

# Jak zkoumáme strukturu hmoty v CERNu?

U3V FJFI  
Praha  
28. 02. 2019

Tomáš Jakoubek

FZÚ AV ČR, FJFI ČVUT, CERN  
[tomas.jakoubek@cern.ch](mailto:tomas.jakoubek@cern.ch)

# Co nás čeká a nemine?

- Co je to vlastně ten **CERN**?
- **CO** tam zkoumáme?
- **JAK/ČÍM** to zkoumáme?
- **PROČ** to zkoumáme aneb  
“K čemu je to celé dobré?”
- (Bonusy)



Převzato z [1]



# Co je to ten CERN?

- European Organization for Nuclear Research
- Mezinárodní (více než Evropská) laboratoř věnující se základnímu výzkumu v oblasti částicové fyziky, založen 1954
- Zkratka z Fr: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



Převzato z [2]

# Poslání CERNu

**Výzkum:** nalézat odpovědi na otázky o vzniku a podstatě vesmíru

**Technologie:** rozšiřovat hranice současné technologie

**Spolupráce:** sbližovat národy prostřednictvím vědy

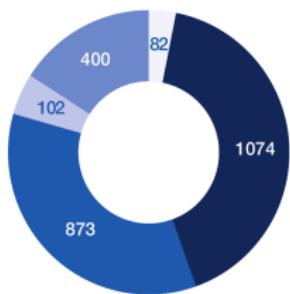
**Vzdělávání:** podporovat a vzdělávat budoucí vědce

- Dnes je to především zázemí pro experimenty, které mohou využívat vědci ze všech členských zemí
- CERN  $\neq$  LHC, je tu dalších 20 různých experimentů



# CERN a lidé

- Cca 3000 kmenových zaměstnanců (2500 placeno CERNem)
- Cca 13000 vědců z 793 institucí a univerzit z celého světa přijíždí na pracovní pobytu nebo konference v roli "uživatelů"...



Převzato z [4]

- Staff
- Research physicists
- Engineers and scientists
- Technicians
- Craftspeople
- Administrators and office staff



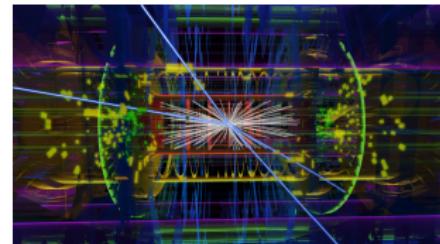
Převzato z [5]

- Rozloha asi 200 hektarů; toto území nepatří žádnému státu, CERN je zde suverénním pánum; příroda, ovce...
- 22 členských zemí + kandidáti, čekatelé, pozorovatelé (USA, Rusko, Japonsko)... BTW: nejde o projekt EU.

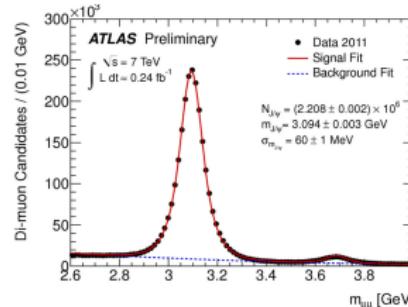


# CO tam zkoumáme?

- Higgsův boson (Božsk... ale FUJ!)
- Temná hmota, temná energie
- Další dimenze
- Antihmota (není jenom ve StarTreku)
- Narušení  $CP$
- “Černé díry”
- Quark Gluonové Plasma (“Velký třesk”)<sup>1</sup>



Převzato z [6]

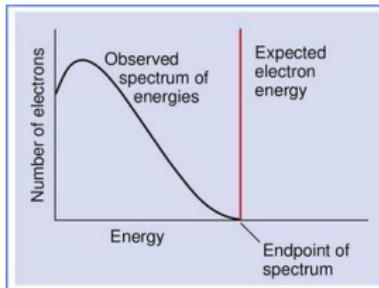


Převzato z [7]

<sup>1</sup>100000× vyšší teplota než v nitru Slunce

# Hmota?

- Trocha (časově nepřesné) historie:
  - Světlo: vlna nebo částice?
  - Neutrino



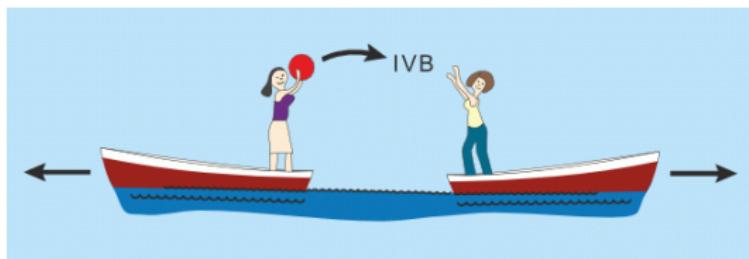
Převzato z [8]

- Antihmota
  - $E^2 = X \Rightarrow E = \pm\sqrt{X}$
  - $E \cdot t - \vec{x} \cdot \vec{p} = (-E) \cdot (-t) - (-\vec{x}) \cdot (-\vec{p})$
- Miony
- Kvarky
- Co dál?



# Síly - interakce

- Analogie
- Kde je najdeme? Přenašeč? Teorie?
  - Gravitace (1)
  - Slabá síla ( $10^{25}$ )
  - Elektromagnetická síla ( $10^{36}$ )
  - Silná síla ( $10^{38}$ )
- Zmínka o Standardním modelu...



Omlouvám se, ale nemůžu najít originál :-(



# Higgsův boson

- Jak získávají částice hmotnost?



Převzato z [9]

# Higgsův boson

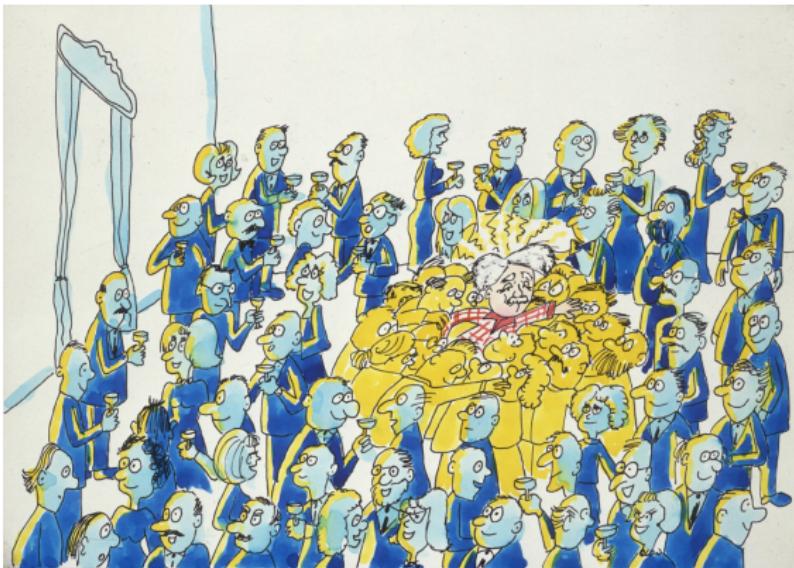
- Jak získávají částice hmotnost?



Převzato z [9]

# Higgsův boson

- Jak získávají částice hmotnost?



Převzato z [9]

# Higgsův boson

- Jak získávají částice hmotnost?
- Jak získává Higgsův boson hmotnost?



Převzato z [9]

# Higgsův boson

- Jak získávají částice hmotnost?
- Jak získává Higgsův boson hmotnost?



Převzato z [9]

# Higgsův boson

- Jak získávají částice hmotnost?
- Jak získává Higgsův boson hmotnost?



Převzato z [9]

# Standardní model

- Popisuje částice a jejich interakce
- Podporován experimenty, ale není všemocný...

QUARKS		GAUGE BOSONS	
mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	charge → $2/3$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
spin → $1/2$		$2/3$	$2/3$
up	charm	top	gluon
LEPTONS		Higgs boson	
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
-1/3	-1/3	-1/3	0
1/2	1/2	1/2	0
down	strange	bottom	photon
$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$
-1	-1	-1	0
1/2	1/2	1/2	1
electron	muon	tau	Z boson
$<2.2 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
0	0	0	$\pm 1$
1/2	1/2	1/2	1
electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	W boson

Převzato z [10]



# JAK/ČÍM to zkoumáme?

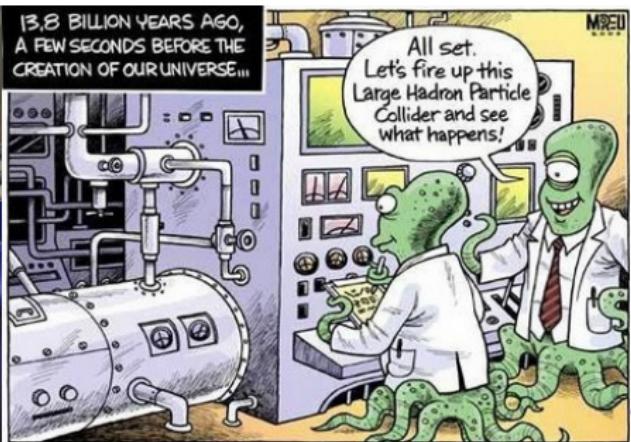
## Urychlovače a detektory

### ■ Proč?

- Obří mikroskop (dualismus vlna-částice, rozlišení)
- Velké energie ( $E = mc^2$ ), TeV (komár), srážky (švestky)



Převzato z [11]



Převzato z [12]

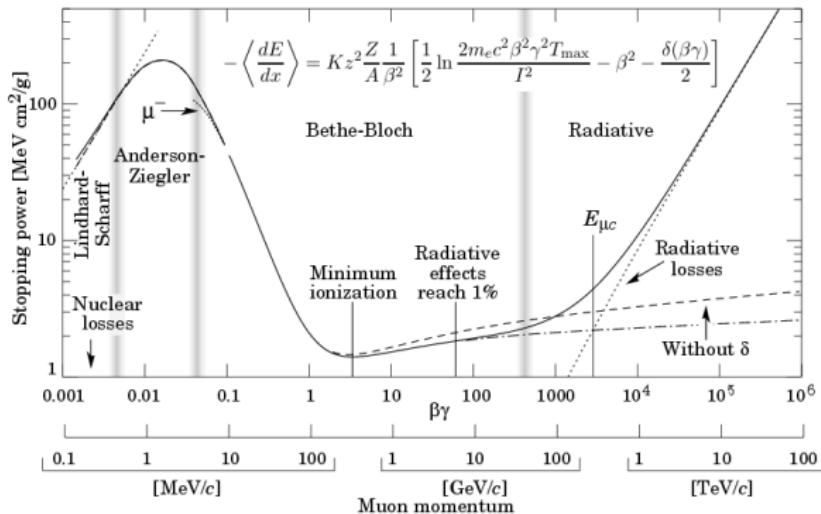
# JAK/ČÍM to zkoumáme?

## Urychlovače a detektory

- Základní princip urychlovače:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

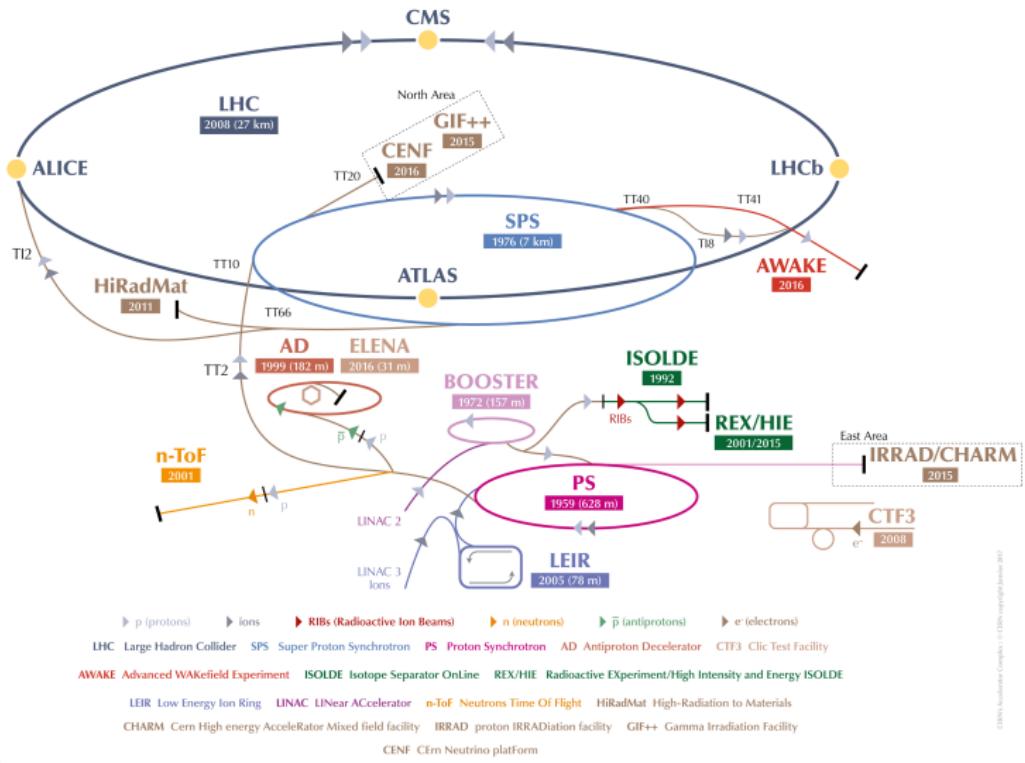
- Základní princip detektoru:



Žádný strach, pouze pro ilustraci; převzato z [13]

# CERN...

## ... a jeho komplex urychlovačů



# CERN...

## ... a ohromující fakta o LHC

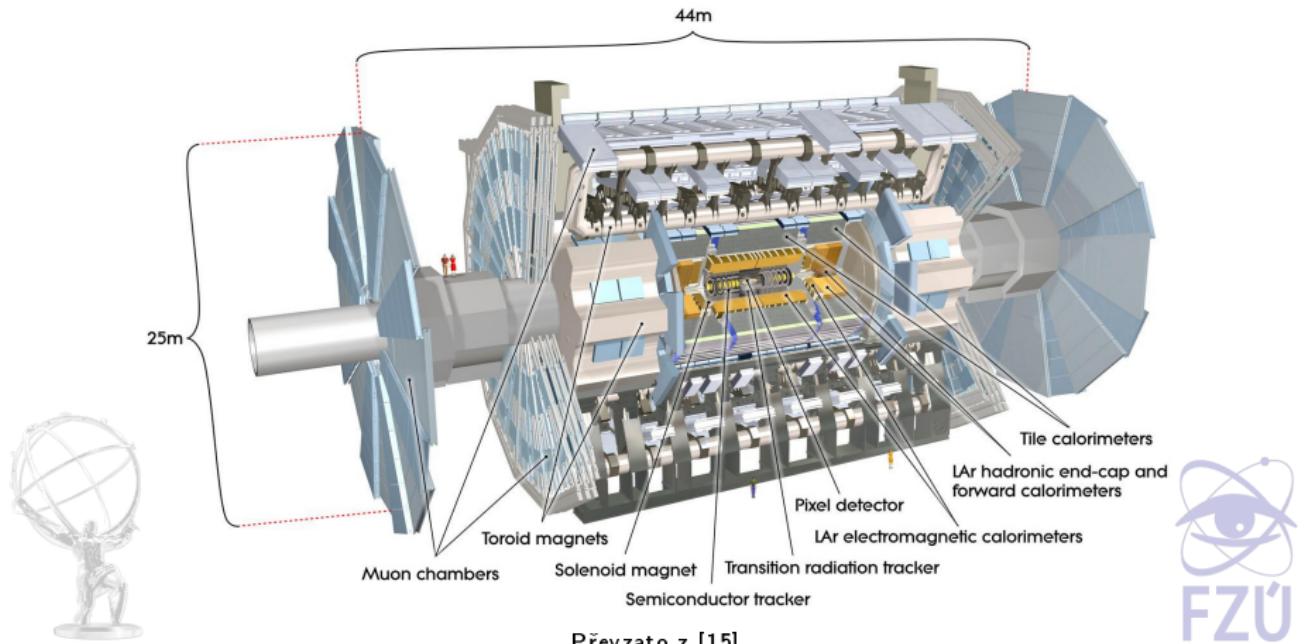
- 26.7 km obvod, 50-175 m pod zemí, provozní teplota 1.9 K, energie 14 TeV (de facto prototyp, postupné zvyšování energie, nyní 13 TeV)
- Cca 9600 magnetů
- Dipóly: pole 8.33 T, 15 m, 35 t, supravodivé NbTi vedou 11.8 kA - 36 pramenů × 6400 vláken ( $7 \mu\text{m}$ )
- Celé LHC 7600 km kabelů (prameny by 6× omotaly Zemi kolem rovníku), vlákna by šla natáhnout 5× ke Slunci a zpět a ještě by zbylo na pár spojení s Měsícem
- 2808 bunchů, 25 ns (cca 7 m) rozestup, cca  $10^{11}$  protonů v bunchi, celý svazek 360 MJ (energie jedoucího TGV!, resp. 80 kg TNT, příp. 16 kg čokolády - na kalorie), 600 mil. srážek/s
- Celková energie v LHC magnetech cca 11 GJ



# CERN, LHC a jeho detektory

## ATLAS

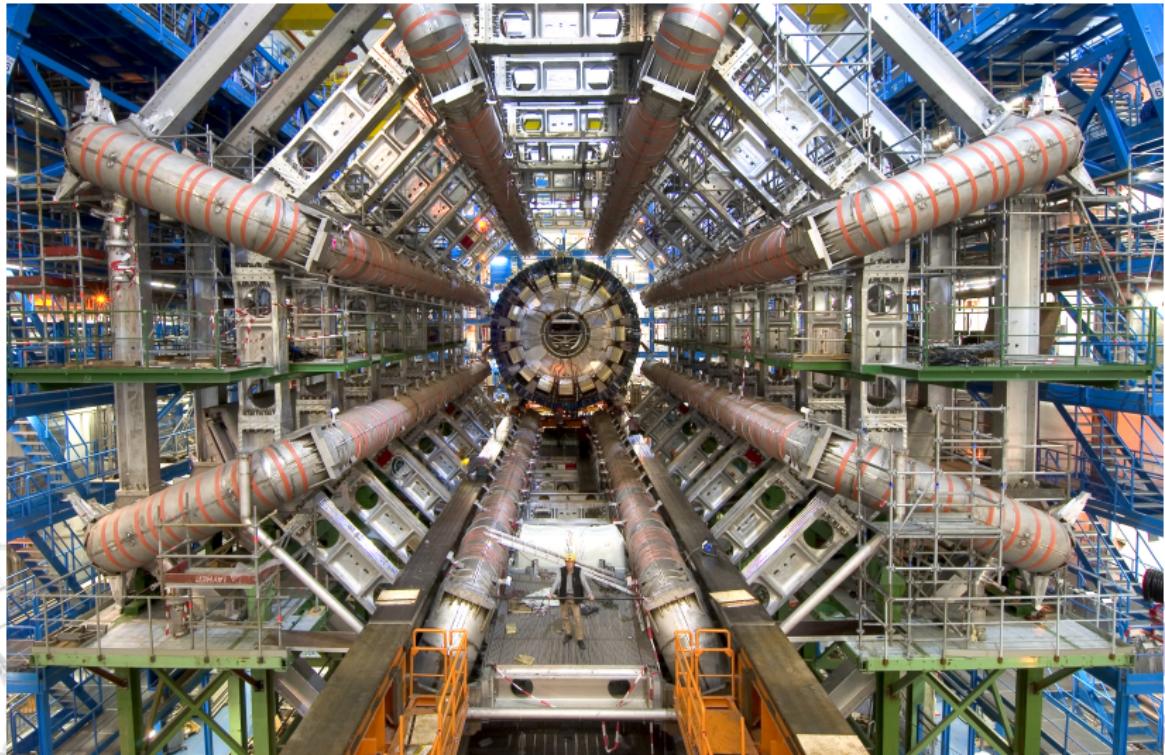
- Hmotnost cca jako 100 B747 Jumbo-jet (prazdných), velikost asi jako polovina katedrály Notre Dame de Paris, přesnost 1 mikrometer



Převzato z [15]

# CERN, LHC a jeho detektory

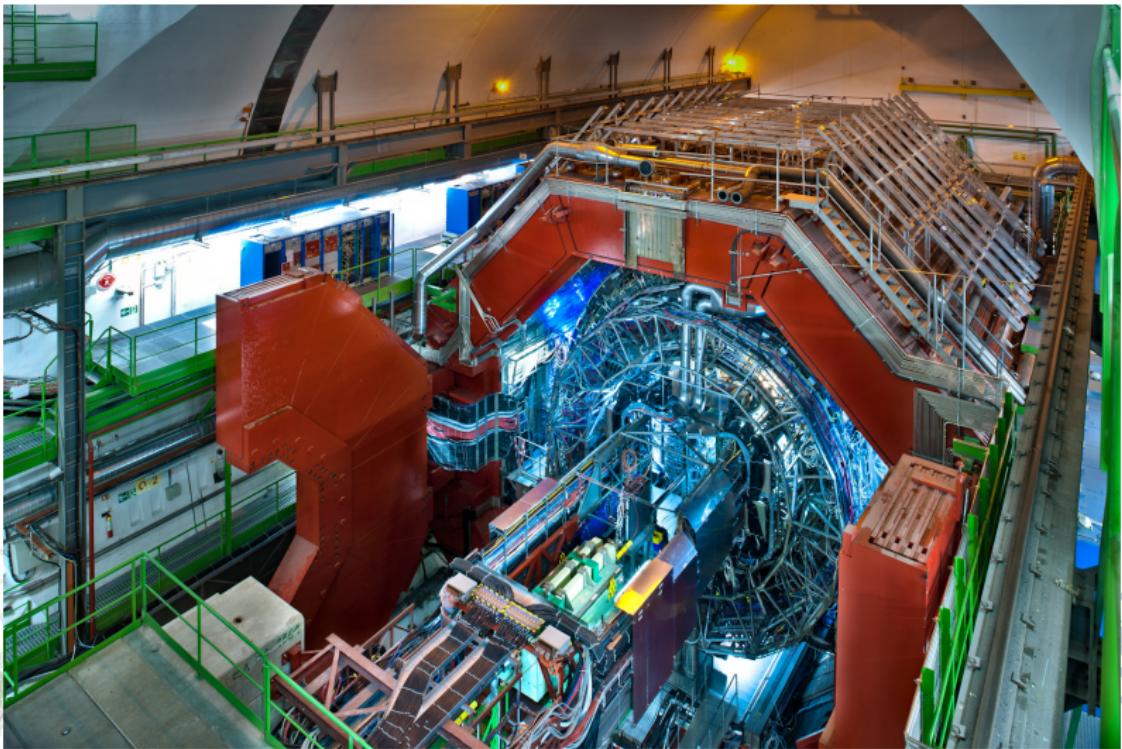
## ATLAS



Převzato z [16]

# CERN, LHC a jeho detektory

## ALICE



Převzato z [17]

# Technologie v CERN

## Chlazení LHC

- Chlazení LHC trvá týdny, je potřeba asi 120 t hélia a 40 MW el. výkonu
- První fáze: helium na 80 K, tepelný výměník, 10000 t tekutého dusíku
- Druhá fáze: na 4.5 K (urychlovací kavity nebo vstřík do magnetu), turbíny (150 kW)
- Třetí fáze: vstříknutí do magnetů a ochlazení na 1.9 K (supratekuté helium), 20 kW chladič (1.8 K)
- Celkem se chladí 36000 t hmoty (magnetů)
- Chladit je potřeba i části detektorů (tekutý argon)
- Ztráty hélia cca 20 t/rok



- Izolační vákuum pro
  - Kryomagnety
  - Distribuci supratekutého hélia pro kryomagnety (pracují při 1.9 K)
  - Celkem 50 km,  $\sim 15000 \text{ m}^3$ , asi jako hlavní loď katedrály,  $10^{-9}$  ATM
- Vákuum ve svazkovodu ("beampipe"), čistá cesta pro svazek,  
 $10^{-13}$  ATM, 54 km
  - 48 km oblouky LHC, 1.9 K, magnety, kryogenické pumpování  
(kondenzace, adsorpce na stěně trubice)
  - 6 km rovné části LHC, "pokojová" teplota, detektory atd.,  
neodpařitelný "povlak" getru (titan-zirkon-vanad), který po aktivaci  
( $200^\circ$ ) absorbuje zbytkové molekuly (účinné pro odstranění všech  
plynů s výjimkou methanu a vzácných plynů, ty se odvádějí pomocí  
780 iontových pump), pravidelné vypékání zvnějšku ( $300^\circ$ )



# Data z LHC

- LHC experimenty = cca 150 M senzorů posílajících data 30 MHz
- Systém triggerů (filtrů) sníží tok na několik stovek **zajímavých** událostí (srážek) za sekundu
- Tok dat ze 4 hlavních experimentů LHC je několik GB/s, cca 50 PB/rok (12 km vež DVD)
- Statistické zpracování velkého množství dat (tzn. znalost fyziky, matematiky a programování... ale princip je stejný jako před 50 lety), speciální programy (ROOT)
- Data musí být přístupná tisícům fyziků po celém světě, náhodné přístupy k obrovskému množství dat v libovolnou denní/noční dobu... a tak vznikl...



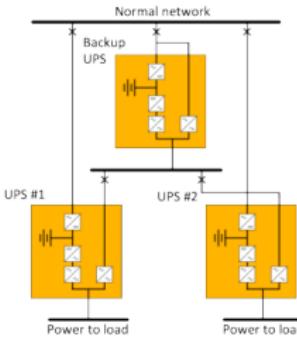
# GRID

- 170 center ve 42 státech, 2 M úloh/den, pík 10 GB/s, 6000 změn v DB za sekundu
  - Tier-0 (CERN a Budapešť): spojení 2x 100 Gbit/s, uložení RAW dat, první rekonstrukce dat, výstup na Tier-1
  - Tier-1 (13 velkých datacenter po celém světě): 10 Gbit/s, uložení část RAW dat, rekonstrukce, reprocessing, uložení výstupů, distribuce na Tier-2 a zpětné uložení výstupů
  - Tier-2 (160 datacenter po celém světě: university, akademie věd): kopie finálních dat pro koncové uživatele (fyzikové), konečné výpočty/analýzy (úlohy definované fyziky na konkretních datech)
  - Tier-3 (lokální stroje): blíže nespecifikováno, může být laptop nebo třeba náš 12 CPUs, 32 GB RAM, 28 TB mazlíček s vlastní UPS v naší kanceláři v CERNu :-)
- CERN: cca 100000 CPUs, 45 PB na uložení dat, 3.5 MW
- Budapešť: cca 20000 CPU, 5.5 PB (plánováno zdvojnásobení)

# Kolik to žere?

A kde se to bere?

- Spotřeba LHC cca 120 MW
- Spotřeba CERN cca 230 MW (v zimě cca 80 MW)
- Celkem 1.3 TWh/rok (cca třetina celého Ženevského kantonu)
- Energie z Francouzské sítě EDF (400 kV), Švýcarské EOS a SIG jako záloha (130 Kv, limit 60 MW)
- LHC má 32 UPS zón, 10 min, 80 t elektroniky, 280 t baterií
- Diesel-generátory (designované pro pohon ponorek), obrovské nádrže
- Záložní zdroje **POUZE** pro bezpečné vypnutí a interlocky



Převzato z [21]

# Kolik to stojí?

	Cena [M CHF]
LHC (RD apod.)	3756
LHC (roční provoz)	20
Podíl CERNu na detektorech LHC	493
Celková cena detektorů LHC	~1500
Podíl CERNu na LHC computing	83
Rozpočet CERNu na rok	1100
Podíl ČR	~11 (285 M Kč)



# Strípky z CERNu

## Přesnost LHC

- Při ražení tunelu se oba konce setkali s přesností 1 cm
- Slapové síly Měsíce - "příliv" Zemské kúry cca 25 cm v oblasti Ženevy - změna 1 mm v obvodu urychlovače (cca 27 km), potřeba započítat a načasovat vstříknutí svazku
- Srazit dva svazky protonů přesně uprostřed detektoru - asi jako vystřelit jehly z obou konců tunelu pod La Manche tak, aby se v půlce srazily...



# Strípky z CERNu

## Historie

### ■ LEP (Large Electron Positron collider): fáze Měsíce a... TGV!

#### A newly observed effect affects the LEP beam energy

G. Brun, B. Dehning, P. Galbraith, K. Henrichsen, M. Koratzinos, M. Placidi, P. Puzzo  
CERN, Geneva, Switzerland

A. Drees, BUGH, Wuppertal, Germany, M. Geitz, RWTH, Aachen, Germany

#### Abstract

The LEP magnetic bending field and therefore the beam energy is changed by a current flow over the vacuum chamber. The current is created by trains travelling between the Geneva main station and destinations in France. Some of the rail current leaks into earth and returns to the power station via the LEP tunnel where the vacuum chamber is one of the conductors. Train leakage currents penetrate LEP at the injection lines from the SPS close to IP1 and between IP5 and IP7, thereby interacting with the magnetic dipole field. The observed changes in B field cause beam energy increases of several MeV.

#### 1 INTRODUCTION

The LEP energy was determined with high precision in 1995 to improve the errors on the Z mass and width and to confirm the results of the 1993 measurements [1]. For the first time since LEP was commissioned the bending field has been monitored with probes installed inside the tunnel dipole magnets.

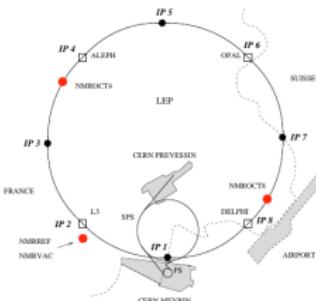


Figure 1: LEP ring with its experiments and the positions of the 4 NMR probes. Two probes, NMRREF and NMRVAC, are installed in the reference magnet in a surface building close to IP2 (L3) while NMROCT4 and NMROCT8 are mounted underground in two LEP bending magnets near IP4 and IP8.

Převzato z [23]



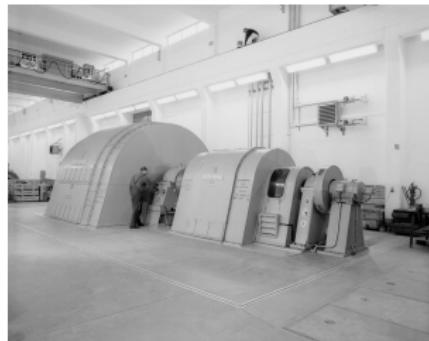
# Strípky z CERNu

## Historie

- PS (Proton Synchrotron): "předurychlovač" LHC, protony na 26 GeV
- Během každého cyklu (1.2 s nebo 2.4 s) 100 magnetů ohýbajících dráhu přejde  $-40 \text{ MW} \rightarrow +40 \text{ MW}$  - není možné odebírat ze sítě
- Řešení: motor (4 MW) - setrvačník (80 t, 1000 rpm, 233 MJ) - generátor (40 MW ho zpomalí jen o pár %)
- První 1959-1967, nová verze 1968-2008 (?), nyní řešení na principu kondenzátorů a DC/DC převodníků



Převzato z [25]



Převzato z [26]



# Strípky z CERNu

## Historie

- PS (Proton Synchrotron): "předurychlovač" LHC, protony na 26 GeV
- Během každého cyklu (1.2 s nebo 2.4 s) 100 magnetů ohýbajících dráhu přejde  $-40 \text{ MW} \rightarrow +40 \text{ MW}$  - není možné odebírat ze sítě
- Řešení: motor (4 MW) - setrvačník (80 t, 1000 rpm, 233 MJ) - generátor (40 MW ho zpomalí jen o pár %)
- První 1959-1967, nová verze 1968-2008 (?), nyní řešení na principu kondenzátorů a DC/DC převodníků



Převzato z [27]



Převzato z [27]

FZU

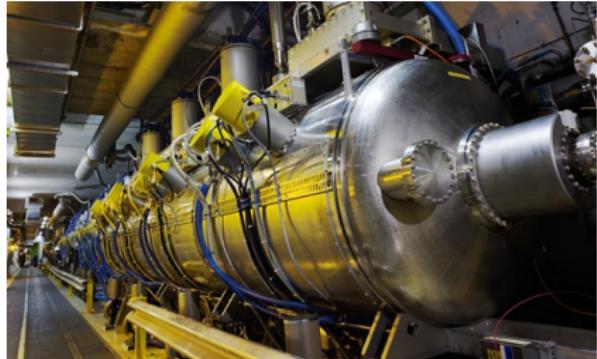
# Strípky z CERNu

## Urychlovací kavity LHC

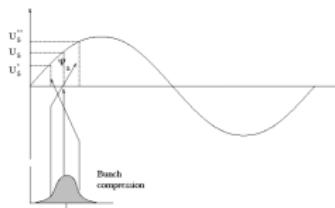
- Proud svazku 0.5 A
- 8 na svazek, každá 2 MV (5 MV/m urychlující pole), 400 MHz
- Jednotka obsahuje heliový tank (provozní teplota je 4.5 K)



Převzato z [28]



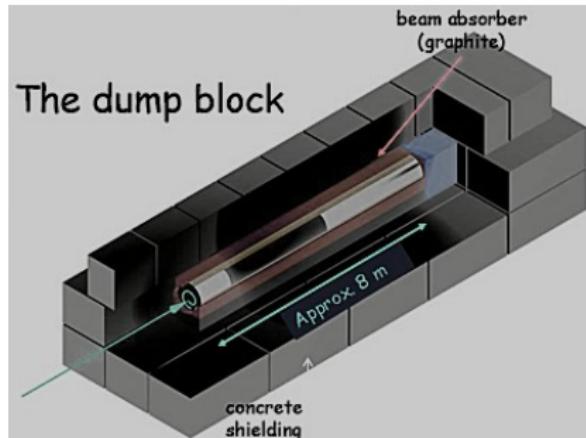
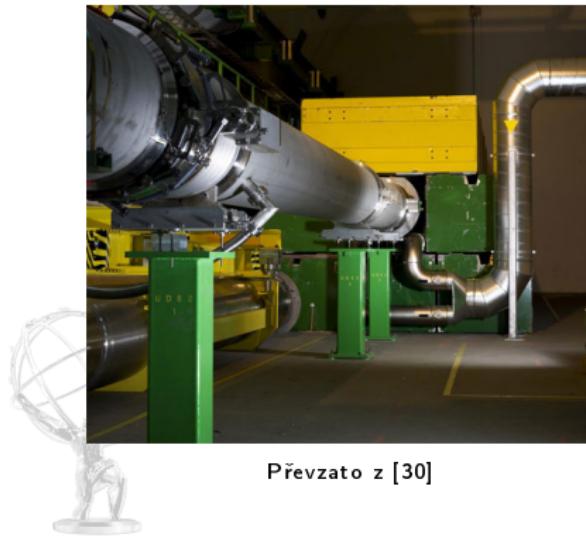
Převzato z [29]



# Strípky z CERNu

## Beam dump

- Nestabilní svazek může poškodit LHC (energie svazku 360 MJ!)
- Od detekce to trvá 3 oběhy ( $< 0.3$  ms) do extrakce (pomocí magnetů)
- Jediná součást LHC, která vydrží plný zásah:



# Strípky z CERNu

## Co tu všechno máme...

- Opravdu je vstup do podzemí chráněn scanem sítnice...
- A taky tu máme útulek pro (počítačové) myši...



Převzato z [32]



# PROČ to zkoumáme?

## “K čemu je to celé dobré?”

- Galvani, Faraday...
- HEP:
  - PET (historie)
  - Ozařování
  - MediPix apod.
  - Wwww
  - Supravodiče
  - Zpracování jad. odpadu



Převzato z [33]



# Díky za pozornost! Otázky či jiné?

...

Mail: [tomas.jakoubek@cern.ch](mailto:tomas.jakoubek@cern.ch)

Web: [home.cern](http://home.cern), [atlas.cern](http://atlas.cern)

[fzu.cz](http://fzu.cz), [ejcf.cz](http://ejcf.cz)  
[\(tomjak.cz\)](http://tomjak.cz)



Převzato z [34]



# References |

- [1] CERN, *Aerial view of CERN and the surrounding region*, CERN-SI-9105065, <https://cds.cern.ch/record/39026>
- [2] Wikimedia, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CERN-aerial.jpg>
- [3] CERN, *LHC Guide*, CERN-Brochure-2017-002-Eng, <https://cds.cern.ch/record/2255762>
- [4] F. Marcastel, *CERN Quick Facts 2016 (English version)*, CERN-Brochure-2016-002-Eng, <https://cds.cern.ch/record/2152342>
- [5] M. Brice, *Pictures of the CERN Flags - April 2014*, CERN-PHOTO-201411-229, <https://cds.cern.ch/record/1968153>
- [6] ATLAS Collaboration, *An ATLAS event with 4 muons*, ATLAS-PHO-EVENTS-2014-015, <https://cds.cern.ch/record/1697053>
- [7] ATLAS Collaboration, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/BPhysPublicResults>
- [8] <http://www.cobra-experiment.org/>
- [9] G. Boixader, *The Higgs mechanism*, CERN-MI-9603021, <http://cds.cern.ch/record/1221471>
- [10] Wikimedia, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg)
- [11] M. Brice, *View of the LHC cryo-magnet between point 1 and 8.*, CERN-EX-0703001, <https://cds.cern.ch/record/1020312>
- [12] <https://cz.pinterest.com/trystorp/big-history/>
- [13] C. Patrignani et al., *Review of Particle Physics*, Chin. Phys. C 40 (2016) no.10, 100001



# References II

- [14] C. De Melis, *The CERN accelerator complex*, OPEN-PHO-ACCEL-2016-009, <https://cds.cern.ch/record/2197559>
- [15] J. Pequenao, *Computer generated image of the whole ATLAS detector*, CERN-GE-0803012, <https://cds.cern.ch/record/1095924>
- [16] M. Brice, *Installing the ATLAS calorimeter*, CERN-EX-0511013, <https://cds.cern.ch/record/910381>
- [17] A. Saba, *The ALICE detector*, ALICE-PHO-GEN-2012-001, <https://cds.cern.ch/record/1436153>
- [18] CERN, *About CERN*, <https://home.cern/about/engineering/cryogenics-low-temperatures-high-performance>
- [19] CERN, *About CERN*, <https://home.cern/about/engineering/vacuum-empty-interstellar-space>
- [20] CERN, *About CERN*, <https://home.cern/about/engineering/powering-cern>
- [21] CERN Bulletin, *Keeping the LHC in power*, <https://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2013/21/NewsArticles/1547273>
- [22] CERN, *CERN Electrical Power Consumption*, <http://en.web.cern.ch/sites/en.web.cern.ch/files/ElectricityFlyer2014.pdf>
- [23] G. Brun et al., *A Newly observed effect affects the LEP beam energy*, Conf. Proc. C 960610 (1996) 421.
- [24] D. Mazur, *Power converter with integrated energy storage*, <http://kt.cern/technology-transfer/external-partners/power-converter-with-integrated-energy-storage>
- [25] CERN, *The main current generator of the PS magnet*, CERN-IT-5901166, <https://cds.cern.ch/record/39924>
- [26] CERN, *Motor-generator set of the PS main supply*, CERN-AC-6803016, <https://cds.cern.ch/record/615847>

# References III

- [27] M. Brice, *PS main supply: motor-generator set*, CERN-IT-0201010, <https://cds.cern.ch/record/42609>
- [28] CERN, *About CERN*, <https://home.cern/about/engineering/radiofrequency-cavities>
- [29] CERN, *LHC Inauguration - LHC Exhibition*, <https://lhc2008.web.cern.ch/lhc2008/inauguration/lhcexpo.html>
- [30] LHC-facts, *Beam Dump*, <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=beamdump>
- [31] X. C. Vidal, R. C. Manzano, *Taking a closer look at LHC - LHC layout*,  
[https://www.lhc-closer.es/taking\\_a\\_closer\\_look\\_at\\_lhc/0.lhc\\_layout](https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.lhc_layout)
- [32] M. Brice, G. Perrenoud, *The new biometric access control system resembles a big electronic eye*,  
CERN-GE-0608007, <https://cds.cern.ch/record/978809>
- [33] Wikimedia, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Where\\_the\\_WEB\\_was\\_born.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Where_the_WEB_was_born.jpg)
- [34] CollegeHumor, *If Ikea Made Instructions for Everything*,  
<http://www.collegehumor.com/post/6340023/if-ikea-made-instructions-for-everything>

