

Az LHC kísérleteinek összefoglalója

Siklér Ferenc

sikler@rmki.kfki.hu

*MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet
Budapest*



Mafihe Részecskefizikai Téli Iskola
Gyenesdiás, 2008. február 2-5.

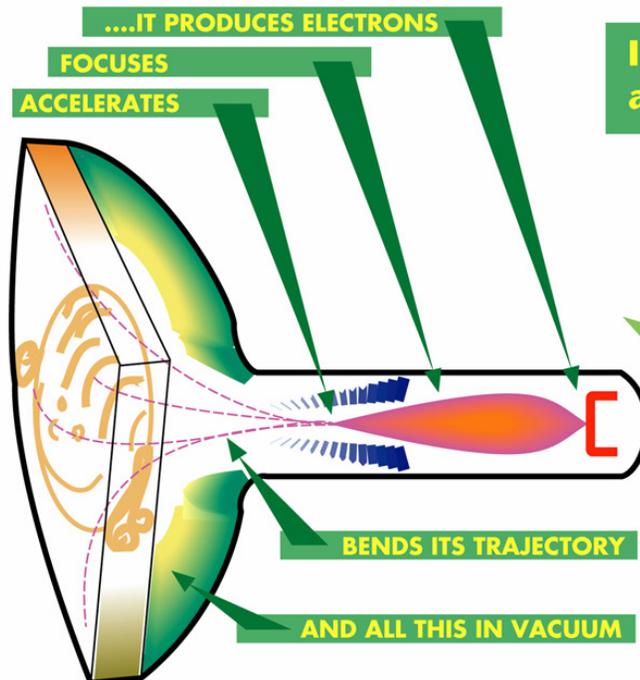
Tartalom

- A gyorsító
 - LHC (Large Hadron Collider), a Nagy Hadron Ütköztető
- Detektorok működése
- A kísérletek
 - ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)
 - CMS (Compact Muon Solenoid)
 - LHCb (The Large Hadron Collider beauty experiment)
 - ALICE (A Large Ion Collider Experiment @ CERN)
 - TOTEM (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC)
 - LHCf (LHC forward)

A gyorsító

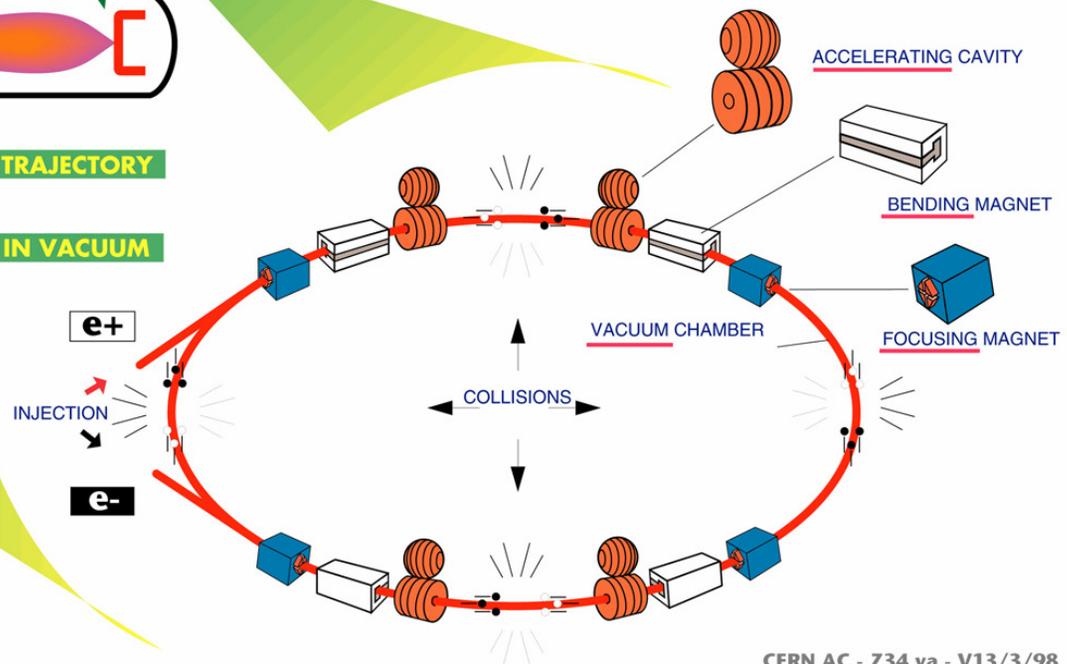
Részecskegyorsítók

DID YOU KNOW YOUR TELEVISION SET IS AN ACCELERATOR ?



In your TV set, the electrons are accelerated to 20000 volts.

In LEP, they are accelerated to 100 000 000 000 volts.



CERN AC - Z34 va - V13/3/98

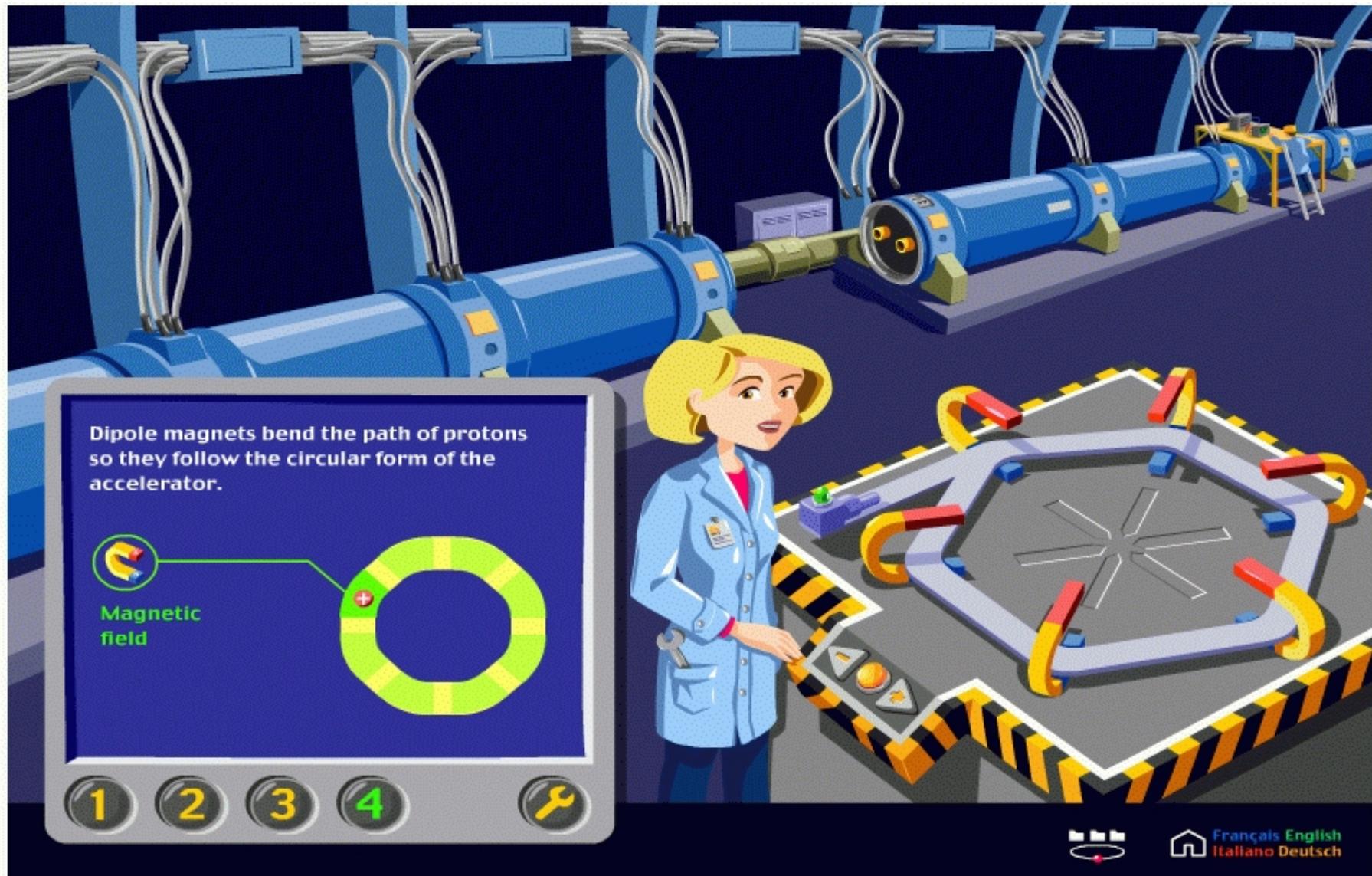
A televízió és a részecske-ütköztető

Gyorsítás – elektromos tér



Váltakozó irányú elektromos tér, rádiófrekvencia

Zárt pályán tartás – mágneses tér



Körpálya, Lorentz-erő: $F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

Fókuszálás – mágneses tér



Kvadrupól mágnesekkel összenyomjuk a nyalábot

CERN – Európai Részecskefizikai Laboratórium



Az LHC alagútja, Genfi-tó, Alpok, Mont Blanc

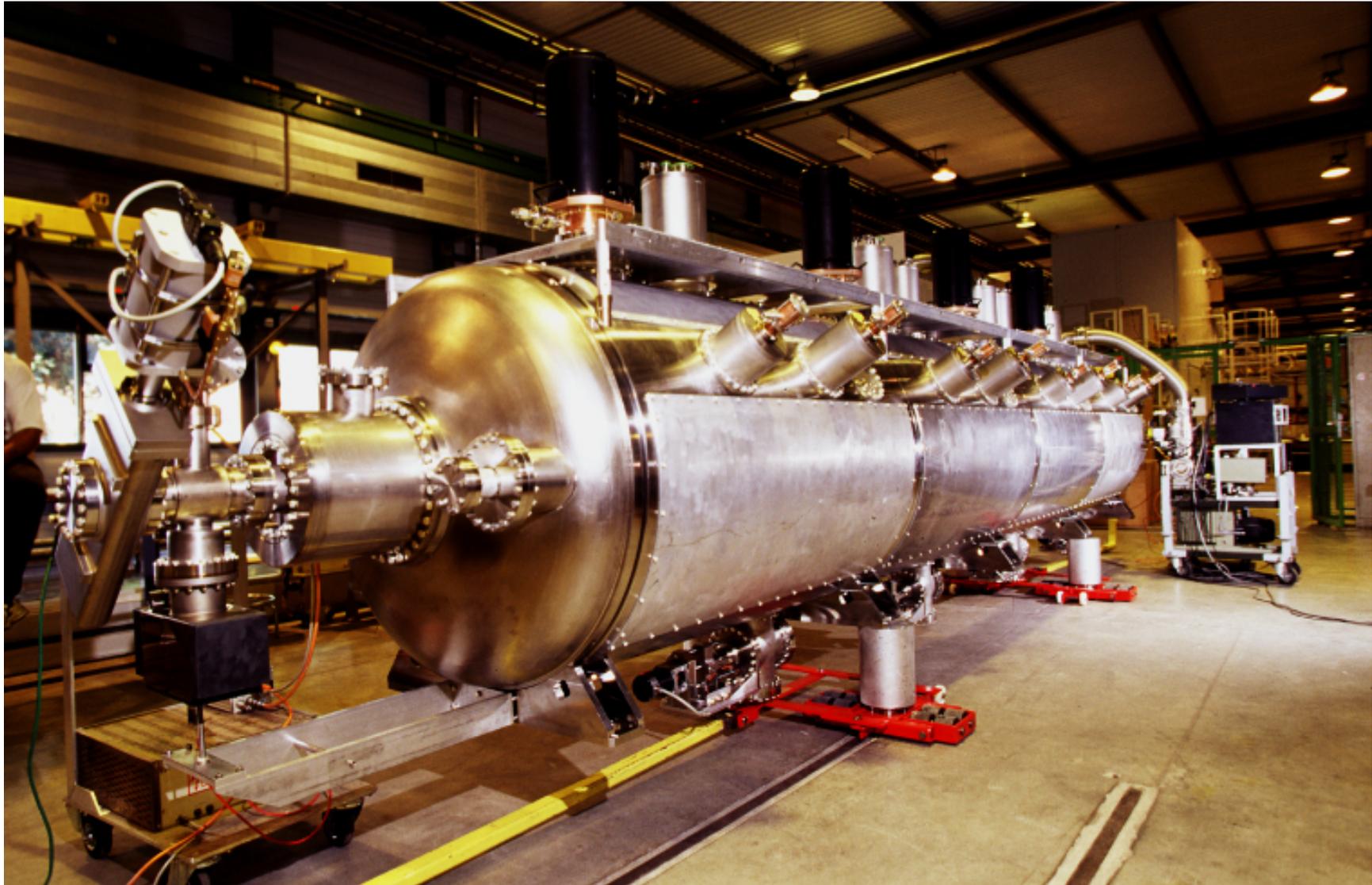
LHC

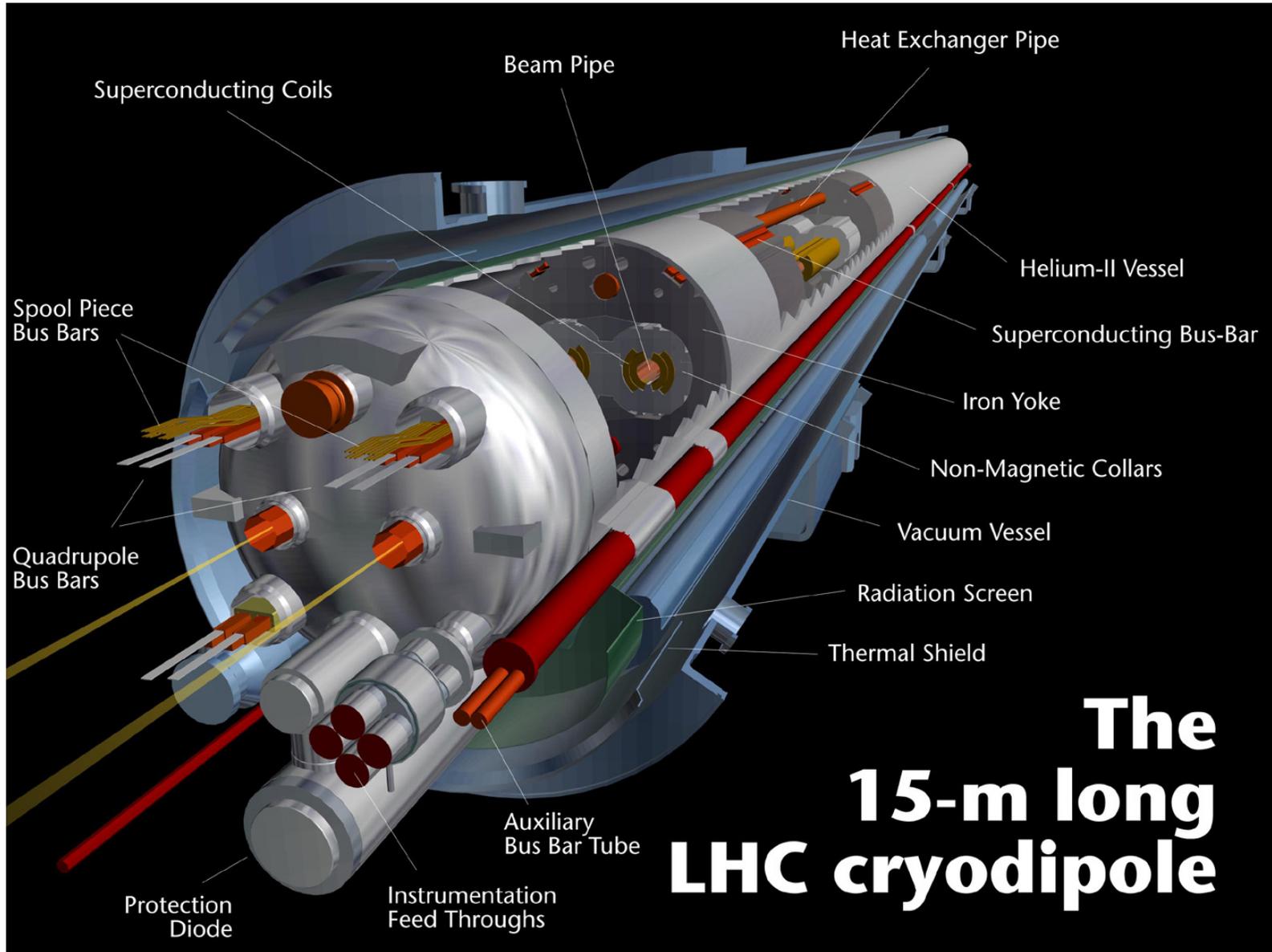
- Röviden

- 27 km kerület, 50 – 175 méter mélyen, 3.8 m átmérőjű alagútban
- Proton (7 TeV) vagy nehézion (2.75 TeV/n) nyalábok
- A nyalábok élettartama 10-20 óra



LHC – rádiófrekvenciás gyorsítás

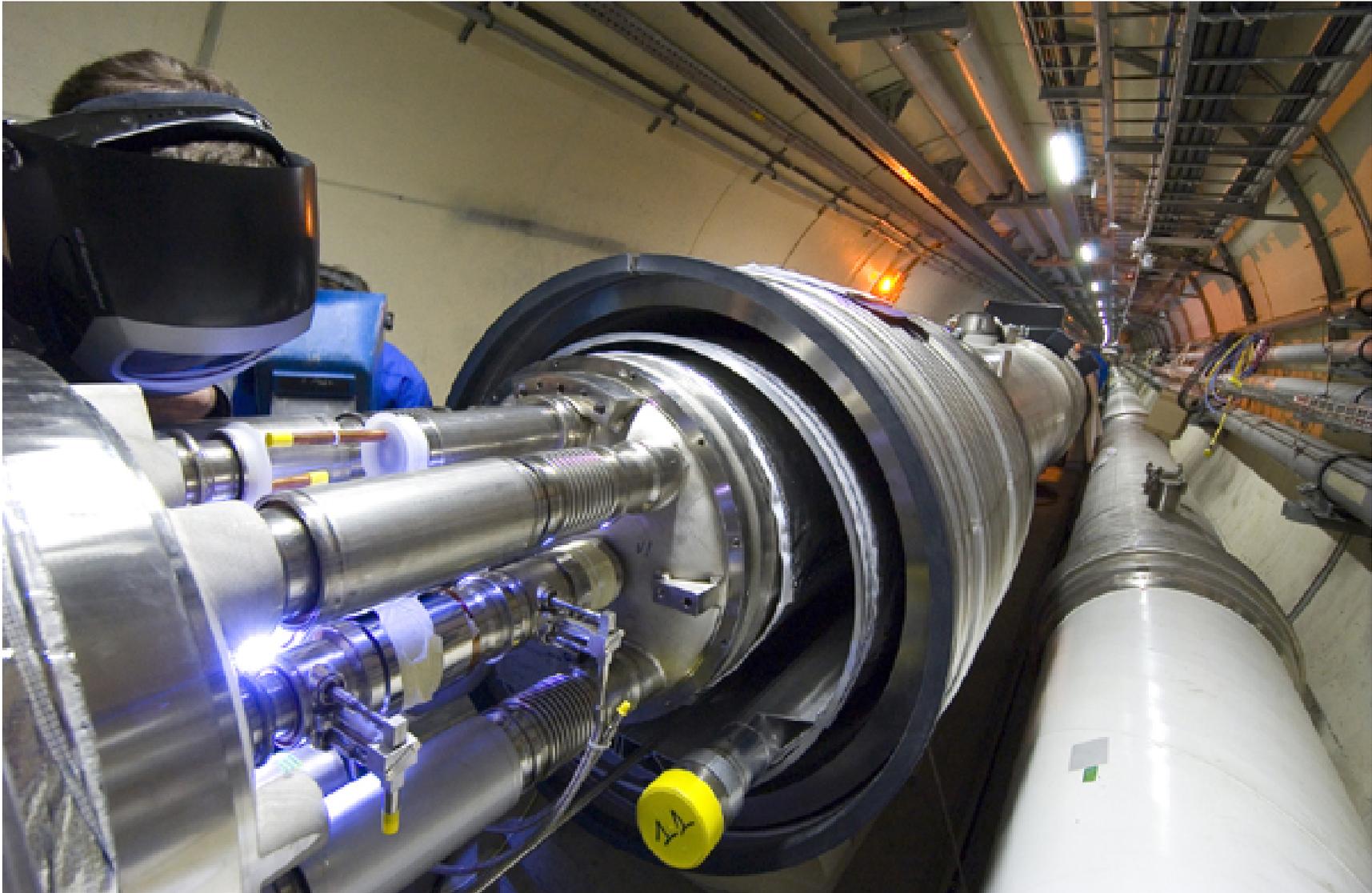




LHC – mágnesek (1)



LHC – mágnesek (2)



LHC – mágnesek (3)

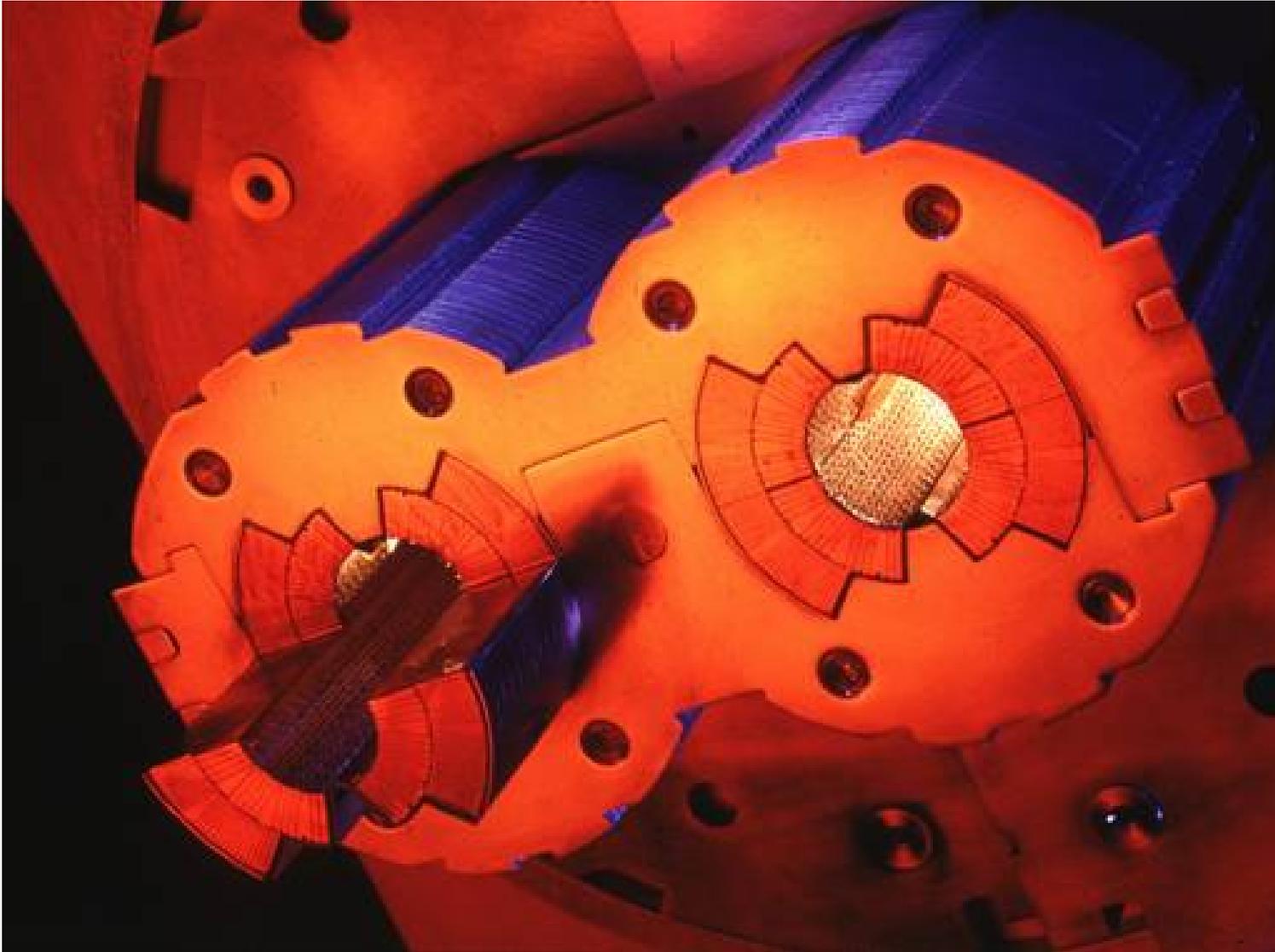
- Dipól mágnesek

- A legnagyobbak
- 8.4 T mágneses tér, 11700 A árammal
- Két nyílás (apertúra) mindkét ellentétes irányba cirkuláló nyaláb számára
- Egy dipól 14.3 m hosszú, 35 tonna, 1.29 GJ energia
- 1232 darab van belőlük, 0.5 MCHF/db
- Nióbium-titán tekercsek
- Körülöttük nem-mágneses ausztenit: jó hőátágulás és mágneses permeabilitás
- Ezek tartják a tekercseket a helyükön, óriási mágneses erők (400 t / 1 m)

- Kvadrupólmágnesek

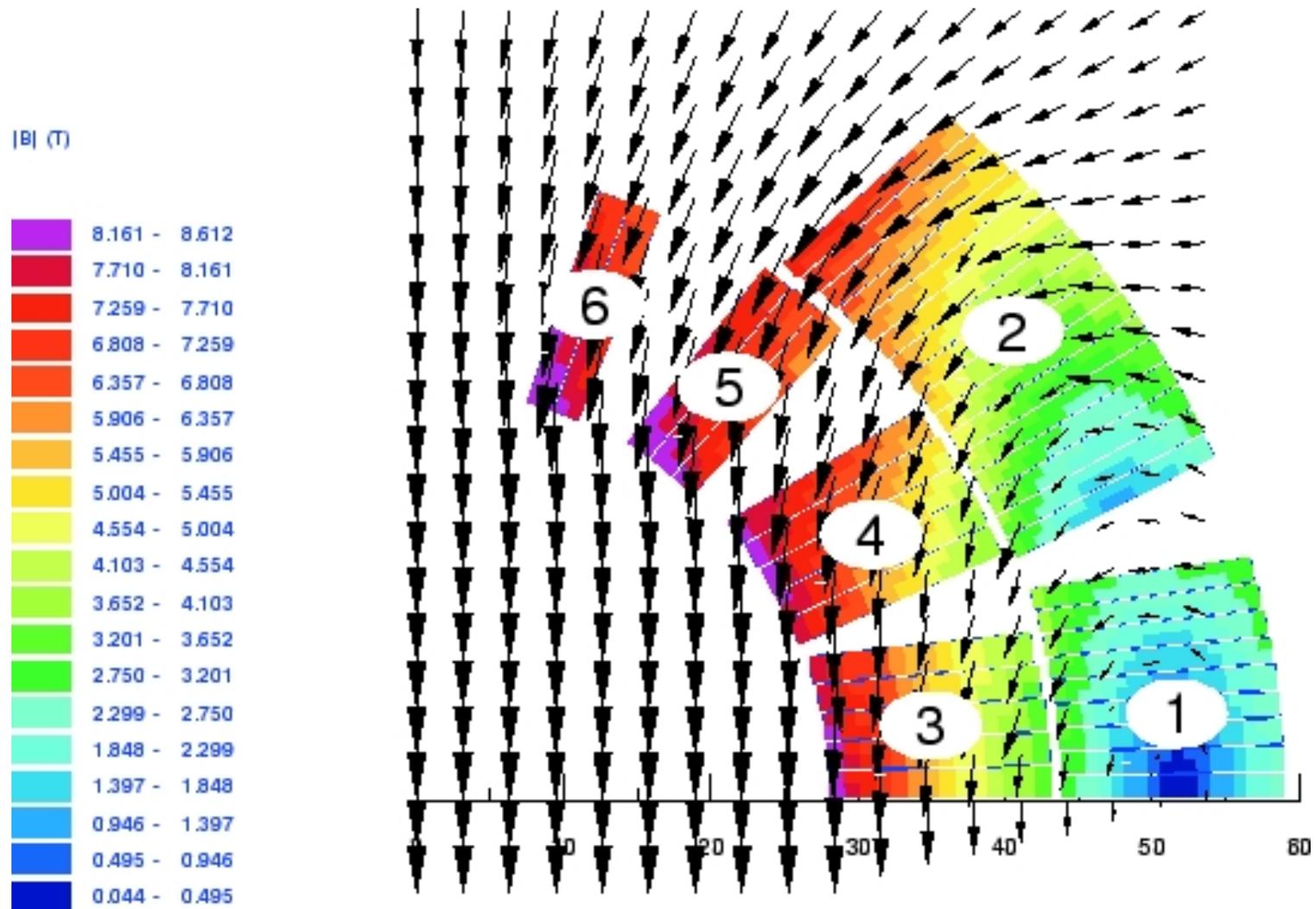
- Fókuszálják és stabilizálják a nyalábot

LHC – mágnesek (4)



Dipól keresztmetszete

LHC – mágnesek (5)

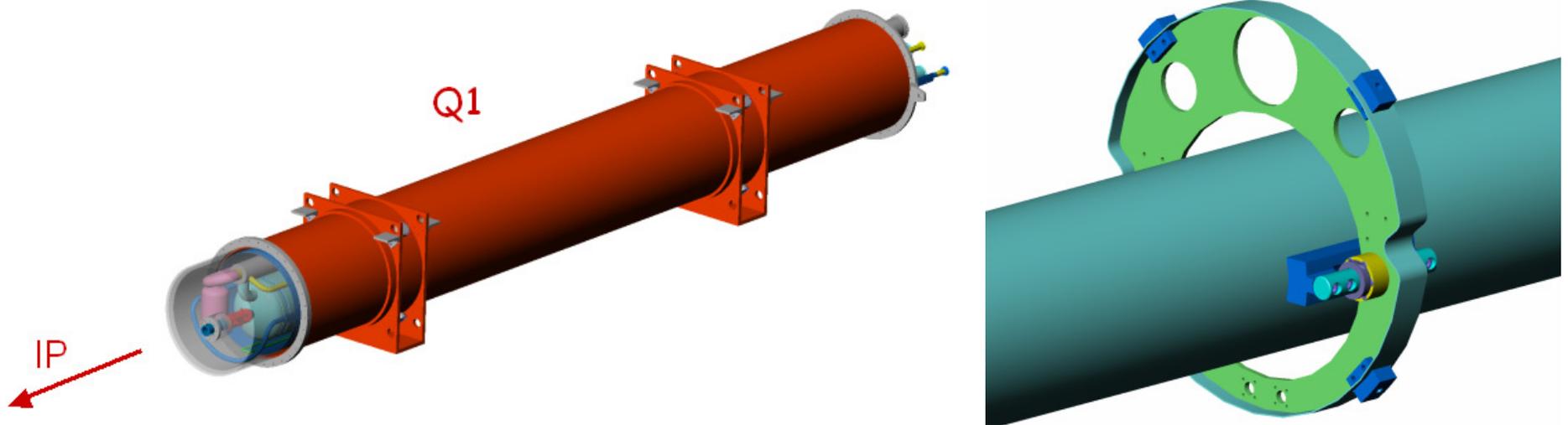


8.4 T mágneses tér

LHC – a baleset (1)

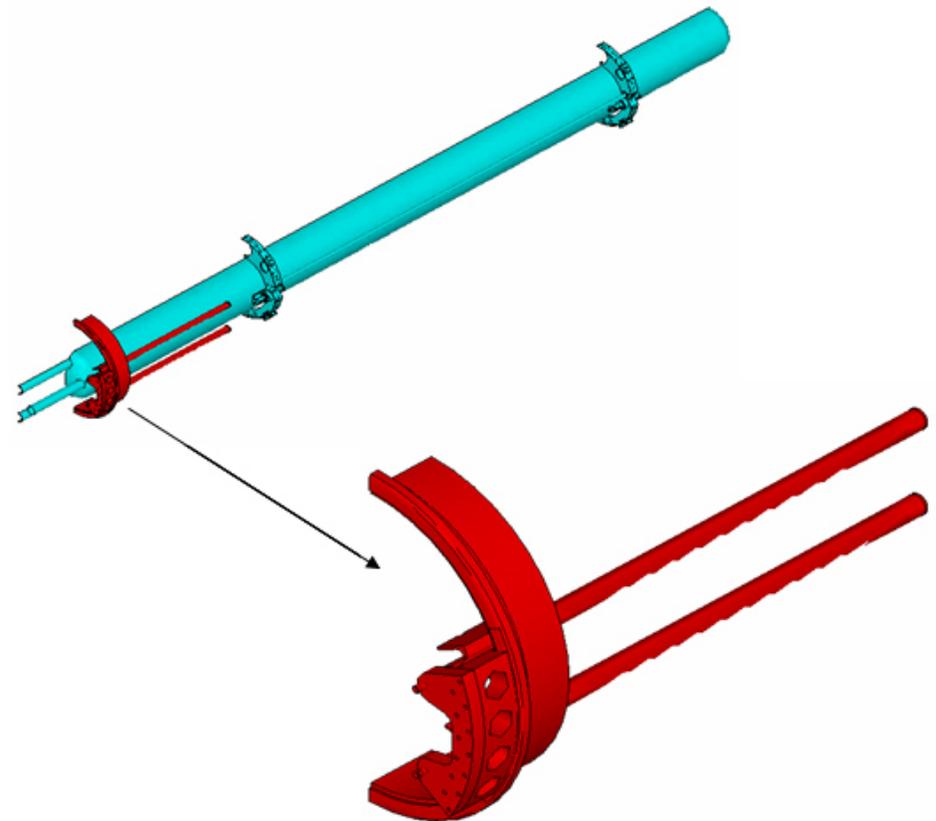
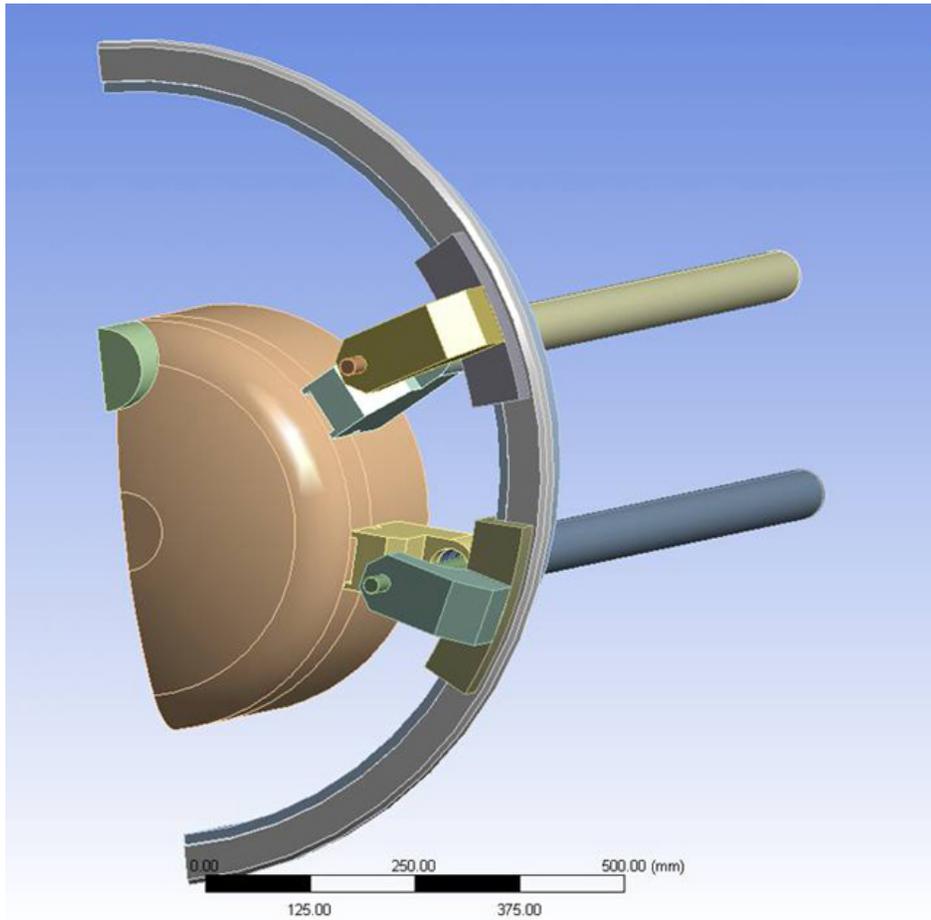
- Mágnesek tesztje

- 2007. március 27, Point 5, a CMS-hez közel
- A Q1 kvadrupól mágnes, legközelebb a kölcsönhatási ponthoz
- Hideg tömeg, hűtőrendszer



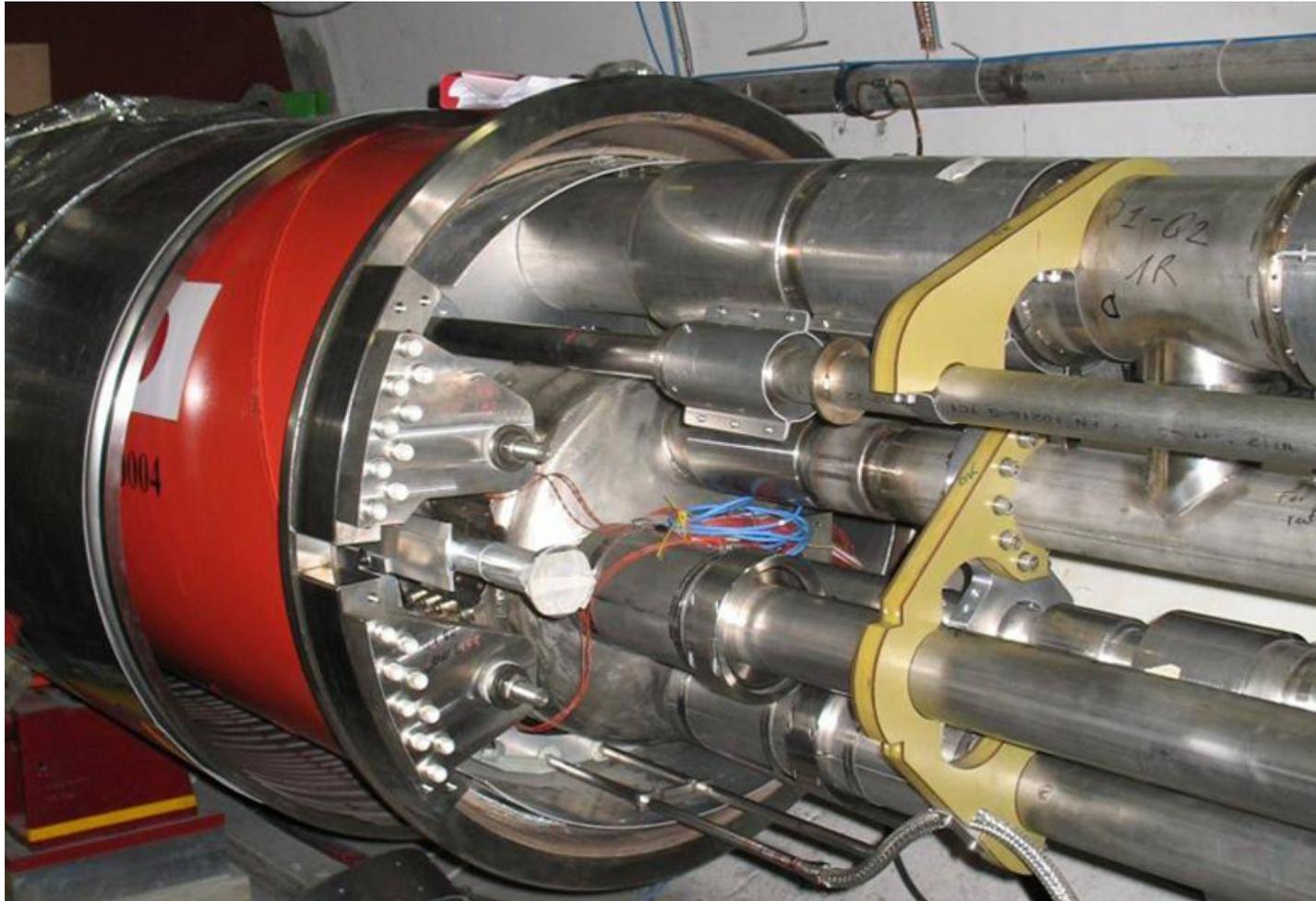
Hosszirányú erők a nyomástereszt során, G-11 támaszték eltört (zöld)
Fermilab – CERN

LHC – a baleset (2)



A struktúra megerősítésére biztosító elemek
a Q1 és Q3 mágnesek között

LHC – a baleset (3)



Négy fűlszerű kapocs tartja a csöveket
A javítás kész: 2007. szeptember 28

LHC – hűtőrendszer és vákuum

- Hűtés

- Szupravezető mágnesek 1.9 K szuperfolyékony héliumban, légköri nyomáson
- Ezeket hűti alacsony nyomású folyékony hélium
- Szuperfolyékony hélium, jó hővezetés, több ezer kW hűtőteljesítmény több mint egy kilométerre, kevesebb mint 0.1 K hőmérsékleteséssel
- 140 kW 4.5 K-en, 27 km hosszan, 31000 tonna anyagot kell hűteni
- Többlépcsős kompresszorok, 40000 szivárgásmentes illesztési pont
- 12 millió liter folyékony nitrogént párologtatnak el a kezdeti lehűtéskor
- Összesen 700000 liter héliumot használnak

- Vákuum

- Ultranagy vákuum 10^{-10} Torr (3 millió molekula / cm^3)
- Tengerszint 760 Torr, 90 km 10^{-3} , 1000 km 10^{-10} , 10000 km 10^{-13}
- Háromféle vákuum, pumpálás
 - * szigetelés a szupravezető mágneseknek: 9000 m^3 , 10^{-6}
 - * szigetelés a hélium elosztó rendszernek: 5000 m^3
 - * nyáláb vákuum: kis térfogat

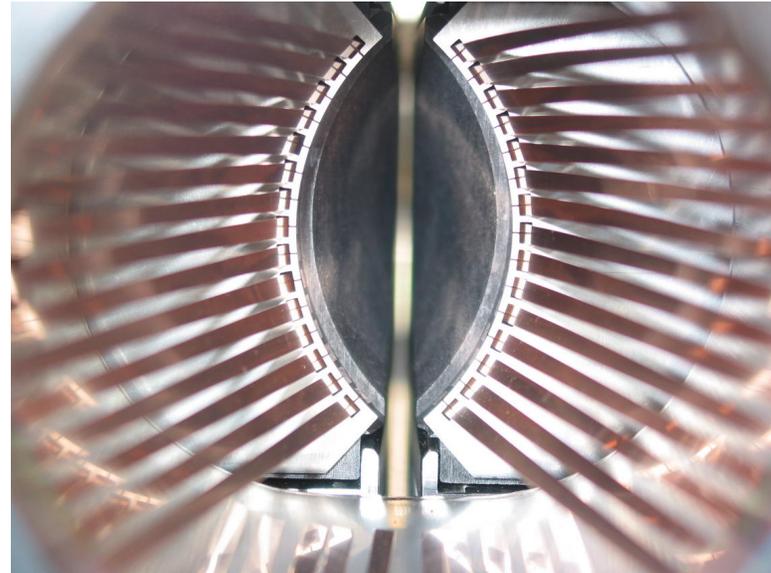
LHC – kollimátorok

- Miért?

- Óriási intenzitás, eddigieknél ezerszer nagyobb oldalirányú energiasűrűség
- A szupravezető mágnes ill. gyorsító alkatrészek veszélyben
- A két nyaláb energiája meg tudna olvasztani 1 tonna rezet

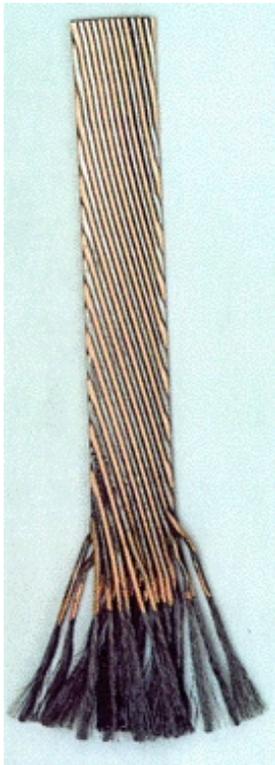
- Kollimálás

- IR3 és IR7 pontokon, mintegy 54 mozgatható kollimátor
- Ezek lesznek a legradioaktívabb területek

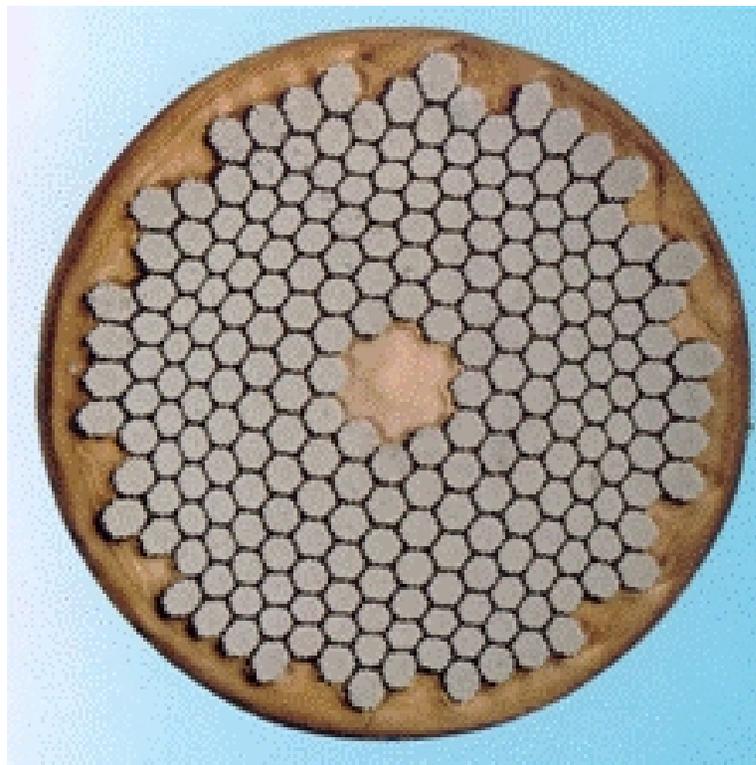


LHC – áramvezetők

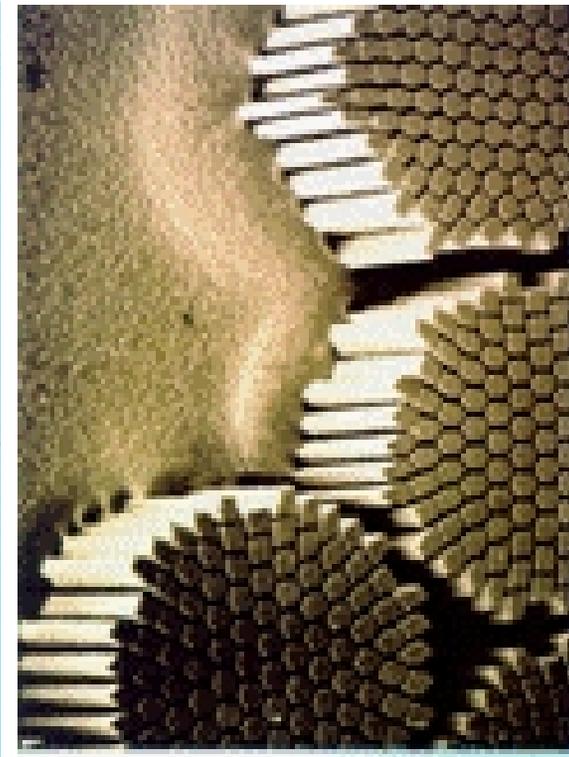
- Hogyan vezessük az áramot a mágnesekbe?
 - 3 millió A a hideg szupravezető mágnesekbe szobahőmérsékletű kábelekből
 - 3250 áramvezető, köztük 1030 tartalmaz nagy hőmérsékletű szupravezetőt
 - 1 kábel = 36 szál, 1 szál = 6300 fonál



Kábelek

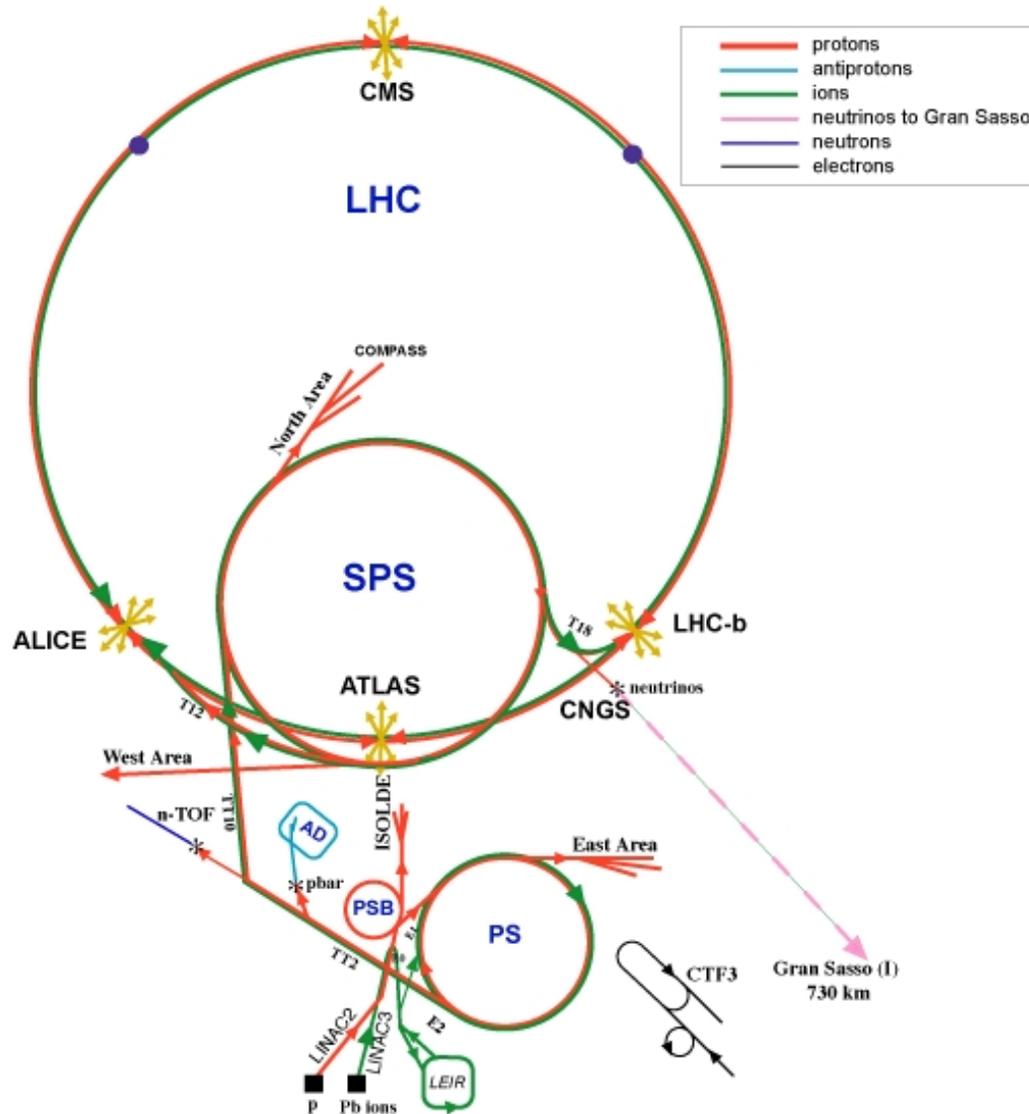


Szálak



Fonalak

LHC – előgyorsítók



Linac2 → PS Booster → Proton Synchrotron → Super Proton Synchrotron → LHC

LHC – nyaláb

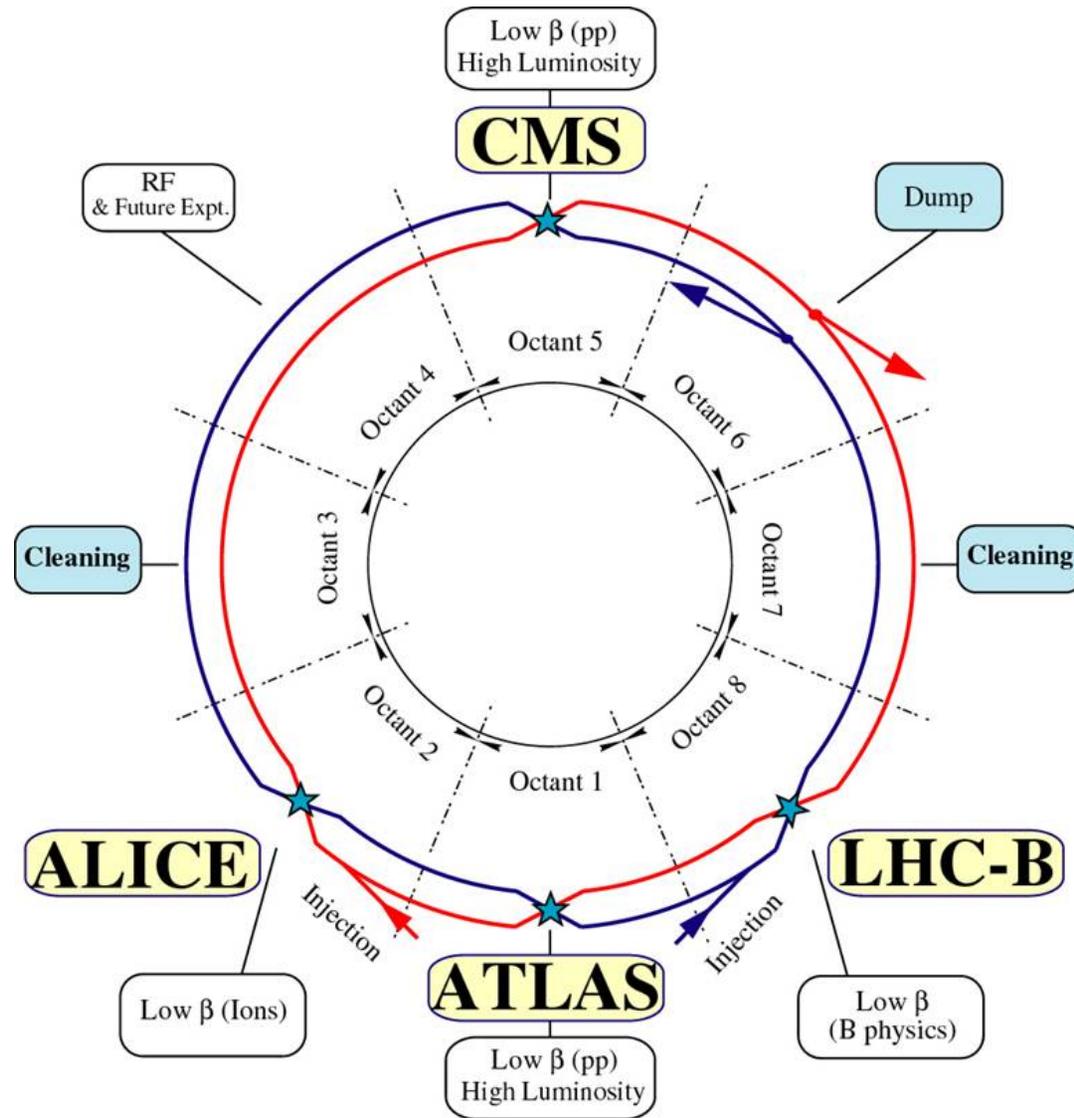
- Protonok

- Hidrogén a palackból
- Elektron leszakítása → proton
- Linac2 50 MeV-re gyorsítja a protonokat
- PS Booster (PSB) 1.4 GeV
- Proton Synchrotron (PS) 25 GeV
- Super Proton Synchrotron (SPS) 450 GeV
- LHC mindkét irányban, 4 perc 20 másodperc töltési idő
- 20 perces gyorsítás 7 TeV-re
- Több órás élettartam
- Proton csomagok

- Nehézionok

- Hasonló, de több lépés

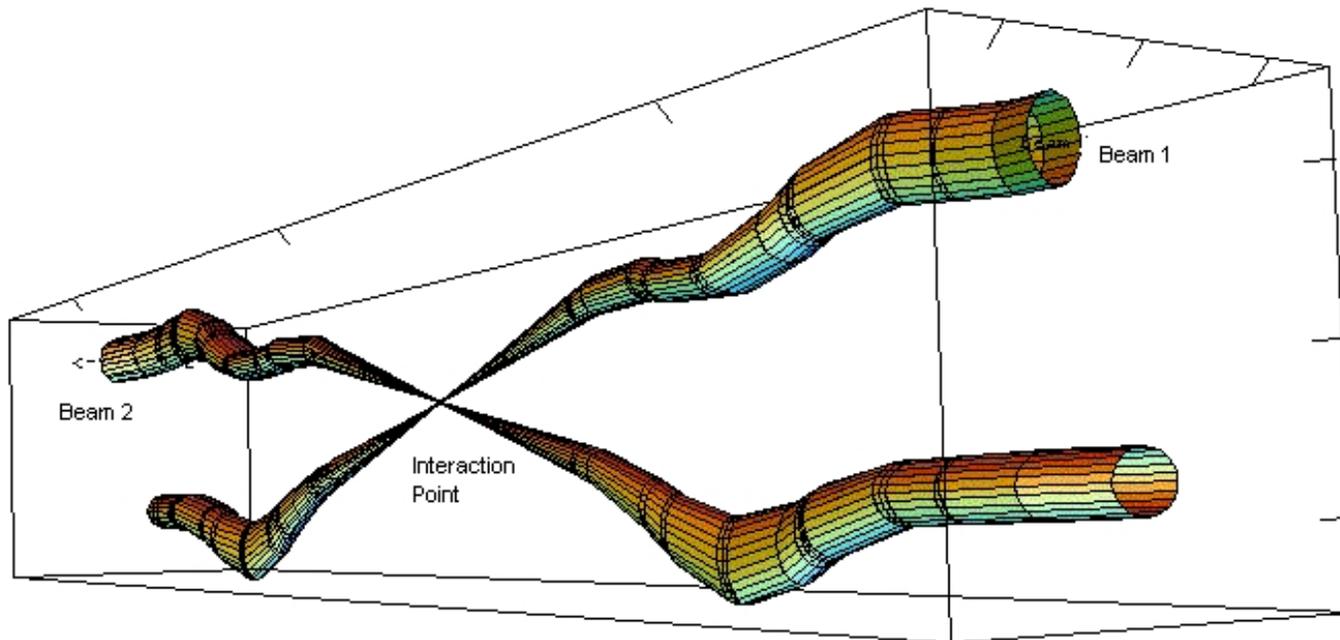
LHC – a gyorsító



LHC – ütközések (1)

- Cél

- Vékony nyaláb
- Csomagok: 100000 millió proton, 16 mikron átmérő, néhány cm hosszú
- Csomagok találkozásakor átlagban 20 ütközés, 25 ns-onként, 40 MHz
- 600 millió ütközés másodpercenként, 2808 csomag nyalábonként

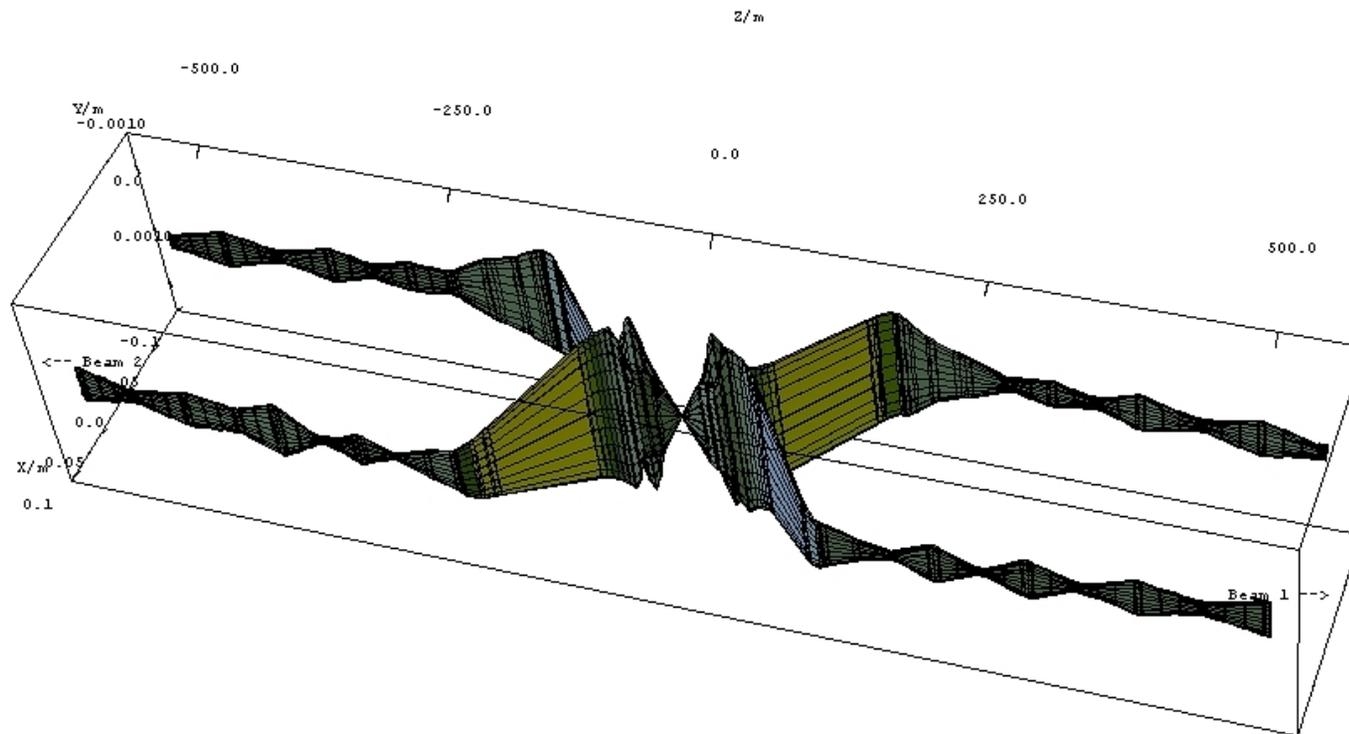


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

LHC – ütközések (2)

- Hatáskeresztmetszet

- Esemény ráta = luminozitás * hatáskeresztmetszet
- Elasztikus: $\sigma_{EL} \approx 40 \text{ mb}$
- Inelasztikus: $\sigma_{ND} \approx 55 \text{ mb}$, $\sigma_{DD} \approx 10 \text{ mb}$, $\sigma_{SD} \approx 7+7 \text{ mb}$



LHC – menetrend 2008

- Hardver

- A gyűrű lehűtése
- Áram
- Kész: április

- Nyaláb

- A gyűrűk teljes lezárása
- Minden mágnes maximális energián
- Minden eszköz egyszerre működik: mágnesek, rádiófrekvencia, nyelők, stb
- Első nyaláb: május vége
- Első egy kört megtevő nyaláb hamarosan
- Első körbefutó nyaláb 2 vagy 3 napon belül
- Első ütközések 450 GeV-en
- Első ütközések 7 TeV-en, 2 hónappal az első nyaláb után

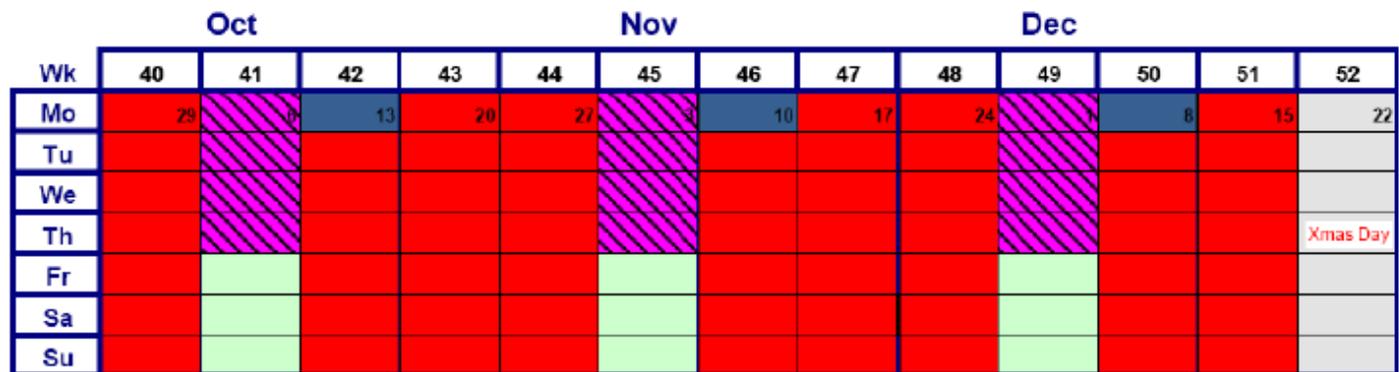
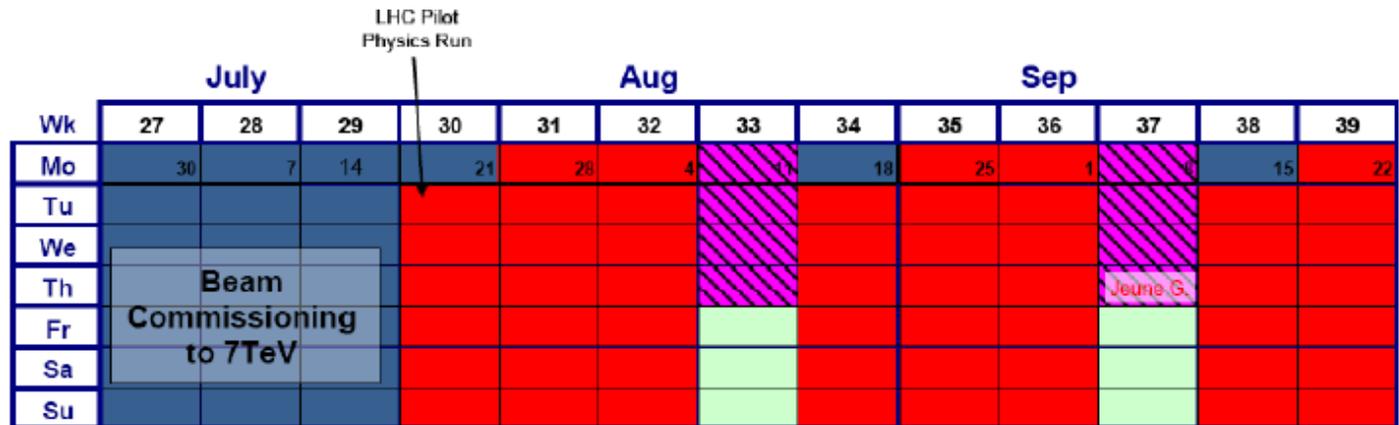
LHC – menetrend 2008

	Jan				Feb				Mar				
Wk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Mo		7	14	21	28	4	11	18	25	3	10	17	Easter 24
Tu	1												
We				Injector Complex shutdown									
Th													
Fr													
Sa									Operation Testing of Available Sectors				
Su													

	Apr				May					June			
Wk	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Mo	31	7	14	21	28	5	Whit. 12	TI 19	26	2	9	16	23
Tu	Linac2 HW Tests		PSB Machine Checkout		SPS Machine Checkout			Setup with Beam					
We													
Th			PS Machine Checkout		1 May/AS								
Fr													
Sa	Operations Testing of Available Sectors			LHC Machine Checkout					Beam Commissioning to 7TeV				
Su													

CPS Closure Linac2 Start with Beam SPS Closure PSB Start with Beam LHC Closure PS Start with Beam SPS Start with Beam LHC Startup with Beam

LHC – menetrend 2008



LHC – paraméterek

Staged commissioning of high luminosity operation of LHC at points 1 and 5

$$L = \frac{N^2 k_b f \gamma}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F$$

$$Eventrate / Cross = \frac{L \sigma_{TOT}}{k_b f}$$

"Thus, to achieve high luminosity, **all one has to do** is make high population bunches of low emittance to collide at high frequency at locations where the beam optics provides as low values of the amplitude functions as possible."
PDG 2006, chapter 25

Machine parameters		450GeV Target	Stage A		Stage B		Stage C		Stage D	
			Target	Limit	Target	Limit	Target	Limit	Target	Limit
spacing	ns	2021	2021	566	75	75	25	25	25	25
bunch length	m	0.1124	0.0755	0.0755	0.0755	0.0755	0.0755	0.0755	0.0755	0.0755
crossing angle	urad	0	0	0	250	250	285	285	285	285
bunch intensity		4.00E+10	4.00E+10	9.00E+10	4.00E+10	9.00E+10	5.00E+10	5.00E+10	9.00E+10	1.15E+11
bunches		43	43	156	936	936	2808	2808	2808	2808
energy	eV	4.50E+11	7.00E+12							
F		1.00	1.00	1.00	0.96	0.92	0.90	0.84	0.90	0.84
normalised emittance	cm	3.75E-04	3.75E-04	3.75E-04	3.75E-04	3.75E-04	3.75E-04	3.75E-04	3.75E-04	3.75E-04
beta*	cm	1100	200	200	200	100	100	55	100	55
luminosity	/cm2s	7.16E+28	6.12E+30	1.12E+32	1.28E+32	1.24E+33	1.13E+33	1.91E+33	3.65E+33	1.01E+34
total inel cross section	cm2	6.00E-26	6.00E-26	6.00E-26	6.00E-26	6.00E-26	6.00E-26	6.00E-26	6.00E-26	6.00E-26
event rate per cross		0.01	0.76	3.85	0.73	7.09	2.14	3.63	6.94	19.18
protons per beam		1.72E+12	1.72E+12	1.40E+13	3.74E+13	8.42E+13	1.40E+14	1.40E+14	2.53E+14	3.23E+14
current per beam	mA	3.09E+00	3.09E+00	2.53E+01	6.74E+01	1.52E+02	2.53E+02	2.53E+02	4.55E+02	5.81E+02
energy per beam	Joules	1.24E+05	1.93E+06	1.57E+07	4.19E+07	9.43E+07	1.57E+08	1.57E+08	2.83E+08	3.62E+08
beam size	um	293.3	31.7	31.7	31.7	22.4	22.4	16.6	22.4	16.6

Commissioning hardware for high energy operation

Installation of phase II collimators and full beam dump diluters

Detektorok működése

Drift cső (DT)

- Röviden

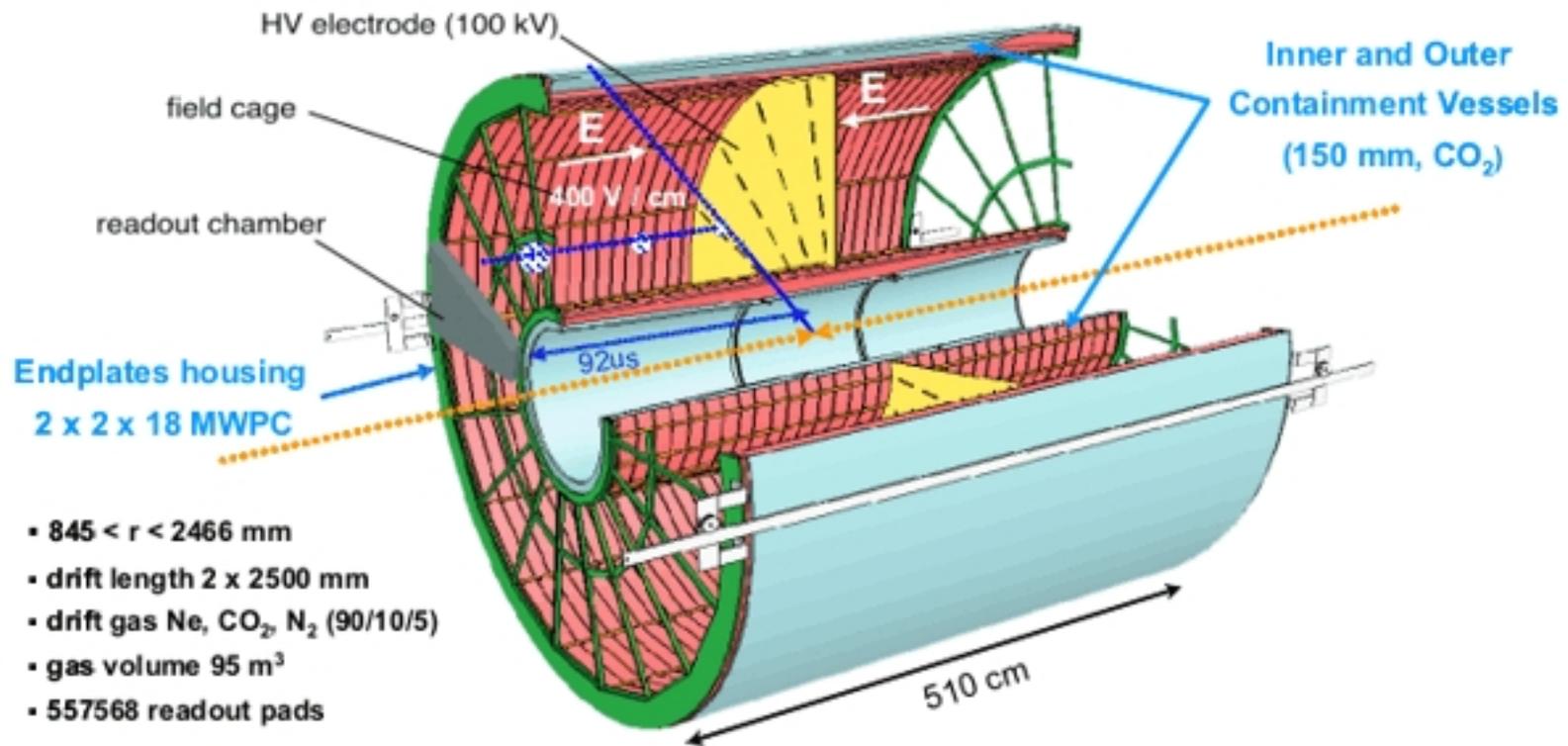
- Cső, közepében egy vékony szál (20-100 μm)
- Az átmenő töltött részecske 100 elektront kell cm-enként
- A szál felé driftelnek, másodlagos ionizálás, lavinák
- Akár 10^5 erősítés, a kezdeti ionizációval arányos
- Túl nagy feszültség: szikra; Geiger-Müller kisülés; lokalizált streamer kisülés
- Drift cső = proporcionális cső + időmérés



Time-projection chamber (TPC)

- Röviden

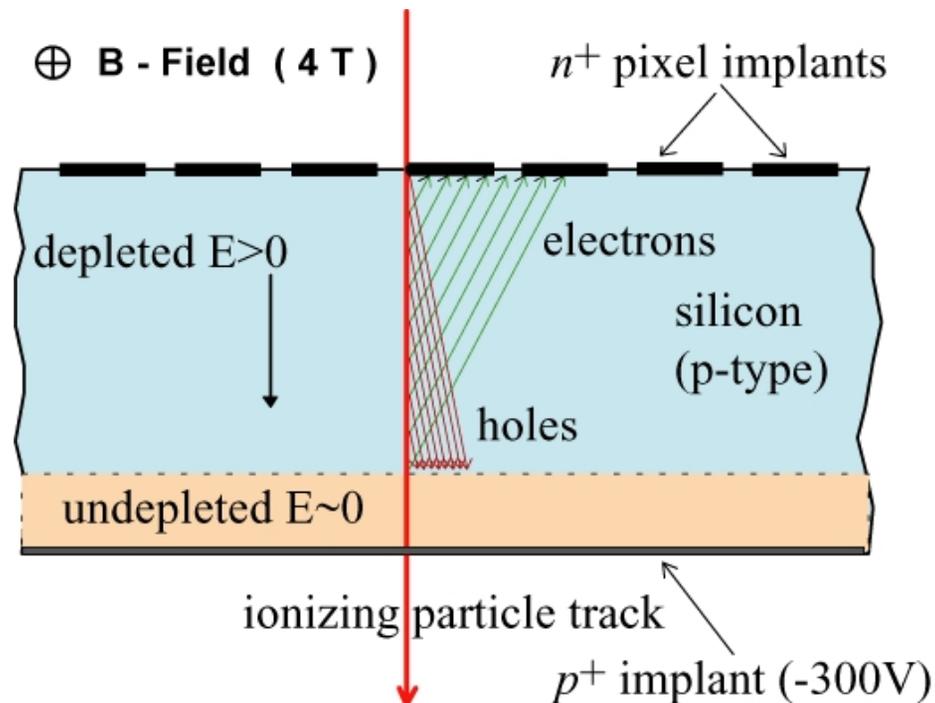
- Gáz + sokszálas proporcionális kamra
- Elektronok driftelnek az elektromos térrel
- Sok mérési pont, jó helyfelbontás, energiaveszteség mérése (dE/dx)



Szilícium alapú félvezető detektor

- Röviden

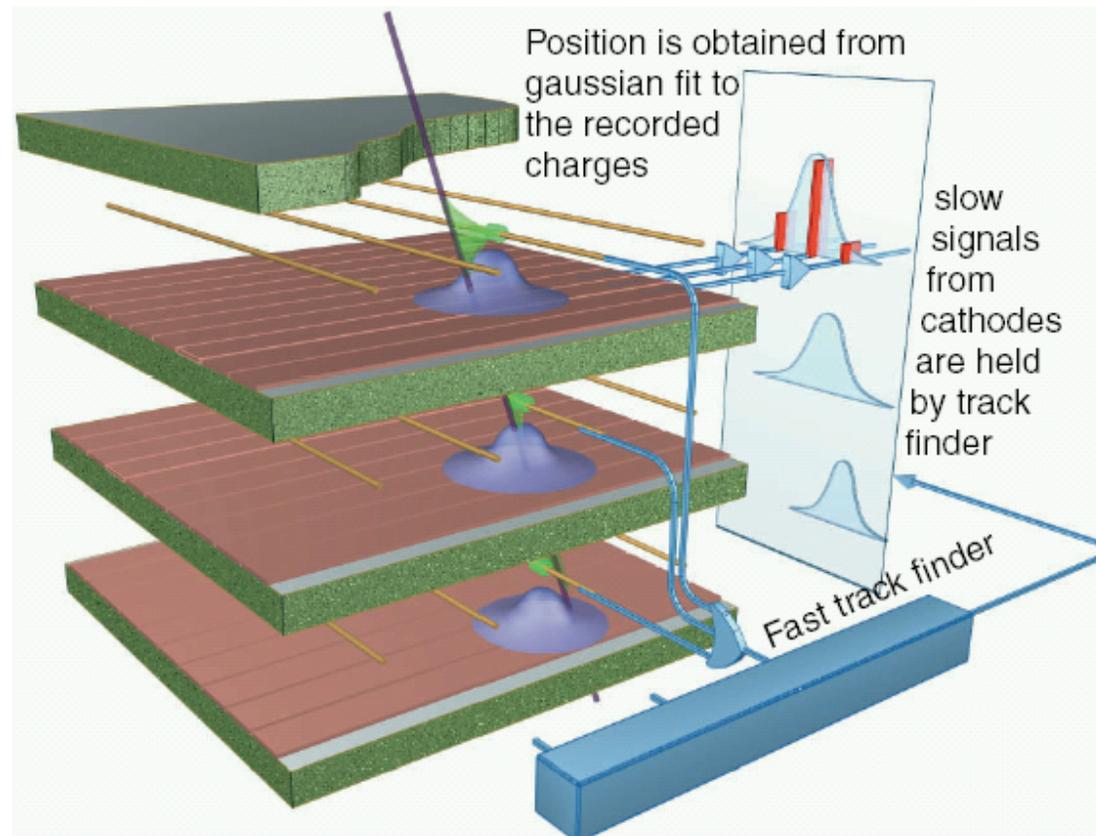
- Nagyfelbontású vertex és nyomkövető detektorokhoz
- Anyagok: szilícium, germánium, gallium-arzenid, gyémánt
- Kis sűrűsége és kis ionizálása miatt megfelelő nagyságú jelek 100-300 μm vastagsággal elérhetők, gyors jelek $\mathcal{O}(10 \text{ ns})$
- Dióda $p - n$ átmenettel, inverz kapcsolásban



Katód-csík kamra (CSC)

- Röviden

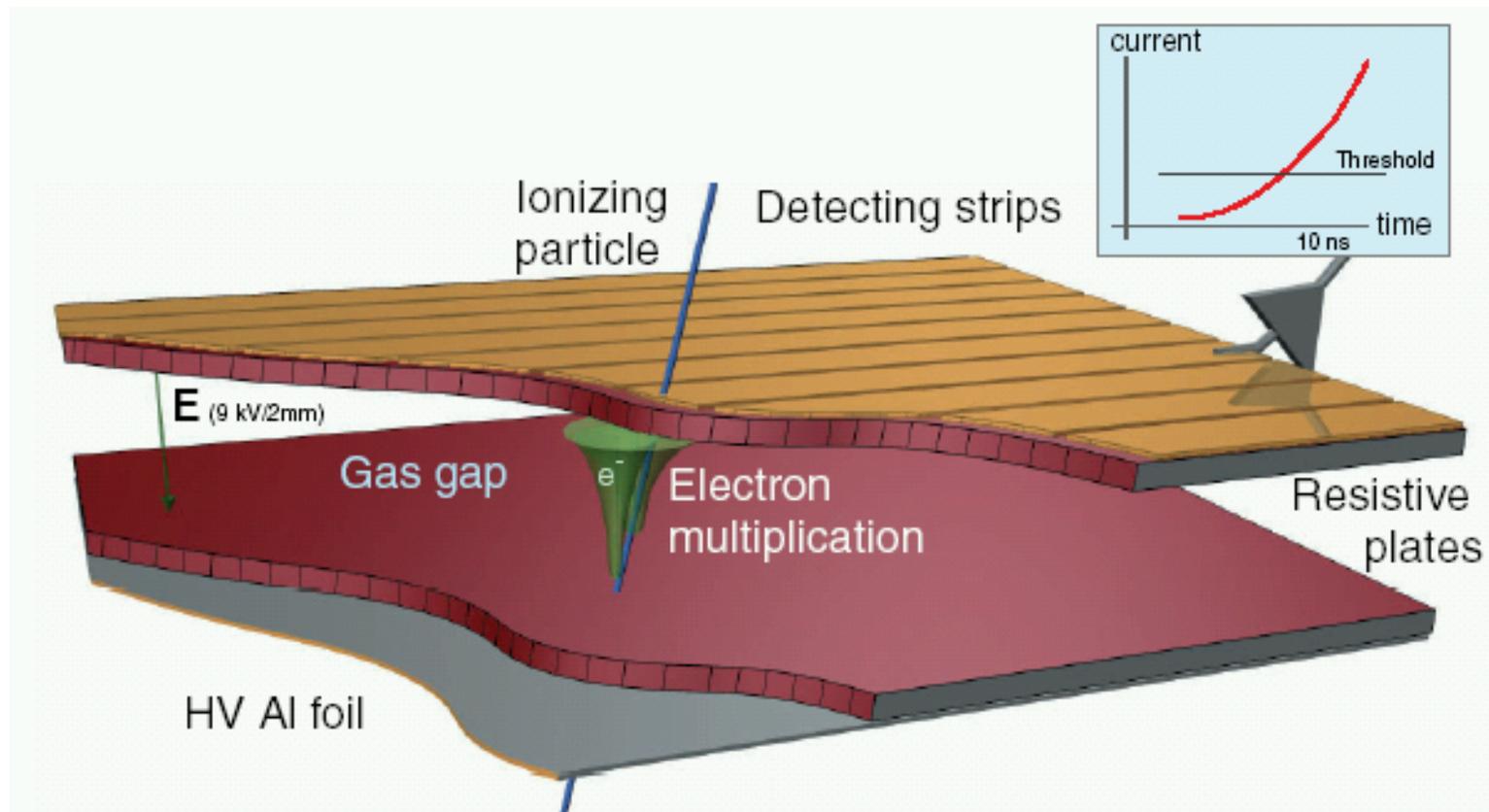
- Töltött részecske ionizál
- Lavina az anódszálak körül
- Indukált töltések a katódon



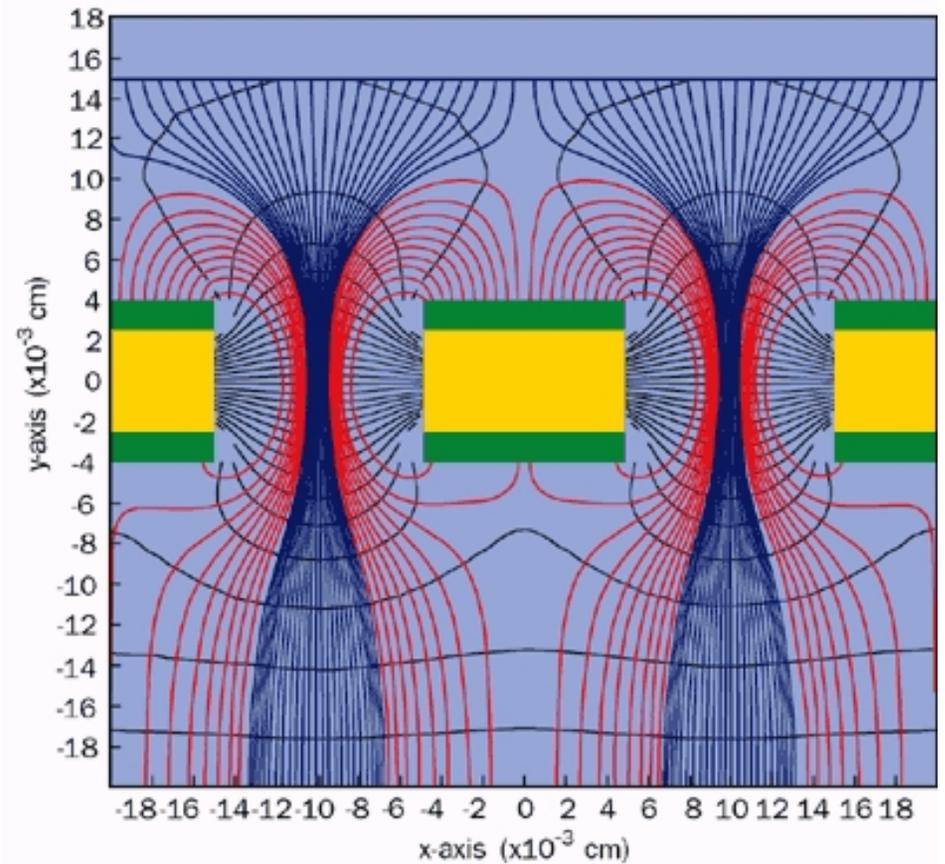
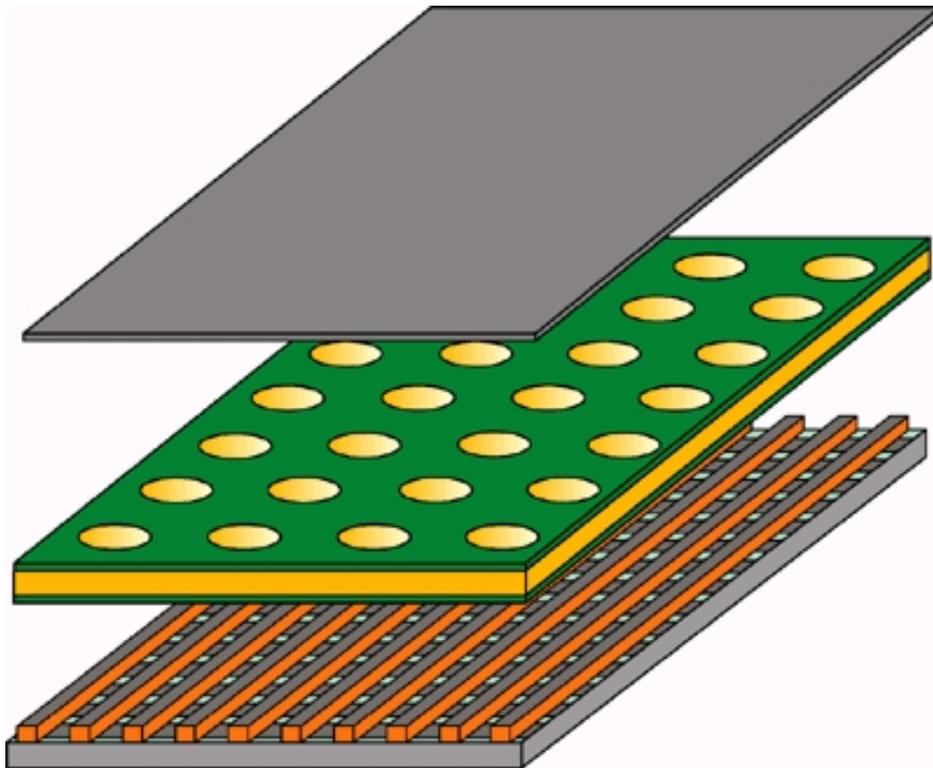
Resistive Plate Chamber (RPC)

- Röviden

- Jó helyfelbontás (\sim MWPC) és jó időfelbontás (\sim szcintillátor)
- Hely és idő együttes mérése, tracking, pl müonok
- Nincsenek benne drótok, egyszerű megépíteni



Gáz elektron sokszorozó (GEM)

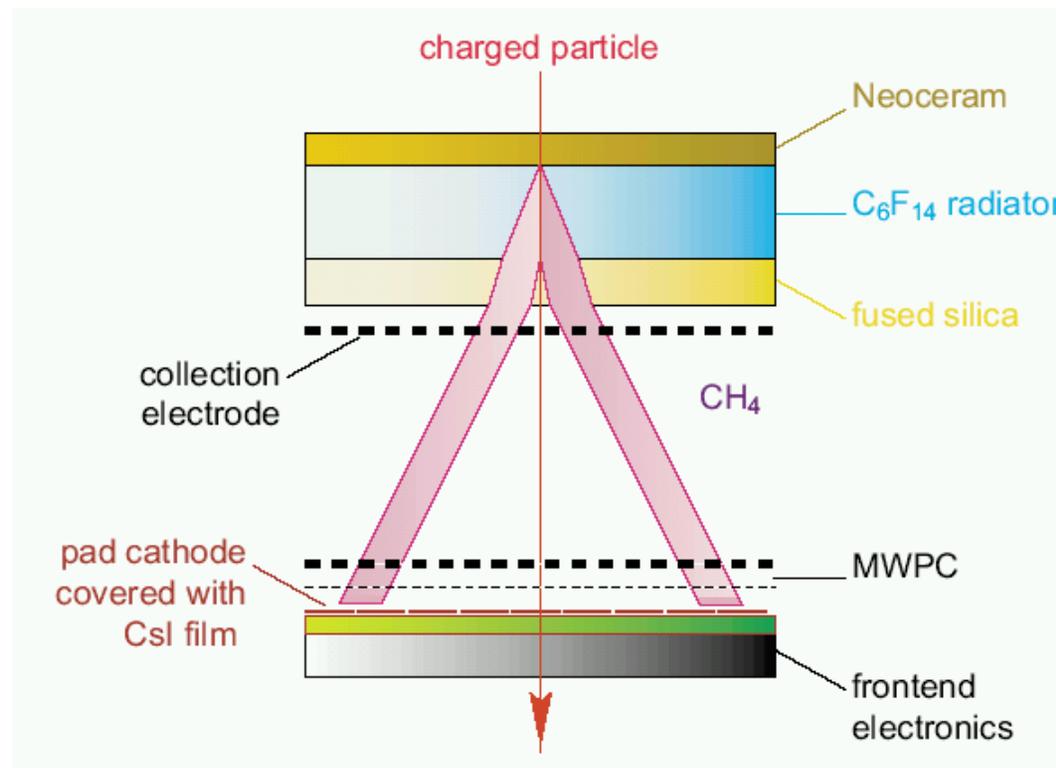


Vékony polimer lap (50-70 μm), mindkét oldalán réz bevonattal
Nagy elektromos tér a lyukakban (30-50 μm), lavina
100-1000-szeres erősítés, az elektronokat kilövi

Cserenkov detektor

- Röviden

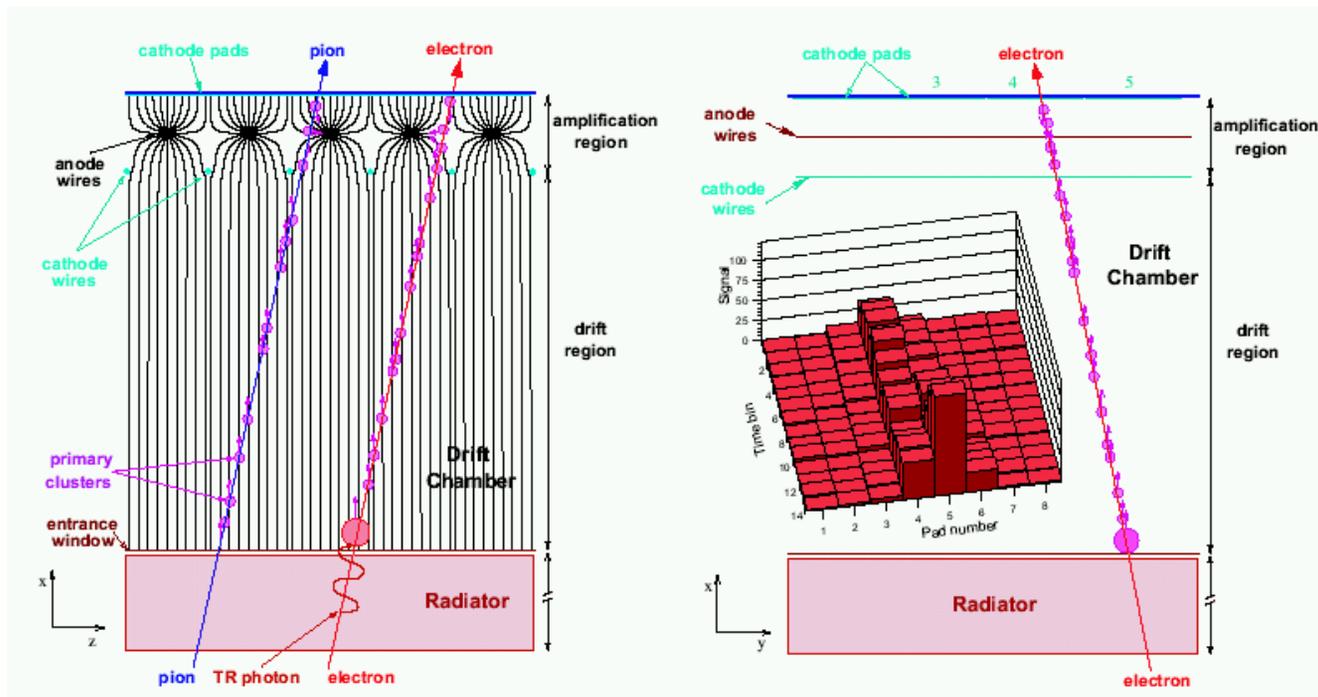
- Szög $\theta_c = \arccos(1/n\beta)$, küszöbsebesség $\beta_t = 1/n$, $\gamma_t = 1/\sqrt{1 - \beta_t^2}$
- Elemek: a sugárzó, melyen a töltött részecske áthalad, valamint a fotodetektor
- Küszöbdetektorok: igen/nem válasz, a részecske a $\beta_t = 1/n$ küszöb felett?
- Képképző detektorok: pl Ring-Imaging Cherenkov (RICH)



Átmeneti sugárzás detektor (TRD)

- Röviden

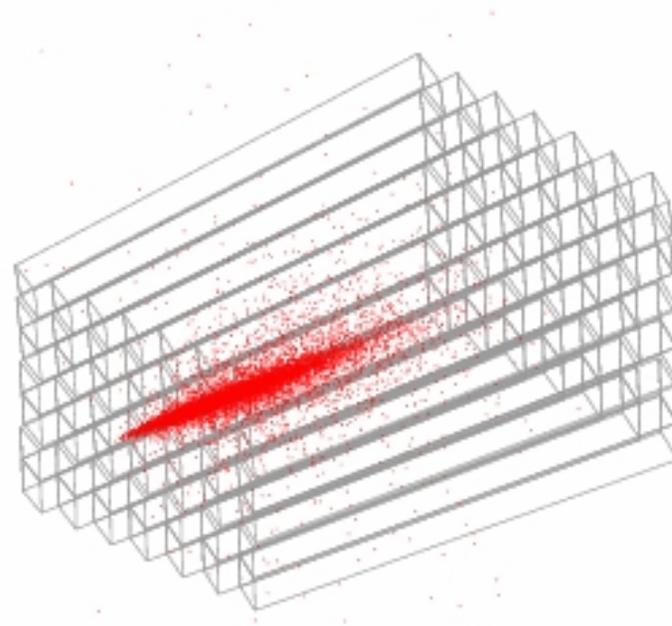
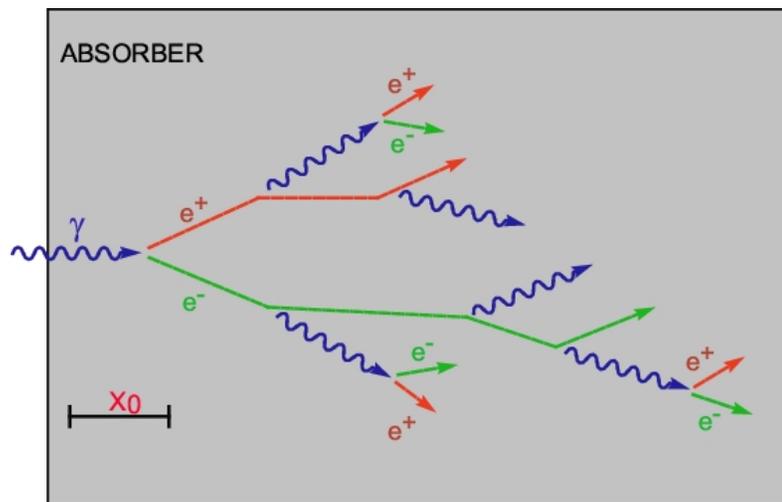
- A részecske két különböző anyag (vákuum és anyag) közti határon halad át
- A kisugárzott energia $I \propto z^2 \gamma \omega_p$
- Röntgensugár (2-20 keV) a részecske haladási irányában
- A sugárzás esélye 1% átmenetenként, több száz határfelület alkalmazása
- Fóliák, szálak, alacsony Z-jű anyagok (polipropilén, lítium) gázban



Elektromágneses kaloriméter (ECAL)

- Röviden

- Elektromágneses záporok: párkeltés és fékezési sugárzás
- Hosszanti kiterjedés: sugárzási hossz, X_0 , $t = x/X_0$
- Transzverz kiterjedés: Molière sugár, $R_M = X_0 E_s/E_c$
- Homogén: az egész térfogat érzékeny (pl BGO, CsI, NaI, ólomüveg)
- Mintavevő: aktív anyag (szcintillátor, "nemes" folyadék) és passzív elnyelő (ólom, vas, réz, urán) síkok egymás után



Hadron kaloriméter (HCAL)

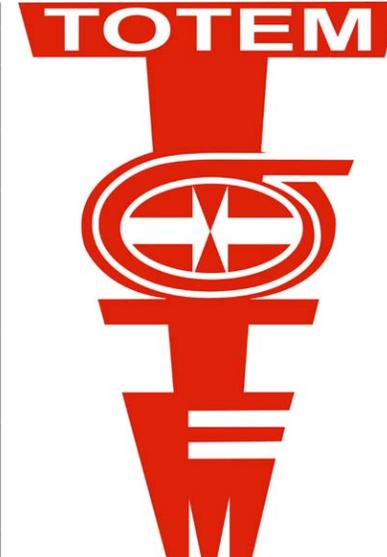
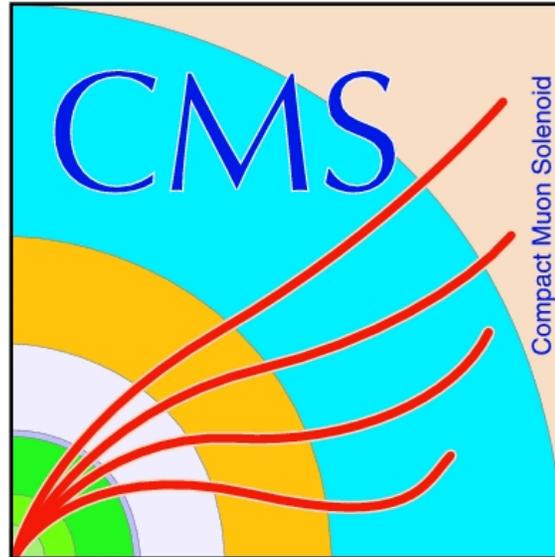
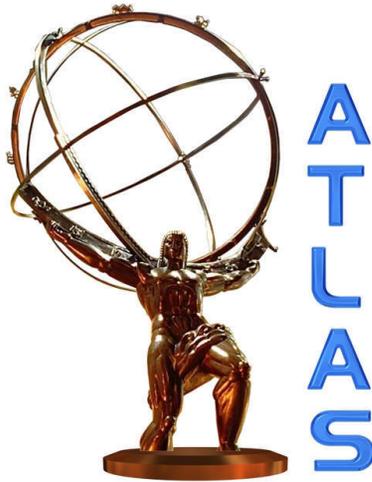
- Röviden

- Többféle lehetőség (ólom lapok + szcintillátor, vas + kvarc szálak)
- Hosszanti energialeadás eloszlása: két komponens
- Éles csúcs az első kölcsönhatás pontja körül (az ott keltett π^0 k miatt)
- Lassabb az alacsony energiás hadronikus összetevő

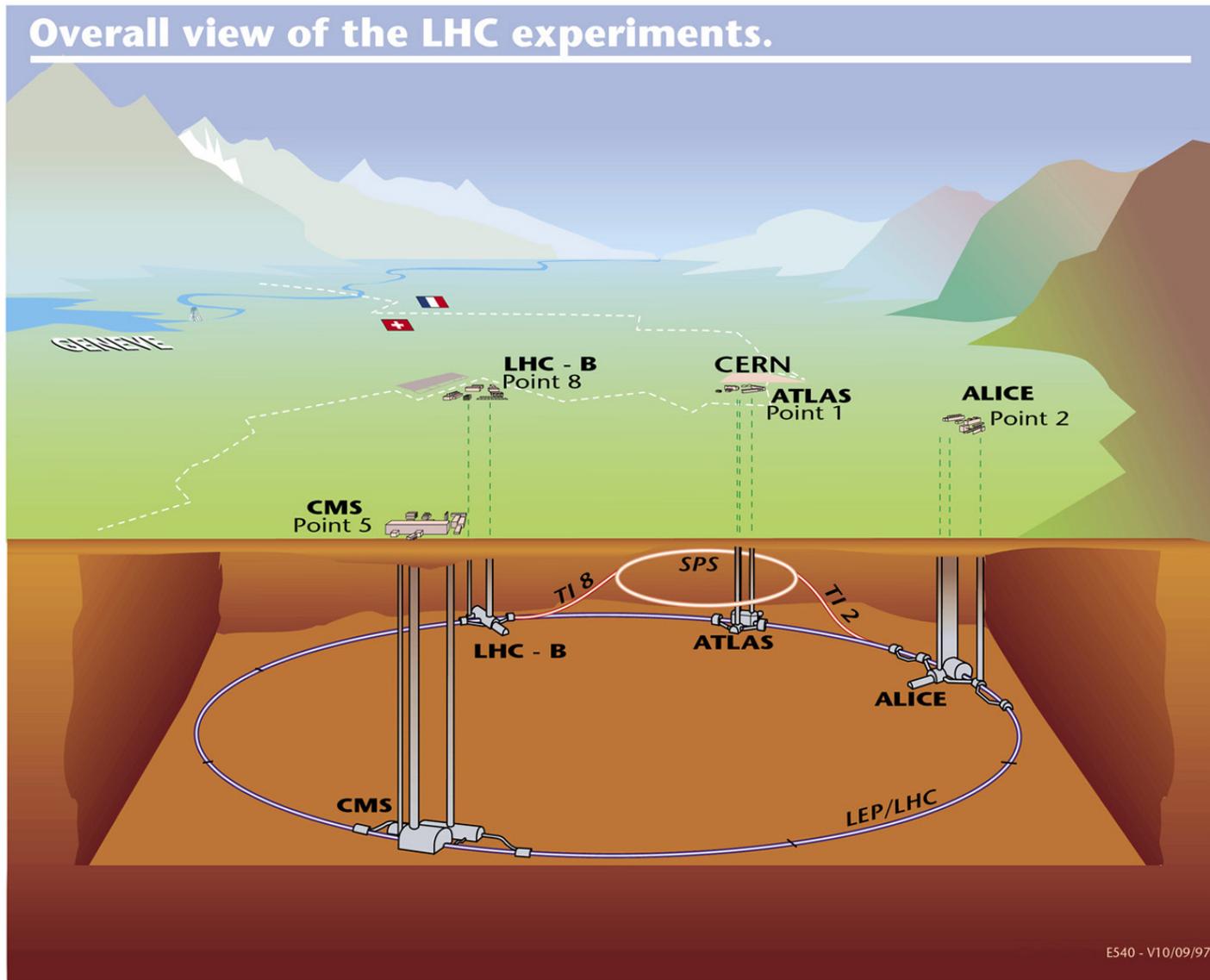


A kísérletek

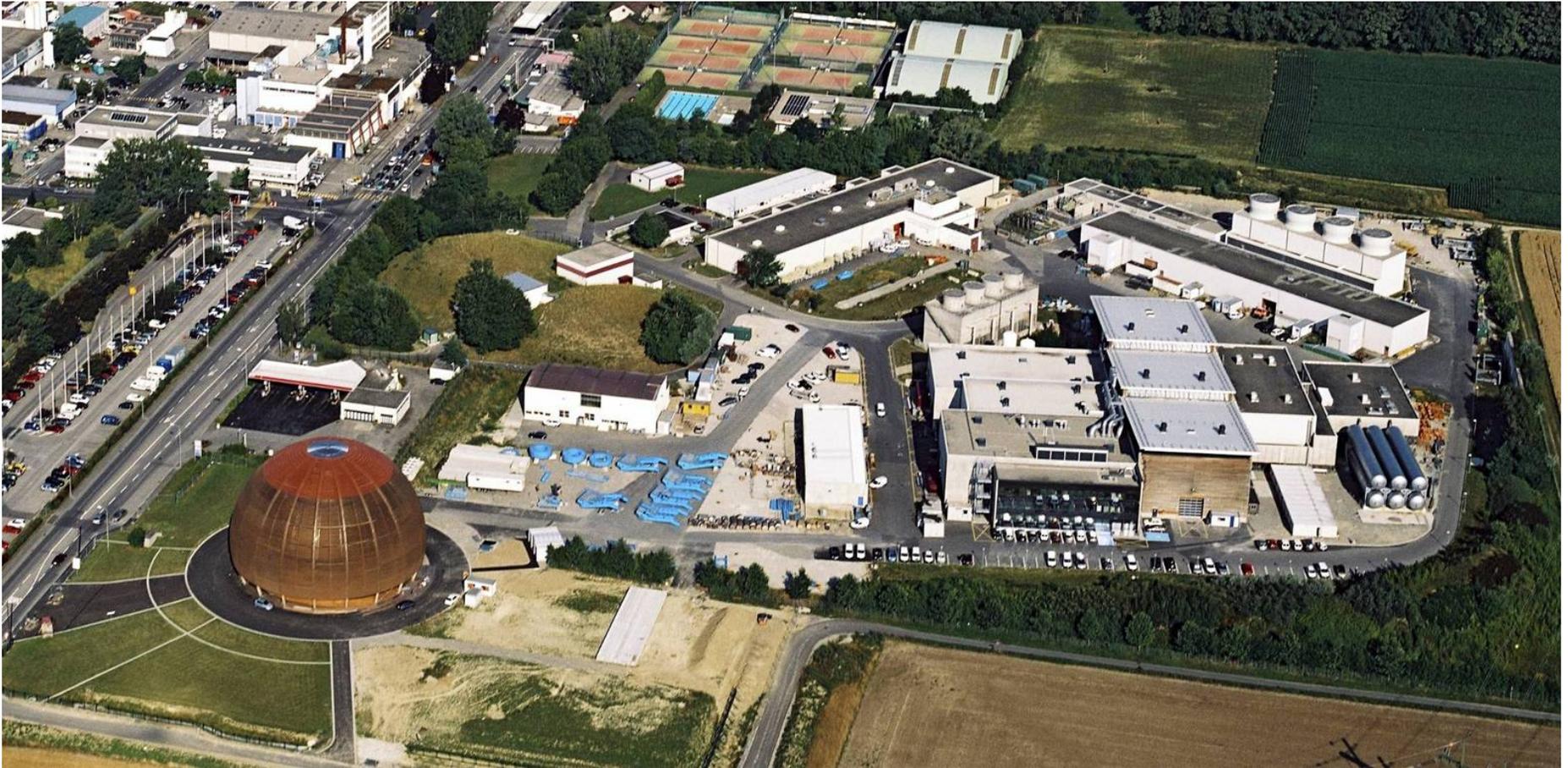
LHC



LHC

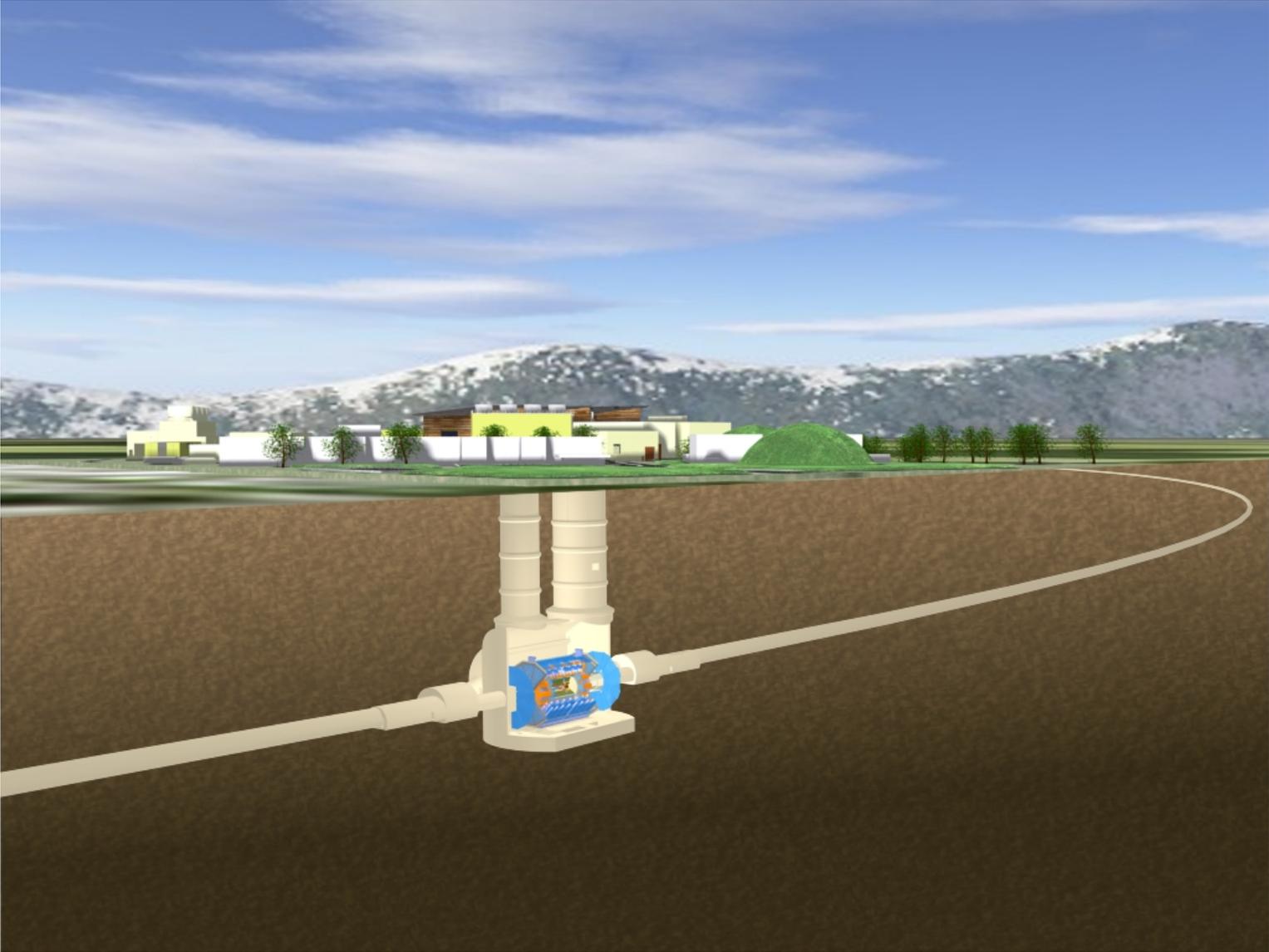


ATLAS

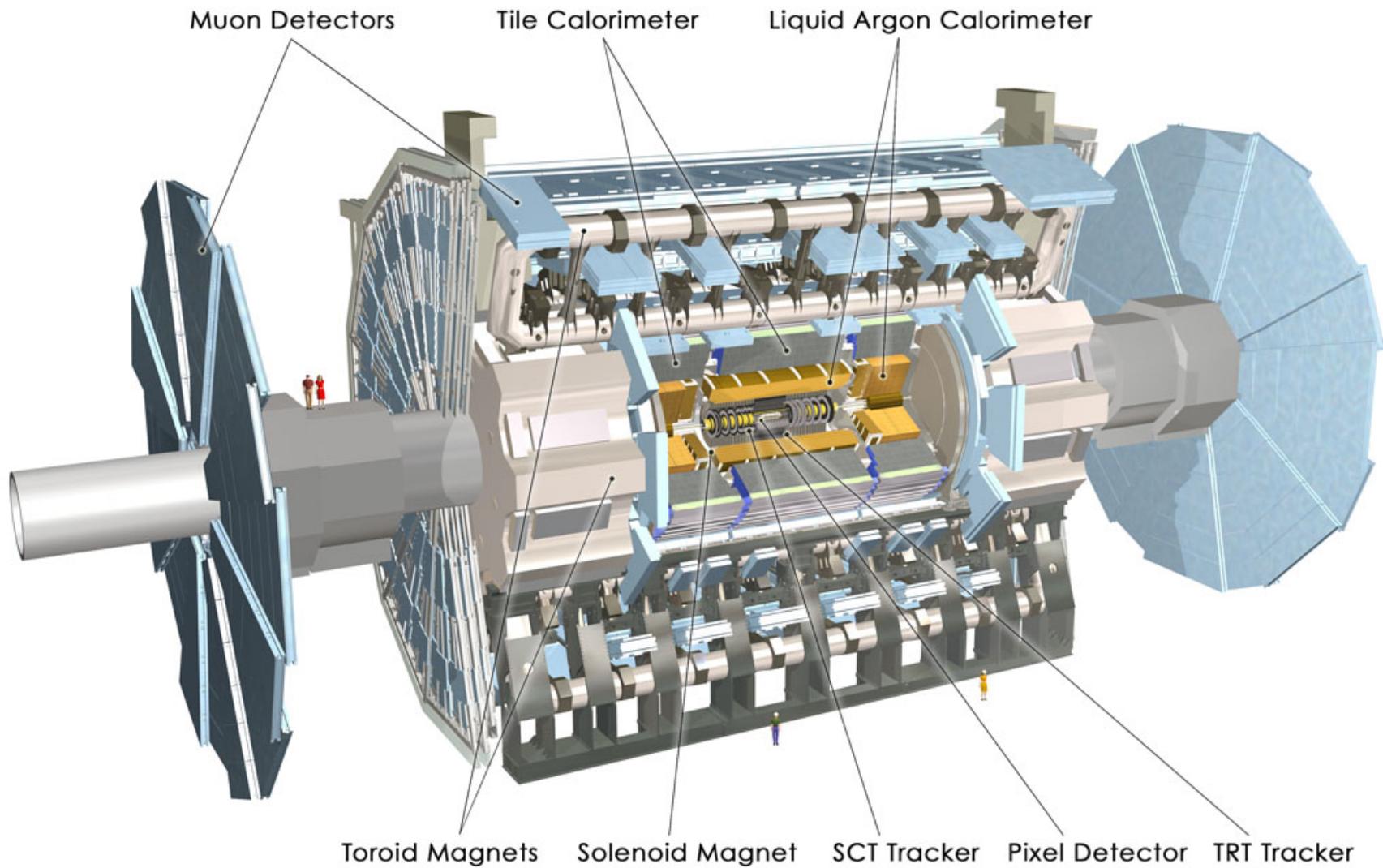


Spokesperson: Peter JENNI, Technical coordinator: Marzio NESSI

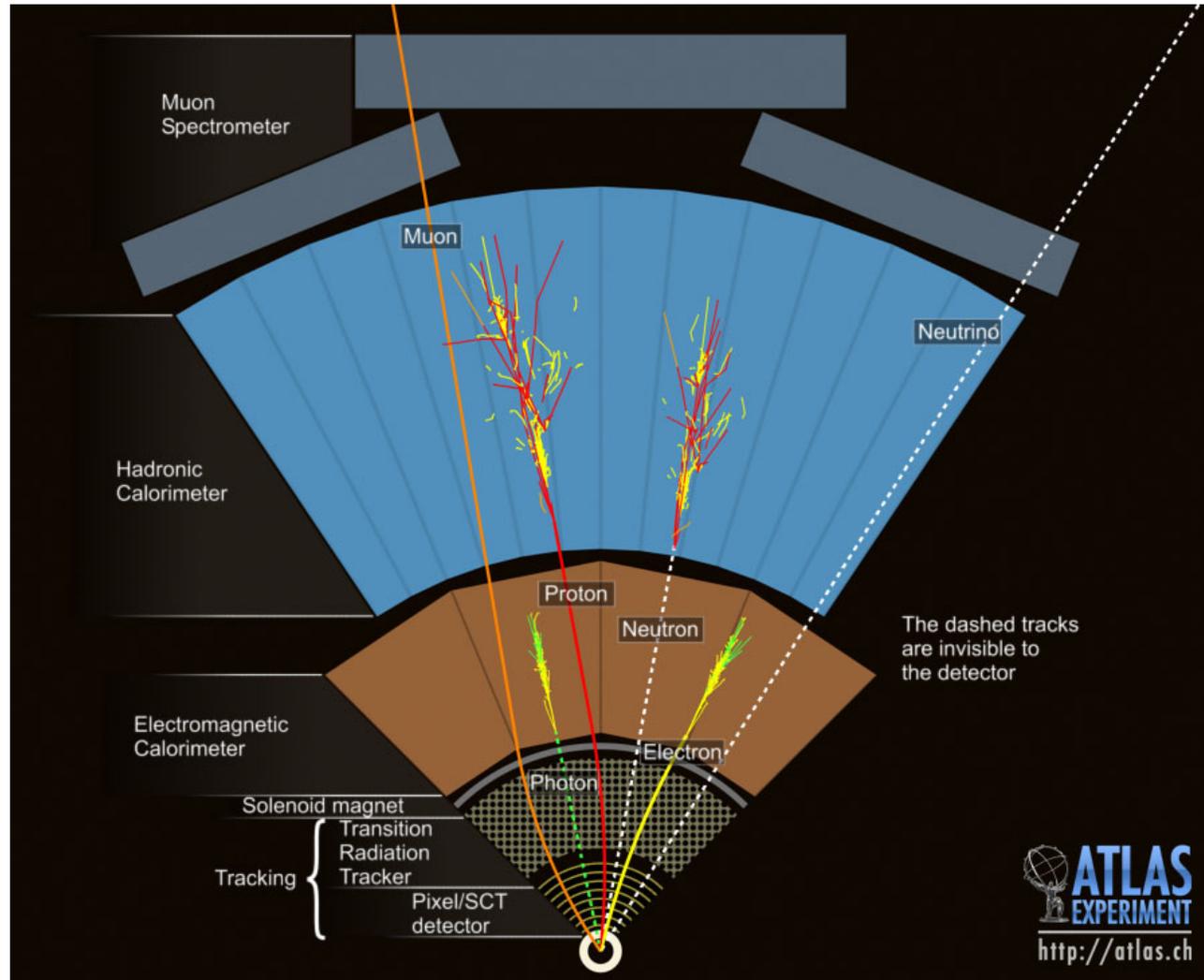
ATLAS



ATLAS – a detektor

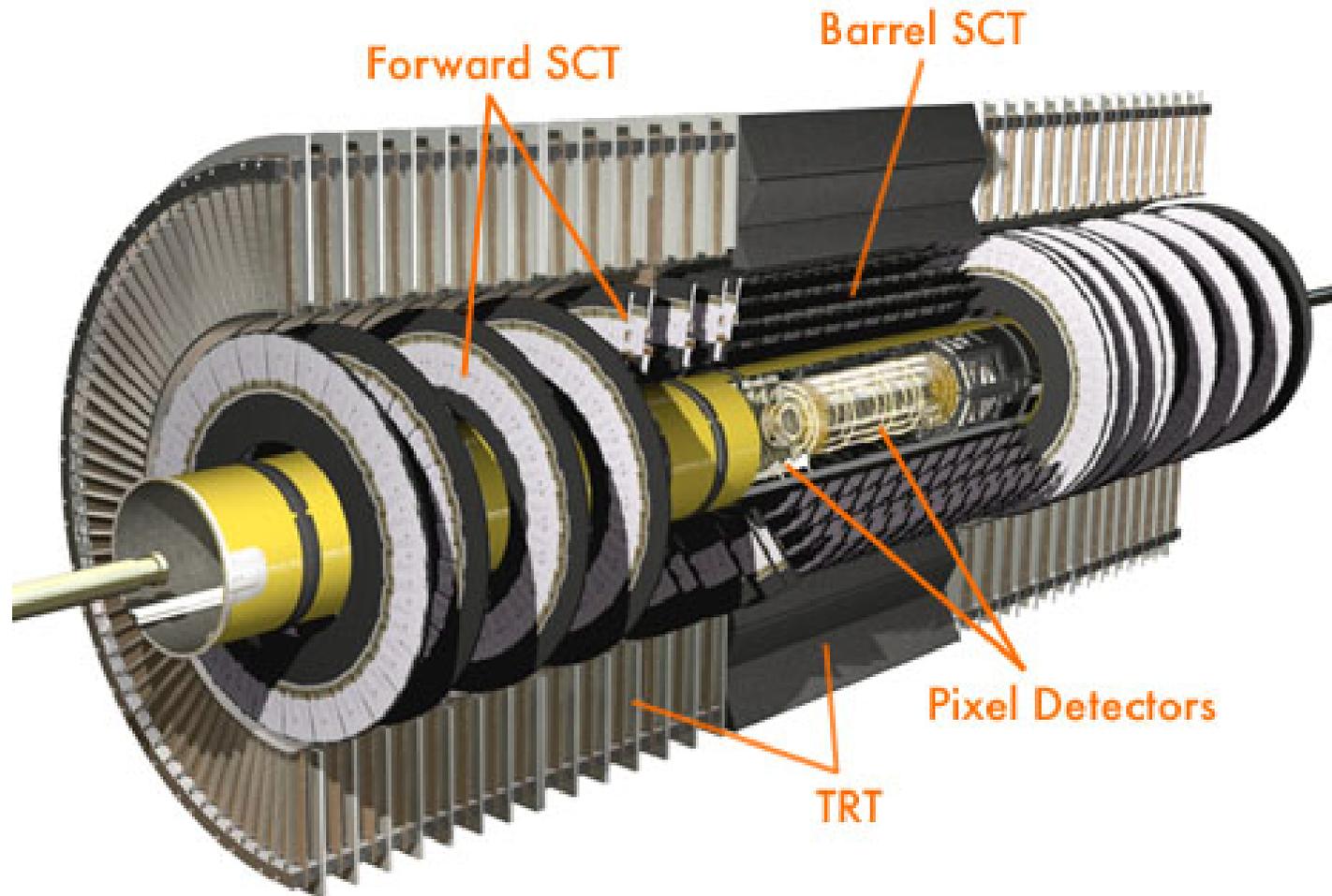


ATLAS – keresztmetszet



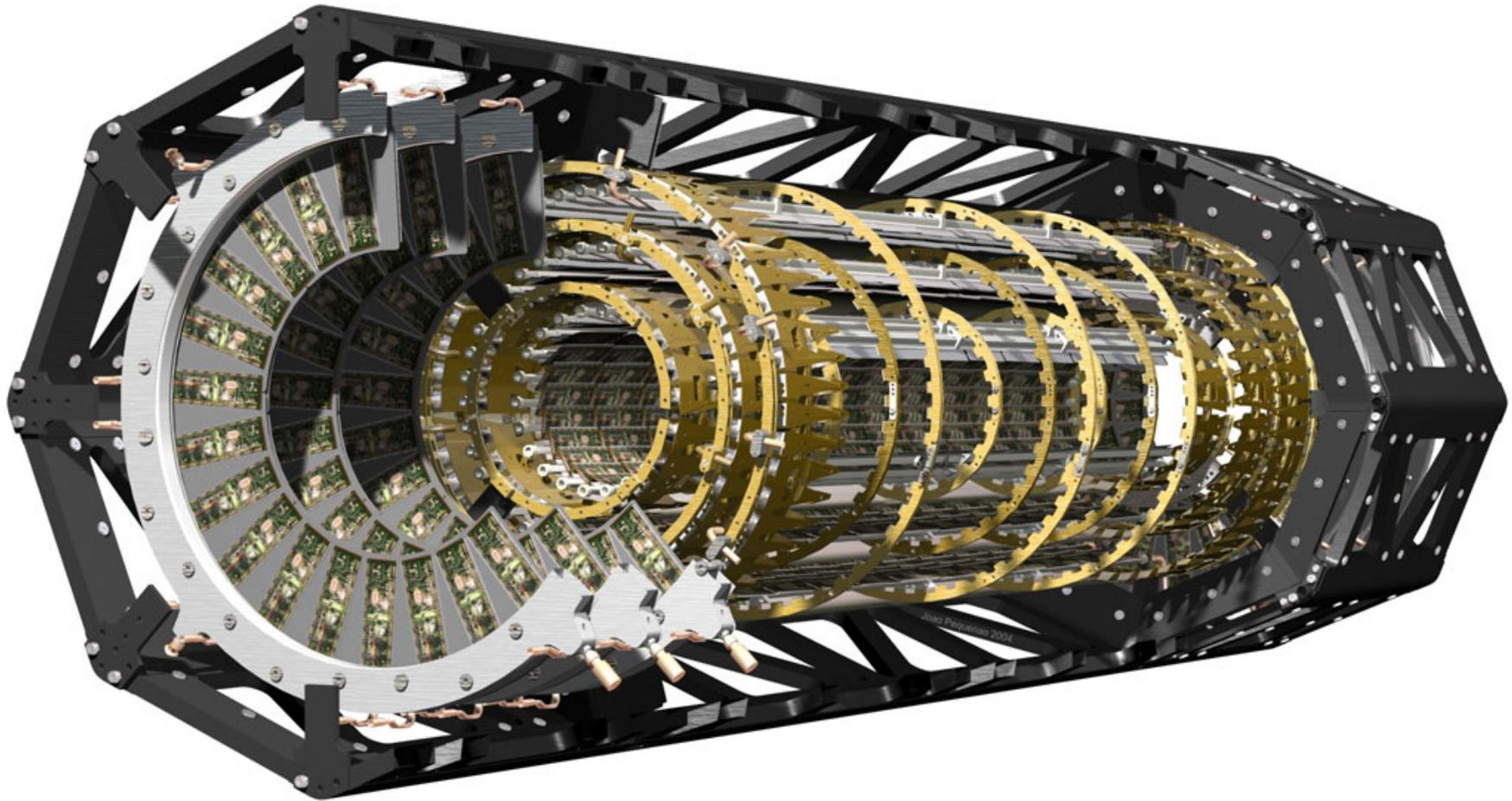
Mérhet leptonokat (e , μ), hadronokat (π , K , p)
Töltött és semleges részecskéket

ATLAS – inner detector



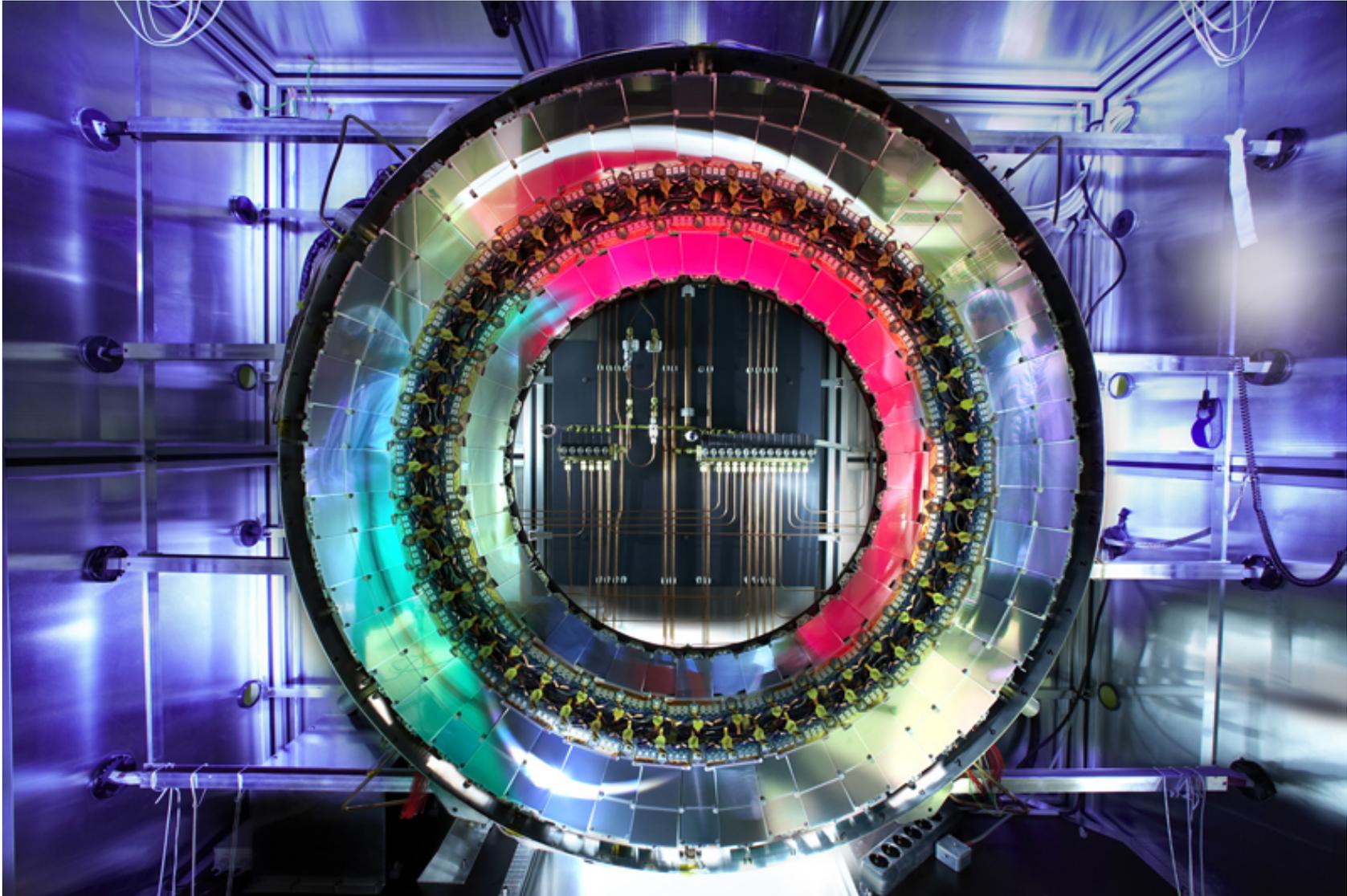
2 T mágneses térben, 1.15 m sugár, 7 m hossz
Mégmért térbeli pontok: pixel 3, strip 4, tracker 36

ATLAS – pixel detector



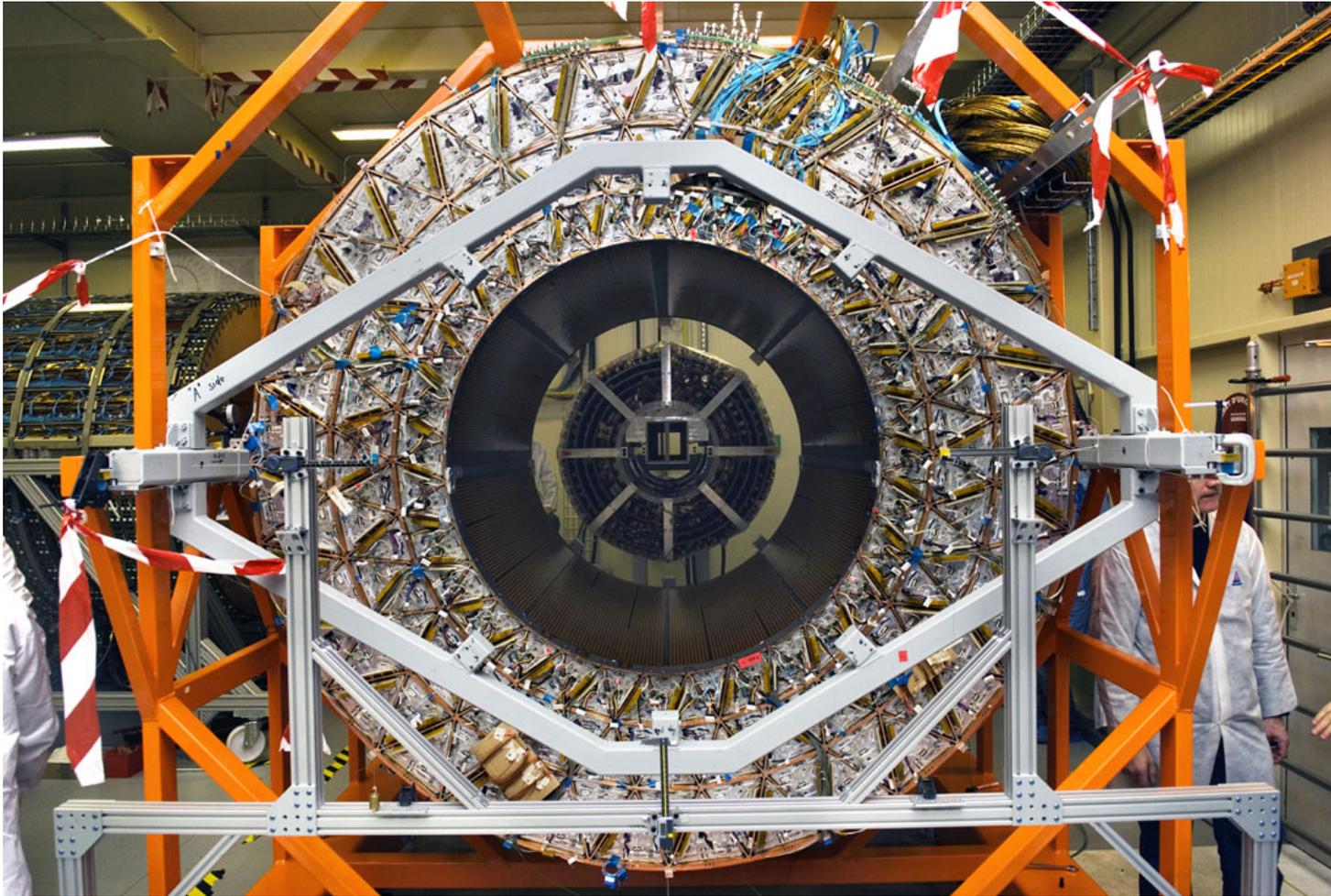
5, 9 és 12 cm sugár, 3 barrel és 3 endcap
80 millió pixel

ATLAS – semi-conductor tracker (SCT)



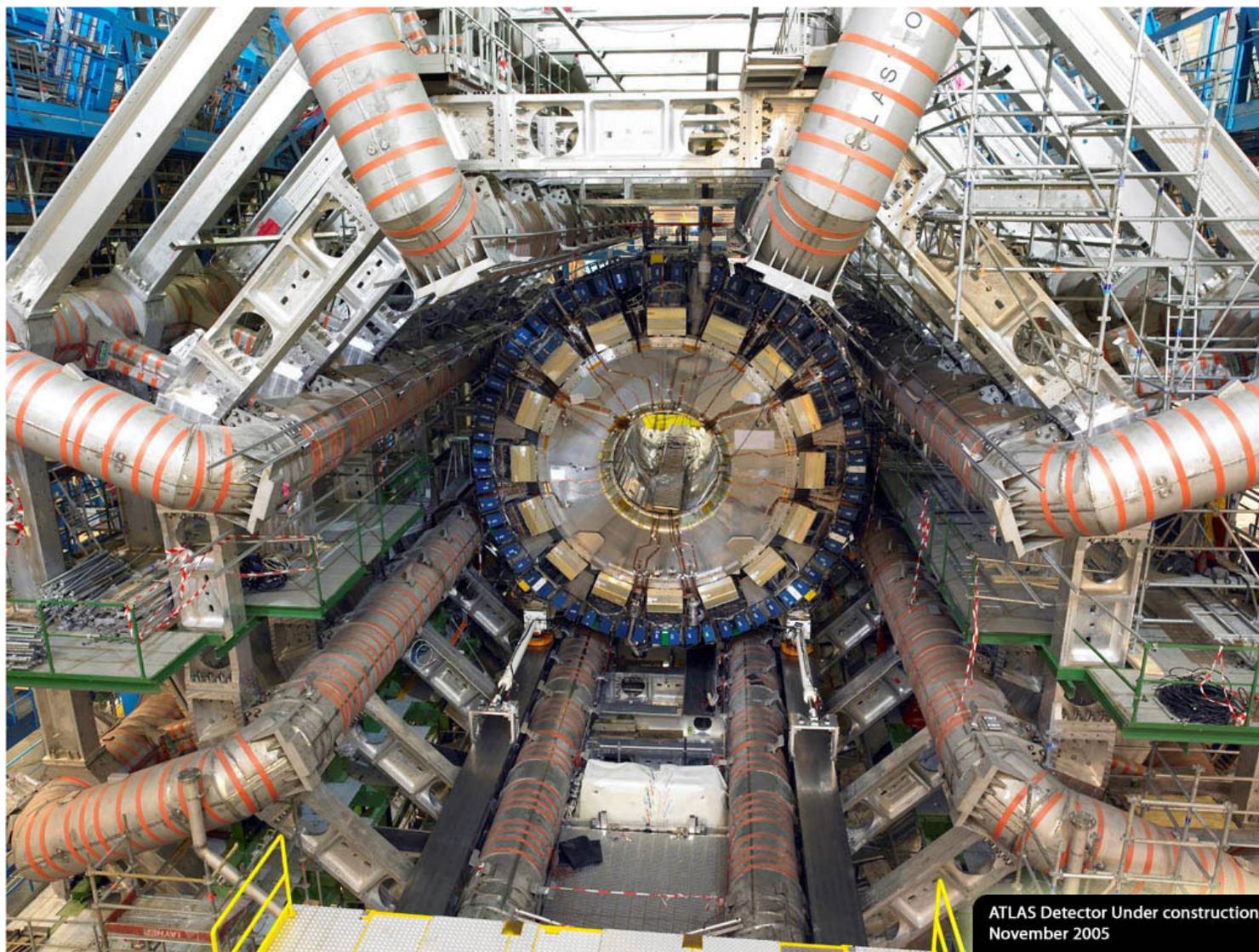
8 megmért pont, $80 \mu\text{m}$ széles csíkok

ATLAS – transition radiation tracker (TRT)



4 mm átmérőjű és 144 cm hosszú csövecskék, $30\ \mu\text{m}$ -os aranyozott W-Re szálakkal
Részecskék beütései és az átmeneti sugárzásból jövő nyomok megkülönböztethetők

ATLAS – mágnes



Szolenoid + toroid

ATLAS – folyékony argon kaloriméter



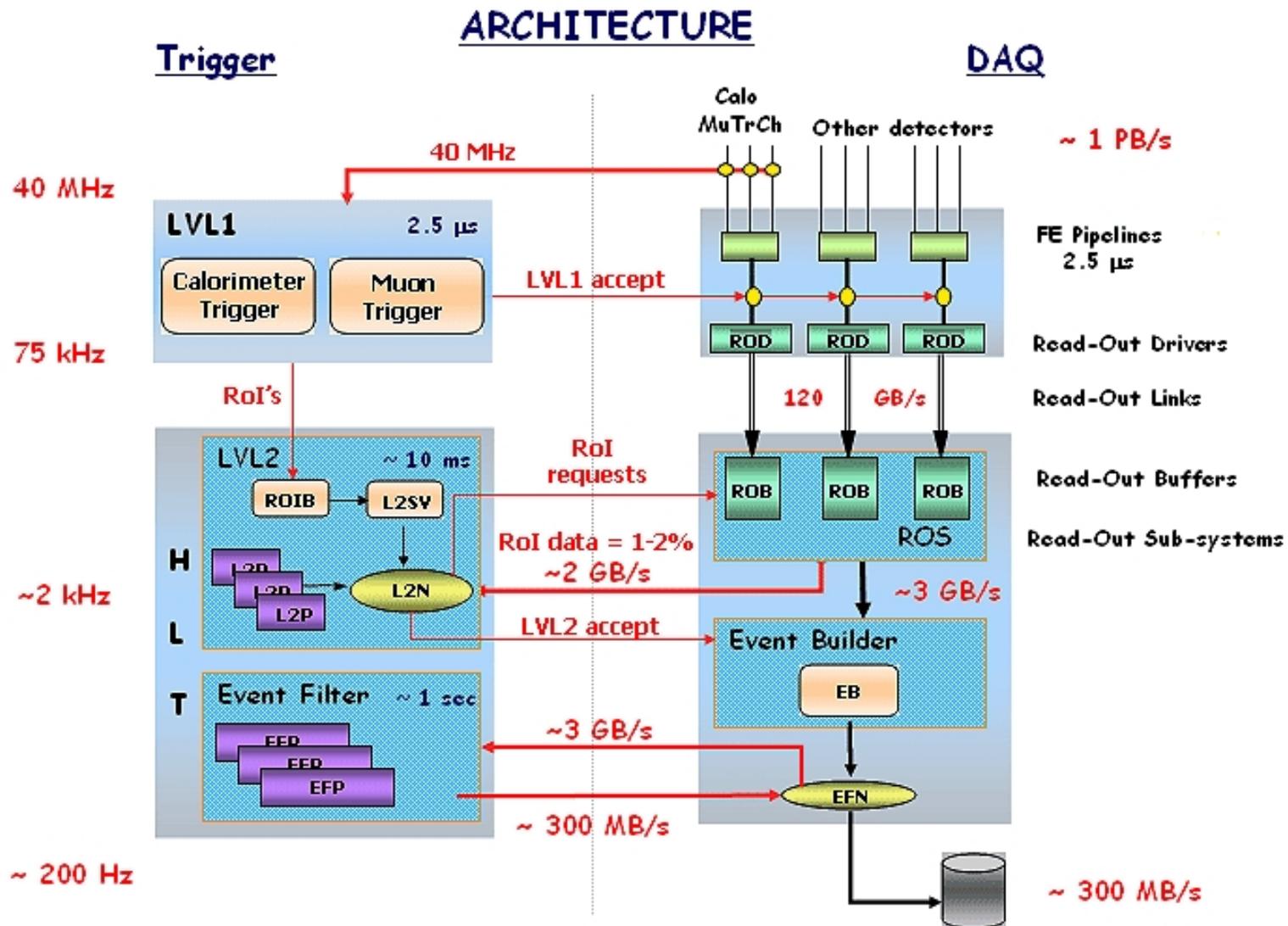
Belső kaloriméter

ATLAS – müon detektorok



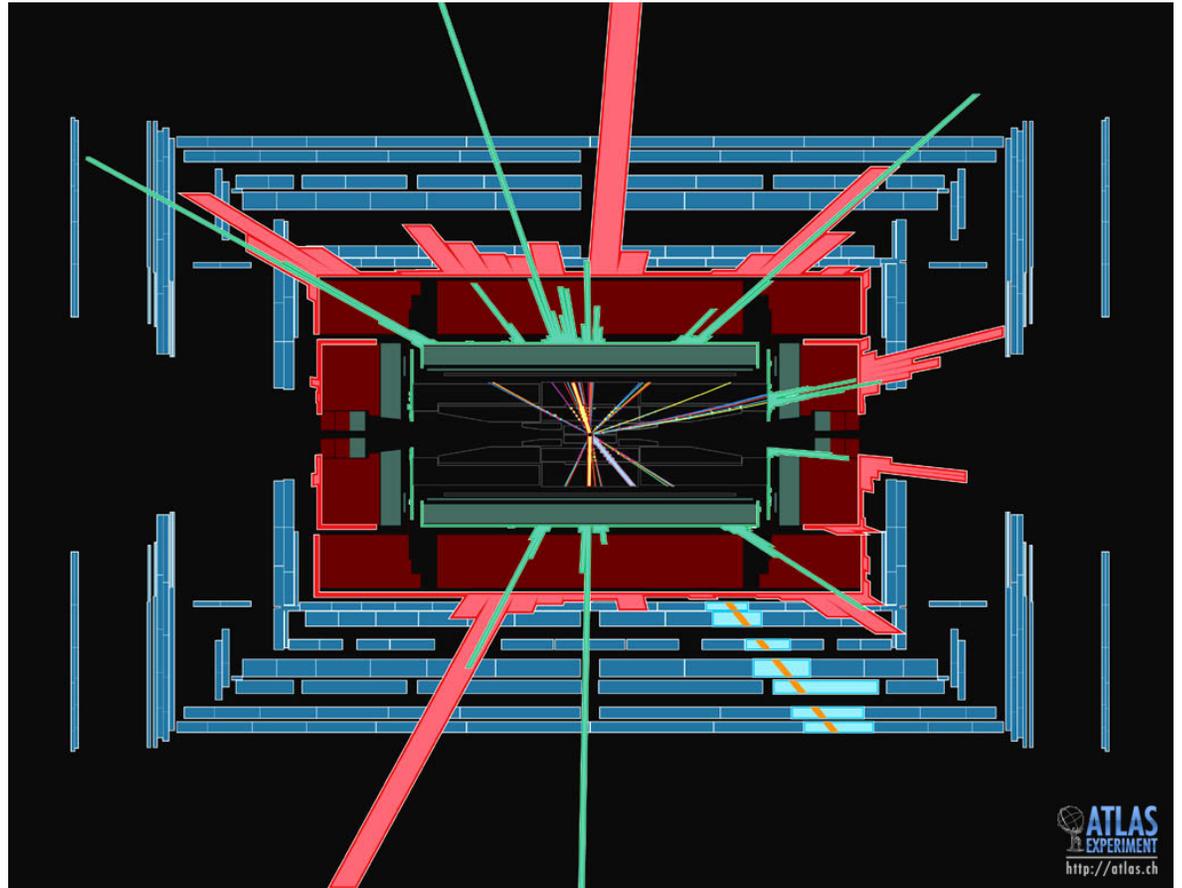
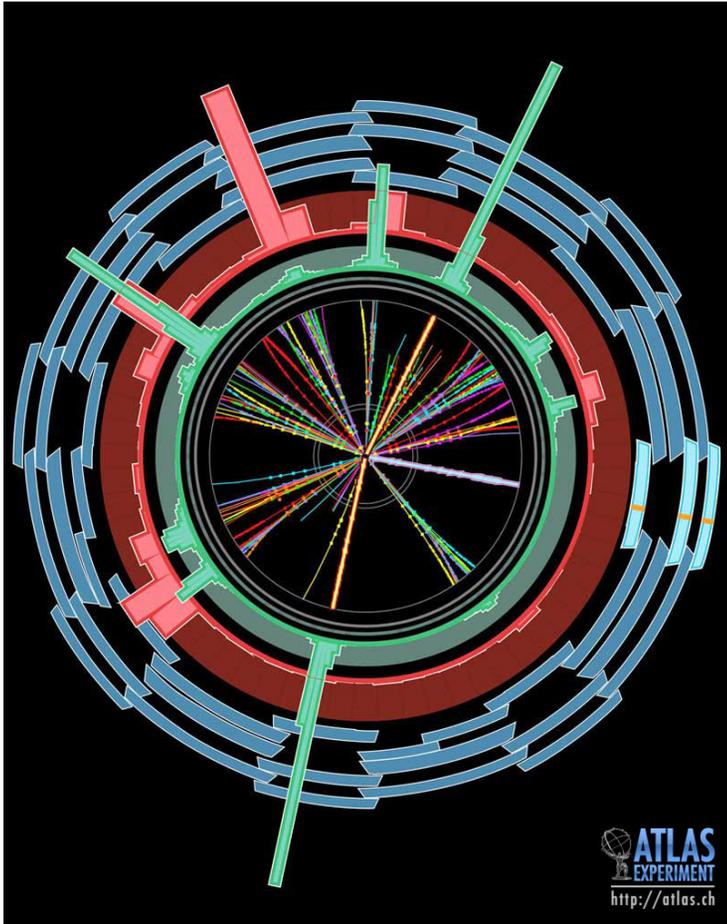
Sokféle technika: DT, CSC, RPC, TGC

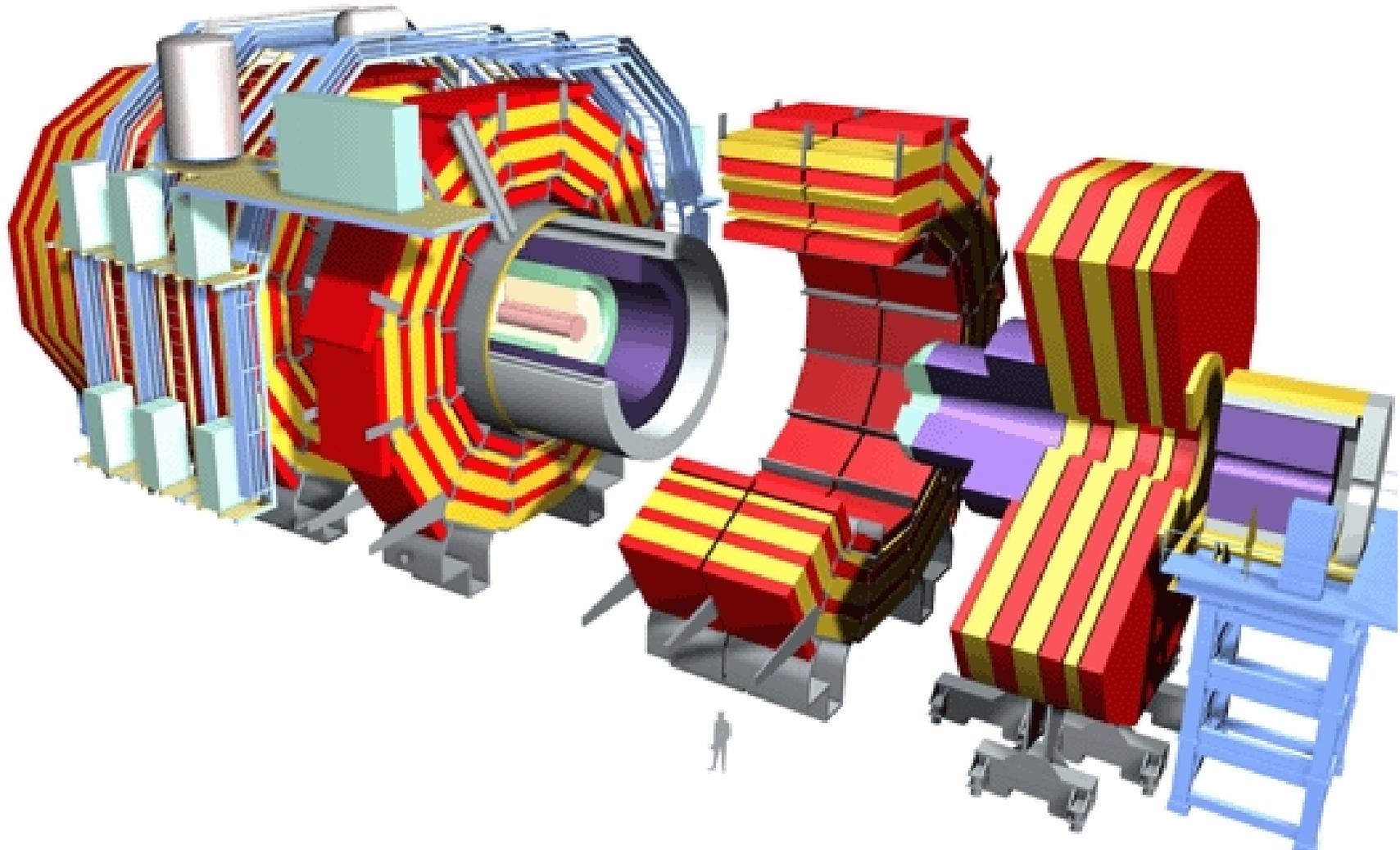
ATLAS – high level trigger



Hardveres és szoftveres trigger

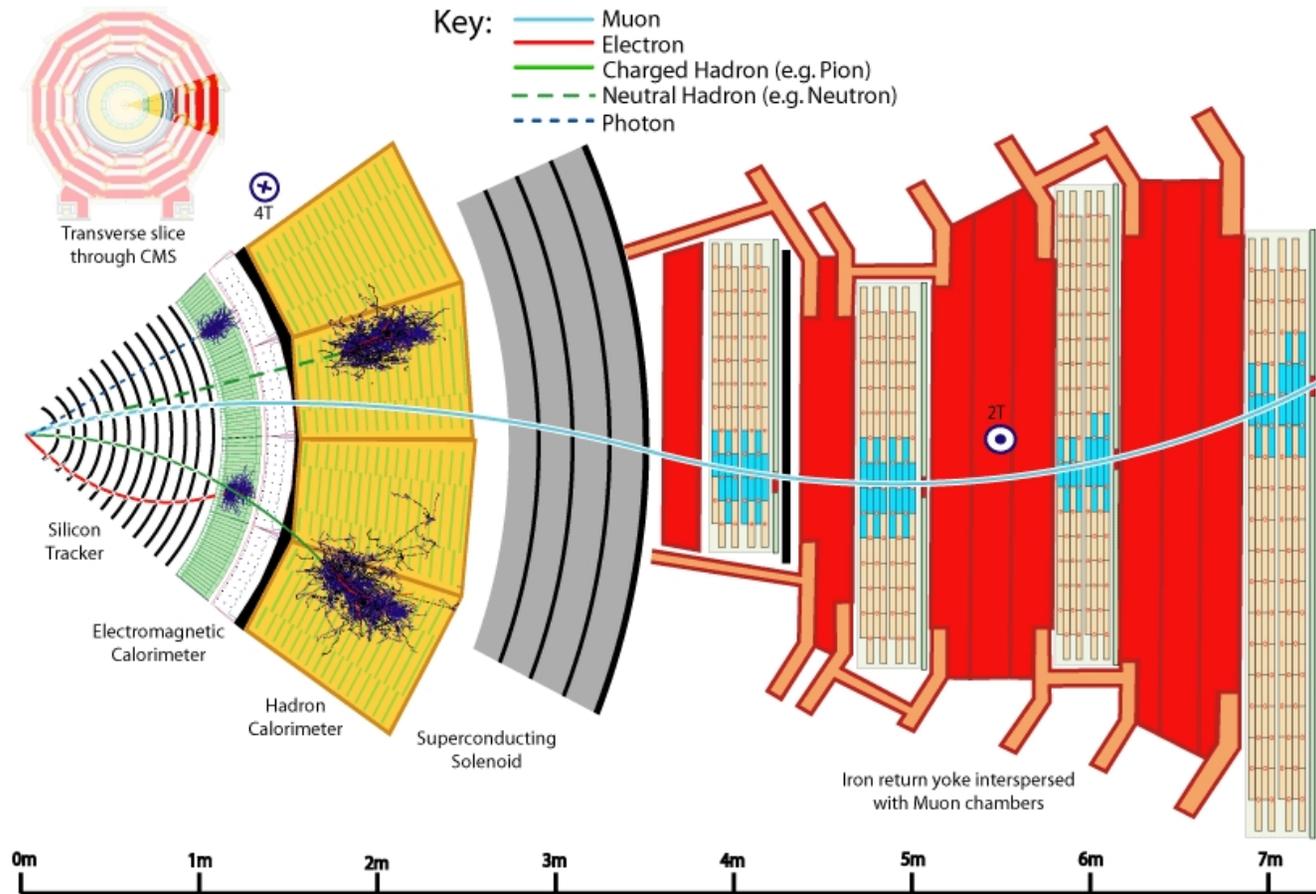
ATLAS – szimuláció





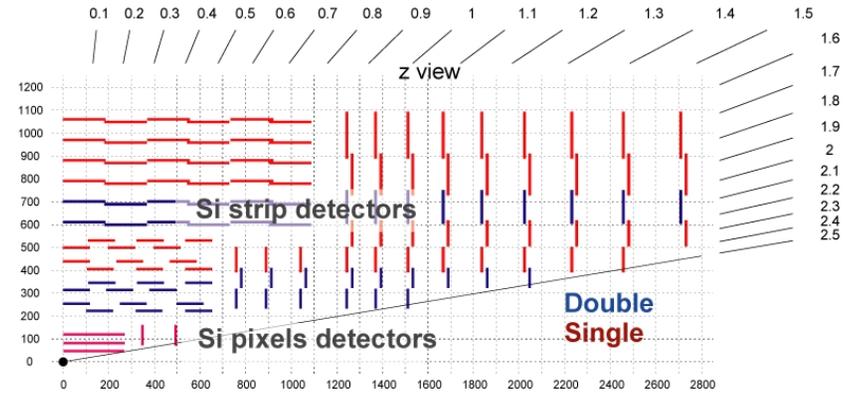
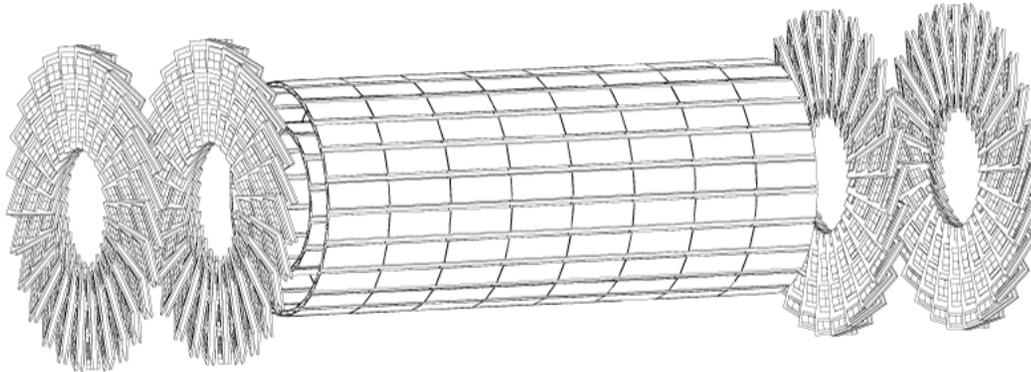
Spokesperson: Tejinder VIRDEE, Contactperson: Guido TONELLI
Contactperson: Robert COUSINS, Technical coordinator: Austin BALL

CMS – keresztmetszet



Szilícium nyomkövető: pixelek és csíkok
Elektromágneses és hadronikus kaloriméterek, müon kamrák
Mérhet leptonokat (e , μ), hadronokat (π , K , p)
Töltött és semleges részecskéket

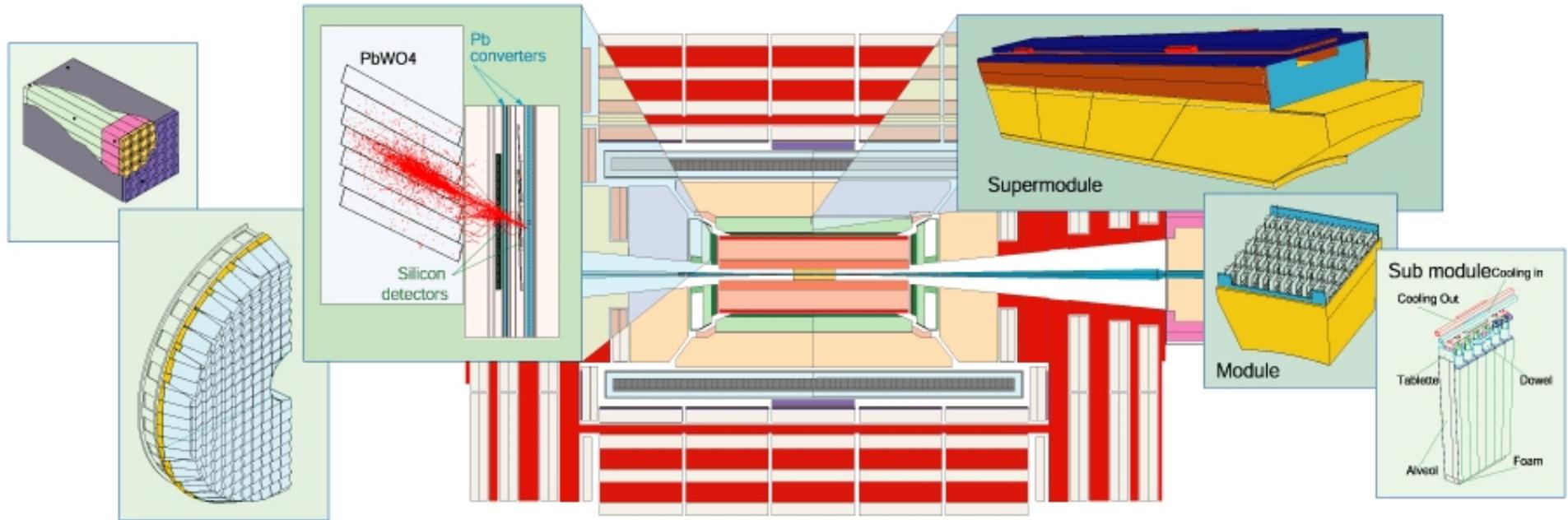
CMS – tracker



The layout of the CMS inner tracker

- **Pixelek:** 3 barrel és 2 forward sík, mindegyik oldalon
 - $100 \times 150 \mu\text{m}$ pixelek
- **Csíkok:** 10 barrel és 9 forward sík
 - néhányuk egy-, mások kétoldalasak, mindegyik oldalon

CMS – elektromágneses kaloriméter

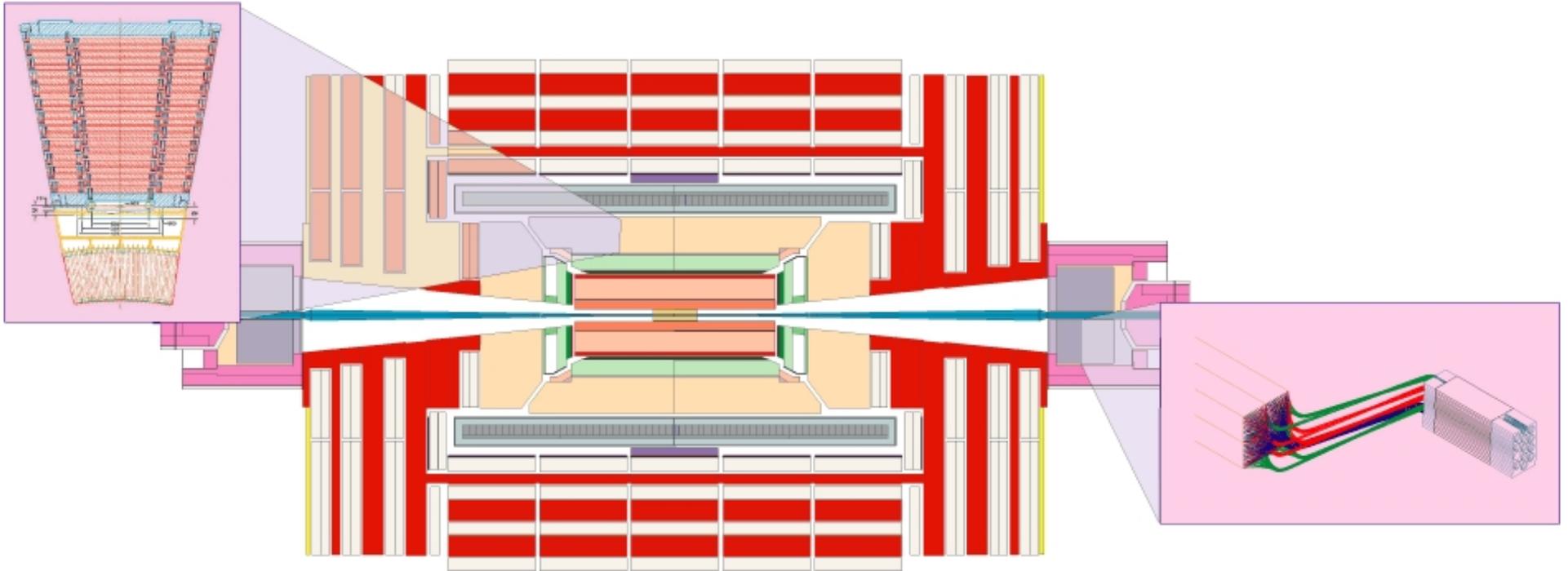


- Elektromágneses

- barrel ($|\eta| < 1.48$) és endcap ($1.48 < |\eta| < 3$) részek
- felbontás $2.7\%/\sqrt{E}$ plusz 0.55%

Ólom-wolframát kristályok: nagy sűrűség, kis Molière sugár, kis sugárzási hossz

CMS – hadron kaloriméter

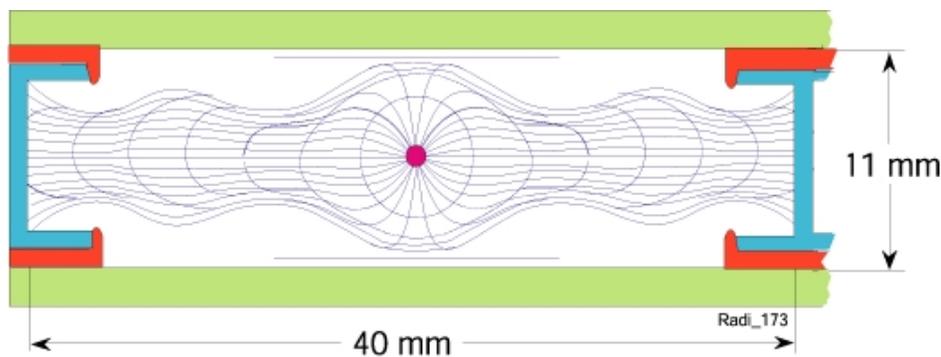
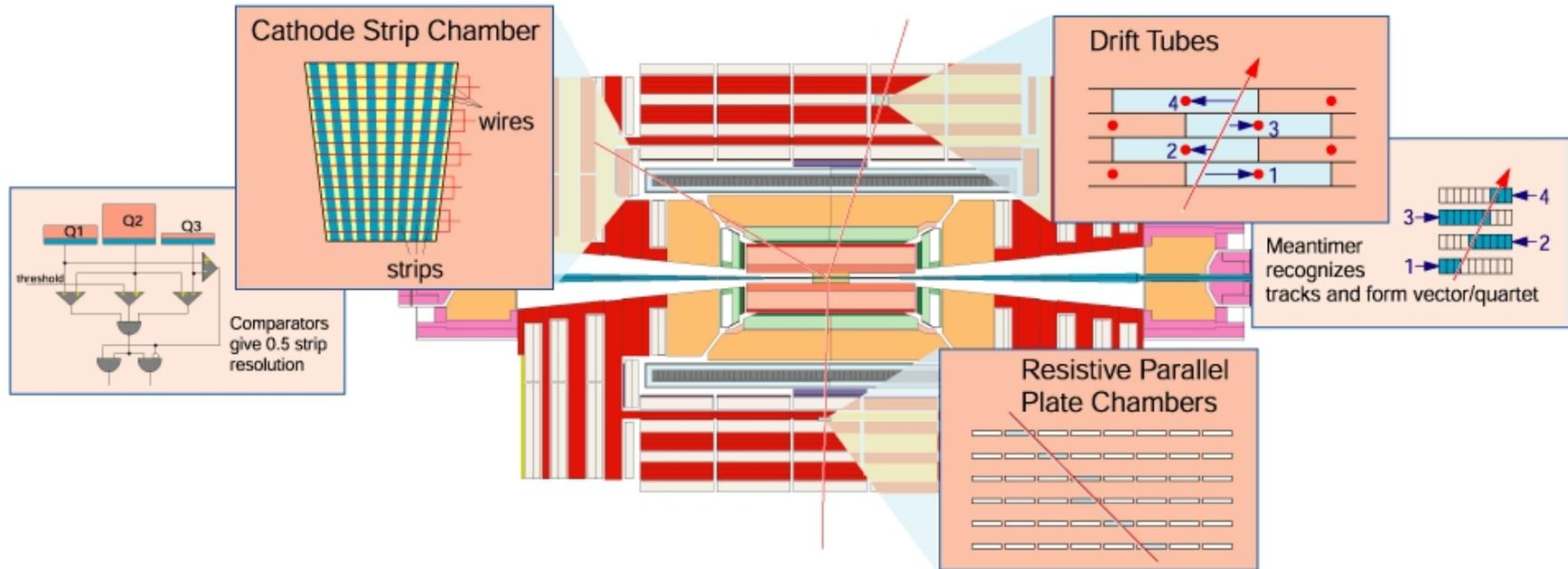


- Hadronikus

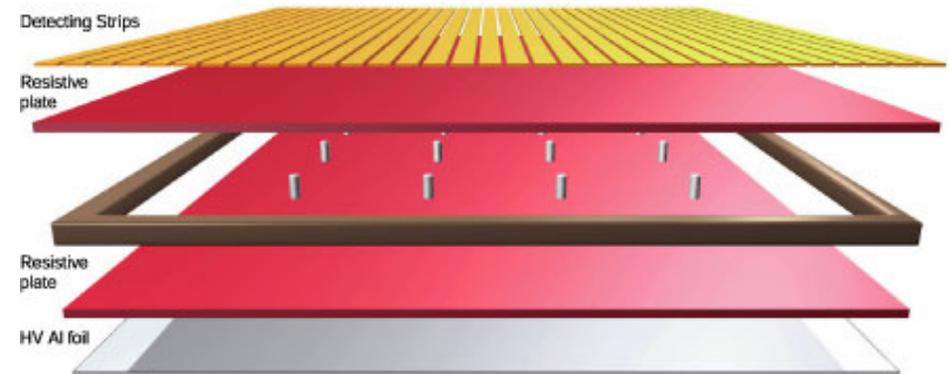
- barrel+endcap ($|\eta| < 3$) és forward ($3 < |\eta| < 5$) részek
- CASTOR-ral ($|\eta| < 7$)
- felbontás $116\%/\sqrt{E}$ plusz 5%

Mintavevő kaloriméterek, 50 mm Cu abszorber lemezek 4 mm szcintillátor síkokkal
vagy: 5 mm W 2 mm kvarc síkokkal

CMS – müon detektorok (1)

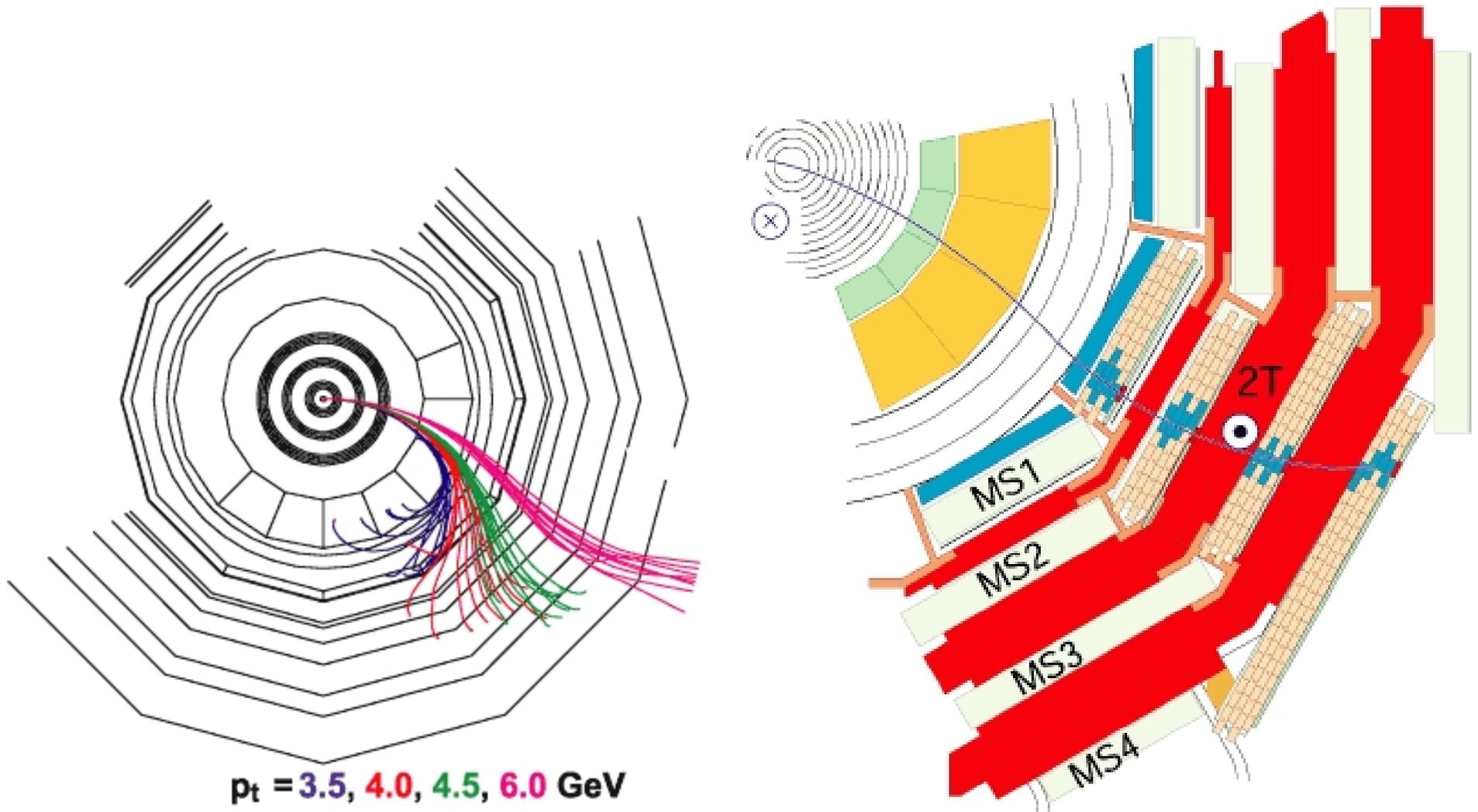


DT

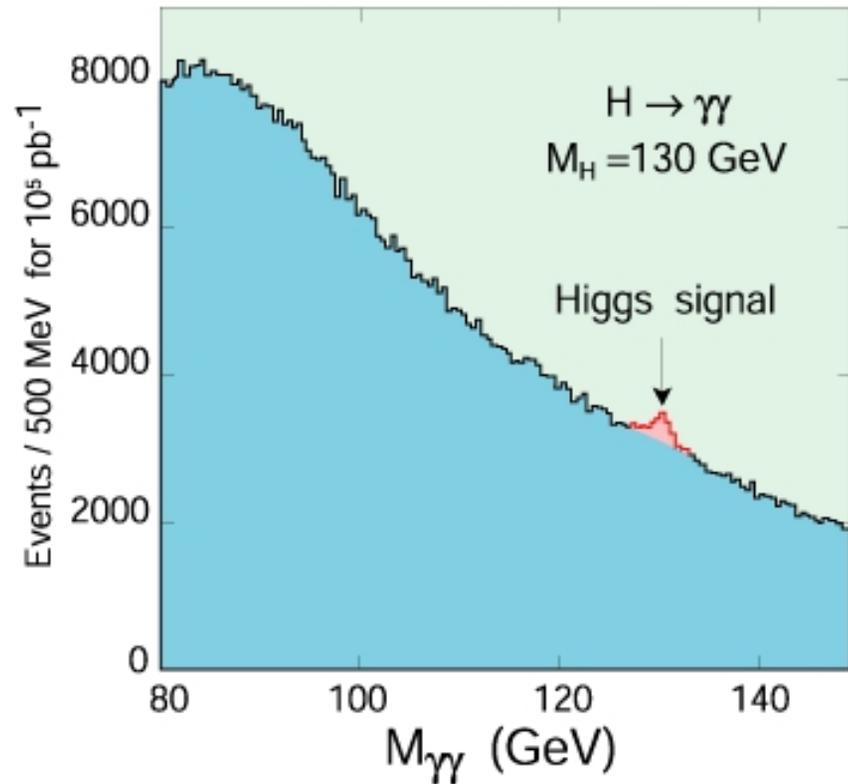
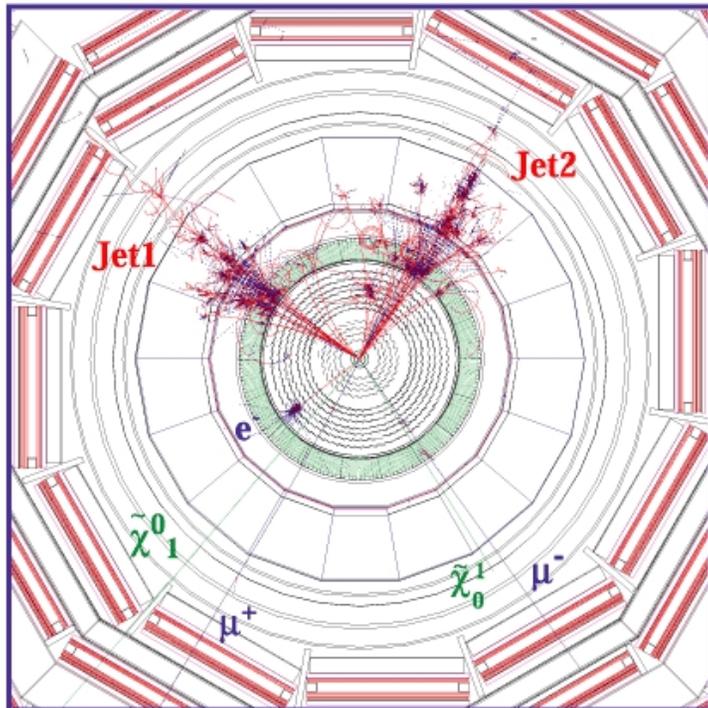
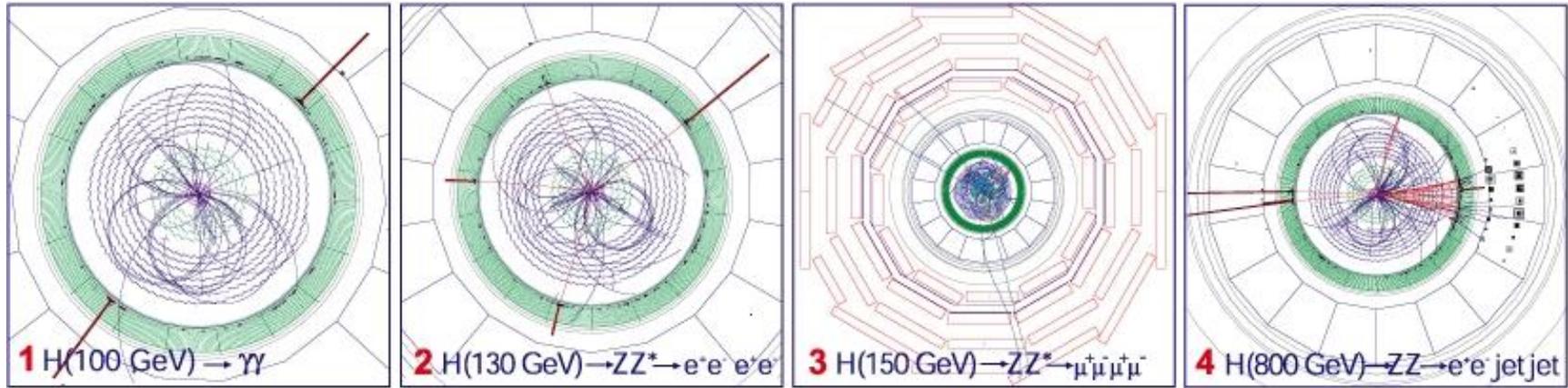


RPC

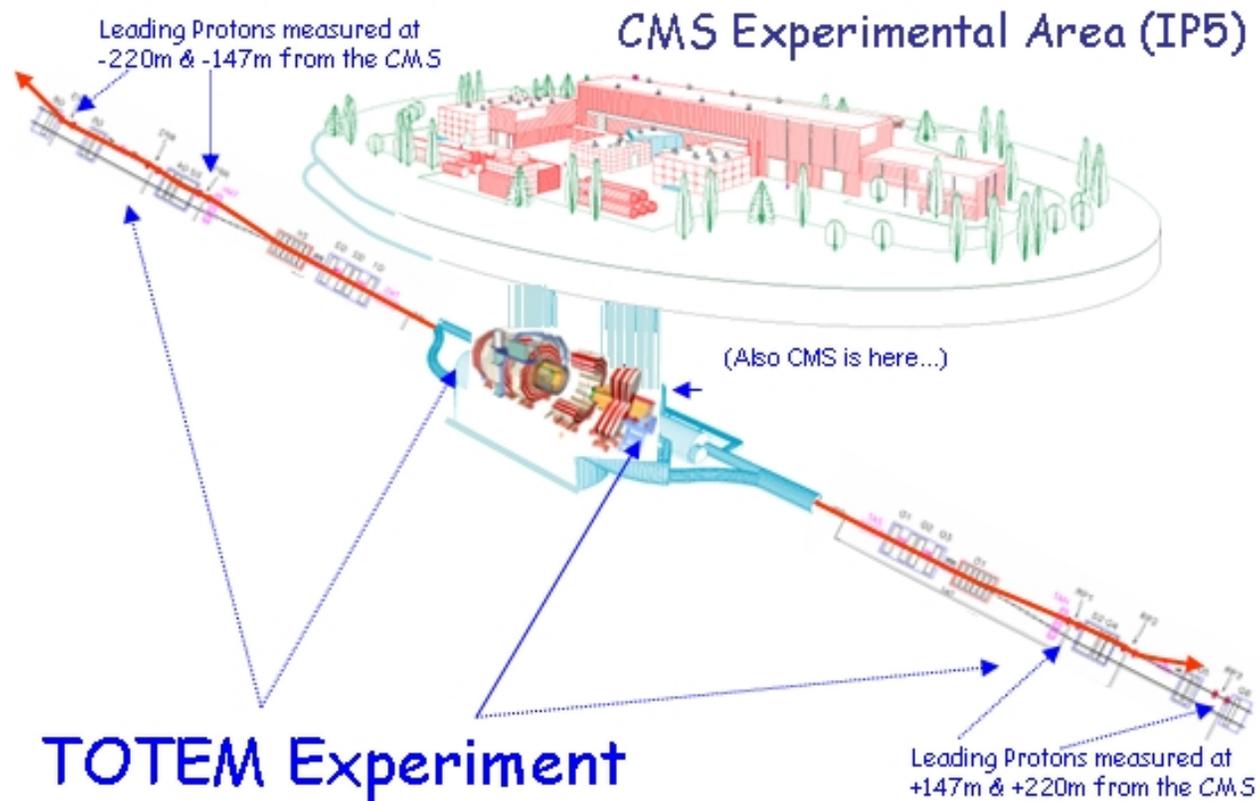
CMS – müon detektorok (2)



CMS – szimuláció

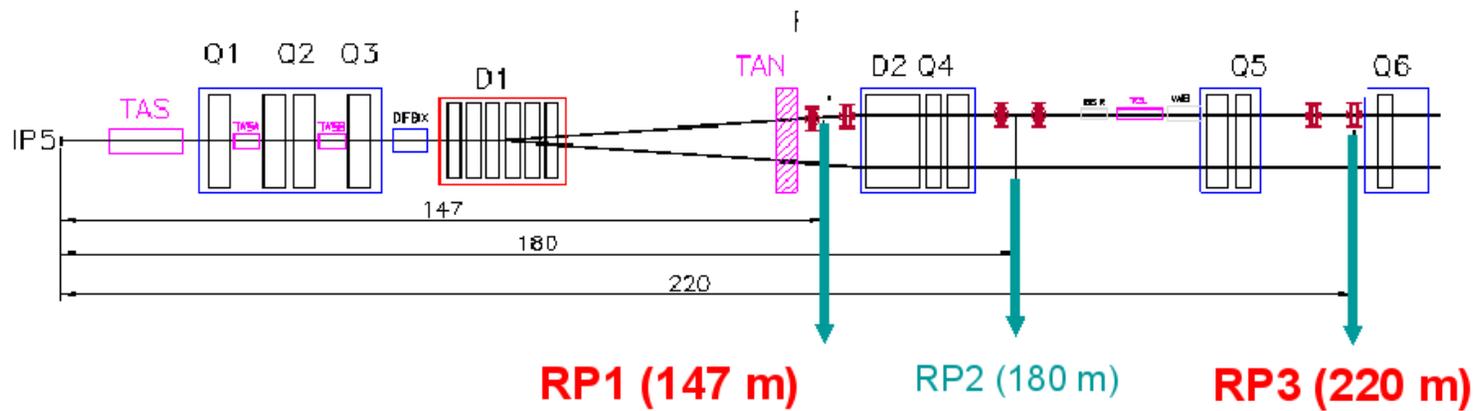
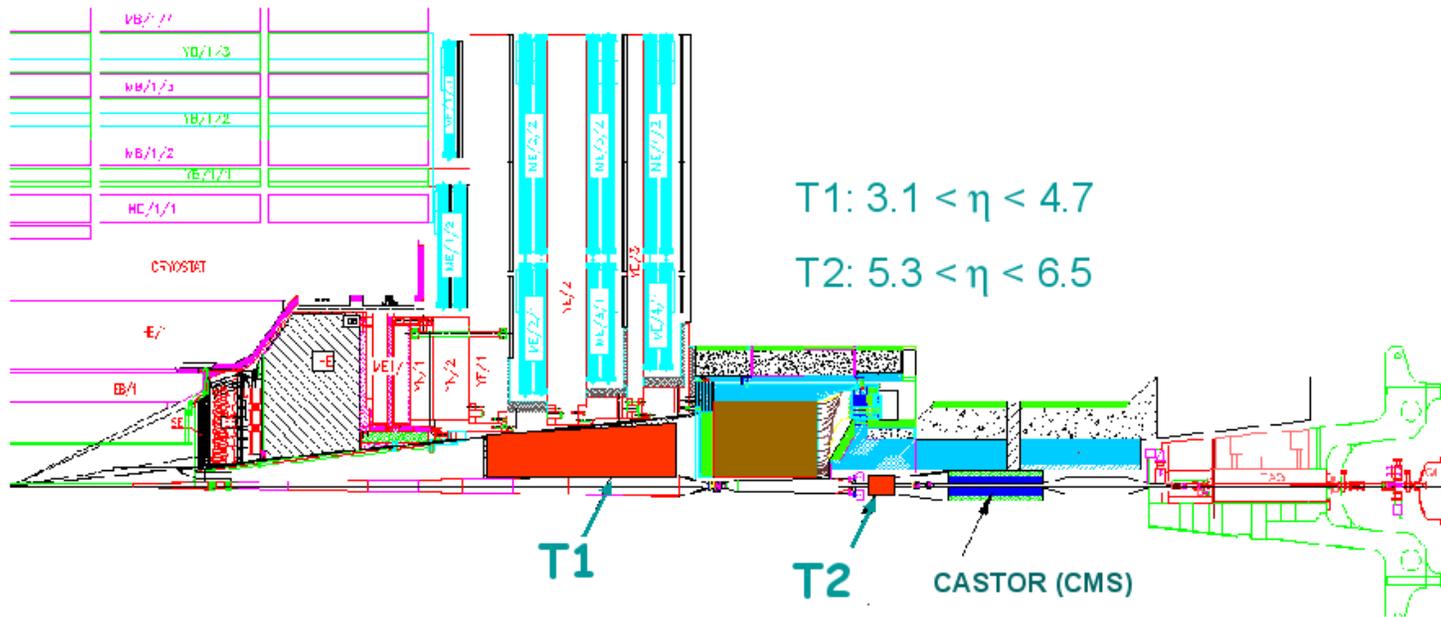


TOTEM



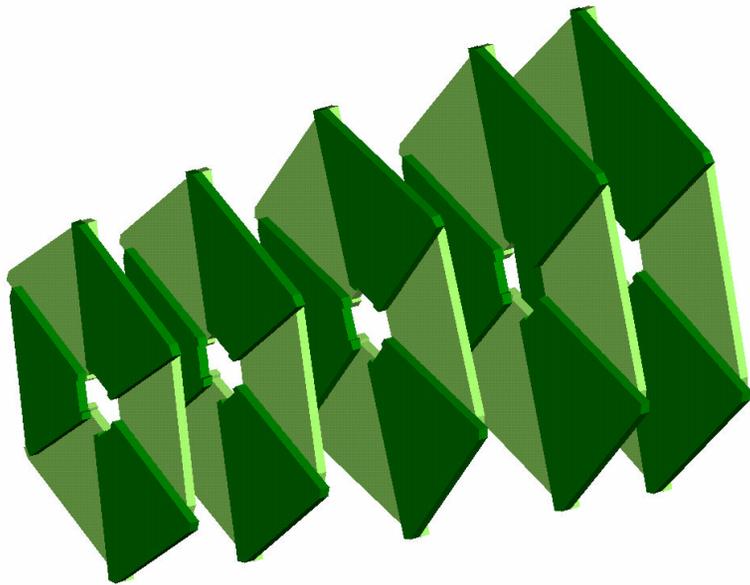
Spokesman: Karsten Eggert, Deputy-spokesman: Maurizio LoVetere
Technical coordinator: Ernst Radermacher

TOTEM



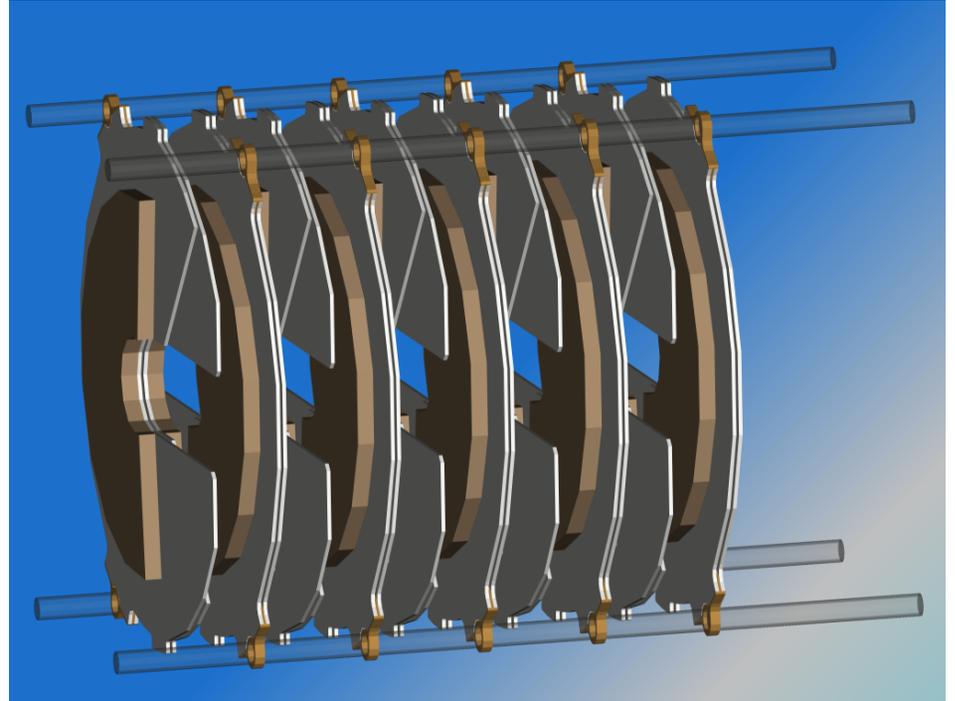
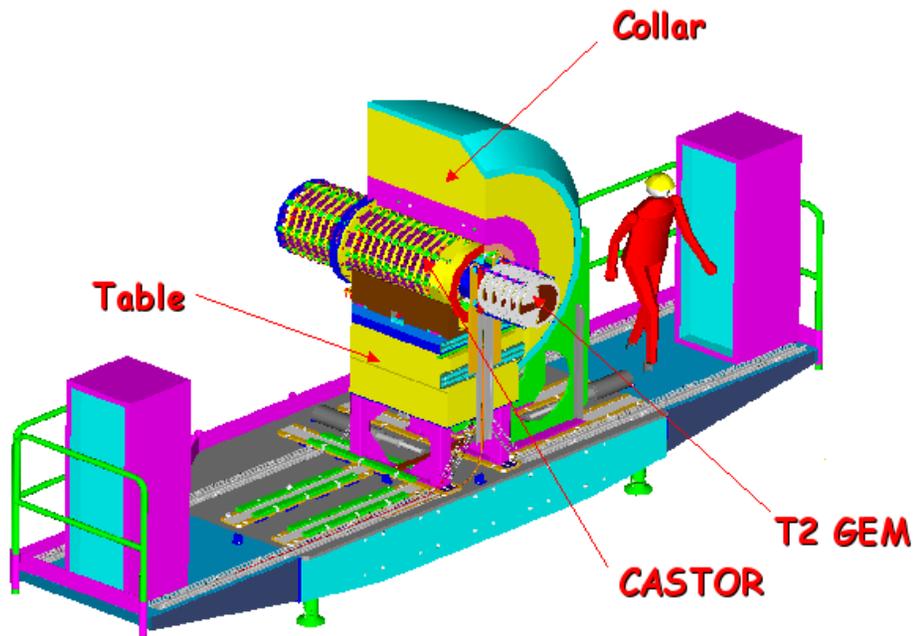
T1, T2 és roman pot (RP1, RP3)

TOTEM – T1 telescope



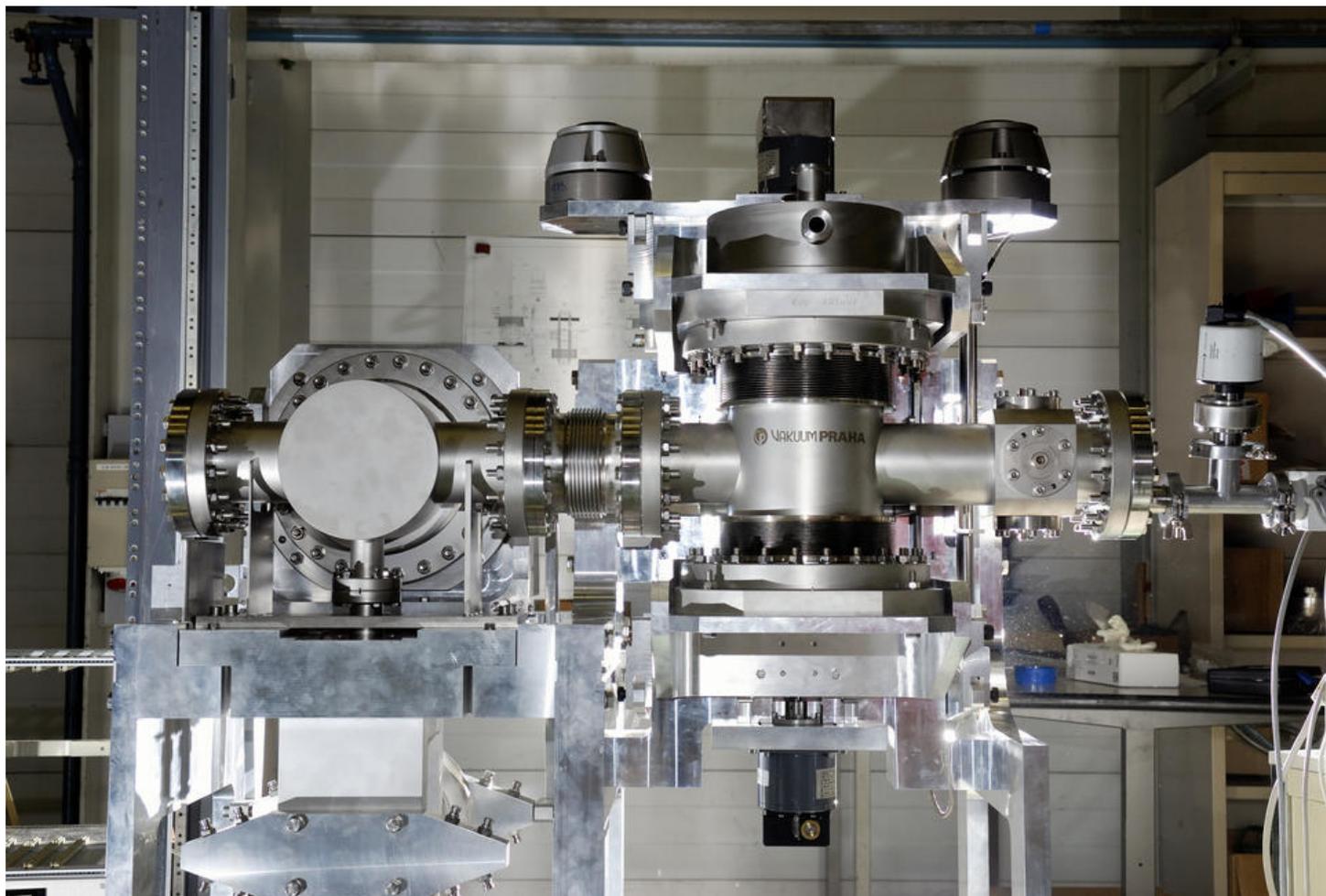
CSC, $3 < |\eta| < 5$

TOTEM – T2 telescope

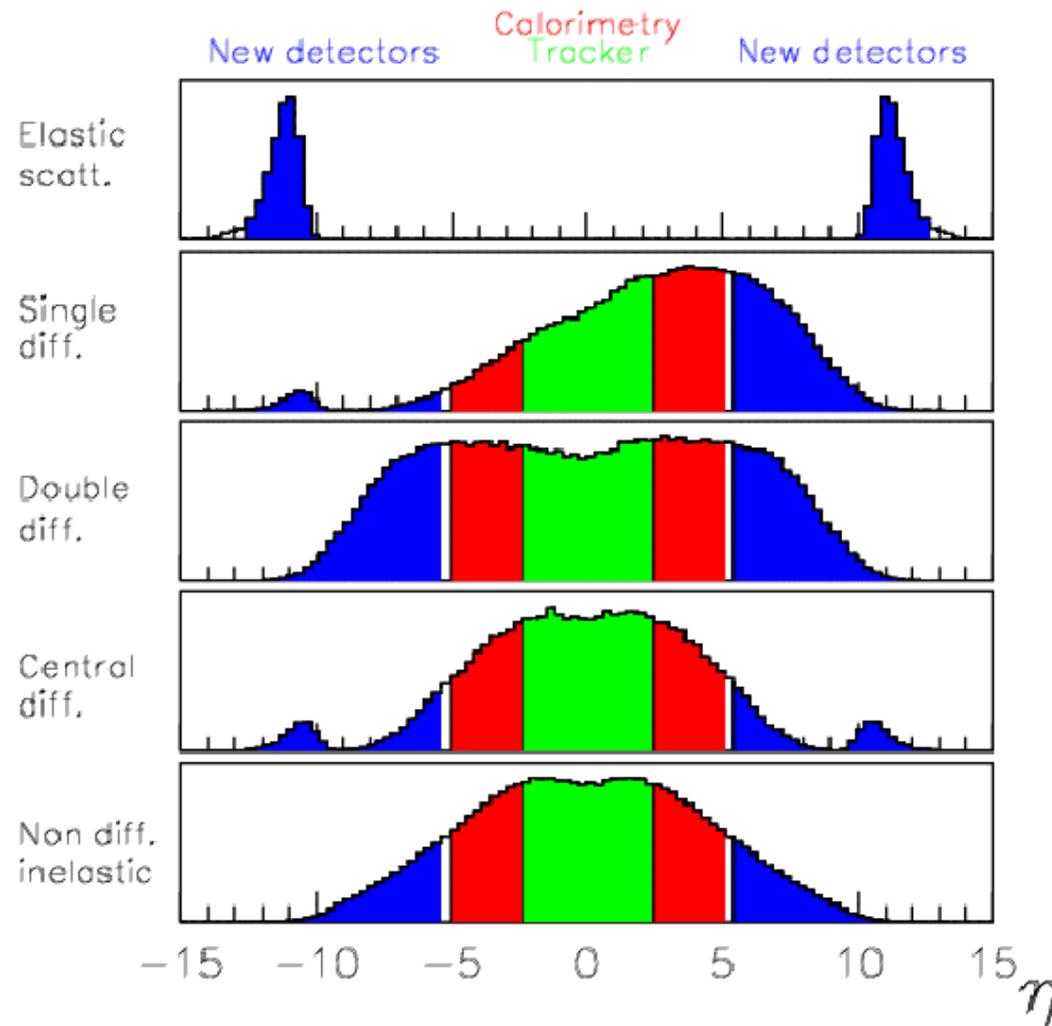


GEM, $5 < |\eta| < 7$

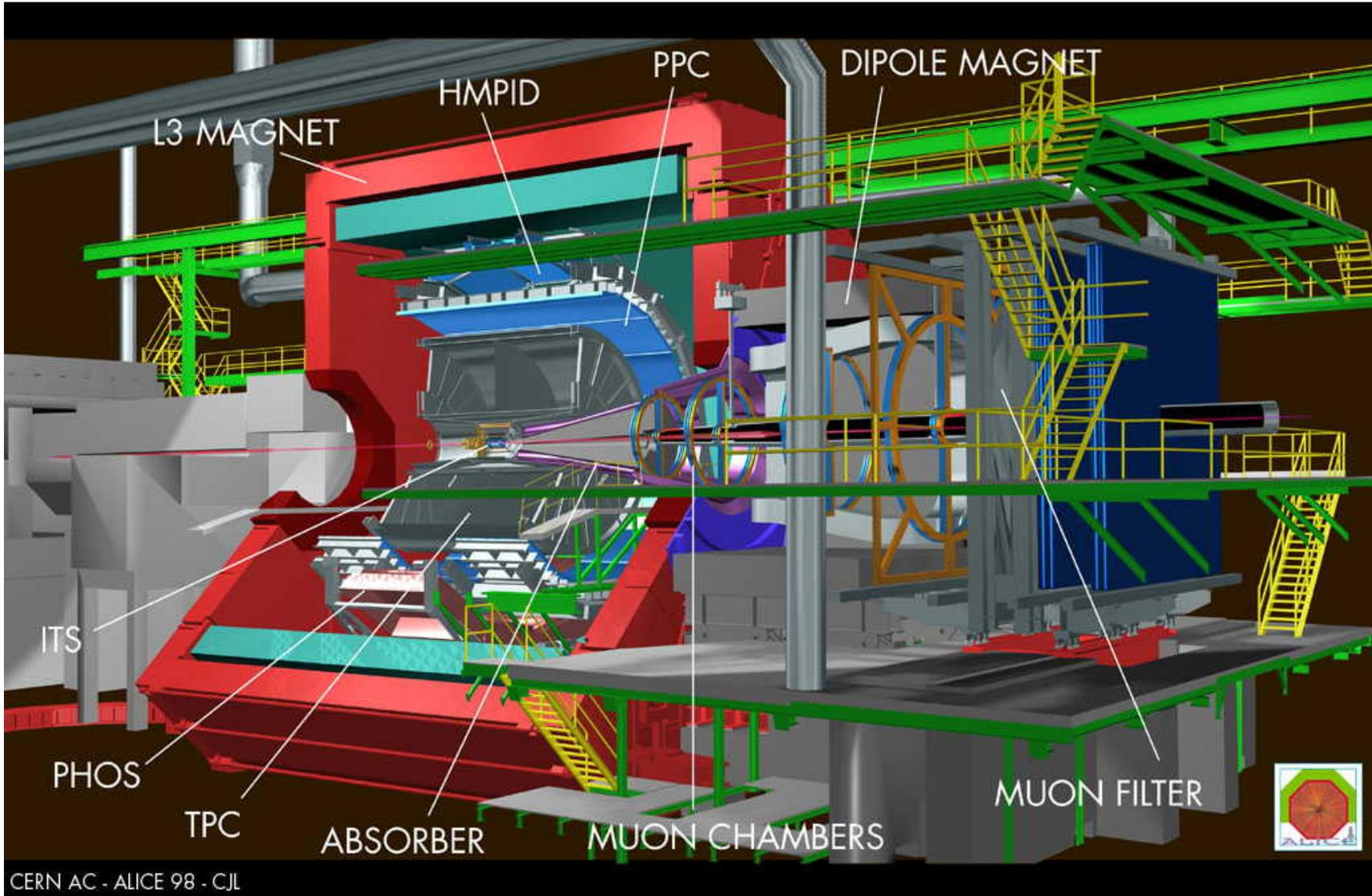
TOTEM – roman pot



CMS + TOTEM – akceptancia

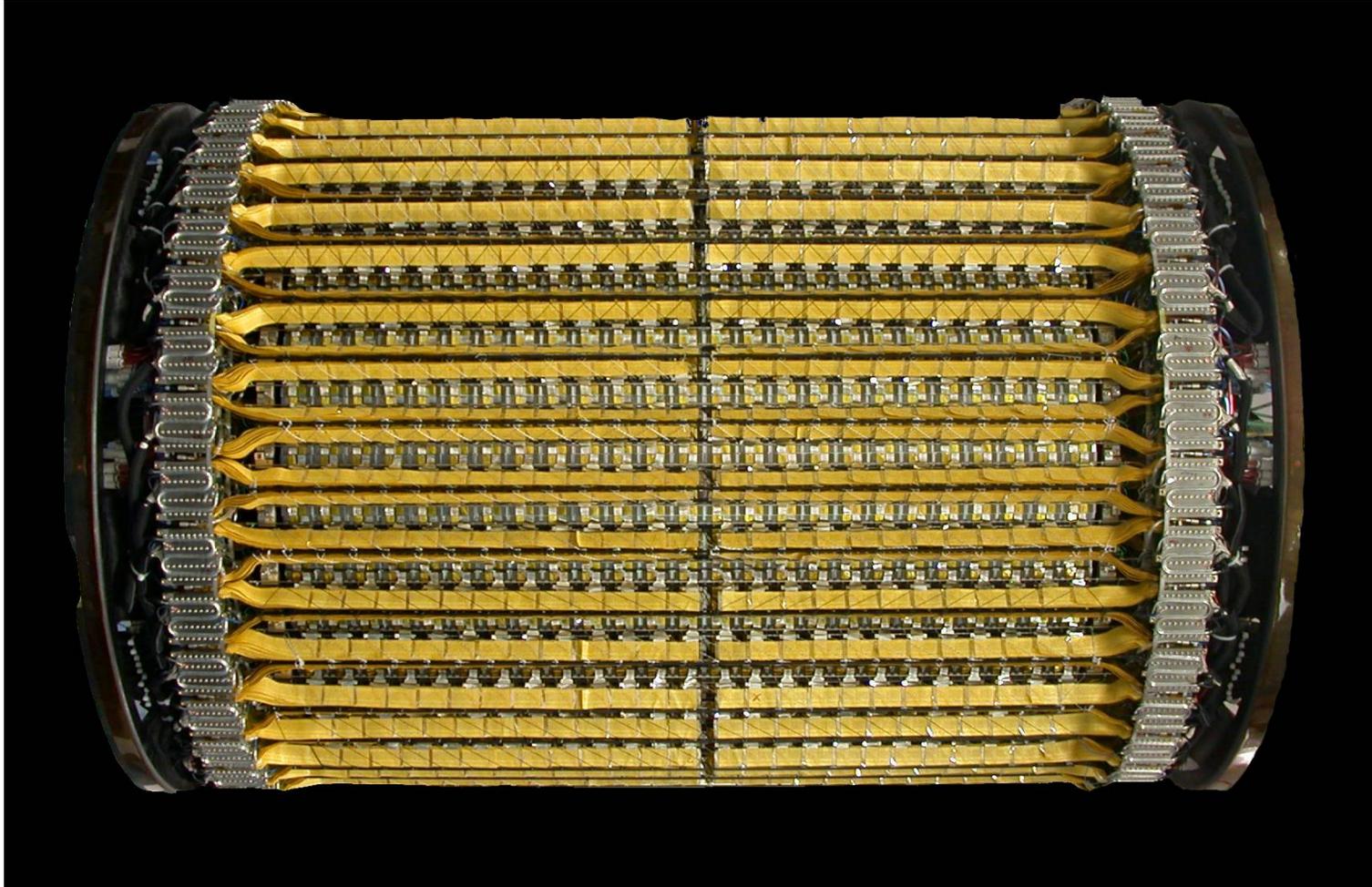


ALICE



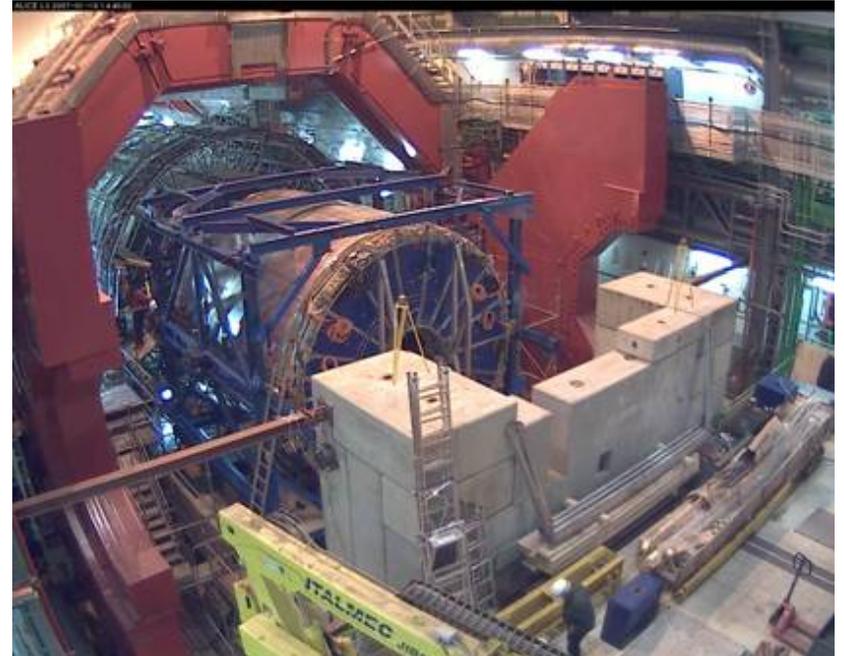
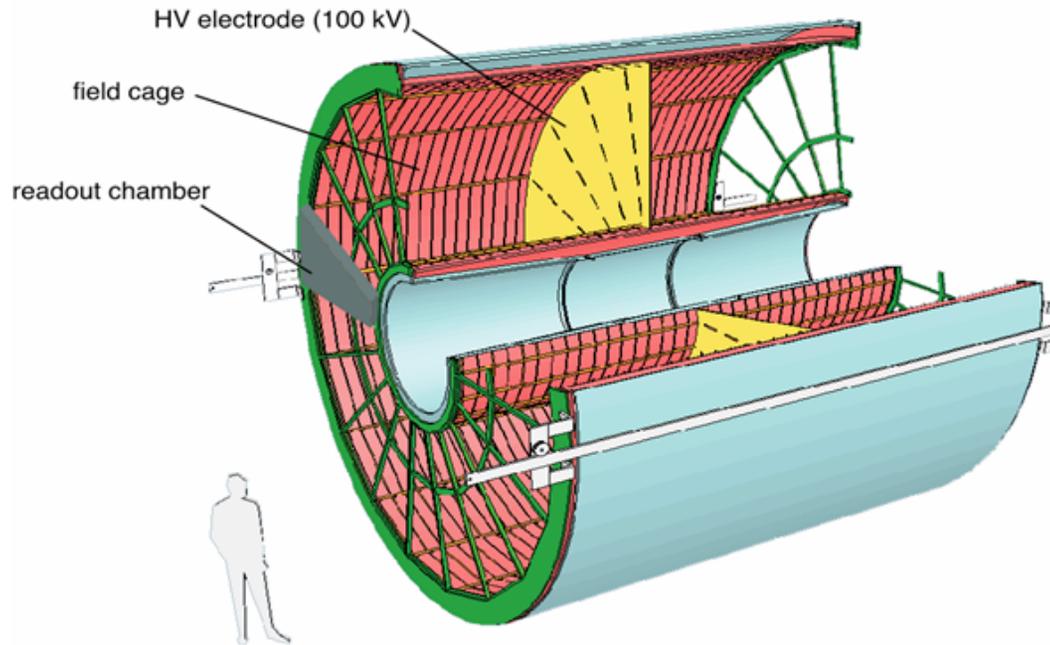
Spokesperson: Jurgen SCHUKRAFT, Technical coordinator: Christian FABJAN

ALICE – Inner Tracking System (ITS)



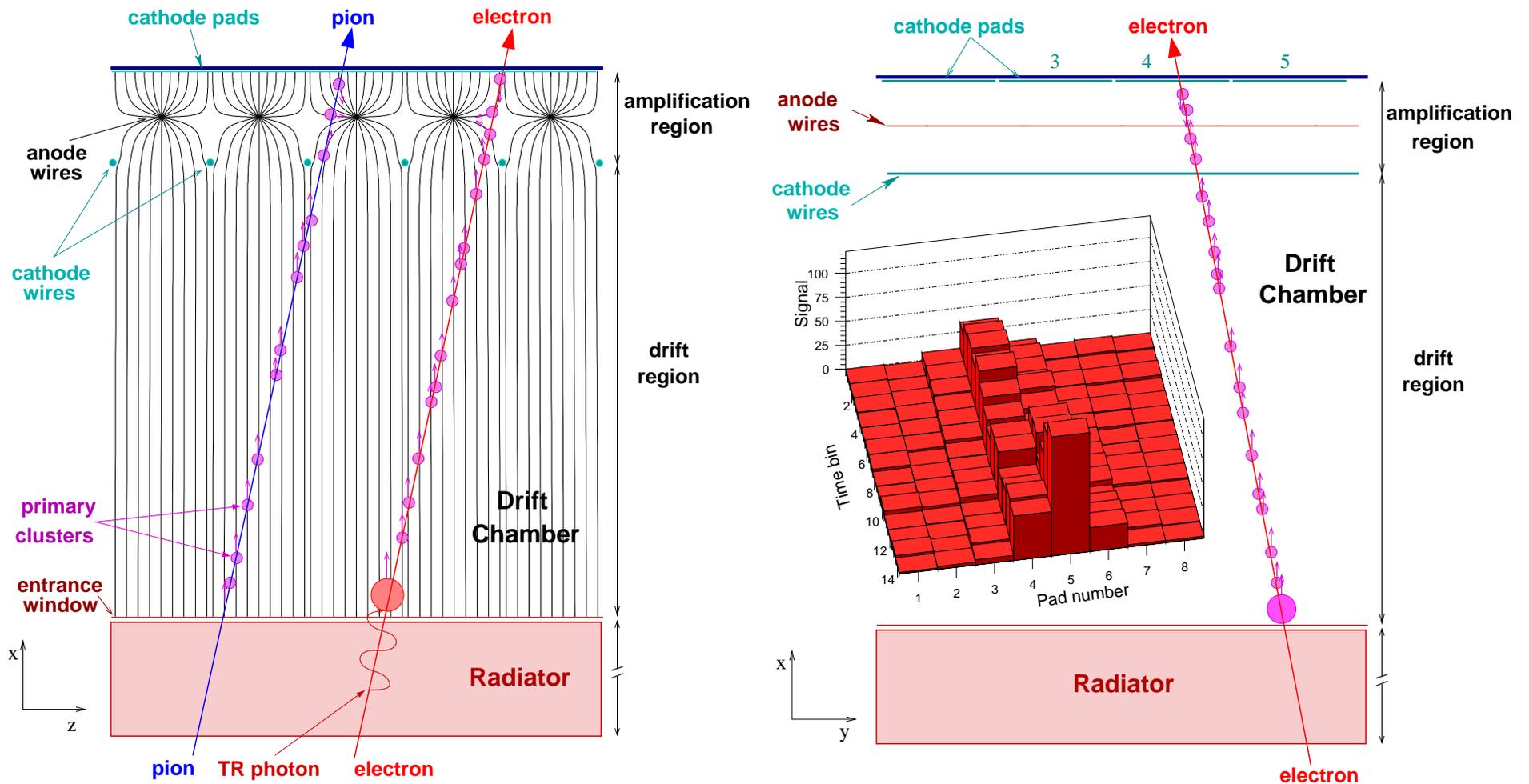
Silicon Pixel/Drift/Strip Detector (SPD, SDD, SSD)

ALICE – Time Projection Chamber (TPC)



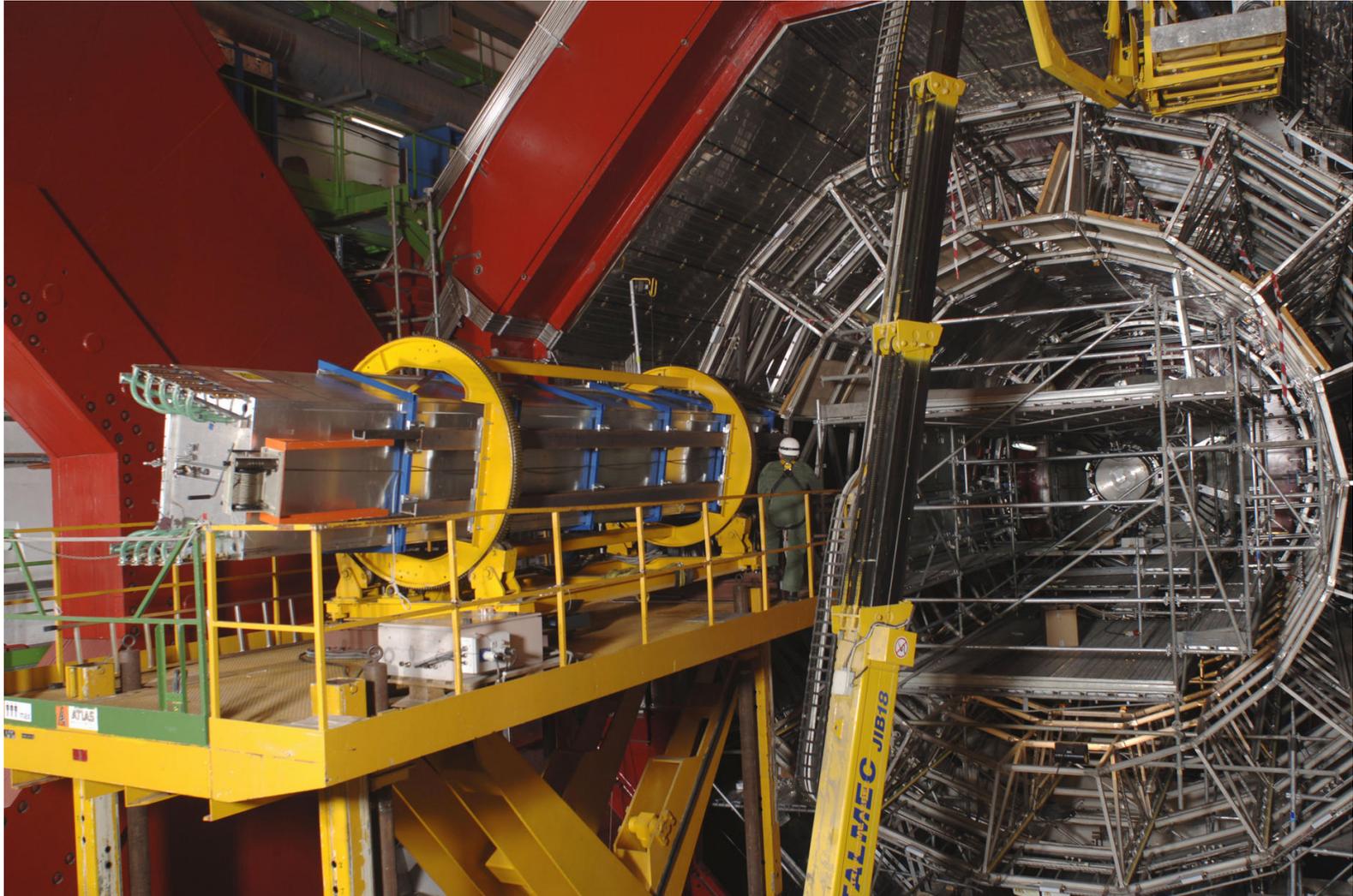
Gáztöltésű kamra, idő és hely 3D

ALICE – Transition Radiation Detector (TRD)



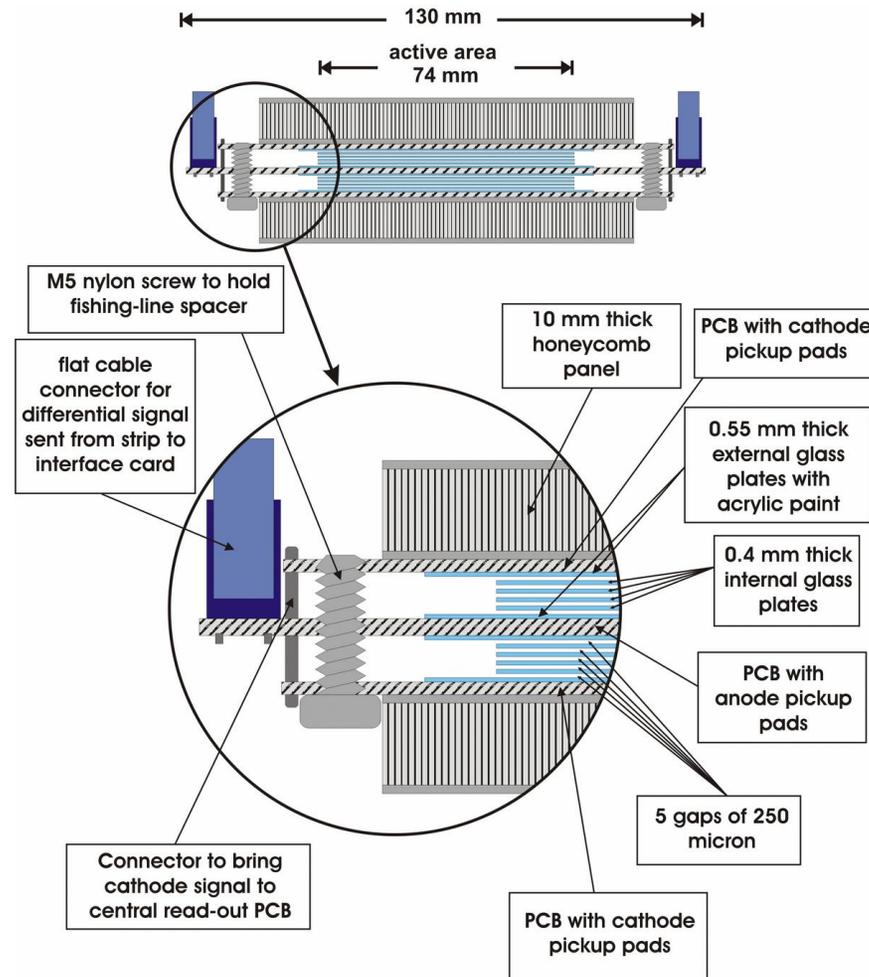
Elektronok azonosítása

ALICE – Transition Radiation Detector (TRD)



Elektronok azonosítása

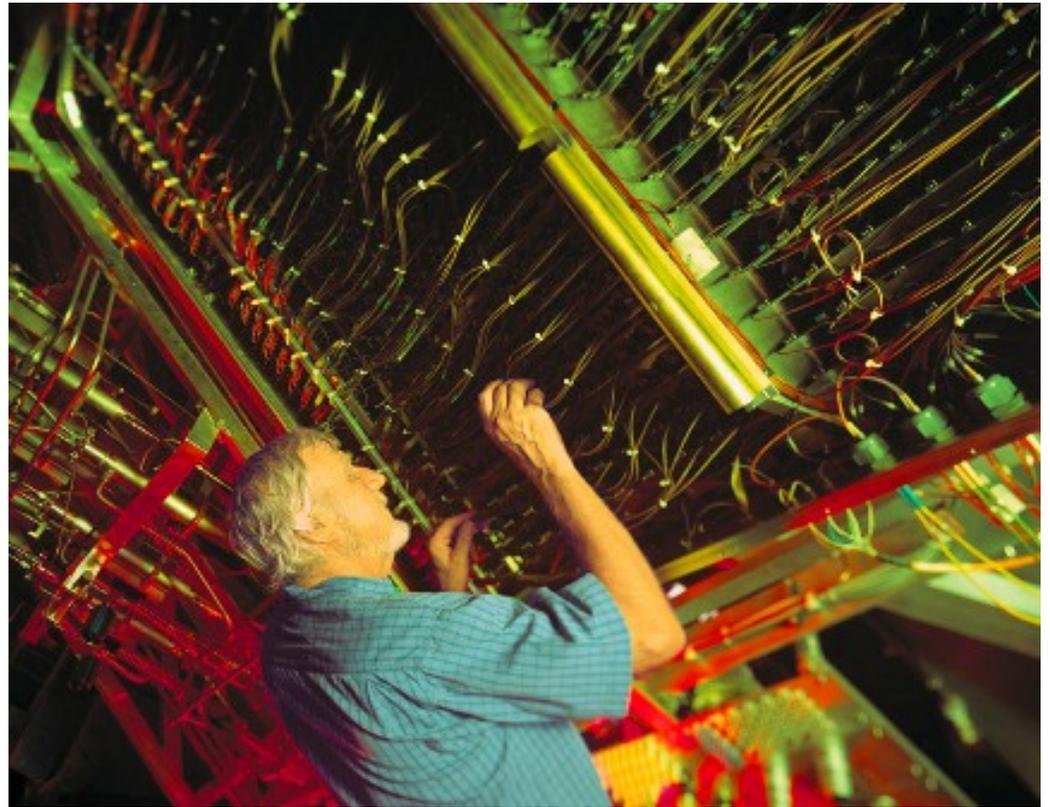
ALICE – Time of Flight (TOF)



Multigap resistive plate chambers (MRPC)

Repülési idő mérése

ALICE – High Momentum PID (HMPID)



Gyors részecskék azonosítása
Cserenkov detektor, gyűjtő tükörrel

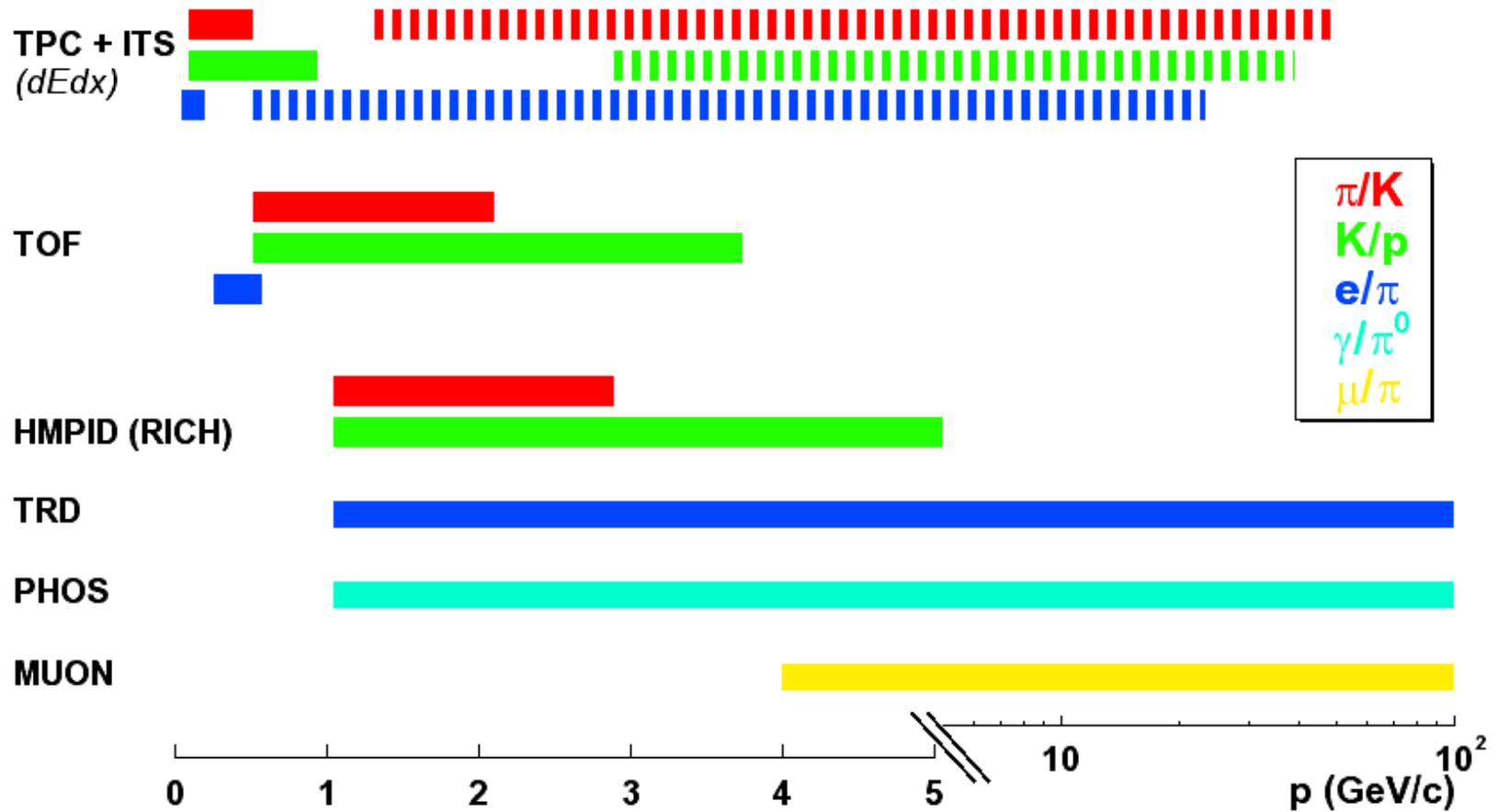
Részecskeazonosítás 3-5 GeV/c-ig

ALICE – Photon Spectrometer (PHOS)



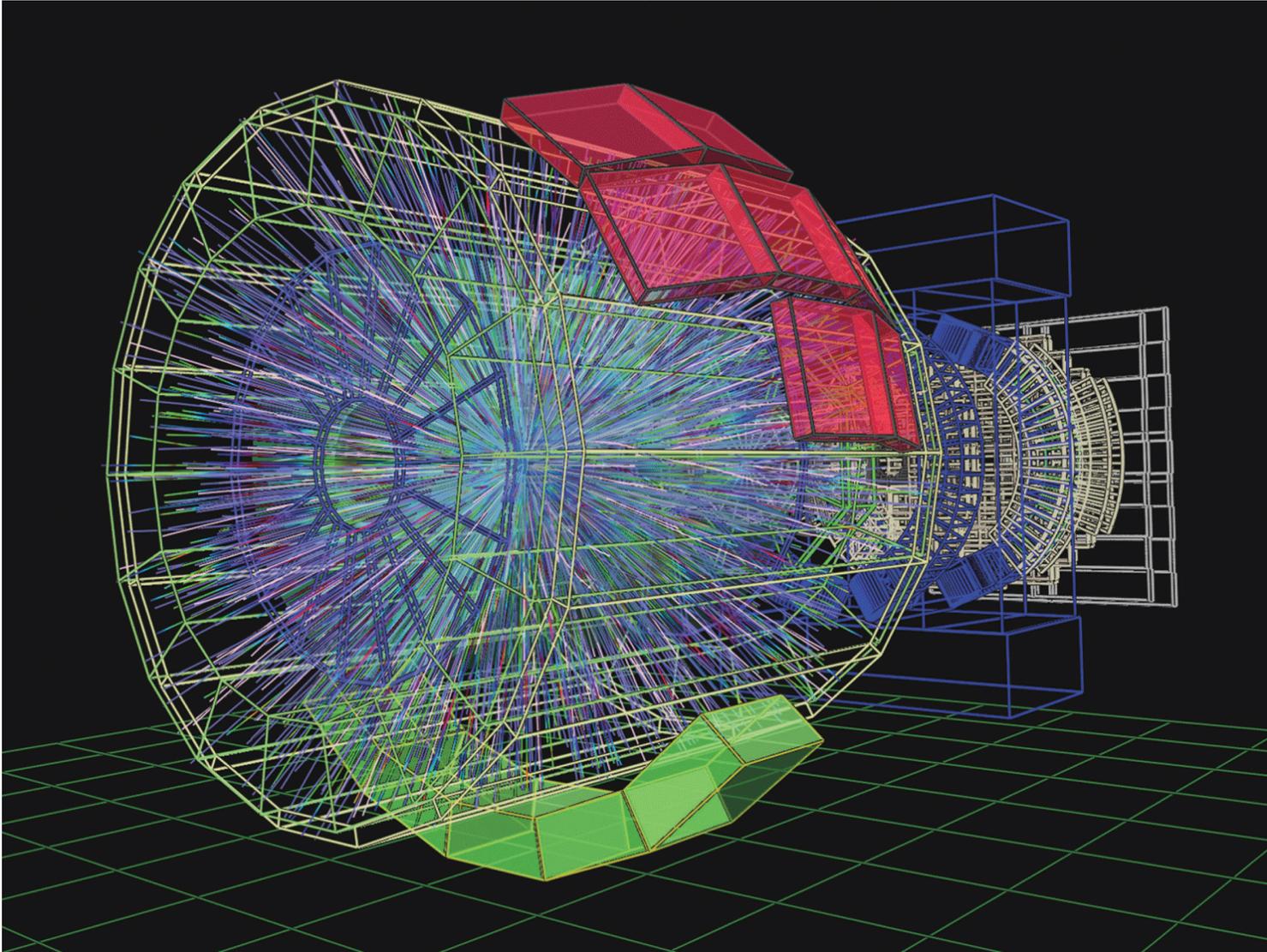
PbWO₄ kristályok

ALICE – részecskeazonosítás

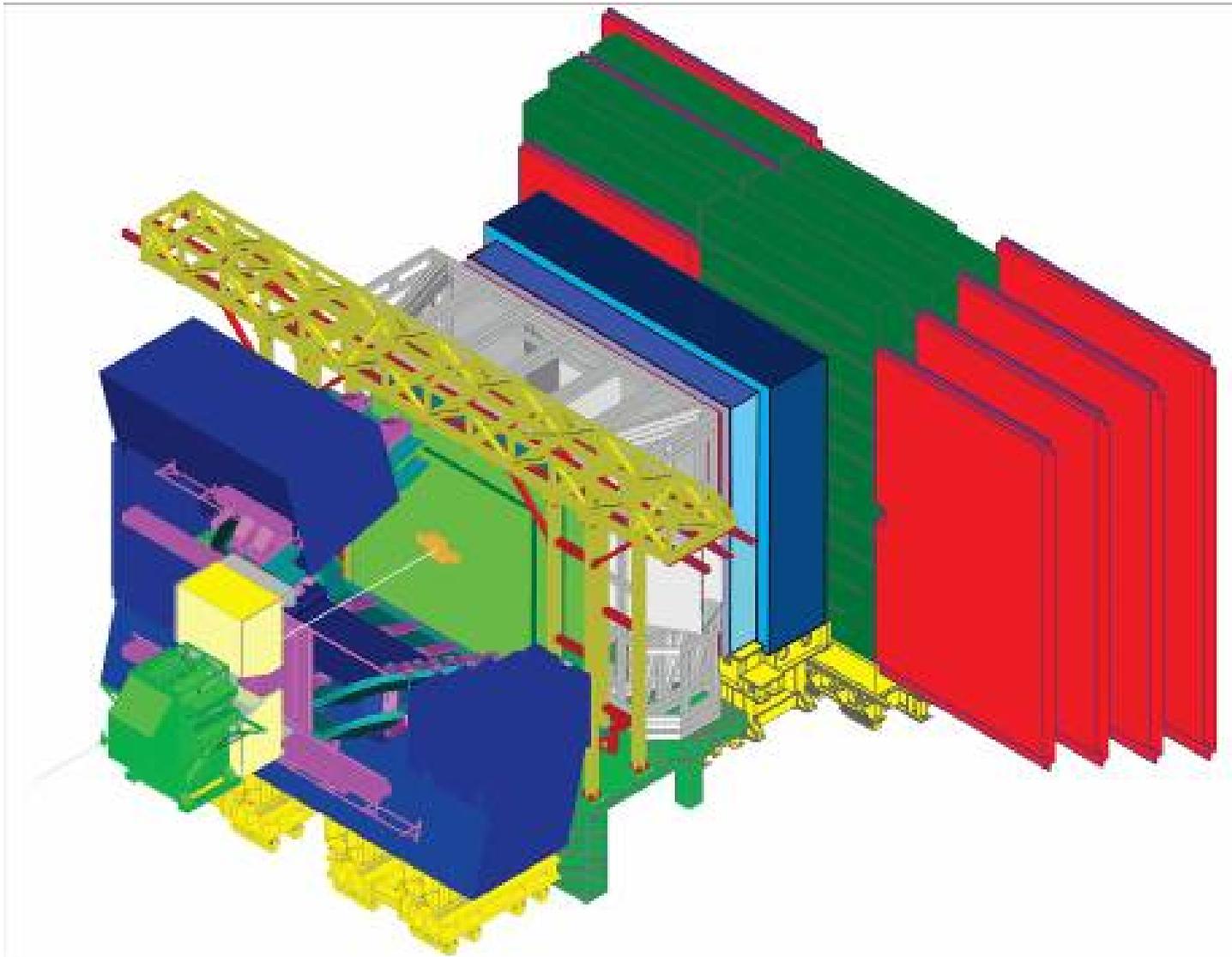


Széles tartomány

ALICE

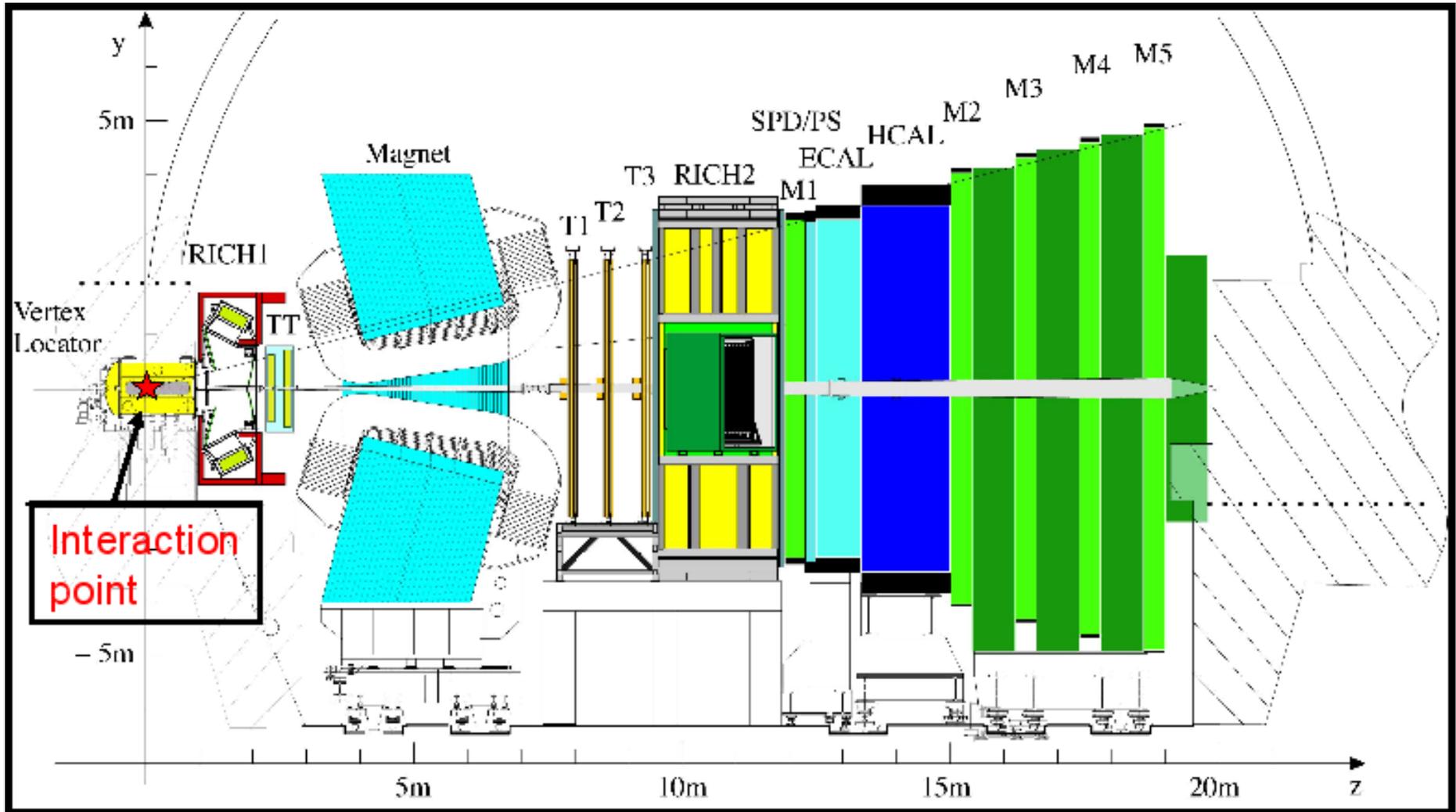


Egy Pb-Pb ütközés



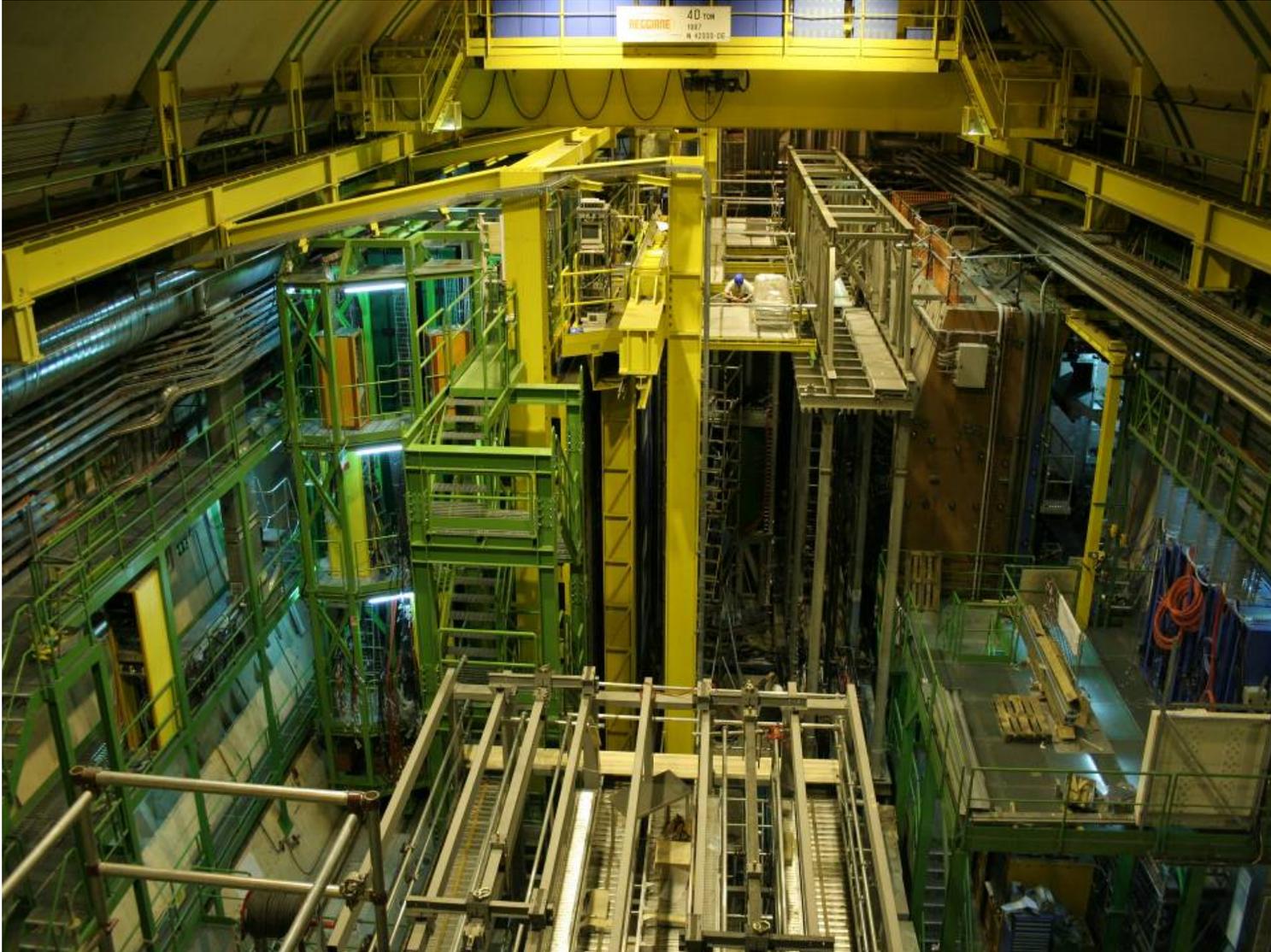
Spokesperson: Tatsuya NAKADA Deputy spokesperson: Roger FORTY
Technical coordinator: Werner WITZELING

LHCb



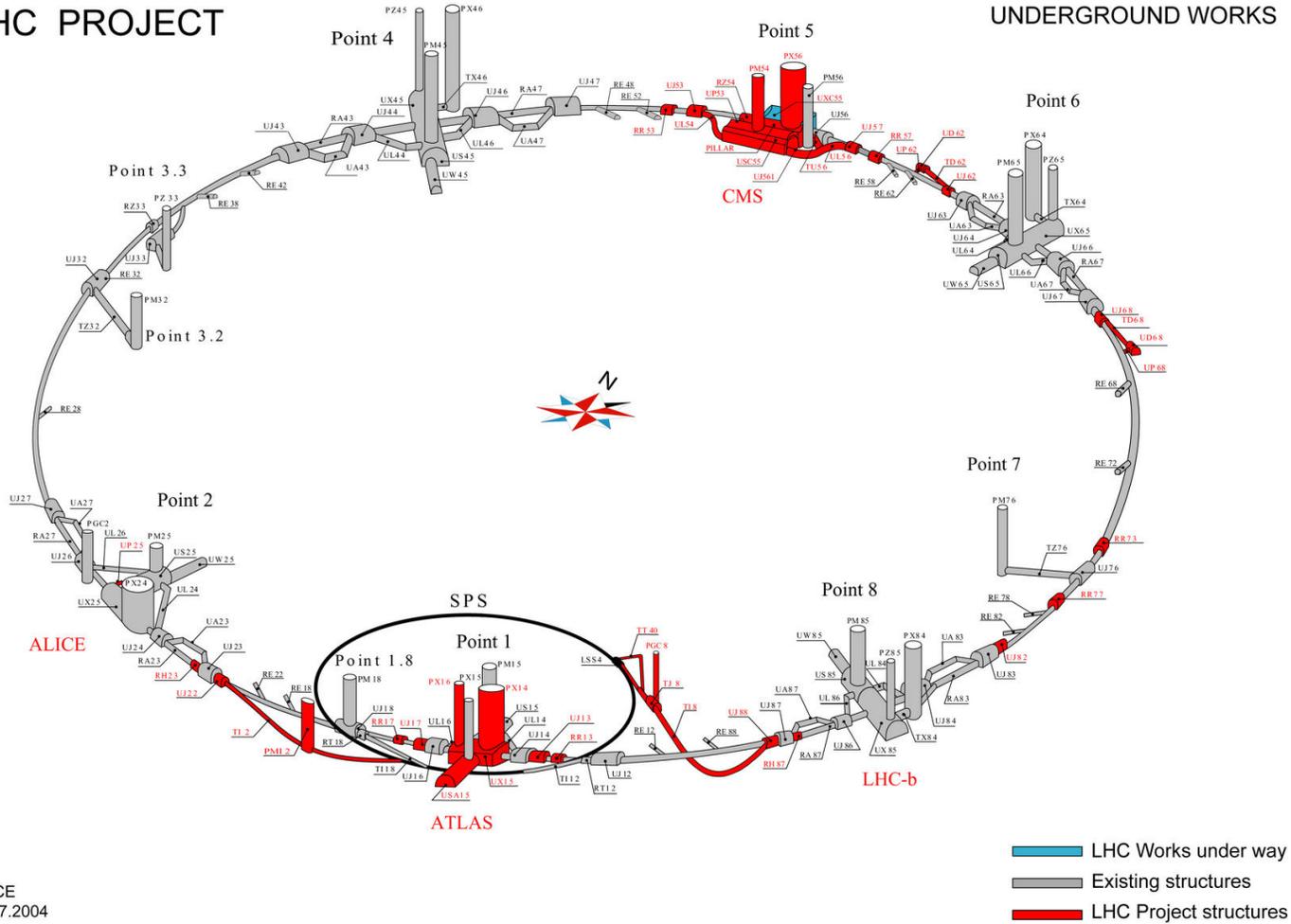
Új fizika keresése a CP sértésben és ritka B bomlások segítségével

LHCb



LHC PROJECT

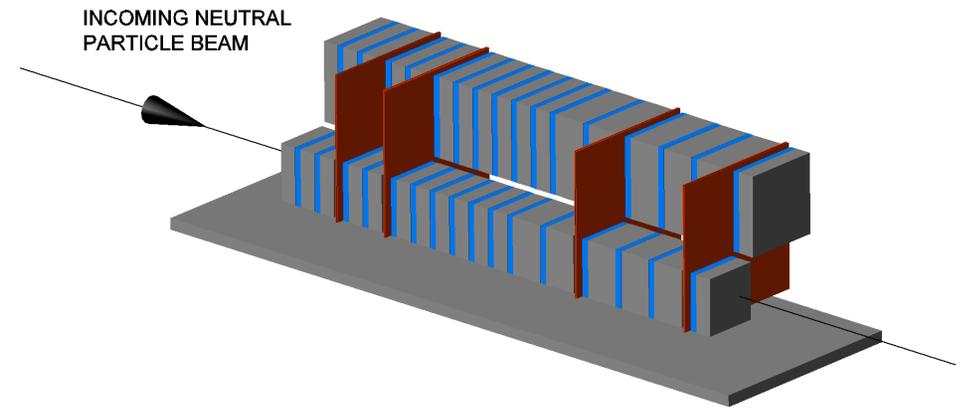
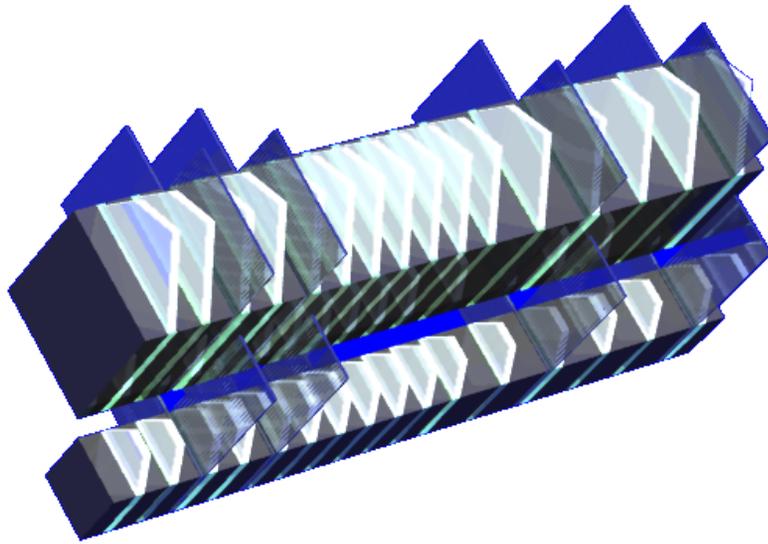
UNDERGROUND WORKS



TS-CE
06.07.2004

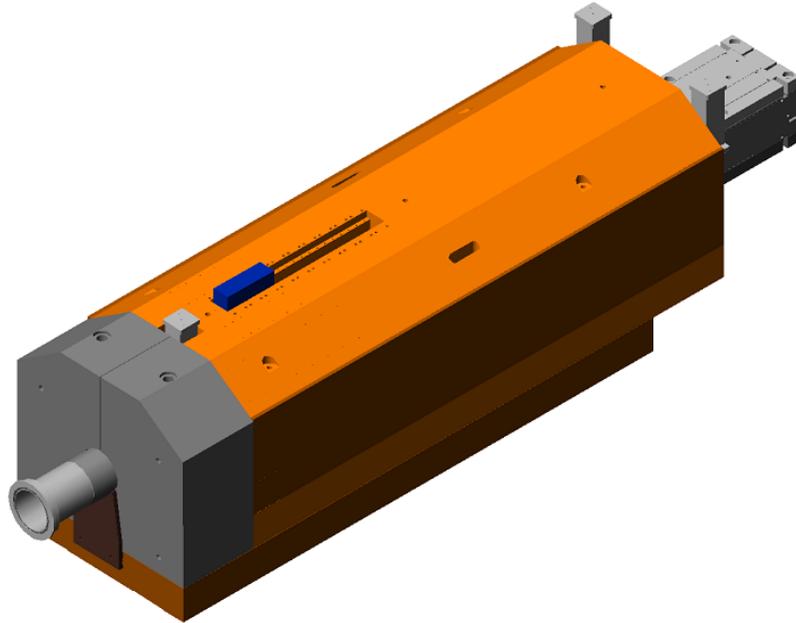
140 m-re az ATLAS kölcsönhatási pontjától

Spokesperson: Yasushi MURAKI, Deputy spokesperson: Oscar ADRIANI



Detector I : W kaloriméter és szcintillációs szálak
Detector II: W kaloriméter és szilícium mikrosztrip

Forward π^0 és n mérése – kozmikus záporok megértése



CMS most



CMS most

