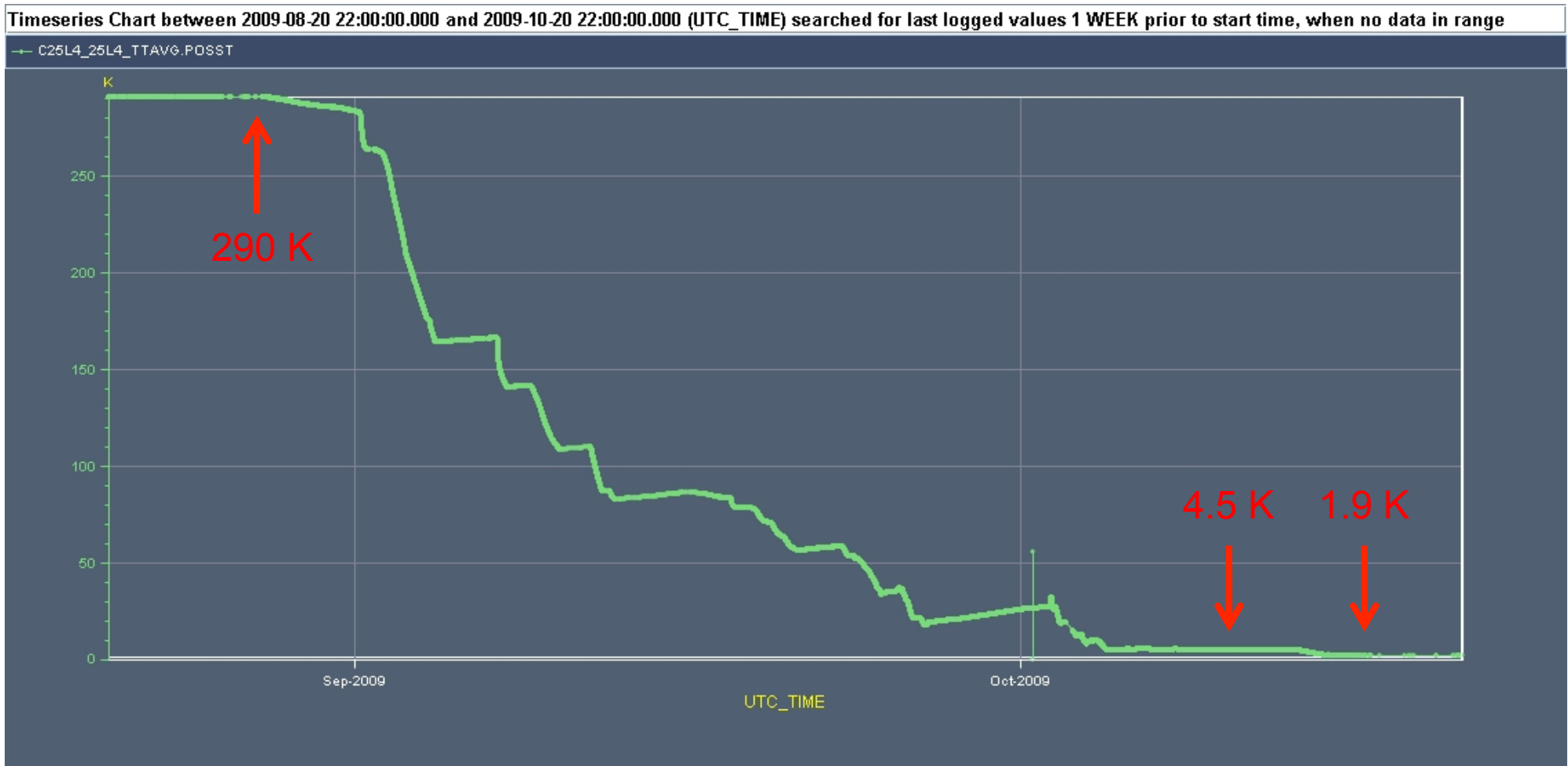
- Začiatok chladenia jednotlivých sektorov na 80 K pomocou odparovania kvapalného dusíka (potrebných ca. 1200 t)
- Po dosiahnutí 80 K začínajú kryo-kompresory a chladenie na 4,5 K
- Po dosiahnutí stabilnej teploty prechod na 1,8 K



Foto: súkromný archív



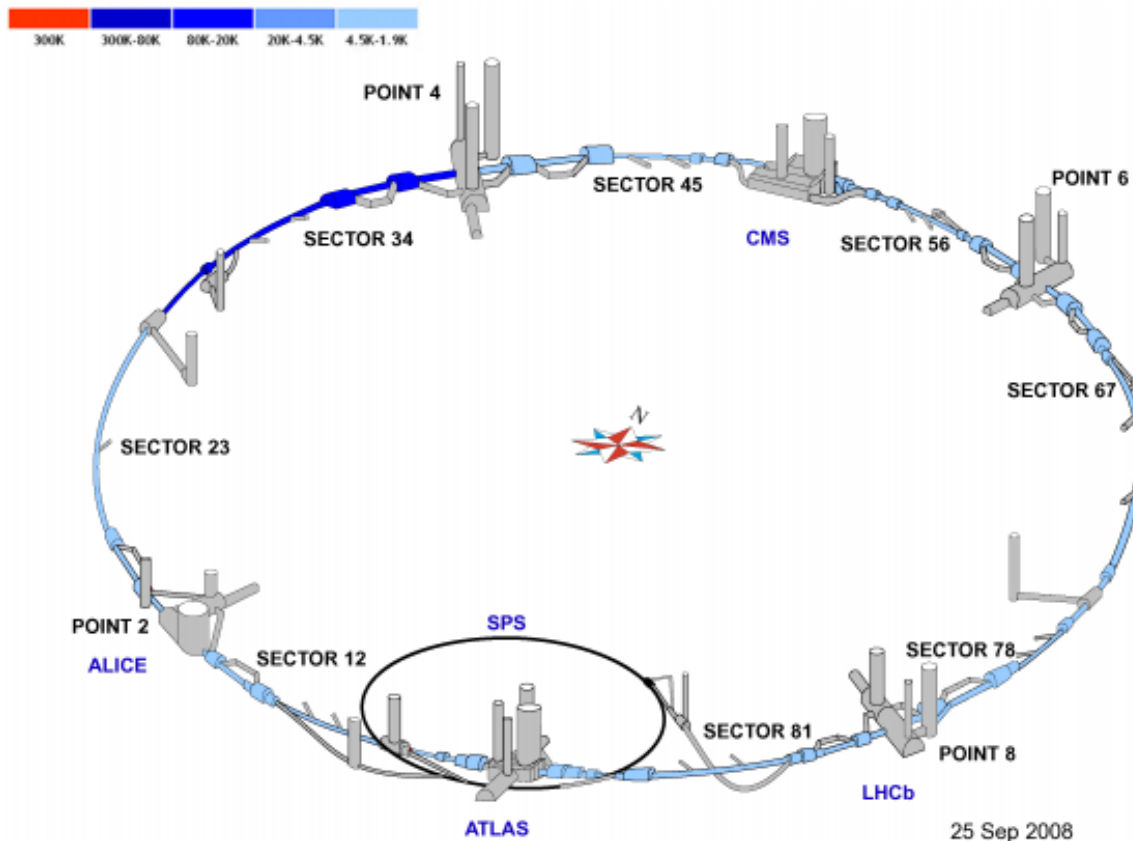
Chladienie sektora z izbovej teploty na 1.8 K trvá 3-4 týždne...



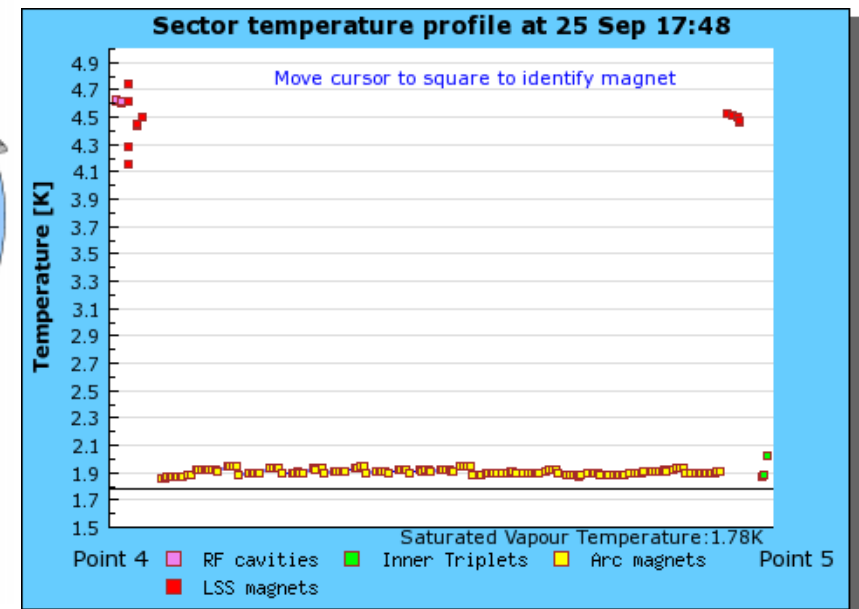


# Spúšťanie LHC

- Vyladenie kryogénneho systému
- Testy napájacích zdrojov pre magnety do skratu, začiatok testov magnetov s prúdom, umelo vyvolané quenche



Stav kryogénneho systému sa dá sledovať cez web <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>



# Spúšťanie LHC

- Nastavenie magnetického poľa na hodnotu zodpovedajúcu 450GeV
- 8. August 2008: Testy injekcie zväzku do jedného a neskôr cez dva sektory.



- 8. August 2008, 21:42: Zväzok Beam1 prešiel celým sektorom 2-3 na prvý pokus s odchýlkou od plánovanej trajektórie menej ako 3 mm!!!
- 22. August 2008, 20:55: Zväzok Beam2 prešiel celým sektorom 7-8 na prvý pokus s podobnou odchýlkou ako Beam1 pred dvoma týždňami

# Spúšťanie LHC

- Okrem 8. a 22. augusta sa nerobili žiadne testy so zväzkom v LHC

**Čakáme na deň „D“ – 10. September 2008**

# Spúšťanie LHC

V modrom rámičku je zachytených pár mojich subjektívnych pocitov a udalostí z procesu spúšťania LHC v septembri 2008

## 5. September, 5 dní pred spustením

Parkovisko pred vstupom do tunela snád' ešte nikdy nebolo takto plné. Dole ľudia pobejú v panike, dokončujú, testujú, upratujú. Od zajtra bude tunel uzavretý a už sa tam nedostanú. Vynesený materiál bude podliehať špeciálnemu režimu.

## 8. September, dva dni pred spustením

V neskorých nočných hodinách sa mi podarilo dokončiť oživovanie a testovanie dvoch modulov fázovej slučky. Bez tejto dosky LHC nedokáže prijať a udržať zväzok. V kanceláriách a labákoch naokolo sa stále svieti.

## 9. September, jeden deň pred spustením

~8h Začínajú inštalovať systém riadenia zväzku. Tlačím a lepím etikety na moje káble, zatavujem priehľadnú bužírku, inštalujem káble.

~9:30h Prichádzajú kolegovia. S príchodom nadriadeného začína panika. Zisťuje sa že 8 ľudí nedokáže naraz inštalovať veci v tom istom racku.

# Spúšťanie LHC

- ~**9:40h** Kolegovi, ktorý má pohotovosť volajú že prestalo fungovať SPS, odchádza zistiť čo sa deje.
- ~**9:45h** Volajú z experimentov, že od nás nedostávajú žiadne referenčné frekvencie. Odpájame kábel z racku plného elektroniky a synchronizovaného na atómové hodiny a prehadzujeme ho na prenosný generátor.
- ~**10:00h** Kolega mi oznamuje, že etikety na mojich kábloch nezodpovedajú nepísaným štandardom ktoré máme v rámci sekcie. Odmontovávam káble, orezávam etikety skalpelom.
- ~**10:15h** Kolega, ktorý ma pohotovosť zisťuje že SPS nedostáva žiadne referenčné frekvencie. Tie sa vysielajú z racku ktorý pred pol hodinou vypol lebo tam inštaloval nové dosky
- ~**10:20h** Orezal som etikety a začínam vyrábať nové podľa káblu pohodeného vedľa etiketovačky. Lepím na káble, zatavujem bužírku.

# Spúšťanie LHC

- ~**11:20h** Kolega vraví, že žltá nálepka je vstup a biela výstup takže to mám všetko zle. Po prezretí vzorového kábla konštatuje že ho tam niekto pohodil lebo má zlé farebné značenie. Beriem skalpel, rozmýšlam či idem orezať etikety alebo najprv niekomu ublížim
- ~**15h** Systém riadenia zväzku je nainštalovaný, zapíname crate, FPGA na jednej doske sa prehrieva a vyzerá že onedlho zomrie.
- ~**15h20** FPGA zomrelo. Rezervnú dosku nemáme. Jej autor si zobral dovolenku a odísel mimo dosahu telefónu.
- ~**18h** Začínáme inštalovať riadiaci software. Zisťuje sa že 12 ľudí nedokáže pracovať na jednom počítači.
- ~**21h** Začína sa inštalovať grafický user interface. Riadiť sa ním síce zatiaľ nič nedá, ale aspoň zobrazuje parametre a dáta z pamäti
- ~**24h** V urýchľovacích dutinách máme 32 MV, šéf otvára šampanské, polomŕtvy odchádzam domov.

# Spúšťanie – deň „D“ 10. september 2008

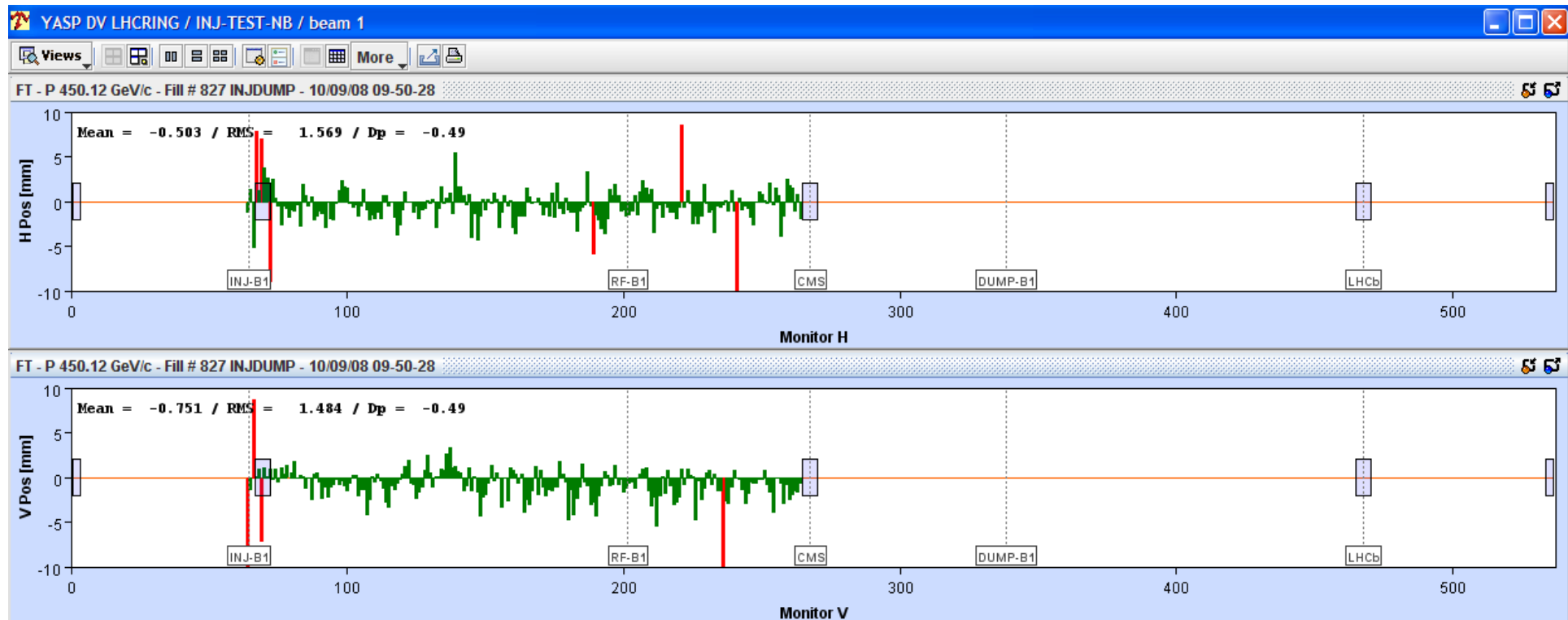
- V riadiacom centre je asi 250 novinárov, dvaja nositelia Nobelovej ceny, všetci riaditelia a vedúci projektu. O pár minút sa uskutoční prvý pokus nechať obehnúť zväzok kompletne celé LHC



Foto: CERN, <http://cdsweb.cern.ch/collection/Photos>

# Spúšťanie – 10. september 2008

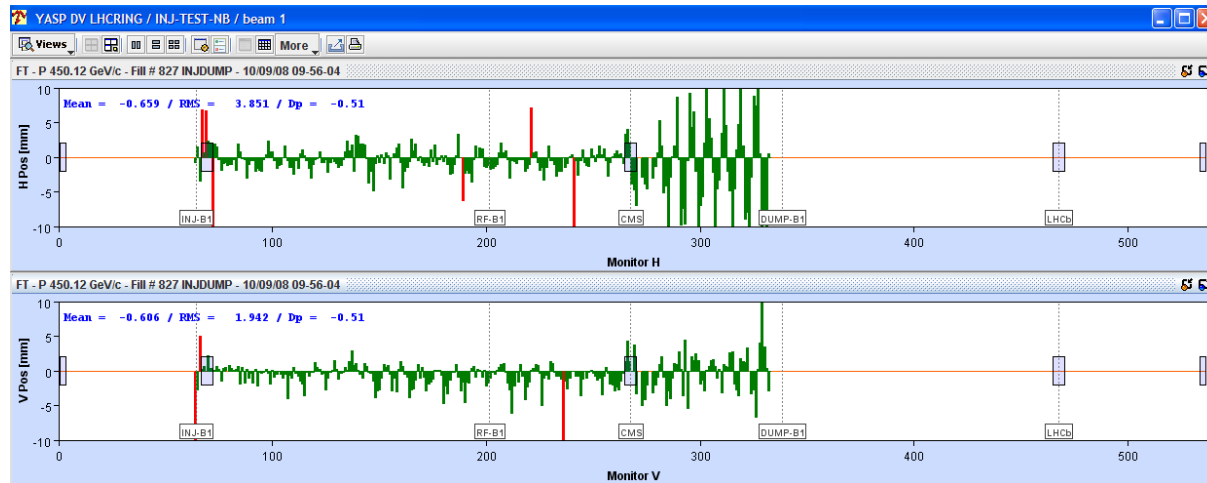
- 9:34 Ochranný dump pre Beam1 sa odstraňuje z prenosovej cesty do LHC
- 9:35 Zväzok preletel cez sektor 2-3 na kolimátory do bodu 3
- 9:47 Kolimátory sa odstránili a zväzok preletel cez dva sektory až do bodu 5 (CMS)



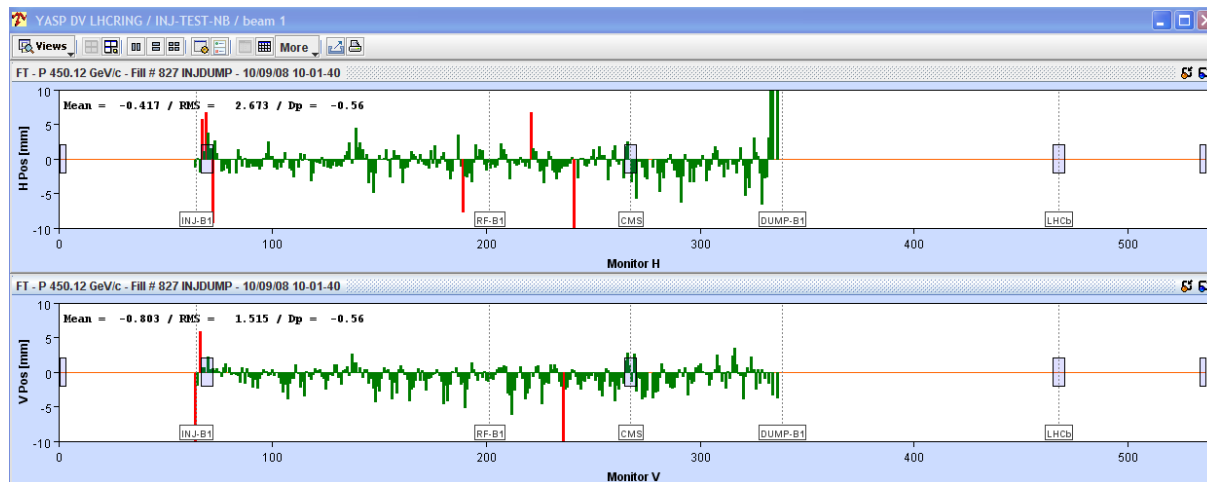


# Spúšťanie – 10. september 2008

- 9:53 Zväzok doletel na prvý pokus do bodu 6, kde je umiestnený dump. Trajektóriu je nutné upraviť a vyladiť správnym nastavením korekčných magnetov.

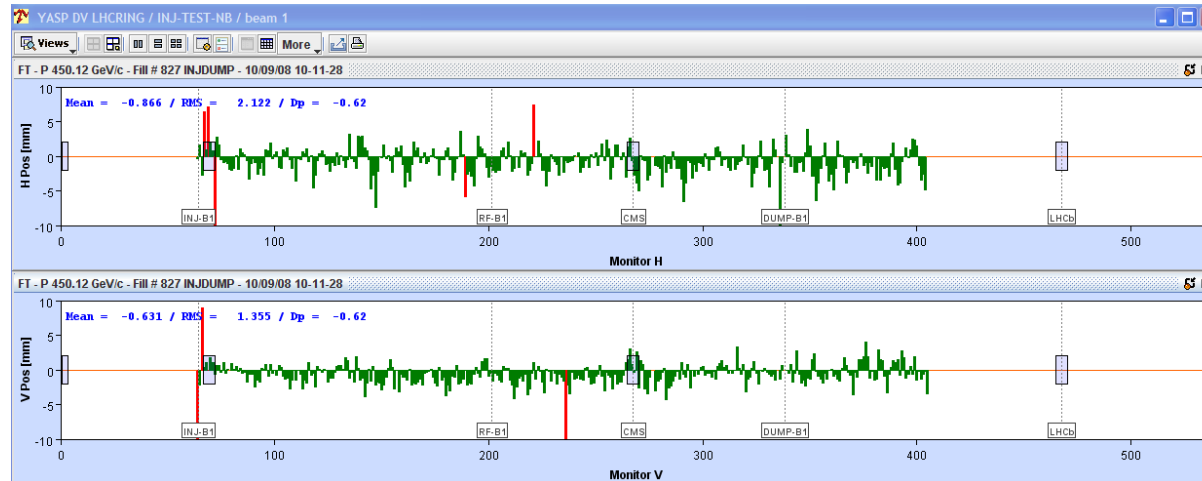


- 9:58 Trajektória je v poriadku, môže sa pokračovať do ďalšieho sektora



# Spúšťanie – 10. september 2008

- 10:07 Zväzok dosiahol bod 7

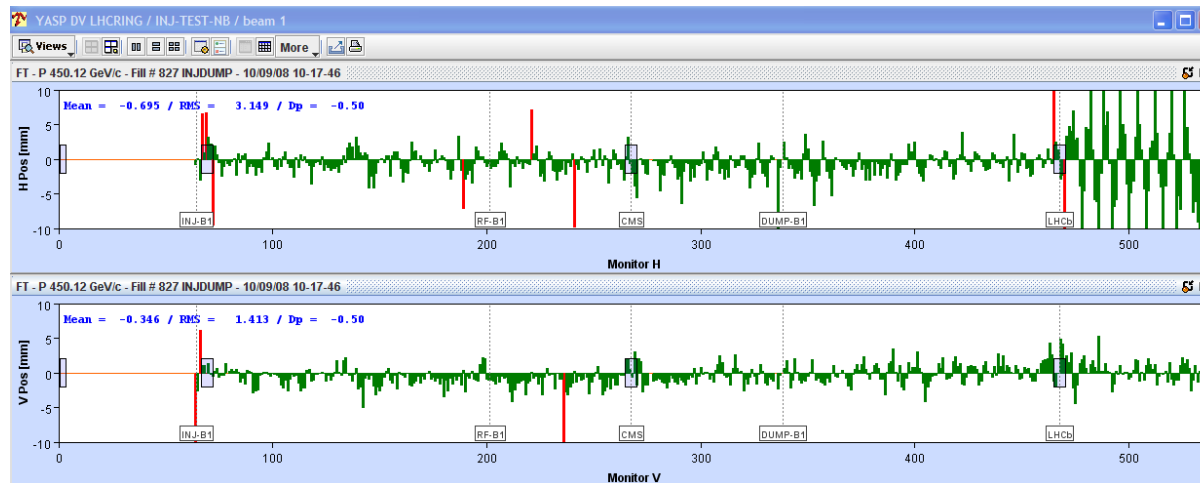


- 10:12 Opäť na prvý pokus do bodu 8, kde je experiment LHCB



# Spúšťanie – 10. september 2008

- 10:18 Zväzok preletel 7/8 LHC a dostal sa do bodu 1 kde je experiment Atlas.



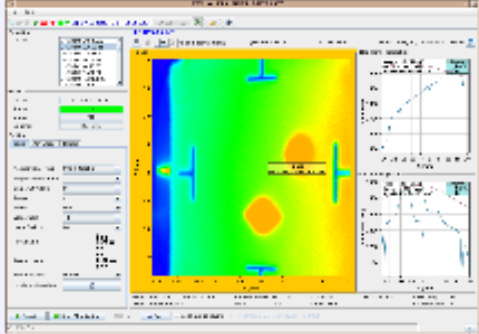
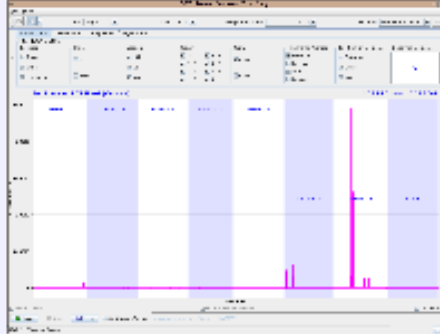
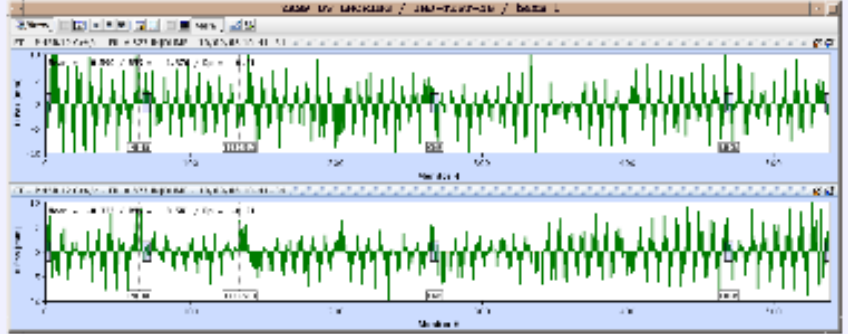
- 10:25 Vyťahujú sa kolimátory v bode 1. Zväzok v LHC má úplne voľnú dráhu. Nasledujúca injekcia častíc už preletí celé LHC dokola...

- Svet sa pozerá v priamom prenose ...



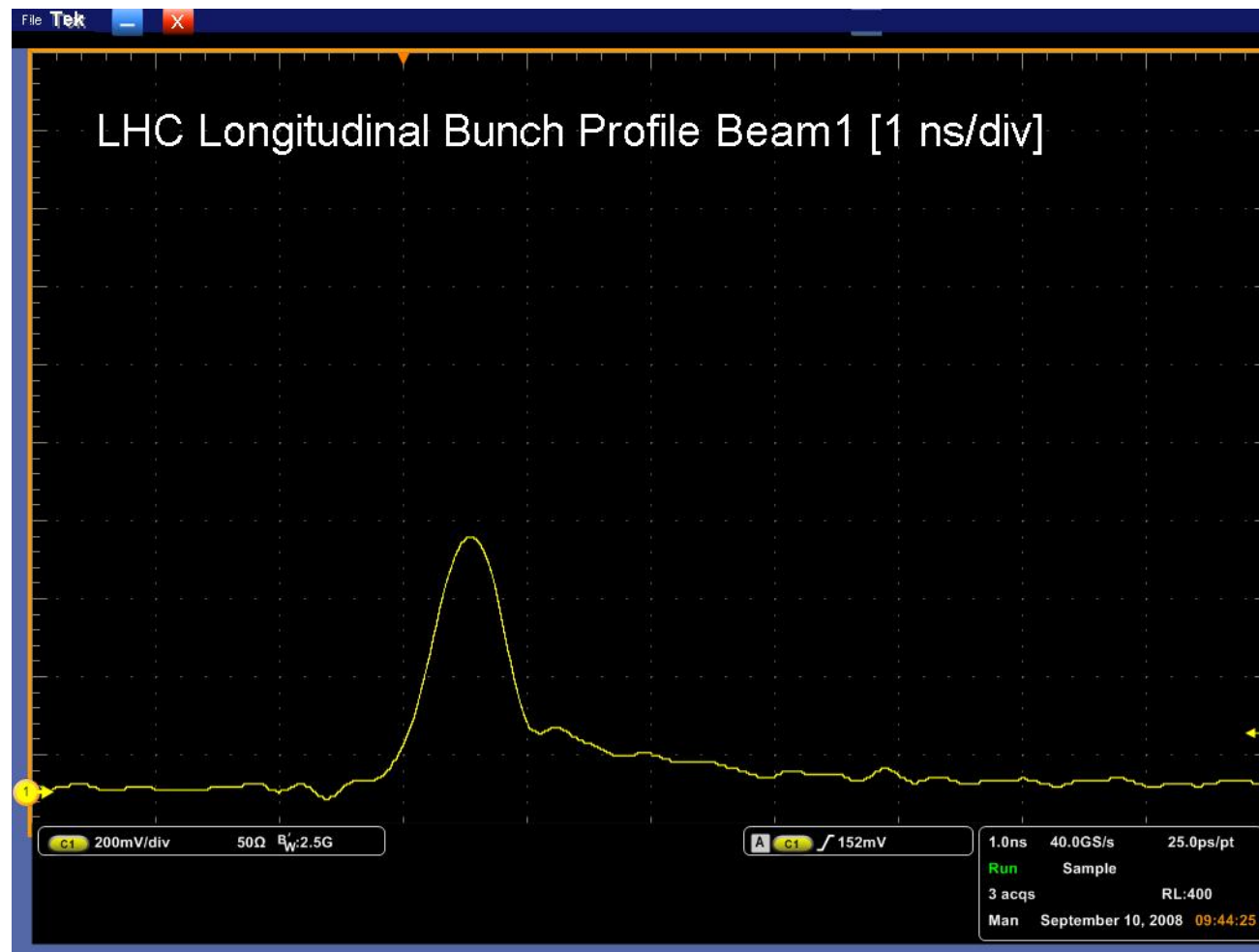
# Spúšťanie – 10. september 2008

- 10:26, necelú hodinu od začiatku  $2.6 \times 10^9$  protónov urobilo historicky prvé tri obehy v LHC

38	10:25	IR1 collimators out. LHC aperture is clear of collimators... <i>created by lhcop on cvo-ccc-d61c</i>		
39	10:26	First turn!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!		
				
		20080910102640.png	20080910102651.png	20080910104551.png <i>created by lhcop on CVO-CCC-D31S</i>

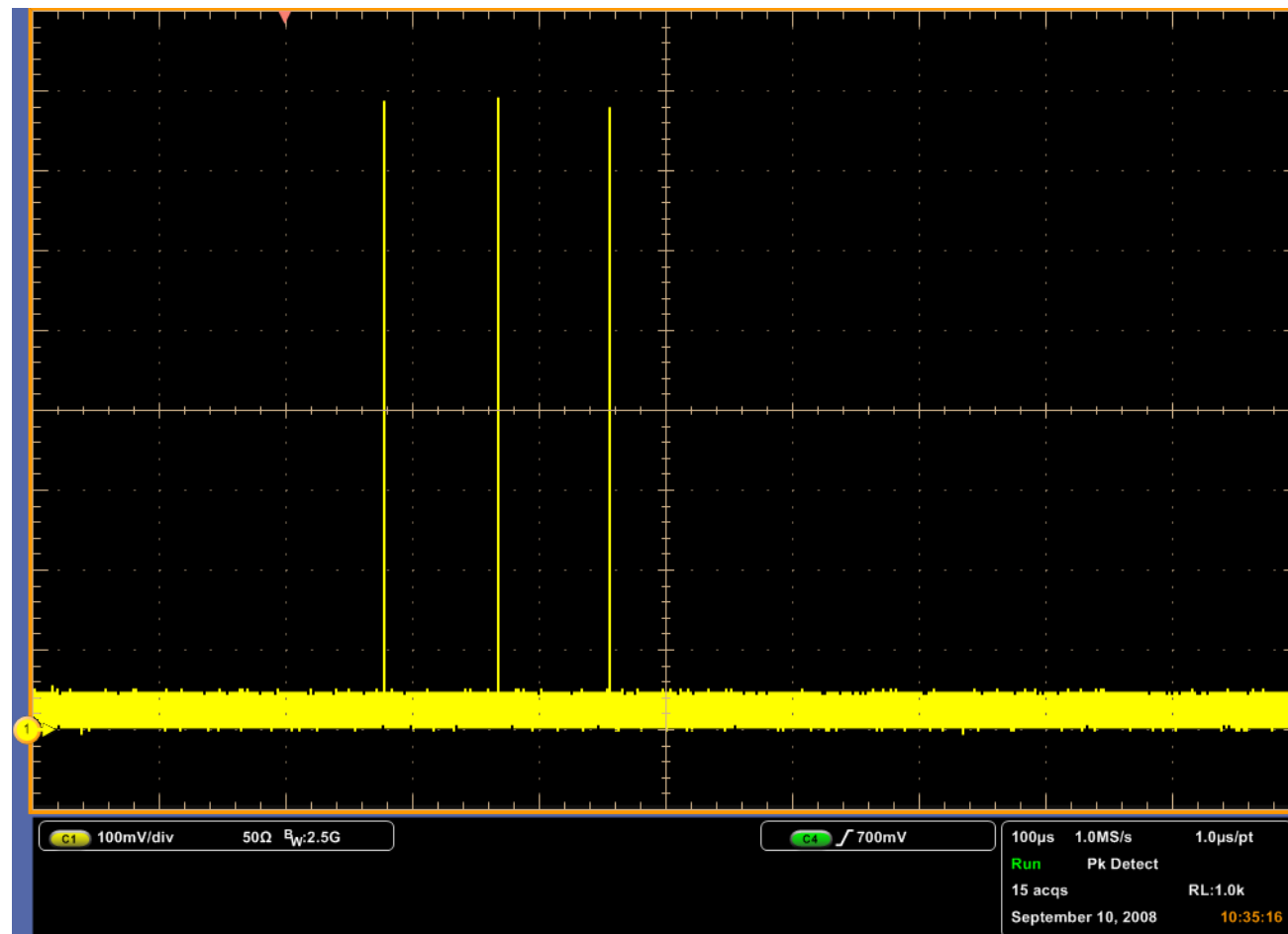
# Spúšťanie – 10. september 2008

- Prvý bunch, ktorý preletel cez VF systém zachytený osciloskopom v bode 4



# Spúšťanie – 10. september 2008

- Prvé 3 obehy zväzku zachytené osciloskopom v bode 4



Prišiel moment úľavy...



Foto: súkromný archív

# Spúšťanie – 10. september 2008

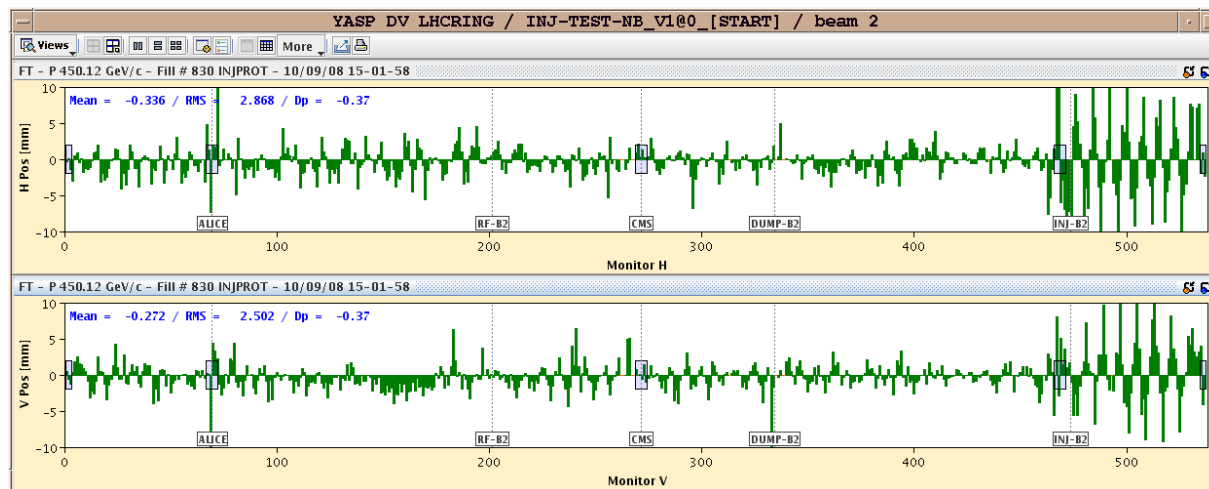
- 13:39 Ochranný dump pre Beam2 sa odstraňuje z prenosovej cesty do LHC, zväzok na prvý pokus prechádza až do bodu 6 (dump)





# Spúšťanie – 10. september 2008

- 14:59 Zväzok Beam2 urobí prvý obeh



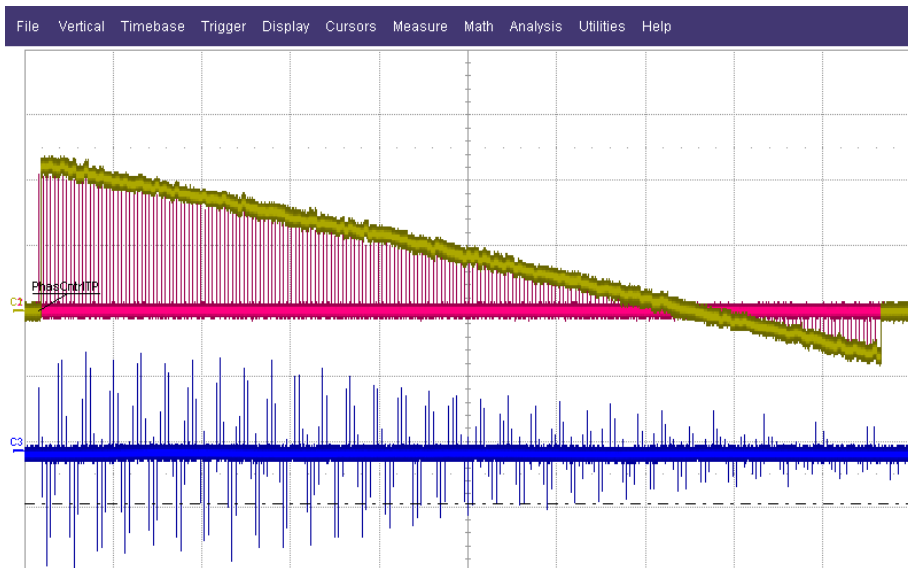
- 17h Novinári odchádzajú, verejné predstavenie sa skončilo a začína sa tvrdo pracovať

# Spúšťanie – 10. september 2008

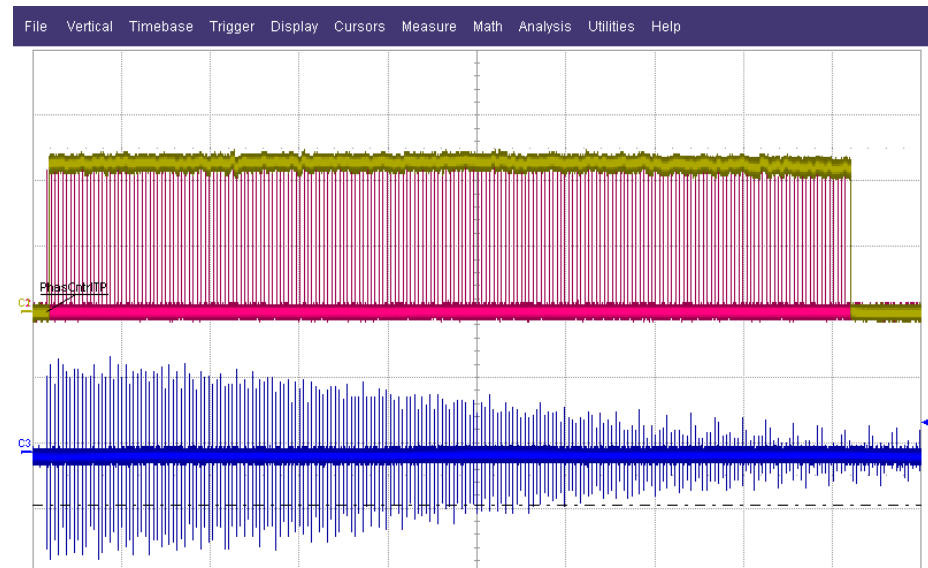
- Aby mohol zväzok obiehať bez strát je nutné perfektne vyladiť trajektóriu. Nastavenie presného časovania pre beam dump
- ~19h: Zväzok už urobí 9 obehov, môžeme začať nastavovať vysokofrekvenčný systém
- ~21:30h: Zväzok už urobí niekoľko sto obehov

# Spúšťanie – 10. september 2008

- Modulom fázovej slučky vidíme, že sa zväzok pohybuje trochu rýchlejšie voči vypočítaným nastaveniam. Je nutné upraviť frekvenciu VF systému aby neskôr zväzok mohol obiehať presne v strede vákuovej komory. Korekcia je menej ako 100Hz na frekvenciu 400 788 933 Hz



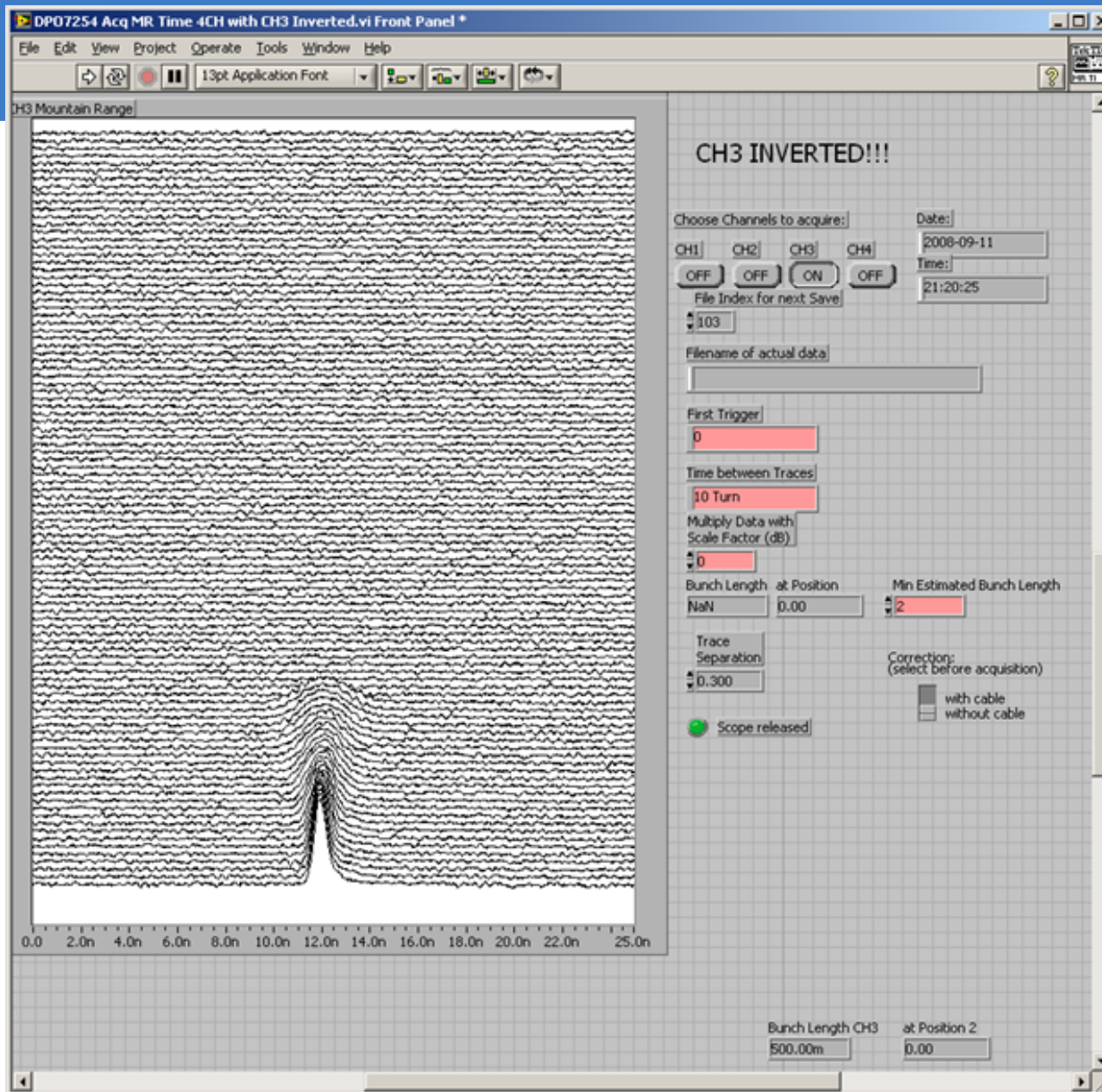
Fáza obiehajúcich bunchov konštantne ubieha, je nutné upraviť referenčnú frekvenciu



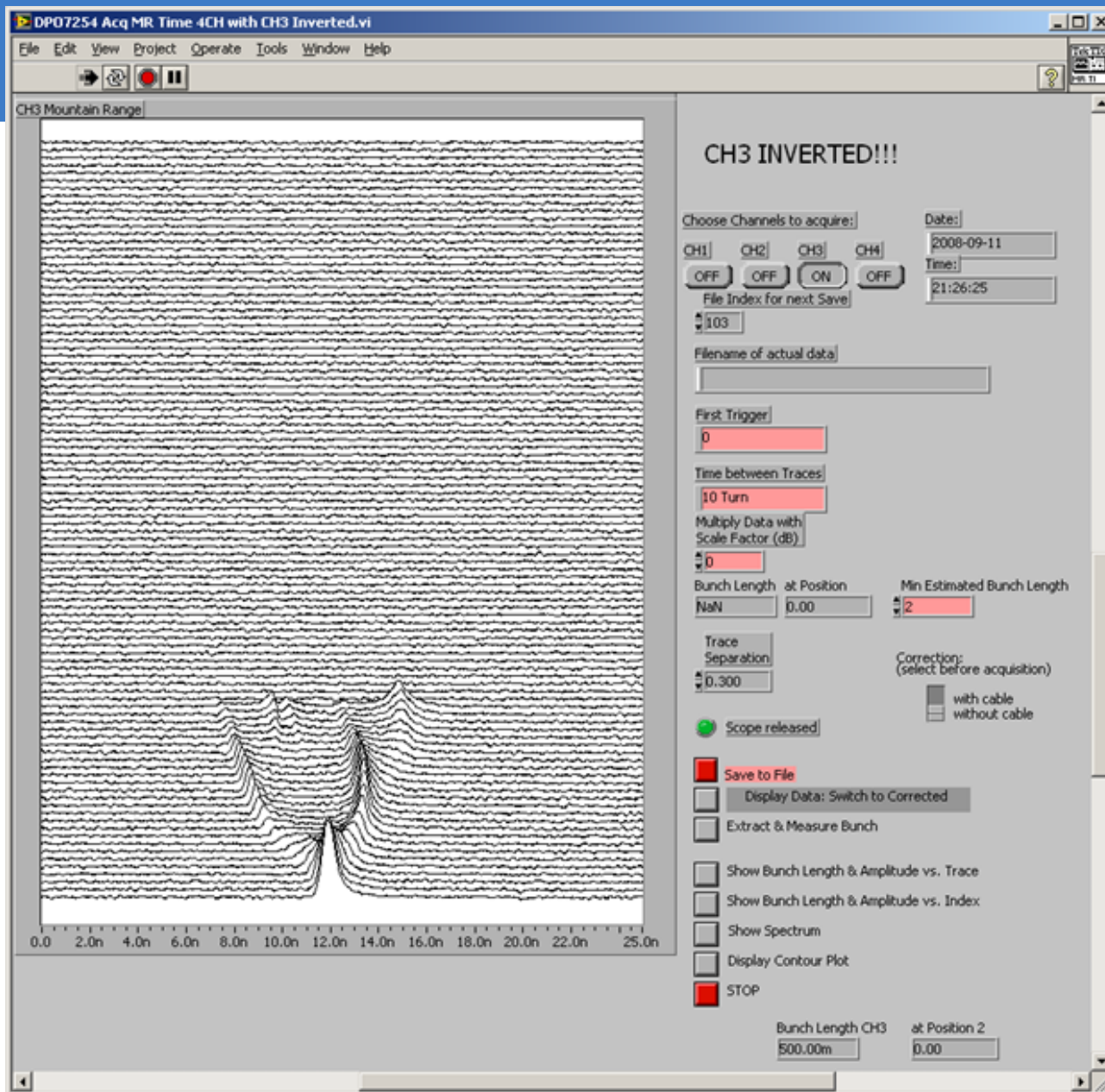
Fáza je takmer konštantná, VF systém je pripravený prijať a zachytiť (capture) zväzok.

# Spúšťanie – 11. september 2008

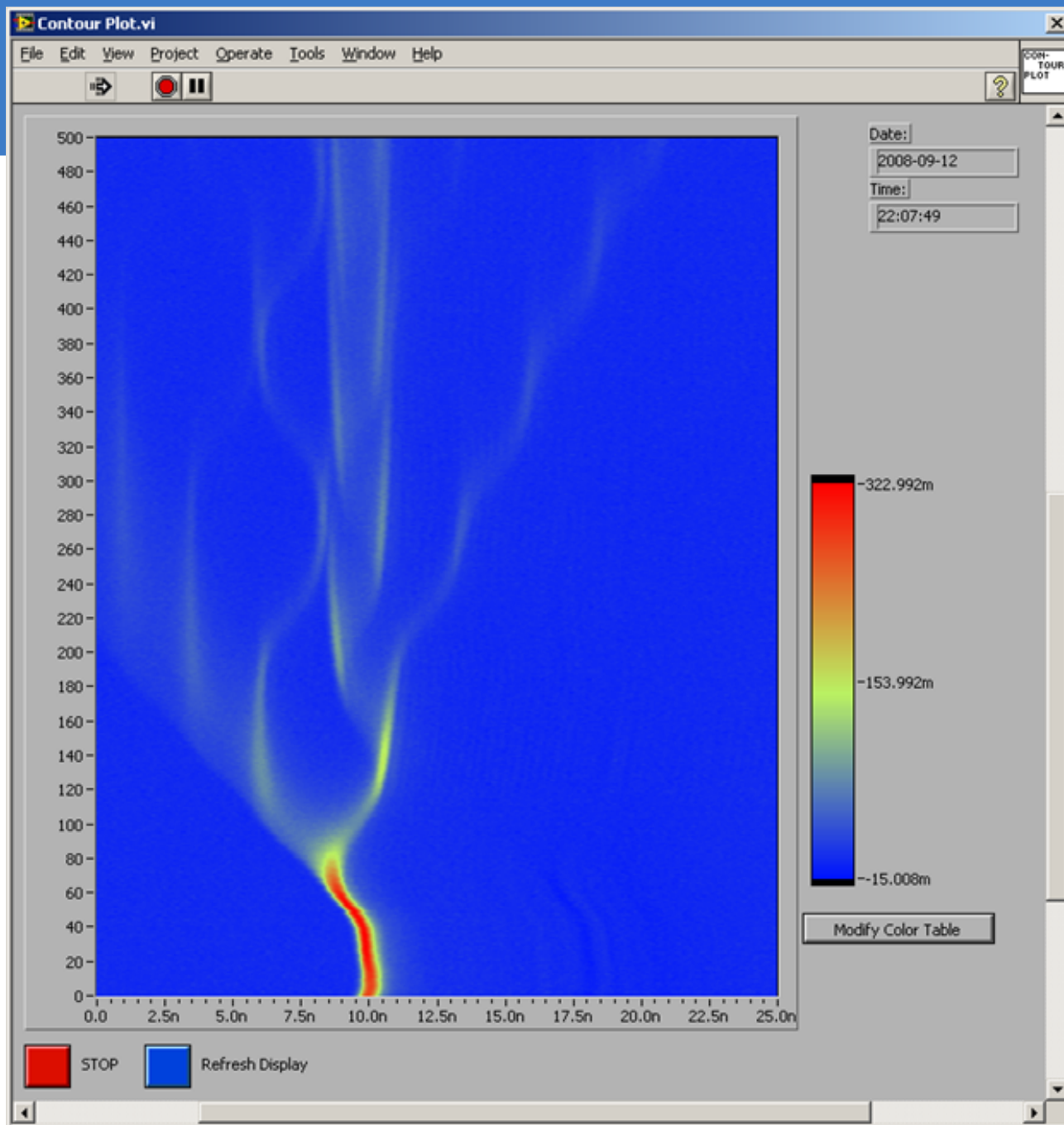
- Ráno: Trajektória je vyladená a stabilná už natoľko, že zväzok dokáže urobiť ~1000 obehov.
- 22:26: Zväzok je stabilný a urobí 4000 obehov a je pripravený na zapnutie vysokofrekvenčného systému
- Pokus o prijatie a zachytenie zväzku vysokofrekvenčným systémom. Tento doteraz obiehal len voľne zotrvačnosťou a postupne strácal štruktúru.



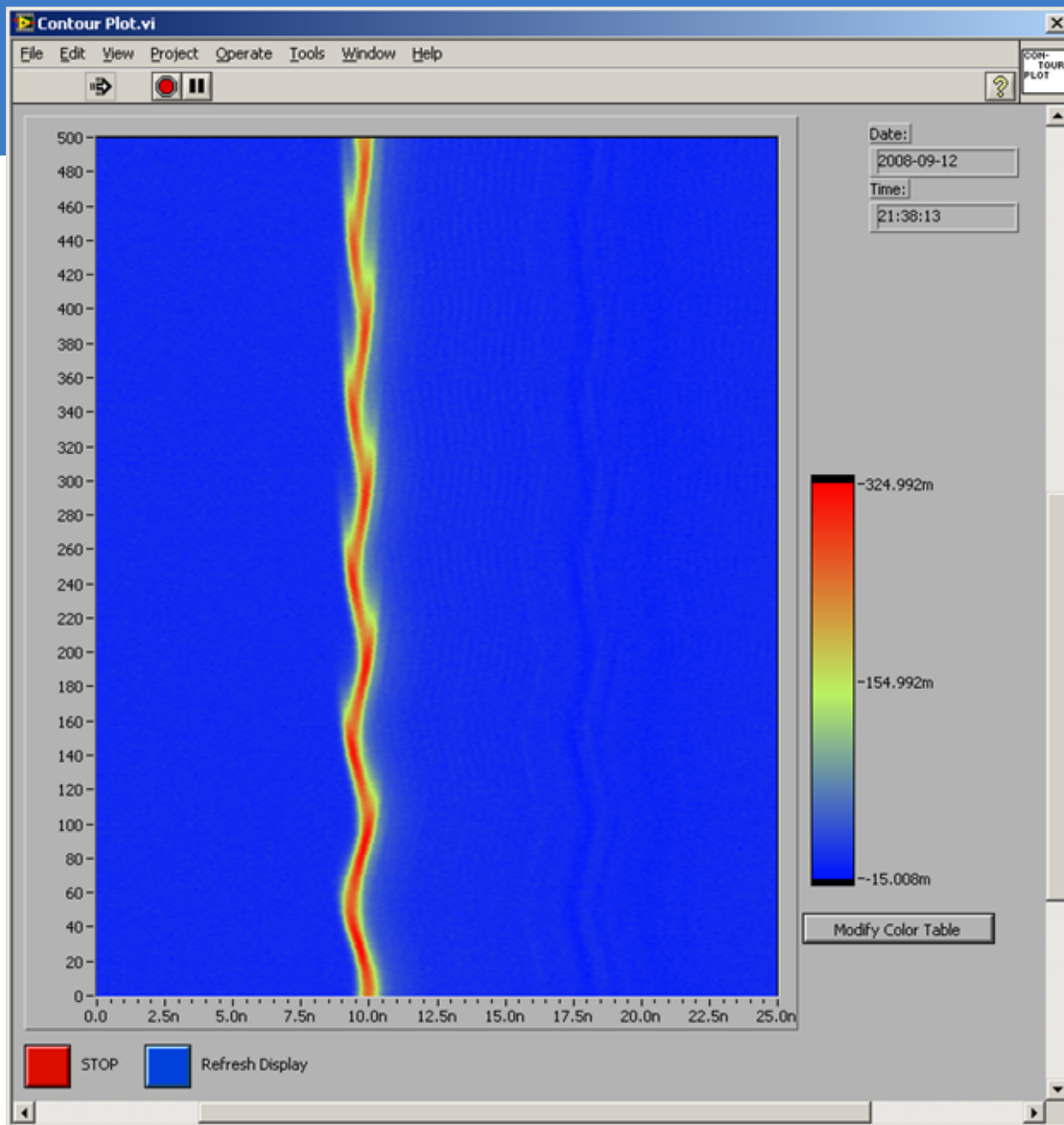
Voľne obiehajúci zväzok bez VF systému. Pôvodne gaussovský bunch sa postupne rozplýva. Po dostatočne dlhom čase rovnomerne zaplní celý ring.



Pokus o zachytenie VF systémom. Parametre zatiaľ nie sú správne nastavené a vysokofrekvenčné pole zväzok doslova roztrhá na niekoľko bunchov.

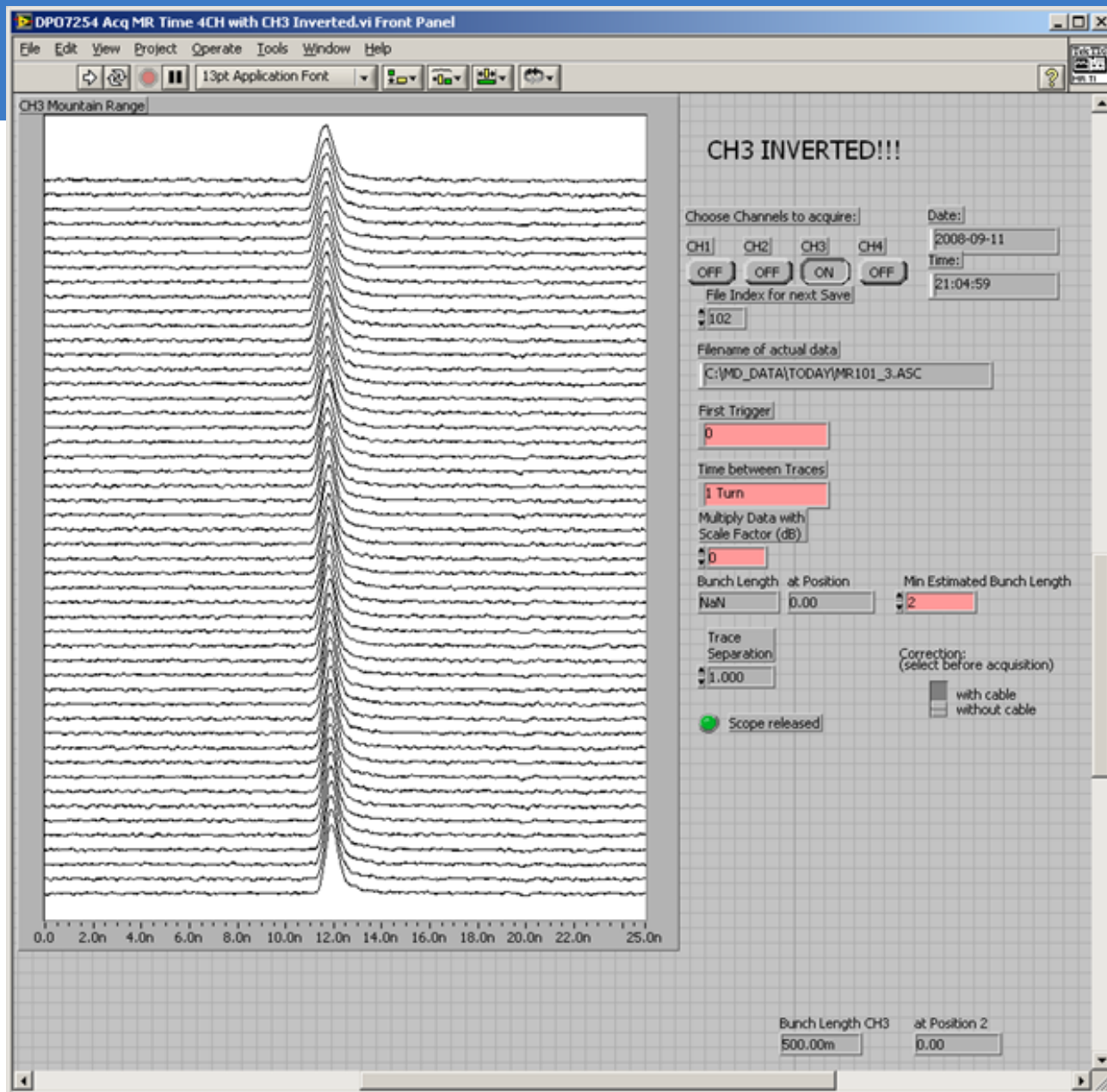


Pokus o zachytenie VF systémom. Parametre zatiaľ nie sú správne nastavené a vysokofrekvenčné pole zväzok doslova roztrhá na niekoľko bunchov.



Pokus o zachytenie VF systémom.  
 Parametre sú už takmer správne, zväzok si uchováva štruktúru ale silne osciluje.

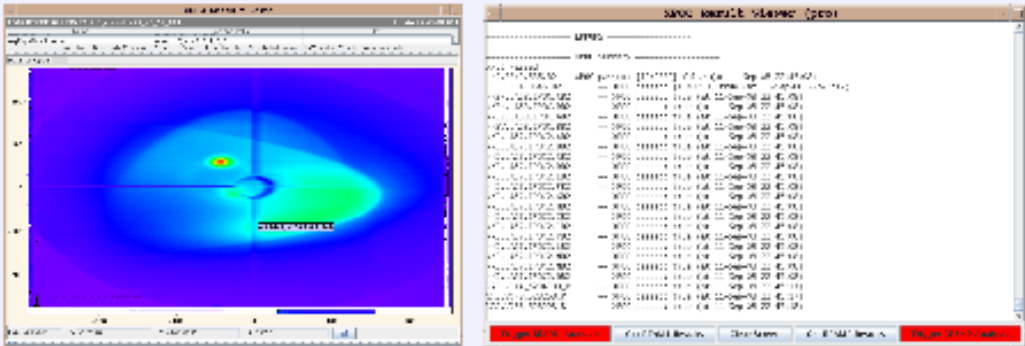




Zväzok správne zachytený VF systémom.  
 Obieha stabilne po takmer neobmedzenú dobu.

# Spúšťanie – 11. september 2008

- 22:33: Zväzok B2 je zachytený kontrolovane obieha v urýchľovači takmer 10 minút!

38	22:26	circulating beam for 4000 turns!	<i>created by lh</i>
39	22:33	CIRCULATING BEAM!!!!	<i>created by lh</i>
40	22:45	<p>We kept the same BEAM for more then 10 minutes.</p> <p>Then, first emergency dump. Caused by the loss of RD circuits 81. Dump correctly executed.</p> 	<i>created by lh</i>
41	22:53	<p>With the circulating beam: Syncho loop was ON, adjusting the injection phase.</p> <p>Problem with the f-ref synchronization, expert will work on it tomorrow.</p>	<i>created by lh</i>

# Spúšťanie LHC

- 12. September 2008, 02:04:

VF systém udržiava obiehajúci zväzok, operátori začínajú nastavovanie všetkých systémov

- 12. September 2008, 21:22:

V LHC prvý krát obiehajú obidva zväzky súčasne

- 13. September 2008

Začínajú rôzne technické problémy spojené s prvou prevádzkou

# 19. september 2008

- 13. – 19. September 2008

Nastavovanie a testy všetkých systémov urýchľovača

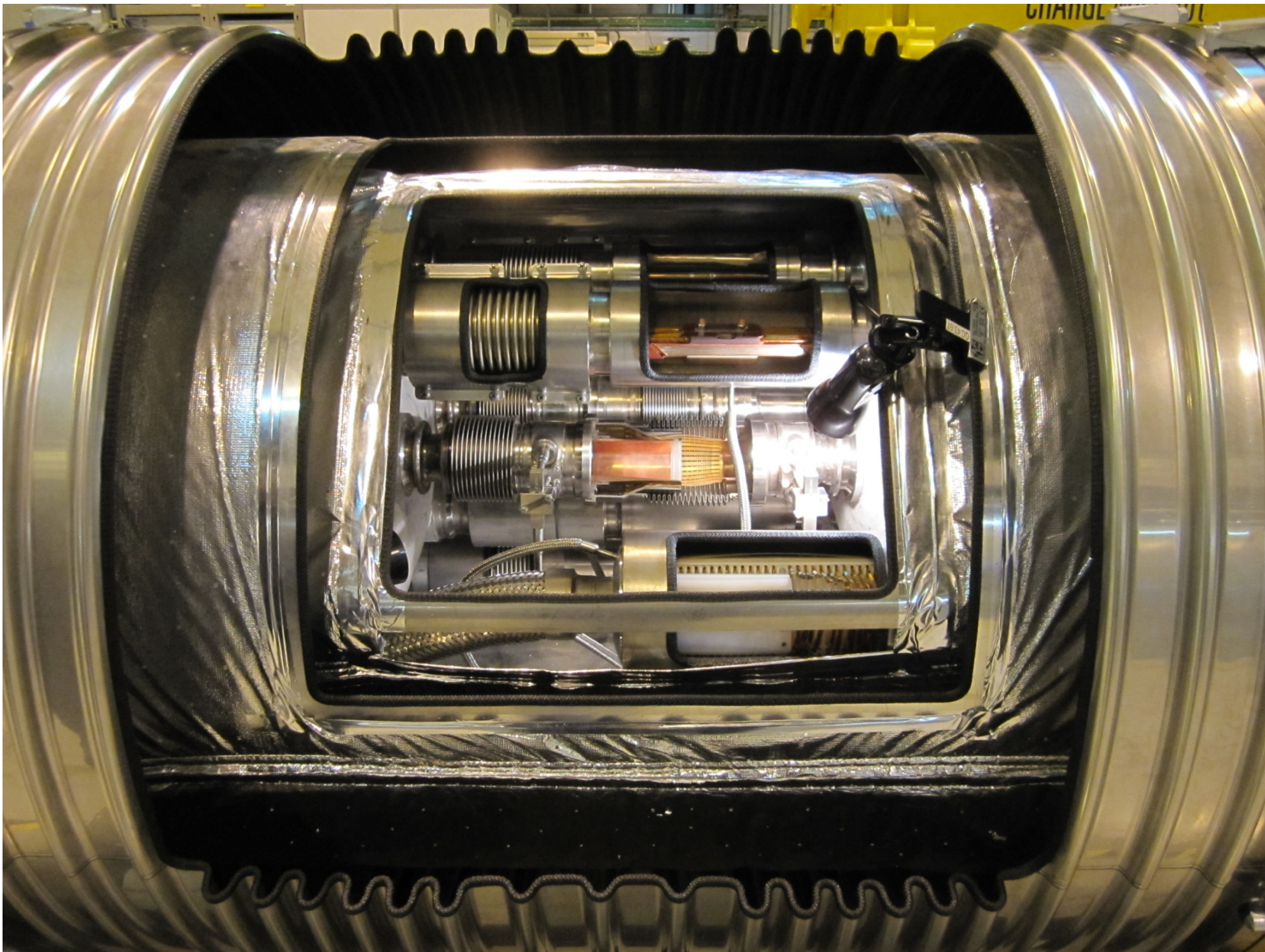
- 19. September 2008, ~11:18:

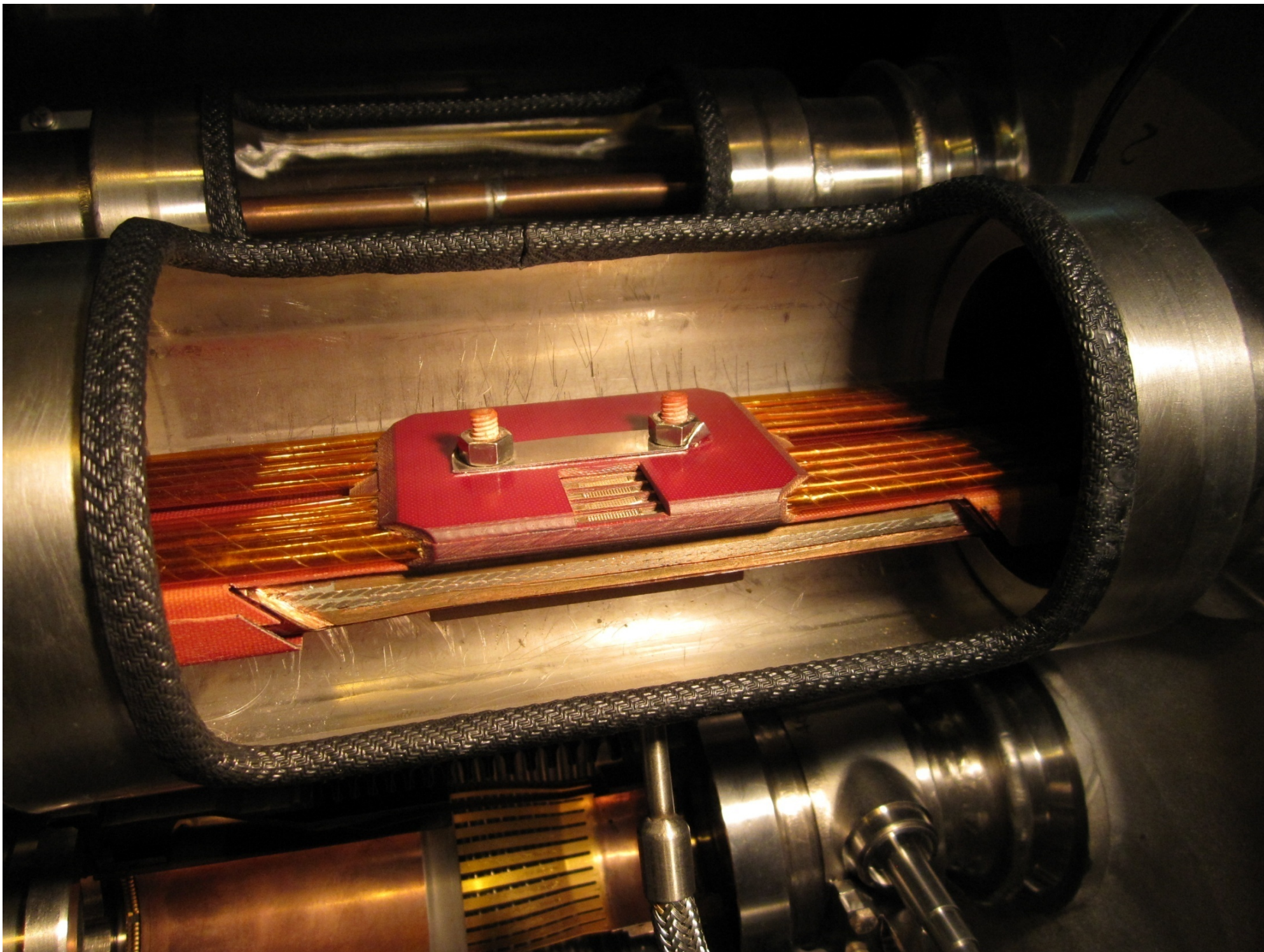
Prebieha rutinný test sektora 3-4. Pri prúde 8.7 kA nastane masívny quench polovice sektora

# 19. september 2008

## INTERIM SUMMARY REPORT ON THE ANALYSIS OF THE 19 SEPTEMBER 2008 INCIDENT AT THE LHC

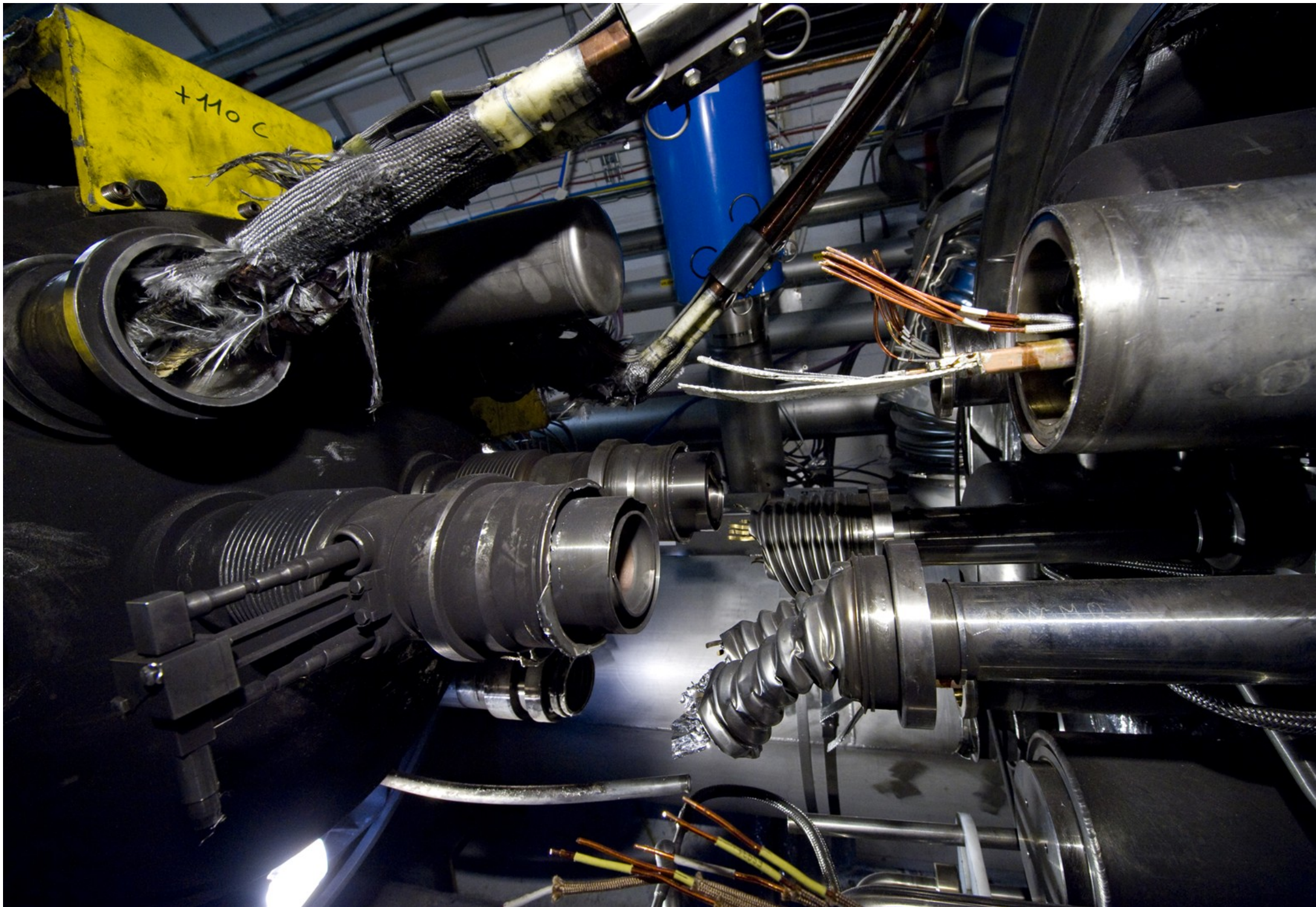
**On 19 September 2008 morning, the current was being ramped up to 9.3 kA in the main dipole circuit** at the nominal rate of 10 A/s, **when at a value of 8.7 kA, a resistive zone developed in the electrical bus** in the region between dipole C24 and quadrupole Q24. **The first evidence was the appearance of a voltage of 300 mV detected in the circuit** above the noise level: the time was 11:18:36 CEST. No resistive voltage appeared on the dipoles of the circuit, individually equipped with quench detectors with a detection sensitivity of 100 mV each, so that the quench of any magnet can be excluded as initial event. **After 0.39 s, the resistive voltage had grown to 1 V** and the power converter, unable to maintain the current ramp, tripped off at 0.46 s (slow discharge mode). The current started to decrease in the circuit and at 0.86 s, the energy discharge switch opened, inserting dump resistors in the circuit to produce a fast power abort. **Within the first second, an electrical arc developed and punctured the helium enclosure, leading to release of helium into the insulation vacuum of the cryostat.** The additional power reaching the helium enclosure produced the onset of a pressure rise above the nominal 0.13 MPa. **After 3 and 4 s, the beam vacuum also degraded in beam pipes 2 and 1**, respectively. At the same time, the insulation vacuum started to degrade in the neighboring subsector 19-21. In the following seconds, electrical noise induced in the quench detectors of several other magnets by the fast power abort, triggered the firing of heaters thus provoking quenches in subsector 23-25. Within 20 s, several provoked quenches occurred at other locations in the sector, and at 20 s, the insulation vacuum also degraded in the other neighboring subsector 27-29. In all cases, the self-actuated quench relief valves on the helium enclosure opened at their set point of 1.7 MPa, and contained the pressure rise to below 2.0 MPa, except in subsector 19-21 where it reached a maximum of 2.1 Mpa.

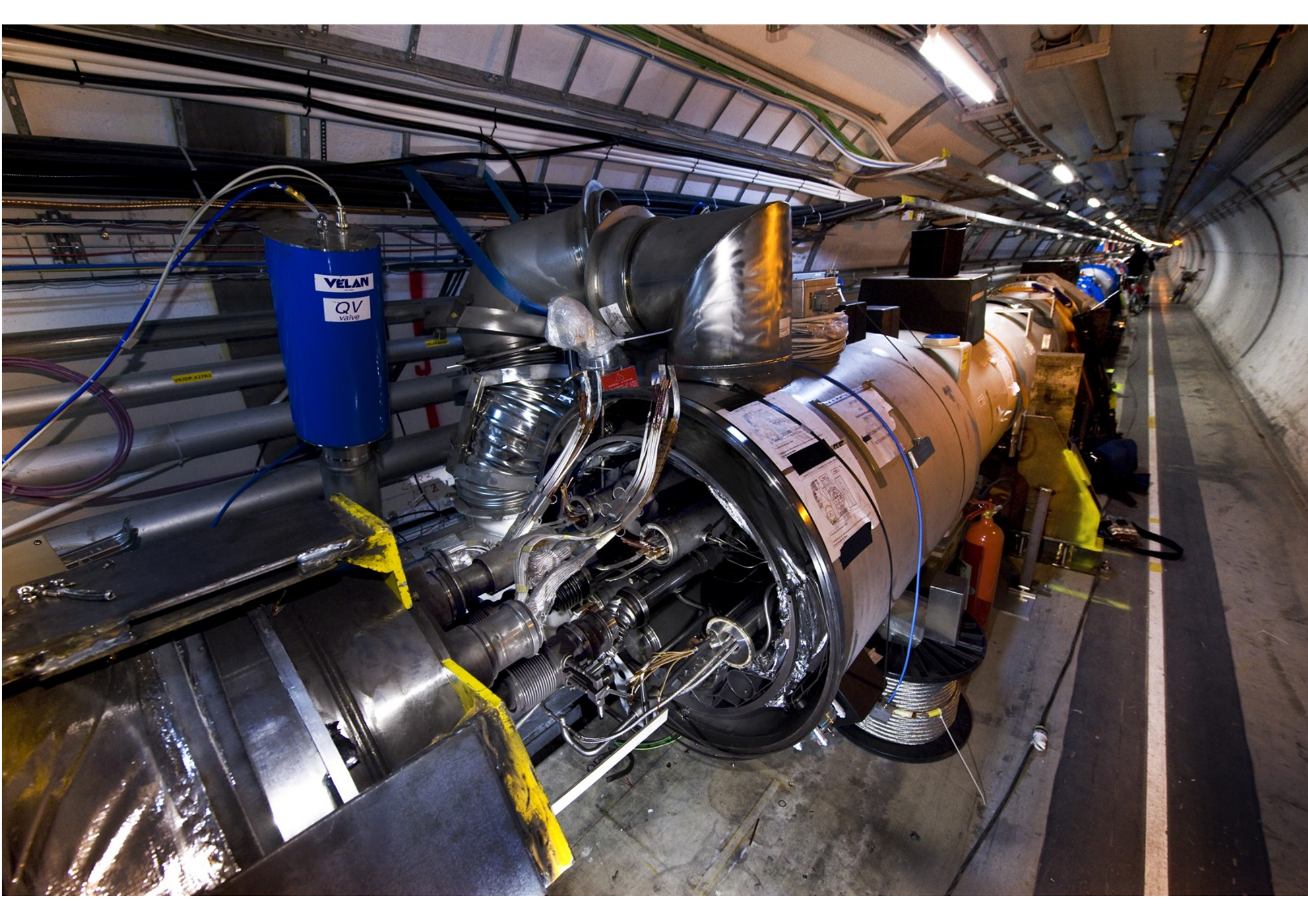


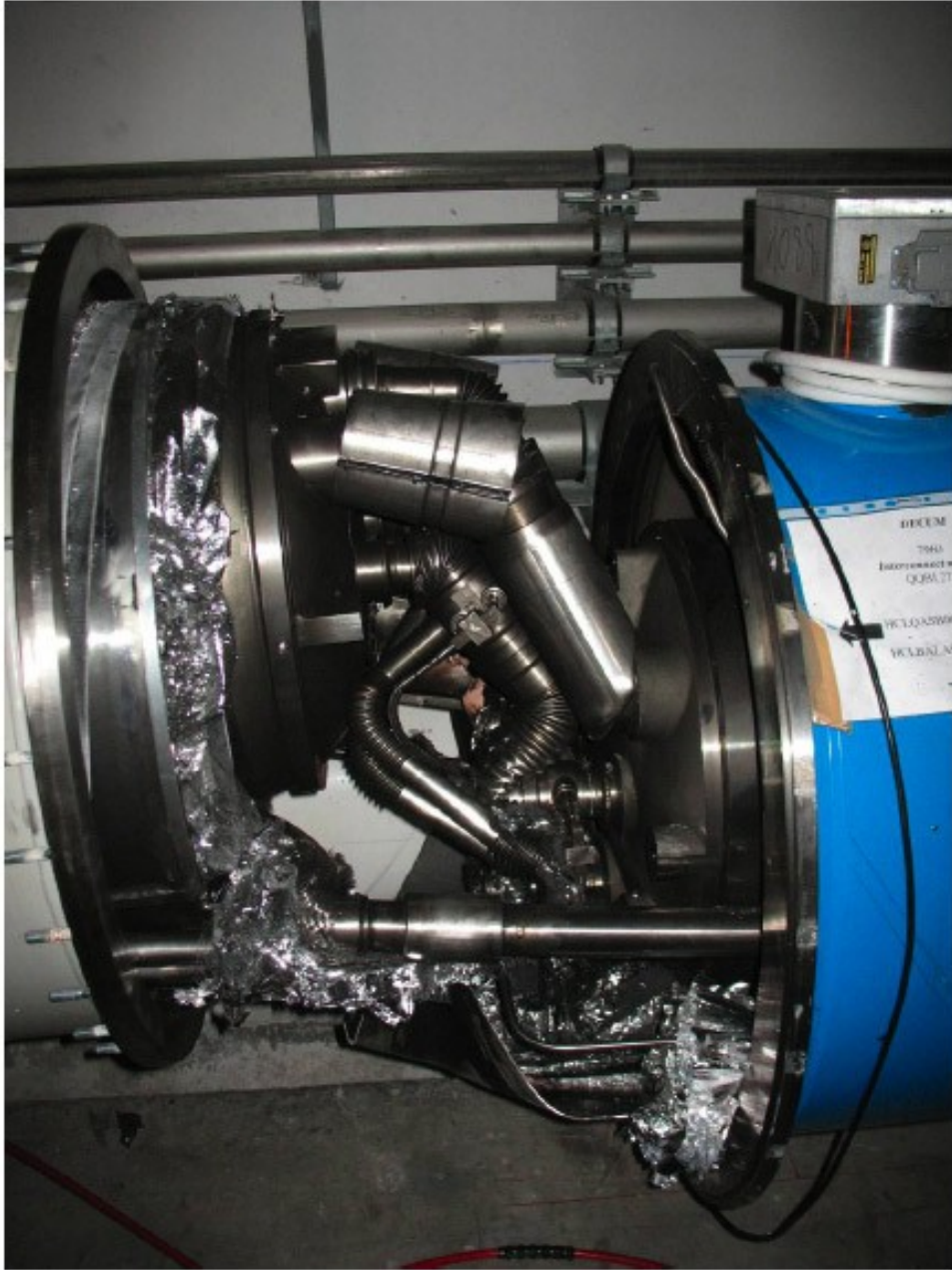














**FEIN Elektrowerkzeuge**  
FEIN Electric Power  
Outils électriques



# Znovu spustenie – November 2009

- Podrobnou analýzou sa našlo niekoľko ďalších vadných spojov
- Po 14 mesiacoch opráv na ktorých pracovalo asi 100 ľudí a 30 miliónoch Eur bolo LHC v novembri 2009 pripravené na znovu spustenie
- 20.11.2009 – znova spustenie LHC do prevádzky
- 23.11.2009 – prvé zrážky protónov pri 450 GeV

# Znovu spustenie – November 2009

- 30.11.2009 – dosiahnutie rekordnej energie 1.18 TeV
- 30.3.2010 – prvé zrážky protónov pri energii 3.5+3.5 TeV

# PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS

Energy:

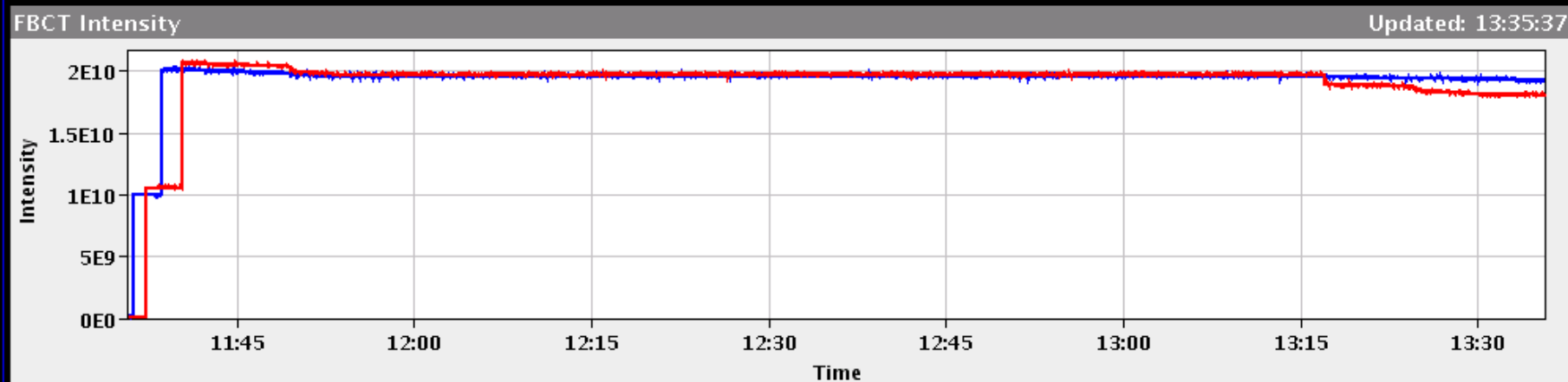
3500 GeV

I(B1):

1.81e+10

I(B2):

1.62e+10



Comments 30-03-2010 13:22:57 :

Stable beams!

BIS status and SMP flags

B1

B2

Link Status of Beam Permits

true true

Global Beam Permit

true true

Setup Beam

true true

Beam Presence

true true

Moveable Devices Allowed In

true true

Stable Beams

true true

LHC Operation in CCC : 77600, 70480

PM Status B1

ENABLED

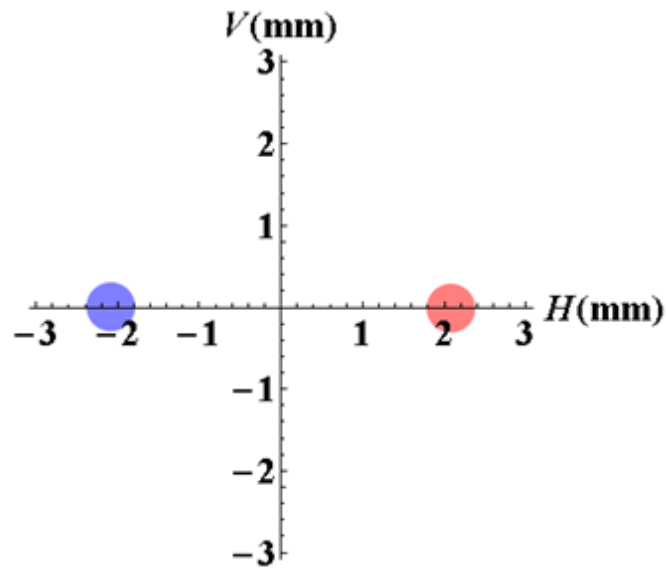
PM Status B2

ENABLED



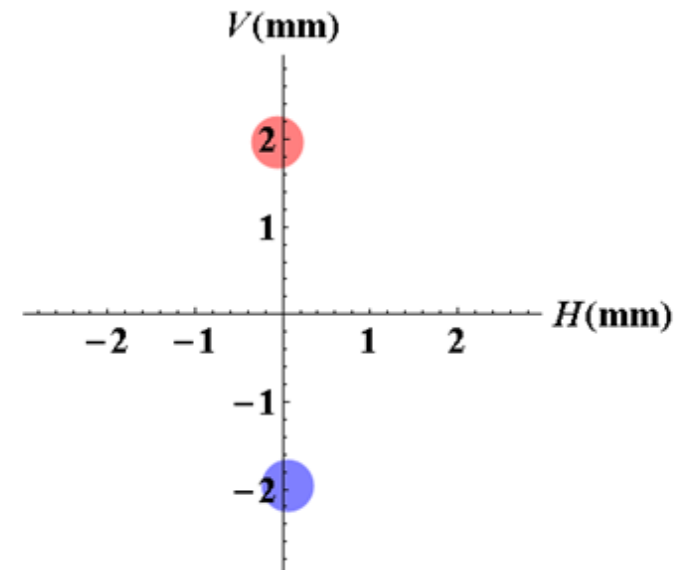
### ATLAS IP Separation

H = 4.173 mm : V = 0.035 mm

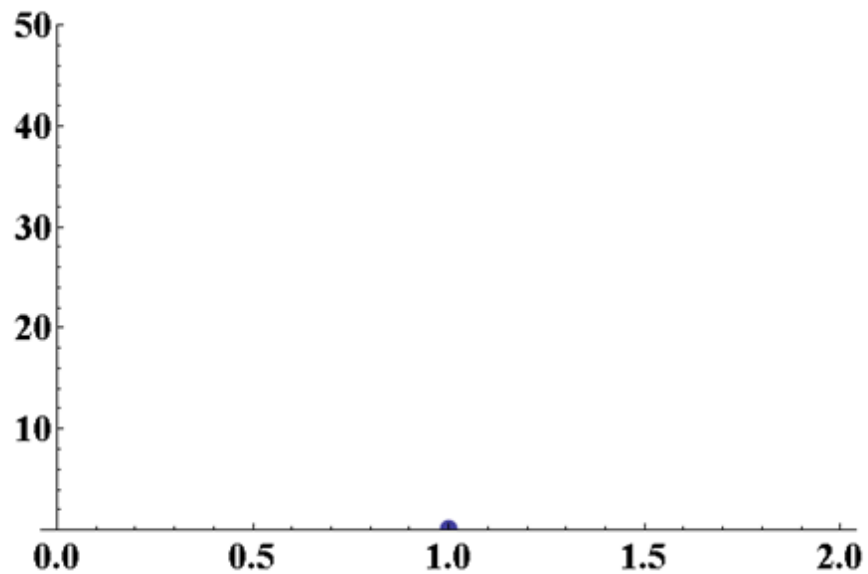


### CMS IP Separation

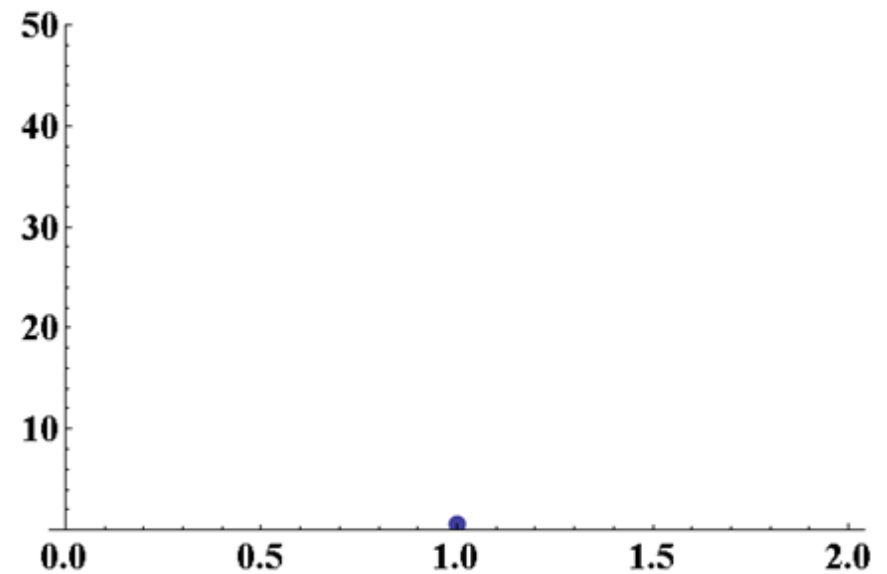
H = 0.130 mm : V = 3.925 mm



### ATLAS Coll Rate Evol

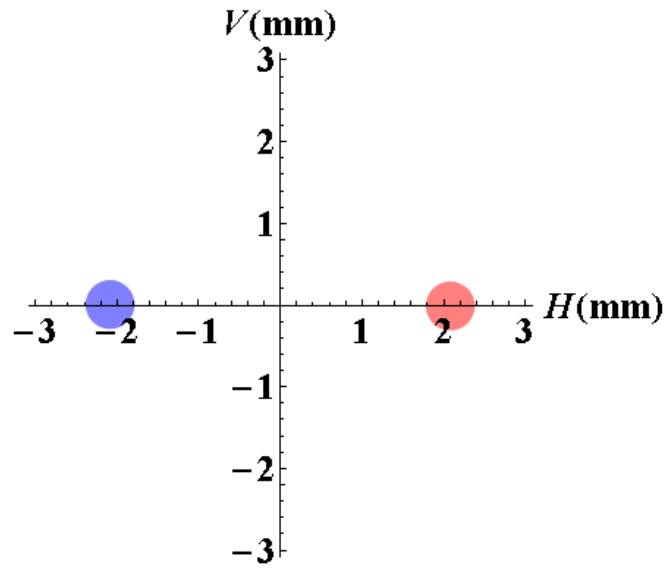


### CMS Coll Rate Evol



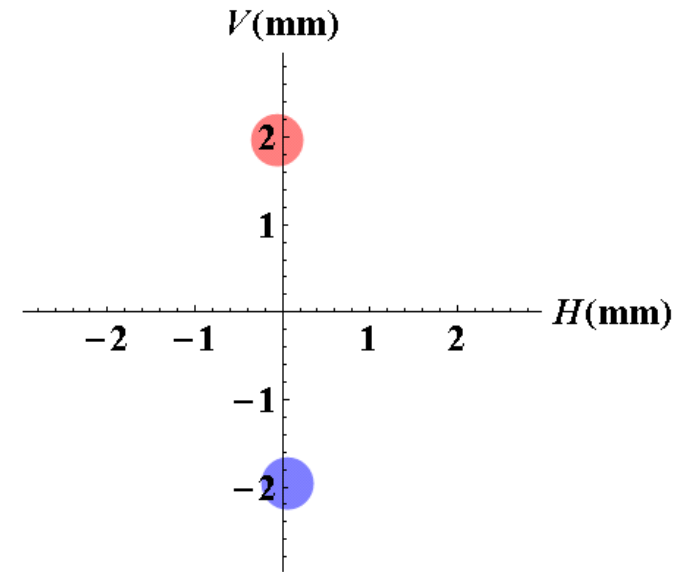
### ATLAS IP Separation

H = 4.173 mm : V = 0.035 mm

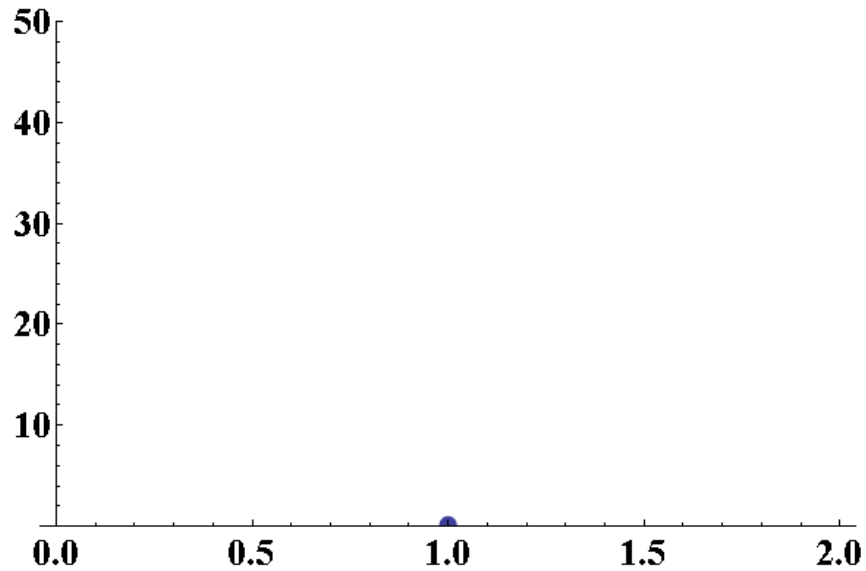


### CMS IP Separation

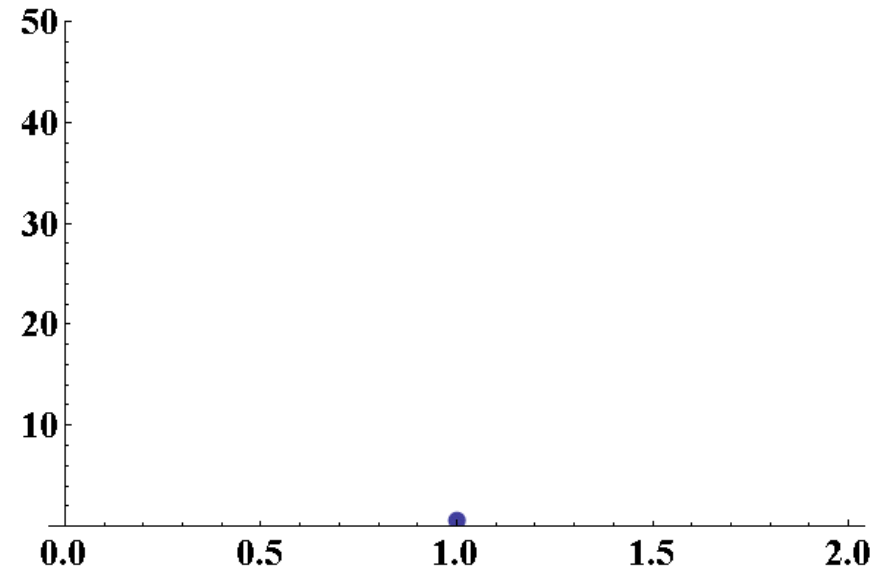
H = 0.130 mm : V = 3.925 mm



### ATLAS Coll Rate Evol

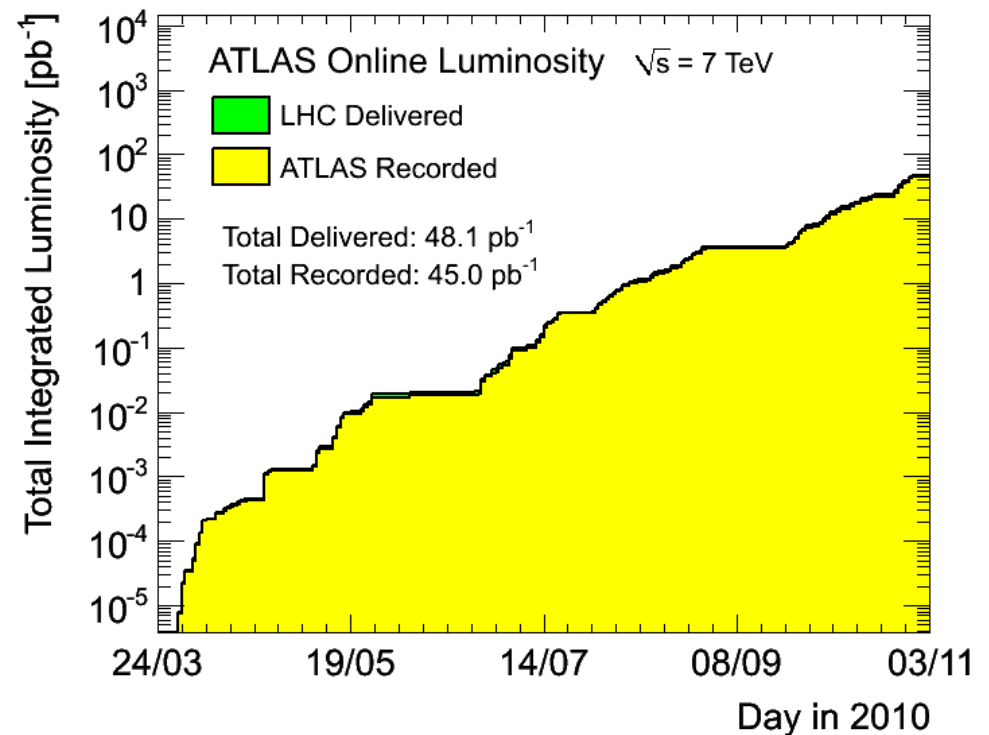
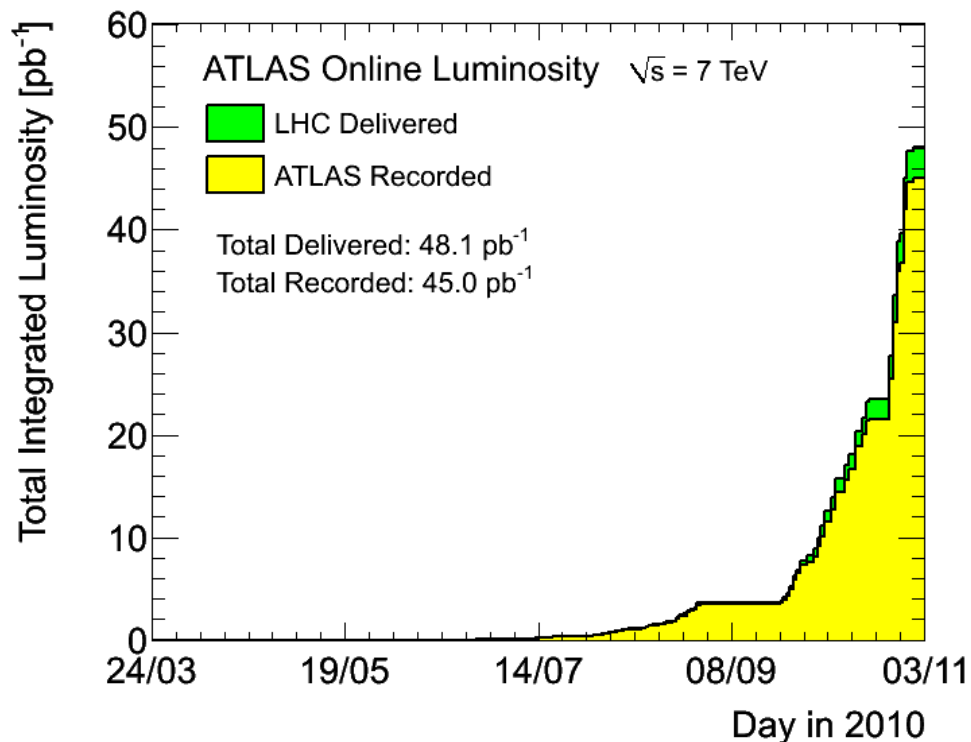


### CMS Coll Rate Evol



# Prevádzka LHC rok 2010

- Rutinná prevádzka s protónmi (do 400 bunchov, 150 ns)
- Výkon LHC (počet zrážok pre fyzikov) sa celý rok 2010 exponenciálne zvyšoval a urýchľovač bežal bez väčších technických problémov



# Prevádzka LHC rok 2010

- 8.11.2010 – prechod na ióny olova
- 7.12.2010, 18:00 – začiatok zimnej prestávky

CERN BE - OP eLogbook NEW - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

file:///C:/dokumenty/eLogbook.php.htm

Most Visited Getting Started Latest Headlines

CERN BE - OP eLogbook NEW

18:00 last beam dump of the year !!!  

**name:** beam dump.png  
**desc:**  
Created by lhc

18:00 LHC SEQ: beam dump handshake closed; LHC=STANBY, EXP=VETO  
Created by cop

18:04 Switching off RF.  
Created by lhc

18:08 ramp down combo of all PCs except RB.A78  
Created by lhc

18:19 Closing all vacuum valves.  
Created by lhc

18:21 RF off  
Created by lhc

18:24 LHC RUN CTRL: ACCELERATOR MODE changed to SHUTDOWN  
Created by cop

18:25 Dampers switched off.  
Created by lhc

18:51 all RB except RB.A78 switched to standby  
Created by lhc

18:56 LHC RUN CTRL: BEAM MODE changed to NO BEAM  
Created by cop

18:57 One last look  

**name:** 20101206190149.png  
**desc:**  
Created by lhc

19:01 switched main quads to standby  
Created by lhc

19:05 main quads switched off  
Created by lhc

19:06 switching all matching quads to standby  
Created by lhc

19:08 switched all matching quads off  
RQ6.R3B1 tripped  
Created by lhc

Done

CERN BE - OP eLogbook NEW - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

file:///C:/dokumenty/eLogbook.php.htm

Most Visited Getting Started Latest Headlines

CERN BE - OP eLogbook NEW

19:11 switched all separation/recombination dipoles to standby  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:14 switched all separation/recombination dipoles off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:16 switched all chromaticity sextupoles off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:19 switched all coupling correction quads off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:20 switched all landau octupoles off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:21 switched all ORBIT-H correctors off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:22 switched all ORBIT-V correctors off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:23 switched all skew quads off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:24 switched all triplet PCs off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:25 switched all tune trim quads off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:27 switched all tune correction quads off  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:29 switched off all RQTL PCs  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:30 switched off all RQ4/5s in 3 and 7  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:31 switched off all RCS PCs  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:31 switched off RQ4.LR3/7  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:32 switched off all RCD PCs  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:33 switched off RQ5.LR3/7 PCs  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:33 switched off all RCO PCs  
Created by lhcop from cwo-ccc-d21c

19:51 Switching off ALICE compensators.  
Created by lhcop from cwo-ccc-d41c

20:07 Dump kickers off.  
Created by lhcop from cwo-ccc-d41c

20:07 Injection kickers off.  
Created by lhcop from cwo-ccc-d41c

20:08 Tune kickers off.  
Created by lhcop from cwo-ccc-d41c

21:37 LHC SEQ: B1 Collimators to parking finished  
Created by copera from cs-ccc-seql

Done

# Prevádzka LHC rok 2011+

- Február 2010 koniec zimnej prestávky
- Cieľ pre rok 2011 – dosiahnutie integrovanej luminozity  $1 \text{ fb}^{-1}$

- 2012 – 2013

celoročná odstávka za účelom upgrade a prípravy systémov pre energiu 7 TeV

# Ďalšie zaujímavé informácie

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

Vistar stránky <http://op-webtools.web.cern.ch/op-webtools/Vistar/vistars.php>

LHC announcer <http://announcer.web.cern.ch/announcer/>

E-logbook [https://ab-dep-op-elogbook.web.cern.ch/ab-dep-op-elogbook/elogbook/eLogbook.php?  
lgbk=60](https://ab-dep-op-elogbook.web.cern.ch/ab-dep-op-elogbook/elogbook/eLogbook.php?lgbk=60)

LHC hlavná stránka <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>

Design report <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/LHC-DesignReport.html>

Brožúra s informáciami o LHC <http://cdsmedia.cern.ch/img/CERN-Brochure-2009-003-Eng.pdf>

Dokument server (publikácie, fotky, videá) <http://cdsweb.cern.ch/?ln=en>

Všetko zaujímavé sústredené na jeden portál [www.lhcbportal.com](http://www.lhcbportal.com)

# Jobs @ CERN

- CERN ponúka množstvo príležitostí
  - Stáže pre študentov inžinierskeho štúdia (1 rok)
  - Doktorandov (2-3 roky)
  - Čerstvých absolventov (2-3 roky)
  - Kmeňových zamestnancov
  
- Podrobné informácie na

<http://ert.cern.ch>





Spúšťanie urýchľovacieho modulu  
žeriavom z povrchu do podzemia v  
bode 4 LHC. Jeseň 2006.