



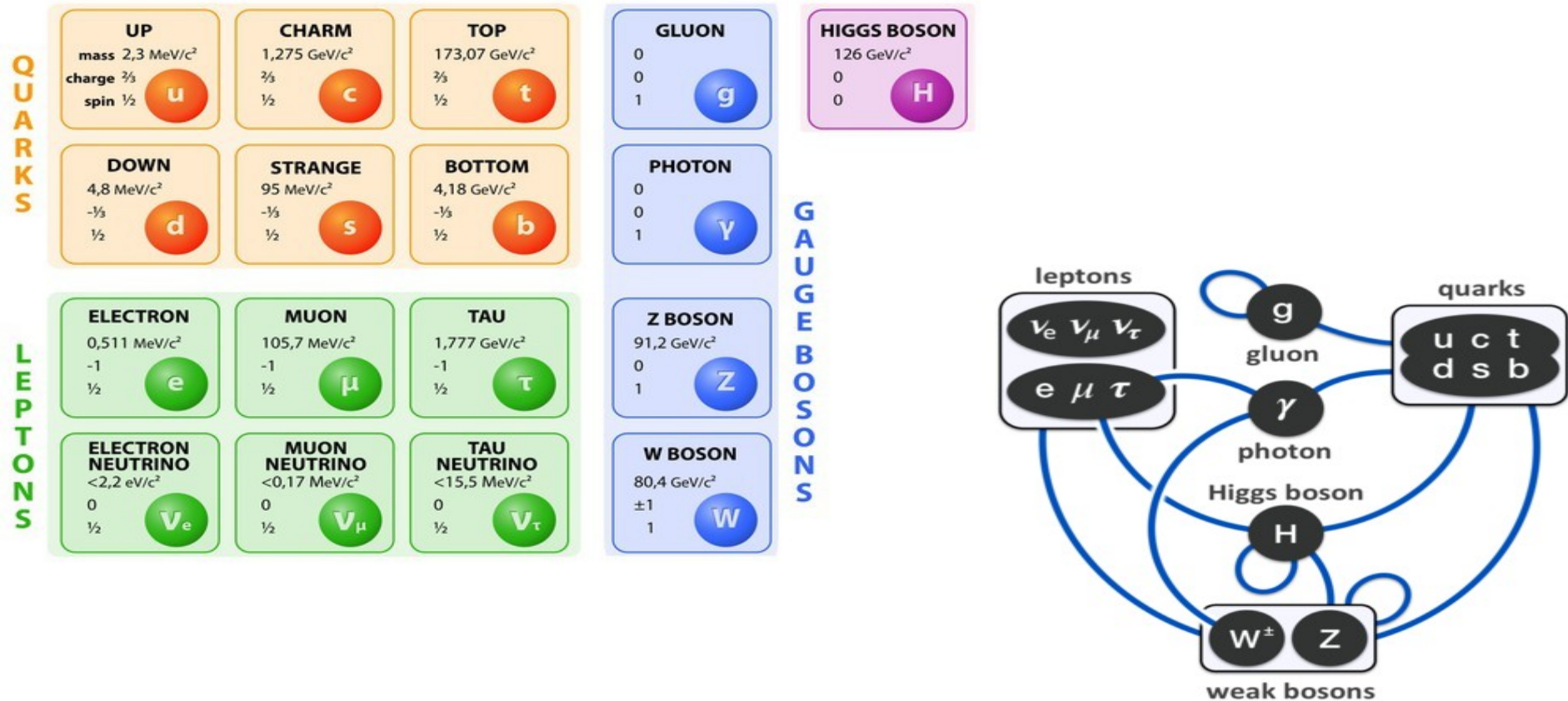
Zkoumáme mikrosvět

Josef Juráň

FÚ SU Opava
ÚTEF ČVUT Praha

Particles and Interactions

STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES



Elementary Particles

Quarks



Up



Down



Charm



Strange



Top



Beauty

Leptons



Electron



Neutrino



Muon



Neutrino Muon



Tau



Neutrino Tau

Bosons



Photon



Gluon



Z^0



W^-



W^+

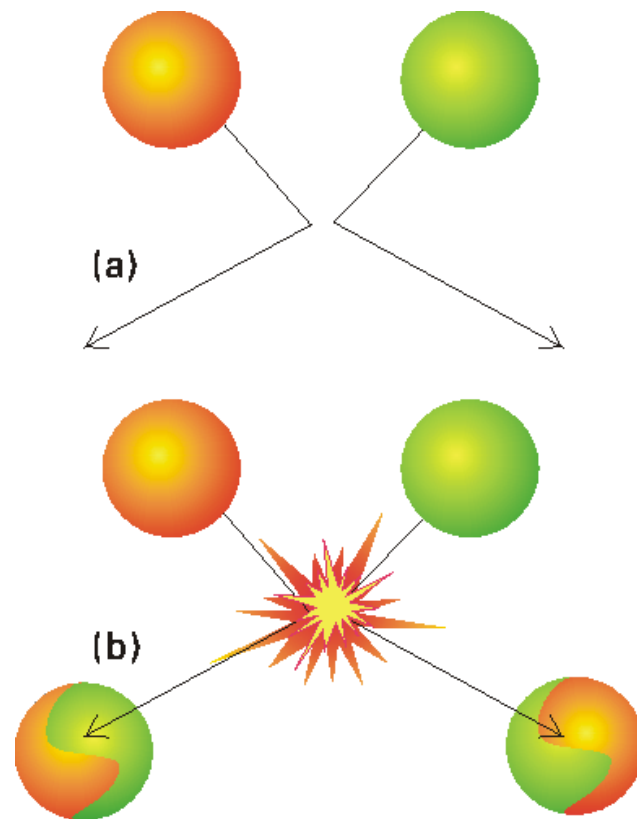


Higgs



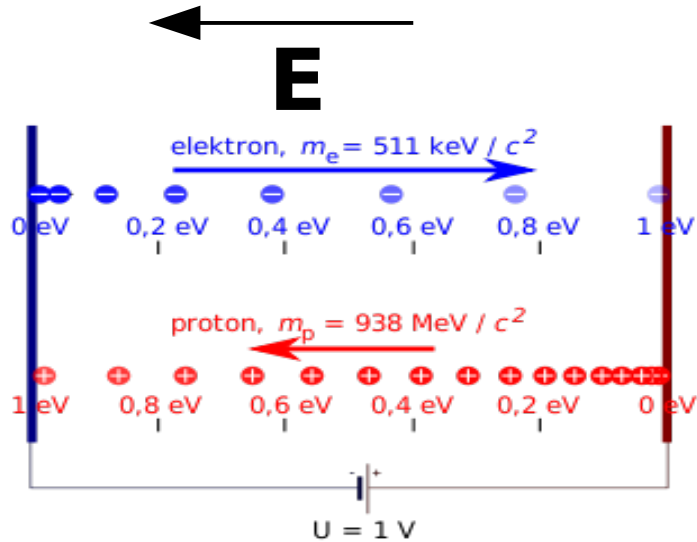
Graviton

Jak vyrobit částice?

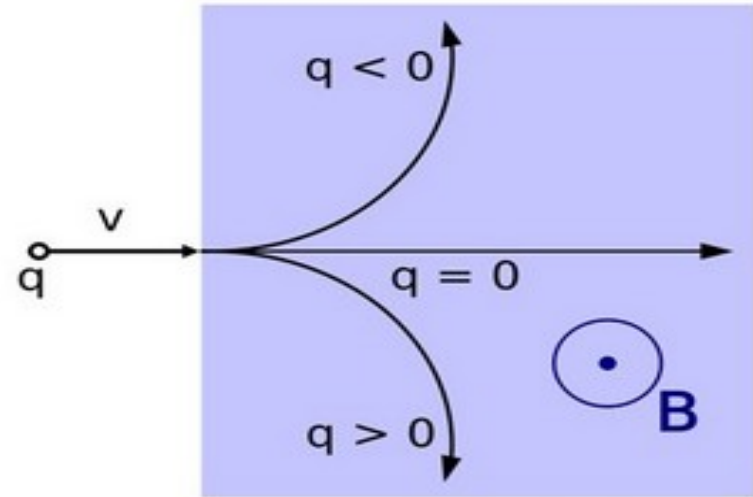


Pohyb nabité částice v elmag. poli

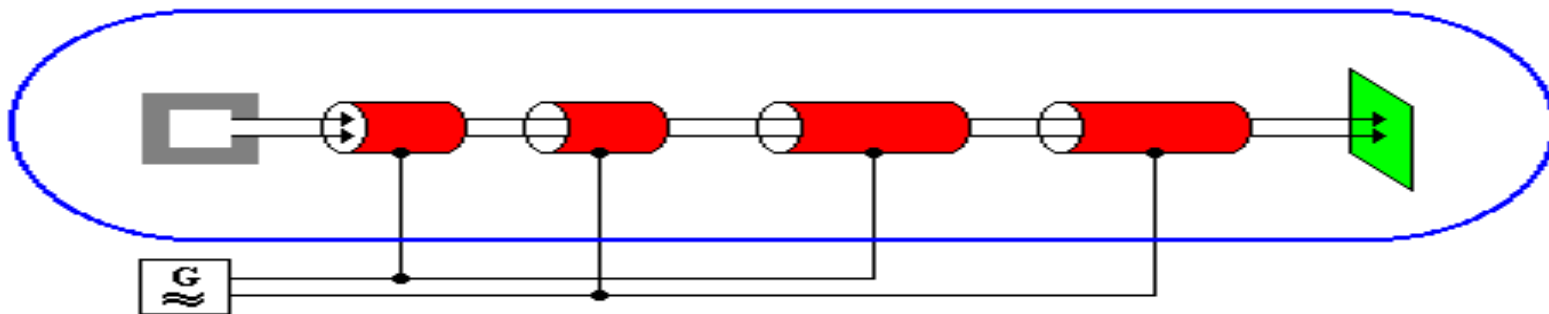
$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



1 elektronvolt



Lineární urychlovač

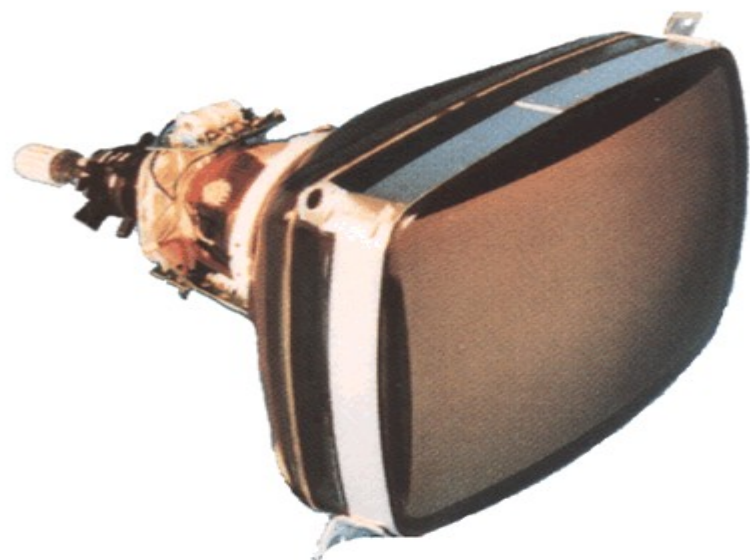


$$\frac{E_{collider}}{E_{fixed\ target}} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sqrt{2E}$$

“PRA” - urychlovače

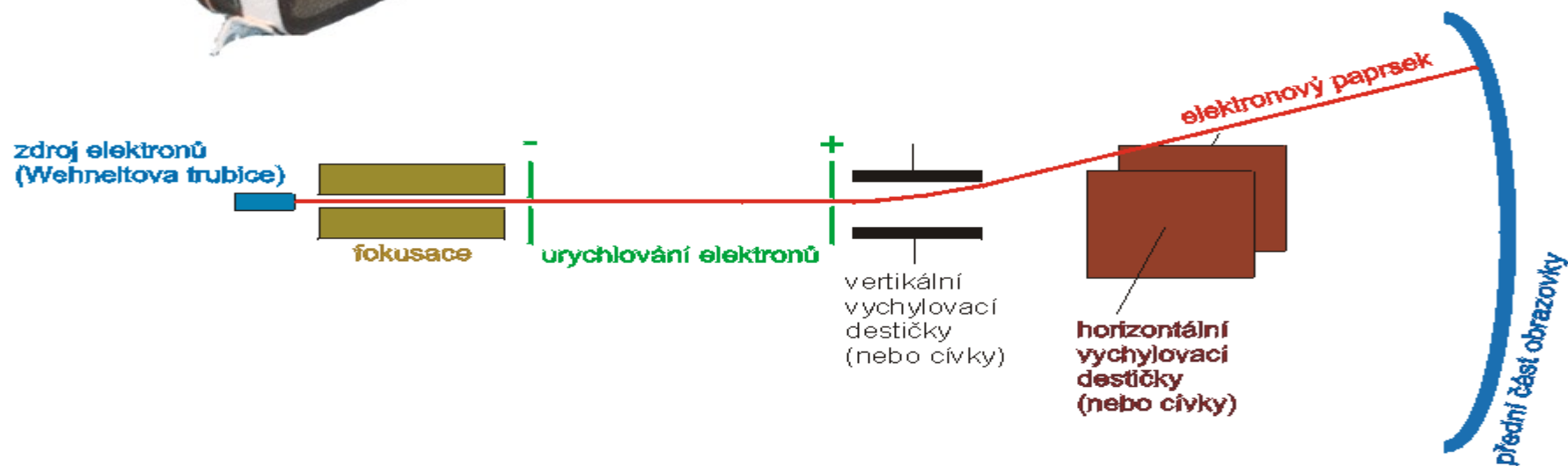
“PRA” - urychlovače



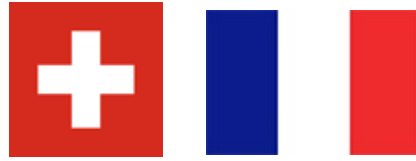


CRT

Cathode Ray Tube



Large Hadron Collider

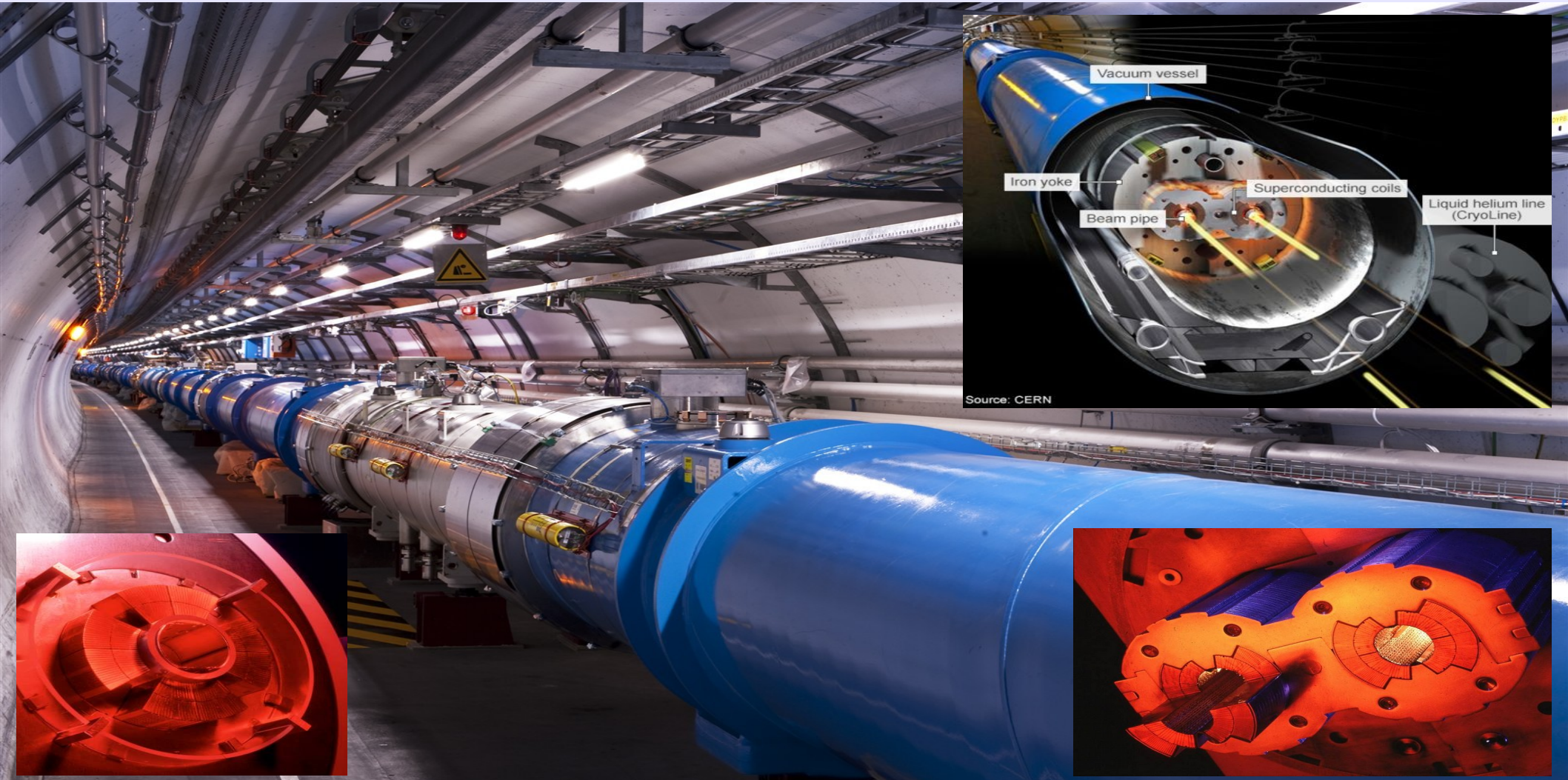


Note: 16. 1. 2021 – Hardware commissioning/magnet training



$$1 \text{ GeV} + 1 \text{ GeV} + E_{\text{kin}} = 13.000 \text{ GeV} = 91 \text{ GeV} + \dots$$

LHC



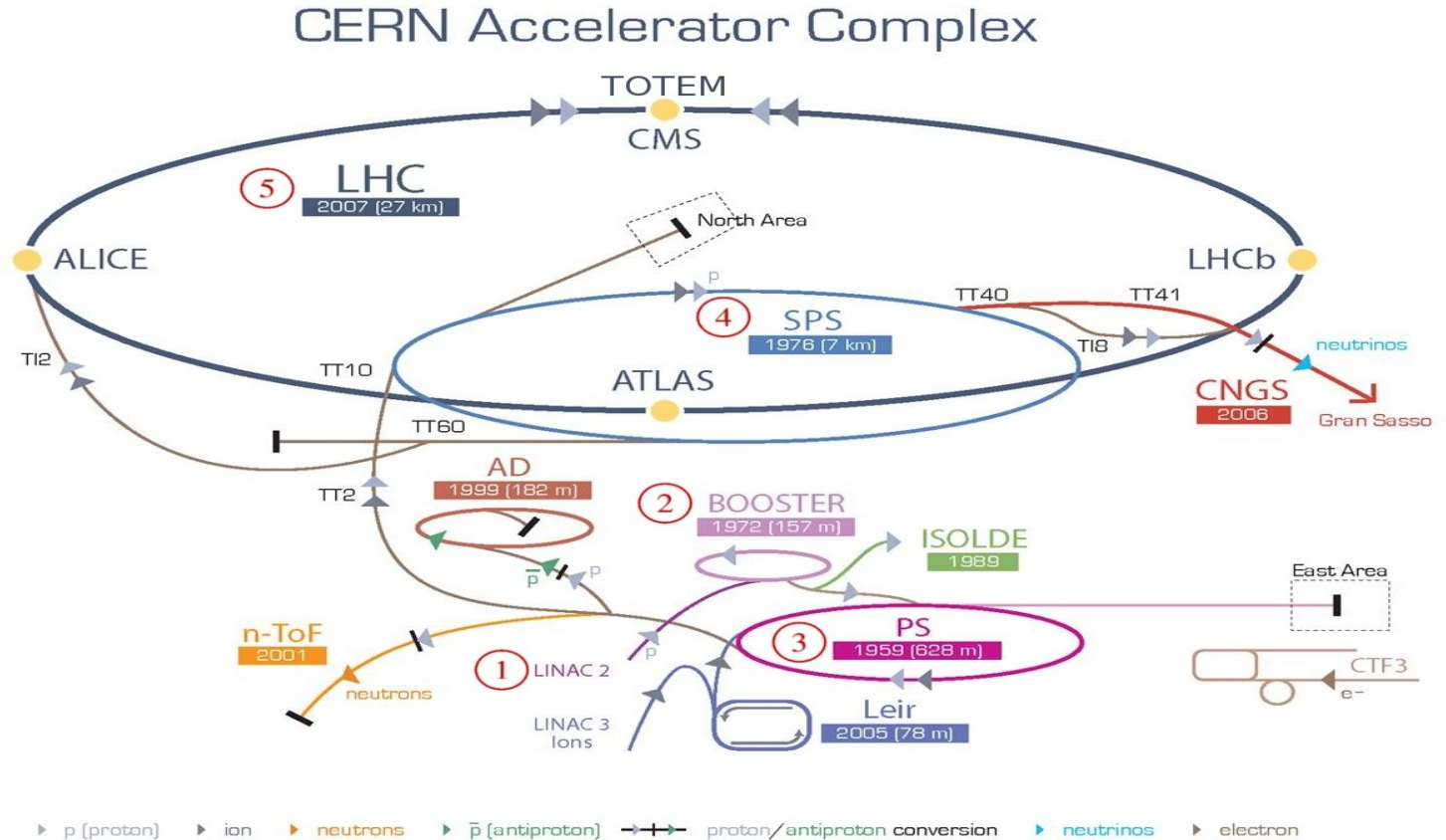
LHC

klystróny

Urychlování:
stojaté střídavé elektrické pole

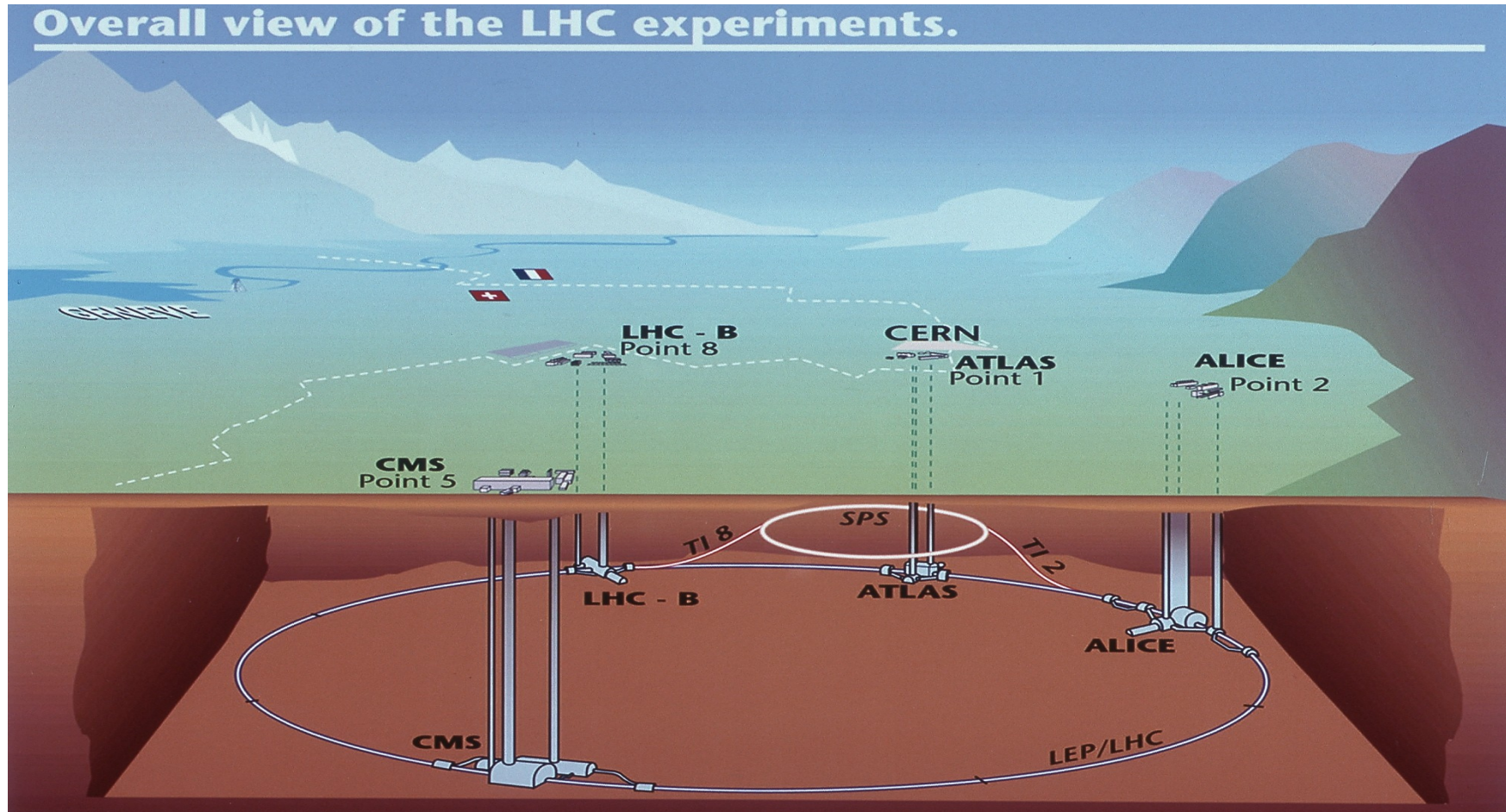


CERN accelerator complex

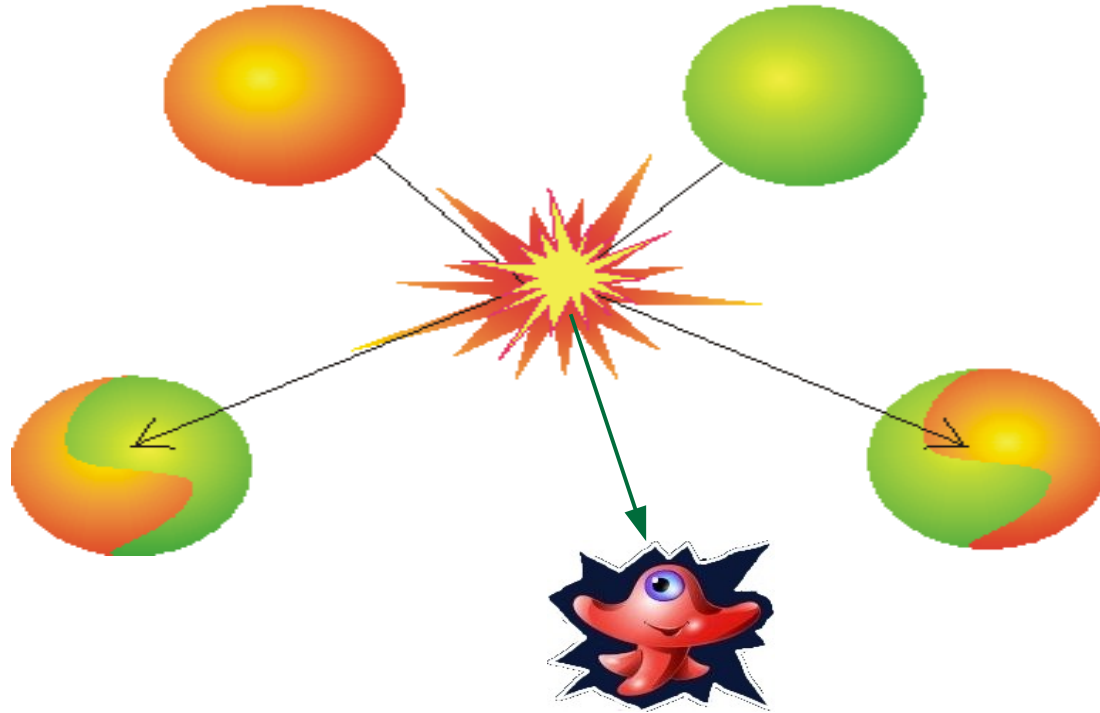


LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

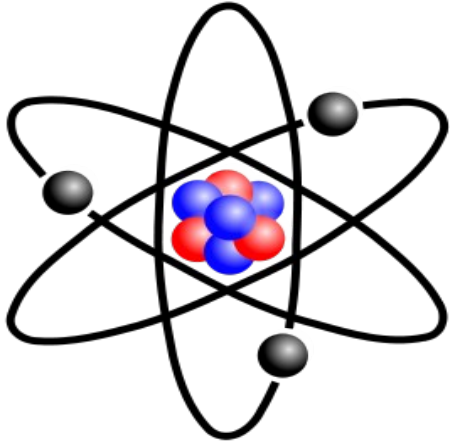
LHC experiments



Jak detekovat částice?



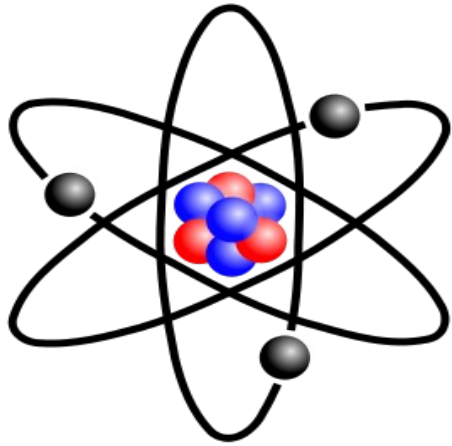
Princip detektorů



Materiál prostředí:

plyn, kapalina, pevná látka, polovodič, scintilátor, ...

Princip detektorů

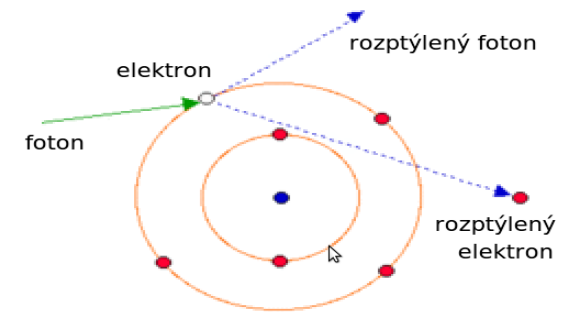
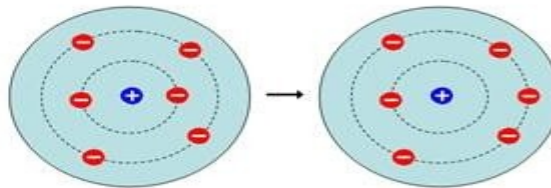
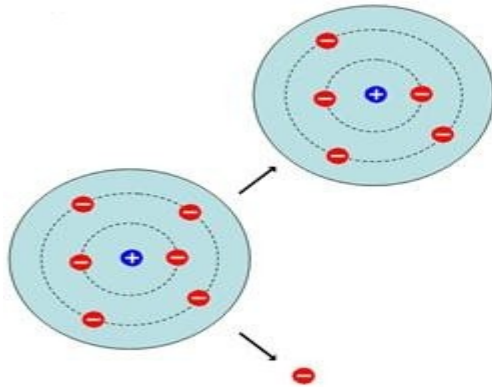


Materiál prostředí:

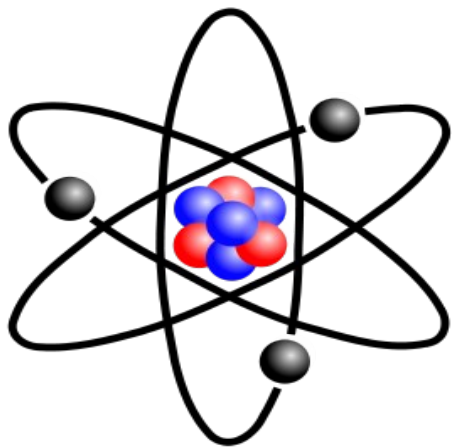
plyn, kapalina, pevná látka, polovodič, scintilátor, ...

Ztráta energie částice v prostředí:

ionizací, excitací, rozptylem, zářením, ...



Princip detektorů

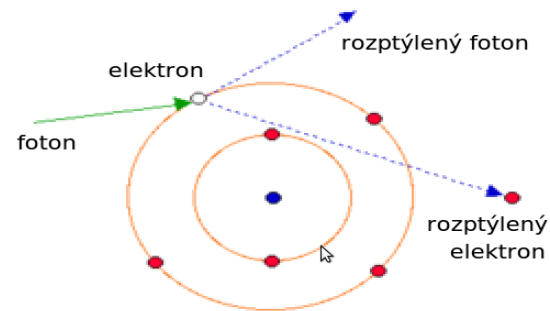
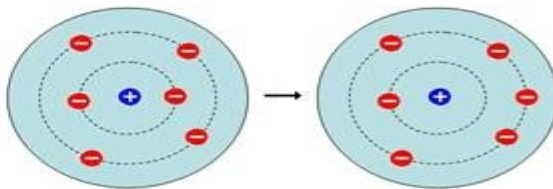
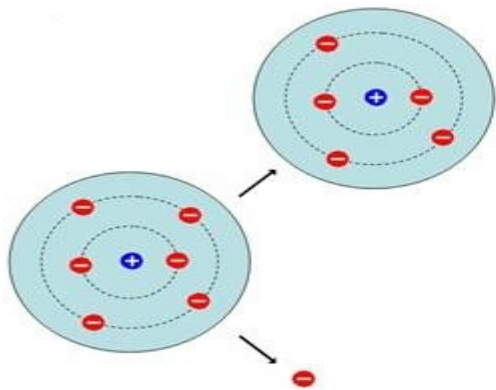


Materiál prostředí:

plyn, kapalina, pevná látka, polovodič, scintilátor, ...

Ztráta energie částice v prostředí:

ionizací, excitací, rozptylem, zářením, ...



Princip: částice ionizuje prostředí → vytvoří volný el. náboj → anoda-katoda (napětí) → sběr náboje → el. proud

Reakce různých částic

Fotony

- fotoefekt $\gamma + atom \rightarrow e^- + iont$
- Comptonův rozptyl $\gamma + atom \rightarrow \gamma + e^- + iont$
- tvorba e^+e^- páru $\gamma + atom \rightarrow e^+ + e^- + atom$

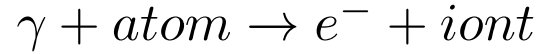
El. nabitá částice

- ionizace
- excitace
- záření
 - brzdné $e^- + atom \rightarrow e^- + atom + \gamma$
 - Čerenkovovo
 - přechodové

Reakce různých částic

Fotony

- fotoefekt
- Comptonův rozptyl
- tvorba e^+e^- páru



Dominance
procesu na E



E

El. nabitá částice

- ionizace
- excitace
- záření
 - brzdné
 - Čerenkovovo
 - přechodové



Pravděpodobnost
interakce (XS)
závisí na **E** částice
a **Z** prostředí

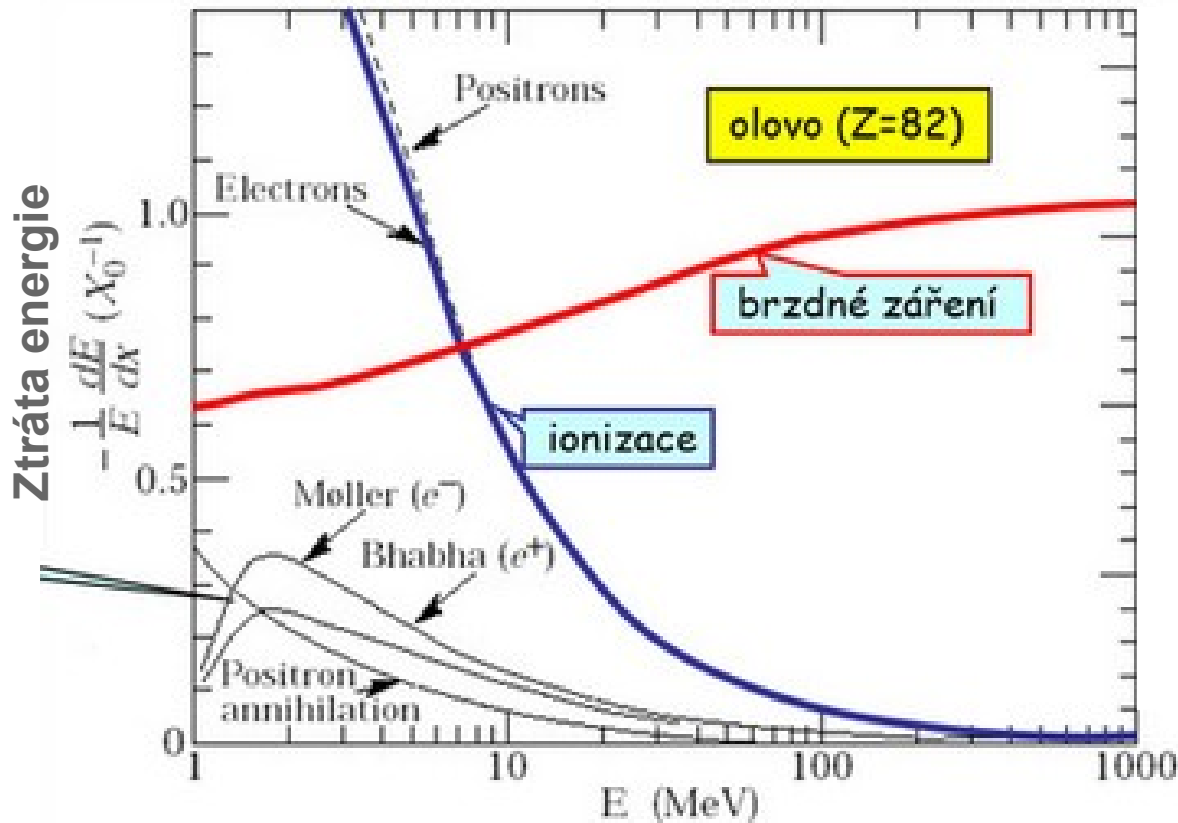
Ztráty energie nabité částice (v olovu)

Elektrony / pozitrony

Dominance procesu ztrát

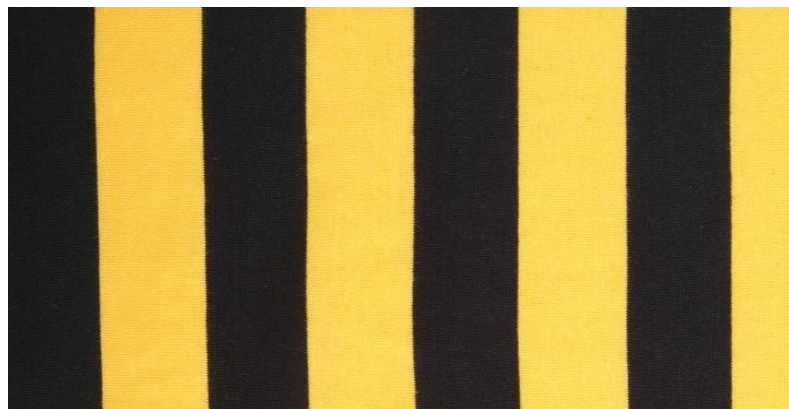
- brzdné záření
- ionizace
- pružný rozptyl
- anihilace

Pro brzdné záření
jsou ztráty energie $\sim E/m^2$



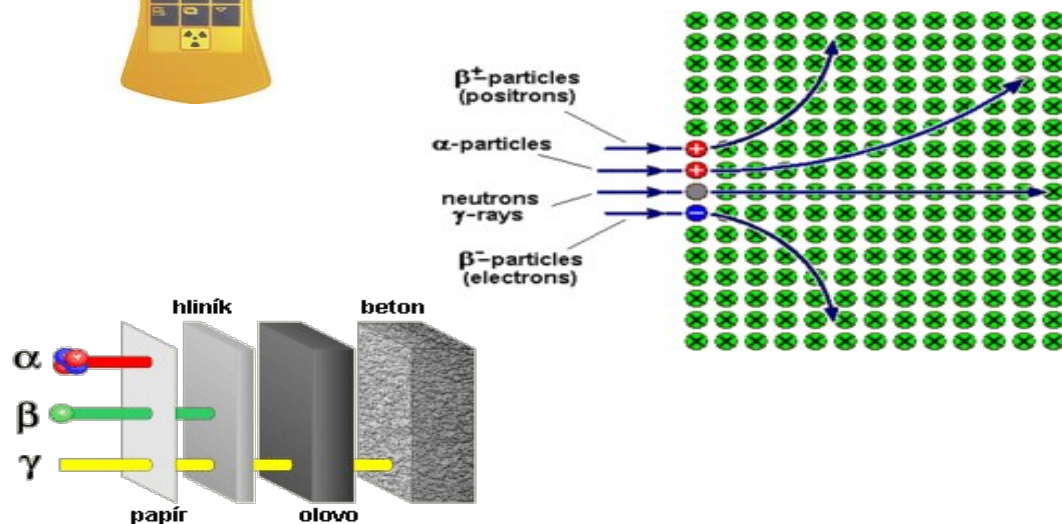
Typy detektorů

- Počítače částic
- Dráhový detektor (q)
- Kalorimetr (E, **p**)



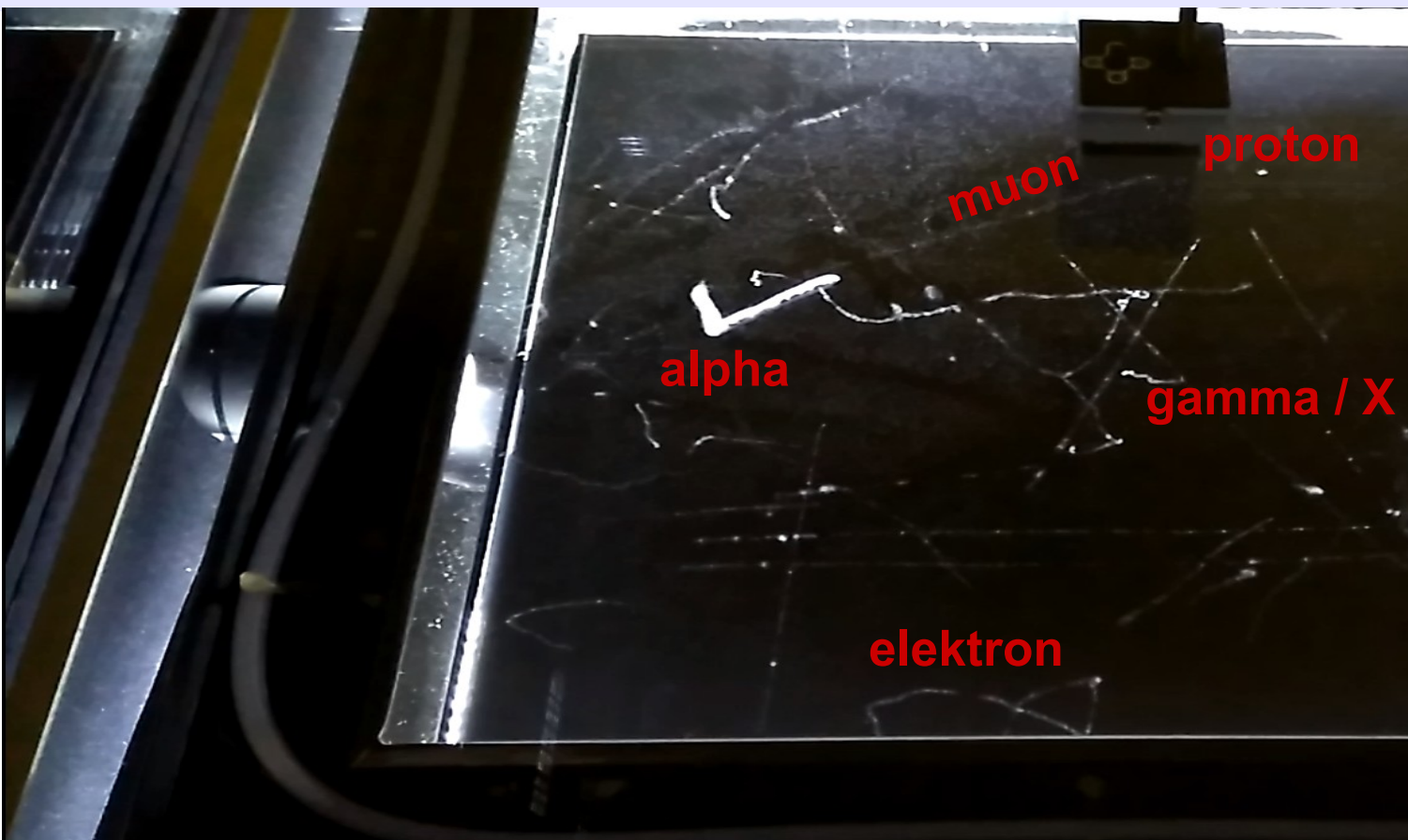
Absorbér – **Detektor**

... vznik volných nosičů náboje (e^- , ionty)



jiný typ částice – jiná odezva
mnoho částic – mnoho detektorů

Mlžná komora



Gymnázium Opatov
(CERN zakázka)



Not a Moon Lander, but a particle detector.

The 26-ton Big European Bubble Chamber (BEBC), filled with 30 cubic metres of liquefied gas, recorded the interactions of elementary particles. The sensitivity of the liquid gas was controlled by a huge piston. Each time the piston expanded, a burst of particles was photographed. Operational from 1973 to 1984, BEBC produced 3000 kilometres of film.

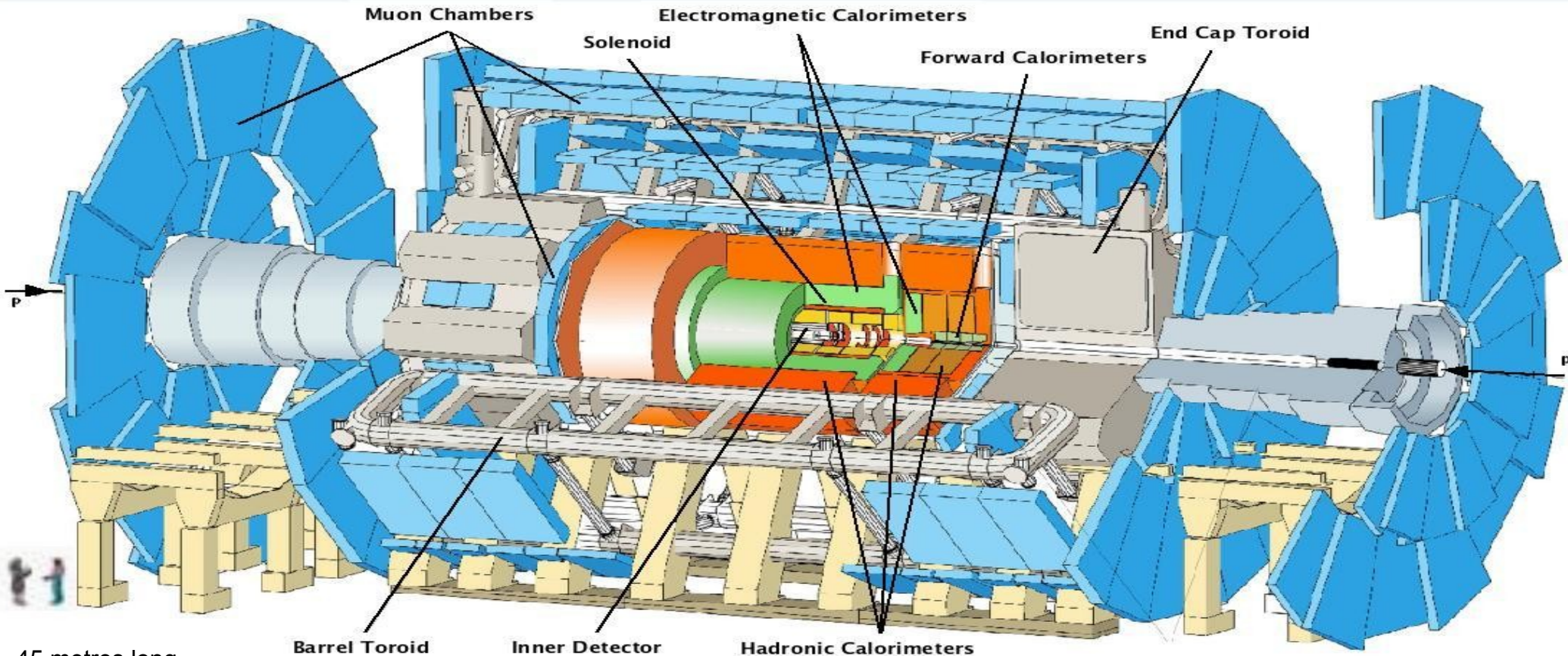


Detektor ATLAS



ATLAS

A Toroidal LHC ApparatuS



45 metres long
25 metres in diameter
weight about 7.000 t
~ 3.000 km of cable
~ 3.000 physicists

Tracker

ECAL

HCAL

μ -Chambers

Konfigurace HE-detektoru

Slupkový charakter detektoru

Rozpoznání
mnoha částic

fotony



elektrony



miony



piony,
protony



neutrony



neutrino

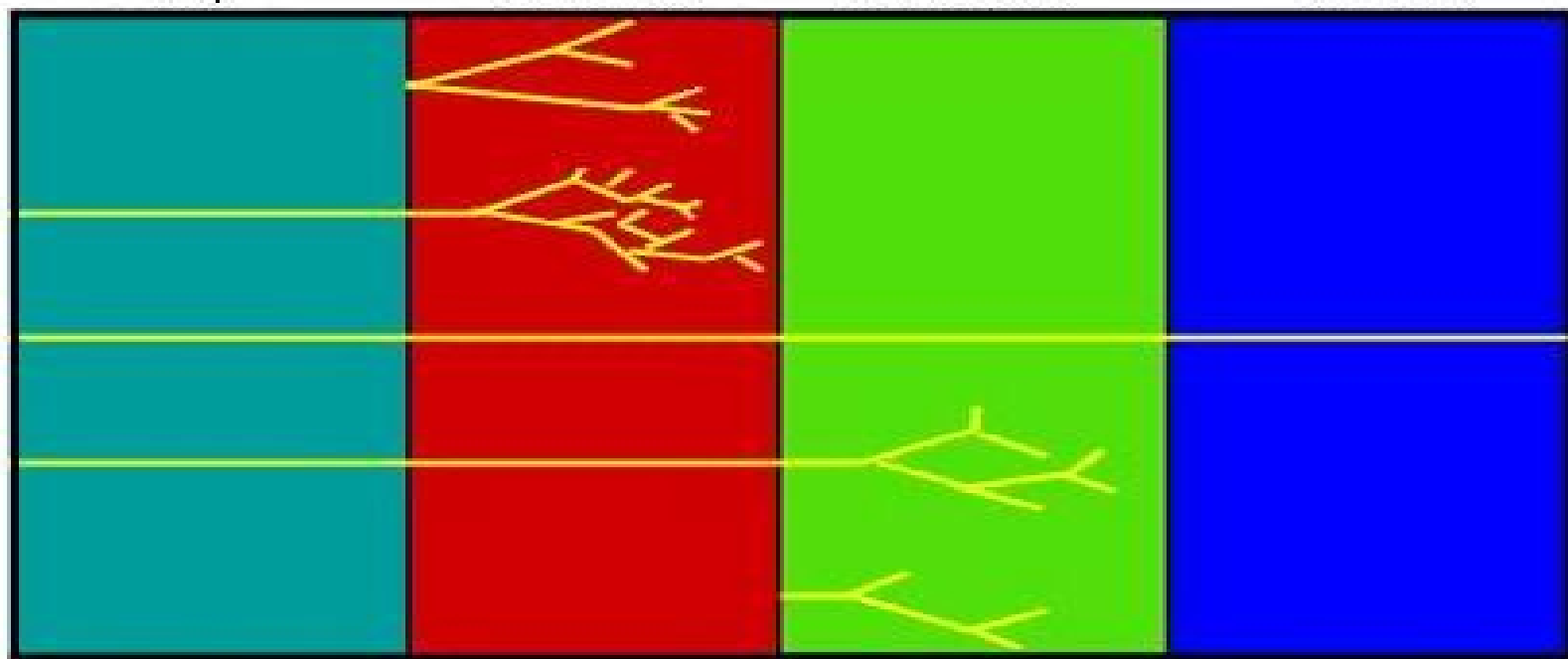
antičástice ($\bar{X}$)

detektor
stop

elektromagnetický
kalorimetr

hadronový
kalorimetr

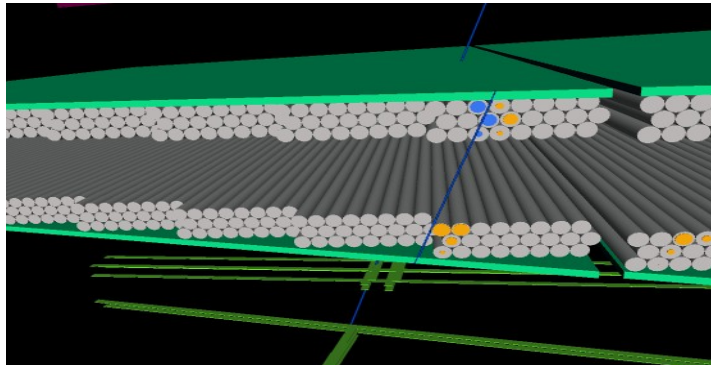
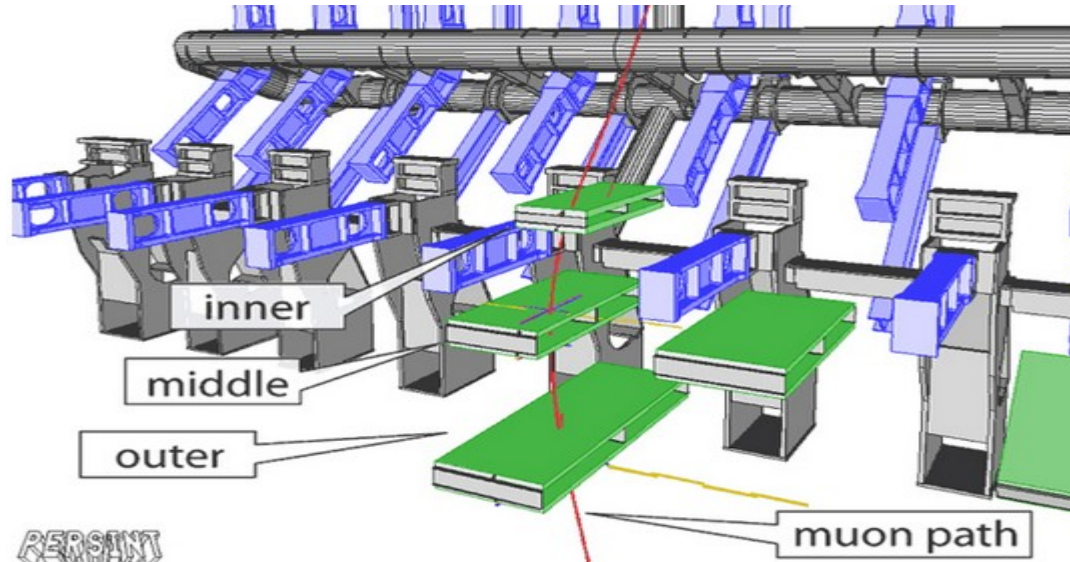
mionová
komora



vnitřní vrstva

vnější vrstva

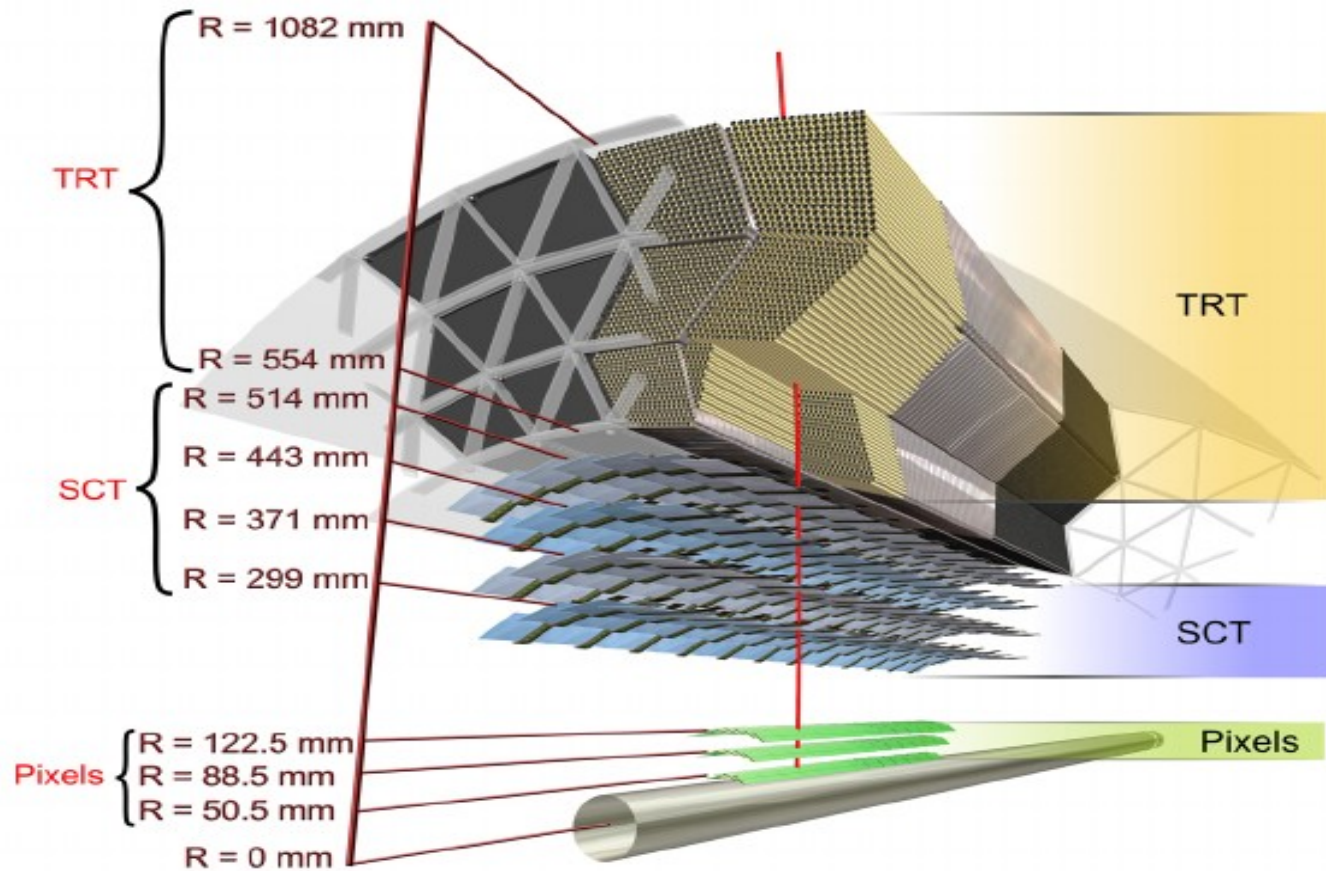
Mionové komory



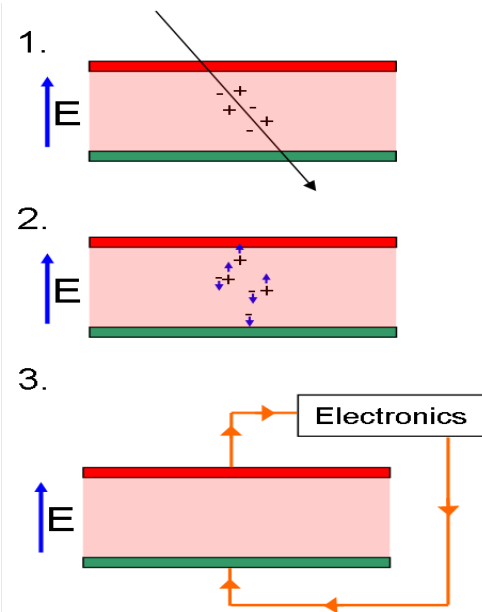
tisíce kov. trubiček
 $\varnothing$ 3 cm
plyn
přesnost ~ 0.1 mm



Dráhový detektor

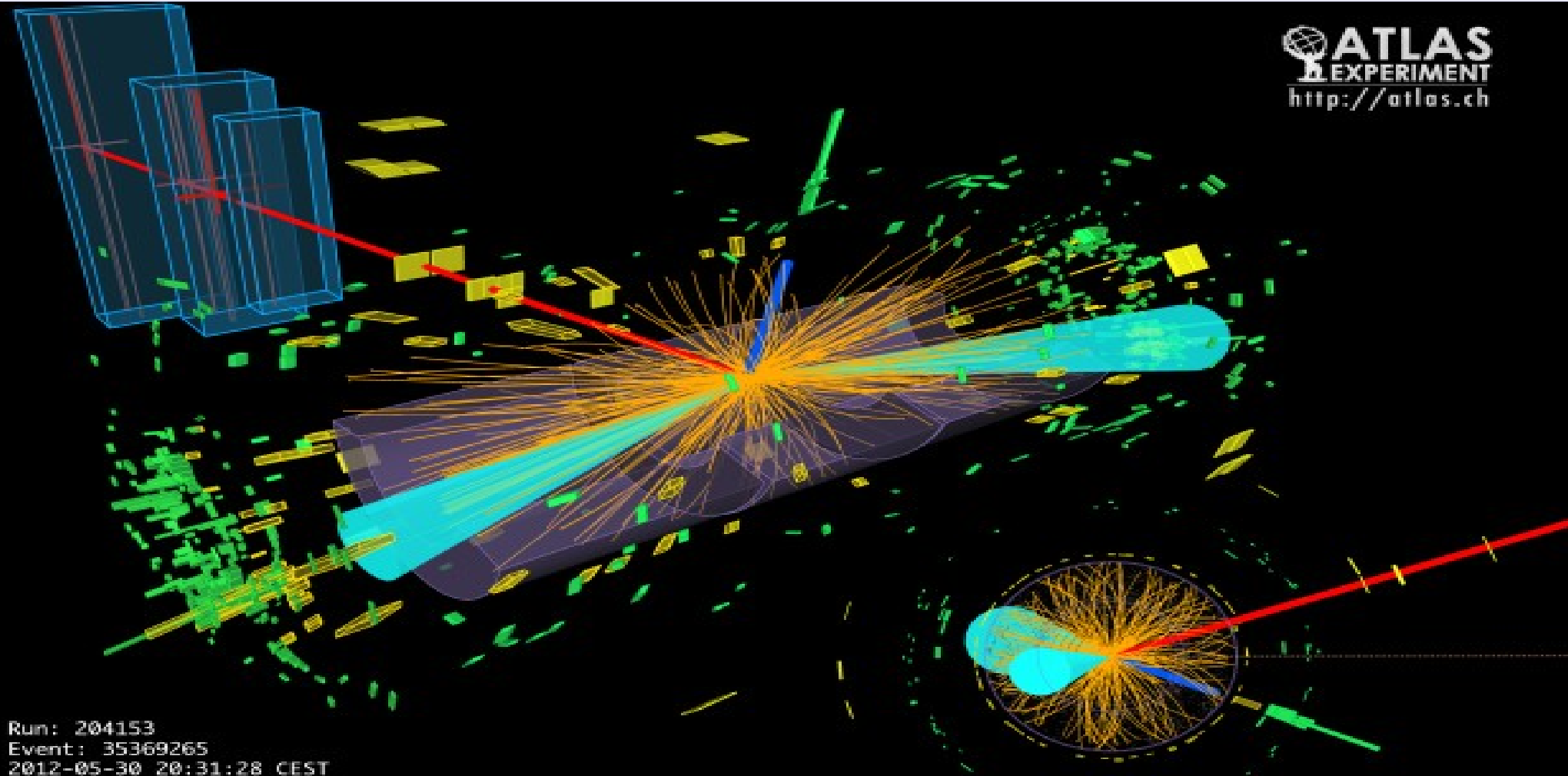


~ 80 milionů pixelů ($50 \times 400 \text{ }\mu\text{m}$)
přesnost $14 \text{ }\mu\text{m}$

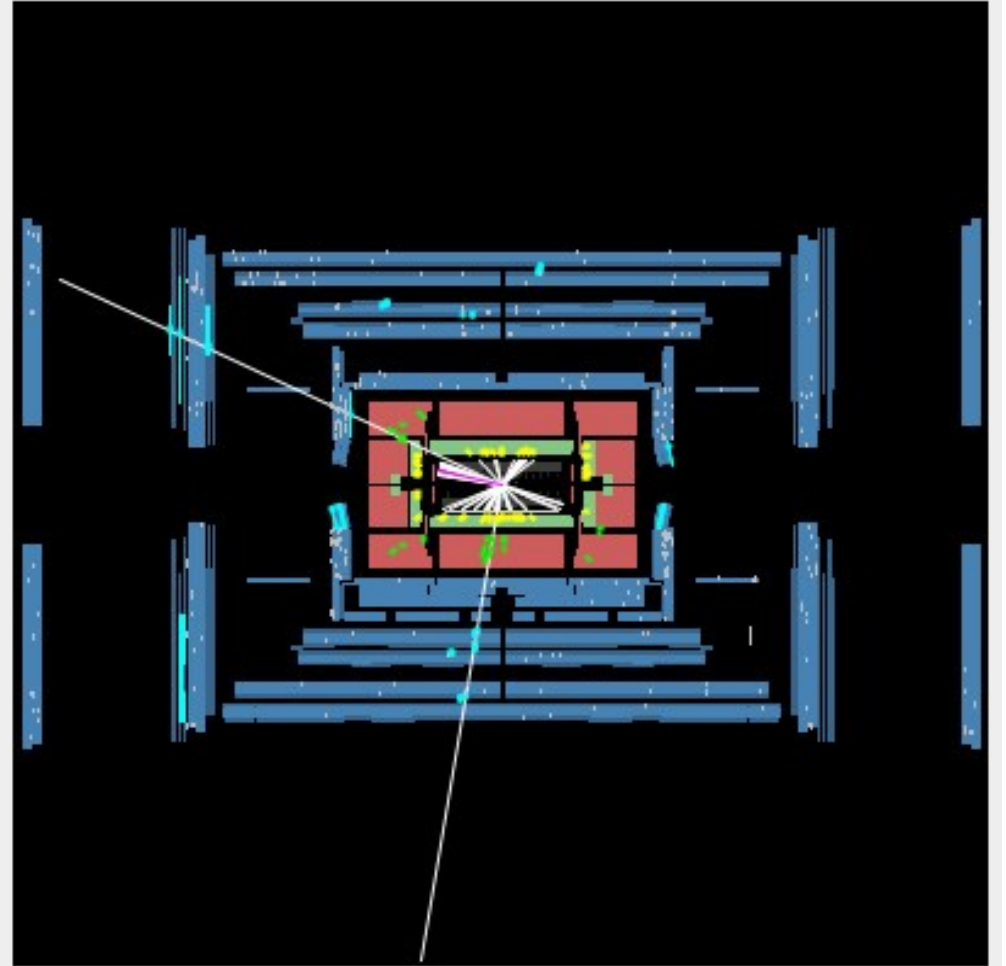
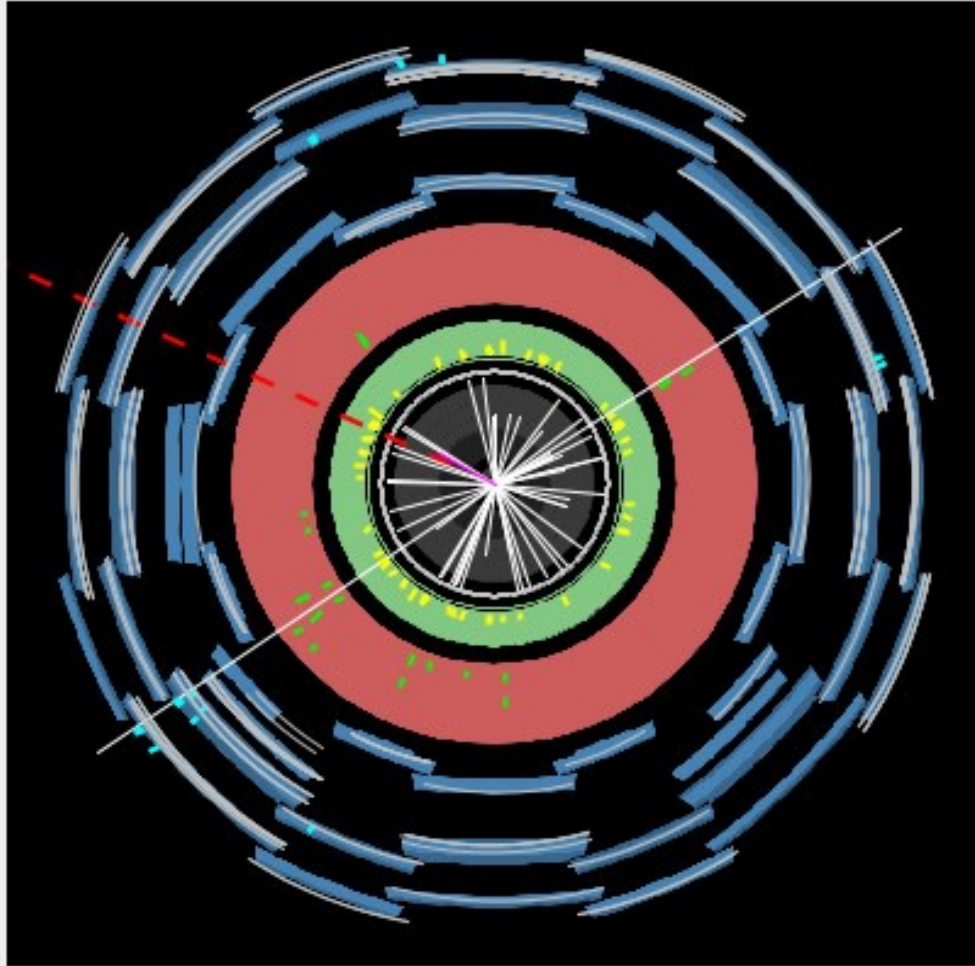


Event (událost)

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



Event (událost)





Z-Path measurement

Z boson

Higgs boson

Kandidát

rozpoznání částic
rozpoznání eventů

Background

Invariantní hmotnost

Track

Rozpadový kanál

p_T cut

J/ψ

Parton

GeV

Event

γ

Primární Vertex

Signal

Peak

Pile-up

Příčná hybnost

Bump

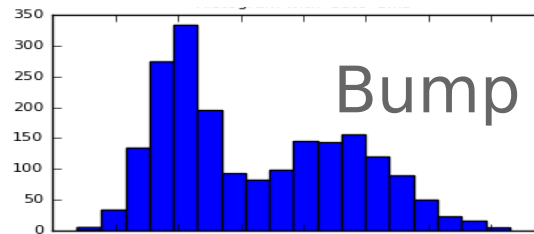
Converted photon

Jet

Energy deposit

kalorimetr

Histogram





Z boson

Jaká “stopa/odezva/podpis” v detektoru?



Z boson

Jaká “stopa/odezva/podpis” v detektoru?

Vlastnosti bozonu Z

- zprostředkovatel slabé jaderné interakce
- $q = 0$
- $\tau \sim 3 \times 10^{-25} \text{ s}$



Z boson

Jaká “stopa/odezva/podpis” v detektoru?

Vlastnosti bozonu Z

- zprostředkovatel slabé jaderné interakce
- $q = 0$
- $\tau \sim 3 \times 10^{-25} \text{ s}$

$Z \rightarrow$	$e^+ e^-$	$\mu^+ \mu^-$	$\tau^+ \tau^-$	$\nu \bar{\nu}$	$q \bar{q}$
%	3.4	3.4	3.4	20.0	69.9

100%?

Z boson

Jaká “stopa/odezva/podpis” v detektoru?

Vlastnosti bozonu Z

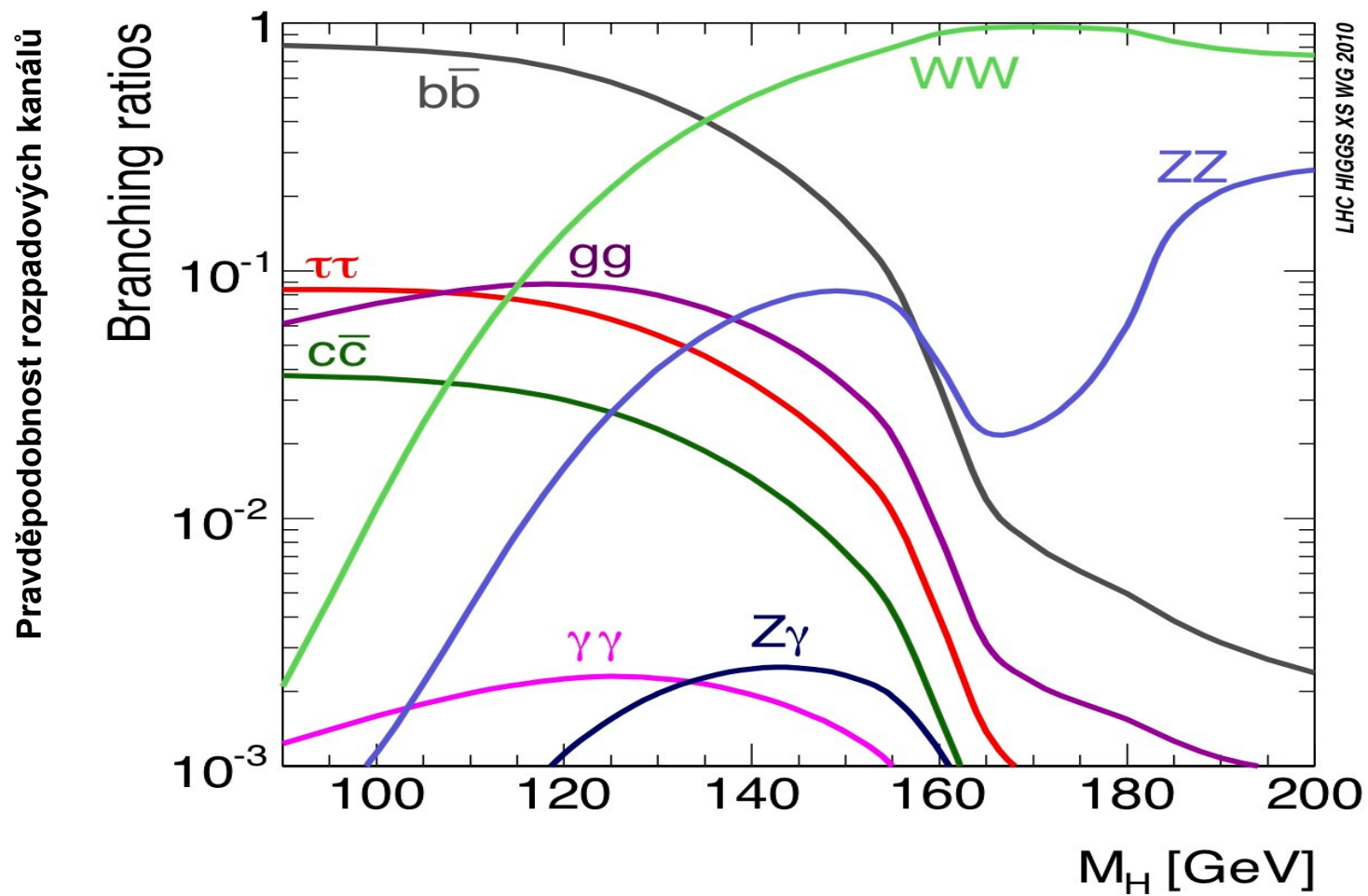
- zprostředkovatel slabé jaderné interakce
- $q = 0$
- $\tau \sim 3 \times 10^{-25} \text{ s}$

$Z \rightarrow$	$e^+ e^-$	$\mu^+ \mu^-$	$\tau^+ \tau^-$	$\nu \bar{\nu}$	$q \bar{q}$
%	3.4	3.4	3.4	20.0	69.9

100%?

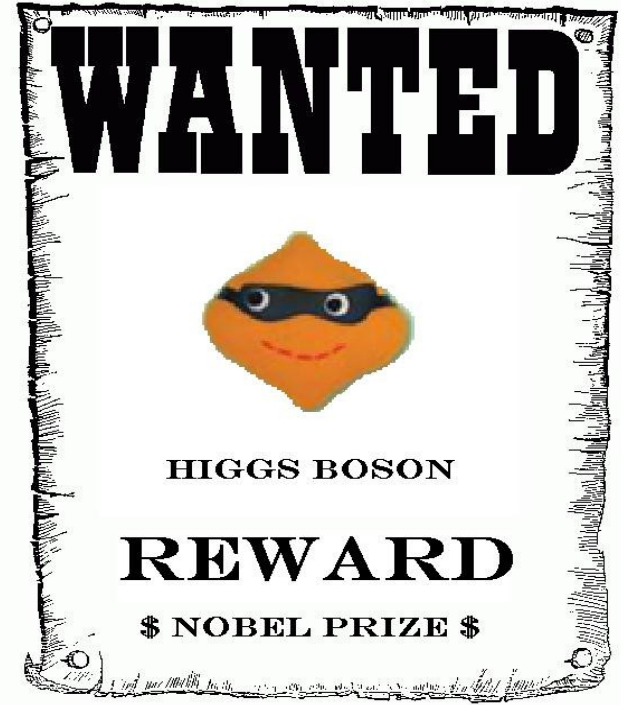
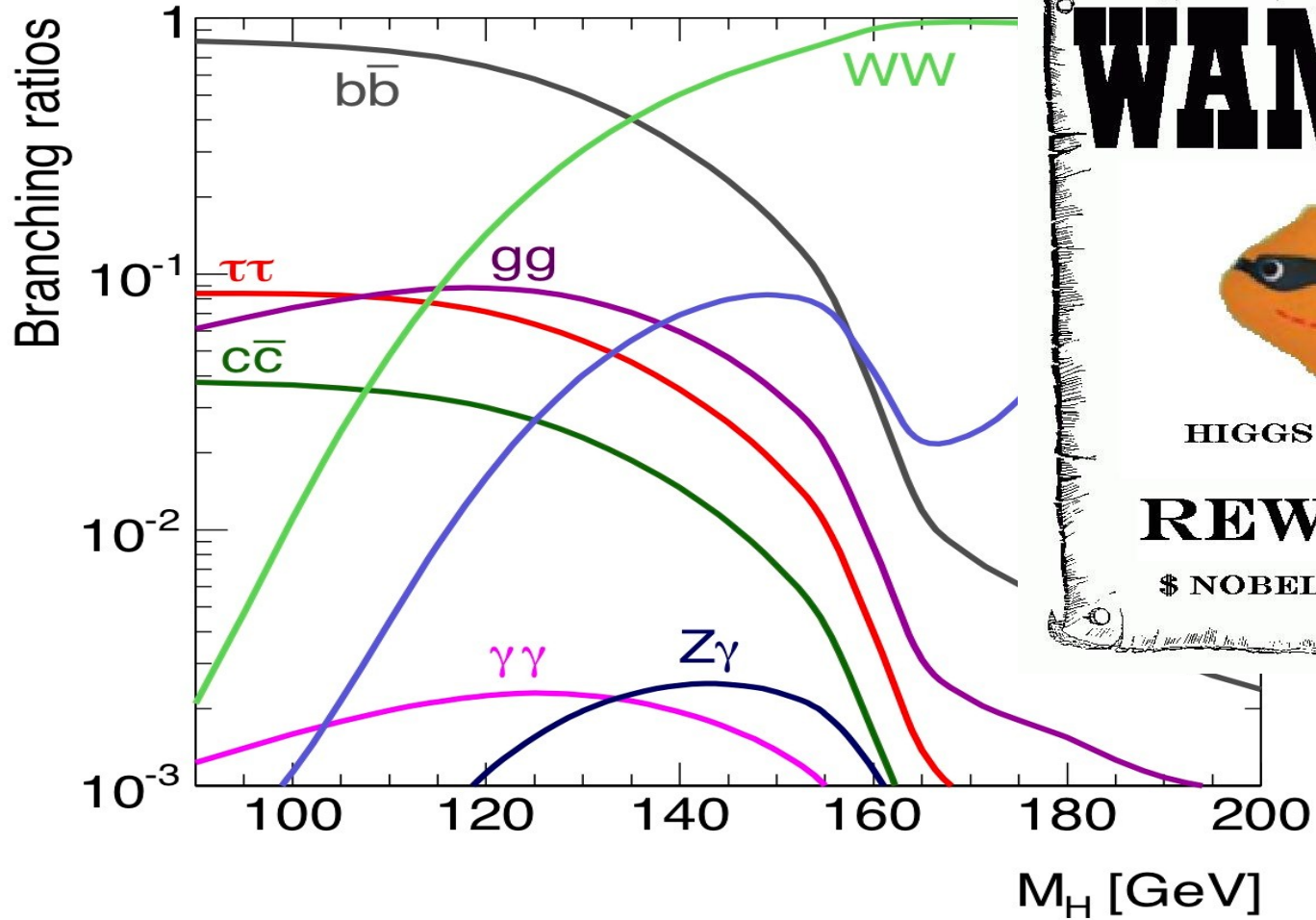
... výběr rozpadových kanálů: **dileptony**

Higgsův boson



Higgsův boson

Pravděpodobnost rozpadových kanálů

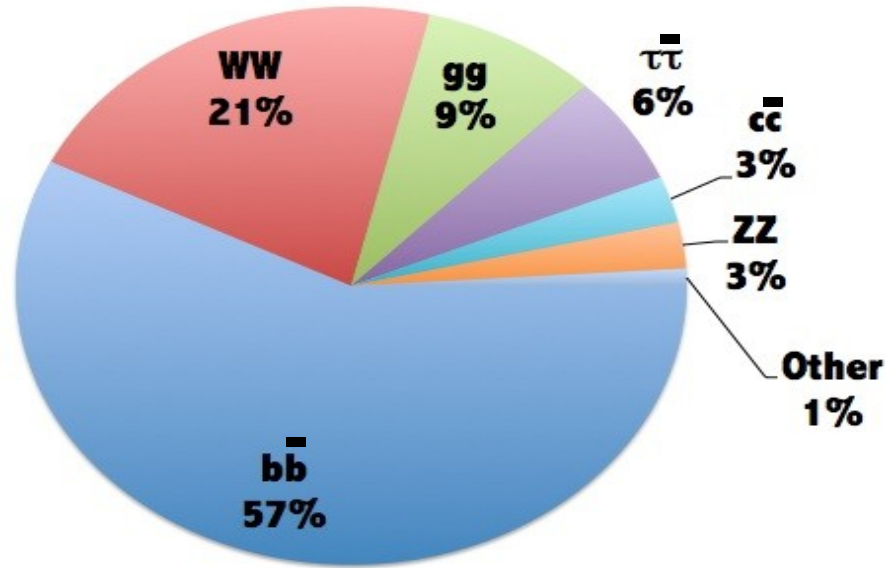


Higgsův boson

Objev prohlášen 4.7.2012

$$H \dots \tau \sim 2 \times 10^{-22} \text{ s}$$

Higgs decays at $m_H=125\text{GeV}$



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

0.2%

$$H \rightarrow a+b+c$$

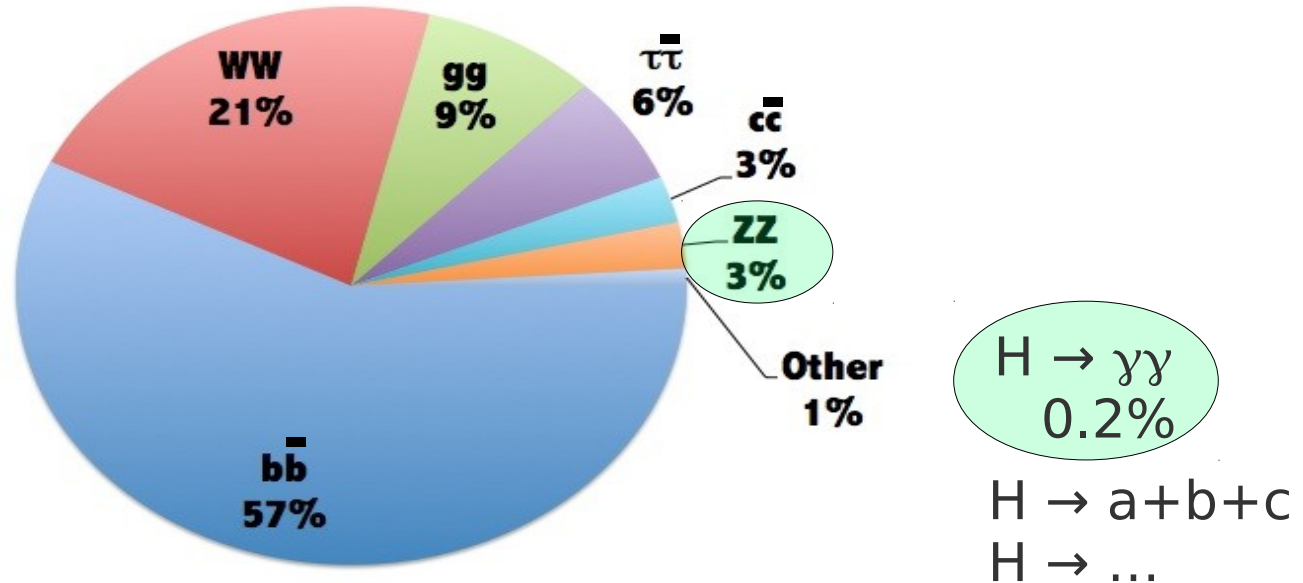
$$H \rightarrow \dots$$

Higgsův boson

Objev prohlášen 4.7.2012

$$H \dots \tau \sim 2 \times 10^{-22} \text{ s}$$

Higgs decays at $m_H=125\text{GeV}$

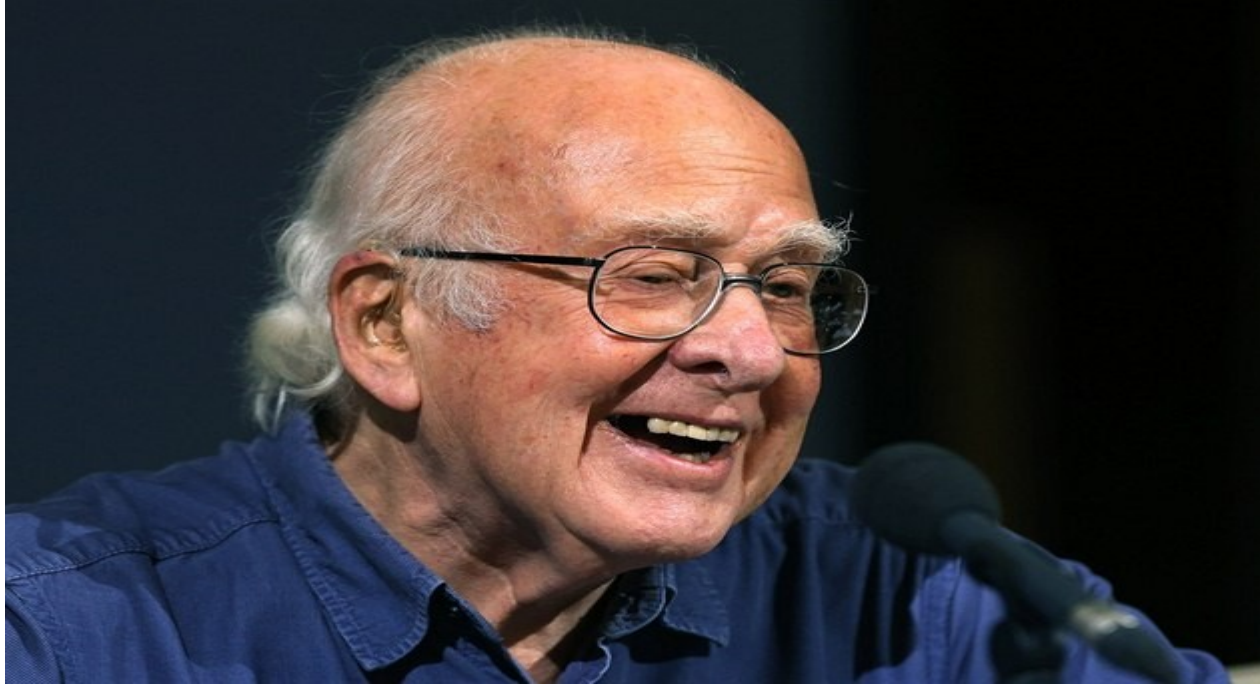


... výběr rozpadových kanálů: ***ZZ and diphotons***

Higgs



Higgs



Higgs



NC za fyziku 2013

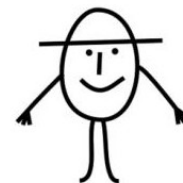
- za předpověď existence Higgsova bosonu (1964)



Peter Higgs a François Englert

Nobelova cena za fyziku

REKLAMA



2001	Eric Allin Cornell, Wolfgang Ketterle a Carl Wieman	za dosažení Bose-Einsteinova kondenzátu atomů a principiální výzkum vlastností t
2002	Raymond Davis a Masatoši Košiba (小柴 昌俊) Riccardo Giacconi	za průkopnické příspěvky k astrofyzice, za průkopnické příspěvky k astrofyzice, rentgenového záření
2003	Alexej Alexejevič Abrikosov (Алексей Алексеевич Абрикосов), Vitalij Lazarevič Ginzburg (Виталий Лазаревич Гинзбург) a Sir Anthony James Leggett	za průkopnické příspěvky k teorii suprav
2004	David Jonathan Gross, H. David Politzer a Frank Wilczek	za objev asymptotické volnosti v teorii s
2005	Roy Glauber, John Hall a Theodor Hänsch	za různé objevy v oblasti optiky (za příspěvek k rozvoji laserové spektroskopie – Hall, Hänsch resp. kvantové teorie optické koherence – Glauber)
2006	John C. Mather a George F. Smoot	za objev toho, že reliktní záření pocházející z vesmíru má podobu záření absolutně černého tělesa , a zjištění anizotropie v tomto záření (viz též COBE)
2007	Albert Fert a Peter Grünberg	za objev obří magnetorezistence (GMR)
2008	Jóičiró Nambu Makoto Kobajaši a Tošihide Masukawa	za objev mechanismu spontánního narušení symetrie v subatomové fyzice za objev původu narušené symetrie a předpověď existence nejméně tří rodin kvarků
2009	Charles Kuen Kao Willard Sterling Boyle a George Elwood Smith	za průlom v oblasti přenosu světla v optických vláknech za vynález CCD
2010	Andre Geim a Konstantin Novoselov	za objev grafenu
2011	Saul Perlmutter, Brian Schmidt a Adam Riess	za objev zrychlujícího se rozpínání vesmíru pozorováním vzdálených supernov
2012	Serge Haroche a David J. Wineland	za průlomové experimentální metody umožňující měření jednotlivých kvantových systémů a manipulaci s nimi
2013	Peter Higgs a François Englert	za předpověď existence tzv. Higgsova bosonu
2014	Isamu Akasaki, Hiroši Amano a Shuji Nakamura	za vývoj modrých světelných diod umožňujících vytvoření nového, ekologického světelného zdroje.
2015	Takaaki Kadžita a Arthur B. McDonald	za objev oscilace neutrin , který dokazuje, že neutrina mají hmotnost
2016	David J. Thouless, Duncan Haldane a Michael Kosterlitz	za teoretické objevy topologických fází hmoty a topologických fázových přechodů ^[1]
2017	Rainer Weiss, Barry Barish a Kip Thorne	za rozhodující příspěvek k detektoru LIGO a pozorování gravitačních vln ^[2]
2018	Arthur Ashkin, Gérard Mourou a Donna Stricklandová	za převratné objevy v oboru laserové fyziky ^[3]

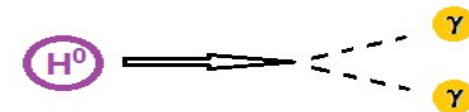
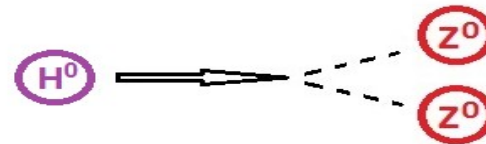
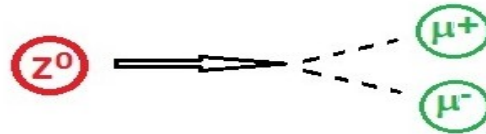
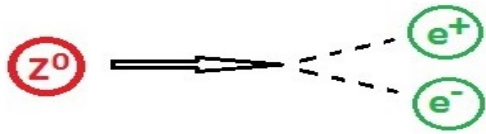
Nobelova cena za fyziku

2019	James Peebles	za teoretické objevy ve fyzikální kosmologii ^[4]
	Michel Mayor, Didier Queloz	za objev exoplanety obíhající hvězdu slunečního typu ^[4]
2020	Roger Penrose	za objev, že vznik černých děr je robustní předpovědí obecné teorie relativity ^[5]
	Reinhard Genzel a Andrea Ghezová	za objev supermasivního objektu v jádře naší galaxie ^[5]

Z-Path measurement

Z a **H**: nepřímá detekce rozpadových produktů

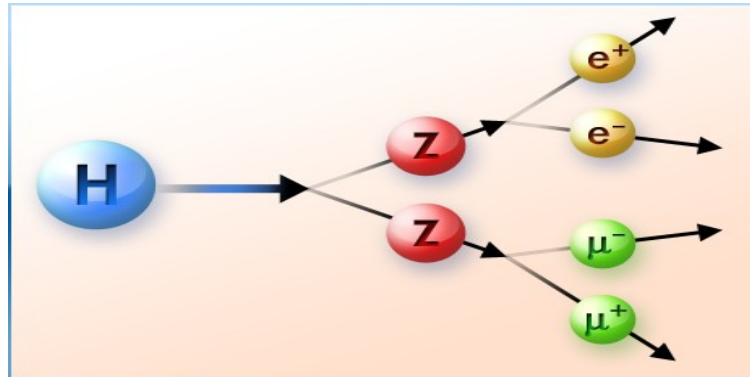
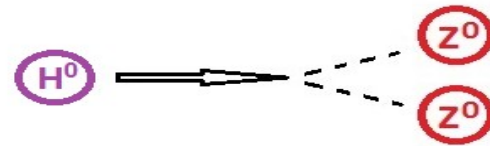
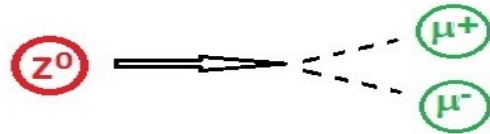
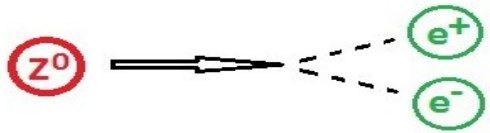
... kterých kanálů?



Z-Path measurement

Z a **H**: nepřímá detekce rozpadových produktů

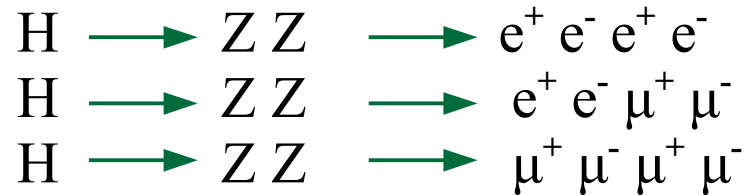
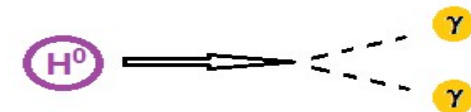
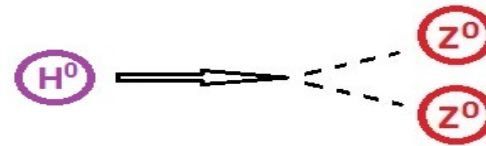
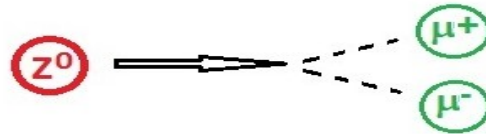
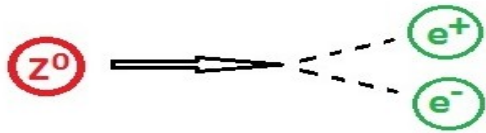
... kterých kanálů?



Z-Path measurement

Z a **H**: nepřímá detekce rozpadových produktů

... kterých kanálů?

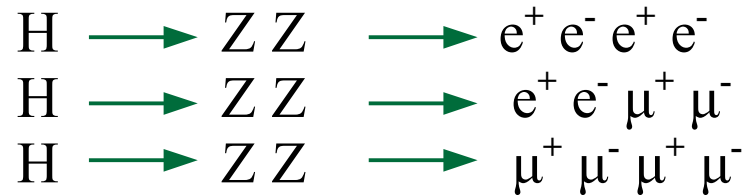
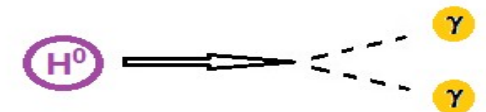
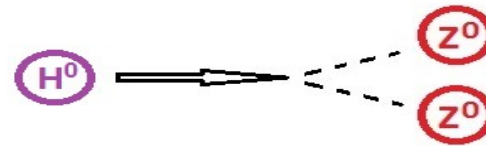
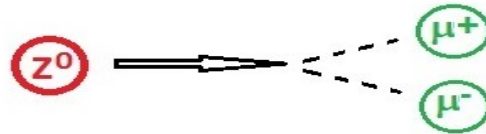
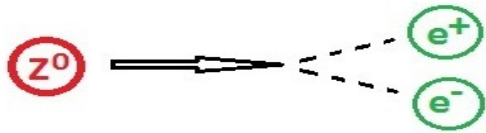


4 leptonový
rozpad

Z-Path measurement

Z a **H**: nepřímá detekce rozpadových produktů

... kterých kanálů?

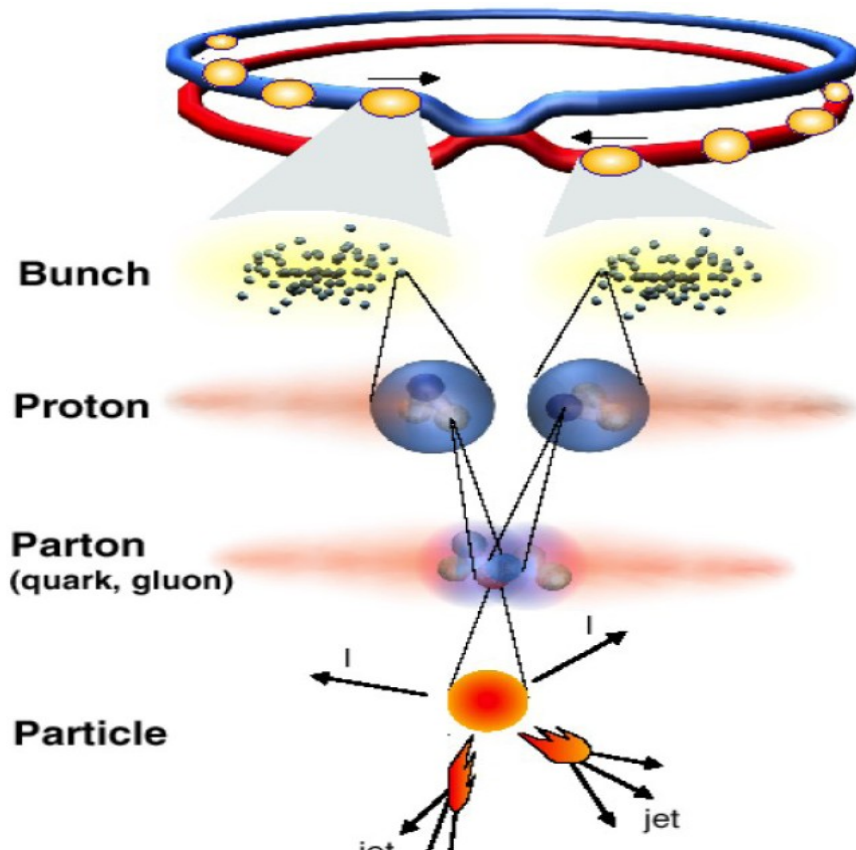


4 leptonový
rozpad

Hledáme stopy / projev částic:

e, μ, γ

LHC parameters



- proton energy: 6.5 TeV
- 2 x 2835 proton-proton bunches
- 10^{11} protons/bunch
- crossing rate of bunches: 40 MHz
- up to 6×10^8 pp-collisions/s
- Pile-up: 23 interactions/crossing
- Magnetic field: 3.8 T
- Temperature: 1.9 K

Řádové odhady

Kolik váží všechny protony ve svazcích?



Řádové odhady

Kolik váží všechny protony ve svazcích?

... a jaká je jejich kinetická energie?



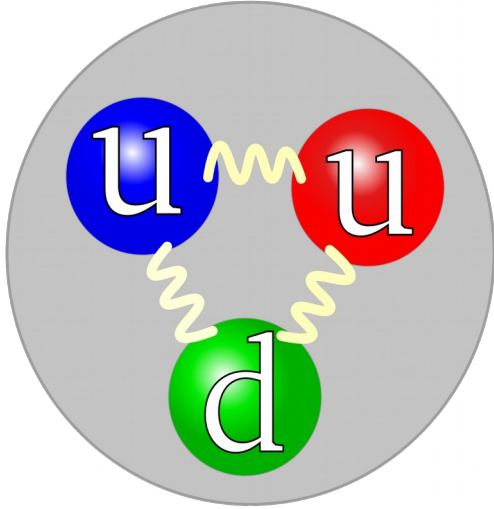
Výroba Z / H

R1: $p + p \rightarrow Z$

R2: $p + p \rightarrow H$

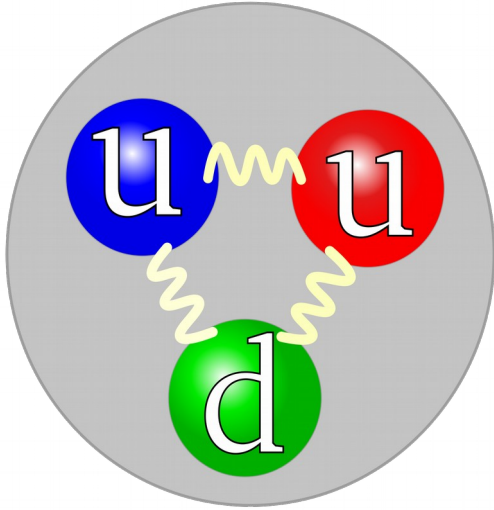
Q: Splněn ZZQ?

Proton



mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

Proton

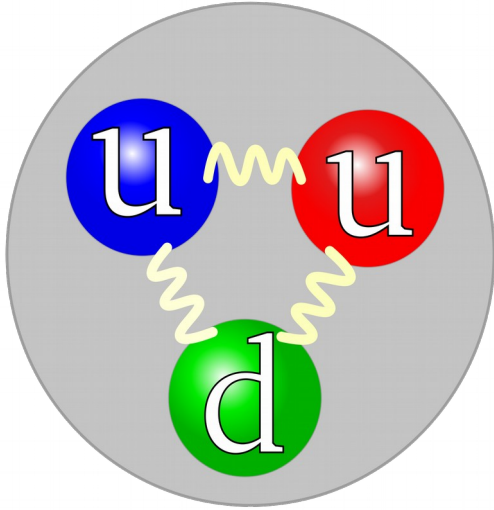


mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

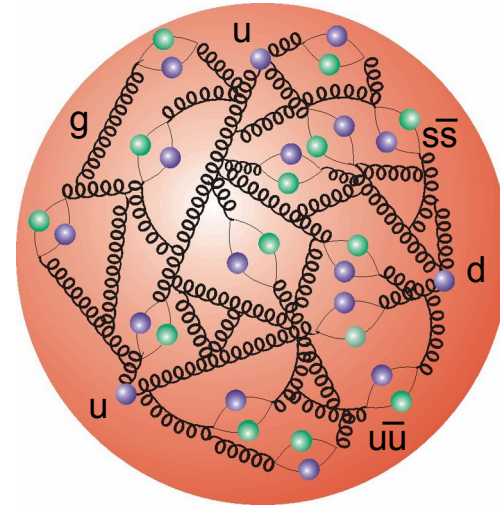
$u + d \rightarrow Z \text{ nebo } H$ ❌

$u + \bar{u} \rightarrow Z \text{ nebo } H$ ✅

Proton

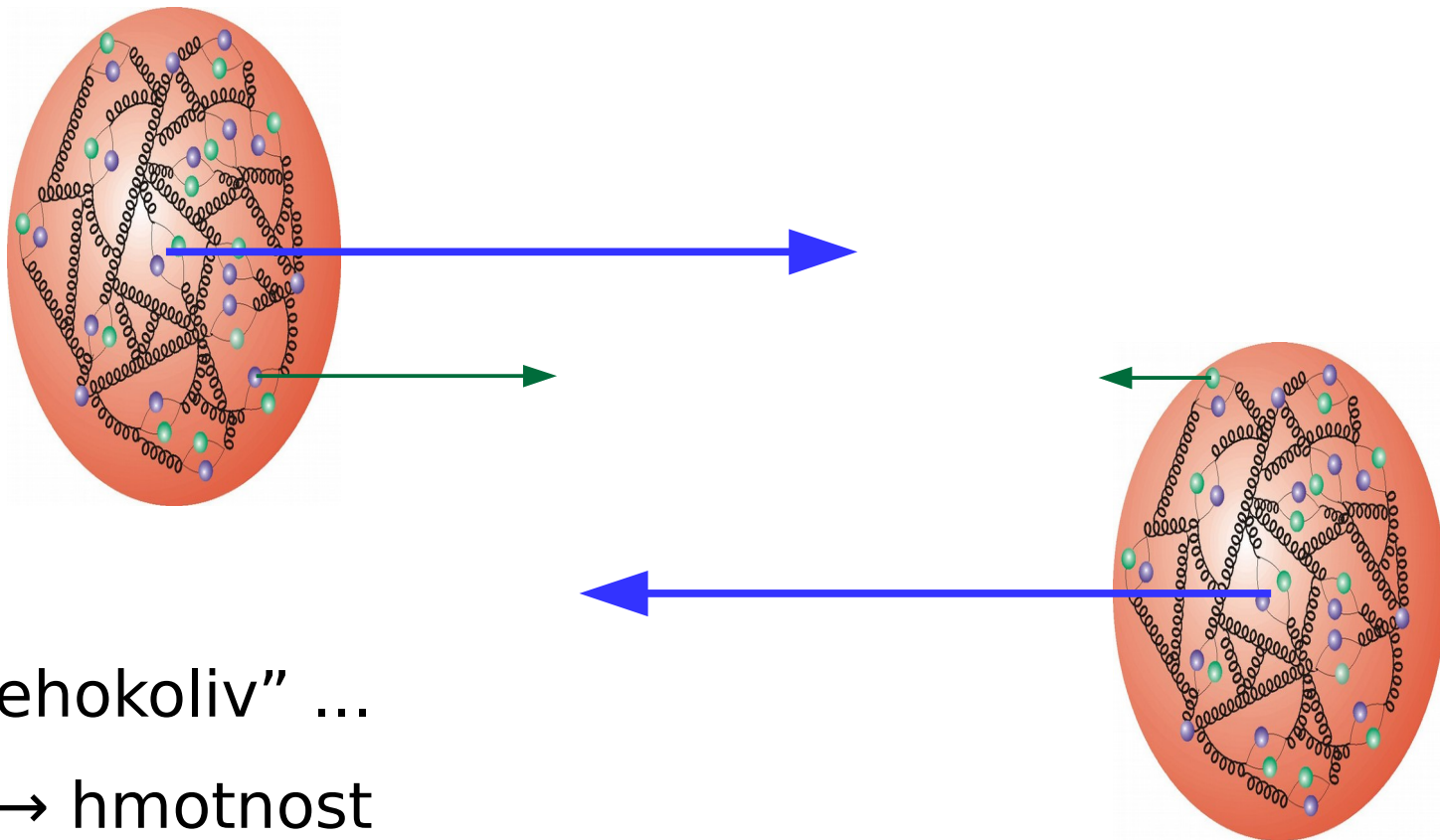


3 valenční kvarky



Partony = $\{q, \bar{q}, \text{gluon}\}$
 $q = \{u, d, c, s, b\}$

Srážka protonů



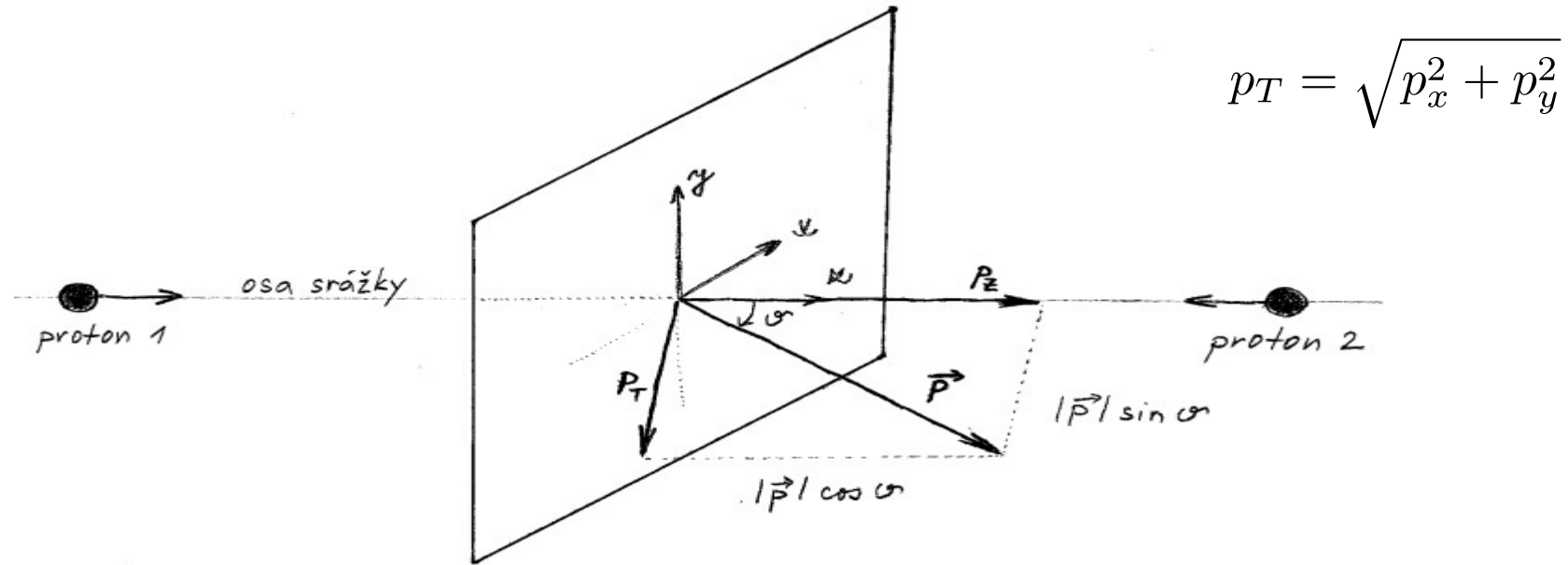
Vznik “čehokoliv” ...

Energie $\rightarrow$ hmotnost

Zákony zachování: E , Q , $\mathbf{P}$, ...

Příčná hybnost

Transverse momentum: p_T



partons $p_T^{\text{initial}} \approx 0$

ZZ p_T : $p_T^{\text{initial}} = p_T^{\text{final}}$

ZZ p_L : $p_L^{\text{initial}} = p_L^{\text{final}} \neq 0$

Řádové odhady

Jaký je objem dat za jeden rok běhu LHC?



Řádové odhady

Jaký je objem dat za jeden rok běhu LHC?

... a výška stohu CD-ček?



CERN daisy



From the 1960s onwards,
data is stored on disks.
1960: disk storing 644 bytes
or 4 thousandths of a
second of music
1973: disk storing 240 Kilobytes
or 2 seconds of music
1976: disk storing 2.5 Megabytes
or 16 seconds of music

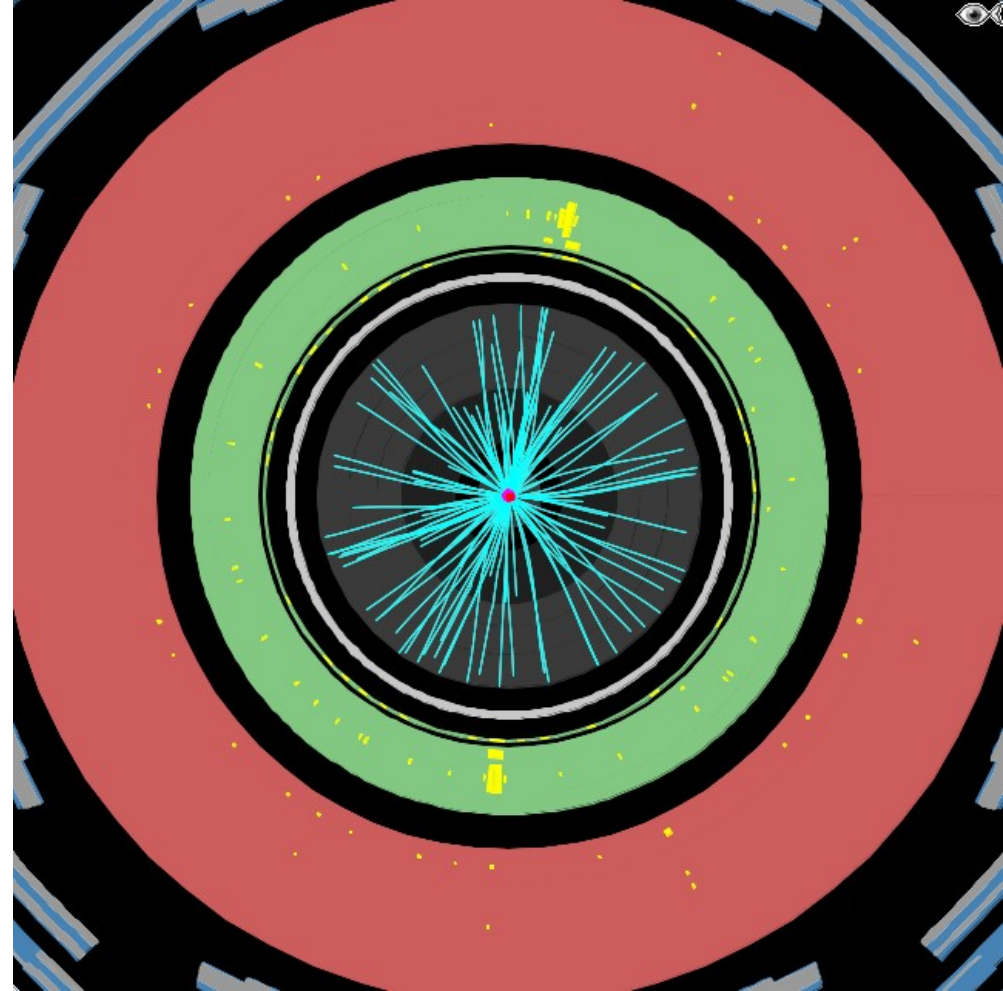
Daten auf Festplatten gespeichert:
einer Kapazität von 644 Byte
zwei Sekunden Musik
einer Kapazität von 240 Kilobyte
von 2.5 Megabyte

Zajímavé eventy

Pro nás zajímavé eventy:

hledáme otisk

Z a H



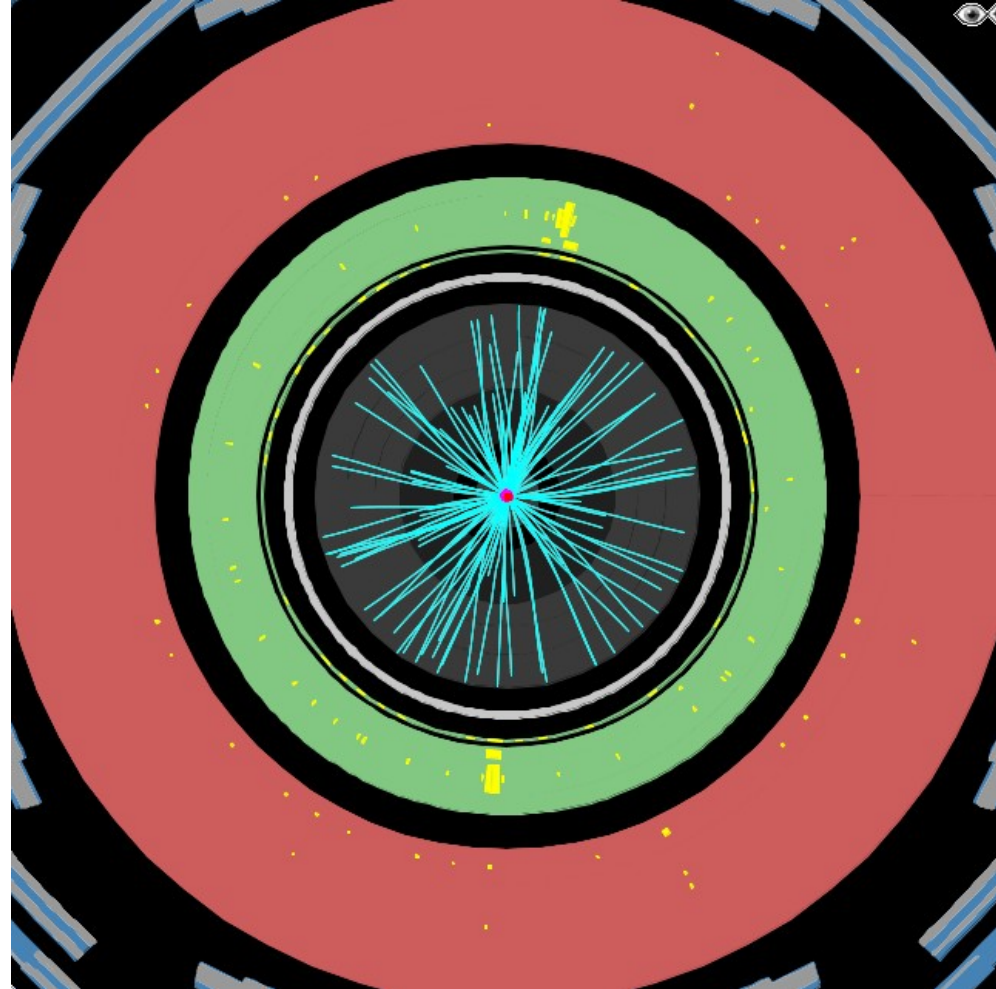
Kritéria na zajímavý event

$$q + \bar{q} \rightarrow Z \rightarrow l^+ + l^-$$

$$l = \{e, \mu\}$$

Kombinace stop:

e^+e^- , $e^+\mu^-$, e^+e^+ , $e^+\pi^-$, $\pi^+\mu^-$, $e^+e^-e^+$, ...



Kritéria na zajímavý event

$$q + \bar{q} \rightarrow Z \rightarrow l^+ + l^-$$

$$l = \{e, \mu\}$$

Kombinace stop:

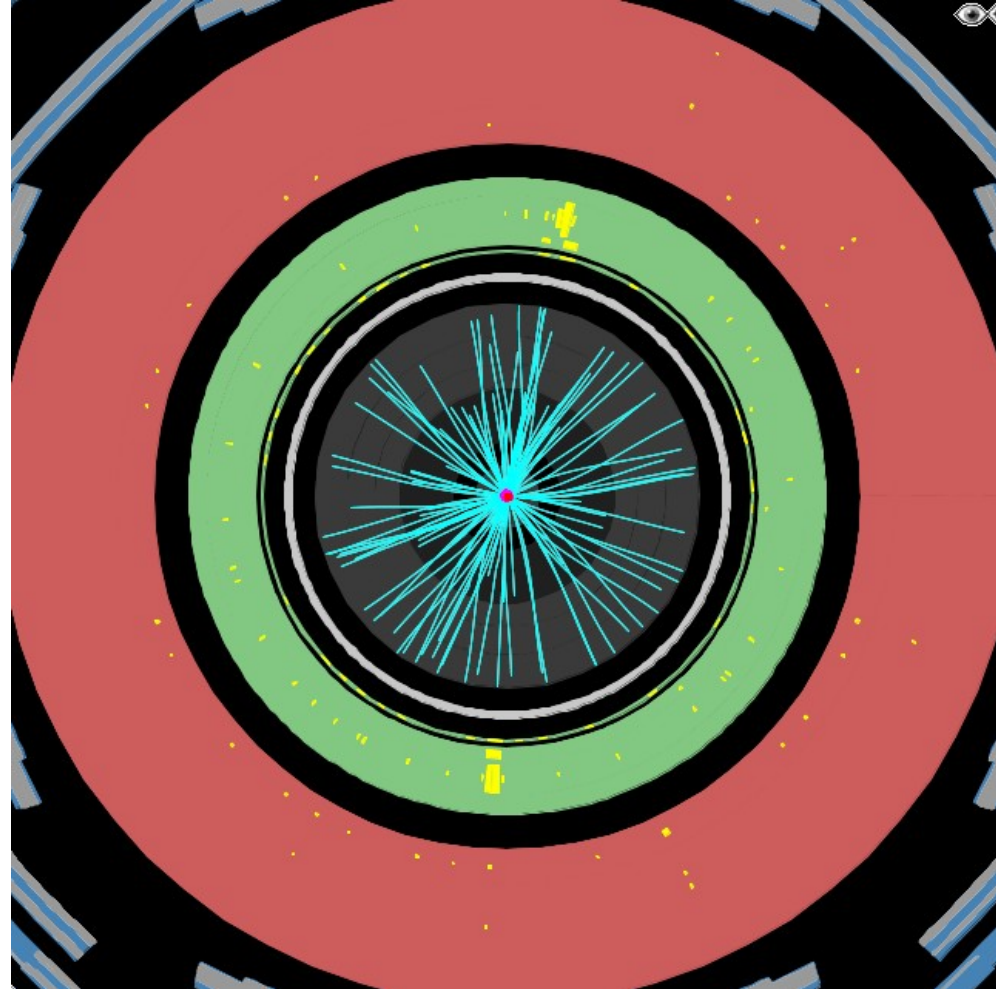
e^+e^- , $e^+\mu^-$, e^+e^+ , $e^+\pi^-$, $\pi^+\mu^-$, $e^+e^-e^+$, ...

1. kritérium:

zachování el. náboje

2. kritérium:

stejný typ částic (lepton flavour)

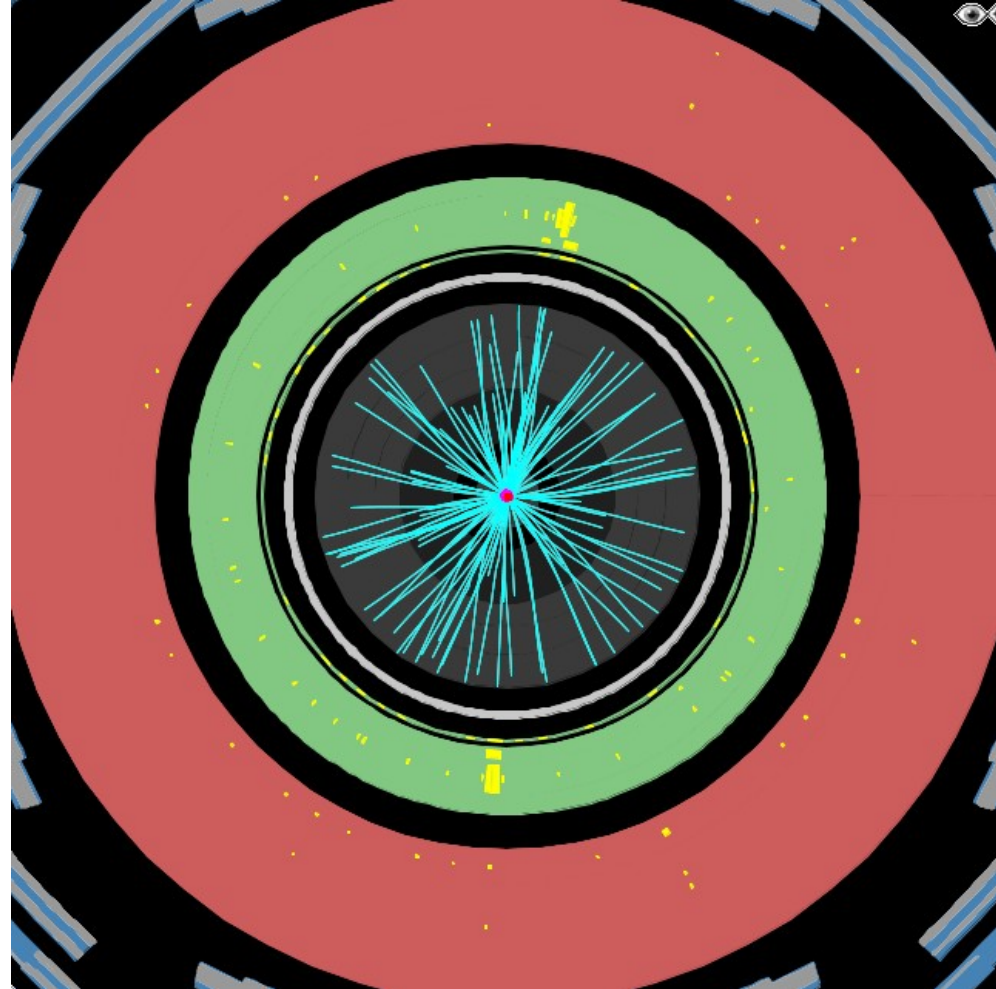


Kritéria na zaujímavý event

3. kritérium:

$$q + \bar{q} \rightarrow Z \rightarrow e^+ + e^-$$

$$M_Z \gg m_e \quad \dots \text{high } p_T$$



Kritéria na zajímavý event

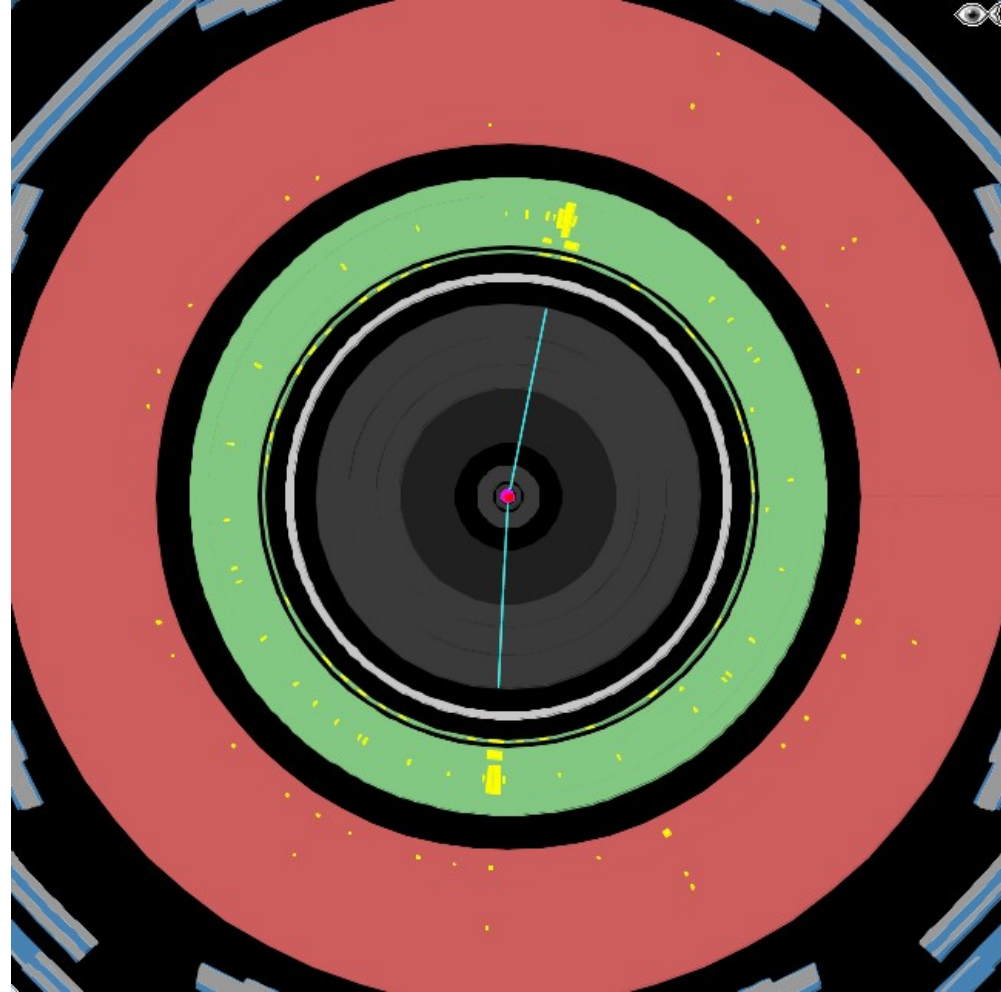
3. kritérium:

High p_T events

(p_T cut filter)

$$q + \bar{q} \rightarrow Z \rightarrow e^+ + e^-$$

$$M_Z \gg m_e$$



Kritéria na zajímavý event

3. kritérium:

High p_T events

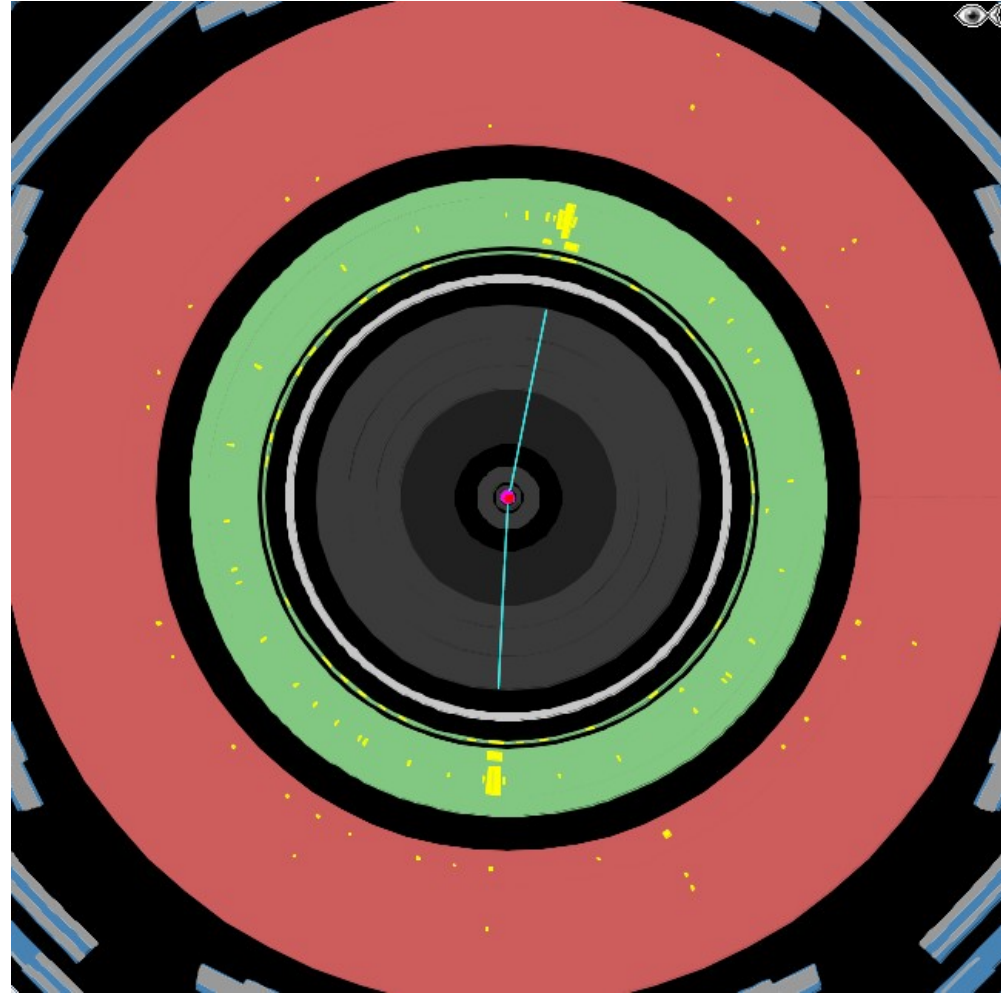
(p_T cut filter)

$$q + \bar{q} \rightarrow Z \rightarrow e^+ + e^-$$

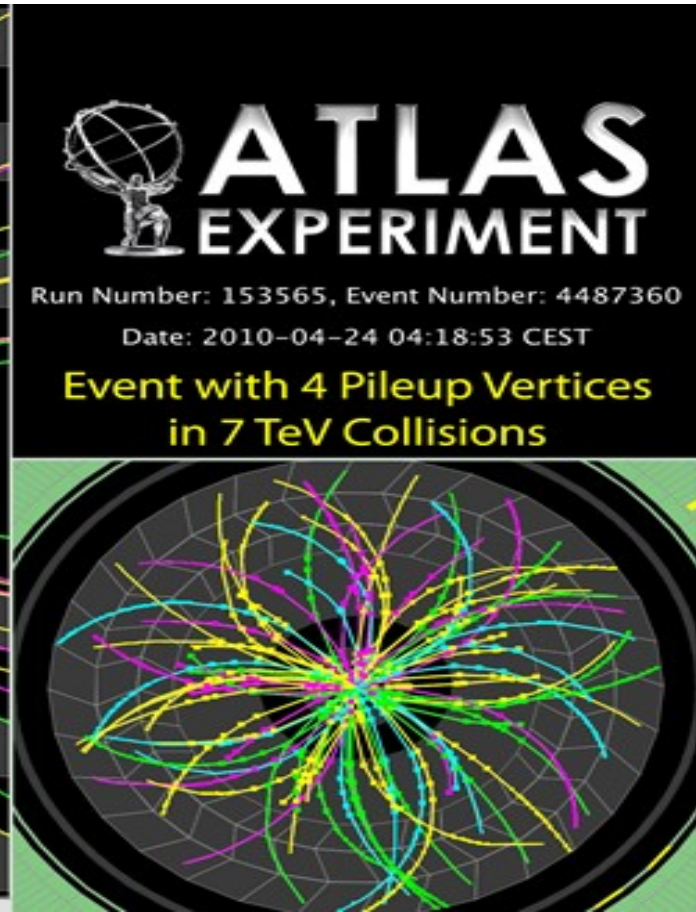
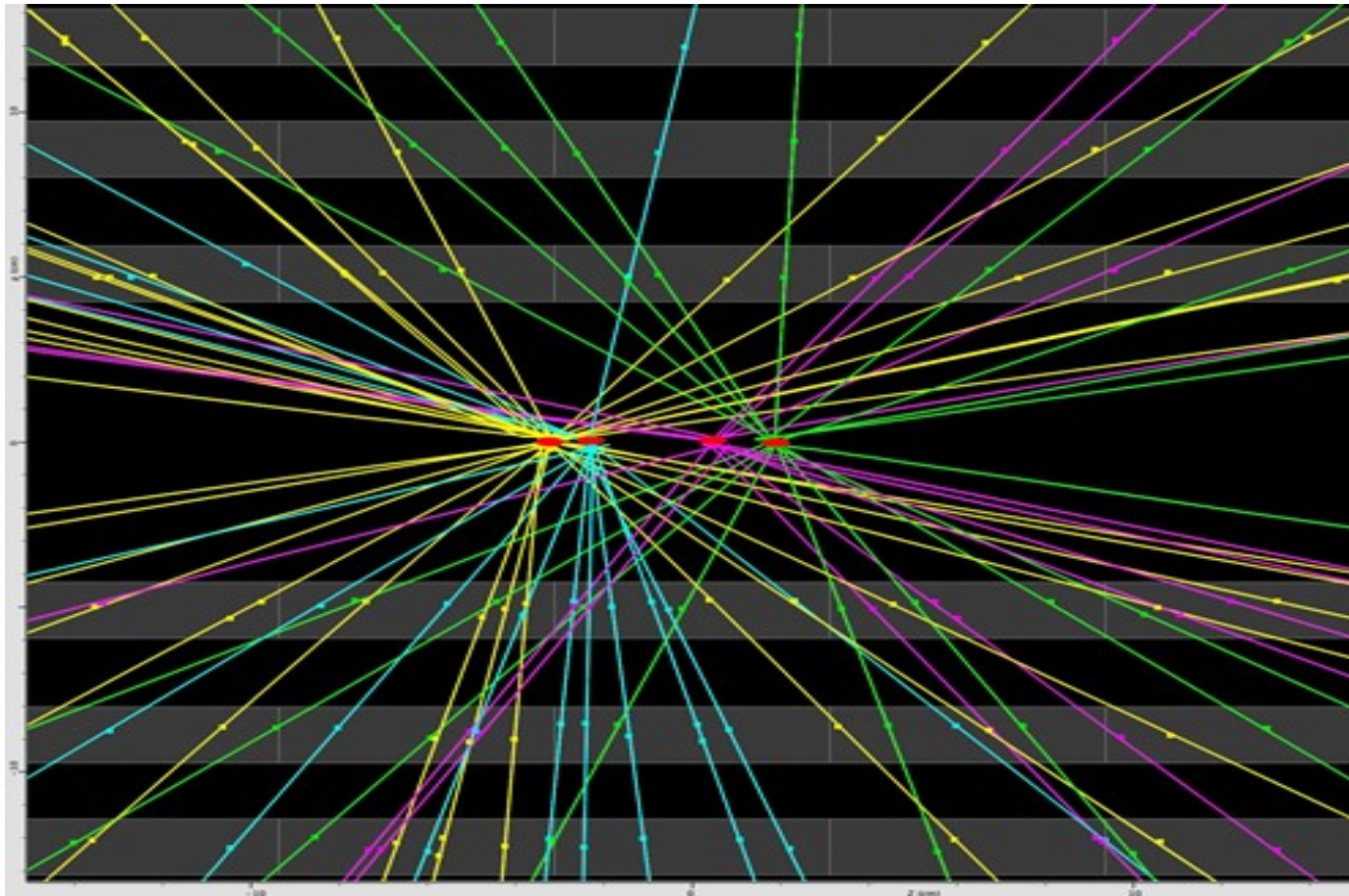
$$M_Z \gg m_e$$

4. kritérium:

energy deposit in ECAL

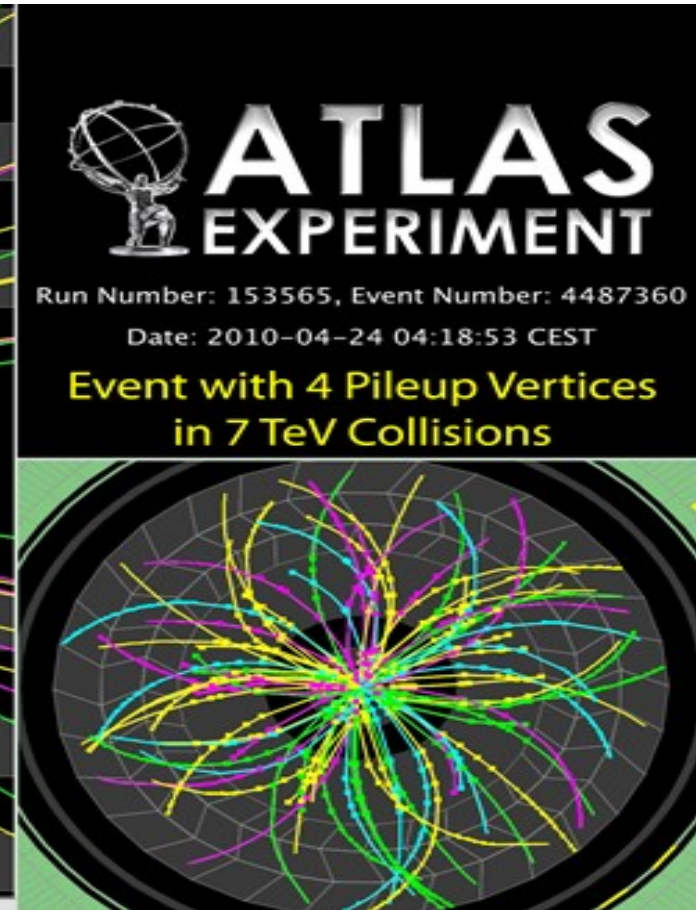
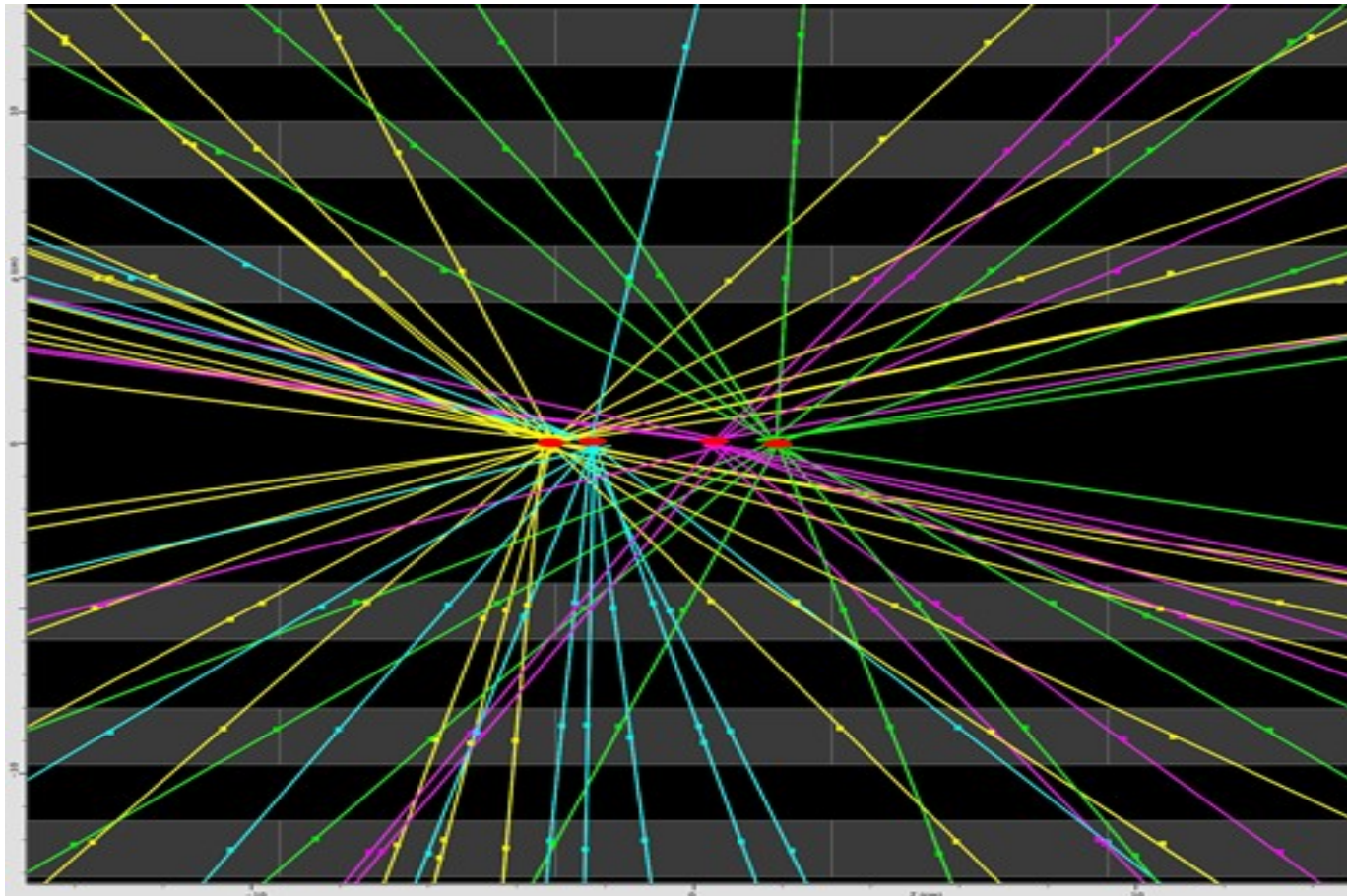


Pile-up



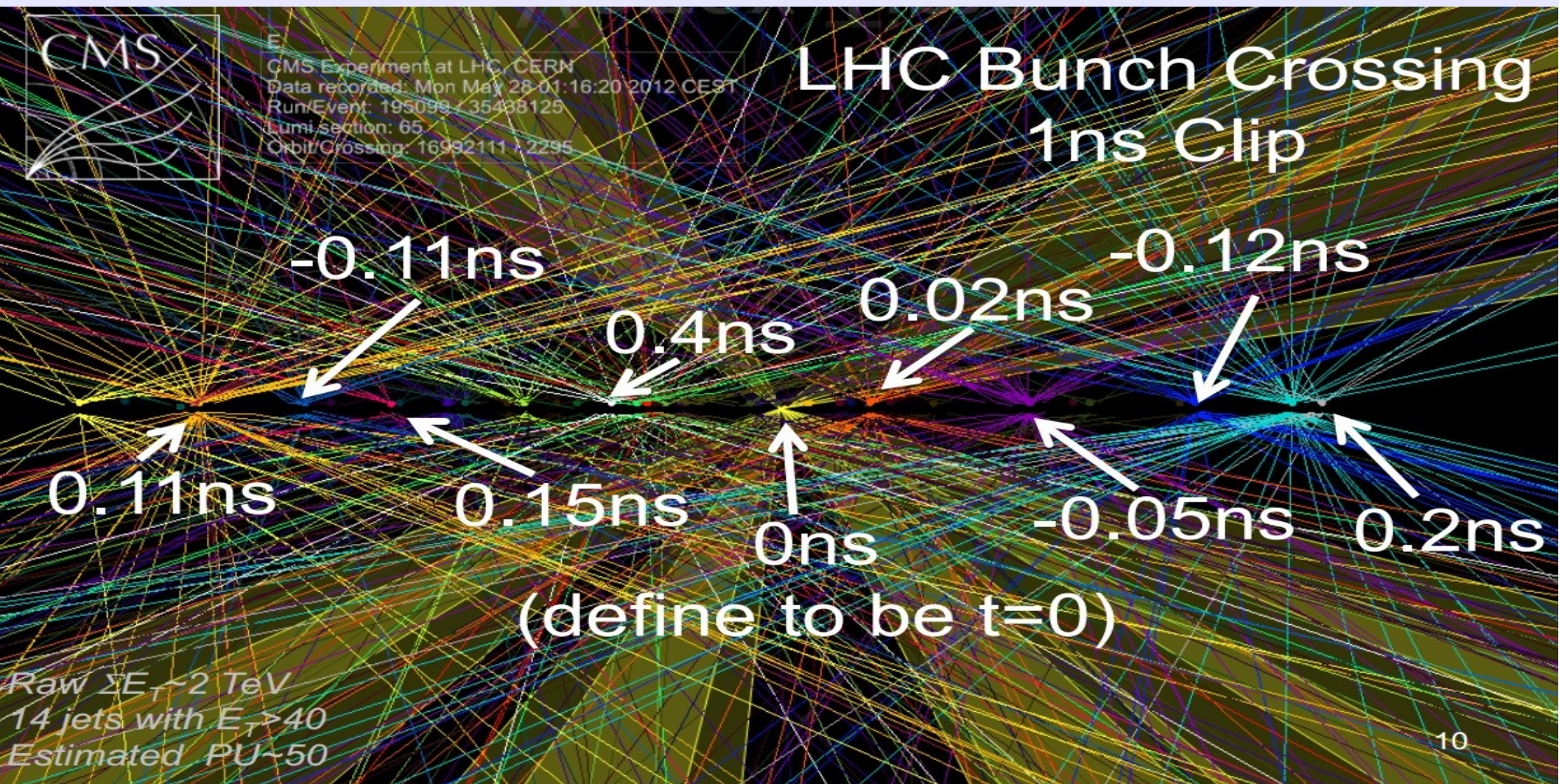
5. kritérium:

Pile-up



5. kritérium: stejné místo interakce

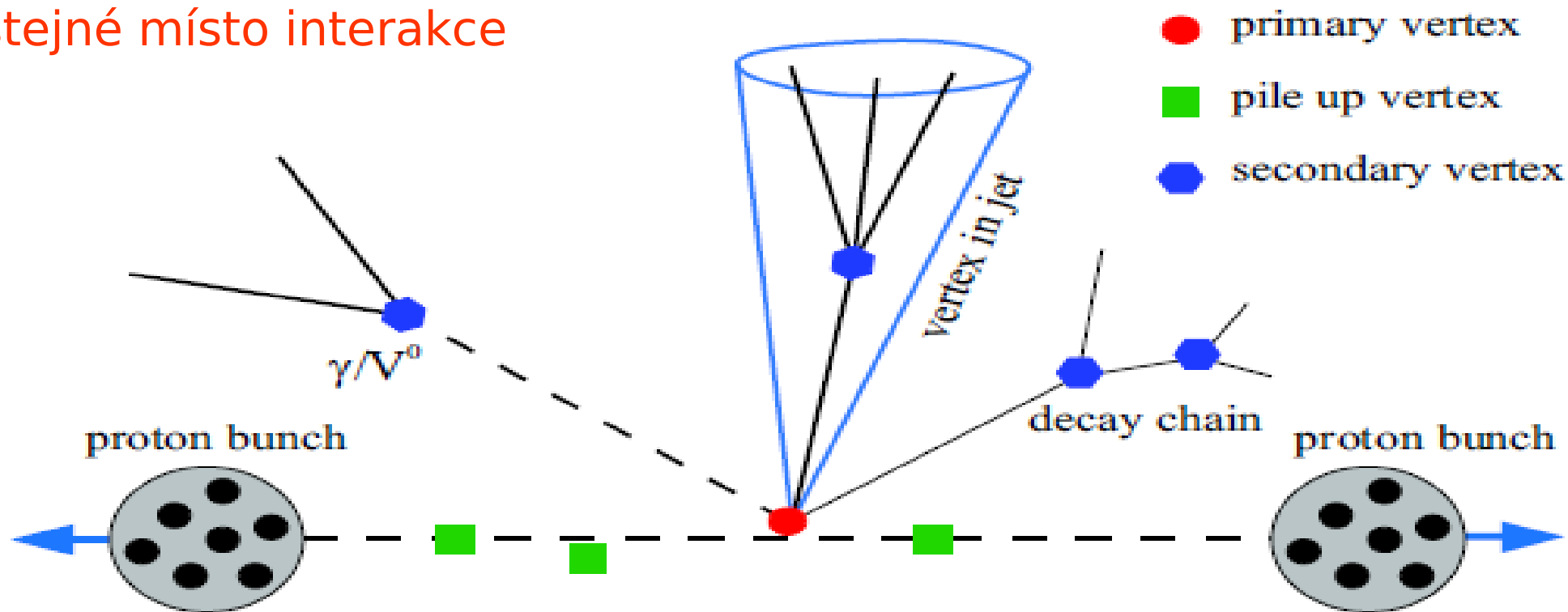
Pile-up



Primární Vertex

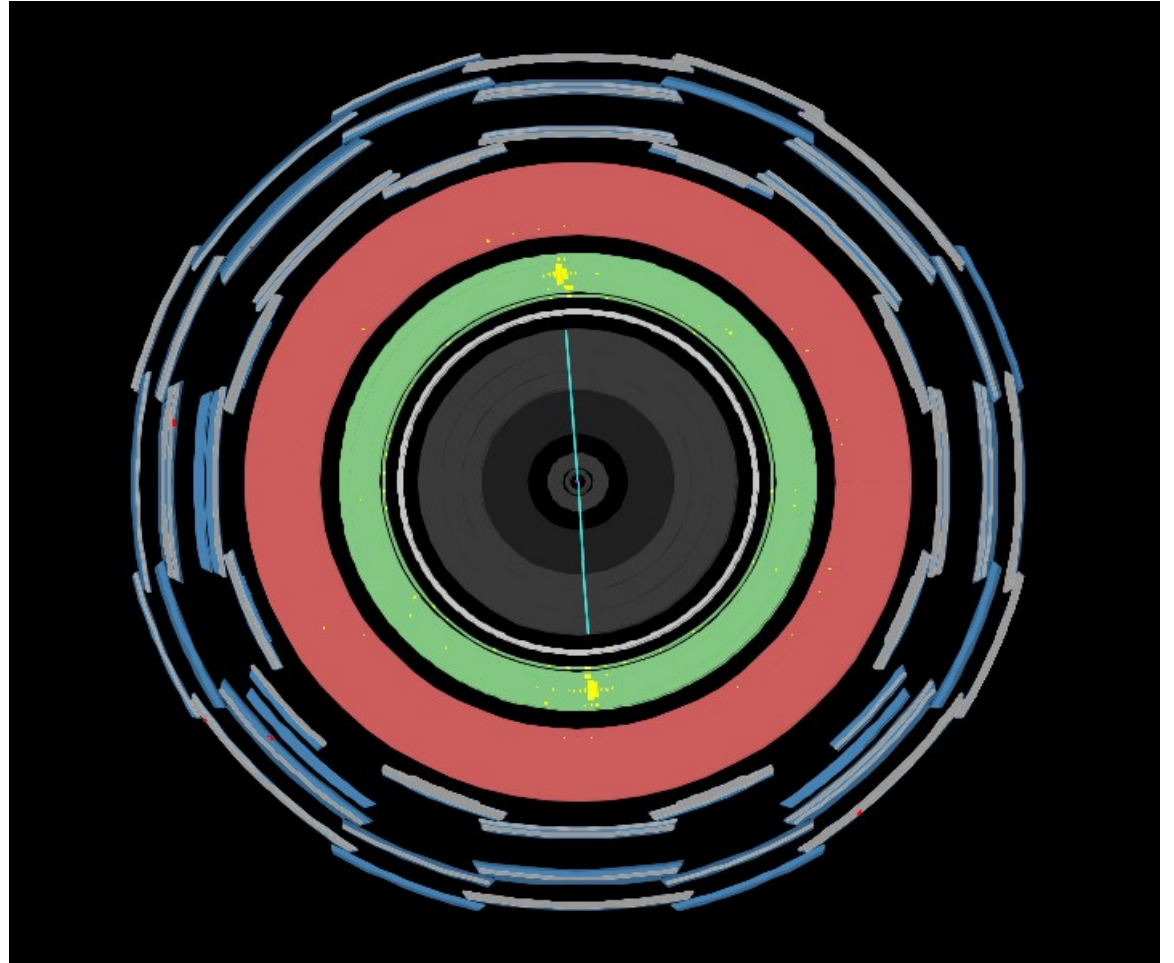
5. kritérium:

stejné místo interakce



Souhrn kritérií

- High p_T events
- Otisk e, μ, γ
- Energy deposit
- ZZQ
- Stejný vertex
- ...



Souhrn kritérií

- High p_T events
- Otisk e, μ, γ
- Energy deposit
- ZZQ
- Stejný vertex
- ...

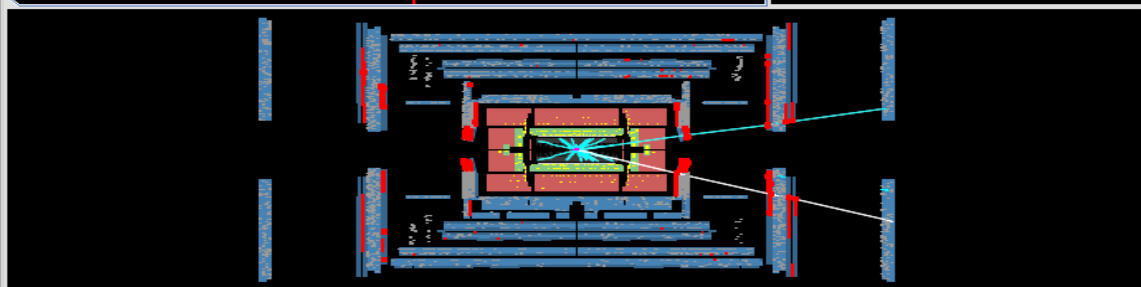
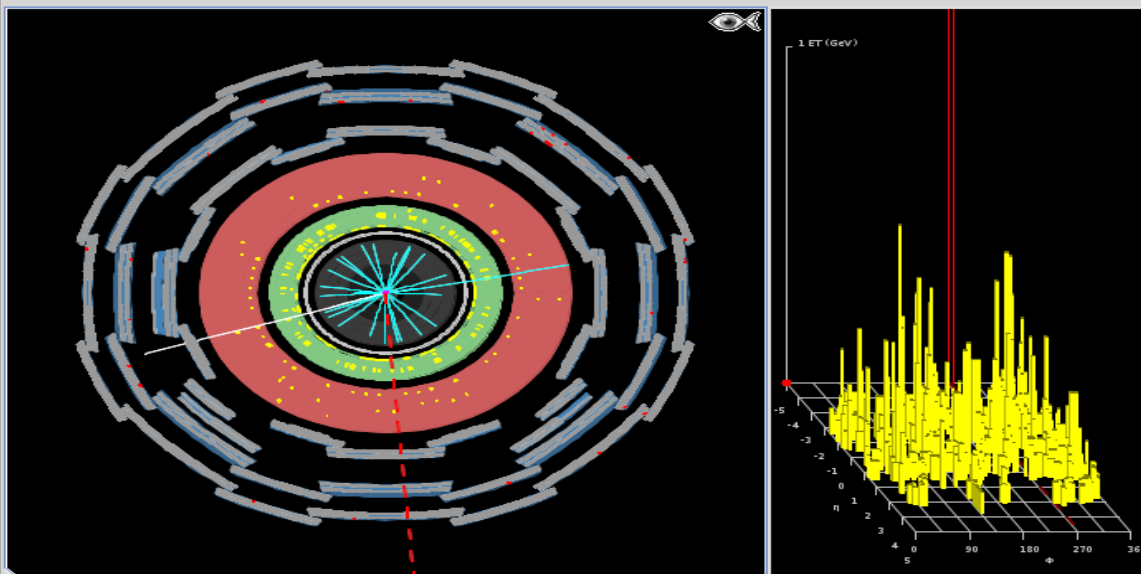


File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	ϕ	η	M(2) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [G...]	M(mmmm) [...]	e/m/g
event006.xml	16.150	Tracks 10	128.1	+	38.3	-2.803	1.877	84.330				m
		Tracks 361	250.1	-	43.1	0.190	2.444					m

HYPATIA

Invariant mass of 2 tracks

CanvasWindow - File: event006.xml Run: 206497 Event: 4465471



HYPATIA - Track Momenta Window

<

HYPATIA - Control Window

Interaction and Window Control

Output Display

Parameter Control

InDet

Calo

MuonDet

Objects

Geometry

Projection

Data

Cuts

InDet

Calo

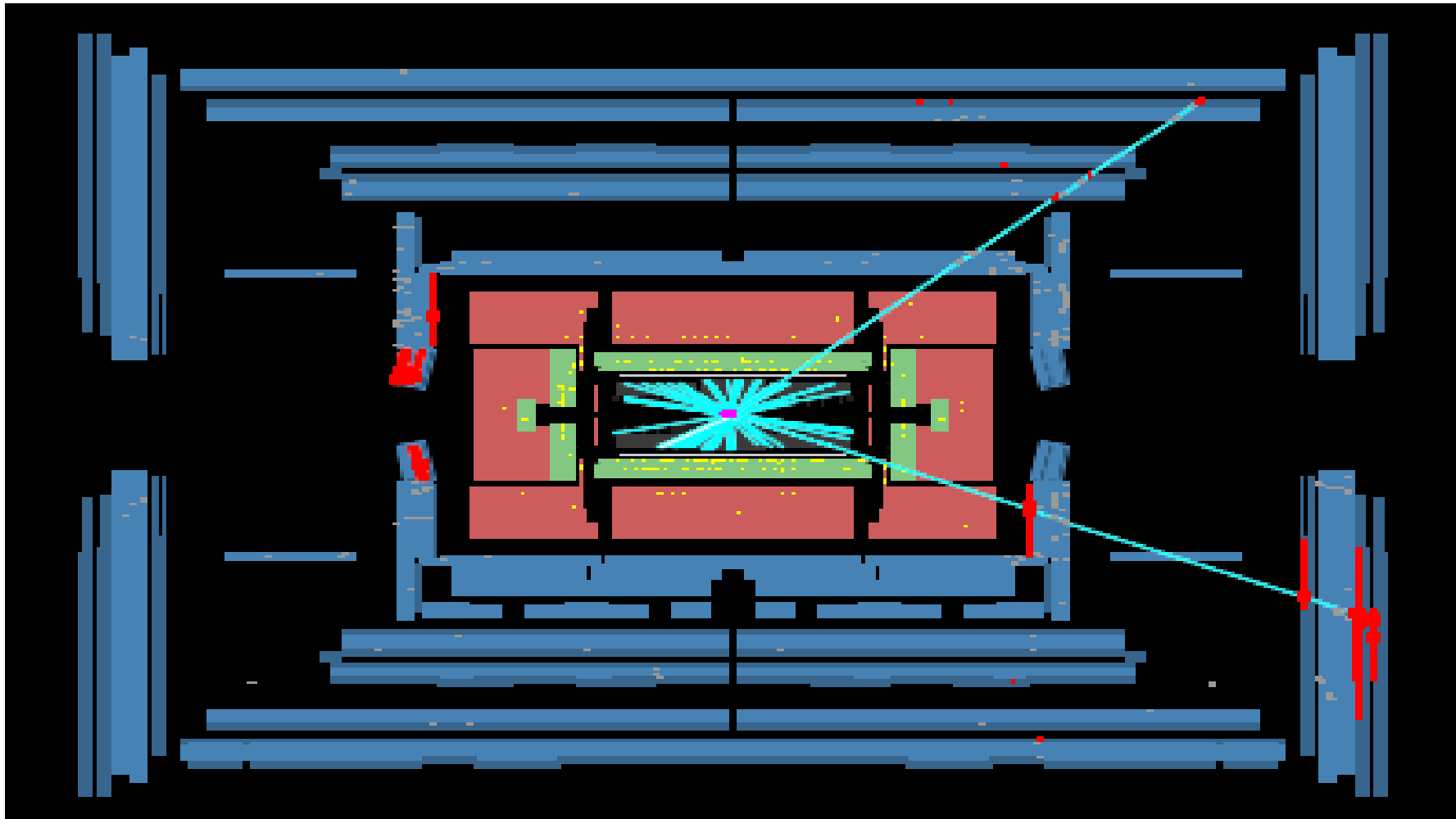
MuonDet

Objects

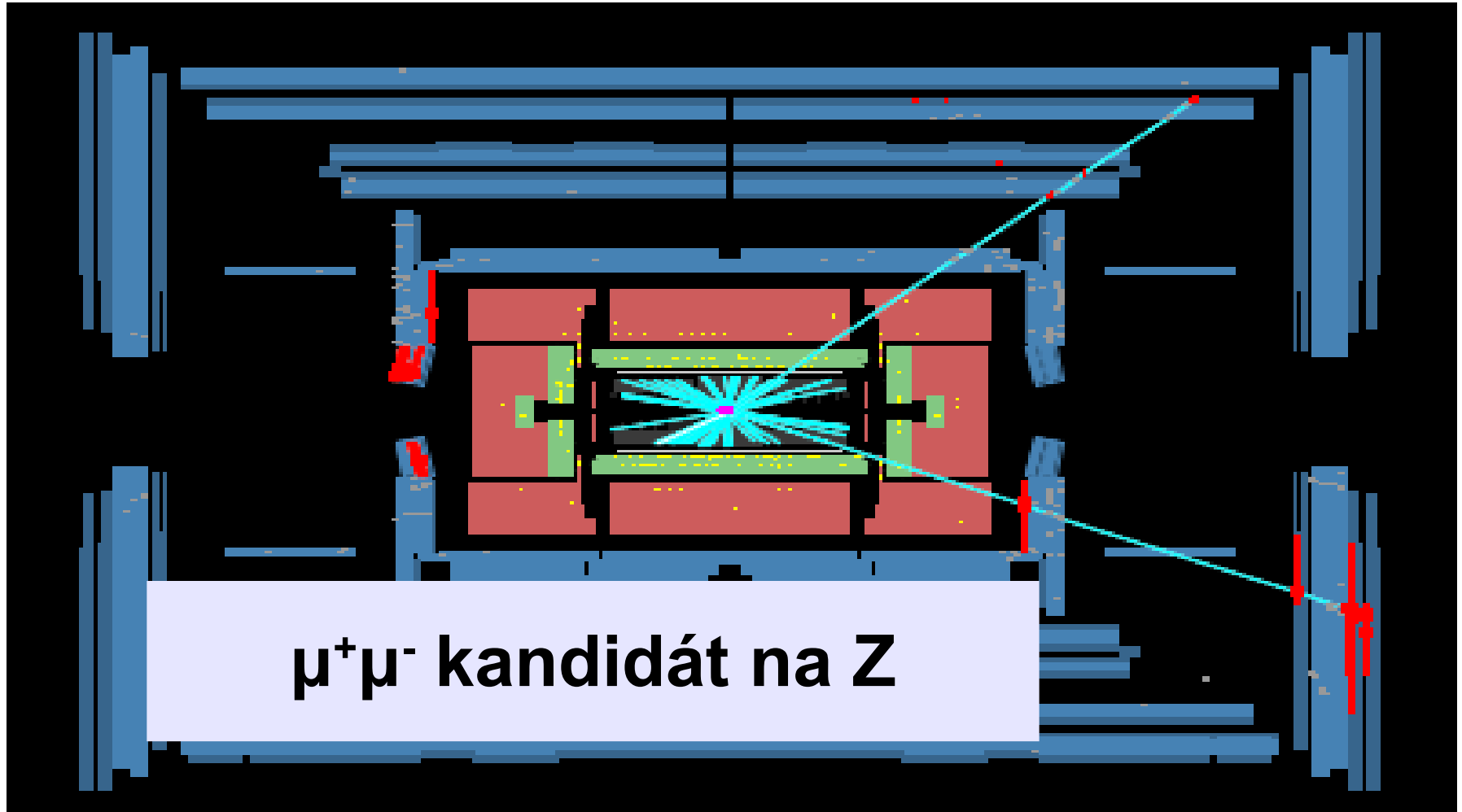
ATLAS

Name	Value
☒ Pt	> 5.0 GeV
☐ Pt2	< 700.0 MeV
☒ d0	< 2.5 mm
☒ z0	< 20.0 cm
☐ d0 Loose	< 2.0 cm

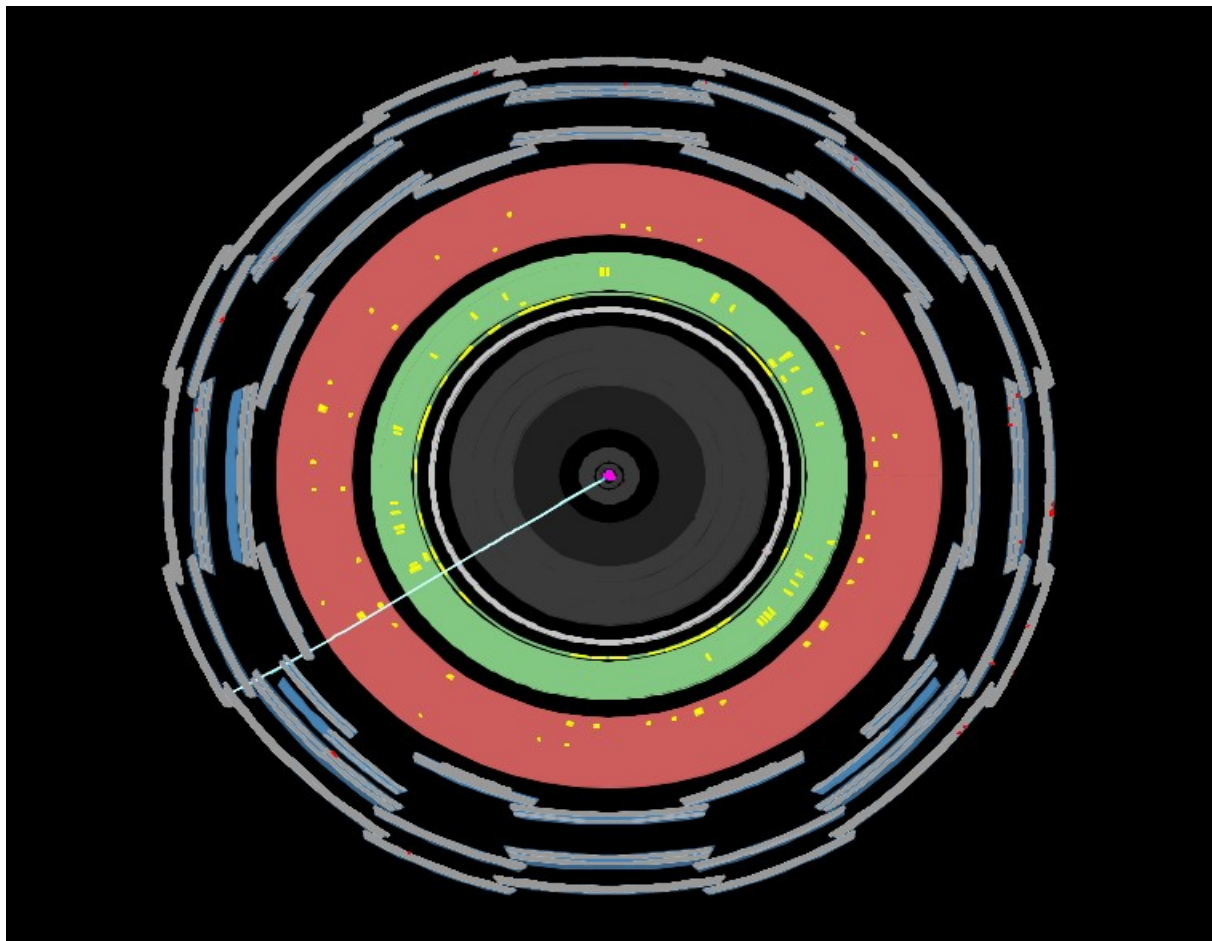
? kandidat



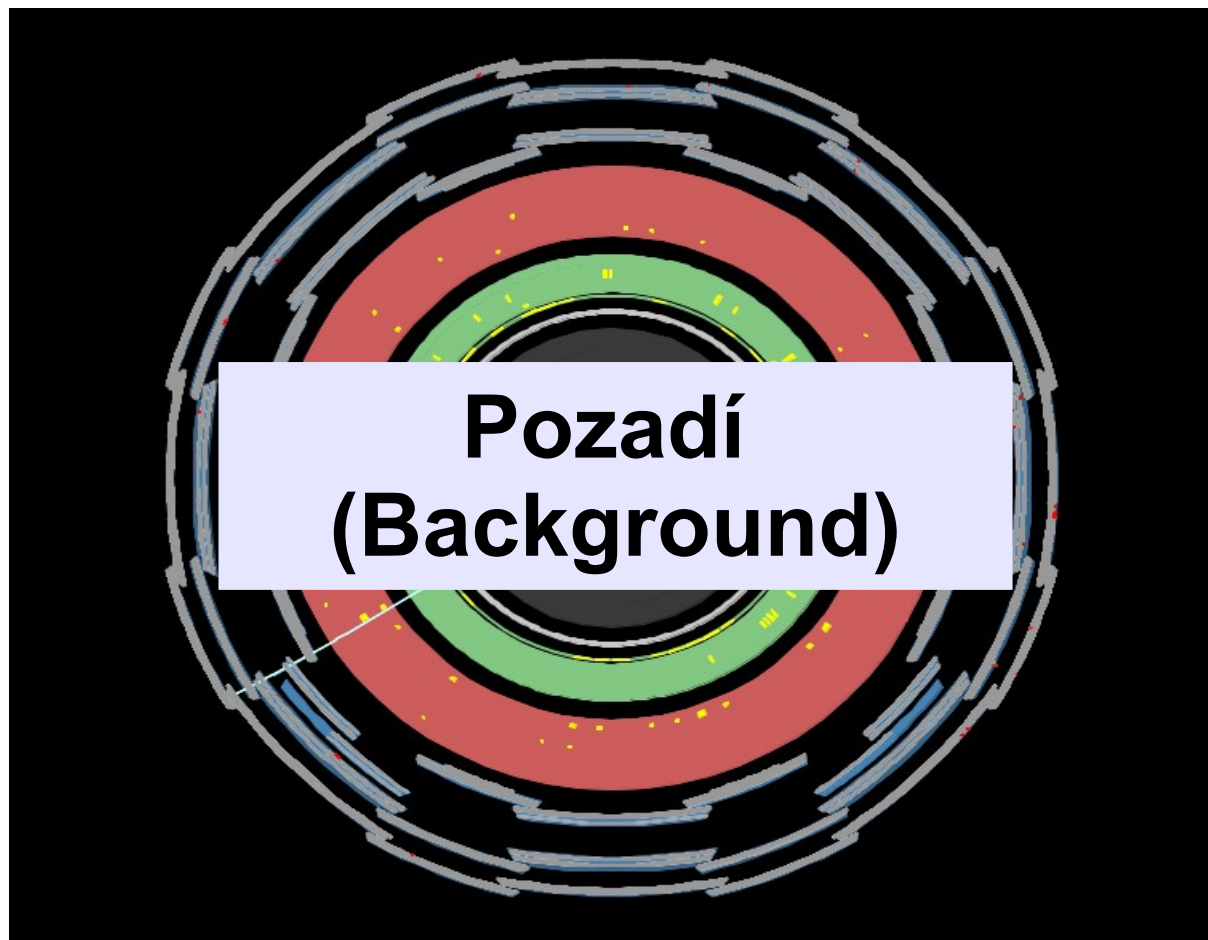
? kandidat



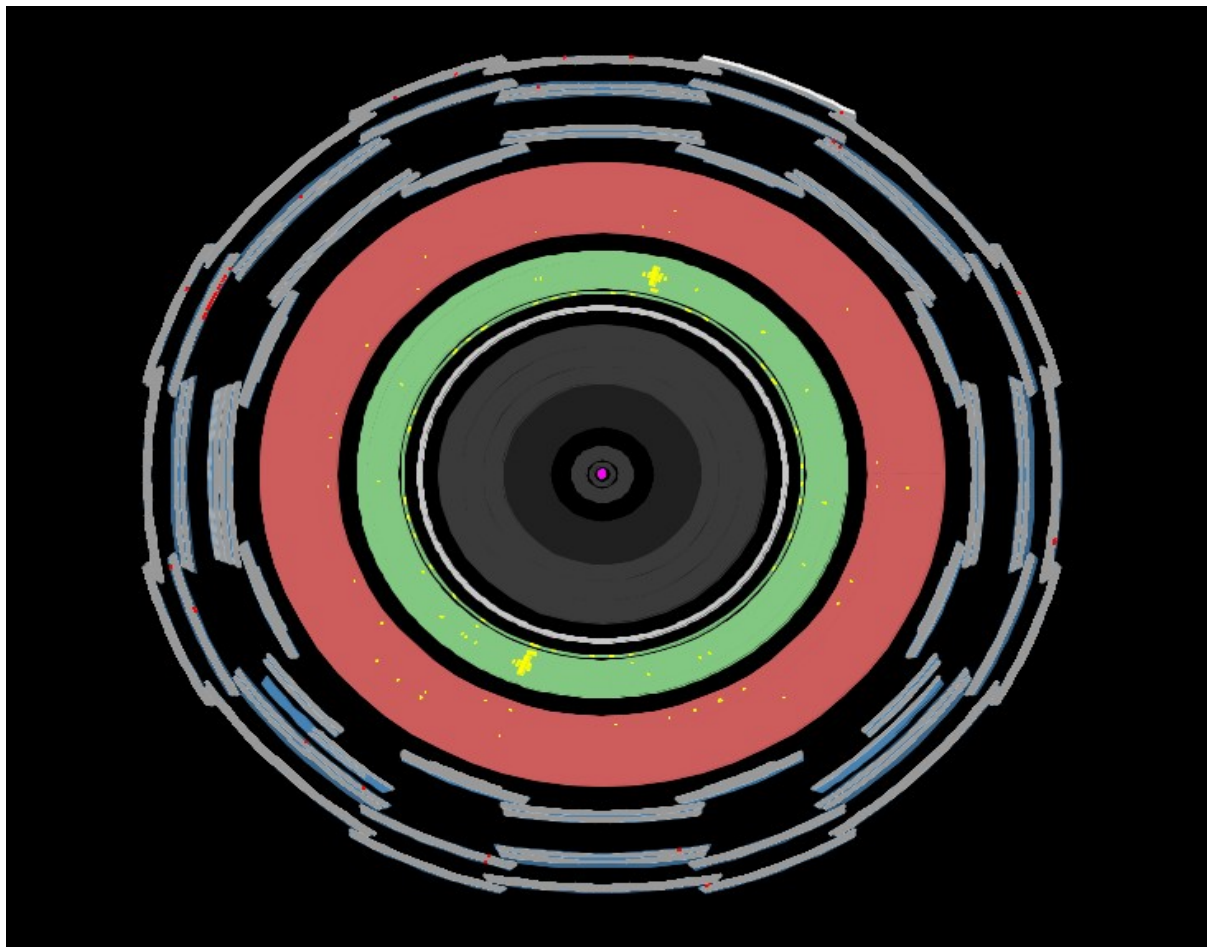
? kandidat



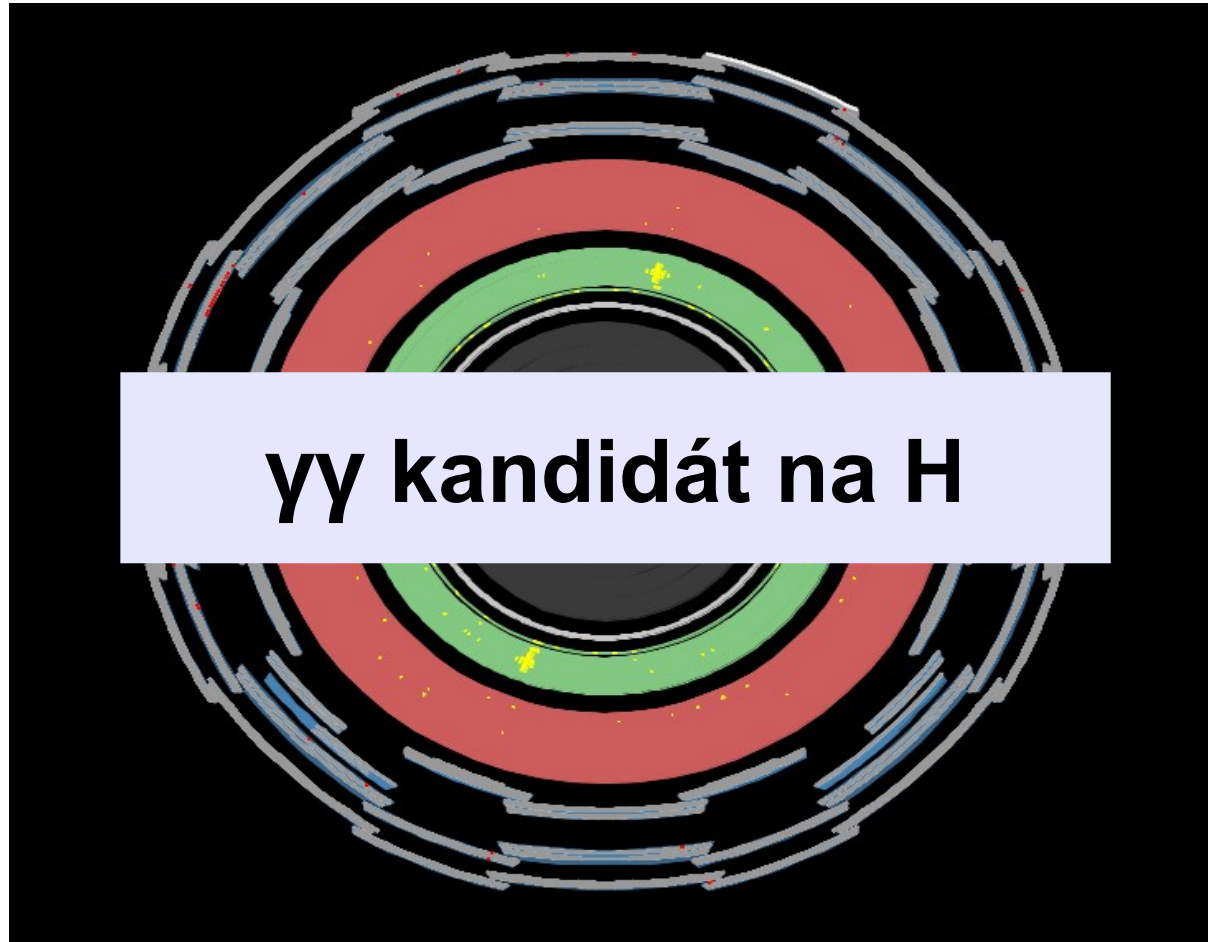
? kandidát



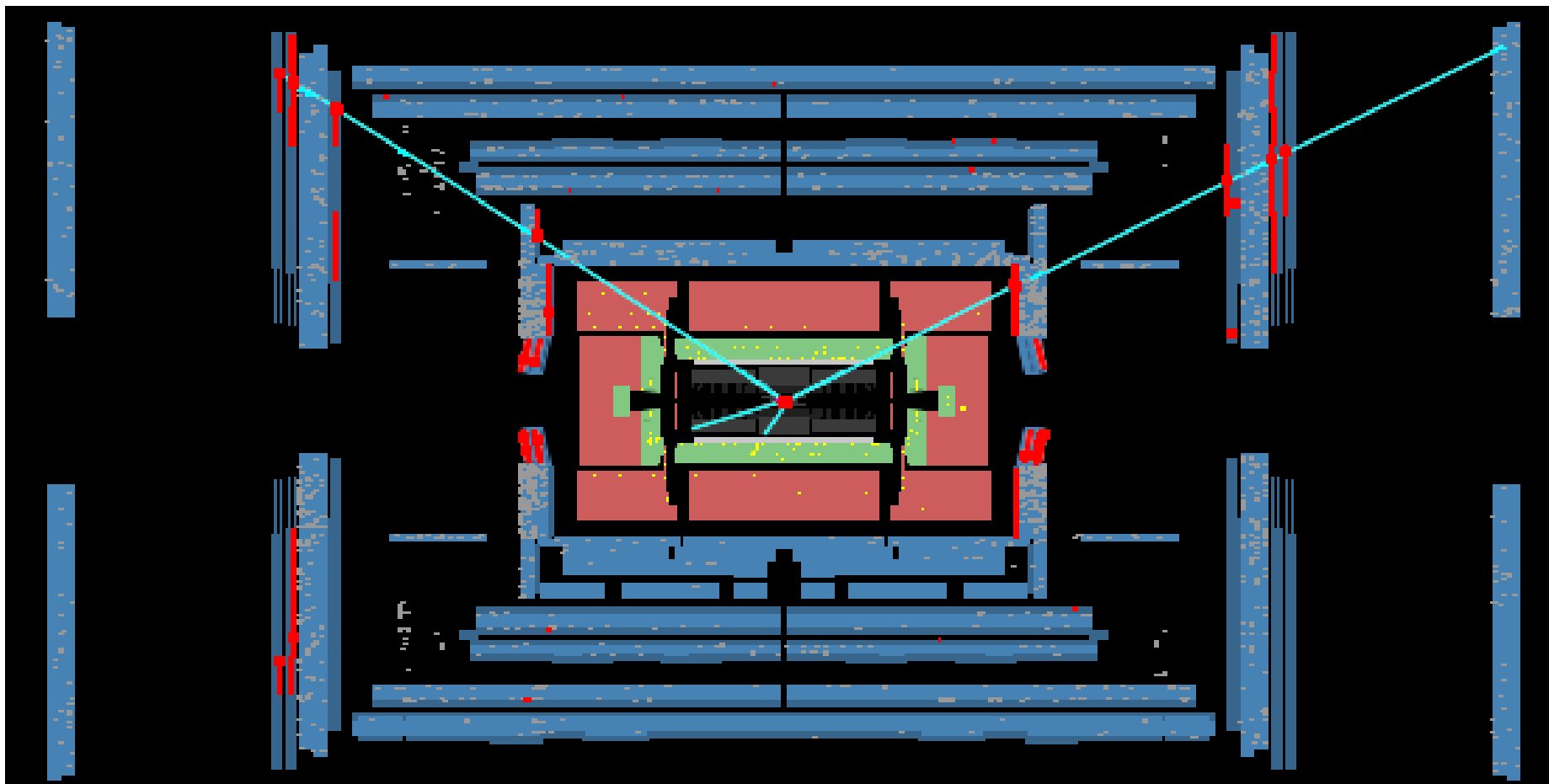
? kandidat



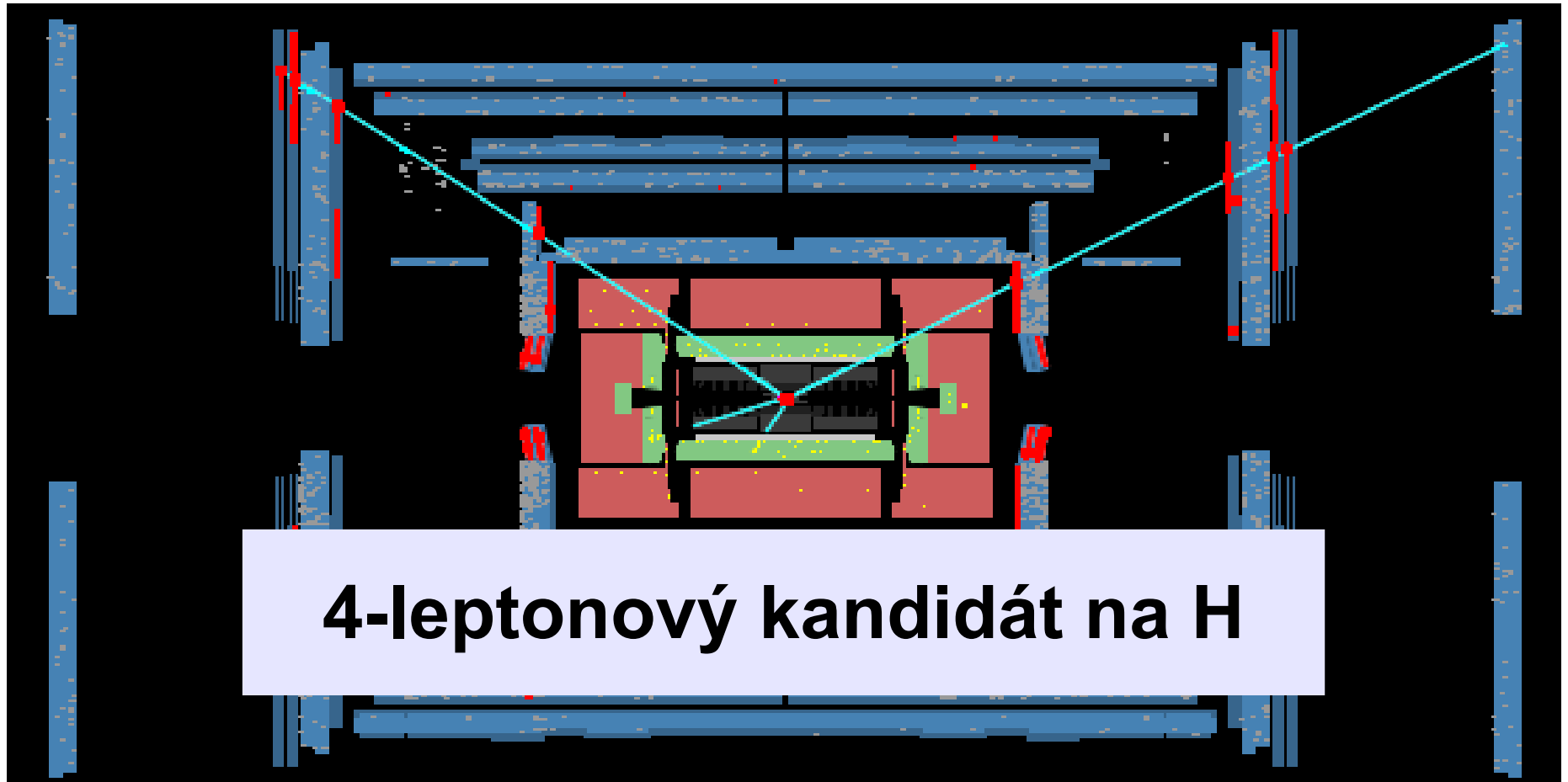
? kandidát



? kandidat

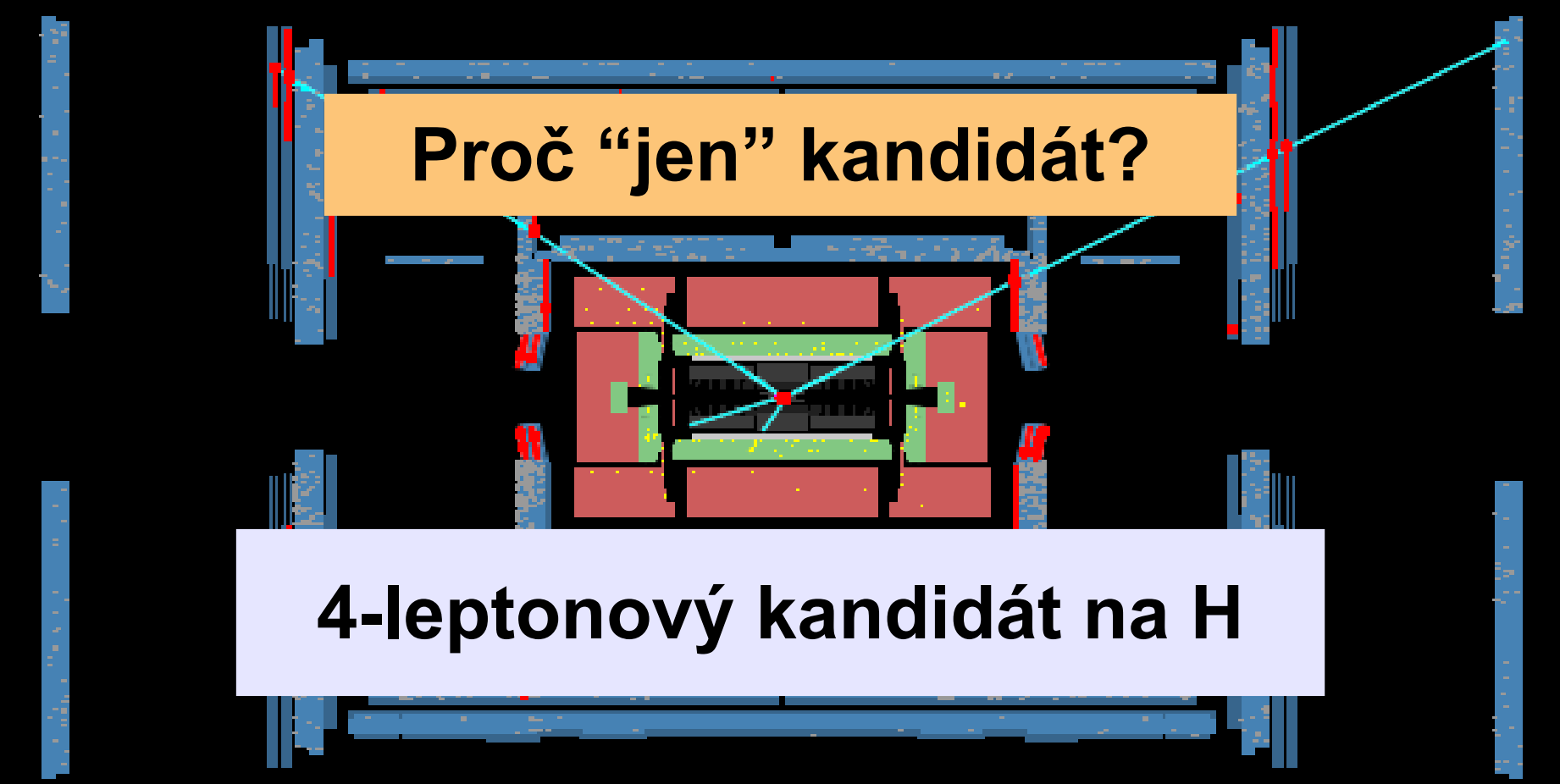


? kandidát



4-leptonový kandidát na H

? kandidát

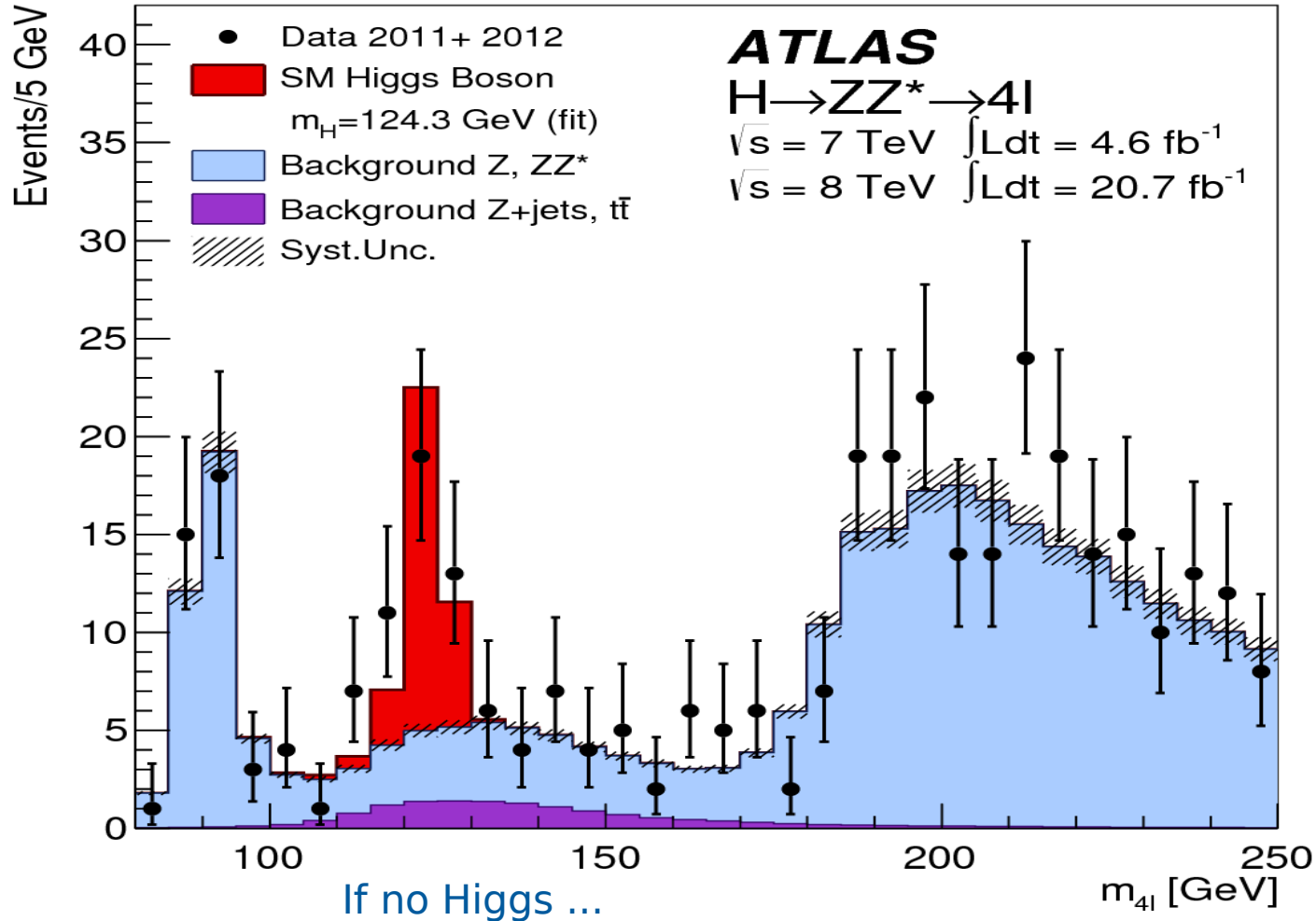


The diagram shows a cross-section of a particle detector. At the center is a black rectangular region representing the interaction point. Surrounding this are several concentric layers: an innermost green layer, followed by red layers, and then blue layers. Yellow dots are scattered throughout the detector, representing particle tracks or hits. Four red lines originate from the central interaction point and extend outwards towards the edges of the detector, likely representing the paths of particles or the lines of sight for a specific event. The entire diagram is set against a black background.

Proč “jen” kandidát?

4-leptonový kandidát na H

Proč “jen” kandidát?



Konkrétní event s Higgsem v detektoru ATLAS

Konkrétní event s Higgsem v detektoru ATLAS



Cíl cvičení

Zkoumání
eventů

Kandidát Z, H
Background

Kandidát
jakého typu

Spočtení
 m_{inv}

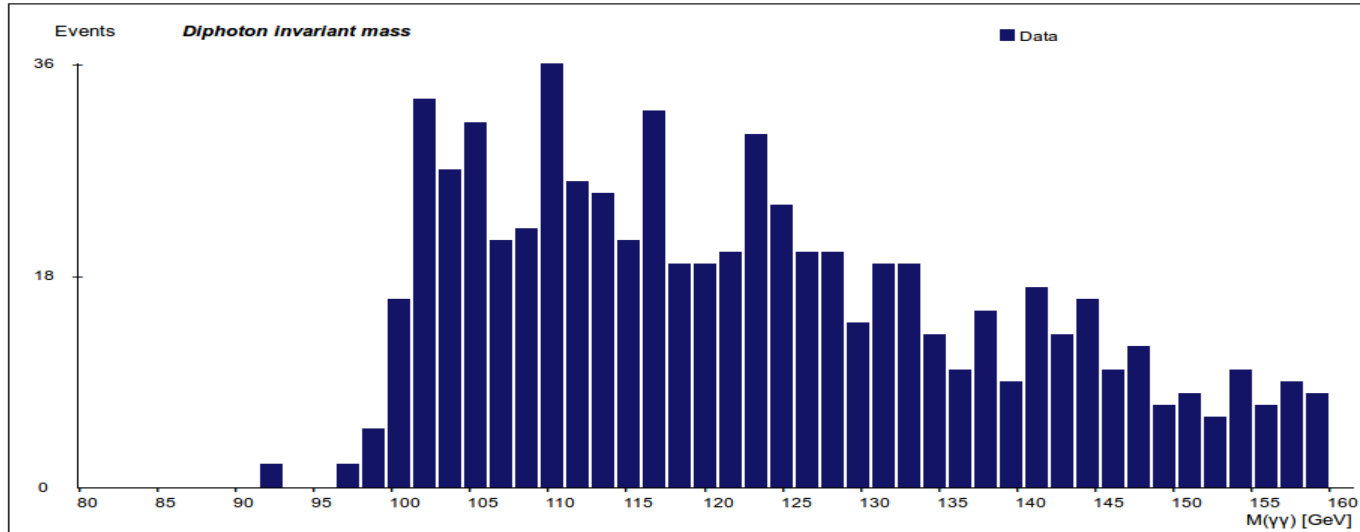
Cíl cvičení

Zkoumání
eventů

Kandidát Z, H
Background

Kandidát
jakého typu

Spočtení
 m_{inv}

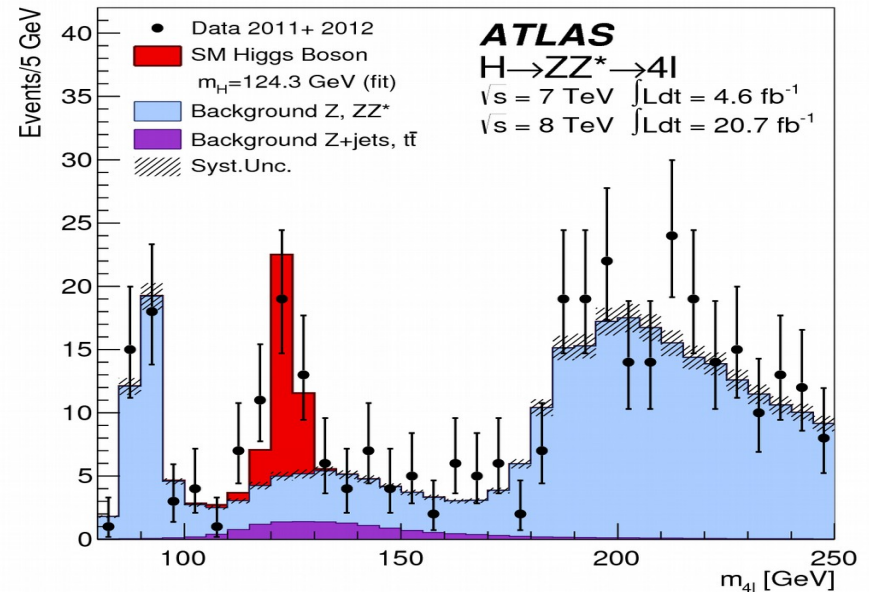
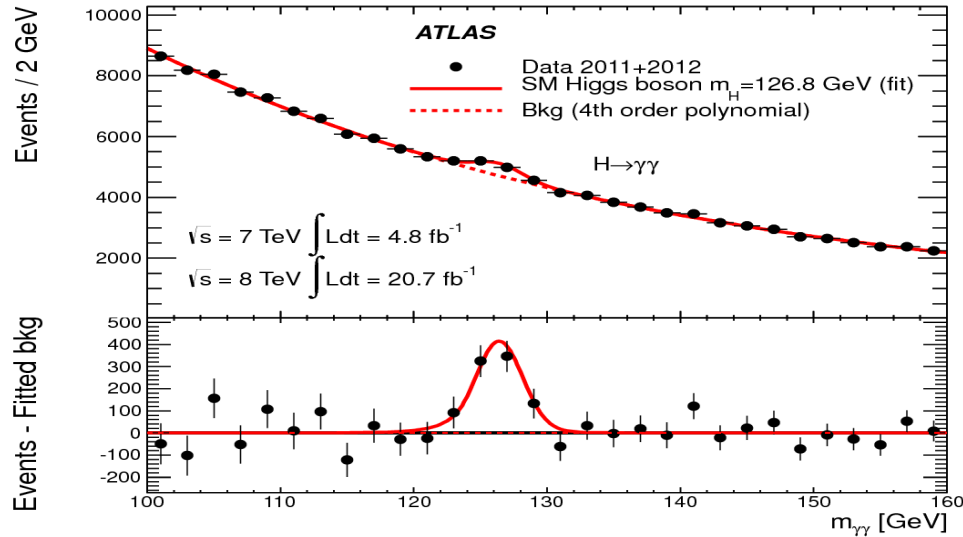


“Objevení”
Z / H / ?

K zamyšlení

Hledání signálu existence částice = jejího peaku.

Proč běží LHC tak dlouho?



Ověření teorie

Pravděpodobnost
naměření daného výsledku

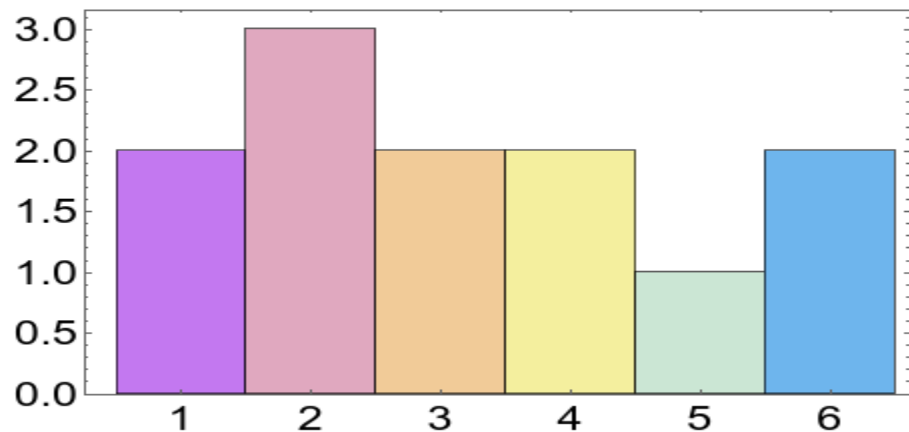


Ověření teorie

Pravděpodobnost
naměření daného výsledku



$N = 12$

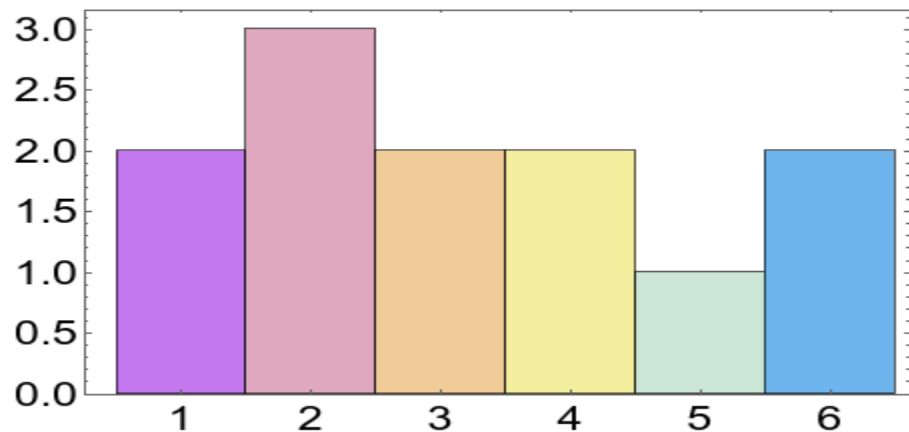


Ověření teorie

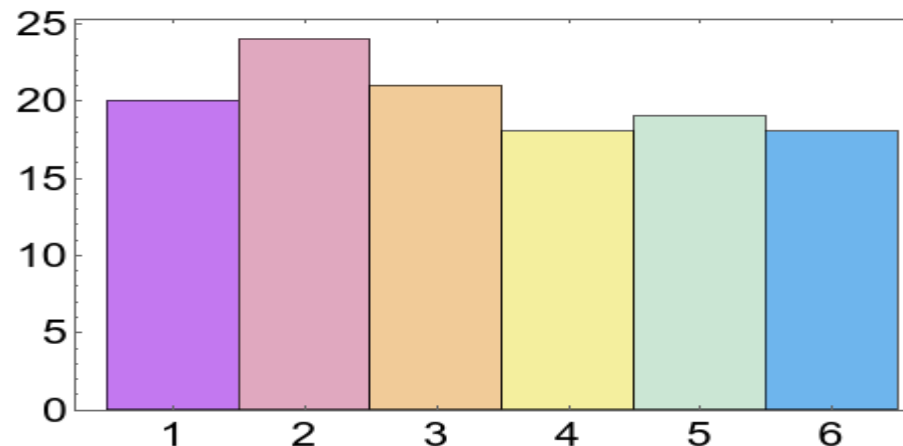
Pravděpodobnost
naměření daného výsledku



N = 12



N = 120



Ověření teorie

$$P(H \rightarrow \gamma\gamma) \sim 0.2\%$$



Ověření teorie

$$P(H \rightarrow \gamma\gamma) \sim 0.2\%$$

$$15H/\text{min} \rightarrow H/4s$$

$$\text{Počet srážek} \sim 6 \times 10^8/s$$

$$P(pp \rightarrow H) \sim 0\%$$



Ověření teorie

$$P(H \rightarrow \gamma\gamma) \sim 0.2\%$$



$$15H/\text{min} \rightarrow H/4s$$

$$\text{Počet srážek} \sim 6 \times 10^8/s$$

$$P(pp \rightarrow H) \sim 0\%$$



Výhra ve sportce

$$P(1.\text{pořadí}) \sim 1/14M$$

Děkuji za pozornost

