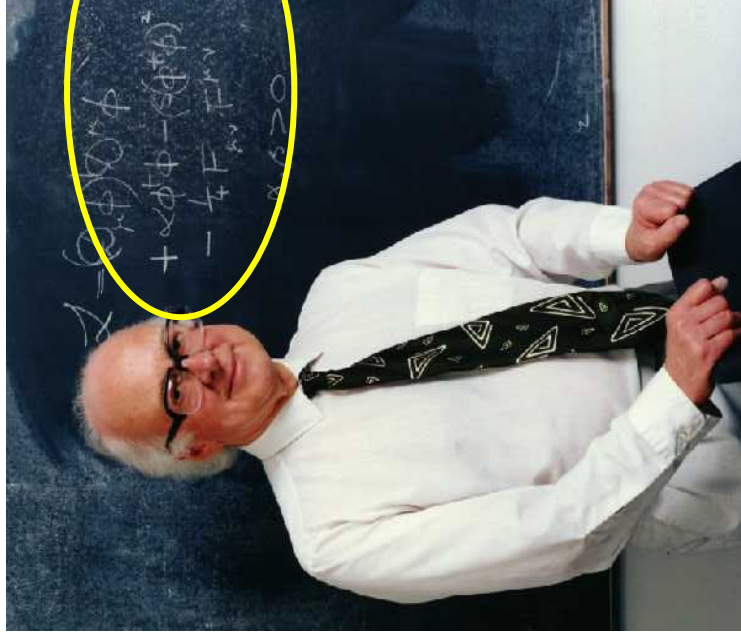


Přednáška 11.(18.12.2007)

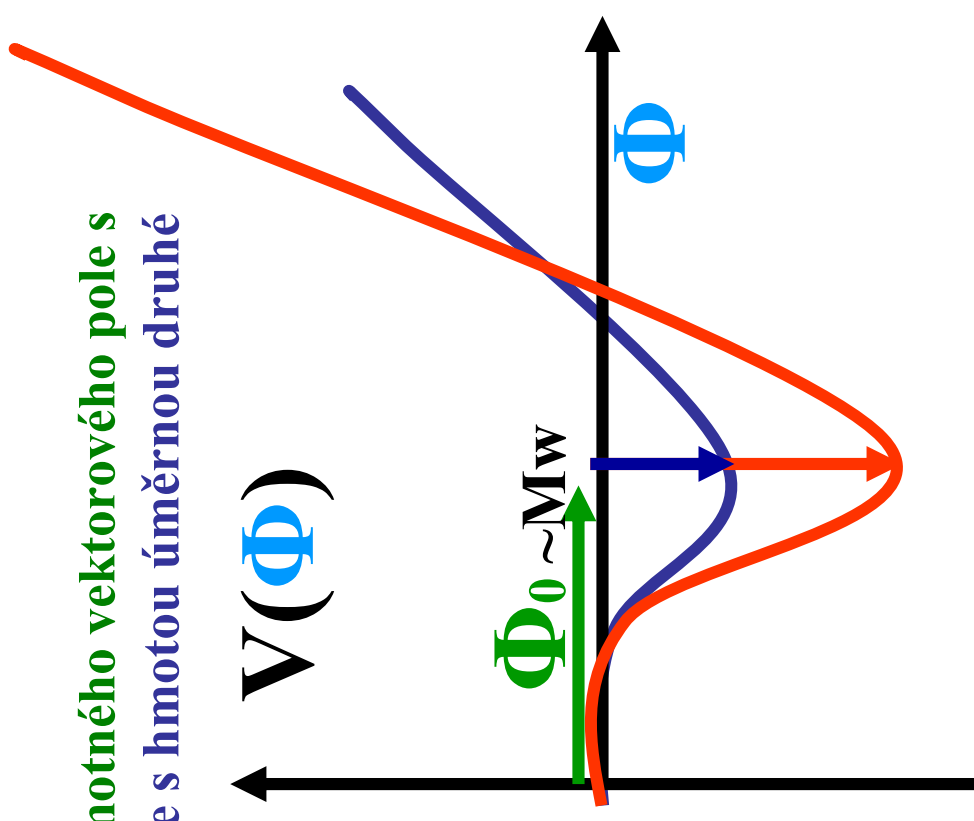
- Higgsův boson
- Supersymetrické částice
- Současná fyzika částic.
- Experiment ATLAS na LHC

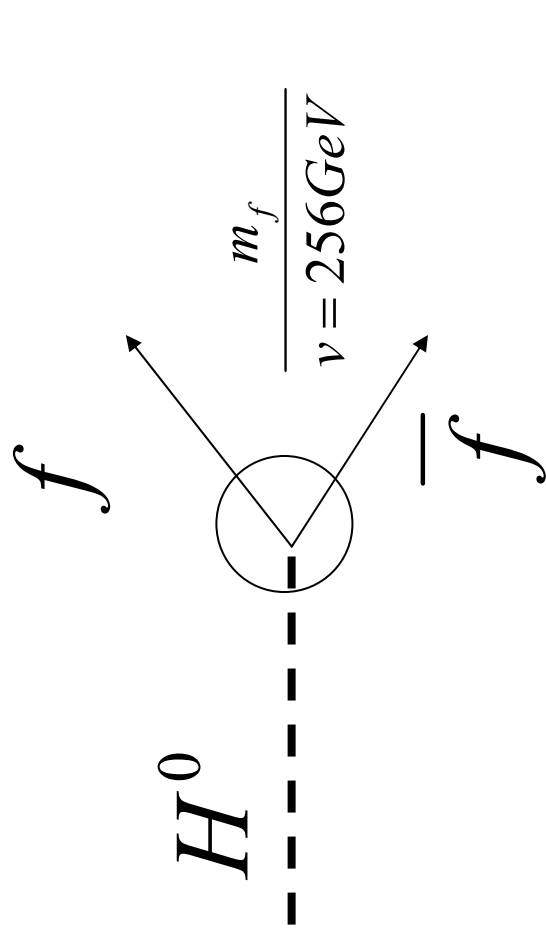
Higgsův mechanismus

- Řešení problému existence nenulových klidových hmot intermediálních bosonů W a Z .
- Předpokládáme **nehmotné vektorové pole A** a **nehmotné skalární pole s** interakčním potenciálem, který má minimum v φ_0 .
- Rozvoj okolo hodnoty minima vede k existenci **hmotného vektorového pole s** **hmotou úměrnou φ_0** a **hmotného skalárního pole s** hmotou úměrnou druhé derivaci potenciálu V v bodě φ_0 .

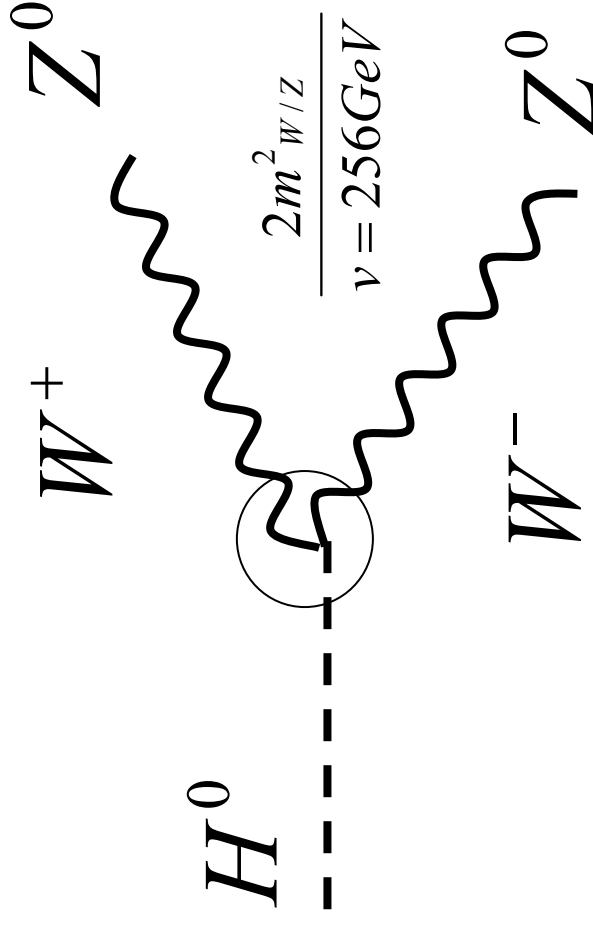


P. W. Higgs

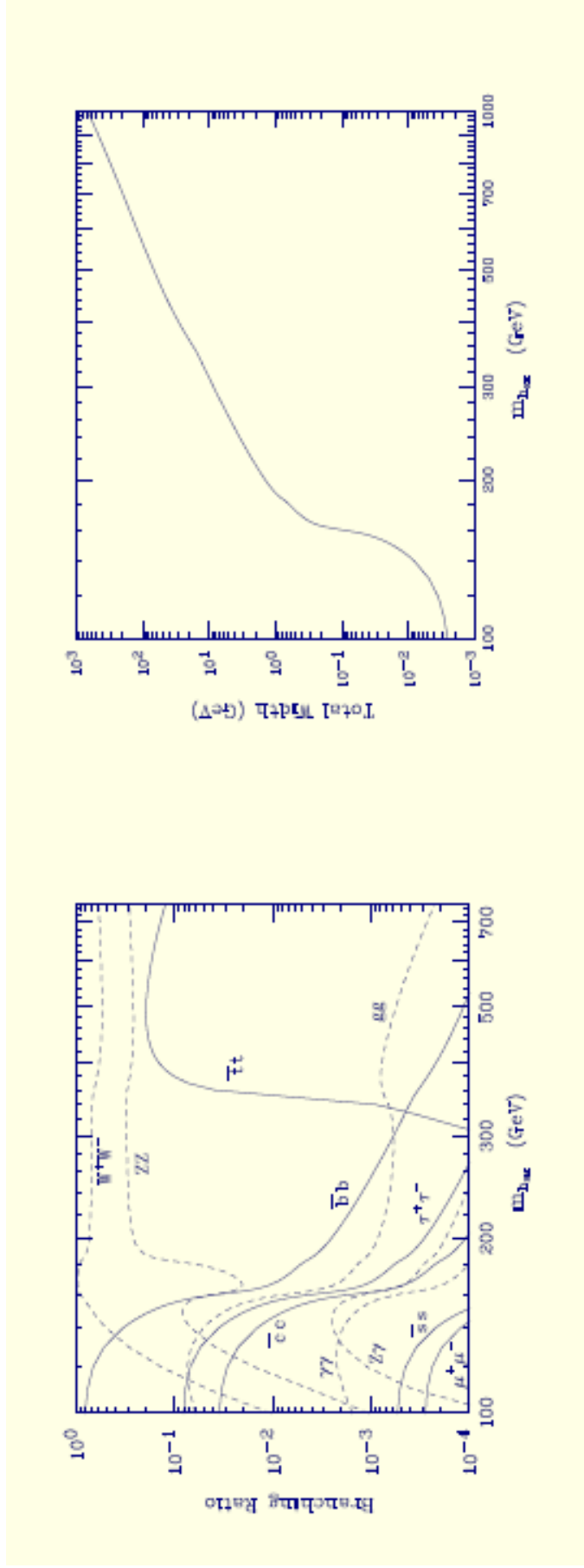




- Higgsův boson je hmotná částice se spinem 0, dosud neobjevená
- V nejjednodušší verzi existuje jeden H s nulovým nábojem a spinem 0
- Amplituda rozpadu H je úměrná hmotě částic na něž se může Higgsův boson rozpadnout (pravděpodobnost je úměrná kvadrátu hmoty)
- Higgsův boson se rozpadá na nejtěžší částice na něž se může rozpadnout

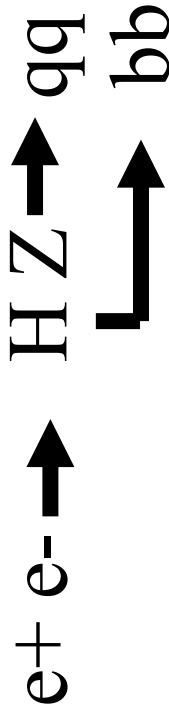


- Amplituda rozpadu H je úměrná hmotě částic na něž se může Higgsův boson rozpadnout (pravděpodobnost je úměrná kvadrátu hmoty)
- Higgsův boson se rozpadá na nejtěžší částice na něž se může rozpadnout



Byl v experimentech na LEP v závěru roku 2000

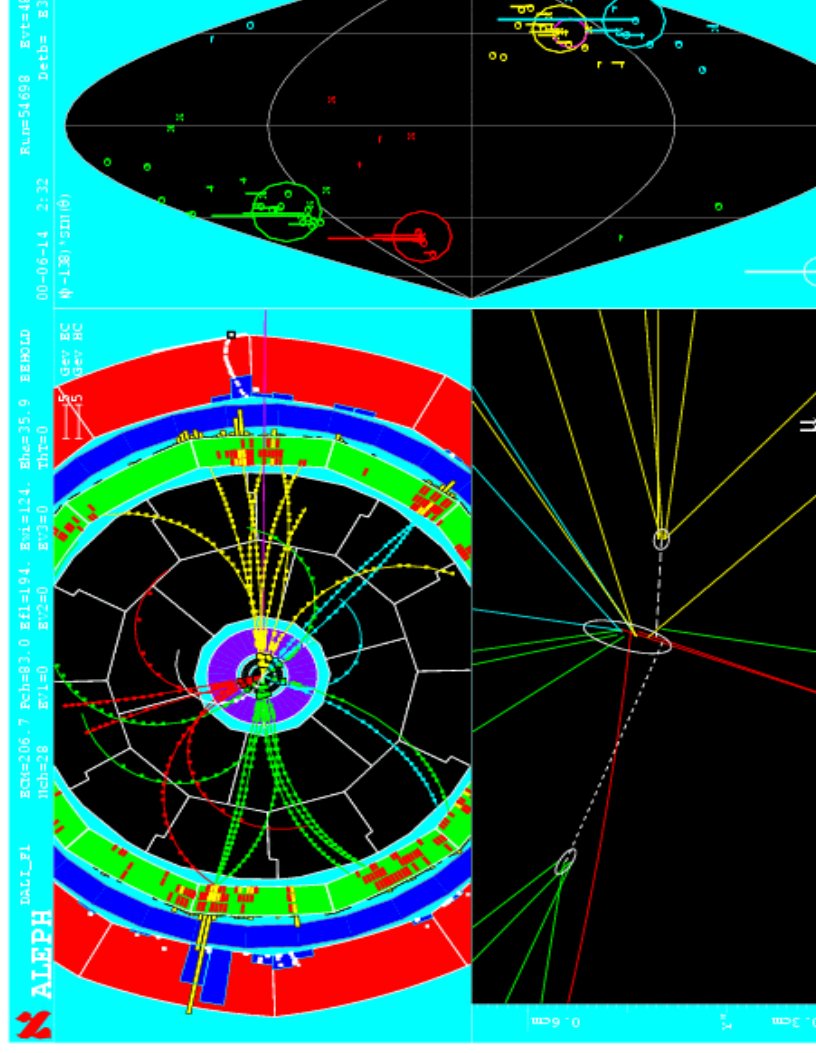
pozorován Higgsův boson ?



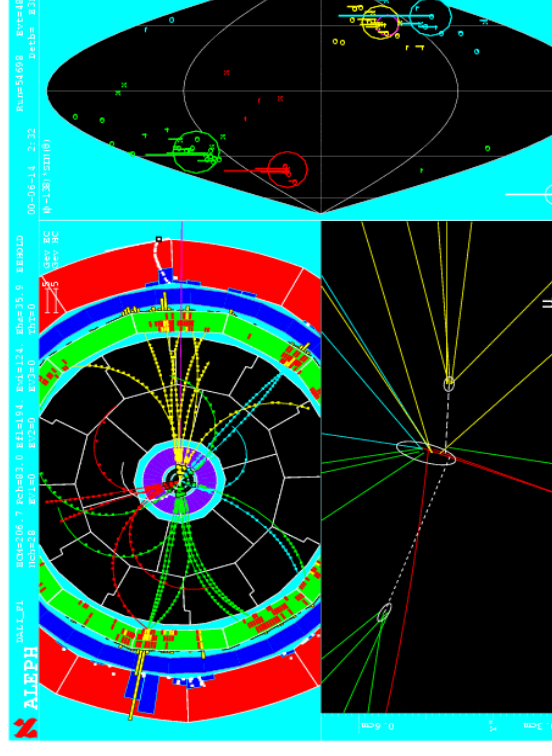
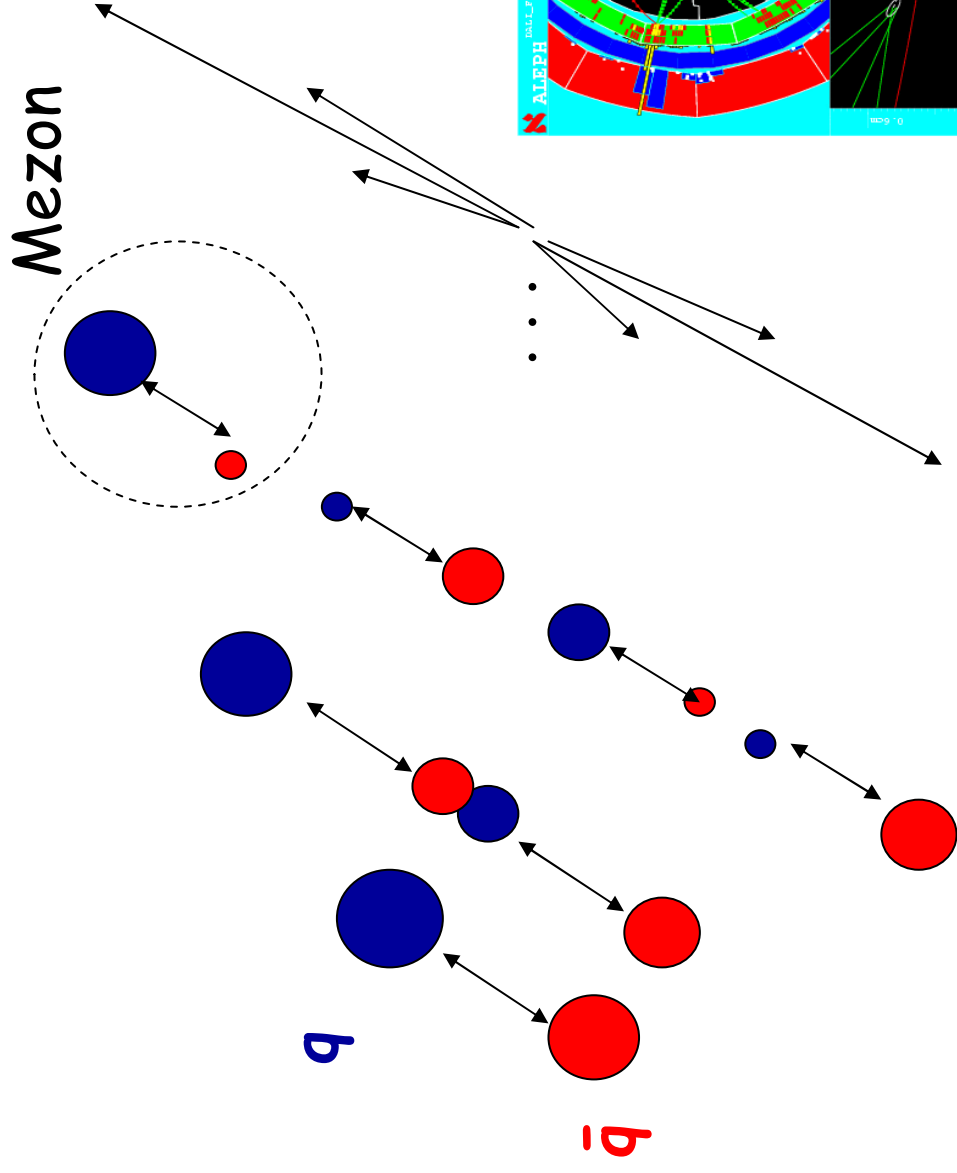
Příznak **b-jetu** je existence tzv.

sekundárních vrcholů

v jetu, jejichž původ je v rozpadech relativně dlouhožijících B mezonů



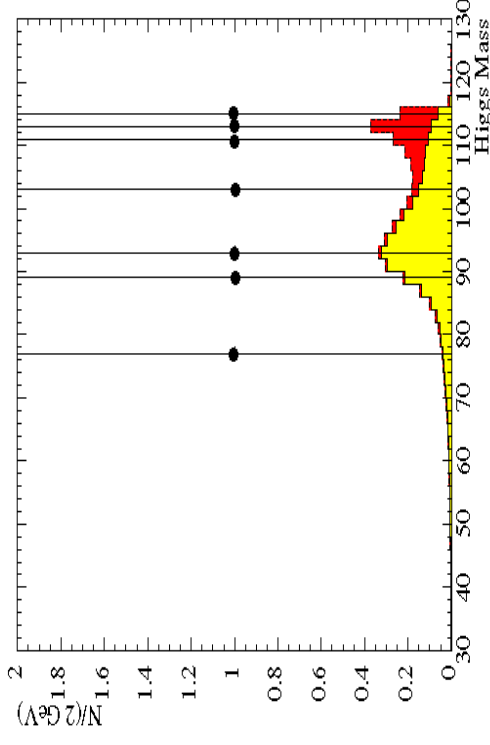
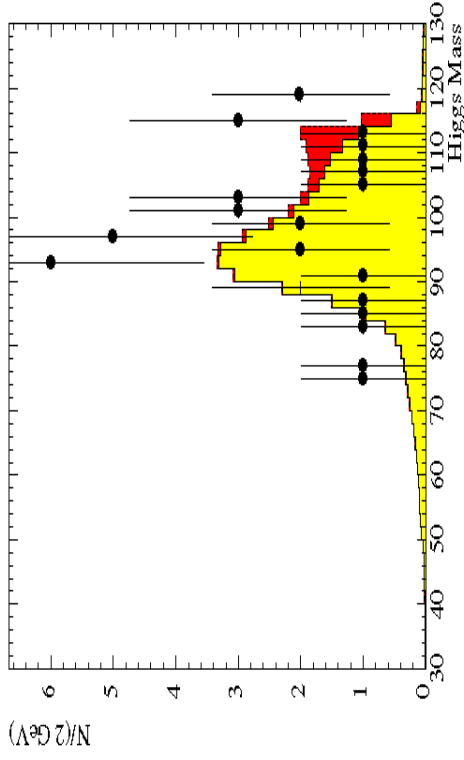
Vznik jetů



Rozdělení invariantní hmoty páru b-jetů v experimentu ALEPH

$$(E, \vec{p}) = (E_1, \vec{p}_1) + (E_2, \vec{p}_2) + \dots + (E_n, \vec{p}_n)$$

$$M^2 = E^2 - \left(\vec{p}_1 \right)^2 = (E_1 + \dots + E_n)^2 - \left(\vec{p}_1 + \dots + \vec{p}_1 \right)^2$$



Publikace:

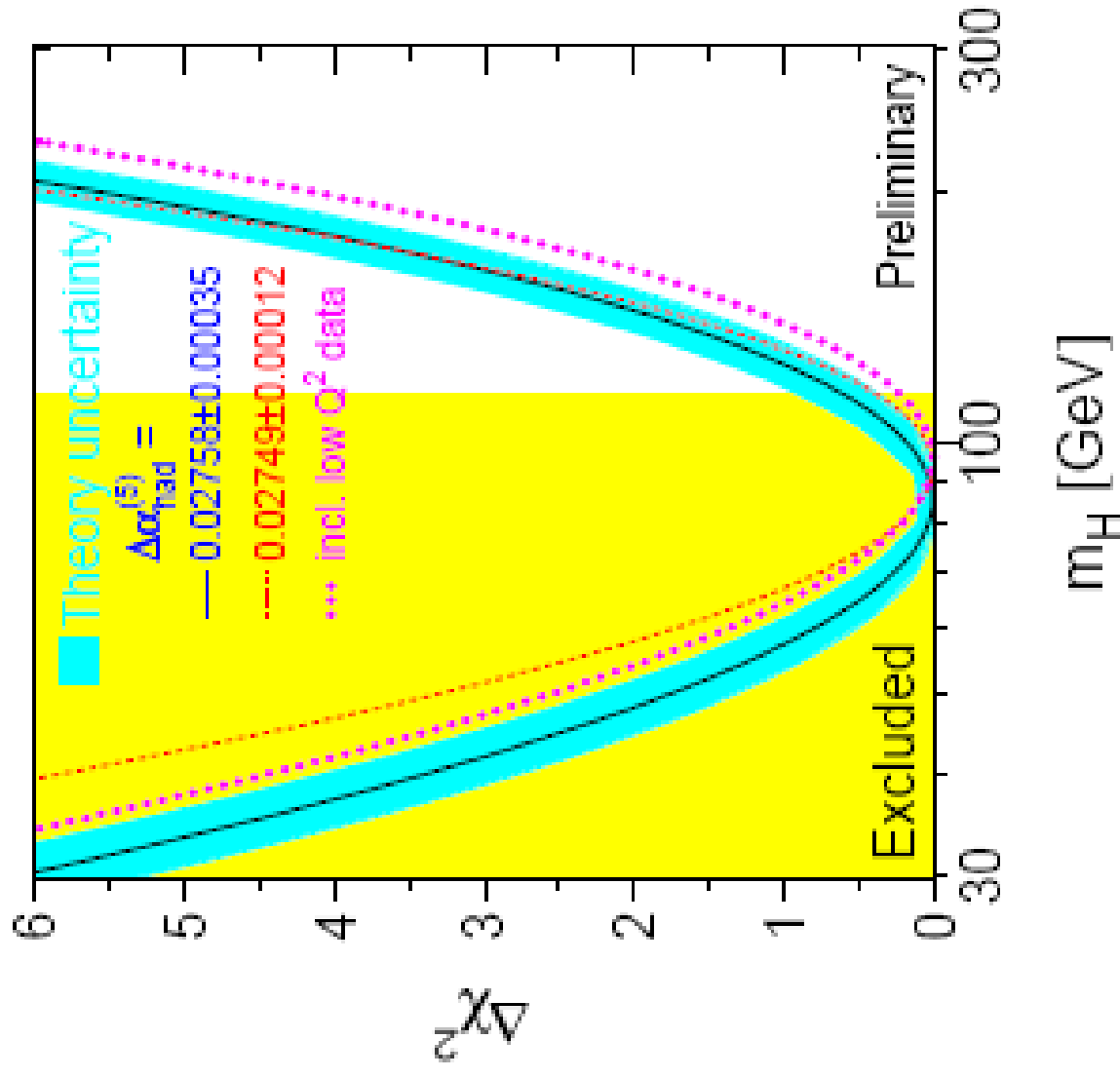
ALEPH Coll., Observation of an Excess in the Search for the Standard Model Higgs Boson at ALEPH, CERN-EP/2000-138

L3 Coll., Higgs Candidates in e+e- Interactions at sqrt(s)=206.6 GeV, CERN-EP/2000-140, Phys. Lett. B, 495 (2000) 18.

Experimenty DELPHI a OPAL tento efekt nepozorovaly.

Závěr - Higgs nebyl pozorován a jeho hmota je větší než 114 GeV

Hledání Higgsova Bosonu – současný stav



Kritická hustota hmoty ve Vesmíru:

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \rho$$

$$v = HR$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = G_N \frac{m M}{R}$$

$$\frac{1}{2} m (HR)^2 = G_N \frac{m}{R} \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \rho_c$$

$$\rho_c = \frac{3 H^2}{8 \pi G_N}$$

$$H \approx (50 \div 80) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = \frac{(50 \div 80) \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}}{3,086 \cdot 10^{22} \text{ m}} = (1,6 \div 2,6) \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

$$G_N = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ kgms}^{-2} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

$$\rho_c = \frac{3 \cdot (1,6 \div 2,6)^2 \cdot 10^{-36} \text{ s}^{-2}}{8 \cdot 3,14 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}} = (2,9 \div 7,6) \cdot 10^{-27} \text{ kgm}^{-3}$$

Jaké je složení hmoty a energie ve Vesmíru?

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N} = 4,5 \cdot 10^{-24} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3};$$

$$\rho_c / m_p = \frac{4,5 \cdot 10^{-24} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}}{1,67 \cdot 10^{-24} \text{ g}} = 2,7 \frac{p}{m^3}$$

$$n_\gamma = 411 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_\nu = 6 \cdot 56 \text{ cm}^{-3} = 336 \text{ cm}^{-3}$$

$$\eta = \frac{n_B}{n_\gamma} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^9}$$

$$n_B = 411 \cdot 10^6 / 3 \cdot 10^9 / \text{m}^3 = 0,14 p / \text{m}^3$$

$$336 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3} \frac{m_\nu}{m_p} = 2,7 p / \text{m}^3$$

$$m_\nu = \frac{2,7 \cdot 938,25 \cdot 10^6 \text{ eV}}{336 \cdot 10^6} = 7,5 \text{ eV}$$

Kritická hustota Vesmíru
odpovídá přibližně 3 protonům
v kubickém metru

Ve Vesmíru je 400 fotonů
reliktního záření v kubickém
centimetru a asi 350 reliktních
neutrín a antineutrín

Na 3 miliardy fotonů připadá jeden
proton, tj. je jen 0,14 protonů v
kubickém metru, jen asi 5%
potřebného množství

Aby neutrína tvořila chybějící hmotu,
musela by mít hmotu 7,5 eV, ale víme,
že jsou lehčí než 2 eV

Jednou z možností jak vysvětlit chybějící hmotu je existence tzv. **Supersymetrických (SUSY)** partnerů „obyčejných částic“.

Ke každému fermionu (**kvarkům a leptonům**) existují supersymetričtí partneři, jež jsou bosony = tzv. **skvarky a sleptony**

Ke každému z bosonů **gama, W, Z** existuje fermion. **fotino, Wino, ...**

Tyto supersymetrické částice jsou nestabilní, rozpadají se, ale nejjednodušší z nich, tzv. **LSP (Lightest Supersymmetric Particle)** je stabilní a může tvořit onu chybějící hmotu. Např. kdyby měla hmotu 100 GeV, stačila by 0,027 takové částice v krychlovém metru na to, aby hustota Vesmíru byla blízka ke kritické.

Hlavní otázky současné fyziky částic:

-Existuje Higgsův boson? Jakou má hmotu?
-Existují supersymetrické částice?
Experimenty na LHC (Large Hadron Collider) v CERN.

-Jaká je hmota neutrin? Jaká je podstata oscilací neutrin?
Neutrinové experimenty

Jaký je původ „chybějící hmoty (energie) ve Vesmíru?
Astročásticové experimenty, experimenty na LHC

Samozřejmě nejzajímavější by bylo odhalit nové jevy, např. existují extra dimenze časoprostoru?, jsou částice bodové? a další.

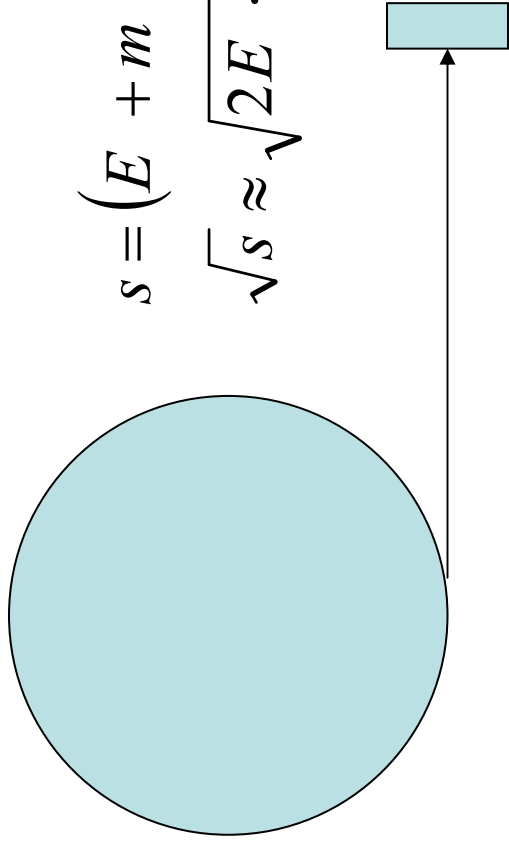
Experimenty na urychlovačích částic

Urychlovat je možné pouze nabitě dostatečně dlouhožijící částice, v současnosti pouze stabilní, tj. protony a antiprotony, elektrony a pozitrony. Existují plány urychlovat miony.

Urychlovače protonů jsou kruhové.

Urychlovače elektronů jsou kruhové i lineární. Důvodem proč urychlovat elektrony s velkými energiemi v lineárních urychlovačích jsou ztráty energie v důsledku pohybu po zakřivené dráze v kruhových urychlovačích.

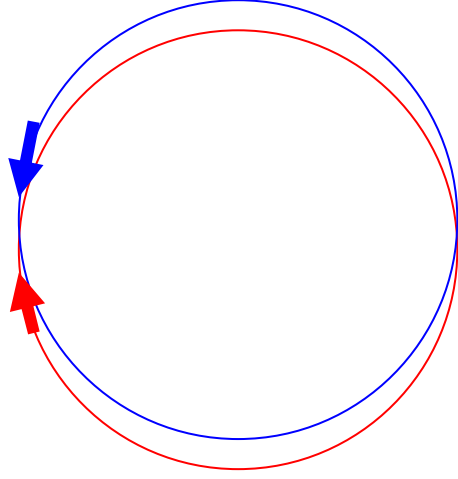
Experimenty na pevném terči (fix target)



$$s = (E + m)^2 - \vec{P}^2 = M^2 + m^2 + 2E \cdot m \approx 2E \cdot m$$

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2E \cdot m}$$

Experimenty na vstříčných svazcích (collider)

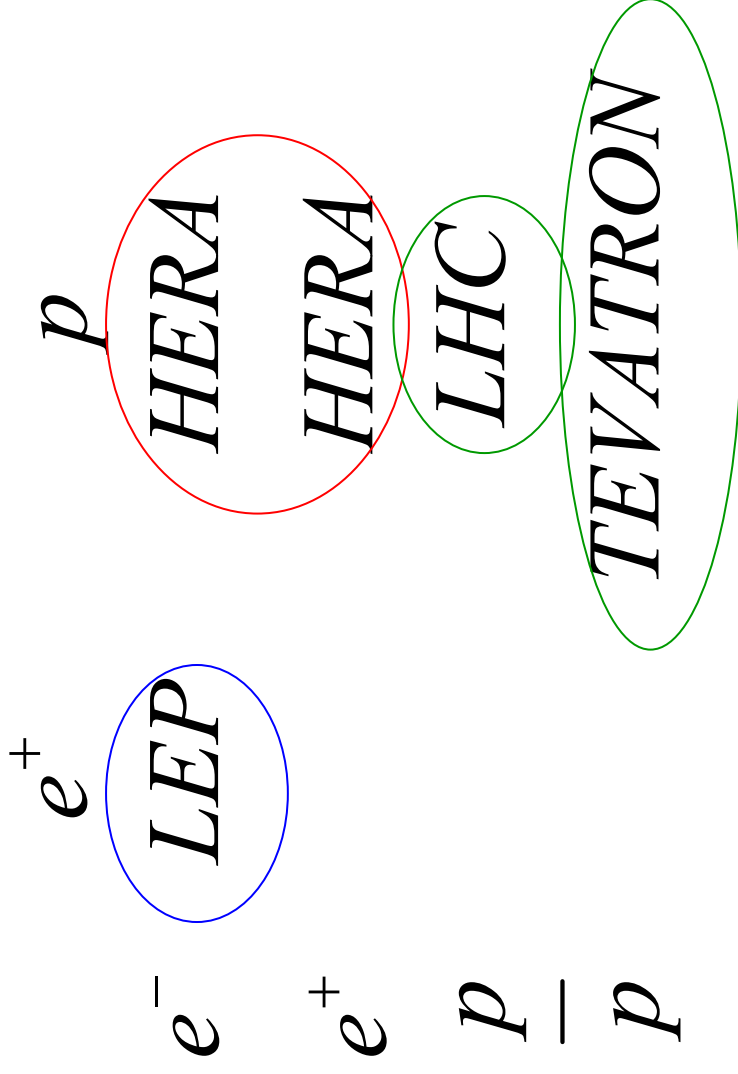


$$s = (E_1 + E_2)^2 - \left(\vec{P}_1 - \vec{P}_2 \right)^2 =$$

$$M_1^2 + M_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2 + P_1 \cdot P_2) \approx 4E_1 \cdot E_2$$

$$\sqrt{s} \approx 2\sqrt{E_1 \cdot E_2}$$

$$E_1 = E_2 \Rightarrow \sqrt{s} \approx 2E$$



LEP – urychlovač v CERN Ženeva, ukončil práci v roce 2001

HERA – urychlovač v DESY Hamburg, ukončil práci v červnu 2007. Přesné měření struktury protonu.

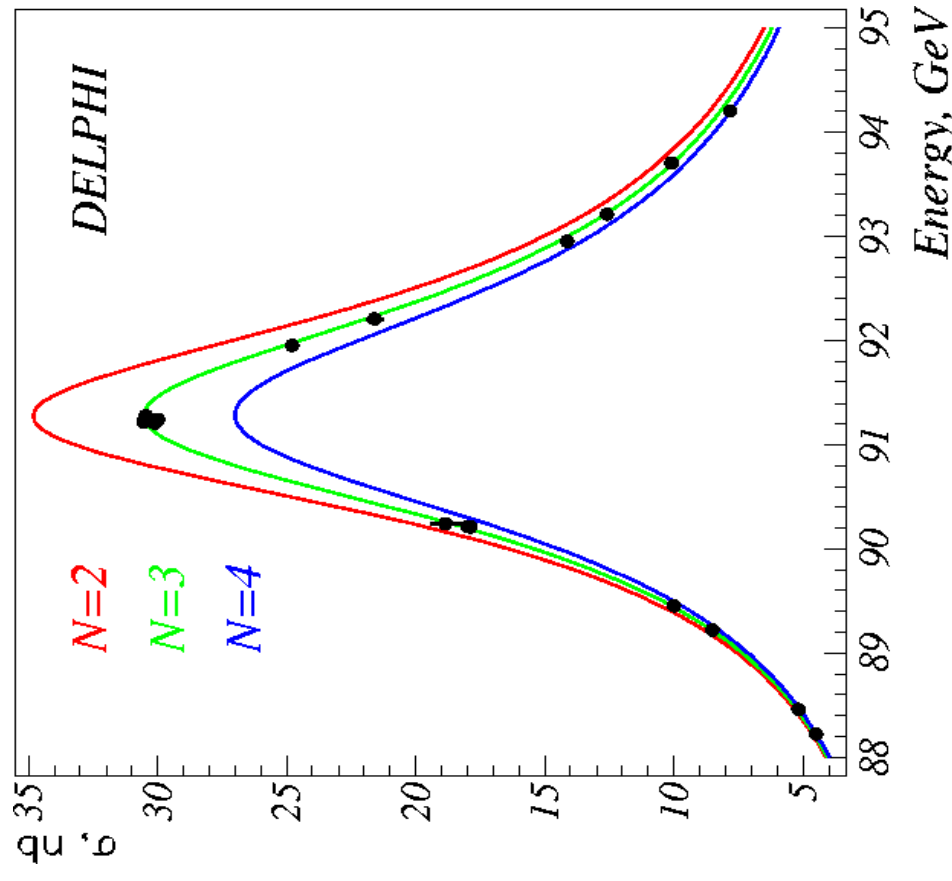
TEVATRON – urychlovač ve FNAL Batavia u Chicaga, bude pracovat nejméně do roku 2009 – objev top kvarku

LHC – urychlovač v CERN, zahájí provoz v roce 2008

Hlavní výsledek z experimentů na urychlovači LEP:

Existují právě tři typy neutrin

Existuje-li symetrie mezi počtem rodin kvarků a leptonů, pak tento výsledek znamená, že neexistuje další čtvrtá rodina kvarků.



Urychlovač HERA v **D**eutsches **E**lectronen **S**ynchrotron
laboratoři (**DESY**) v Hamburgu

$$e^{\pm} p \quad 27 \text{ GeV (e)} \times 920 \text{ GeV (p)}$$



Hlavní úkol:

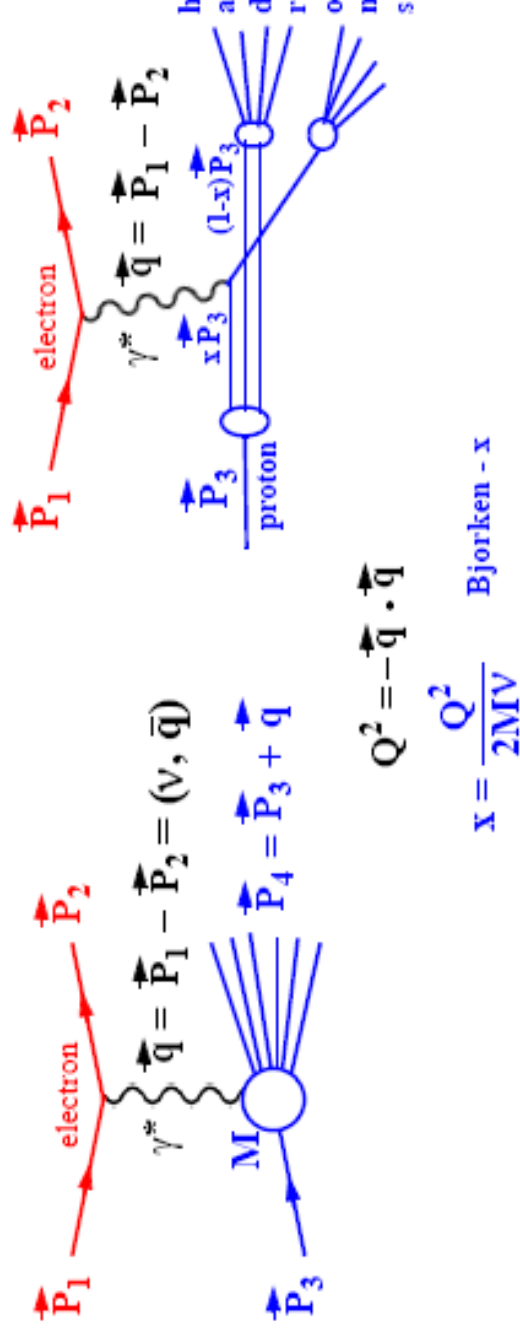
Zkoumání vnitřní
struktury protonu

Srážka elektronu s protonem při velkých hodnotách předané hybnosti:

Dojde k rozbití protonu a vzniku jetu částic

Srážku lze popsat jako pružnou srážku elektronu s **partonem (part of proton)**, který nese x tou ($x = 0-1$) část energie a hybnosti protonu

INELASTIC ELECTRON-PROTON SCATTERING

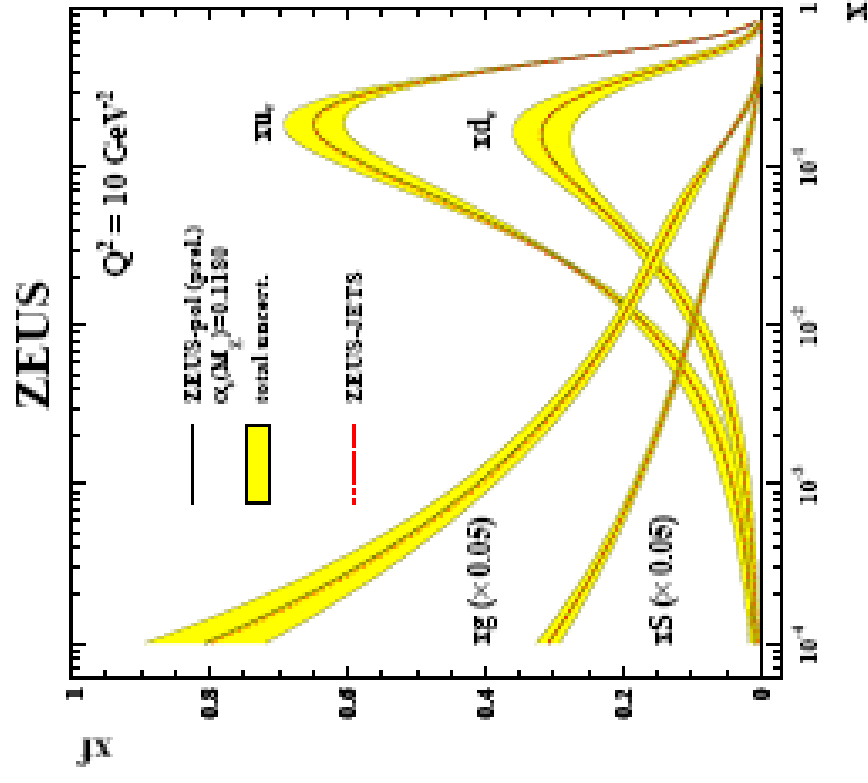


$$\frac{d\sigma}{dE_2 d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \cdot \frac{1}{\nu} \cdot \left[F_2(x, Q^2) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{Q^2}{xM^2} F_1(x, Q^2) \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$

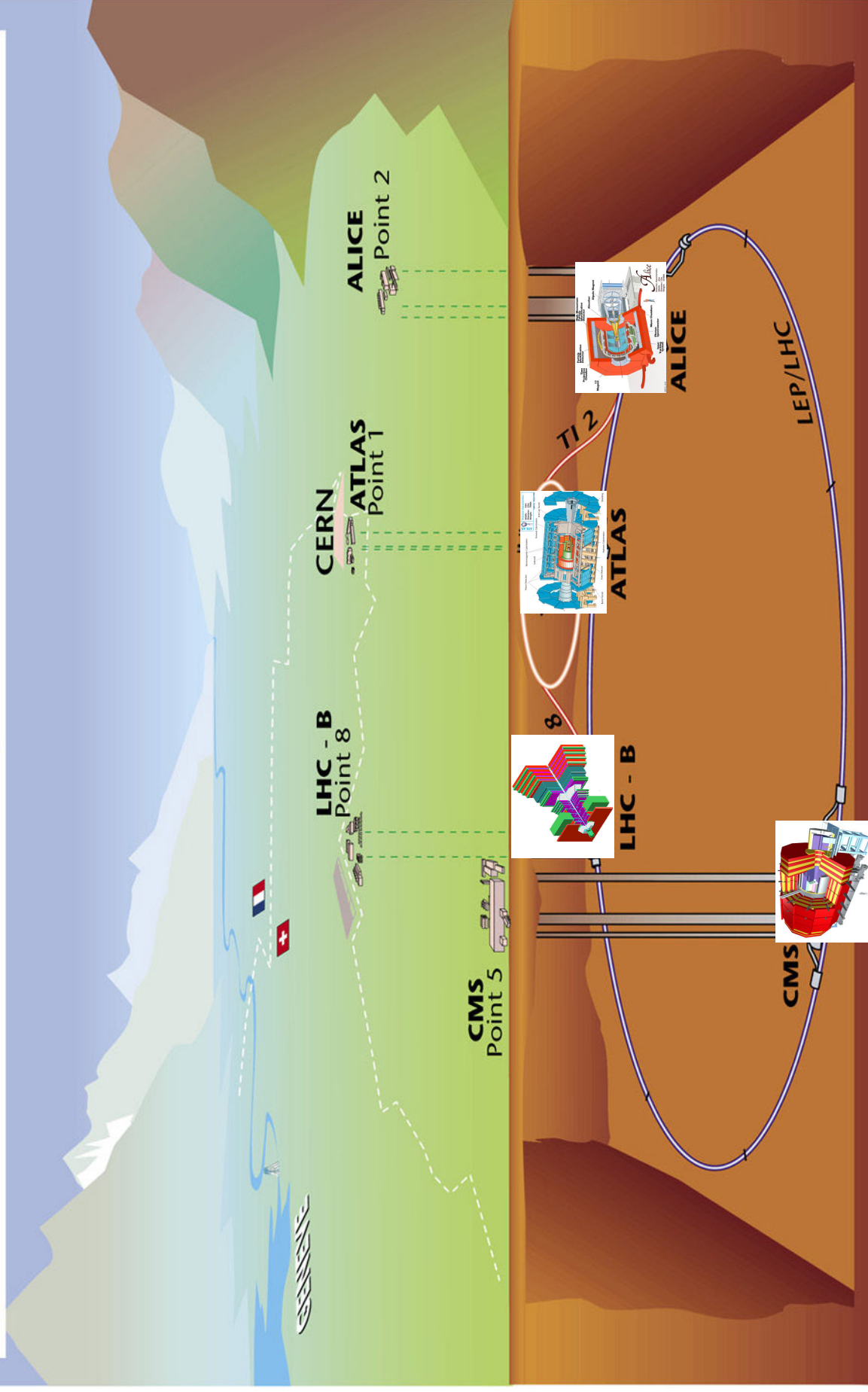
Co jsou ony partony? Struktura protonu:

Přibližně polovinu energie a hybnosti nesou **kvarky**

Polovinu nesou **gluony**

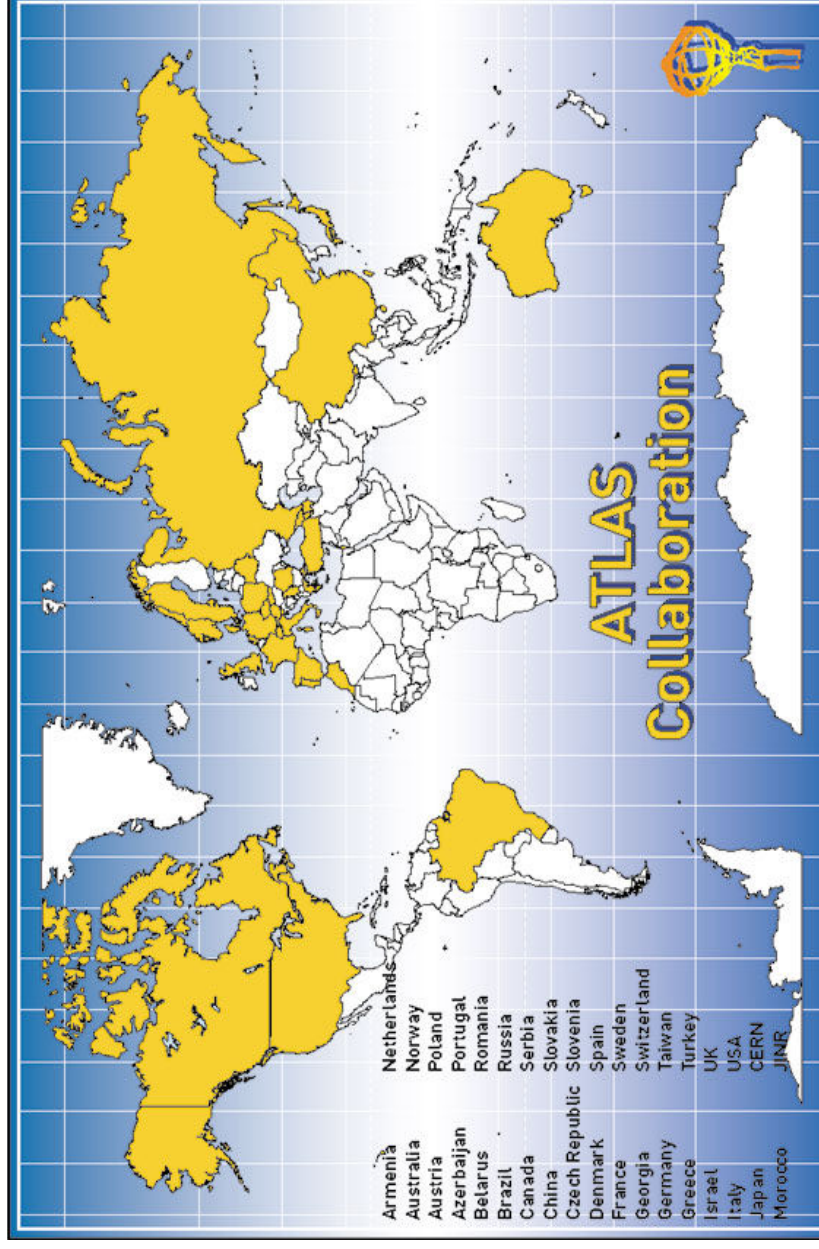


Overall view of the LHC experiments.



ATLAS Collaboration

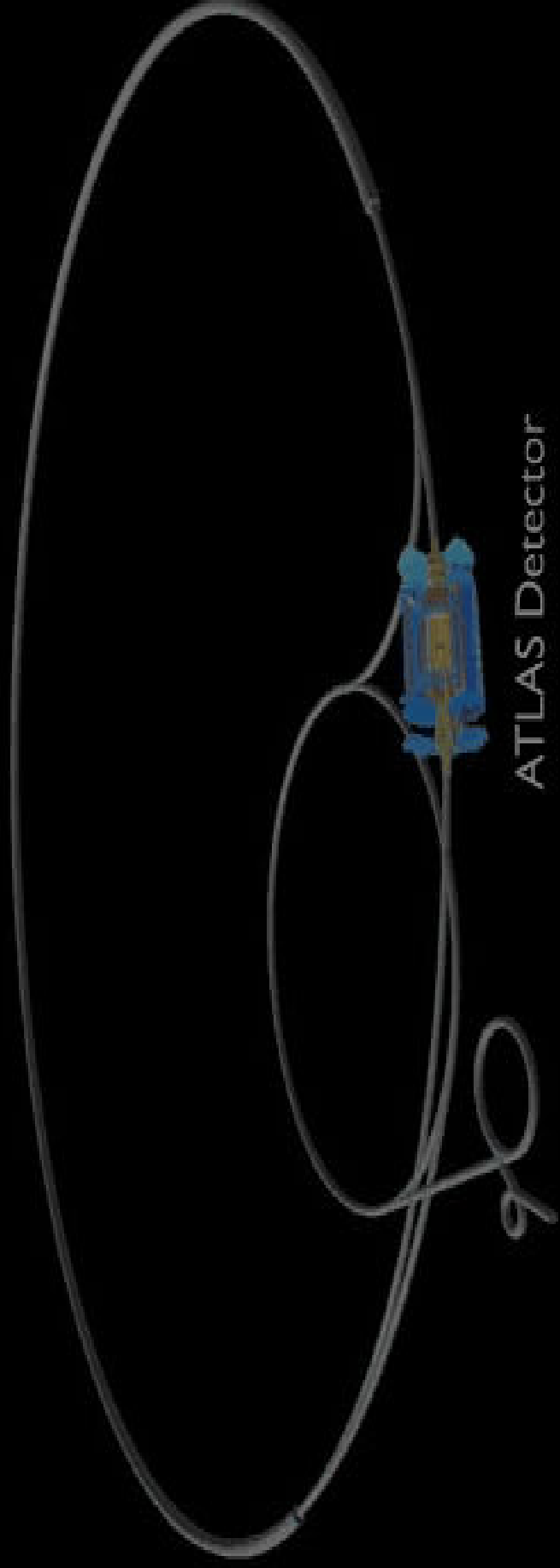
34 zemí
151 ústavů
1770 autorů



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, Bern, Birmingham, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Bucharest, Cambridge, Carleton/CRPP, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, INP Cracow, Dortmund, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Glasgow, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto UE, Lancaster, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Naples, Naruto UE, New Mexico, Nijmegen, Northern Illinois, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, LAL Orsay, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, **CAS Prague, CU Prague, TU Prague**, IHEP Protvino, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rochester, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Tokyo UAT, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

PLAY▶

Large Hadron Collider



ATLAS Detector

Parametry urychlovače LHC

- Energie 2x7 TeV (současný největší urychlovač je TeVatron ve Fermi National Accelerator Laboratory FNAL nedaleko Chicaga v USA)

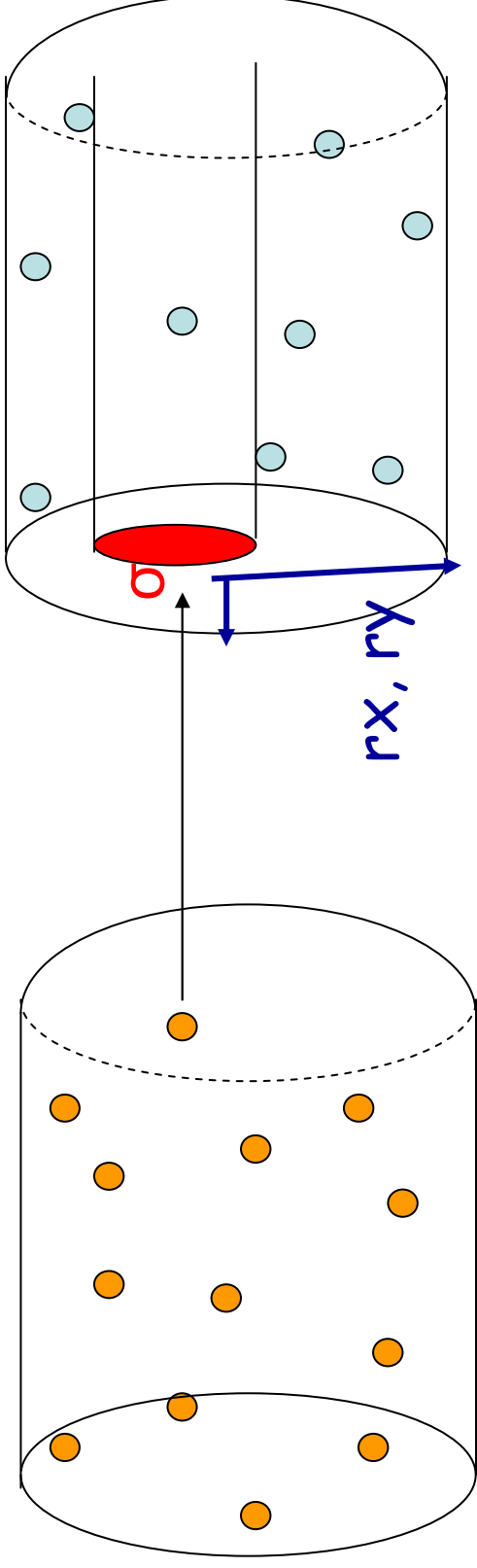
K tomu je nutné magnetické pole 8 T podle vztahu:
 $0,3 \text{ B (T) Reff (km)} = 7 \text{ TeV}$



Parametry urychlovače LHC

- Účinné průřezy (pravděpodobnosti interakcí jsou úměrné $1/E^2$, tj. o řád vyšší energie potřebuje také o dva řády vyšší intenzity
- Světelnost 100 fm^{-1} za 1 rok
 - „bunches“ částic, v každém 10^{11} protonů jsou od sebe vzdáleny 7.5 m, tj. frekvence srážek je 25 ns (rychlost světla = 30 cm/ns)

Luminosita (světelnost)



$$N_{\text{int}} = \sigma \frac{N}{\pi \cdot r_x \cdot r_y} \cdot N \cdot f \cdot t$$

$$N_{\text{int}} = \sigma \int \frac{N}{\pi \cdot r_x \cdot r_y} \cdot N \cdot f \cdot dt$$

$$l = \frac{N}{\pi \cdot r_x \cdot r_y} \cdot N \cdot f = \frac{10^{11}}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}} \cdot 10^{11} \cdot \frac{1}{25 \cdot 10^{-9} \text{ s}} =$$

$$l_{\text{max}} \cong 3 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$L = \int \frac{N}{\pi \cdot r_x \cdot r_y} \cdot N \cdot f \cdot dt = 10^{34} \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} = 100 \cdot \frac{1}{10^{-15} \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2} = \frac{100}{fb}$$

ATLAS Detektor

Celková váha ~ 7000 t

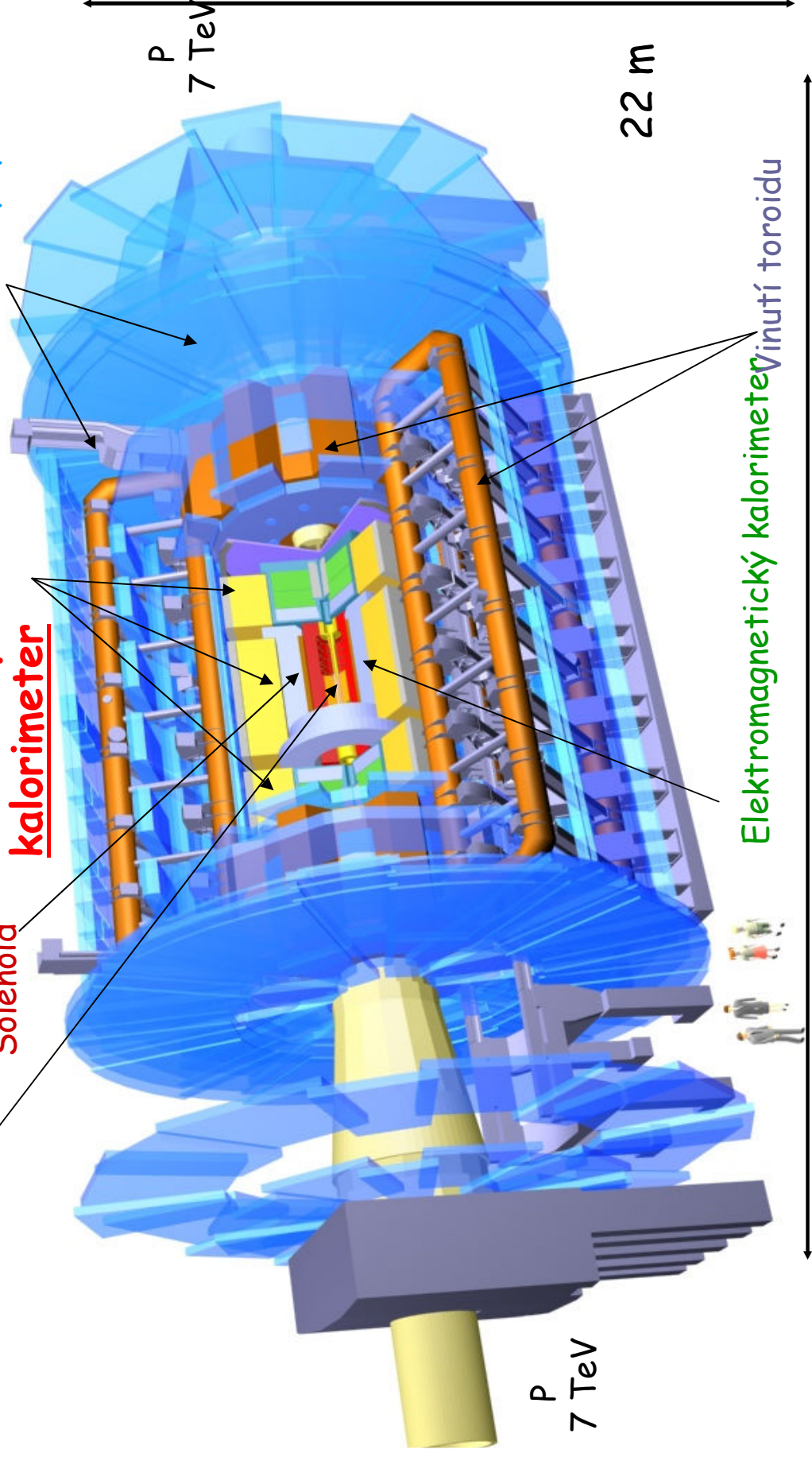
Vnitřní Detektor (CZ - stripy, pixely)

Hadronový Tile
kalorimeter

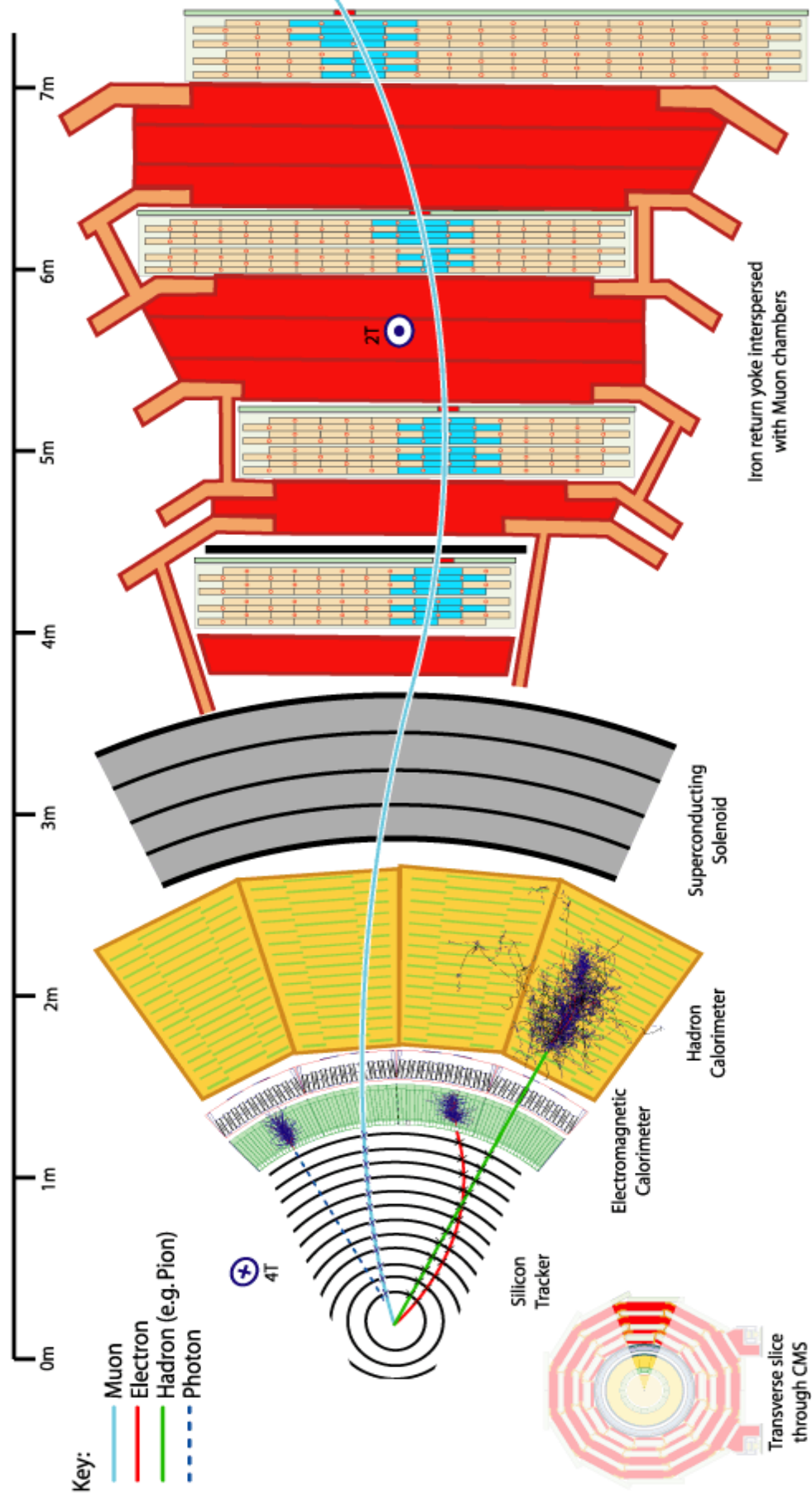
Solenoid

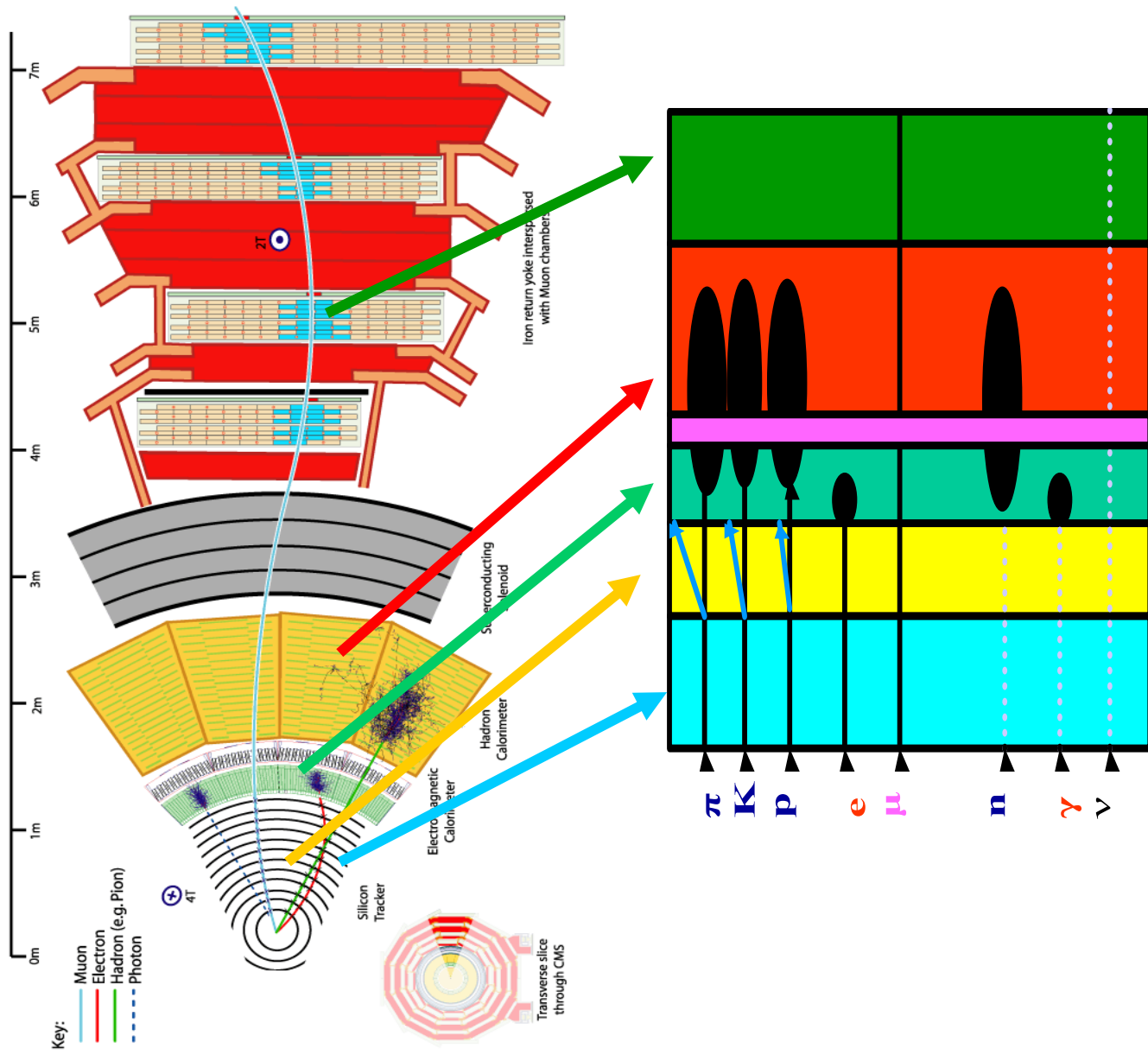
Muonový spektrometer

Elektromagnetický kalorimeter
Vlnutí toroidu

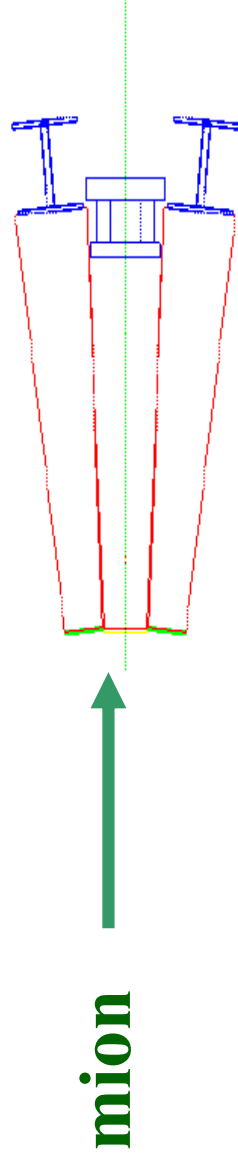
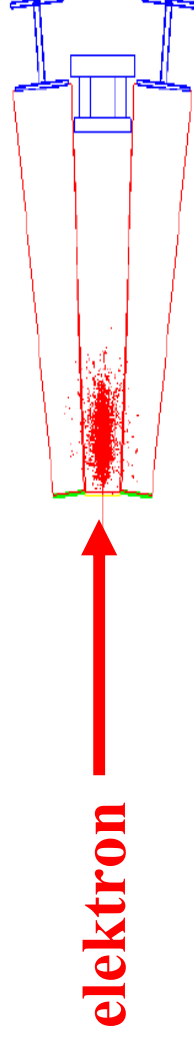
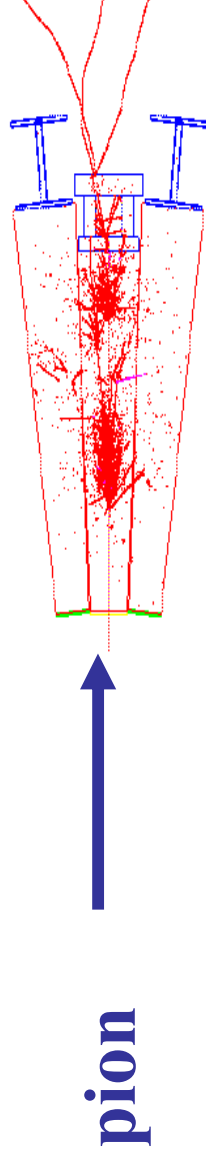


Detektory slouží pro měření energie, hybnosti a identifikaci částic,



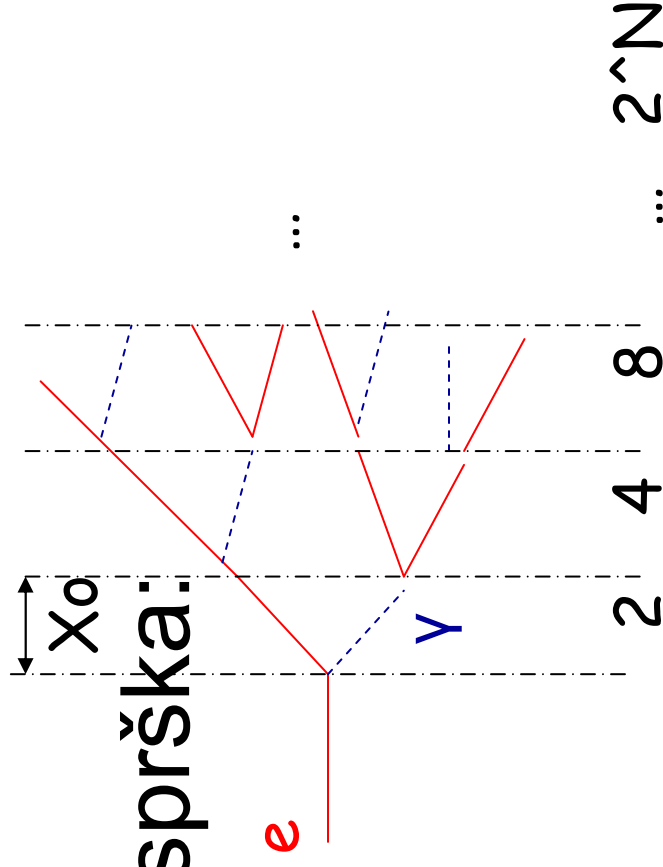


Identifikace částic podle odezvy v kalorimetru



Elektromagnetický kalorimetr

- Elmg. sprška:



$$\frac{E}{2^N} = \varepsilon$$

$$\frac{7 \cdot 10^6 \text{ MeV}}{2^N} = 10 \text{ MeV}$$

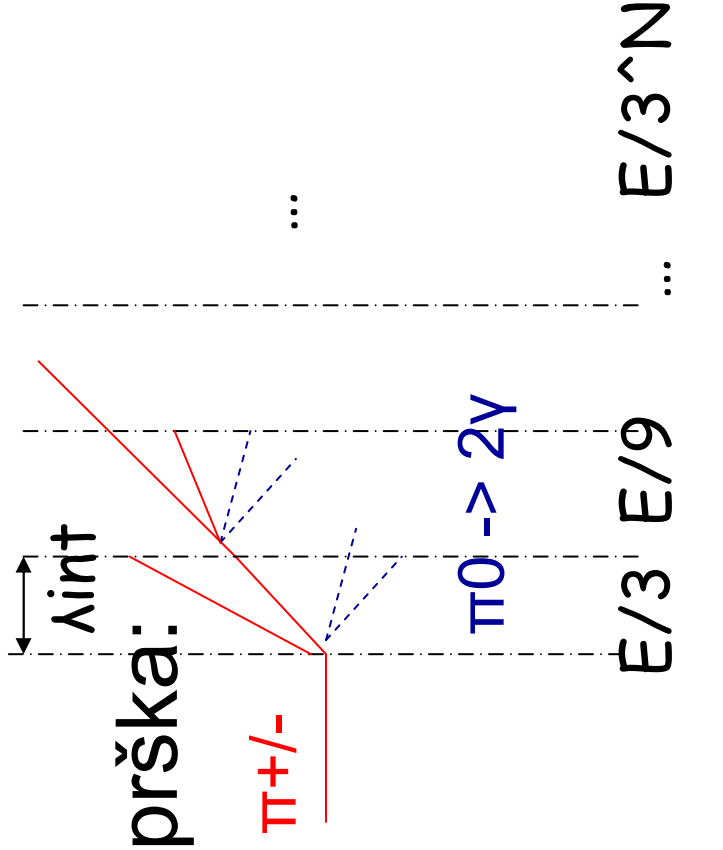
X_0 je radiální délka = 5,6 mm pro olovo

$$2^N = 7 \cdot 10^5 \Rightarrow N \approx 20 \quad X_0$$

Elektromagnetický kalorimetr Atlas má hloubku $25 X_0$

Hadronový kalorimetr

- Elmg. sprška:



$$\frac{E}{3^N} = \varepsilon$$

$$\frac{7 \cdot 10^3 \text{ GeV}}{3^N} = 1 \text{ GeV}$$

$$3^N = 7 \cdot 10^3 \Rightarrow N \approx 8 \lambda_{\text{int}}$$

λ_{int} v železe je asi 20 cm,
kalorimetry Atlas mají
hloubku min. 9 λ_{int}

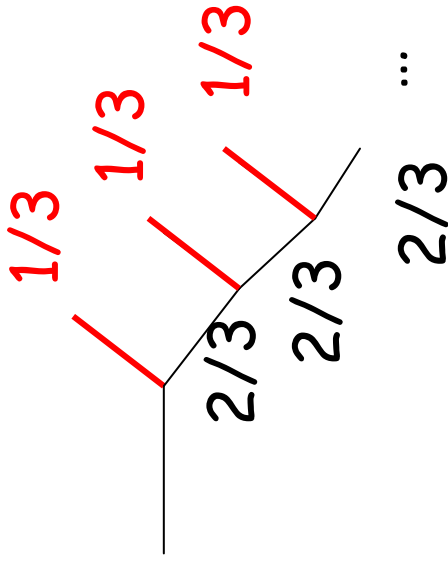
Hadronová sprška

- Elektromagnetická část v hadronové spršce:

$$f_{em} = 1/3 + (2/3) \cdot (1/3) + (2/3)^2 \cdot (1/3) + \dots$$

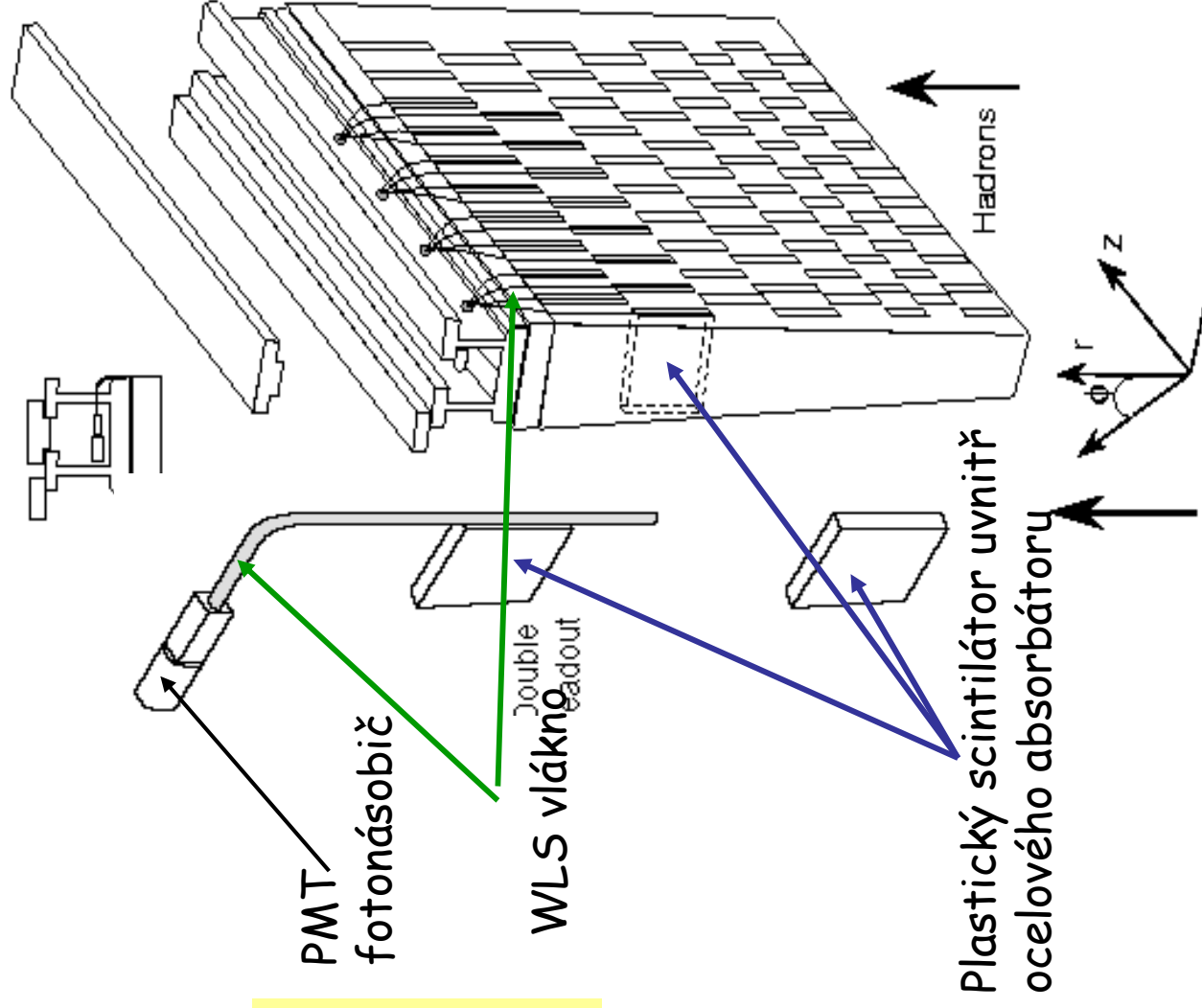
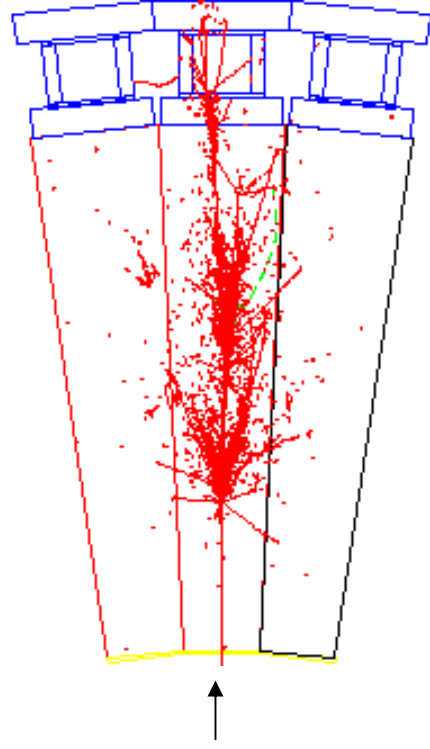
$$f_{em} = 1/3 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} + \left(\frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{2}{3} \right)^3 + \dots + \left(\frac{2}{3} \right)^N \right)$$

$$f_{em} = 1/3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{2}{3} \right)^N}{1 - \frac{2}{3}} = 1 - \left(\frac{2}{3} \right)^N$$

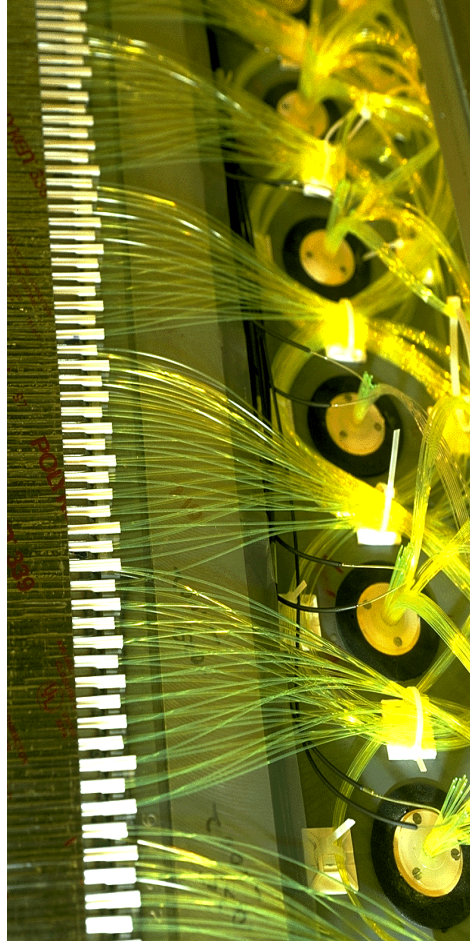
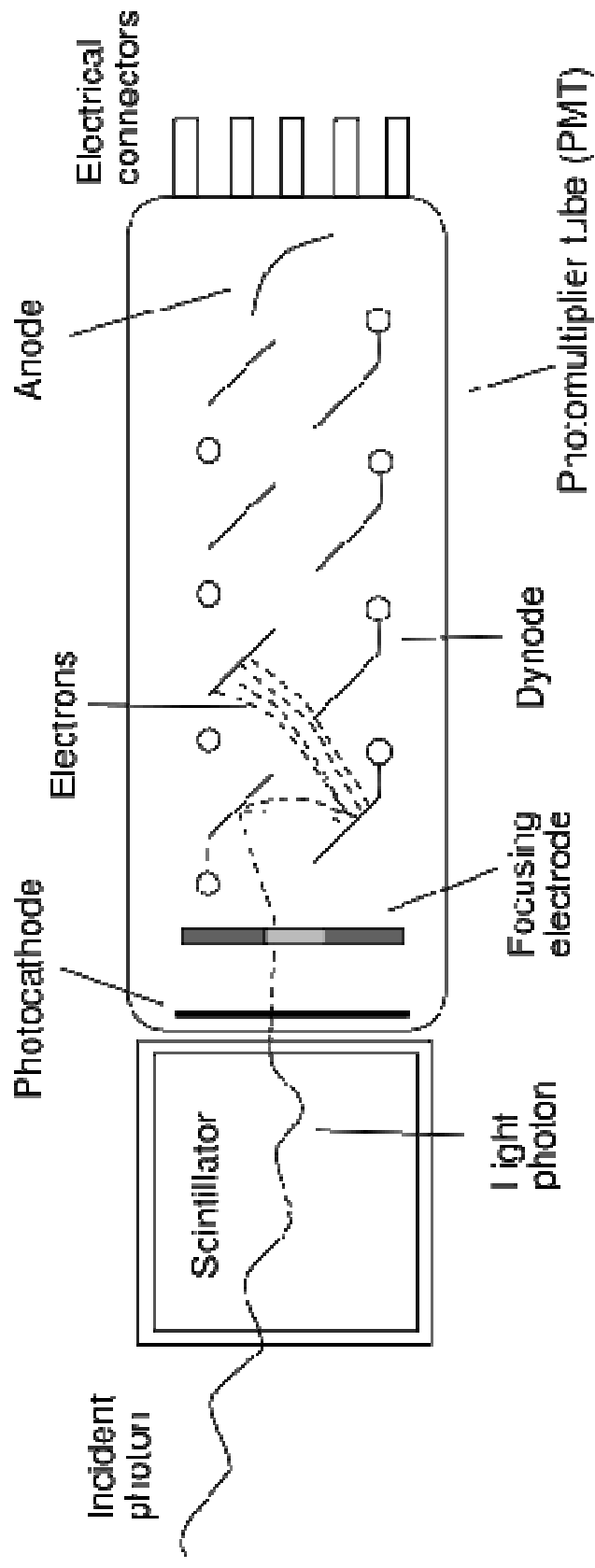


Protože odezva kalorimetru na elmg. část je zpravidla větší, jsou hadronové kalorimetry nelineární

**Princip Tile
kalorimetru:**
Měření světla
produkovaného nabitými
částicemi ve scintilátoru.



Fotonásobiče PhotoMultiplier Tubes (PMT)



Měření hybnosti mionů

$$sagita = R - \sqrt{R^2 - (L/2)^2} \approx R - R(1 - \frac{1}{2} \frac{L^2}{4R^2}) = \frac{L^2}{8R}$$

$$0,3BR = p \Rightarrow R = \frac{p}{0,3B}$$

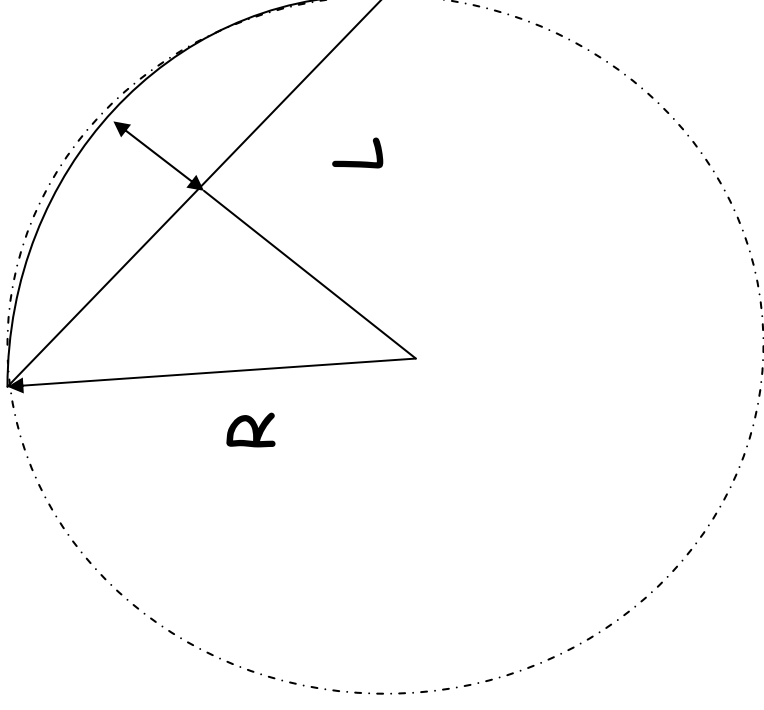
$$sagita = \frac{0,3}{8} BL \cdot L \frac{1}{p}$$

$$p = 1TeV$$

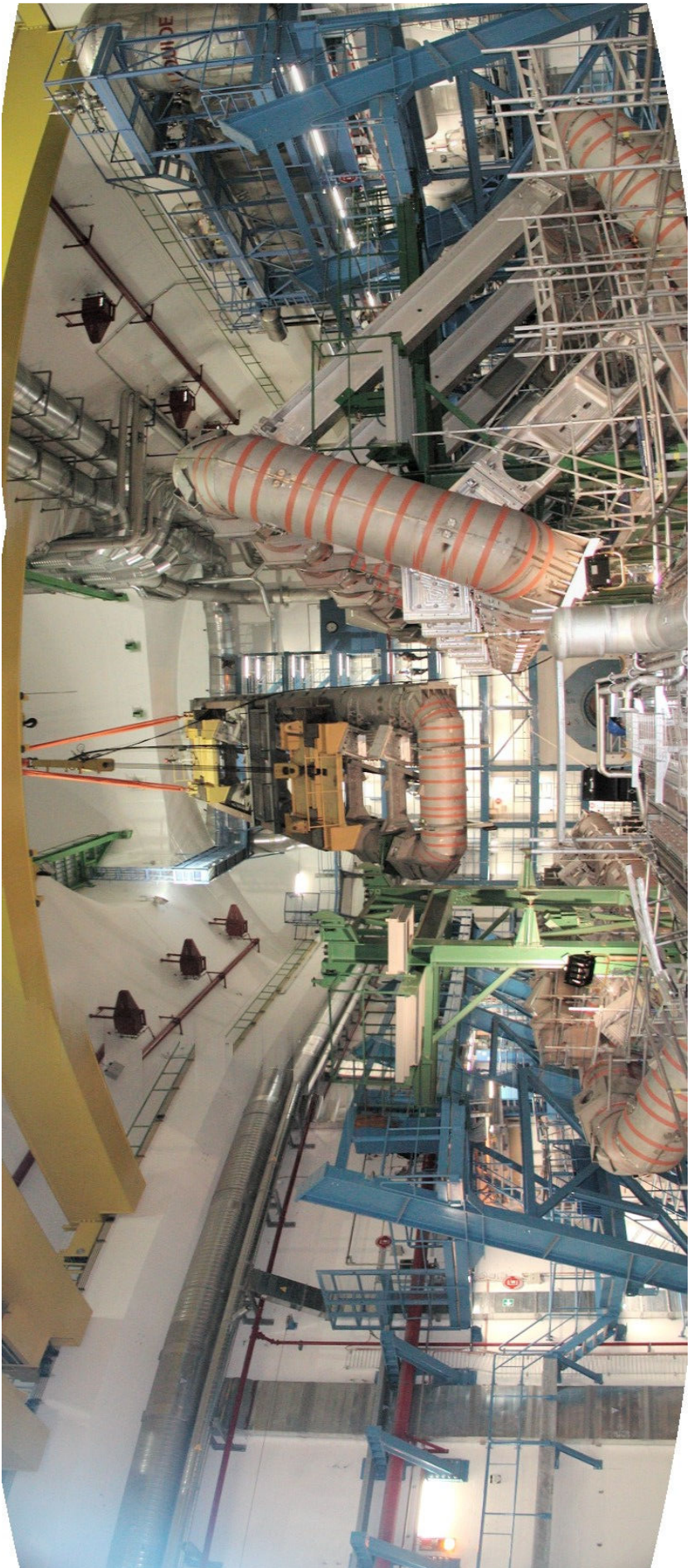
$$L = 5m$$

$$BL = 8Tm$$

$$sagita = \frac{0,3}{8} 8Tm \cdot 5m \frac{1}{1000GeV} = 750\mu m$$

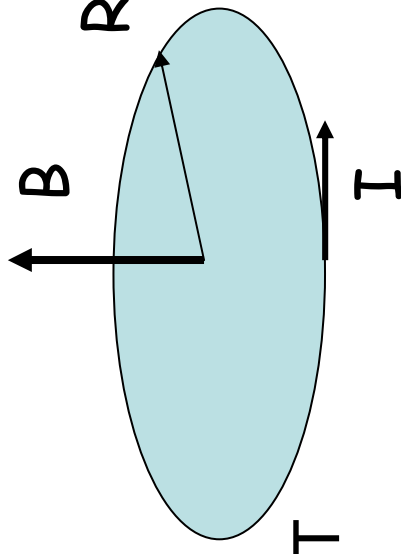


Chceme-li měřit s přesností 10%, pak musíme být schopni změřit sagitu s přesností 75 mikronů.



Magnetické pole v torroidálních magnetech

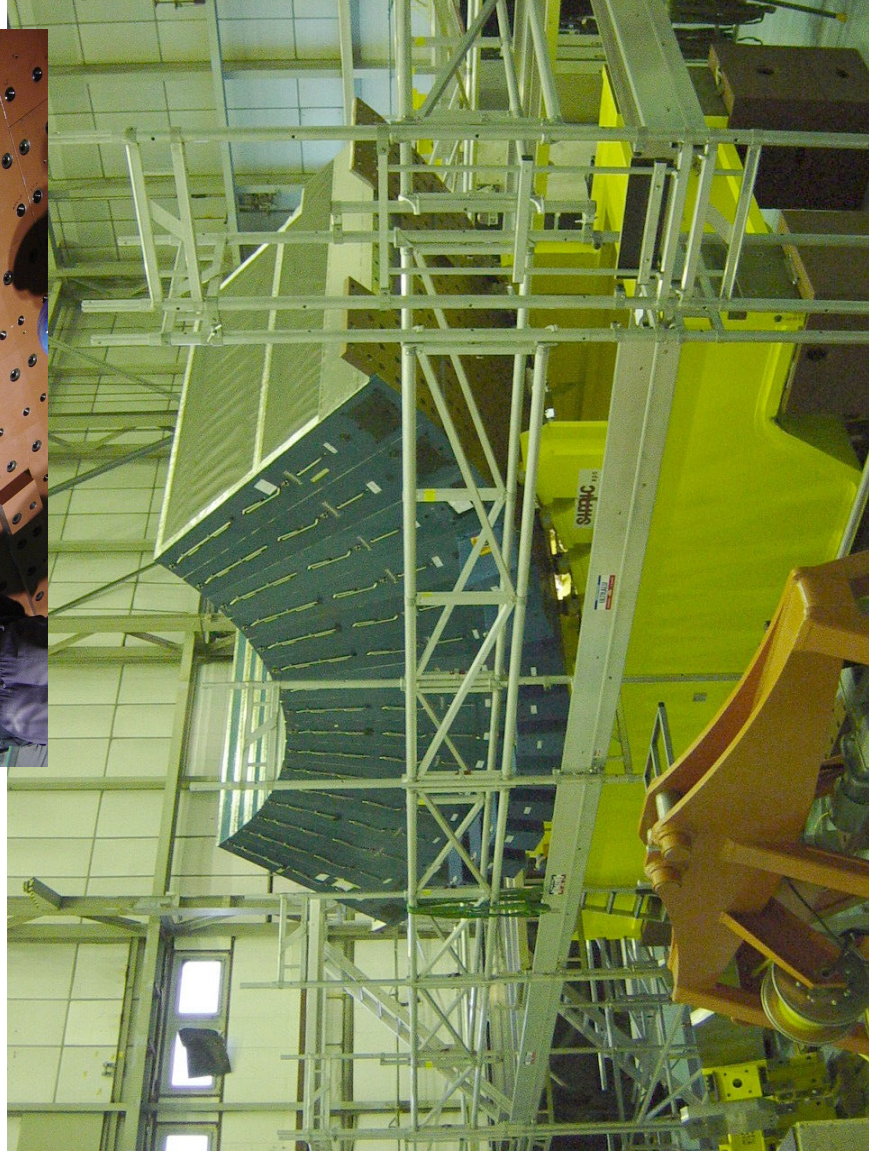
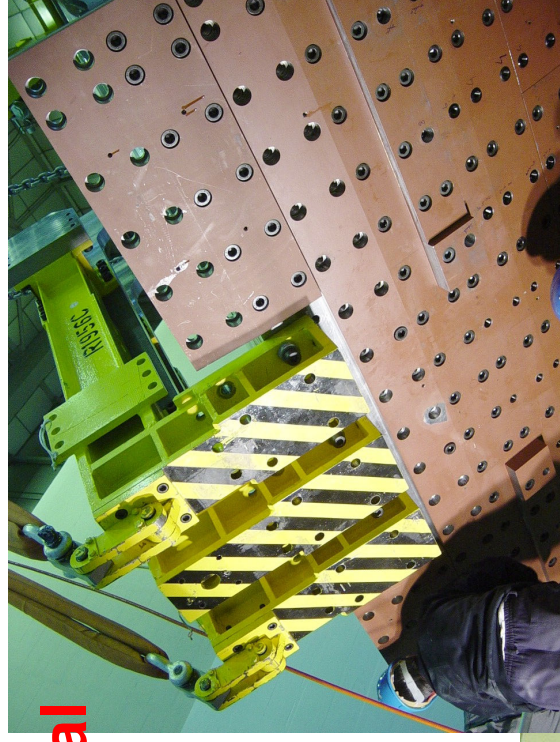
- Torroid 5.5x26 m, což je přibližně ekvivalent kruhu o poloměru 6.5 m



- Uprostřed je v Atlas pole 2.5 T

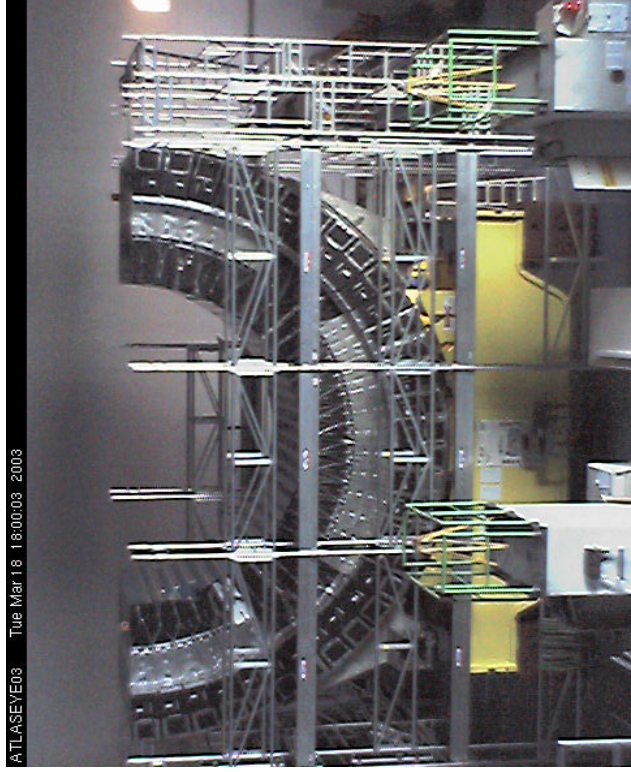
$$B = \frac{\mu}{4\pi} \frac{2\pi IN_{\text{závit}}}{R} = 10^{-7} \frac{6.28 IN_{\text{závit}} (A \text{závit})}{6.5(m)}$$

$$B = 2.5T \Rightarrow IN_{\text{závit}} \cong 250000004 \text{mpérzávitů} = 120 \text{závitů} \times 20500A$$

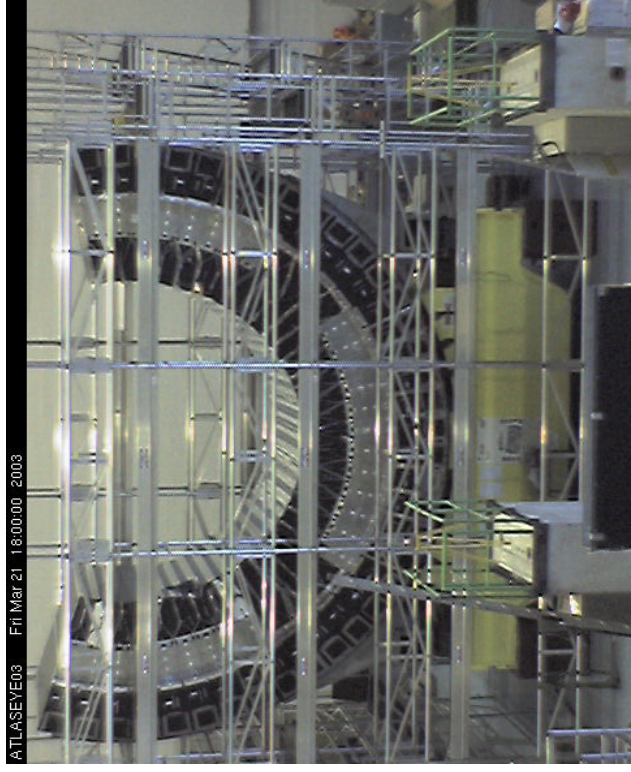


**Skládání TileCal
na povrchu**

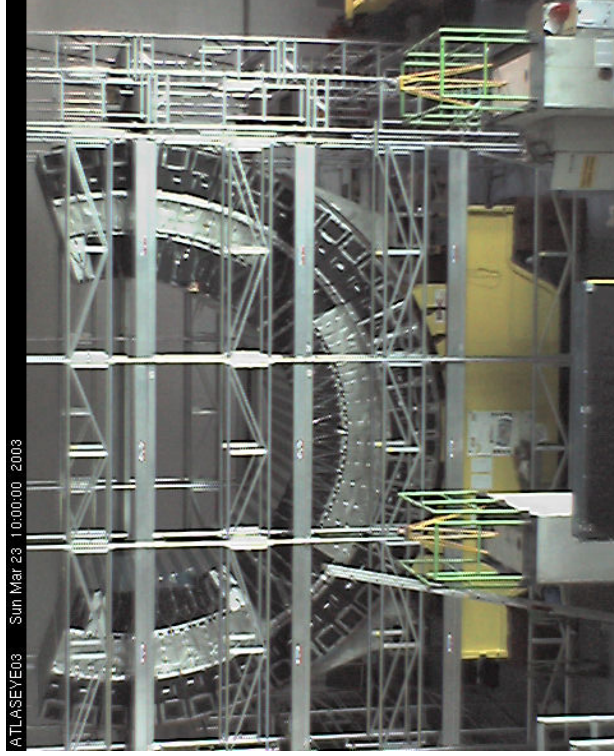
18.3.2003



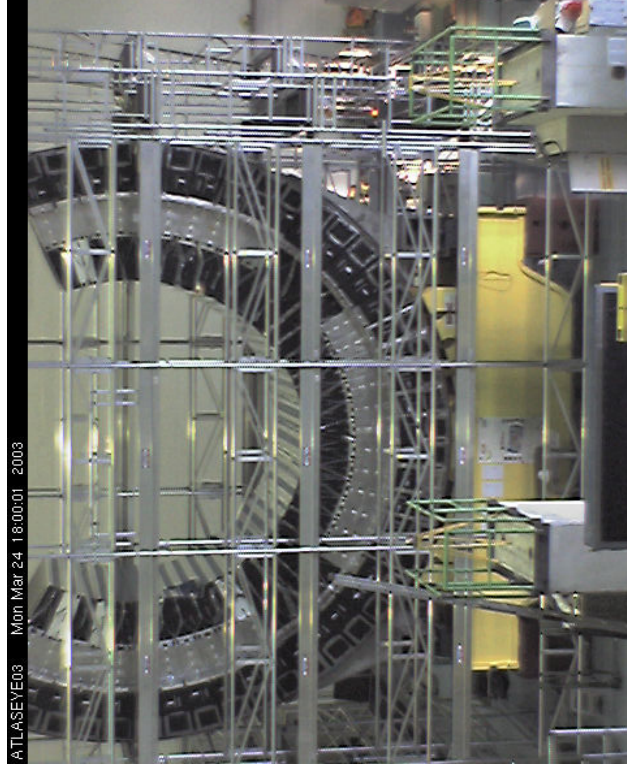
21.3.2003

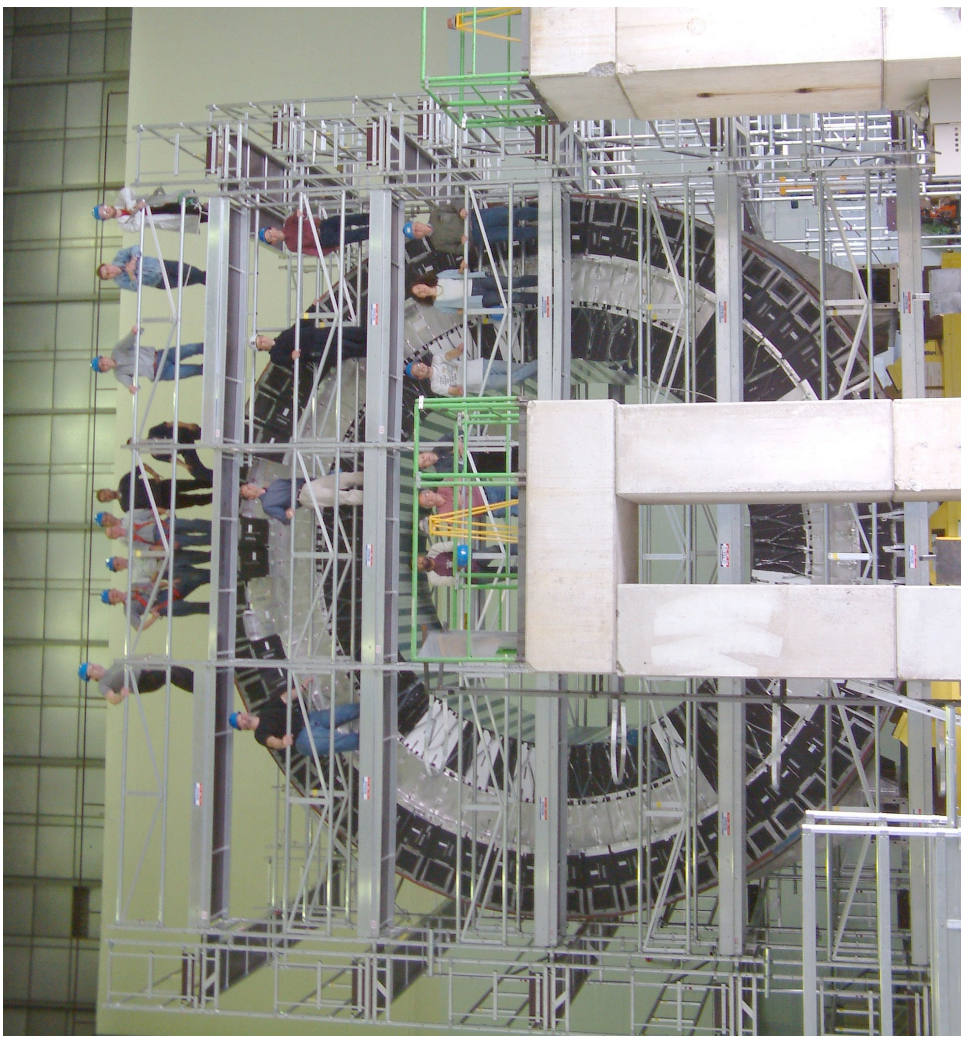


23.3.2003

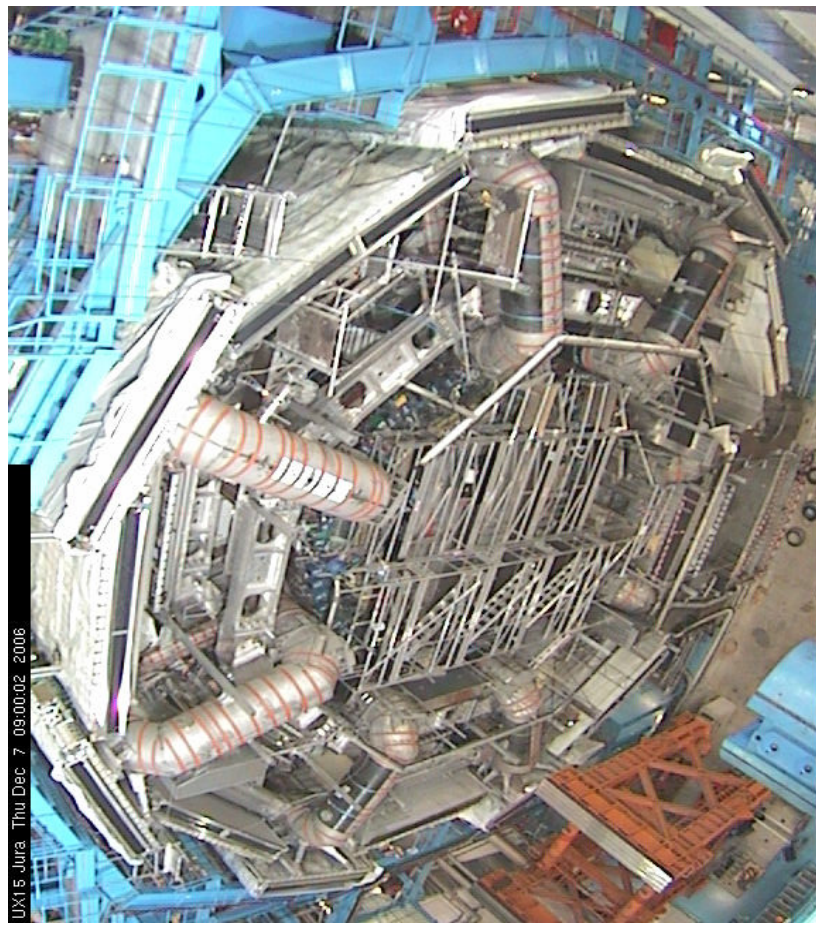
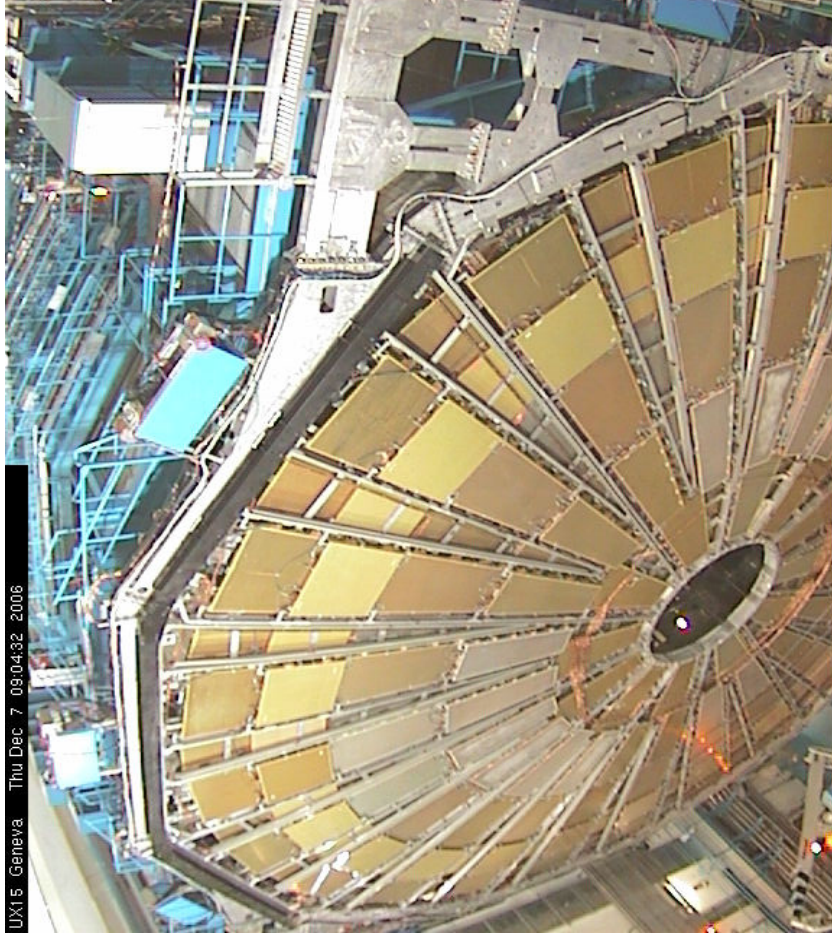
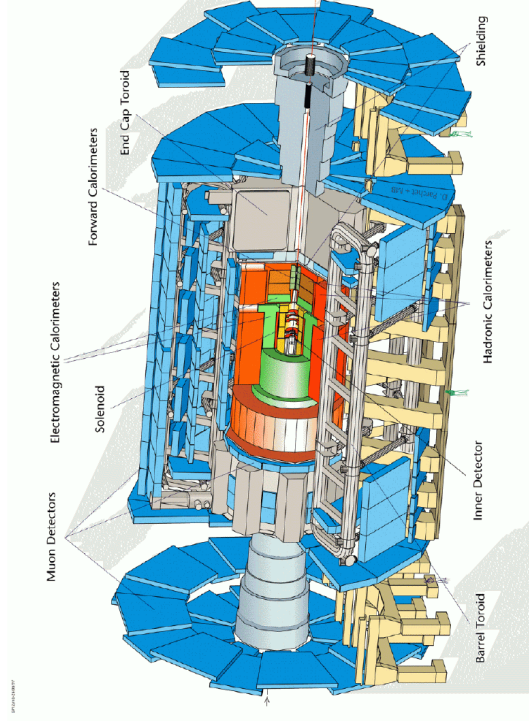


24.3.2003





Dnešní stav montáže Atlas



Příklad fyzikálního zkoumání v experimentu

Atlas Hledání Higgsova bosonu

- Higgsův boson je hmotná částice se spinem 0, dosud neobjevená
- V nejjednodušší verzi Standardního modelu existuje jeden H s nulovým nábojem a spinem 0
- Amplituda rozpadu H je úměrná hmotě částic na něž se může Higgsův boson rozpadnout (pravděpodobnost je úměrná kvadrátu hmoty)
- Higgsův boson se rozpadá na nejtěžší částice na něž se může rozpadnout

Lehký Higgsův boson

- Hmotu menší než $2 M_W = 2 \times 80$

GeV (intermediální boson slabé interakce W)

$\sim 80\%$ $H \rightarrow b\bar{b}$

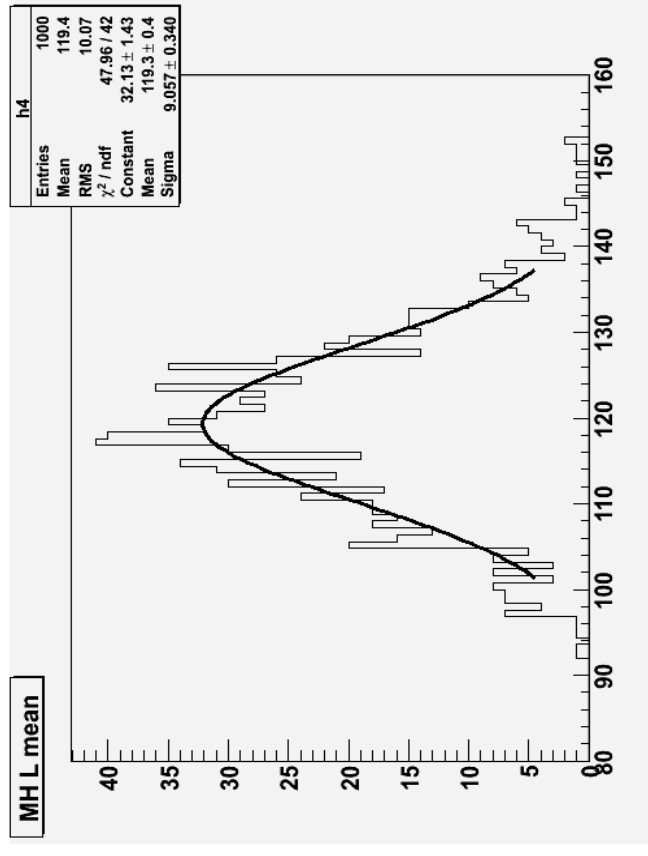
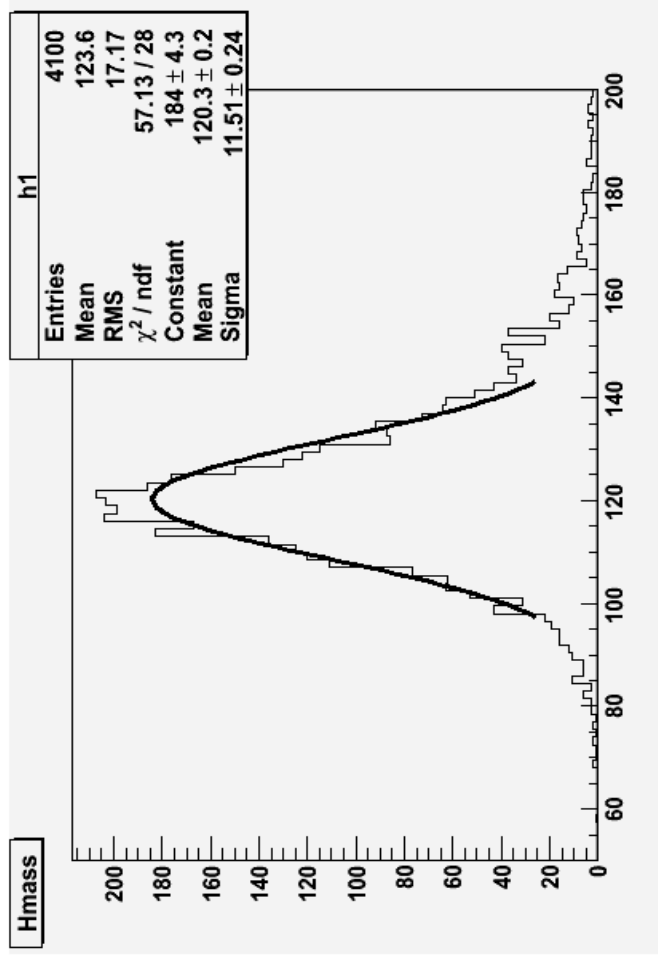
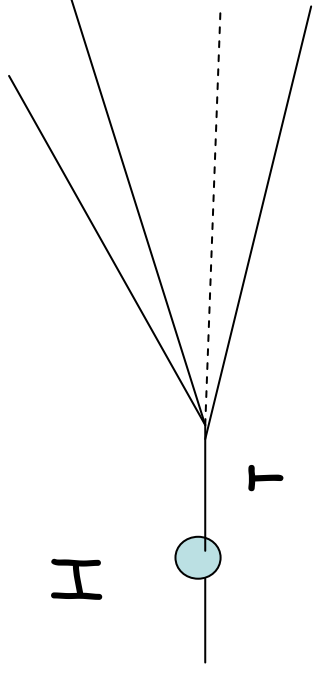
$$\sim 10\% \quad H \rightarrow \tau^+ + \tau^- \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau + \pi^- \nu_\tau$$

Nezměřeno = celkem 6 veličin – p_x, p_y a p_z obou neutronů
Kolineární aproximace – neutrona letí ve směru pionu. Pak nám „chybí“ pouze dvě proměnné – velikosti hybností neutronů
Tyto dvě proměnné lze dopočítat, vezmeme-li do úvahy, že vektor hybnosti kolmý na směr počátečních protonů je nula. Odtud dostanu dvě dodatečné rovnice, které umožní zjistit p neutronů a Určit jejich invariantní hmotu = hmotu Higgse.

Porovnání výsledků pro kolineární aproximaci (vlevo) a nové metody Tomáše a Jany – podle doběhu tau leptonu (vpravo)

$$ct = 87,11 \mu m$$

$$\beta_{\gamma ct} = \frac{p_z}{m_\tau} 87,11 \mu m = \frac{60 GeV}{1,77 GeV} 87,11 \mu m = 2,95 mm$$



Těžký Higgsův boson

$$H \rightarrow W^+ + W^- \rightarrow q\bar{q} + l^-\bar{\nu}_l$$

Tři neznámé (složky
hybnosti neutrína) určíme z
podmínek na příčnou
hybnost (2 rovnice) a z
toho, že invariantní hmota
 $M_W = M_W$

$$H \rightarrow Z^0 + Z^0 \rightarrow l_1^+ l_1^- + l_2^+ l_2^-$$

Vše změřeno – tzv.
Gold Plate kanál

Určení spinu Higgsova bosonu

