

Jaderná fyzika vysokých energií

Michal Šumbera
Ústav jaderné fyziky AV ČR



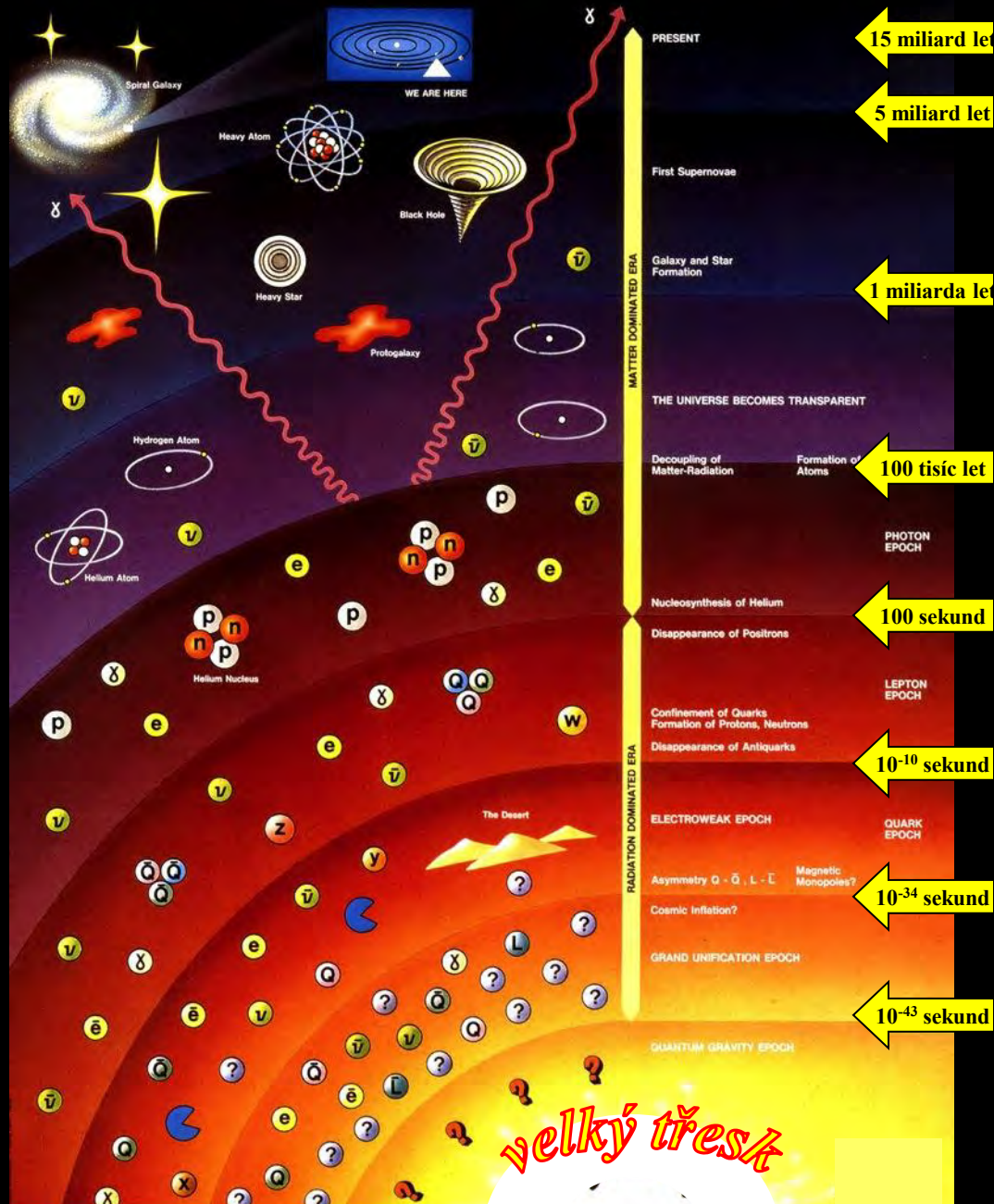
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



UPOZORNĚNÍ:

Ministr zdravotnictví varuje, že tato přednáška obsahuje zaujatou a neúplnou informaci, která může mít negativní vliv na zdraví a duševní pohodu těch, kteří očekávají či vyžadují něco jiného.

Historie vesmíru





MATTER DOM

RADIATION DOMINATED ERA

THE UNIVERSE BECOMES TRANSPARENT

Decoupling of Matter-Radiation

Formation of Atoms

10^{13} s

PHOTO EPOCH

Nucleosynthesis of Helium

100 sekund

Disappearance of Positrons

*uvěznění kvarků
vznik protonů a neutronů*

10 μ s

10^{-10} sekund

ELECTROWEAK EPOCH

QUARK EPOCH

Asymmetry $Q - \bar{Q}, L - \bar{L}$

Magnetic Monopoles?

10^{-34} s

Cosmic Inflation?

GRAND UNIFICATION EPOCH

Protogalaxy

Hydrogen Atom

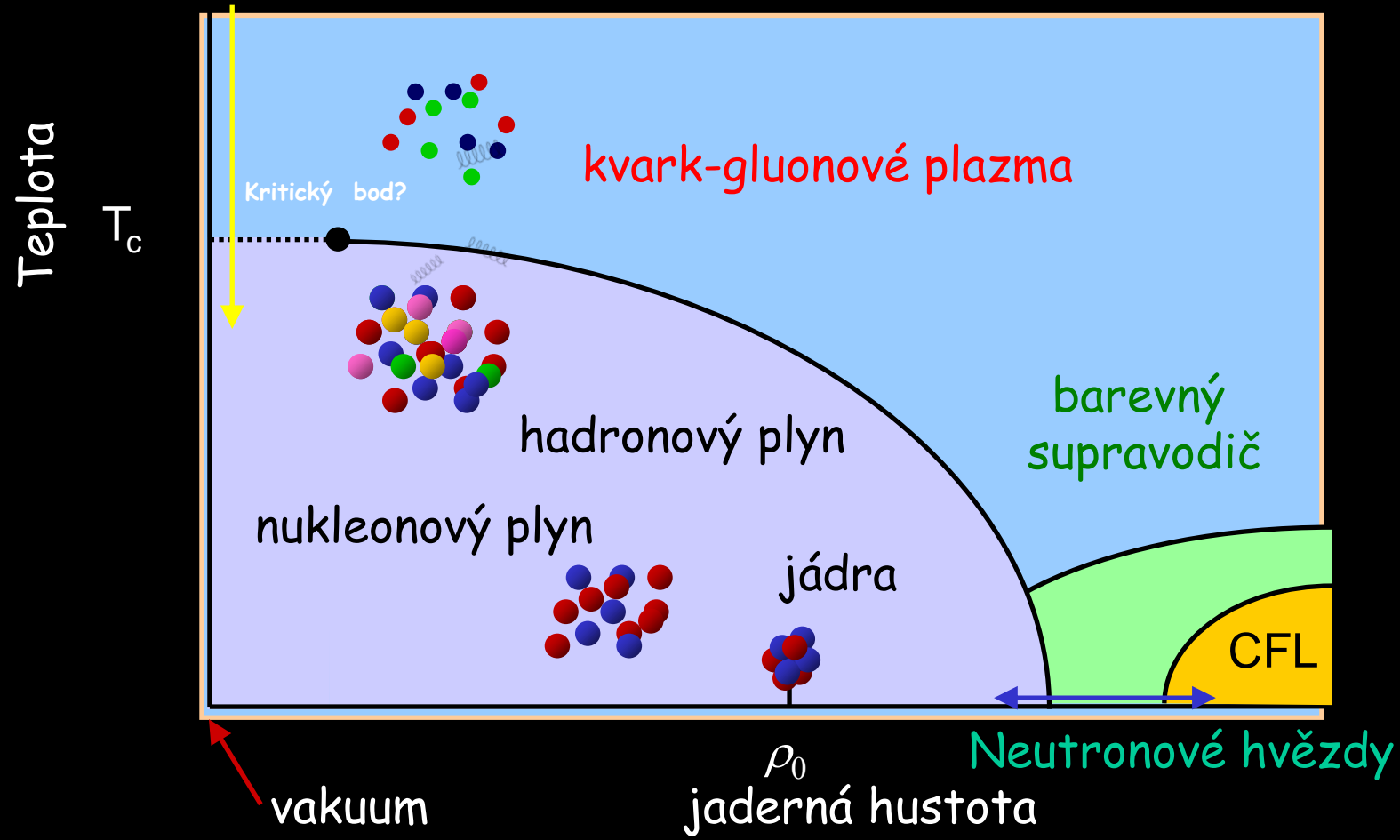
Helium Atom

Helium Nucleus

The Desert

Fázový diagram jaderné hmoty (QCD)

Ranný vesmír

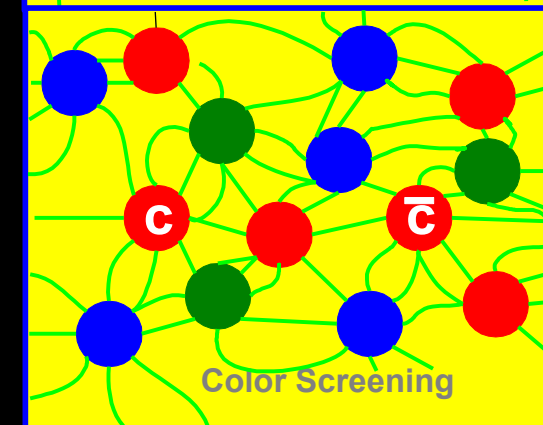
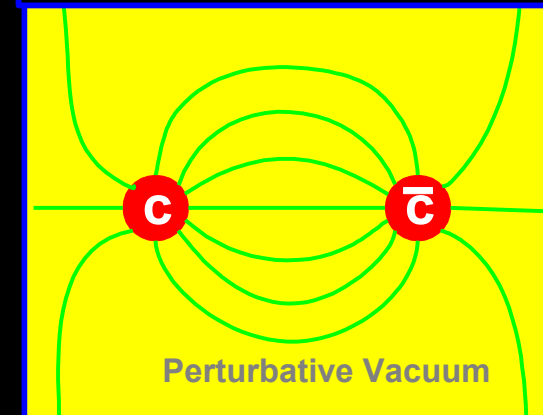
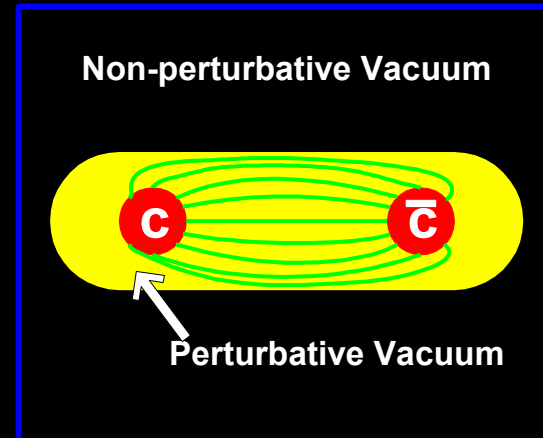


D.J. Gross, H.D. Politzer & F. Wilczek
Nobelova cena za fyziku v roce 2004

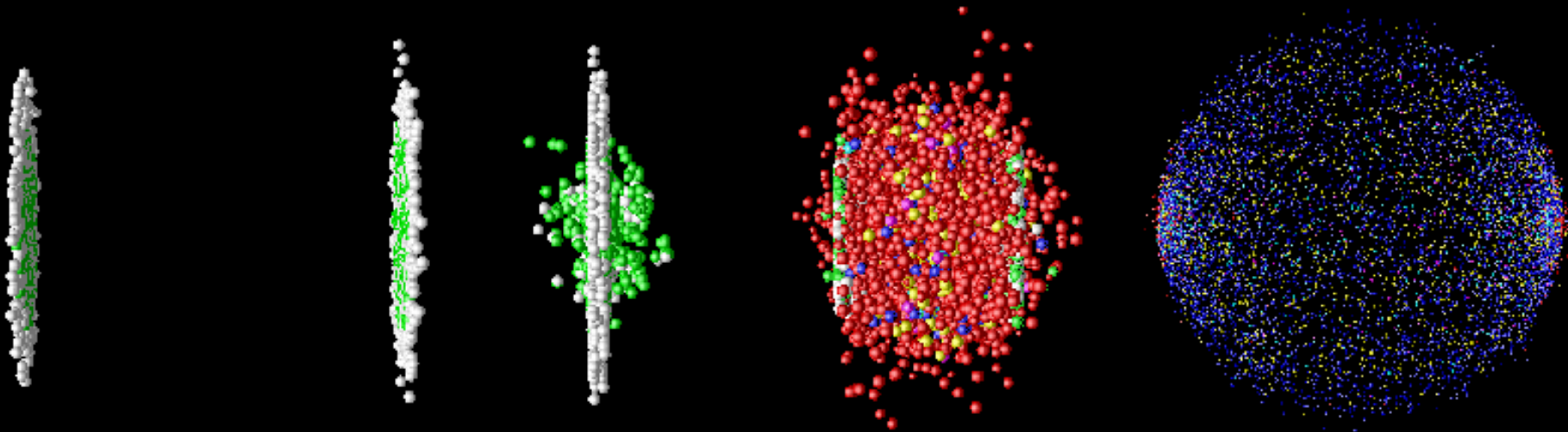
Fázové přechody QCD

□ Studujeme neporuchové "vakuum", které vězní kvarky, tím, že jej „roztavíme“

- Experimentální metoda:
 - Vysokoenergetické srážky těžkých jader
- Experimentální měření:
Užíváme sondy/signály, které
 - Sami vznikají
 - Jsou citlivé ke všem časovým škálám srážky



Srážky relativistických jader: malý „velký třesk“ v laboratoři



Au + Au @ RHIC

How much
energy
in each
collision?

$$1.6 \times 10^{-19} \frac{J}{eV} \times 197 \times 200 GeV \sim 6 \mu J$$

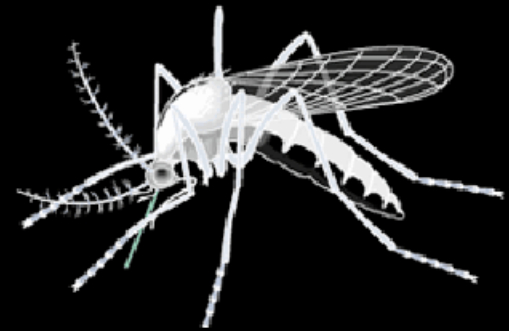
Au + Au @ RHIC

How much
energy
in each
collision?

$$1.6 \times 10^{-19} \frac{J}{eV} \times 197 \times 200 GeV \sim 6 \mu J$$



Consider
two mosquitos
colliding...

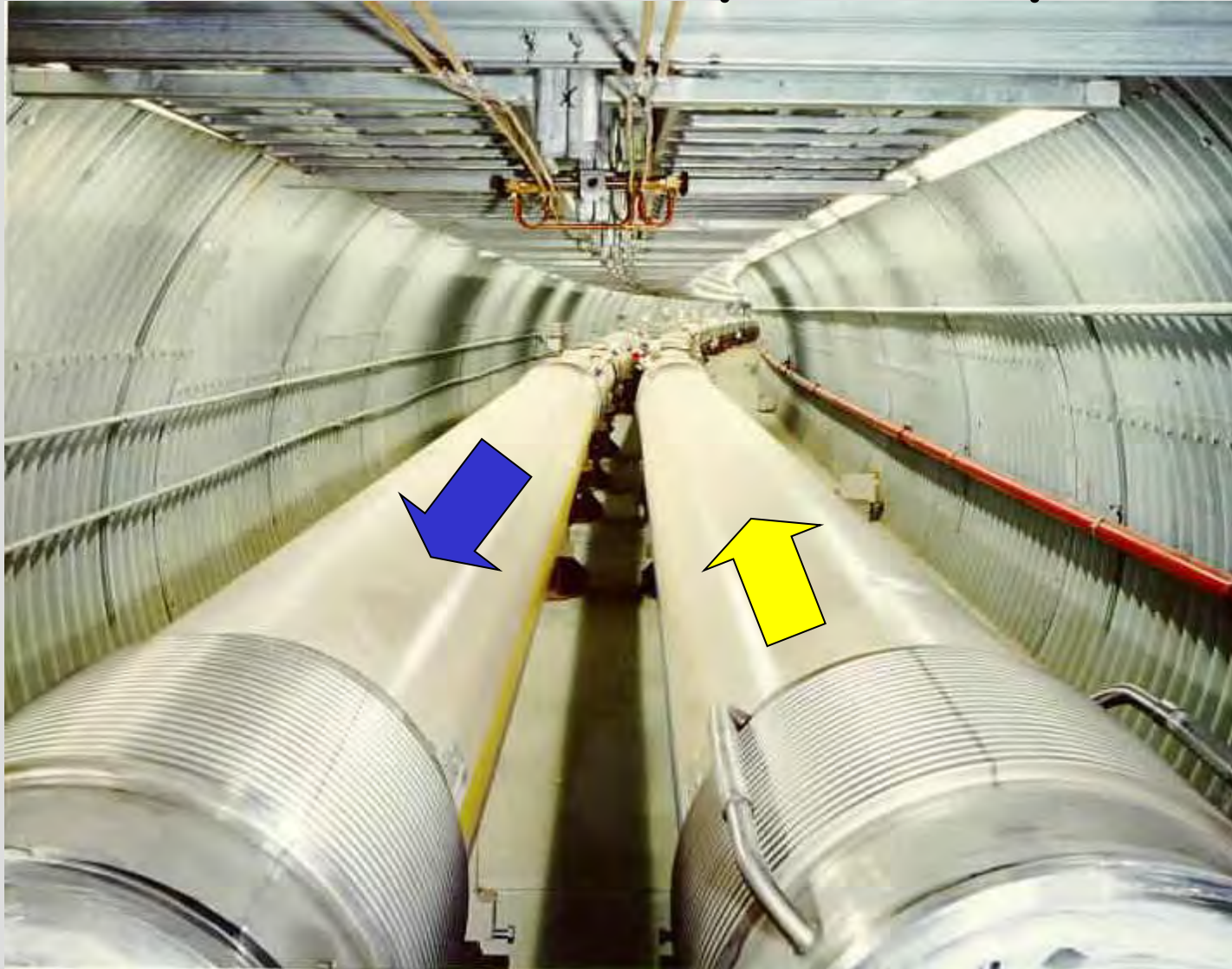


$$2 \times \frac{1}{2} mv^2 = (1g) \times (10cm/s)^2 = 10 \mu J$$



Butch Cassidy and the Sundance Kid. Copyright: Twentieth Century Fox Films Inc.

Relativistic Heavy Ion Collider - „srážec relativistických těžkých iontů“



RHIC: pohled z družice



Brookhavenská
národní laboratoř



RHIC: pohled z letadla



obvod: 3,8 km

<http://www.rhic.bnl.gov>

Urychlovačový komplex RHIC



1. Tandem Van de Graaff
2. Heavy Ion Transfer Line
3. Booster
4. Alternating Gradient Synchrotron (AGS)
5. AGS-to-RHIC Transfer Line
6. Prstenek RHIC:

~1700 supravodivých magnetů

Původně budovaný jako urychlovač protonů ISABEL (do roku 1981)

Po spuštění urychlovače $Sp \bar{p}S$ v CERN byl projekt prohlášen za nekompetitivní a jeho výstavba ukončena. Oživení (RHIC) od roku 1985.

Experimenty na RHIC

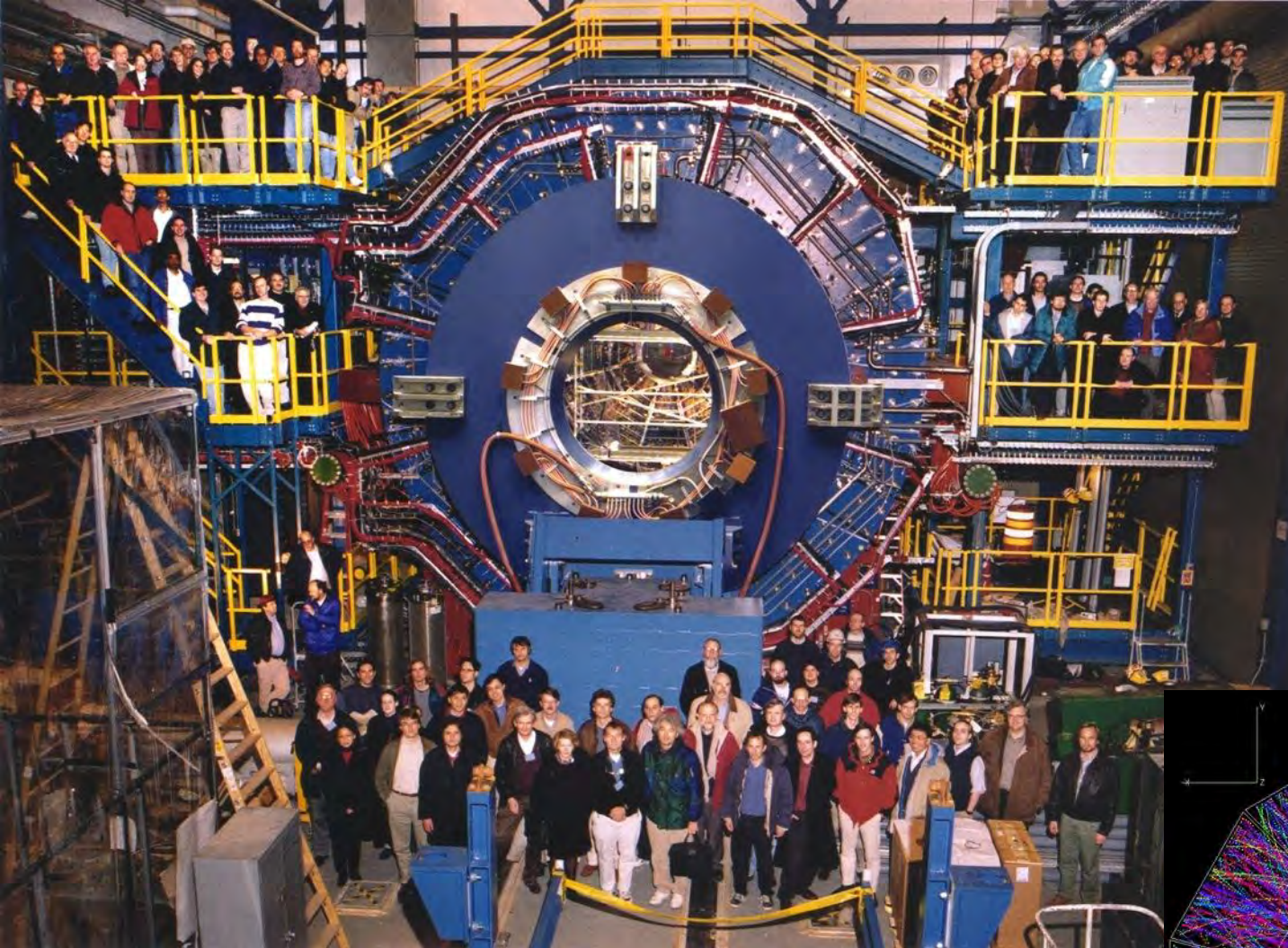


2 velké:
PHENIX
STAR
více než 400
vědčů a
techniků

2 menší:
BRAHMS
PHOBOS

Státy účastníci se výzkumu na RHIC





The

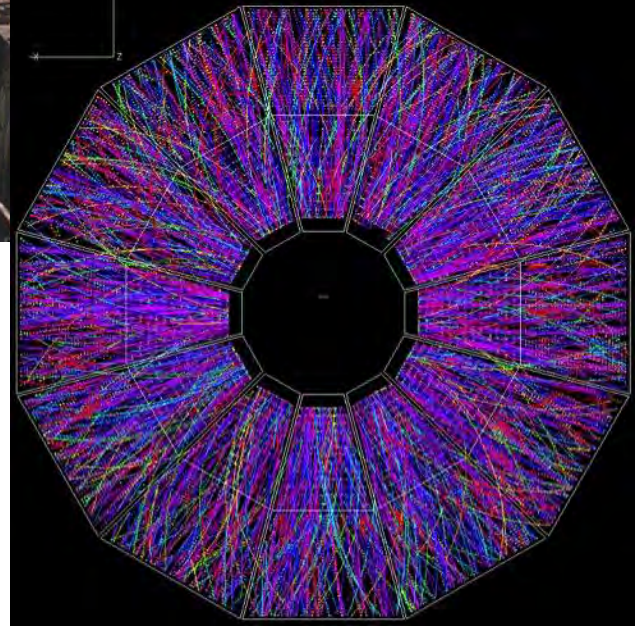
Collaboration

Solenoid Tracker At RHIC

522 spolupracovníků

51 institucí

12 zemí



STAR <http://www.star.bnl.gov/>

Office of High Energy Physics of the U.S. Department of Energy's Office of Science
U.S. National Science Foundation

Federal Ministry of Education and Research of Germany

National Institute of Nuclear Physics and Particle Physics of the National Center for Scientific
Research of France

United Kingdom Engineering and Physical Sciences Research Council

Research Supporting Foundation of the State of Sao Paulo, Brazil

Russian Ministry of Science and Technology

Ministry of Education of China

National Natural Science Foundation of China

Grant Agency of the Czech Republic (GAČR)

Department of Energy of India

Department of Science and Technology of India

Council of Scientific and Industrial Research of the Government of India

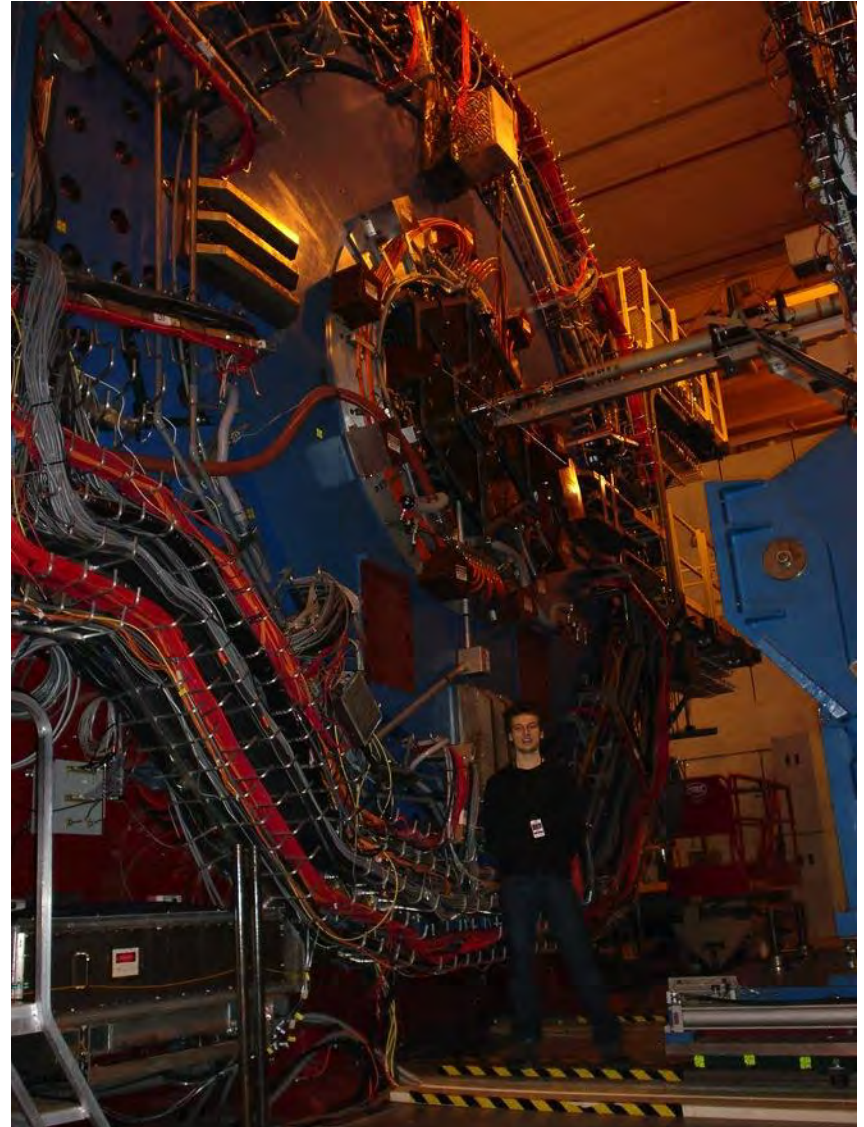
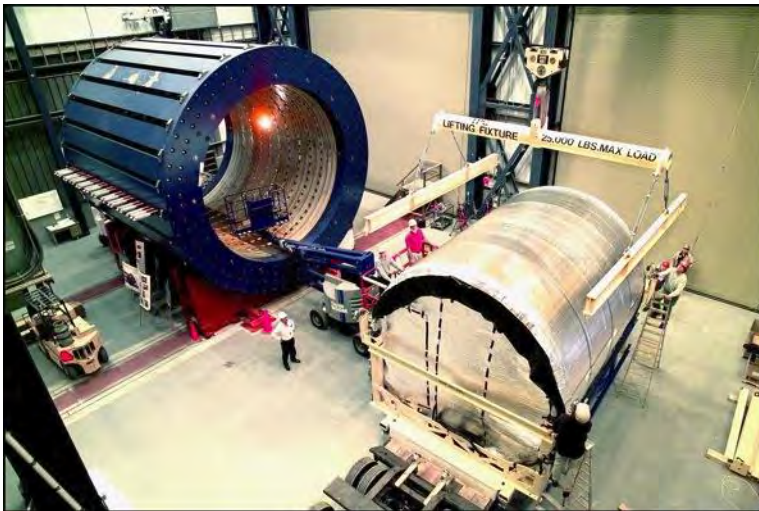
Swiss National Science Foundation

Netherlands Foundation for Fundamental Research on Matter

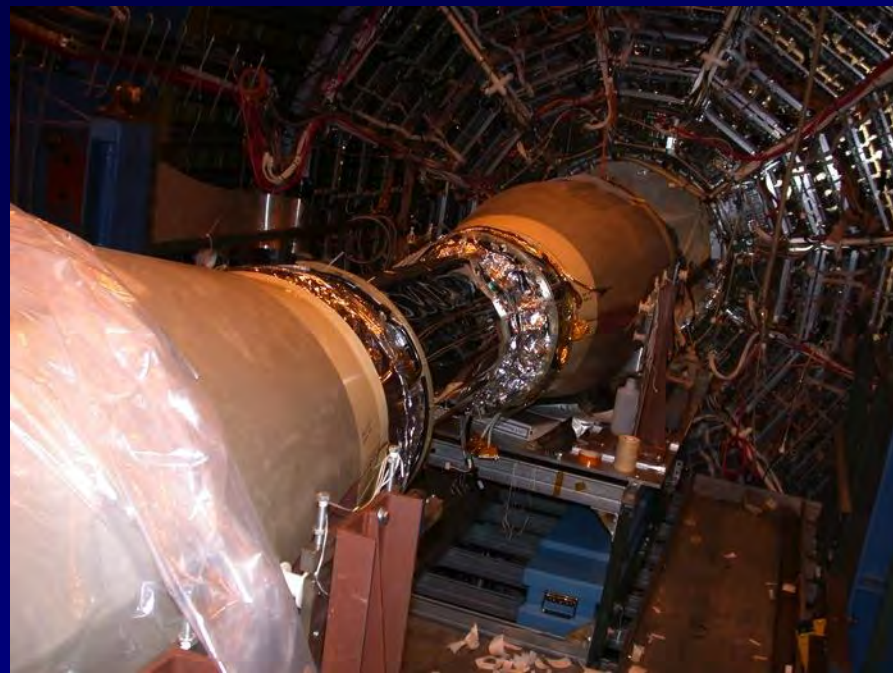
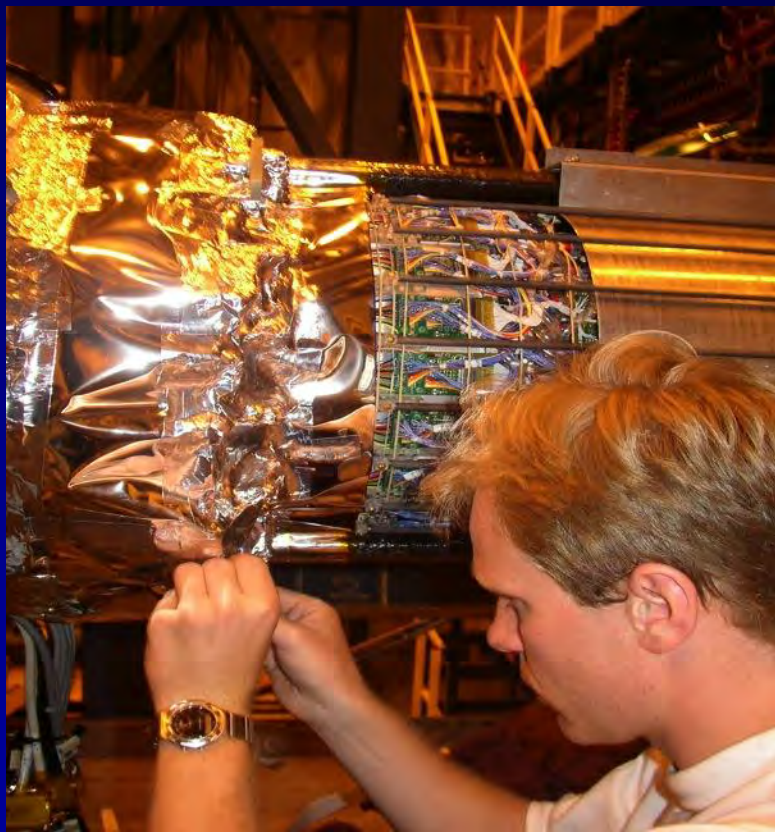
Polish State Committee for Scientific Research

Science and Technology Assistance Agency of Slovakia

Časově projekční komora



Křemíkový vrcholový detektor



První srážky jader zlata

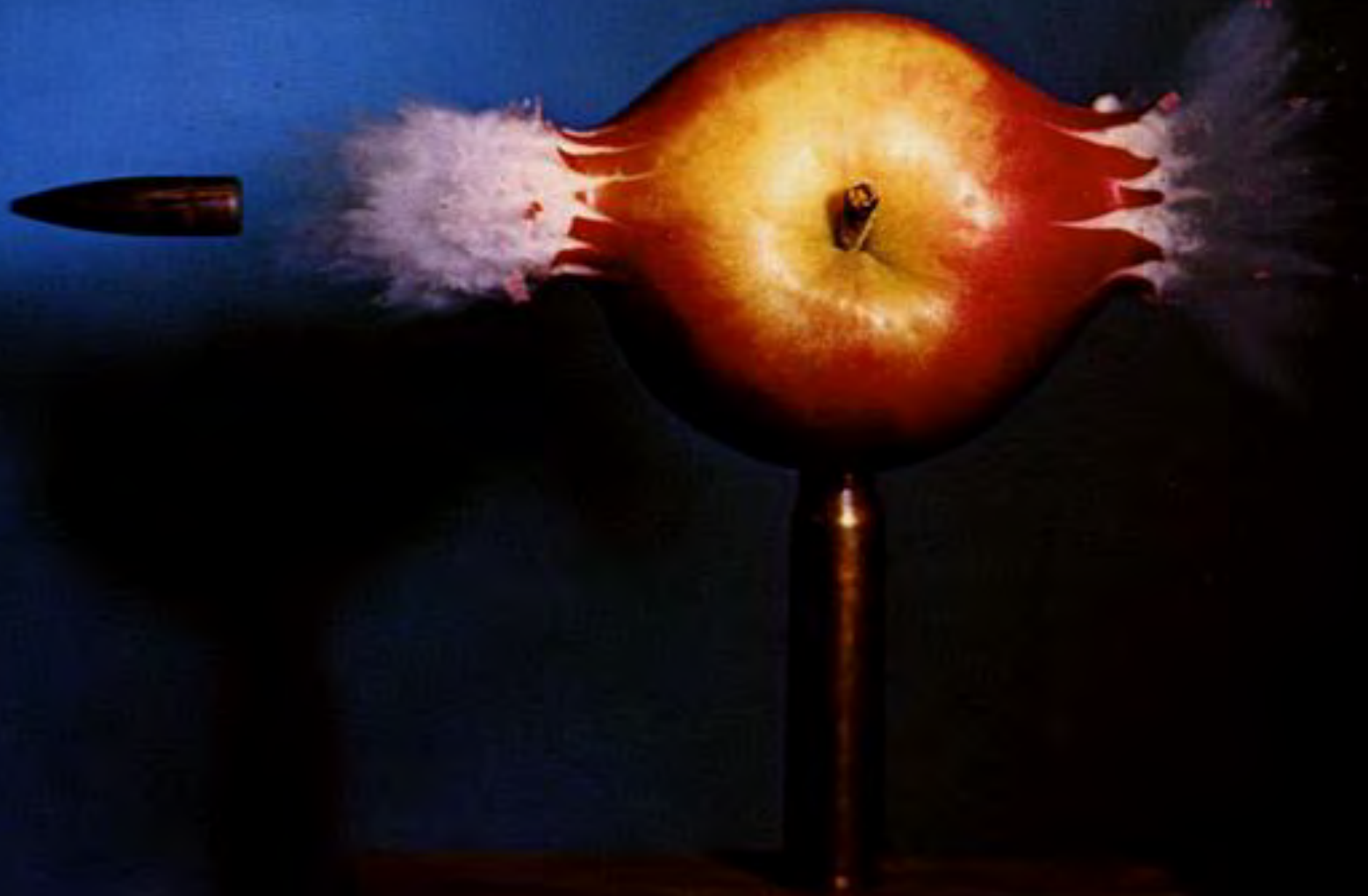


Řídící
centrum
experimentu
STAR
12.6.2000
večer

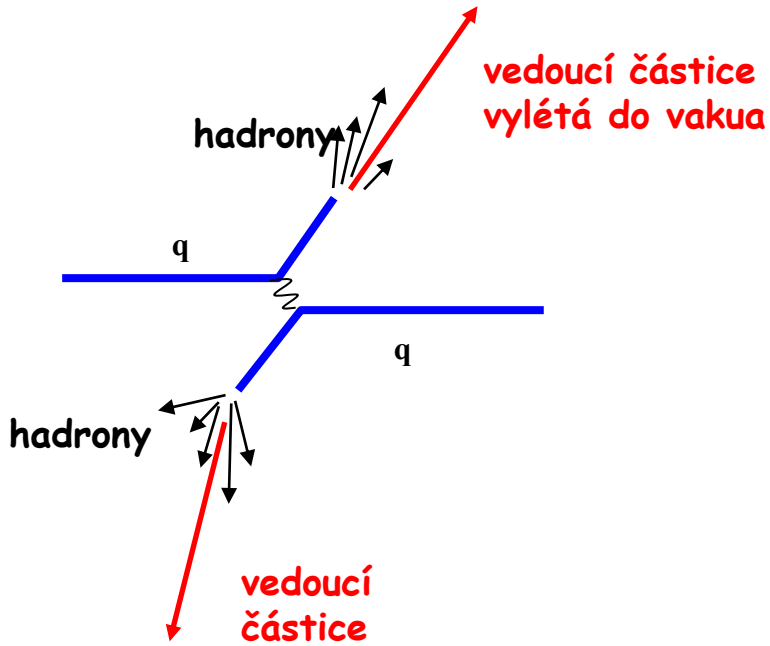
únor-březen 2005 (tamtéž)



Tomografie plazmatu

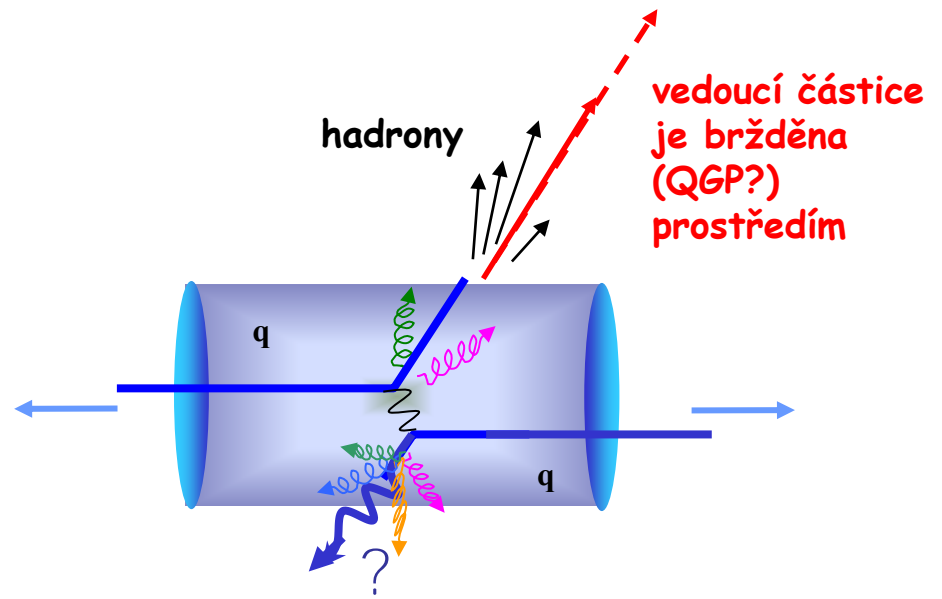


Produkce hadronových spršek ("jetů")



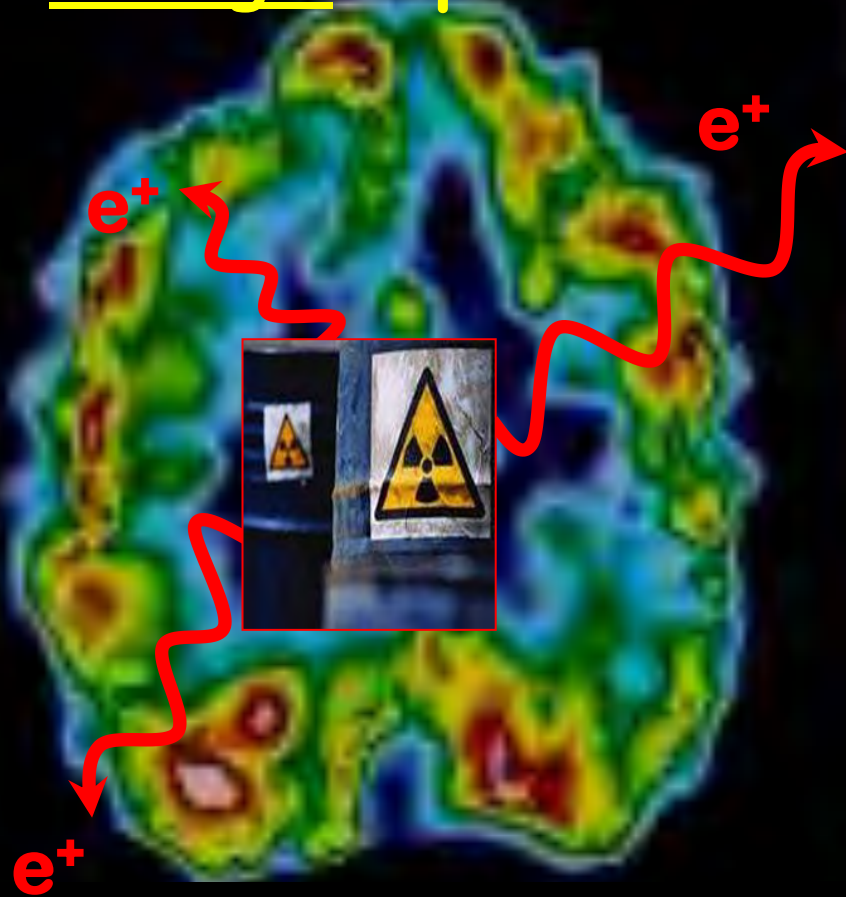
srážka dvou protonů

srážka dvou jader



Tomografie plazmatu

analogie s pozitronovou emisní tomografií (PET)

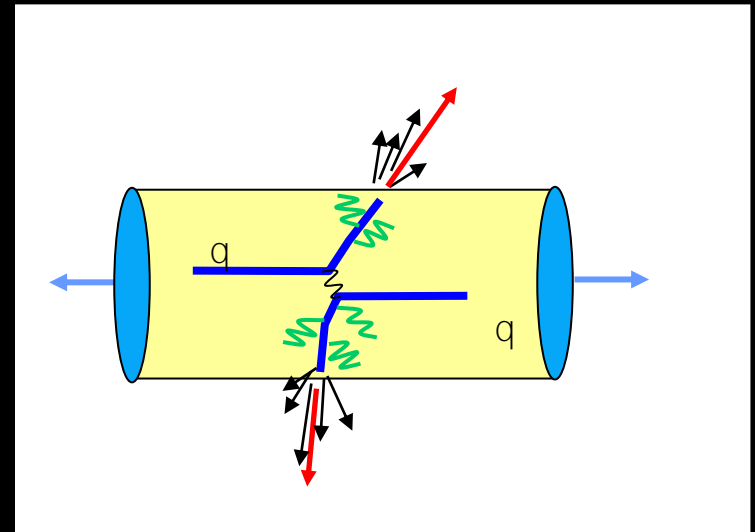


Radionuklidy:

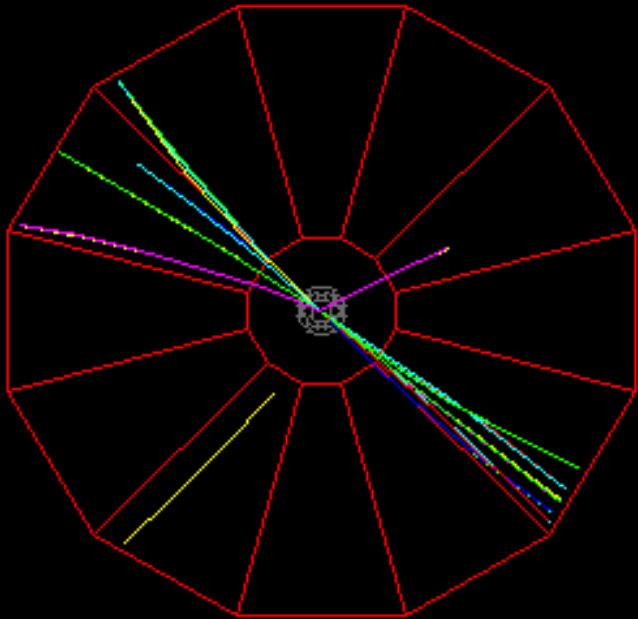
^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F

úlohu radionuklidů hrají tvrdé srážky k nimž dochází na počátku srážky jader.

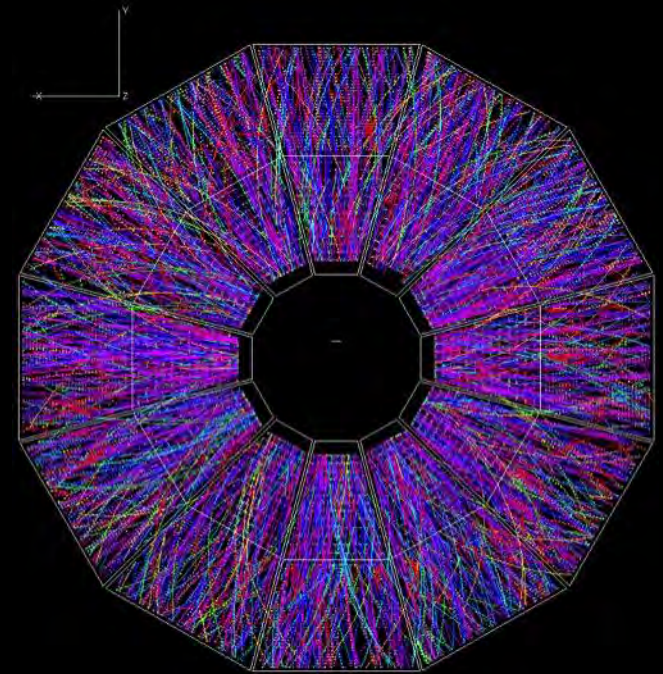
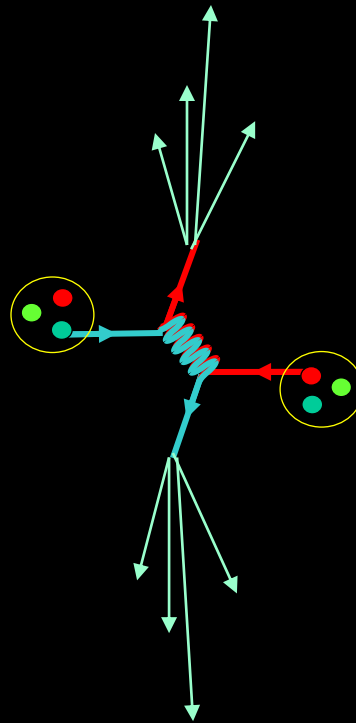
roli záření beta přebírají kvarky a gluony prolétávající plazmatem



Produkce „tvrdých“ částic v proton-protonových a jádro-jaderných srážkách na RHIC



$p+p \rightarrow \text{jet} + \text{jet}$

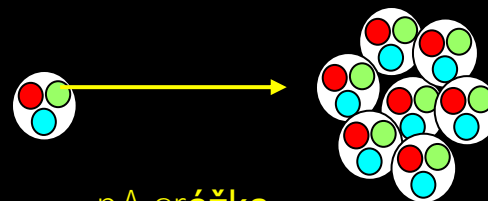


$\text{Au} + \text{Au} \rightarrow \text{cokoliv}$

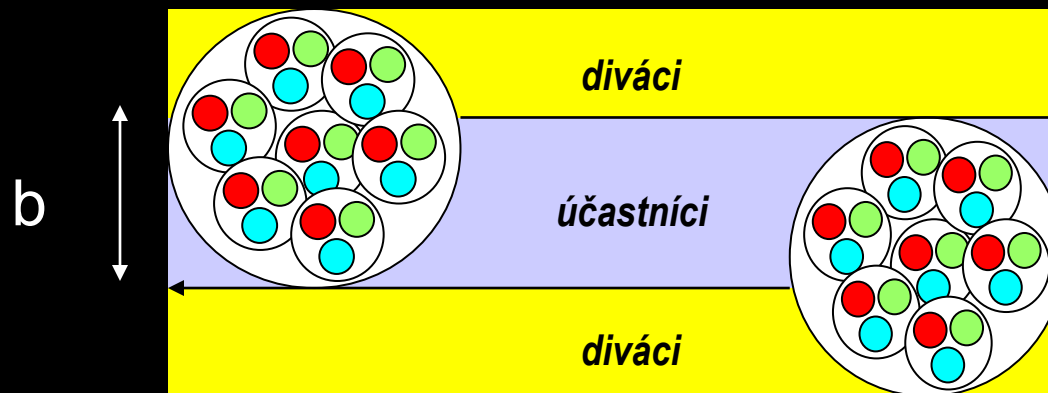
Srážky protonů a jader



pp srážka



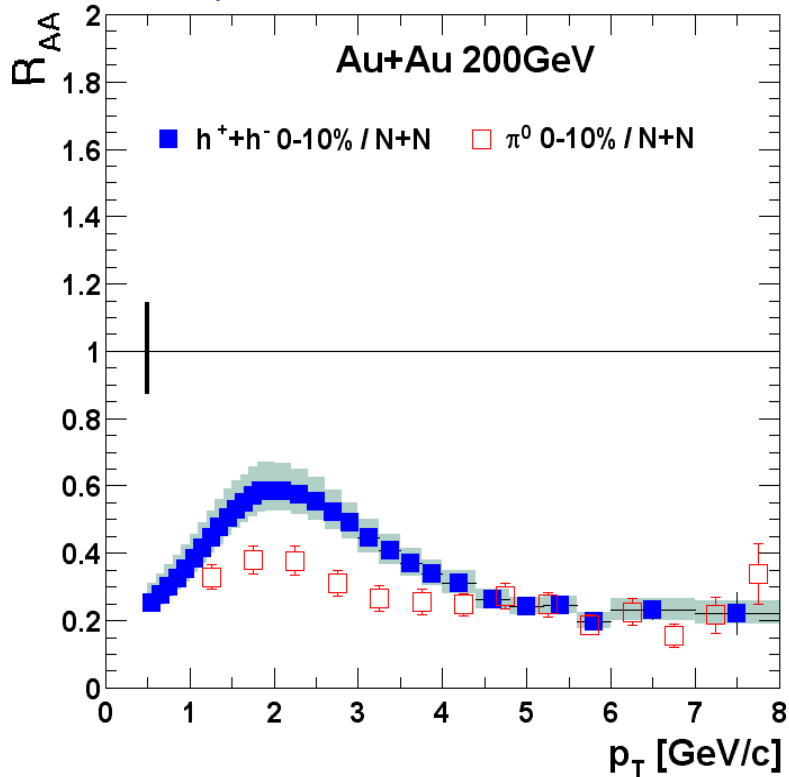
pA srážka



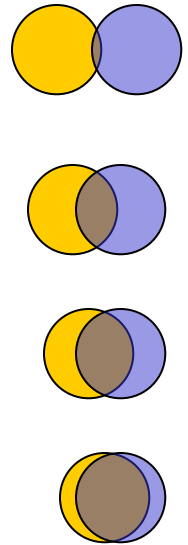
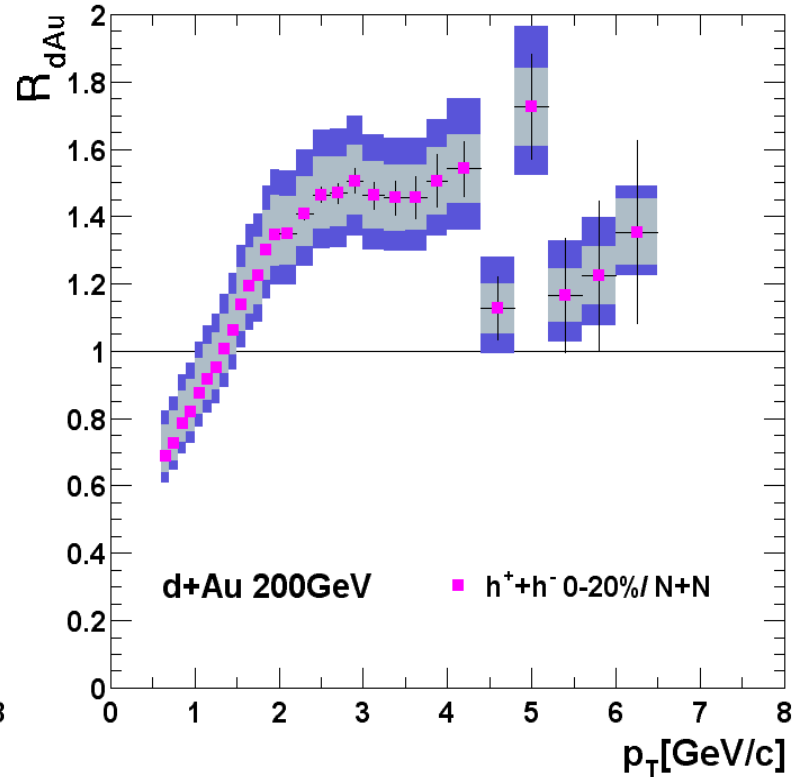
AA srážka

Potlačení „tvrdých“ částic plazmatem

Experiment: Au + Au

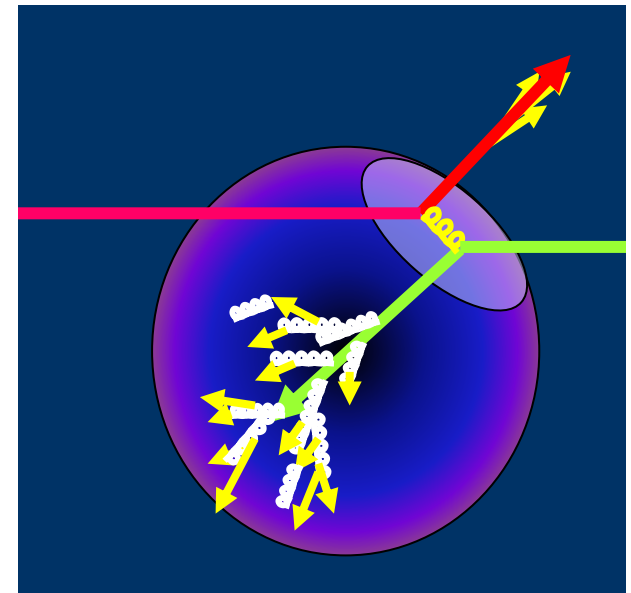
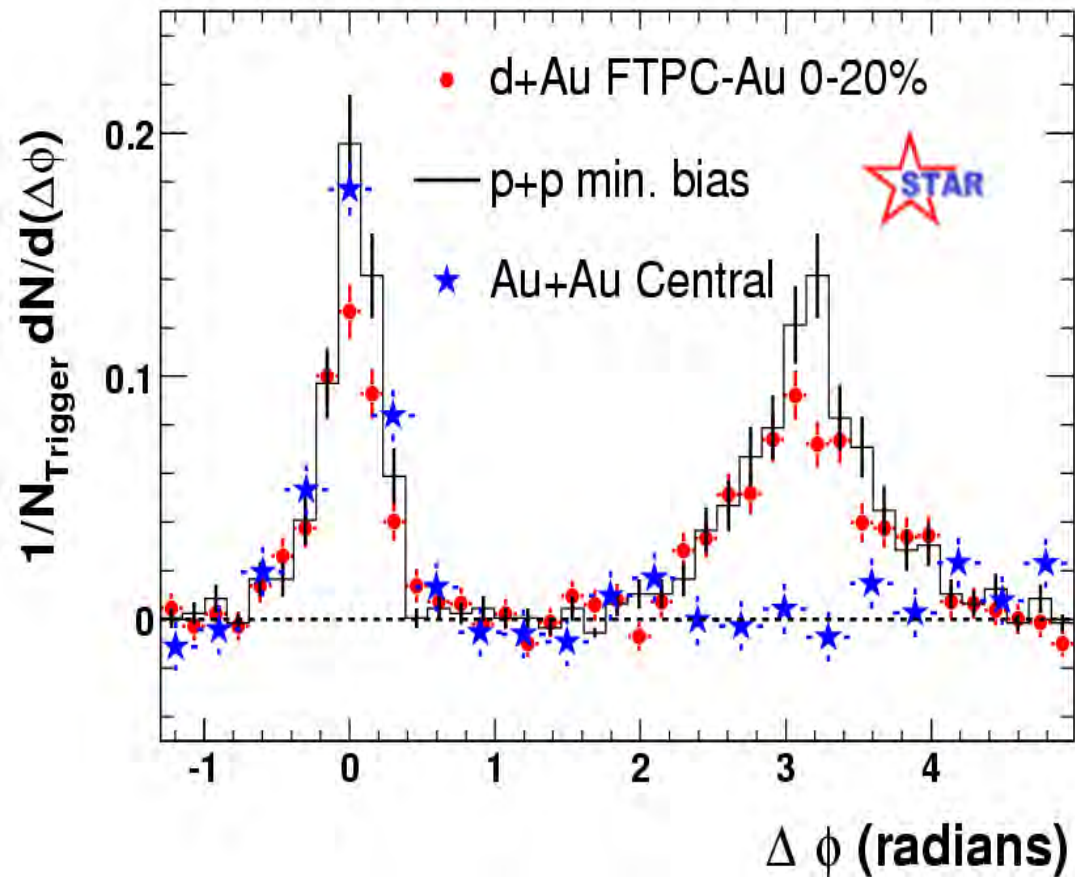


Kontrolní experiment: d + Au



Dramaticky rozdílná závislost na centralitě srážky

Otázka: „Jak moc je nová hmota neprůzračná pro tvrdé částice?“



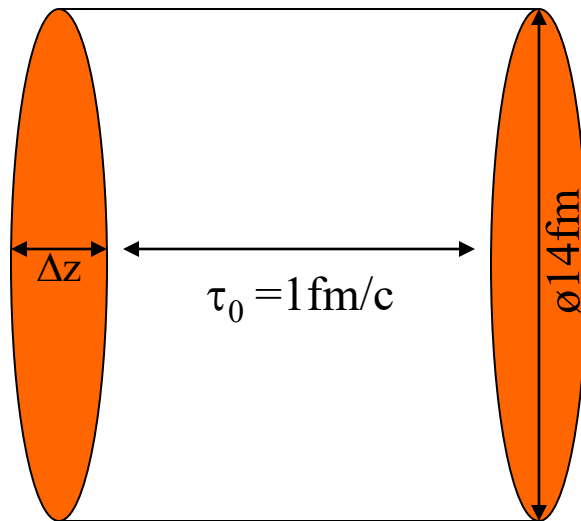
Odpověď: „Úplně“

Jak hustá je vzniklá hmota?



(podle Jamese Bjorkena)

$$\Delta z = \frac{2R}{\gamma} \simeq .14 \text{ fm}$$



$$\varepsilon_{Bj}(\tau_0) = \frac{1}{\pi R^2 \tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 0.000000000000001 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{Bj}(1 \text{ fm}/c) \approx 5.5 \text{ GeV}/\text{fm}^3 \approx 30 \times \rho_0 \approx 10 \times \rho_N$$

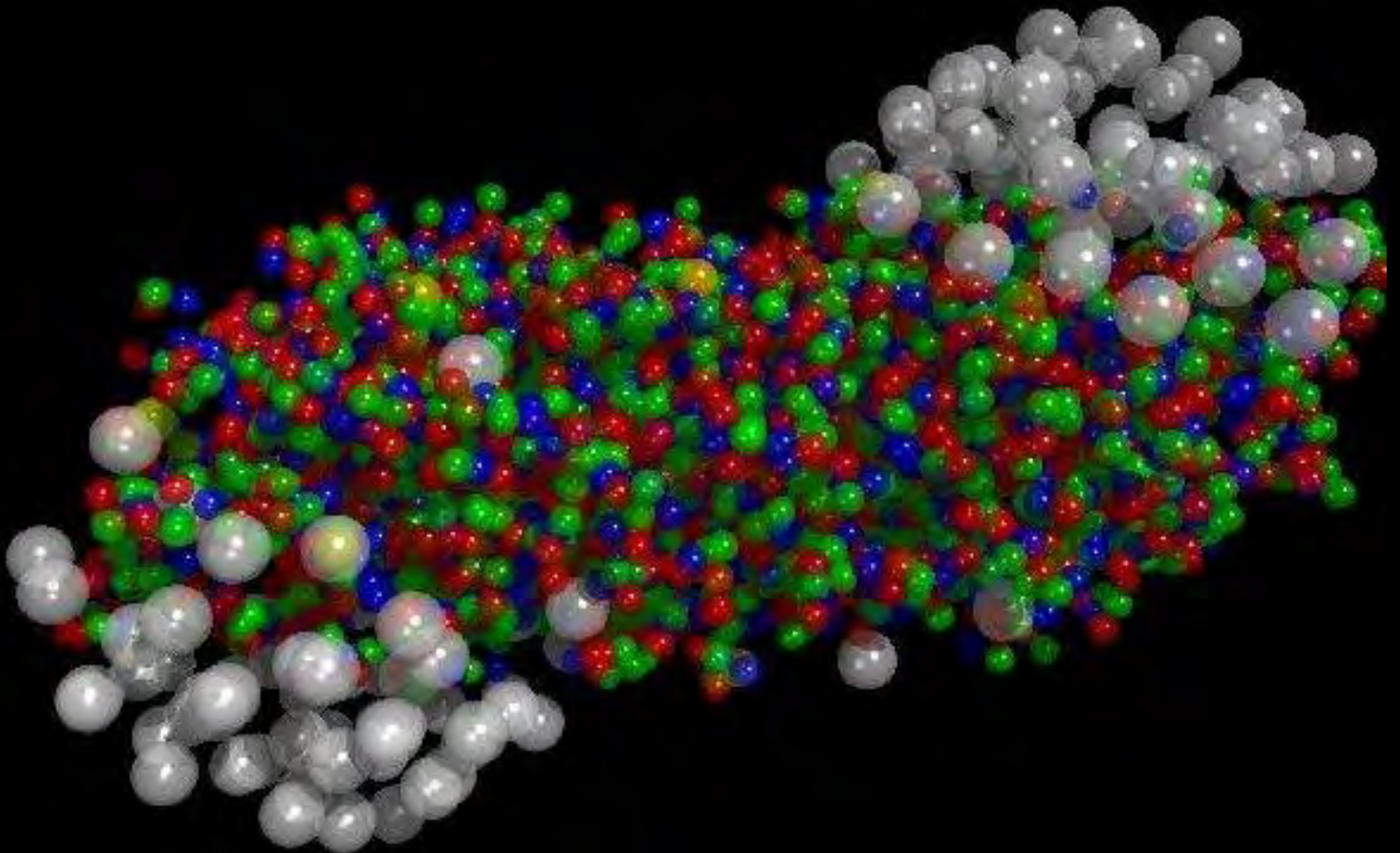
$$\varepsilon_{Bj}(0.35 \text{ fm}/c) \approx 16 \text{ GeV}/\text{fm}^3 \approx 95 \times \rho_0 \approx 30 \times \rho_N \quad (\tau_0 \approx 1/m_T)$$

$$\varepsilon_{Bj}(0.14 \text{ fm}/c) \approx 40 \text{ GeV}/\text{fm}^3 \approx 235 \times \rho_0 \approx 80 \times \rho_N \quad (\tau_0 \approx 1/Q_s)$$

ρ_0 = hustota atomového jádra

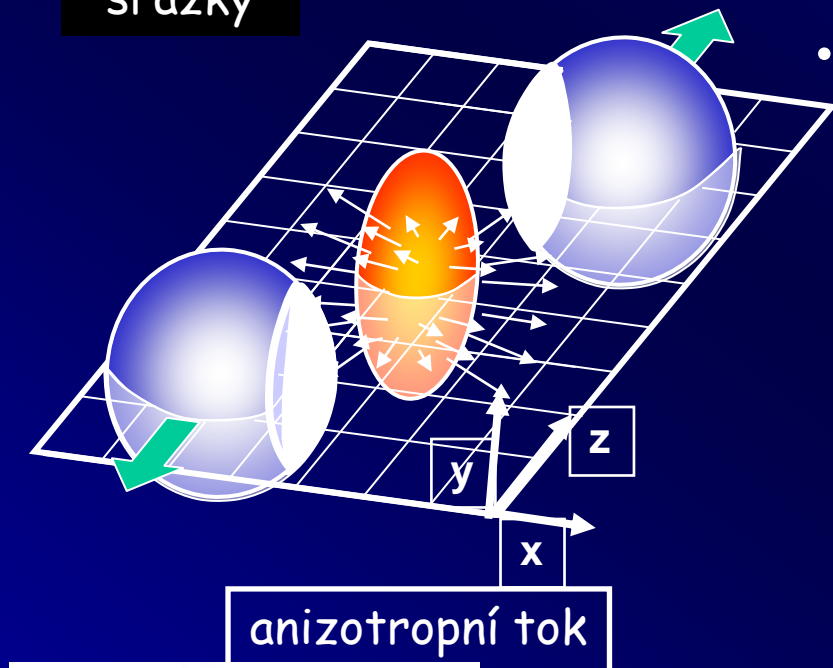
ρ_N = hustota hmoty uvnitř protonu nebo neutronu

Měření tlaku plazmatu

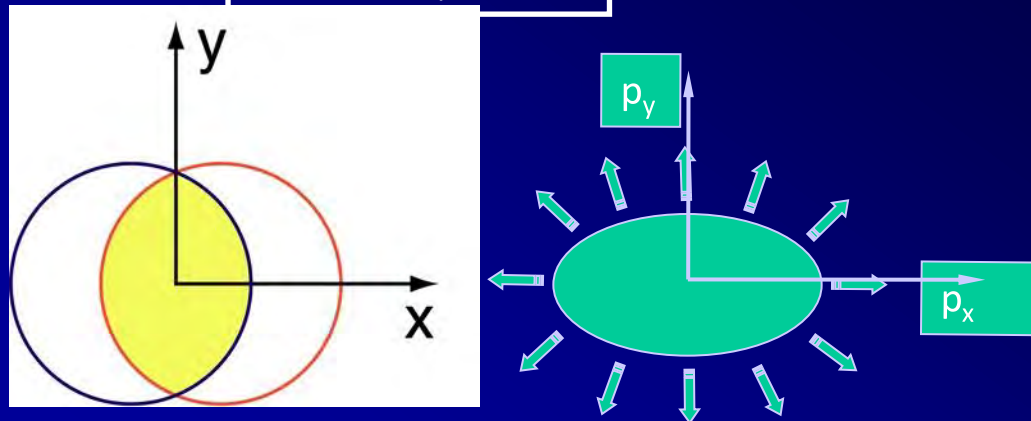


Eliptický tok částic: "nejlepší barometr" na RHIC

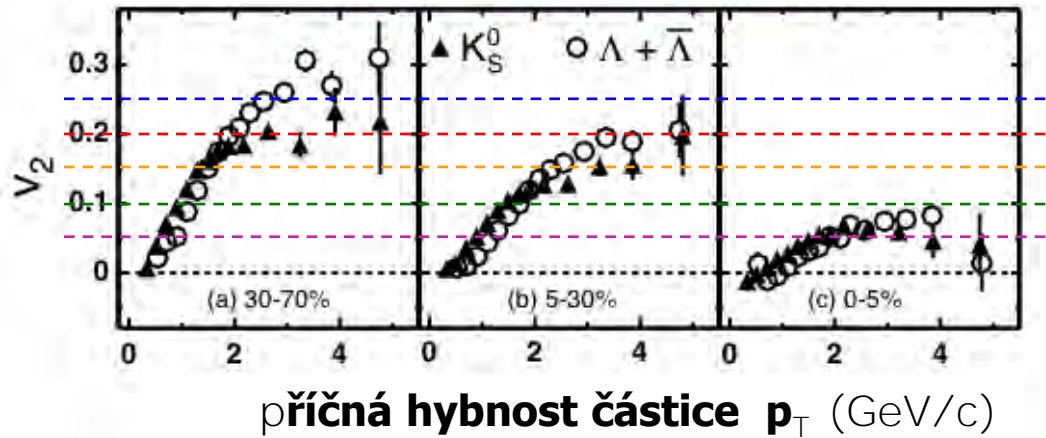
Periferní
srážky



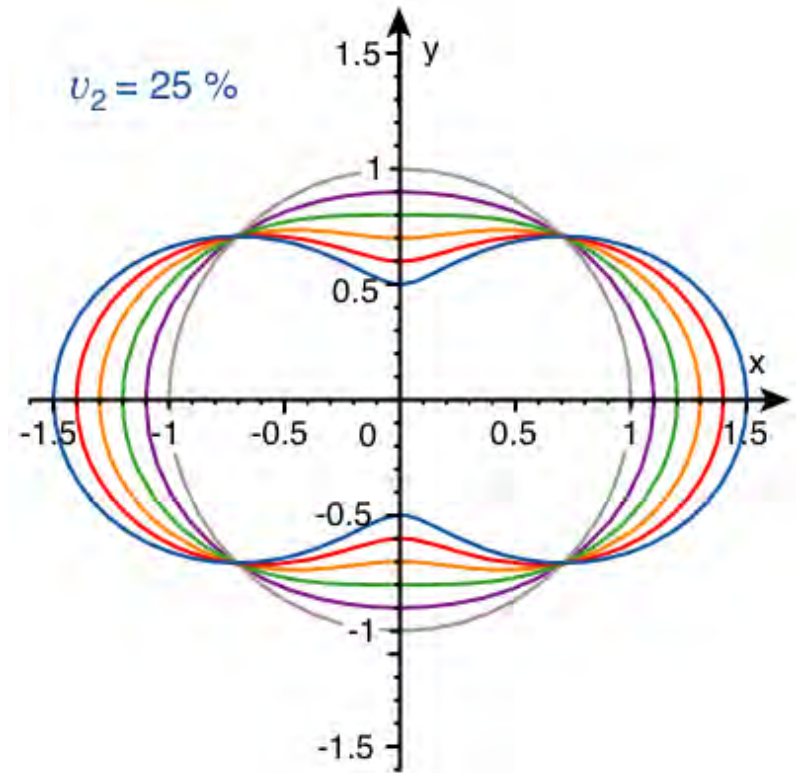
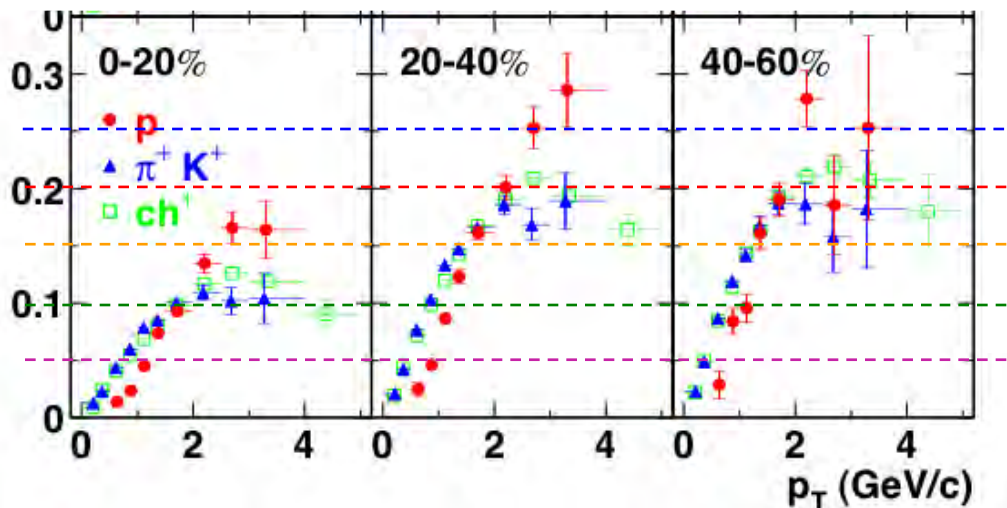
- Oblast překrytí v periferních srážkách má **čočkovitý tvar**
 - Pro částice je snazší vylétnout ve směru x nežli ve směru y
 - Interakce mezi částicemi vytváří tlakový gradient, který umožňuje změřit počáteční anizotropii v souřadnicovém prostoru pomocí měření anizotropie v hybnostním prostoru



Eliptický tok částic s velkou příčnou hybností je obrovský !



příčná hybnost částice p_T (GeV/c)

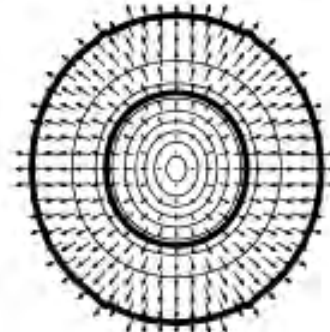
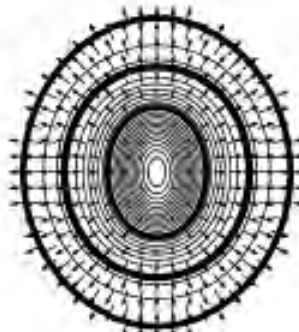


$$1 + 2 v_2 \cos 2\varphi$$

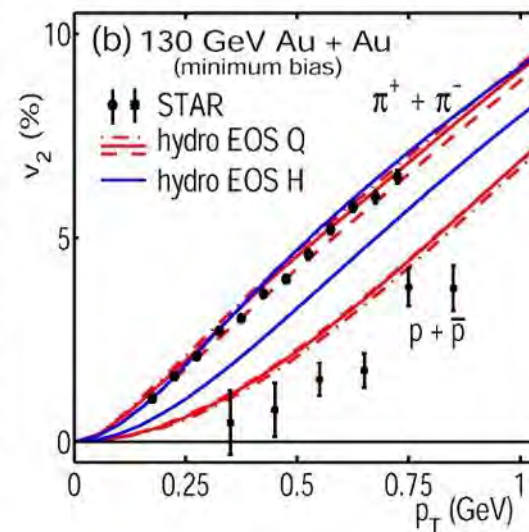
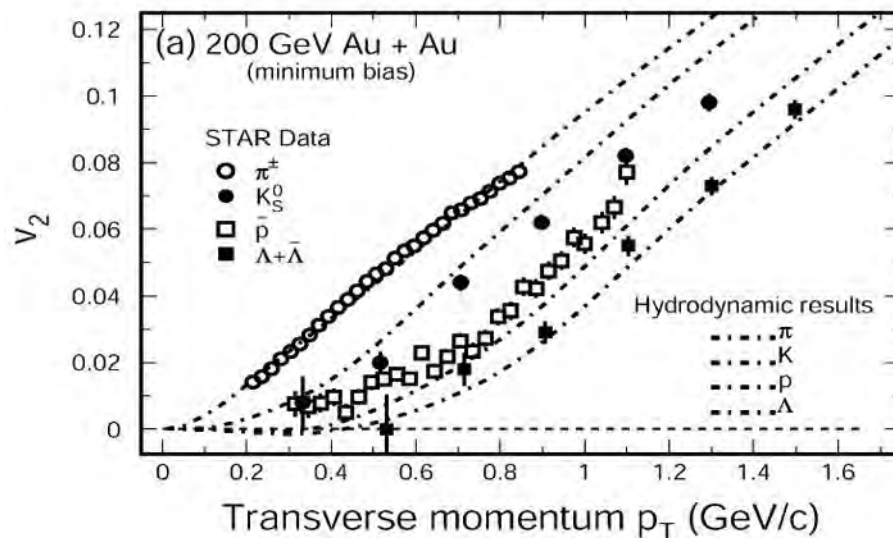
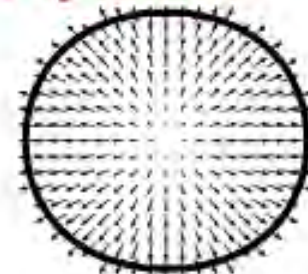
$V_2 = 0.25$ znamená, že je 3 x více částic vyletí ve směru x (do tzv. reakční roviny) než do směry y (tj. mimo reakční rovinu)

Souhlas experimentálních dat s hydrodynamickými výpočty je nejsilnějším argumentem ve prospěch existence kvark-gluonové kapaliny

$\tau - \tau_0 = 3.2 \text{ fm}/c$

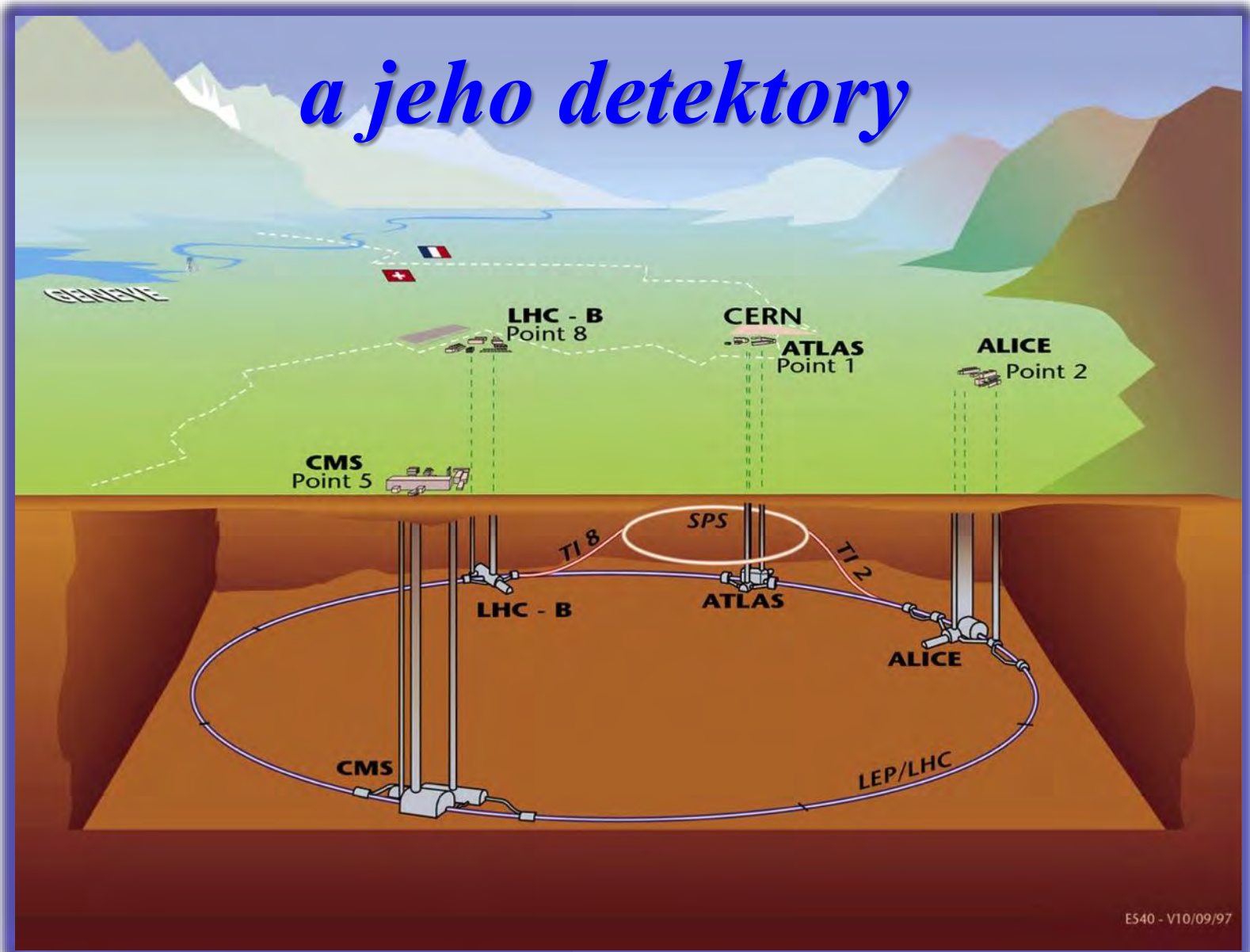


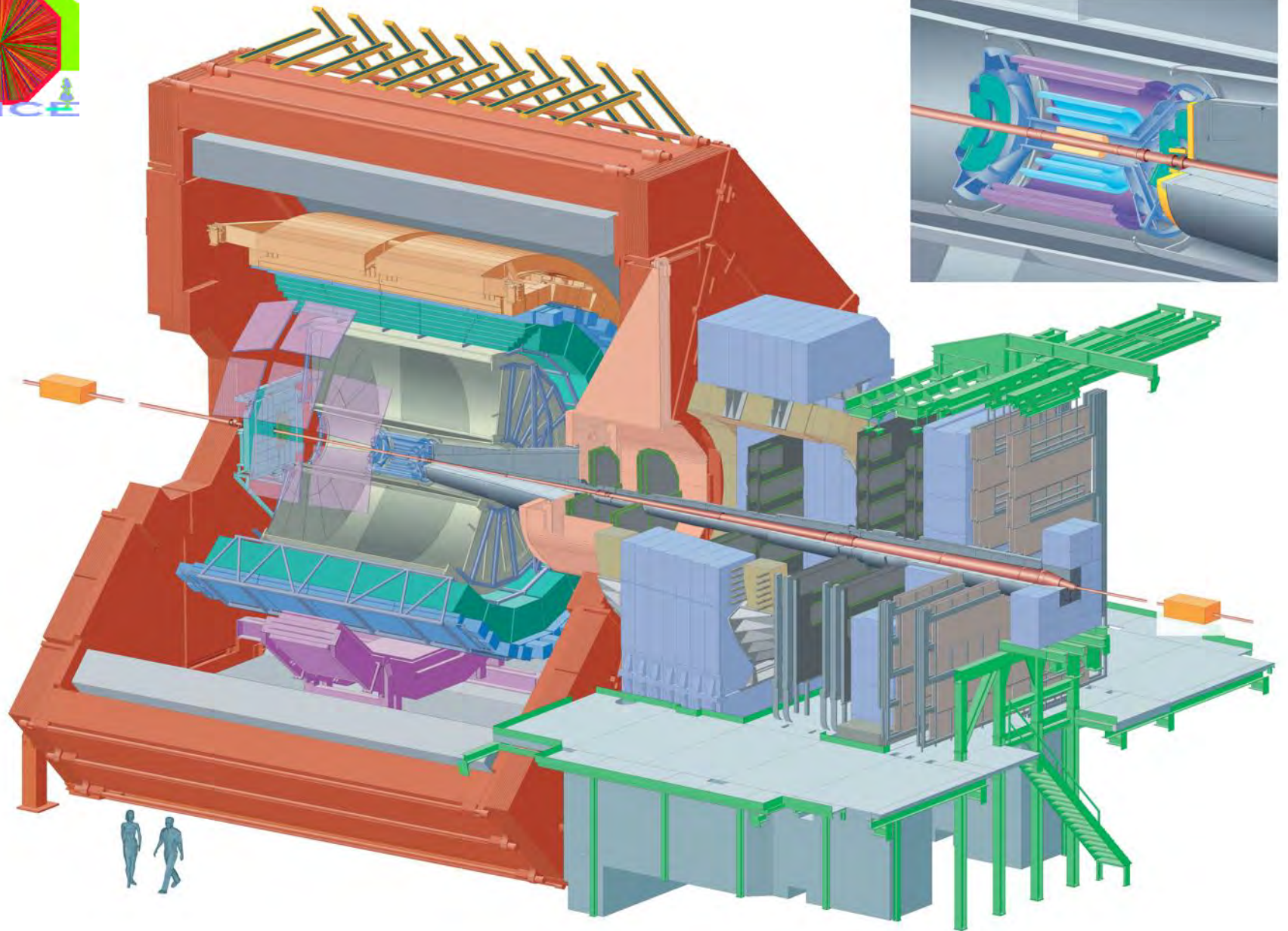
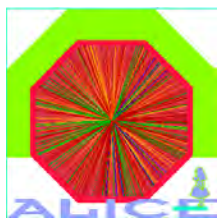
$\tau - \tau_0 = 8 \text{ fm}/c$



Velký srážek hadronů (LHC)

a jeho detektory





16x16x26 m³, celková váha ≈ 10 000t, 18 různých detektorů



Detector characteristics

Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

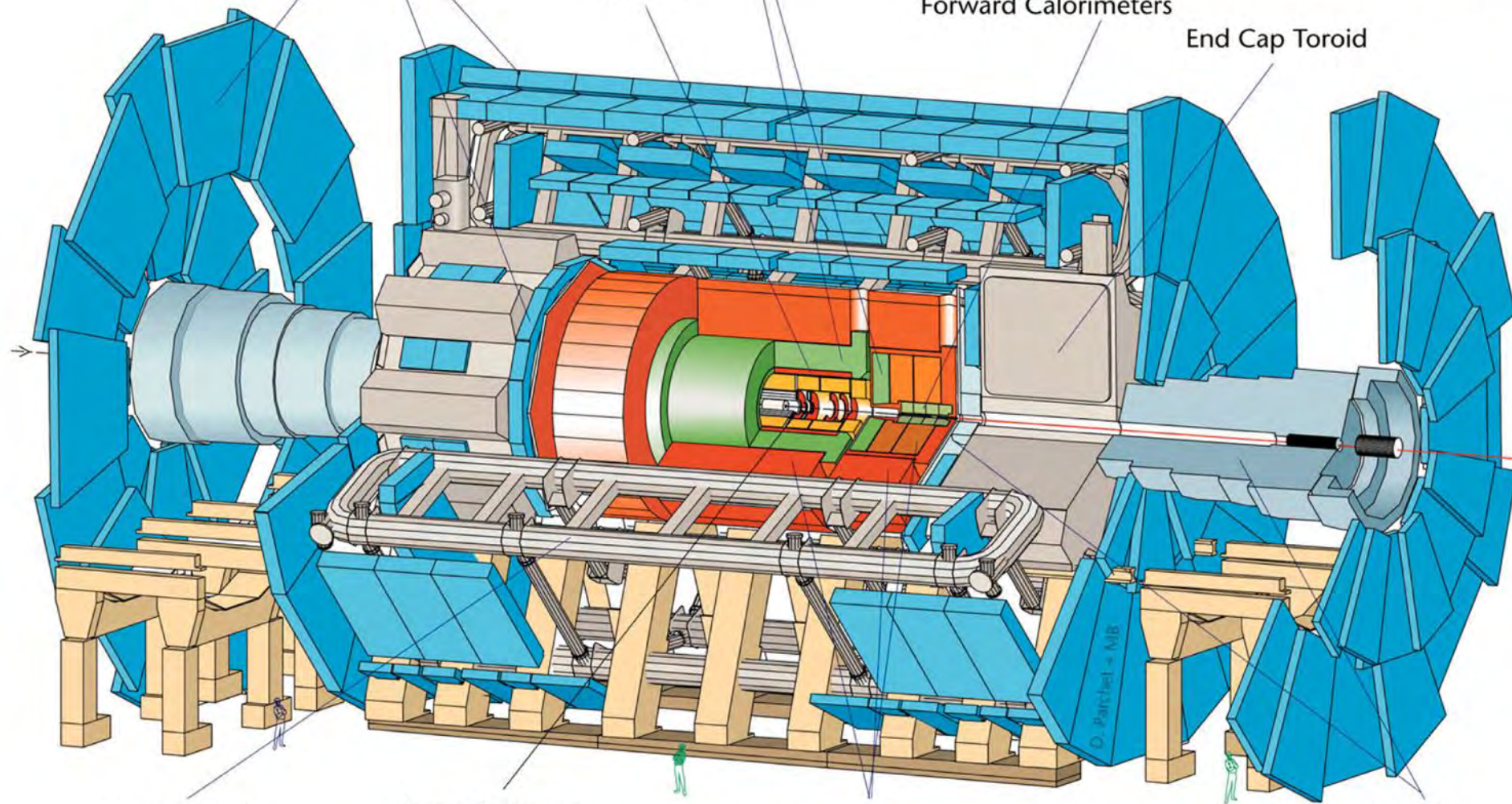
Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid

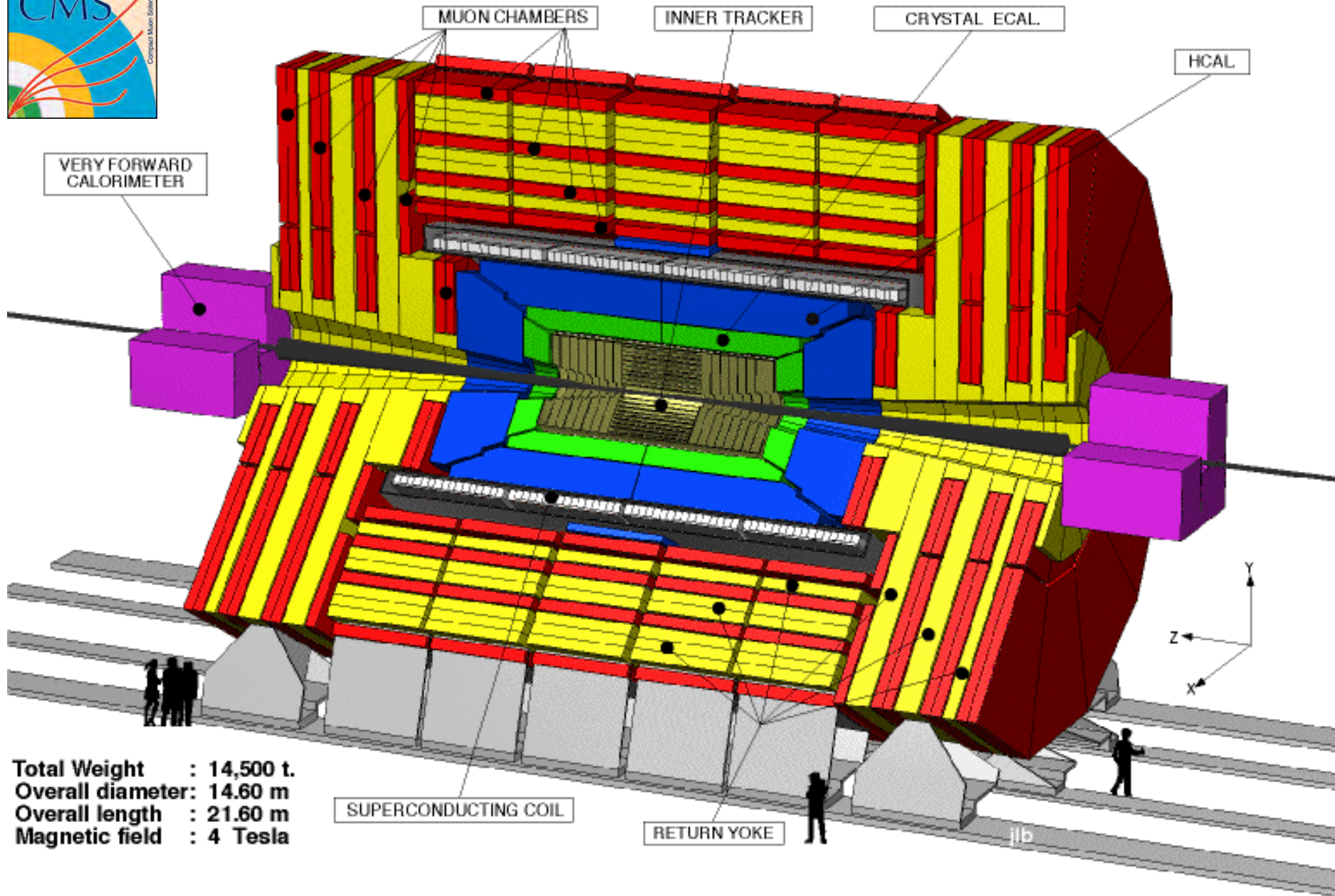


Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding



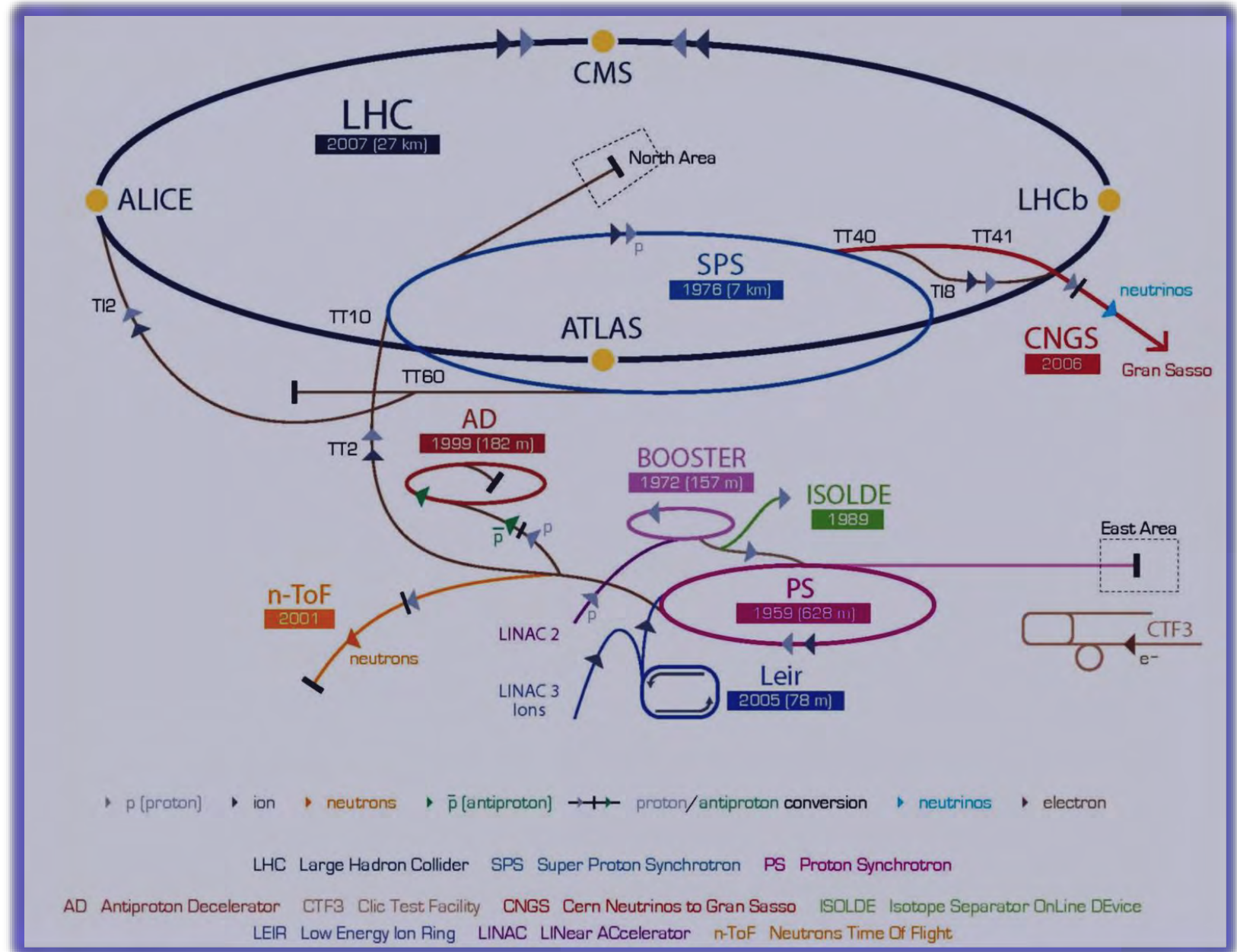
Total Weight : 14,500 t.
Overall diameter: 14.60 m
Overall length : 21.60 m
Magnetic field : 4 Tesla

SUPERCONDUCTING COIL

RETURN YOKE

jlb

Soustava urychlovačů v CERN

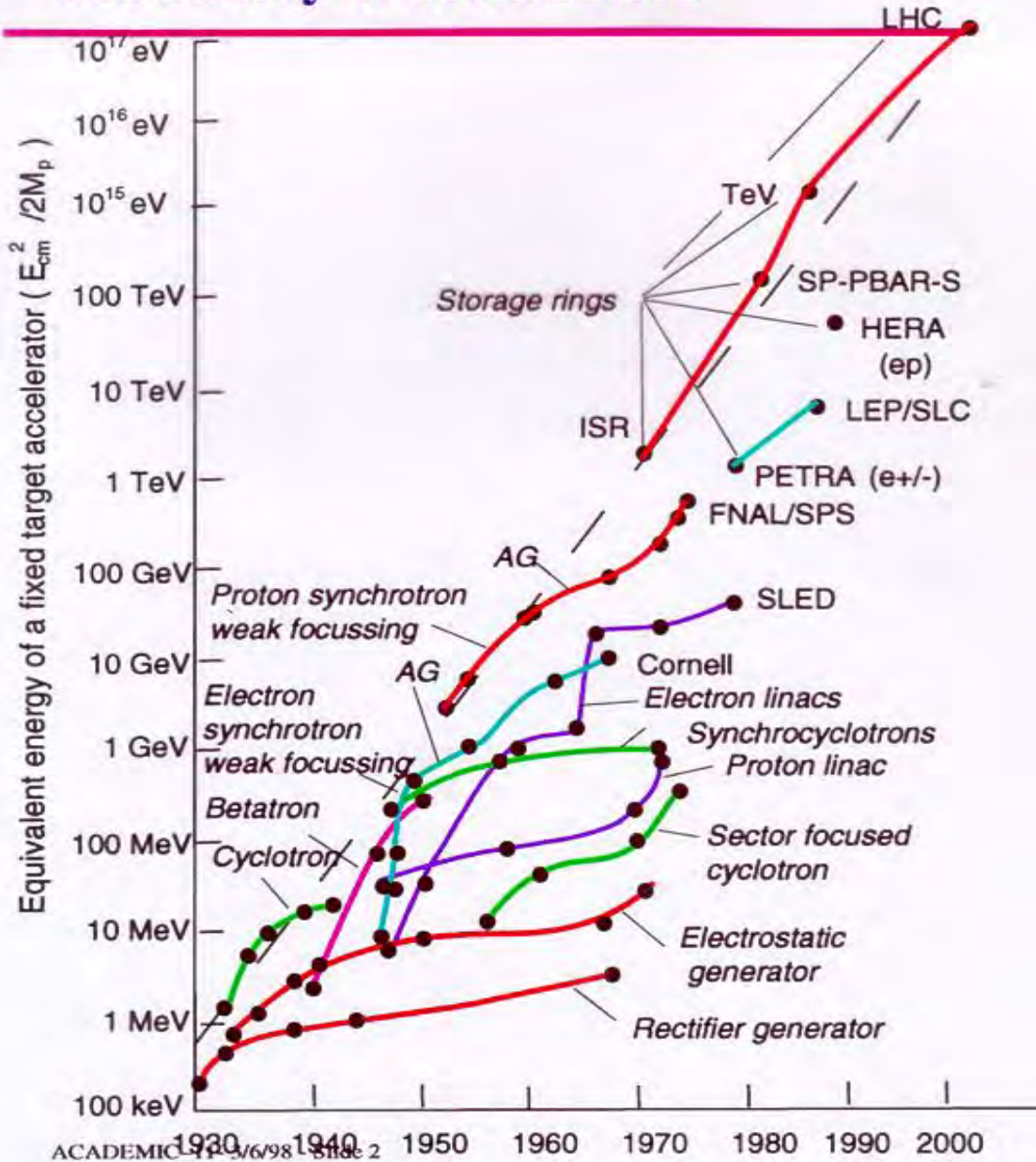


LHC = pokročilá technologie v akci

*23 km **supravových magnetů**
udržovaných **supratekutým heliem na 1.9 K***



The history of accelerators

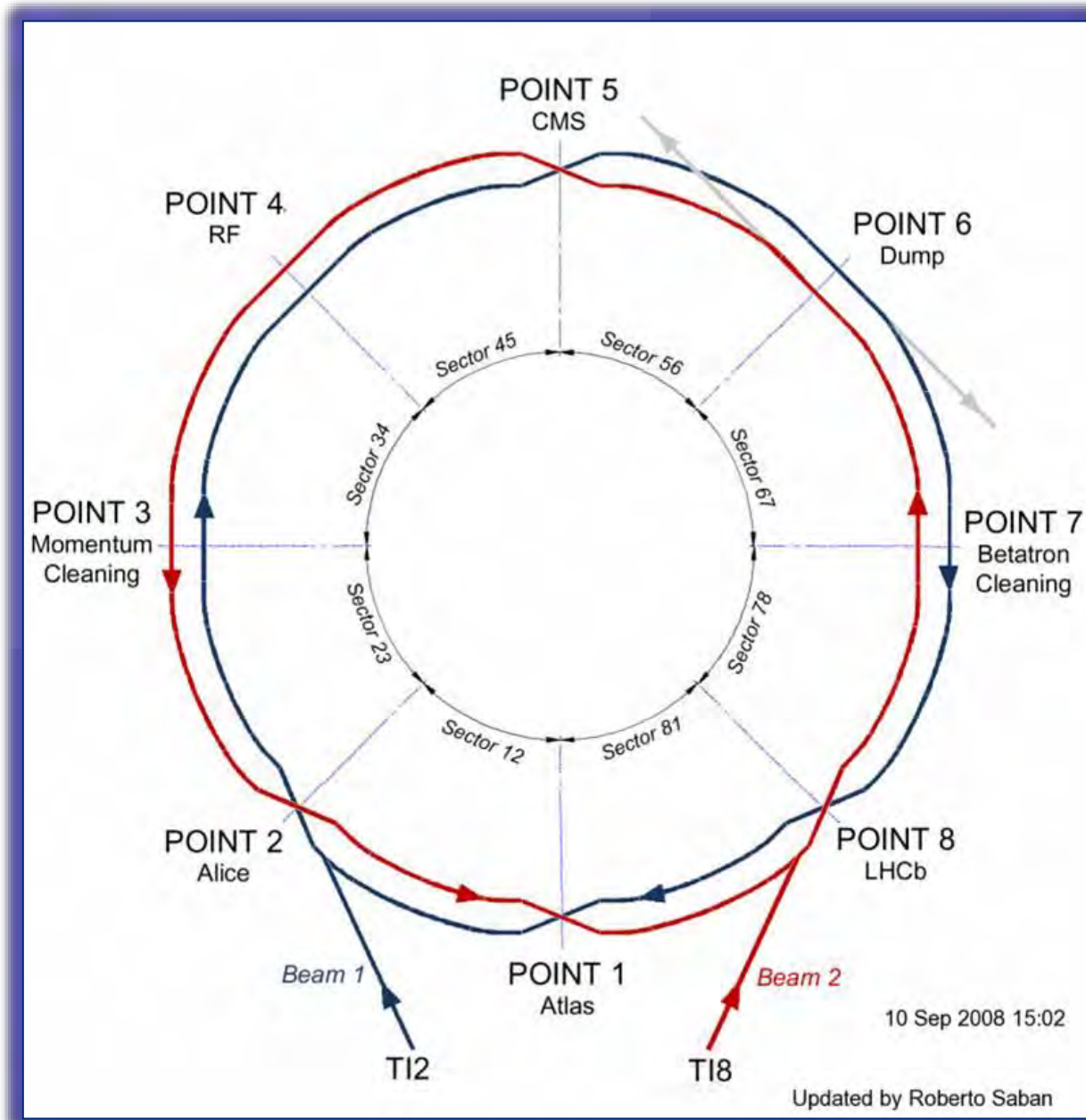


Konstantní exponenciální růst energie po více než 70 let.

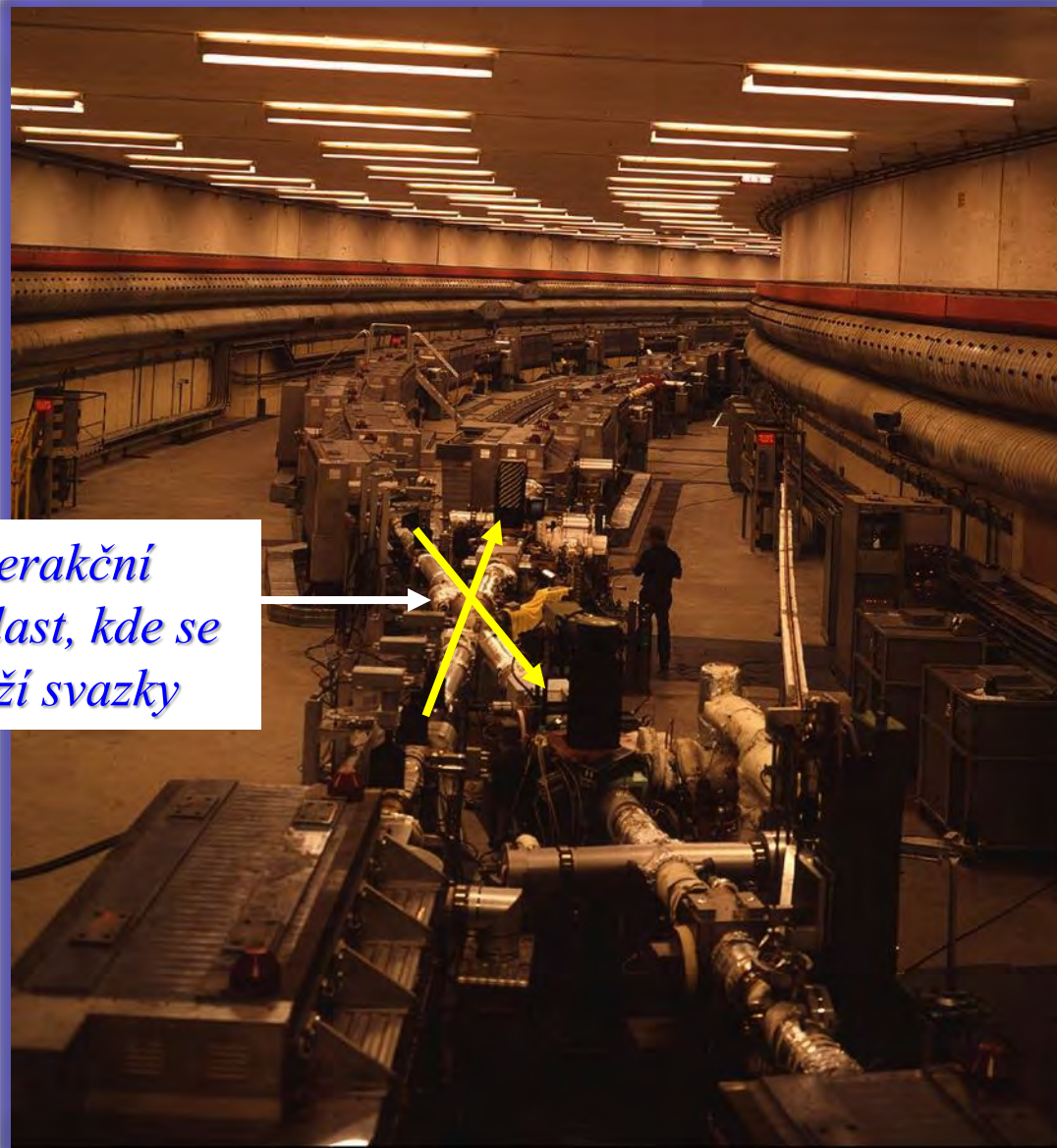
Pokrok dosažen opakovanými technologickými skoky

Supravodivost byla již od 80. let a zůstává i nyní klíčovou technologií urychlovačů vysokoenergetických částic

Srážení proti sobě letících svazků částic

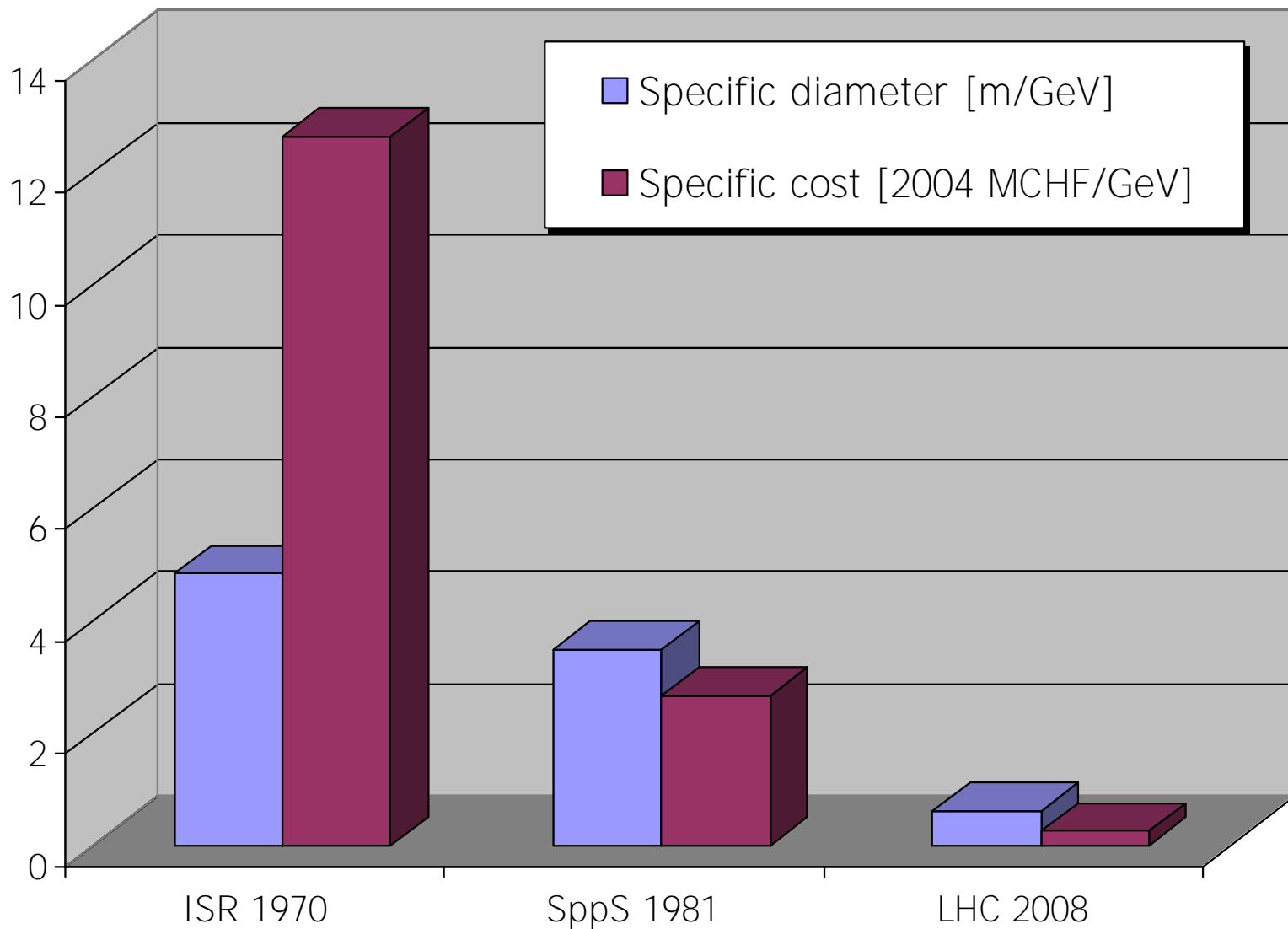


Intersecting Storage Rings: 1971-84

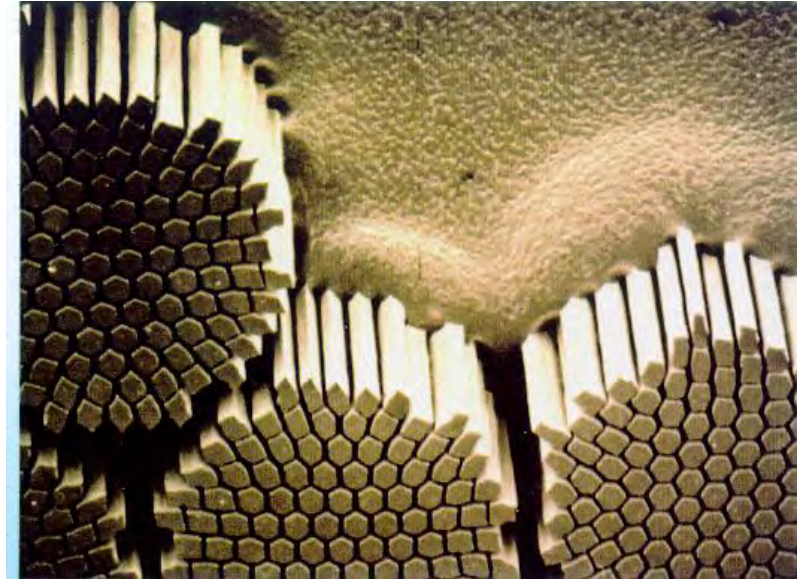
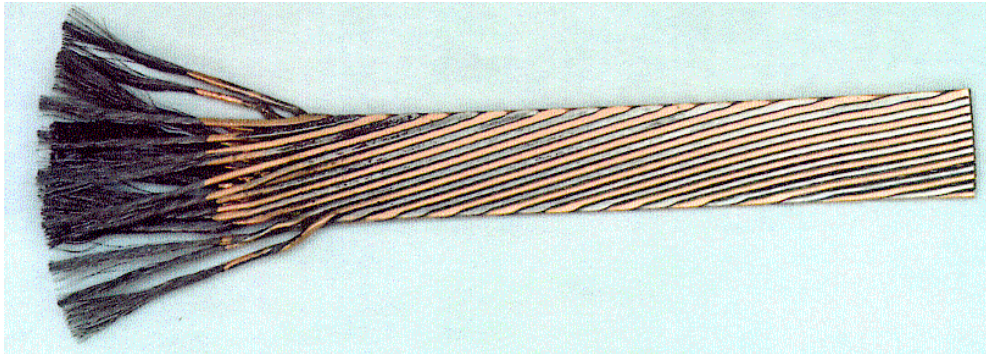


*Interakční
oblast, kde se
kříží svazky*

Velikost a cena urychlovačů hadronů



*7000 km supravodivých vícežilových kabelů z Nb-Ti**

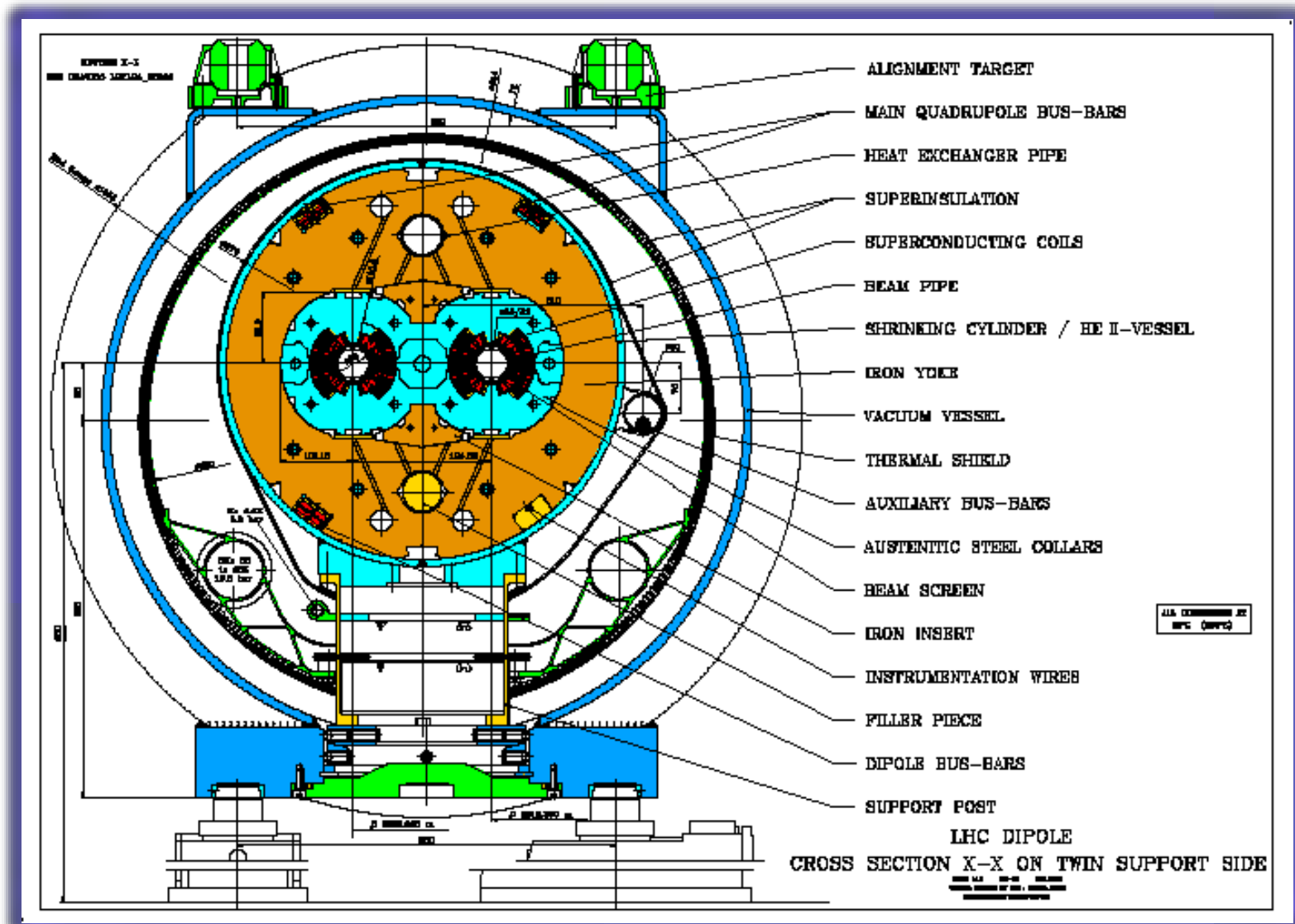


*) Supravodič typu II, $T_C = 10$ K, zůstává supravodičem až do ~ 15 T

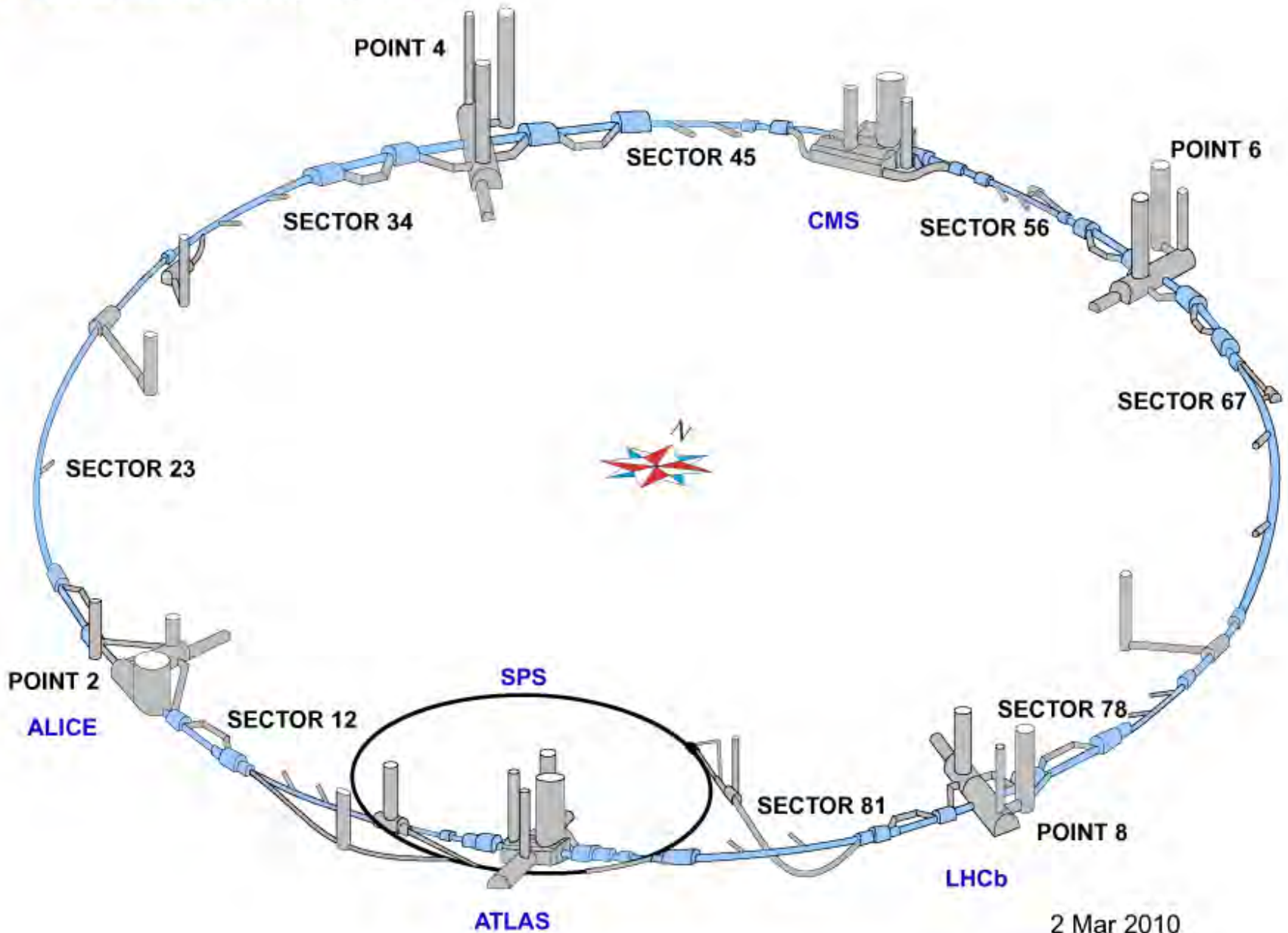


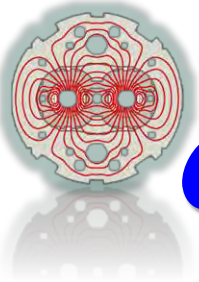
30 14:11

Průřez kryogenním dipólem LHC



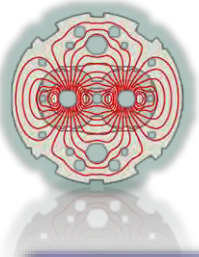
Nejstudenejší místo ve vesmíru





Ochlazení jednoho sektoru LHC

- Z pokojové teploty na 80K pomocí tekutého dusíku (1200t: 64 nákladů o 20t). 3 týdny pro jeden sektor.
- Z 80K na 4.5K pomocí chladniček (refrigerátorů). 3 týdny pro jeden sektor. Je třeba ochladit 4700t materiálu.
- Z 4.2K na 1.9K. Chladicí kompresory pracující při tlaku 15 mbar. 4 dny pro jeden sektor.



Ochlazení jednoho sektoru 4625 t materiálu na 3.3 km

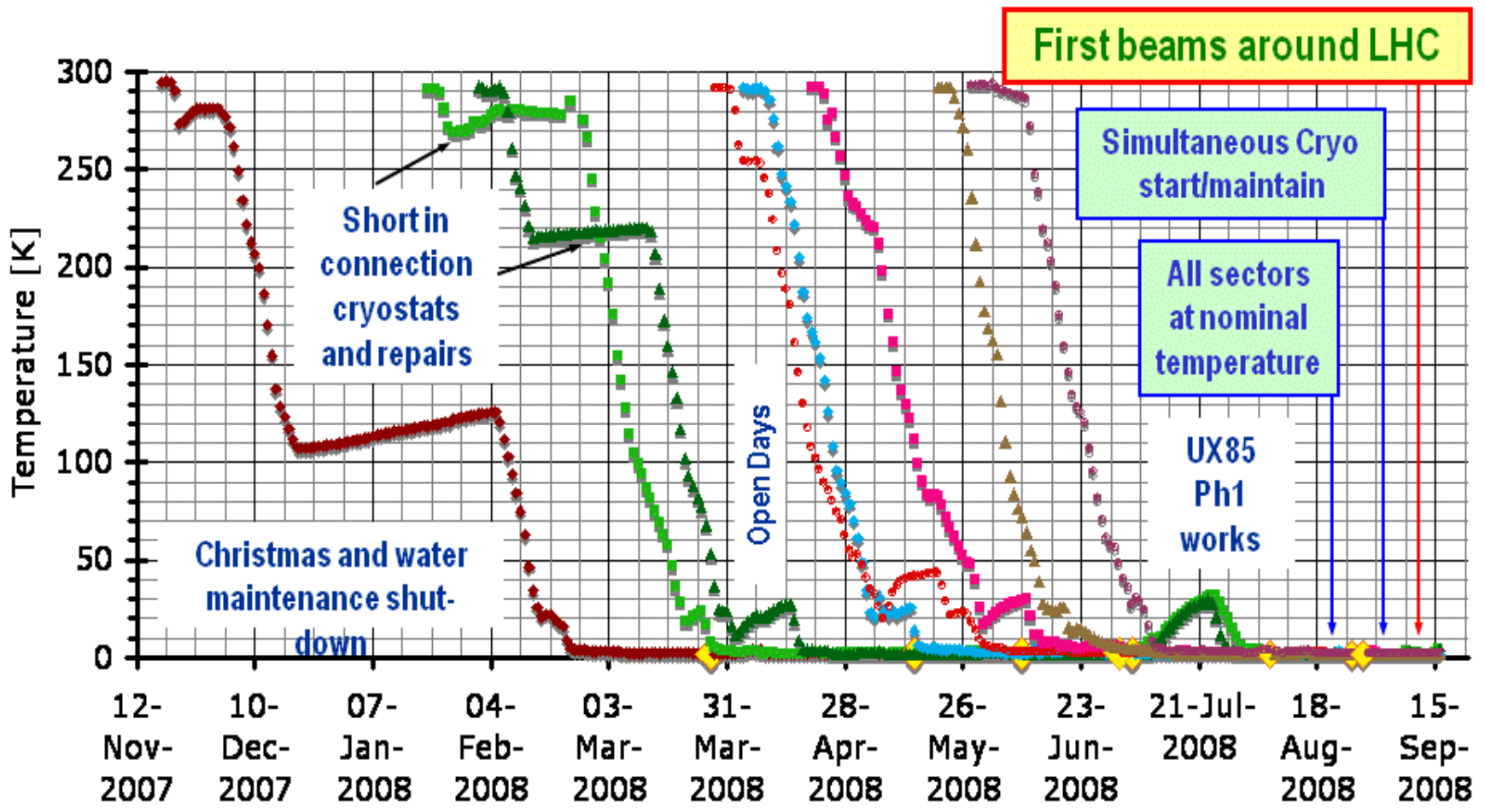


Vykládání LHe a LN2

Ochlazování pomocí LN2
(~5 t/h)

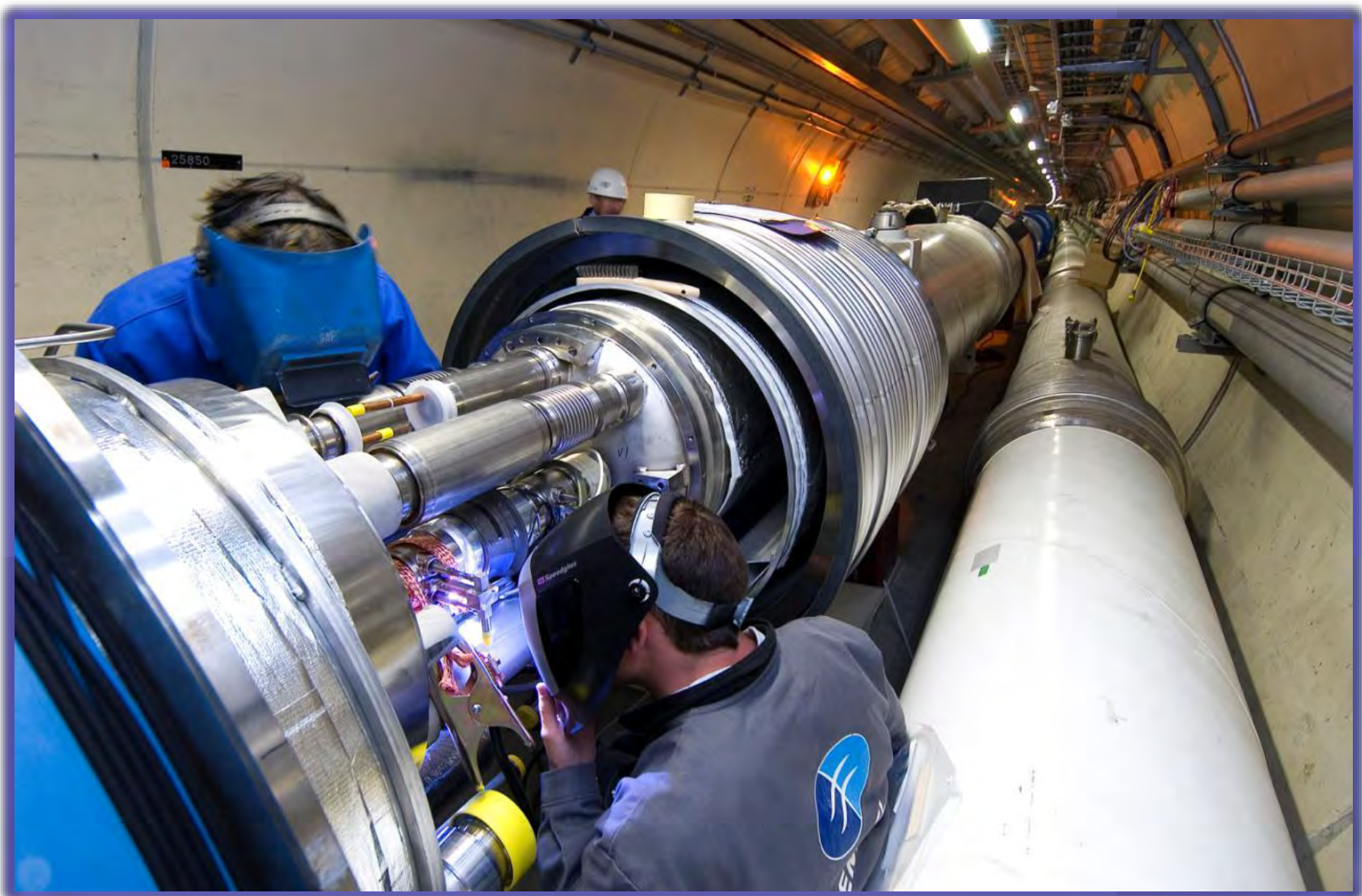


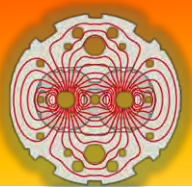
První ochlazování sektorů LHC



- ◆ ARC56_MAGS_TTAVG.POSST ■ ARC78_MAGS_TTAVG.POSST ▲ ARC81_MAGS_TTAVG.POSST ◆ ARC23_MAGS_TTAVG.POSST
- ARC67_MAGS_TTAVG.POSST ■ ARC34_MAGS_TTAVG.POSST ▲ ARC12_MAGS_TTAVG.POSST ● ARC45_MAGS_TTAVG.POSST

Havária 19.9.2008





Incident

The magnets were commissioned to their nominal current on 10 September 2008. The dipole magnets were commissioned on 10 September 2008 to establish the beam.

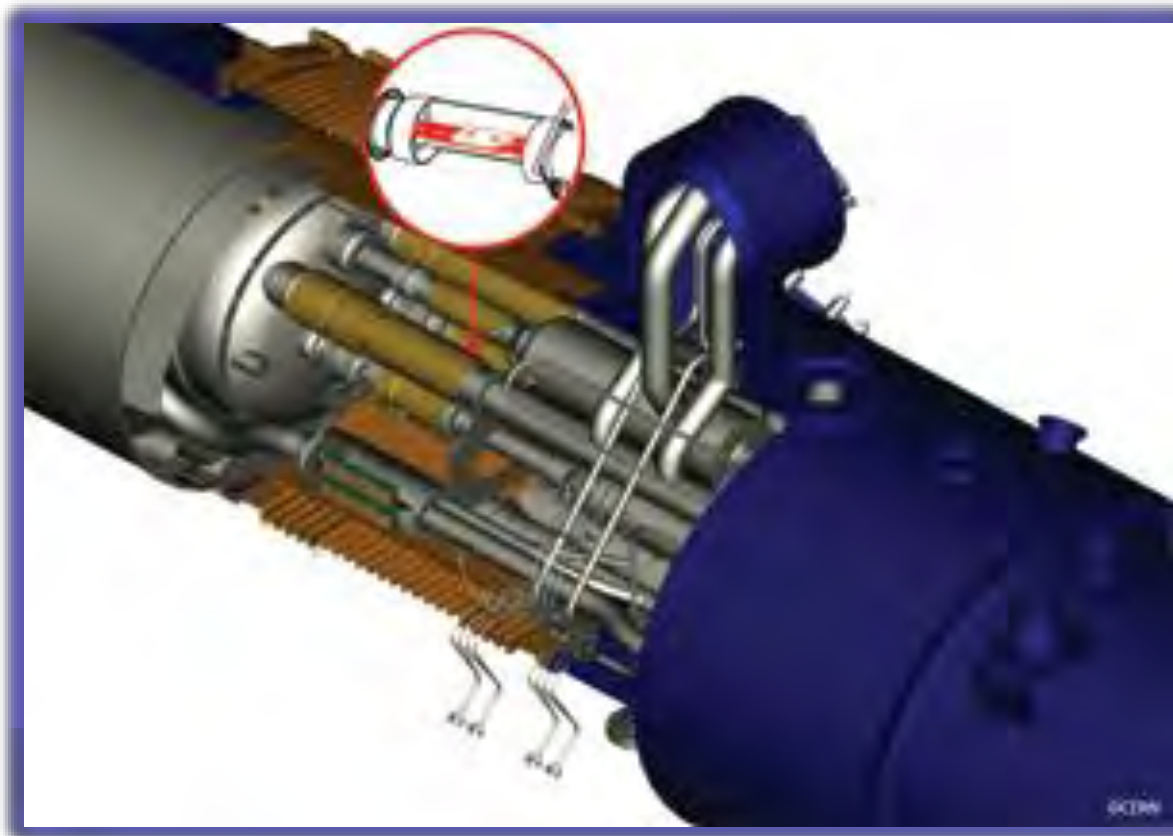
On 19 September 2008, a fault in the electrical circuit at the main dipole magnet caused the appearance of a quench in the CEST. No quench detectors were present as initial equipment was not yet installed to maintain the current in the circuit and produce a controlled discharge of the magnets.



Commissioned to their nominal current on 10 September 2008. The dipole magnets were commissioned on 10 September 2008 to establish the beam. The current was increased from 7 kA to 9.3 kA prior to the incident at 0.45 TeV, and according to the procedure.

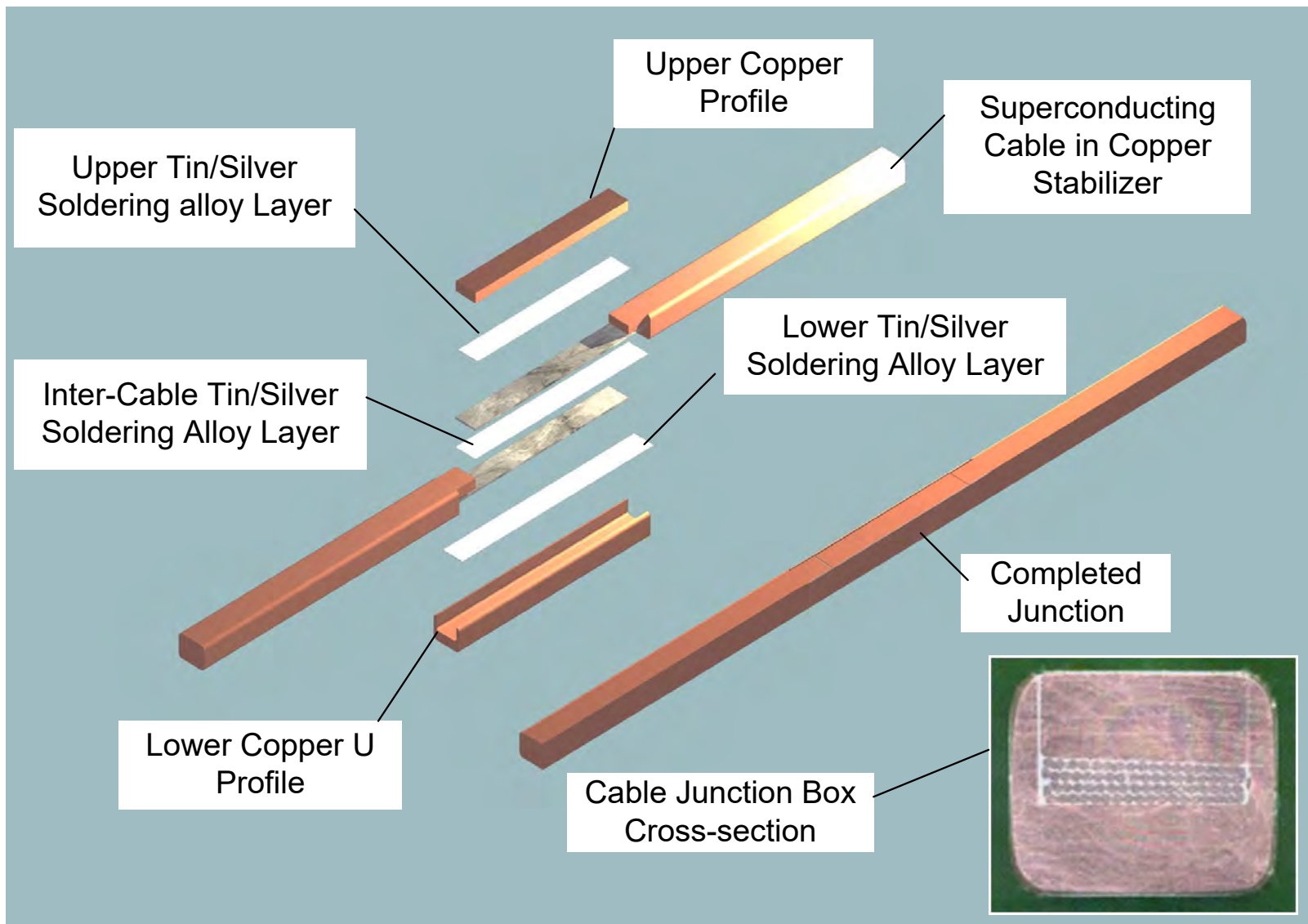
the main dipole magnet developed in the quench. Evidence was that the quench time was 11:18:36. The quench was triggered with quench detectors. The quench can be excluded from the main dipole inverter, unable to maintain the current. The current started to decrease in the circuit to produce a controlled discharge of the magnets and energy.

CERN zveřejňuje analýzu havárie na LHC

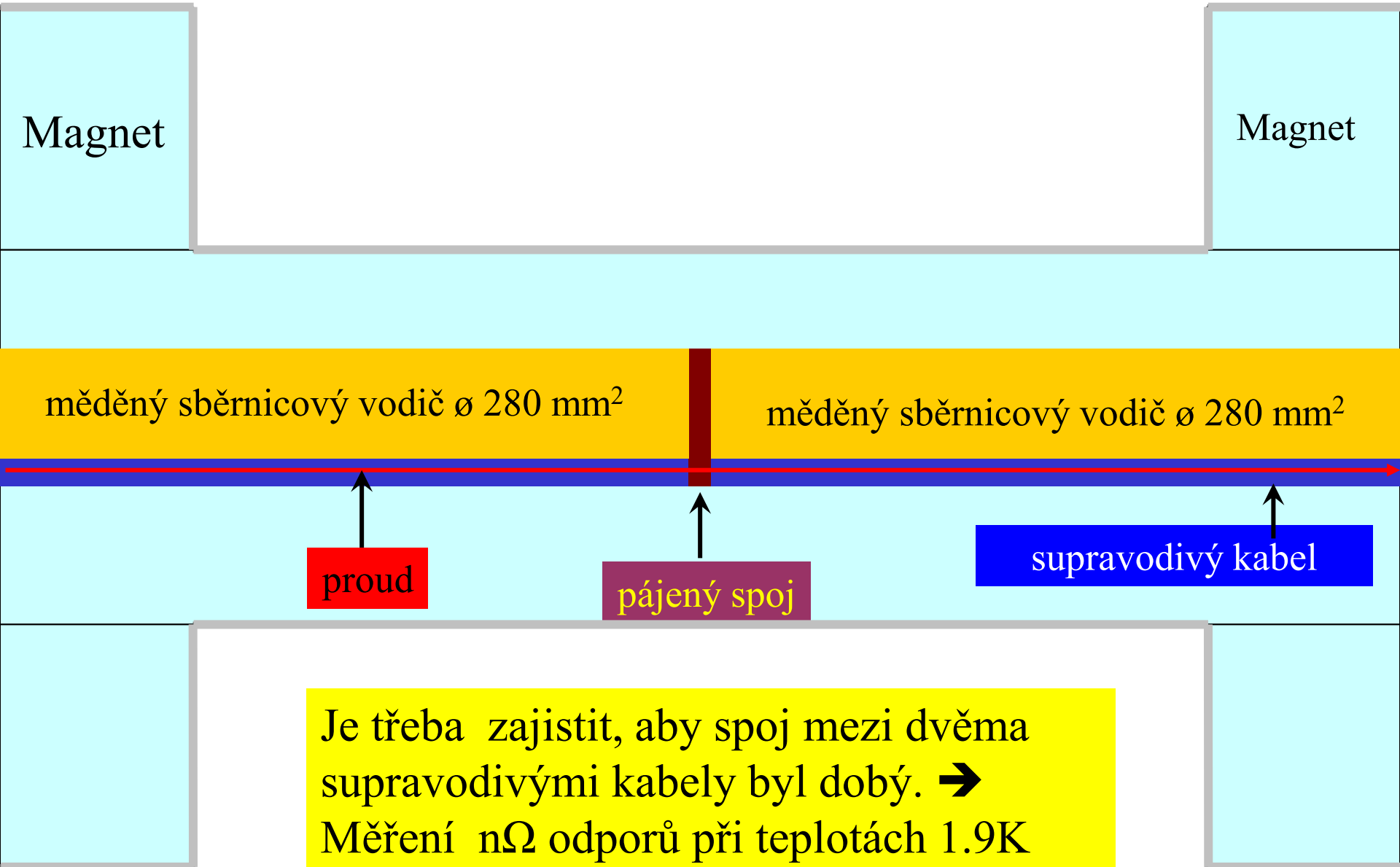


Vyšetřování ukázalo, že důvodem havárie v sektorech 3-4 byl vadný elektrický spoj mezi dvěma magnety (ukázaný červeně).

Sběrníkový vodič



Dobrý spoj při normálním provozu (1.9K)



Dobrý spoj po náhlé ztrátě supravodivosti (>10K)

Magnet

Magnet

měděný sběrníkový vodič $\varnothing 280 \text{ mm}^2$

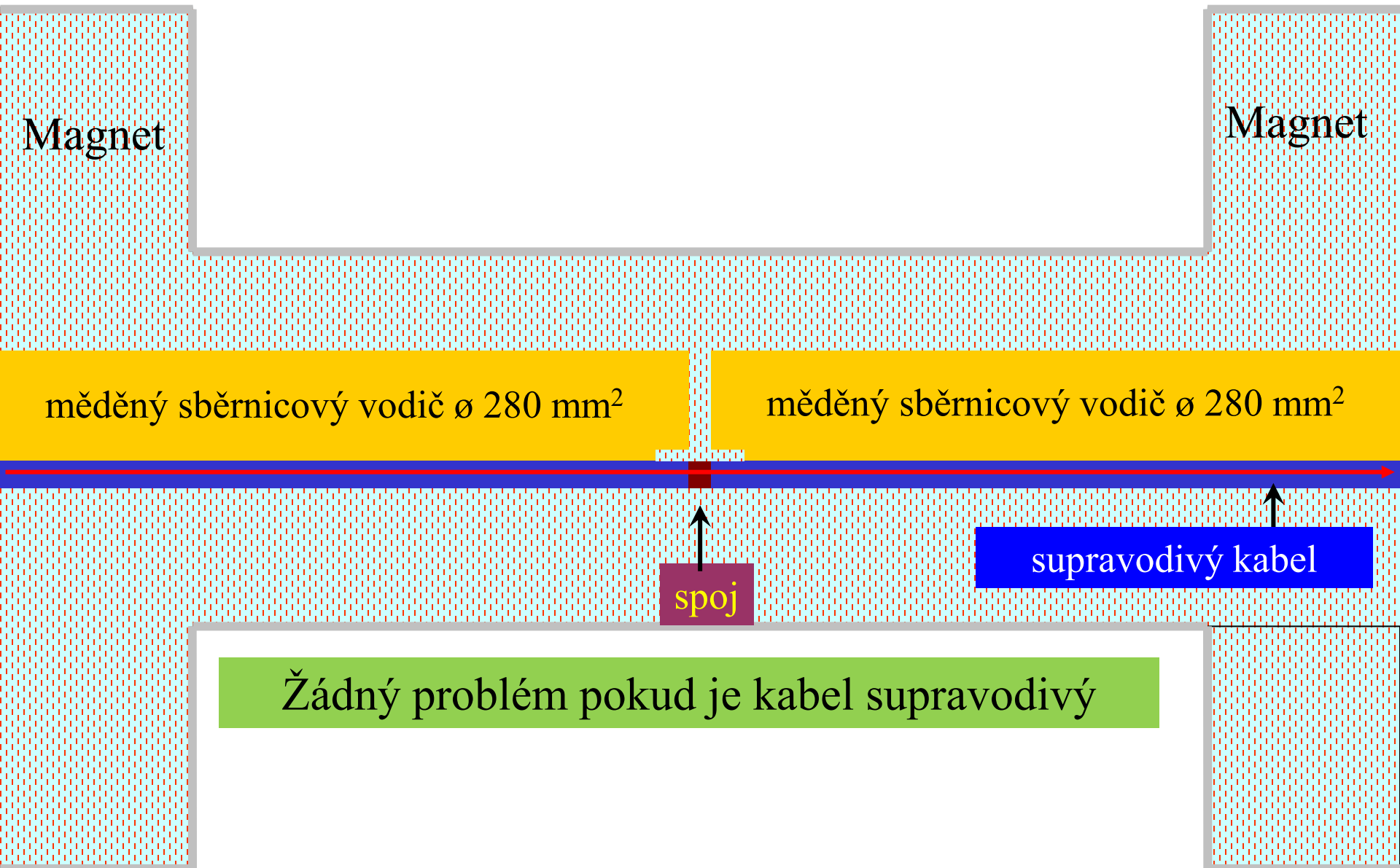
měděný sběrníkový vodič $\varnothing 280 \text{ mm}^2$

↑
spoj

↑
kabel není supravodivý

Měděná sběrnice odebere proud vzniklý při ztrátě supravodivosti v mnohožilovém kabelu

Špatný spoj při normálním provozu (1.9K)



Špatný spoj po ztrátě supravodivosti

Magnet

Směr proudu je odkloněn do kabelu, který však již není supravodivý. V závislosti na velikosti proudu a délce dráhy se kabel může stát tepelně neovladatelným...

Magnet

měděný sběrníkový vodič $\varnothing 280 \text{ mm}^2$

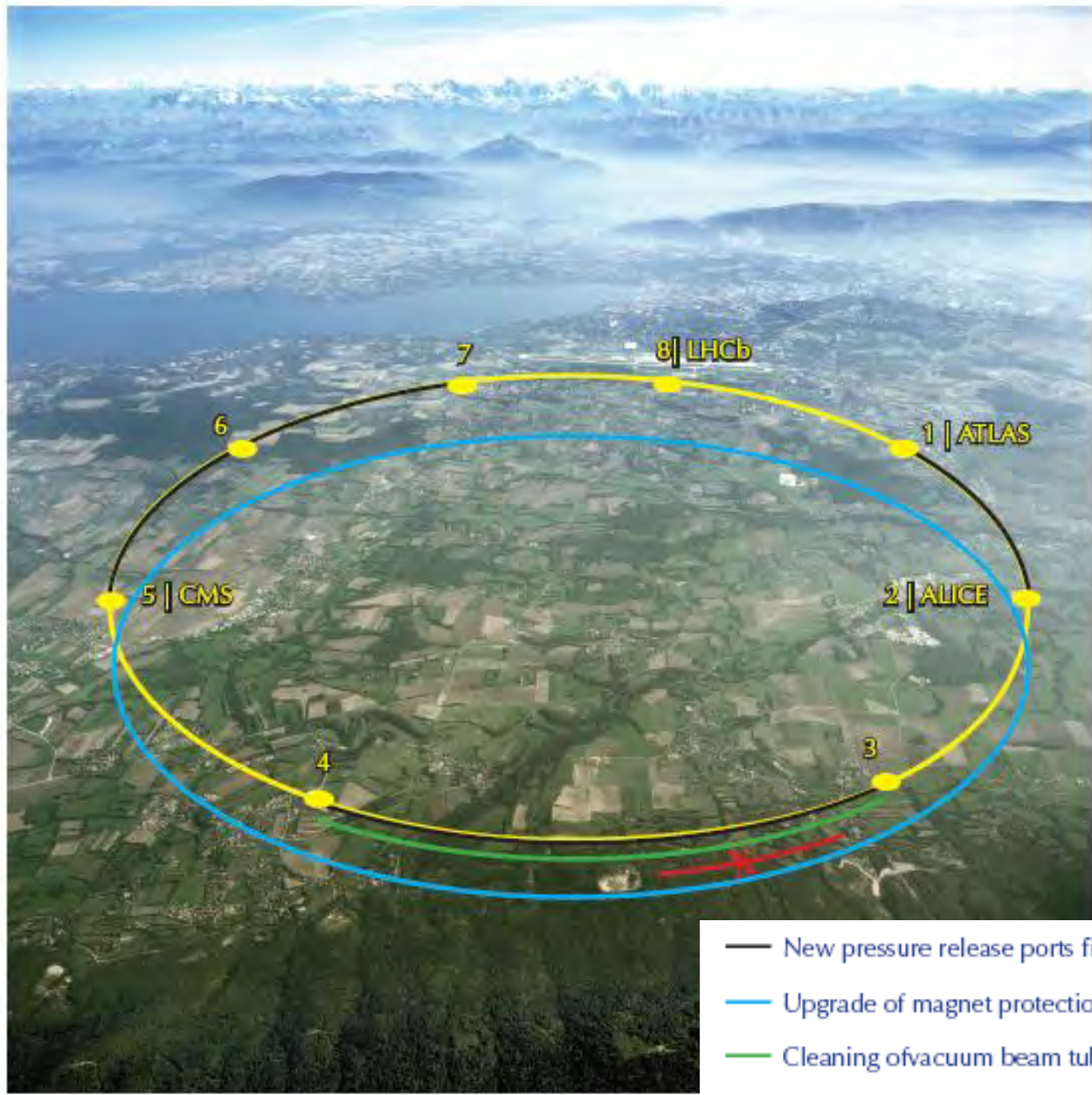
měděný sběrníkový vodič $\varnothing 280 \text{ mm}^2$

spoj

kabel není supravodivý

Nebezpečí roztavení kabelu elektrickým vybojem

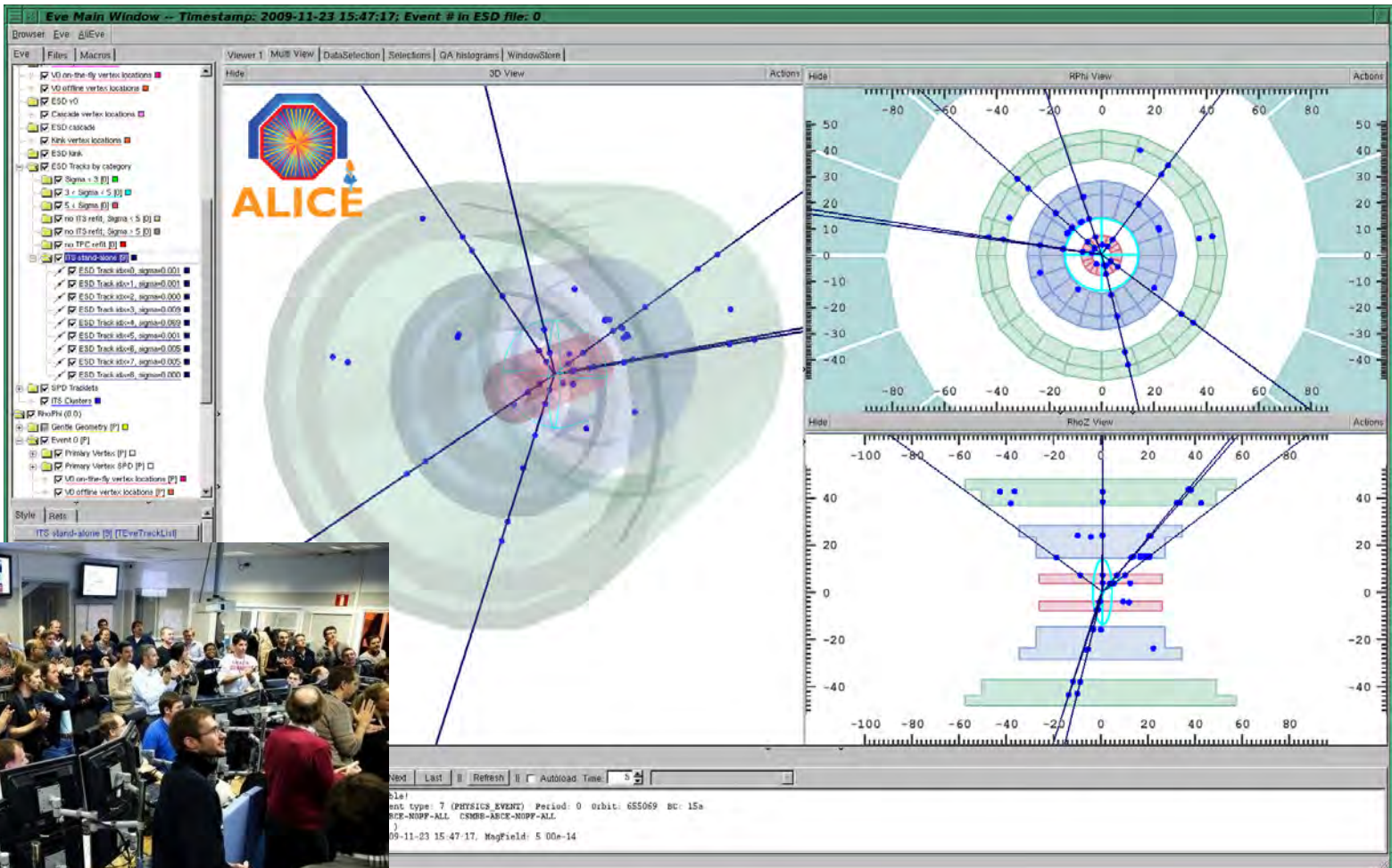
Je třeba zajistit, aby byl měděný vodič pocolé délce nepřerušený →
Měření $\mu\Omega$ odporů při normální teplotě



- New pressure release ports fitted
- Upgrade of magnet protection system
- Cleaning of vacuum beam tube
- Dipole and quadrupole magnets replaced and electrical interconnections
- LHC ring
- X** Incident

Nov 23, 2009: First p - p collision

as seen in the ALICE online event display

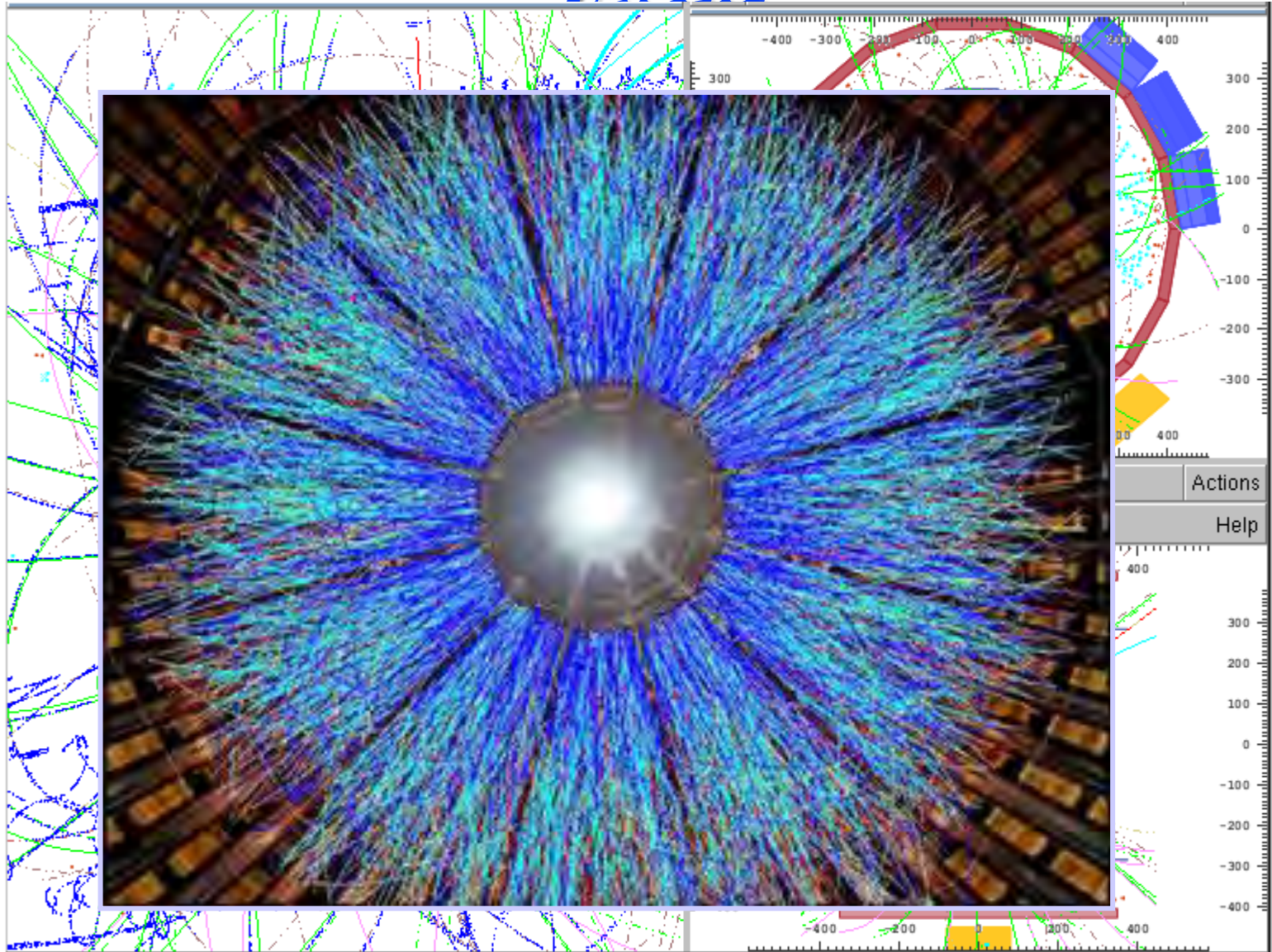




High Multiplicity



Event



Command EventCtrl

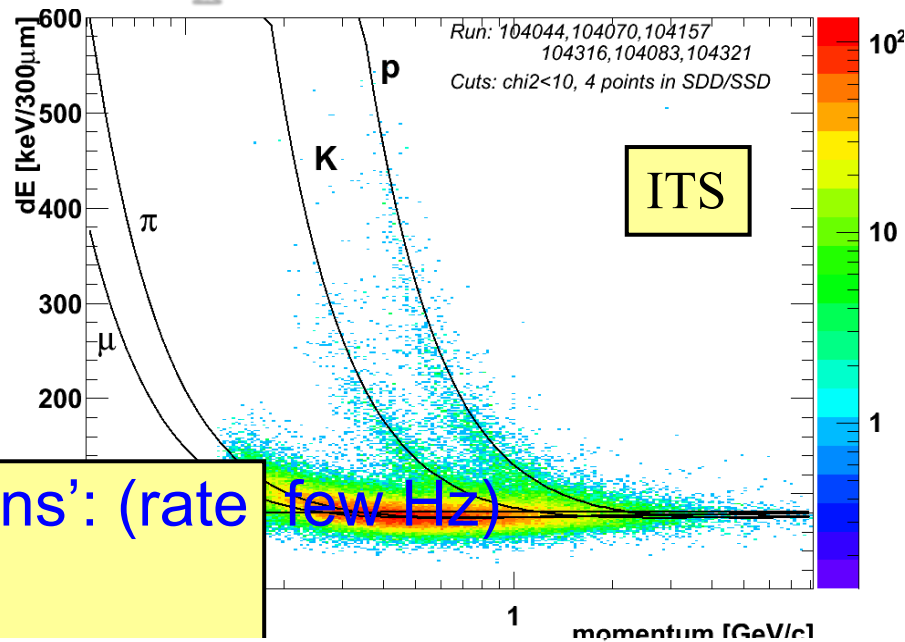
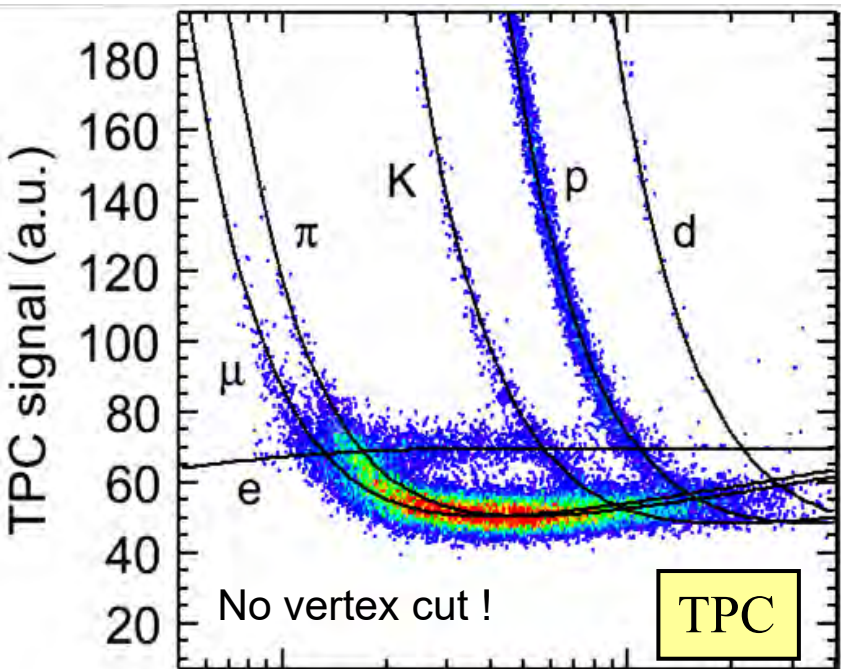
Still, not too bad for pp (50 charged tracks in TPC)

First Prev 198 / 2041 Next Last Refresh Autoload Time: 5

ESD event info: Run#: 104892 Event type: 7 (PHYSICS_EVENT) Period: 1 Orbit: e2a657 BC: 301

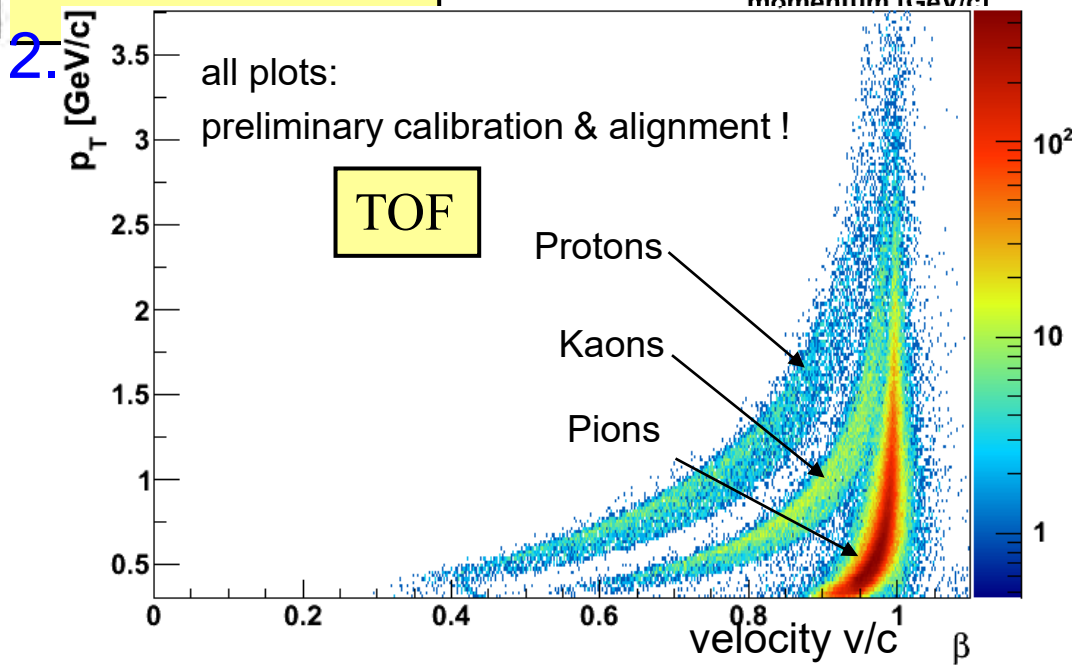
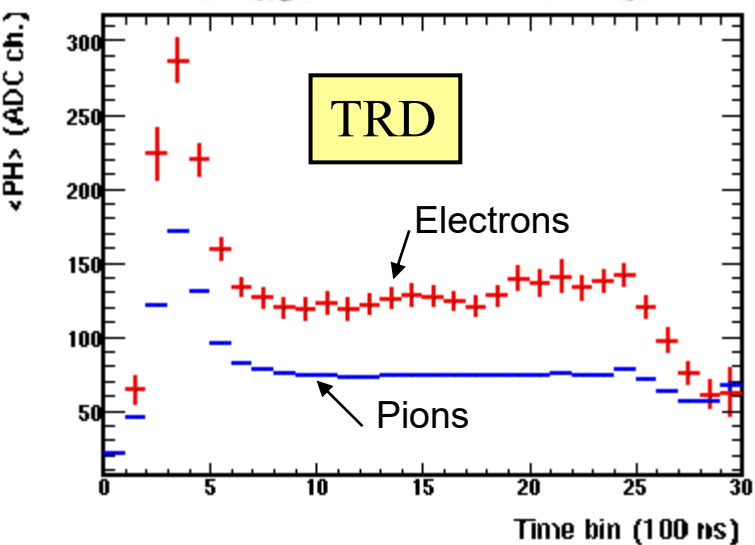


Selected data plots



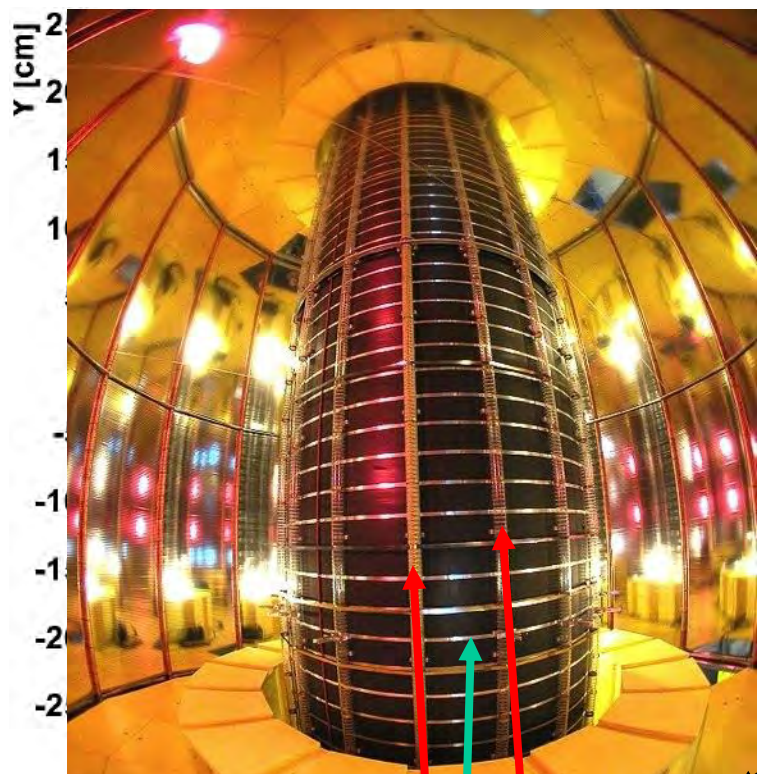
Interactions': (rate few Hz)

200 GeV





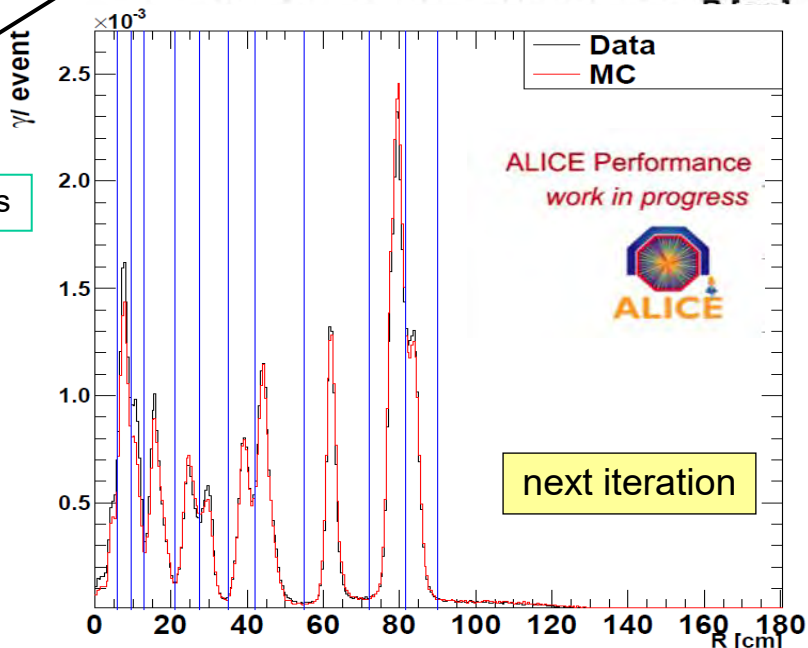
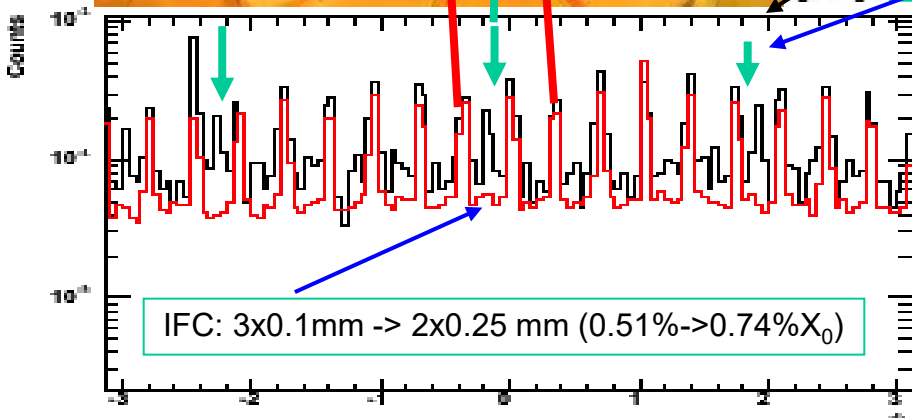
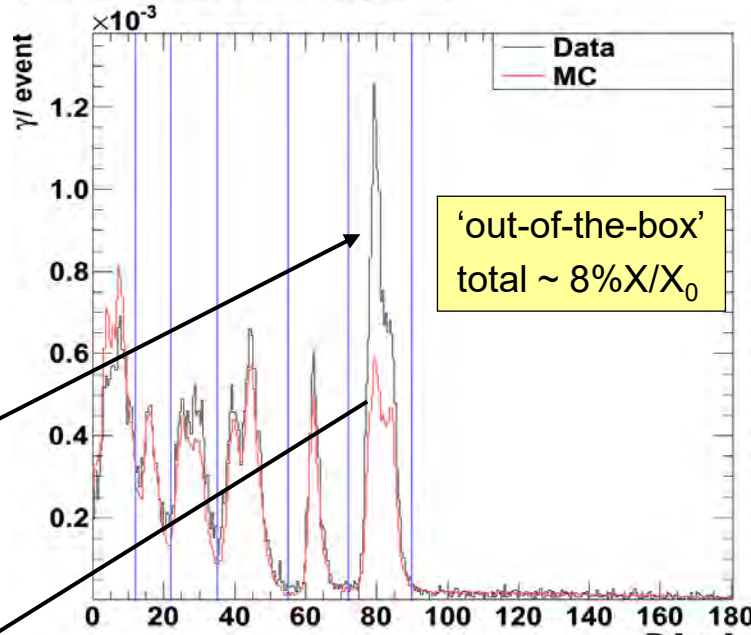
Getting to know ALICE



er ent
e

aphy

Conversions R distribution

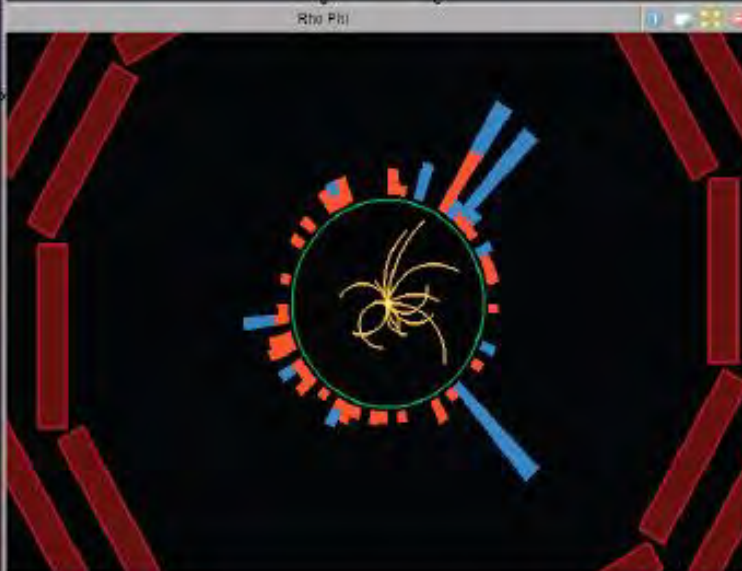
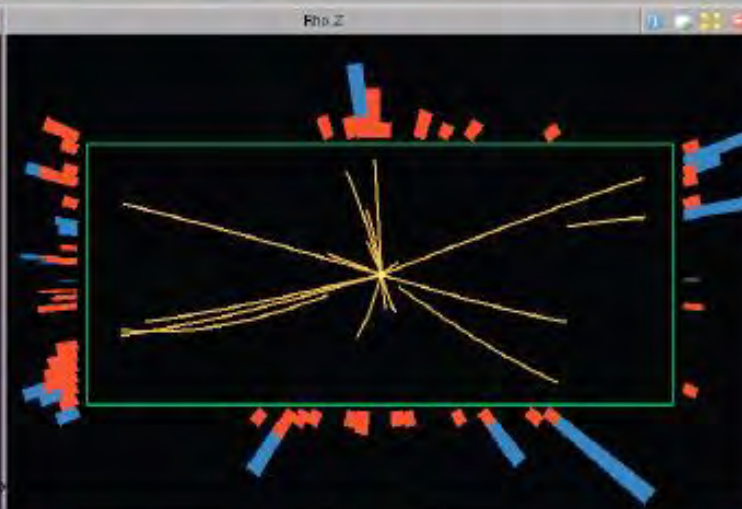
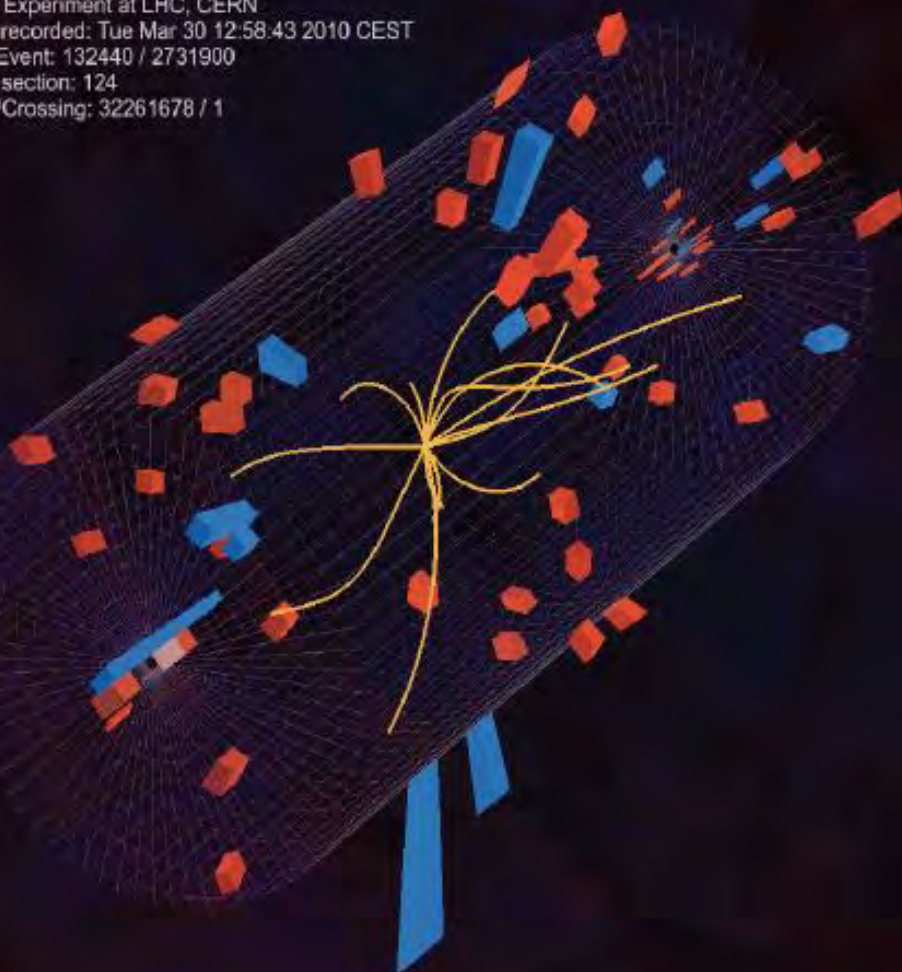




Within seconds: 7 TeV First Collisions



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Mar 30 12:58:43 2010 CEST
Run/Event: 132440 / 2731900
Lumi section: 124
Orbit/Crossing: 32261678 / 1





Inclusive D^{*+} production. $D^{*+} \rightarrow D^0(K^-\pi^+)\pi^+$

All pairs of oppositely charged tracks with $p_T(\text{track}) > 0.5 \text{ GeV}/c$ combined

Vertex constrained kinematic fit (using KalmanVertexFitter)

$M(K\pi)$ of the fitted tracks to be within a $200 \text{ MeV}/c^2$ window around D^0 PDG mass required

Combine the D^0 candidate with a soft pion π^\pm candidates with opposite charge to the K track

Require $\Delta M = M(K\pi\pi) - M(K\pi) < 0.18 \text{ GeV}/c^2$

