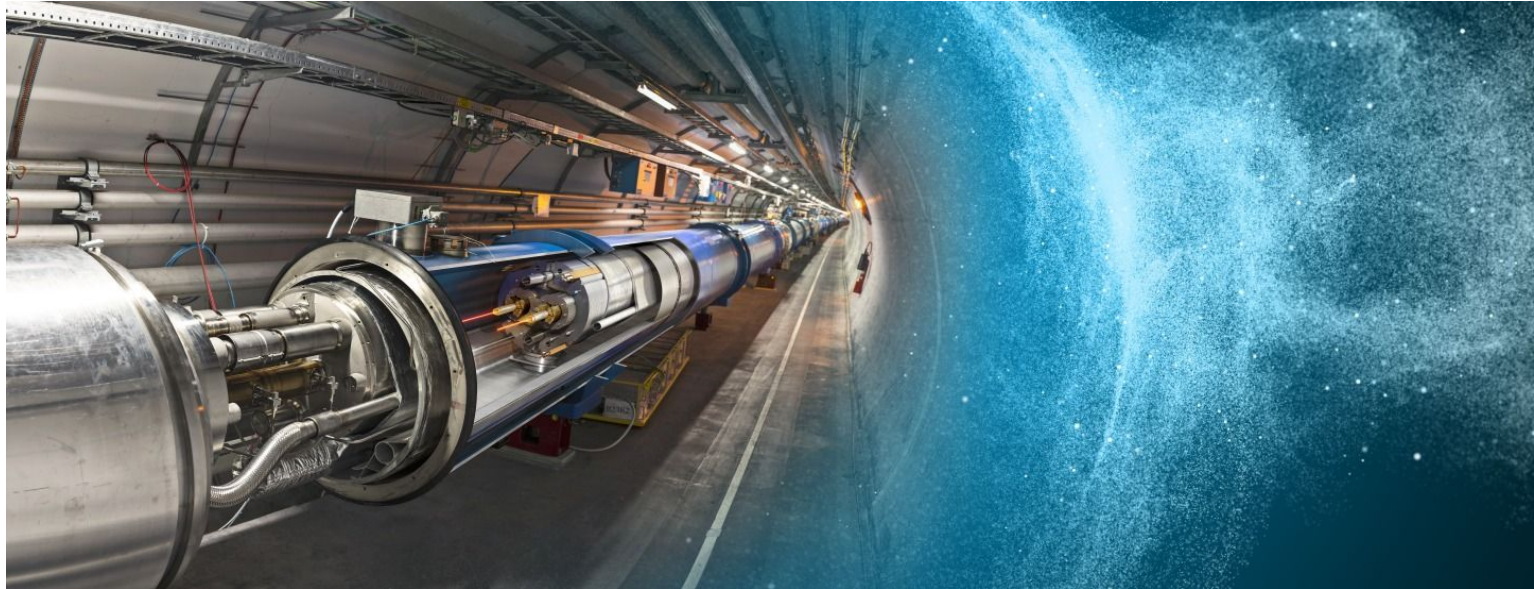


CERN Masterclasses

Částicová fyzika a experiment ATLAS

Karel Černý

PřF UP, Olomouc, 13.3.2026



Atomismus



Demokritos z Abdér
460 - 370 př. n. l.

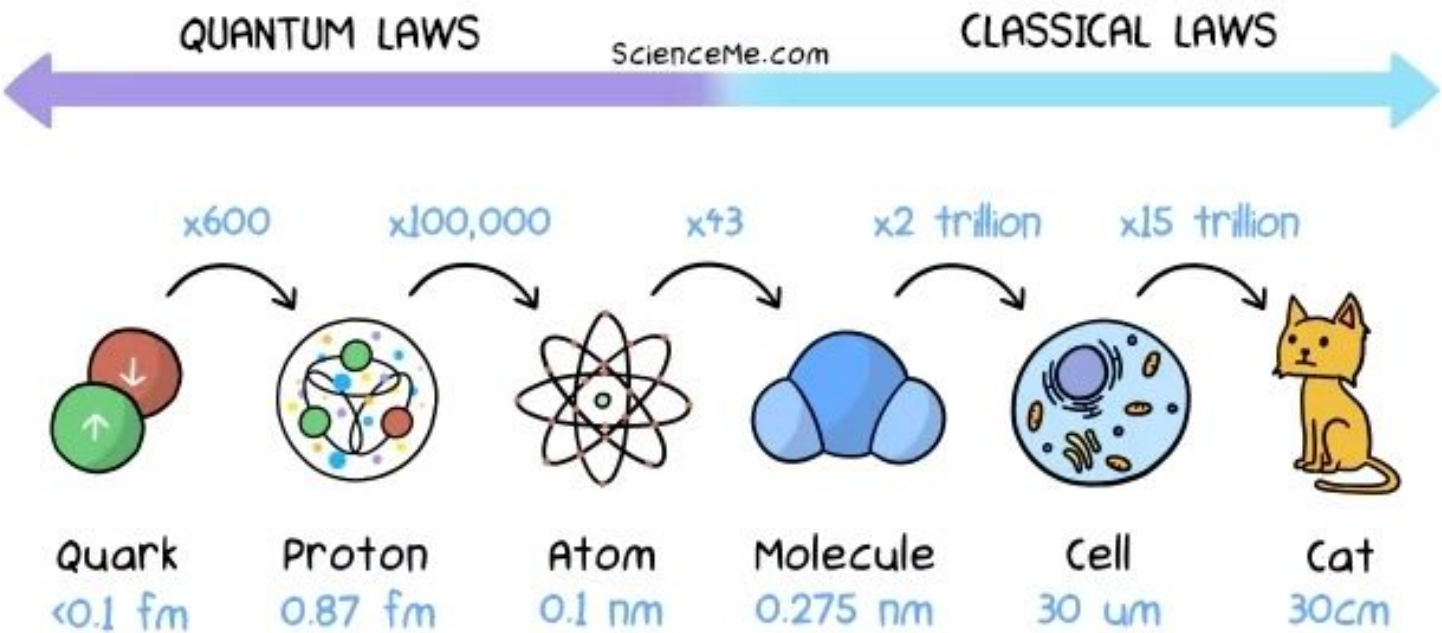
Atomismus je pravděpodobně nejdůležitější lidská myšlenka.

Carlo Rovelli "cituje" Démokrita v knize - Reality is not what it seems"

Celý vesmír se skládá z bezmezného prostoru, v němž se pohybuje nespočet atomů. Prostor je bez hranic; nemá ani nahoře, ani dole; nemá střed ani okraj. Atomy nemají žádné vlastnosti kromě svého tvaru. Nemají hmotnost, barvu ani chuť. „Sladkost je pouhý názor, hořkost je názor; teplo, chlad a barva jsou názory: ve skutečnosti existují jen atomy a prázdno,“ řekl Demokritos. Atomy jsou nedělitelné; jsou základními zrny skutečnosti, která již nelze dále rozdělit, a všechno je z nich složeno. Volně se pohybují v prostoru, narážejí do sebe, zachycují se o sebe a navzájem se tlačí a přitahují. Podobné atomy se přitahují a spojují.



Měřítka



P	... 10^{15}
T	... 10^{12}
G	... 10^9
M	... 10^6
k	... 10^3
	... 10^0
m	... 10^{-3}
μ	... 10^{-6}
n	... 10^{-9}
p	... 10^{-12}
f	... 10^{-15}
a	... 10^{-18}

Částicová fyzika

Částicová fyzika studuje jevy na malých prostorových škálách.

Není tu možné podat podrobný výčet všech aspektů částicové fyziky. K nim patří jak experimentální tak teoretické metody.

Za posledních 100 let bylo ve fyzice uděleno přes 50 Nobelových cen spojených s částicovou fyzikou.

Částicová fyzika používá nástroje speciální relativity, kvantové mechaniky a teorie pole.

Shrnutí vývoje

Pozorování

1897–1930	struktura atomu
1930–1950	kosmické záření a nové částice
1950–1970	hadronová zoo
1960–1990	Standardní model
2012	Higgsov boson

Teorie

1905	energie $\leftrightarrow$ hmota
1920s	kvantová mechanika
1940s	kvantové teorie pole
1960s	sjednocení sil
1970s	Standardní model

Experiment

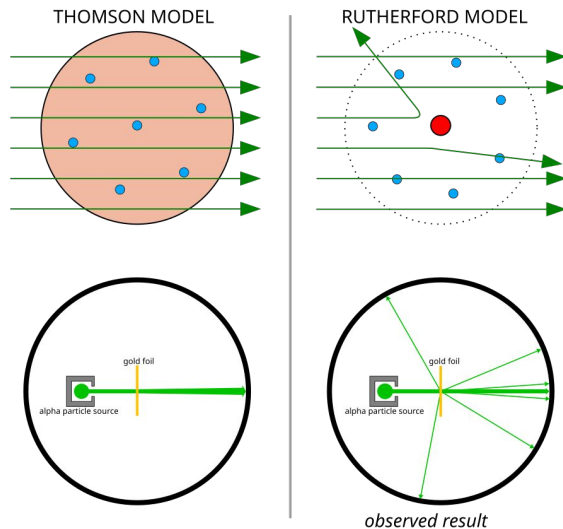
1897	objev elektronu, J. J. Thomson
1911	atomové jádro, Ernest Rutherford
1932	neutron, James Chadwick
1932	pozitron (antielektron), C.D. Anderson
1936	mion, C.D. Anderson
1947	pion, objeven v kosmickém záření
50.–60.	léta – „zoo“ hadronů, objeveno mnoho částic: kaony, hyperony, rezonance. To vedlo k myšlence, že tyto částice nejsou elementární.
1964	kvarkový model, M.Gell-Mann, G. Zweig, protony, neutrony a další hadrony jsou složeny z kvarků (u,d,s)
1968	experimentální důkaz kvarků
1974	charm (c) kvark, objev částice J/ψ , tzv. „November Revolution“
1975	tau lepton, třetí generace leptónů
1977	bottom (b) kvark, objev rezonance Y
1983	bosony slabé interakce W a Z
1995	top (t) kvark, Fermilab
2000	tau neutrino
2012	Higgsův boson, LHC v CERN, ATLAS, CMS

Teorie

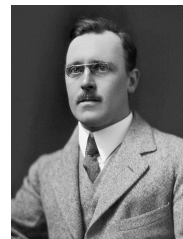
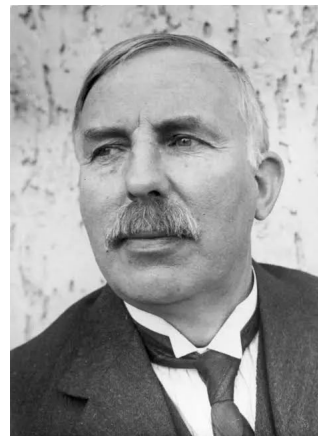
1905	energie a hmota, Albert Einstein $E = m c^2$ hmota může vznikat z energie tvorba částic ve srážkách
1925–28	kvantová mechanika, hlavní autoři: W. Heisenberg, E. Schrödinger, P. Dirac matematická teorie mikrosvětla
1928	Diracova rovnice, Paul Dirac popisuje relativistický elektron, předpověď existence Positronu
1935	teorie jaderné síly, Hideki Yukawa předpověděl částici přenášející jadernou sílu ➡ Pion
1940–50	kvantová elektrodynamika (QED) R. Feynman, J. Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga první plně funkční kvantová teorie pole popisuje: elektrony, fotony a elmg. interakci
1961–67	sjednocení elektromagnetické a slabé síly S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg elektroslabá teorie, předpověděla: W boson, Z boson
1964	Higgsův mechanismus, P. Higgs, F. Englert, R. Brout proč mají částice hmotnost. předpovězen Higgs boson
1964	kvarkový model. Gell-Mann & Zweig hadrony jsou složeny z kvarků
1973	kvantová chromodynamika (QCD) částice: kvarky, gluony mají barevný náboj
1970–80	Standardní model, sjednocení teorií: QED, elektroslabé interakce, QCD do Standardního modelu částicové fyziky

Objev jádra

Hans Geiger a Ernest Marsden
vedeni Ernestem Rutherfordem
v roce 1909 provedli experiment
rozptylu “záření alfa” na tenké
folii zlata.



A dodnes provozujeme podobné experimenty.



Relativita



A. Einstein - 1. teoretická revoluce 20. století - speciální teorie relativity (STR).

Konstantnost rychlosti světla ve všech inerciálních systémech má mnohé dopady, mj. také

$$E = m \cdot c^2$$

Je-li k dispozici energie, pak mohou existovat částice. Kolik a jaké - to nám ovšem neříká !

Nový matematický formalismus (H. Minkowski) pracující s prostorčasem dovoluje provádět složitější (neintuitivní) transformace mezi vztažnými soustavami za užití **čtyřvektorů**

Například energie a hybnost tvoří 4-vektor: $P = (E, p_x, p_y, p_z) = (E, \vec{p})$

Redefinuje skalární součin, klasicky víme že: $\vec{p} \cdot \vec{p} = p_x \cdot p_x + p_y \cdot p_y + p_z \cdot p_z = |\vec{p}|^2$

Ale v STR dostaneme: $P \cdot P = E \cdot E - p_x \cdot p_x - p_y \cdot p_y - p_z \cdot p_z = E^2 - \vec{p} \cdot \vec{p}$

Dá se ukázat, že jeho hodnota je stejná (= $m^2 \cdot c^4$) ve všech soustavách a vede na nejdůležitější kinematický vztah pro dnešní práci:

$$E^2 = |\vec{p}|^2 c^2 + m^2 \cdot c^4$$

Relativita



A. Einstein - 1. teoretická revoluce 20. století - speciální teorie relativity (STR).

Konstantnost rychlosti světla ve všech inerciálních systémech má mnohé dopady, mj. také

$$E = m \cdot c^2$$

Je-li k dispozici energie, pak mohou existovat částice. Kolik a jaké - to nám ovšem neříká !

Nový matematický formalismus (H. Minkowski) pracující s prostorčasem dovoluje provádět složitější (neintuitivní) transformace mezi vztažnými

Například energie a hybnost tvoří 4-vektor:

Redefinuje skalární součin, klasicky víme že:

známe			vypočítáme	
E	a	p	m	
E	a	m	p	
p	a	m	E	

Ale v STR dostaneme: $P \cdot P = E \cdot E - p_x \cdot p_x - p_y \cdot p_y - p_z \cdot p_z = E^2 - \vec{p} \cdot \vec{p}$

Dá se ukázat, že jeho hodnota je stejná (= $m^2 \cdot c^4$) ve všech soustavách a vede na nejdůležitější kinematický vztah pro dnešní práci:

$$E^2 = |\mathbf{p}|^2 c^2 + m^2 \cdot c^4$$

Relativita

Ze zákonů zachování E a $|p|$ musí i produkty rozpadu splňovat stejnou podmínku.



A. Einstein

Konstanta

$$A \rightarrow B + C \quad \text{pak} \quad P_A = P_B + P_C$$

také

$$m_A^2 = P_A \cdot P_A = (P_B + P_C) \cdot (P_B + P_C) = m_B^2 + m_C^2 + 2 P_B \cdot P_C$$

Je-li k dis

íká !

zde používáme $c = 1$... pohodlná volba částicových fyziků

Nový matematický formalismus (M. Minkowski) pracující s prostorocasem dovoluje provádět složitější (neintuitivní) transformace mezi vztažnými

Například energie a hybnost tvoří 4-vektor:

Redefinuje skalární součin, klasicky víme že:

	<u>známe</u>			<u>vypočítáme</u>		
E	a	p		m		
E	a	m		p		
p	a	m		E		

Ale v STR dostaneme: $P \cdot P = E \cdot E - p_x \cdot p_x - p_y \cdot p_y - p_z \cdot p_z = E^2 - \vec{p} \cdot \vec{p}$

Dá se ukázat, že jeho hodnota je stejná (= m^2) ve všech soustavách a vede na nejdůležitější kinematický vztah pro dnešní práci:

$$E^2 = |\mathbf{p}|^2 c^2 + m^2 \cdot c^4$$

Kvantová mechanika



E.S.

W.H.

P.D.

2. teoretická revoluce 20. století - kvantová mechanika (KM)

Na základě experimentů, kdy se částice chovají jako “vlny”, se v KM stav objektů, jejich propagace prostorem a časem a jejich interakce popisují funkcemi v oboru komplexních čísel tzv. vlnovými funkcemi, $\psi(x)$. Druhá mocnina (kvadrát) $|\psi|^2 = \psi \cdot \psi^*$ představuje hustotu pravděpodobnosti naměření našeho objektu (částice) v okolí bodu x.

komplexně
sdružená
funkce

Vývoj stavu udává Schrödingerova rovnice

$$i\hbar \frac{\partial \psi(t, x)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(t, x)}{\partial x^2} + V(t, x) \psi(t, x)$$

1D vlnová funkce

imaginární jednotka

modifikovaná Planckova konstanta

rychlost změny ψ v bodě x a čase t na jednotku času

hmotnost objektu

rychlost změny ψ na jednotku prostorové souřadnice

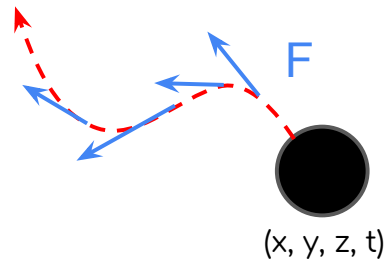
potenciální energie

Proč teorie pole?

Na co jste zvyklí jsou Newtonovy zákony

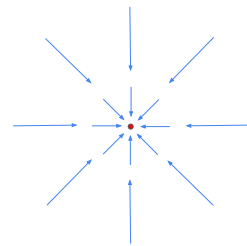
$$F = m \cdot a \quad \& \quad v = a \cdot t \quad \& \quad s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

Předpovídáme **polohu** hmotného bodu v prostoru jako **funkci času**.

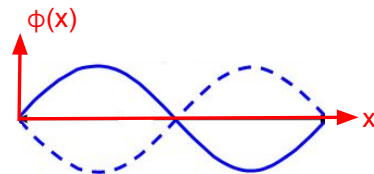


Ale znáte také pojem **pole** (má své hodnoty v prostoru a čase)

$$F_{\text{Coulomb}} \sim Q_1 \cdot Q_2 / r^2 \quad \text{anebo} \quad F_G \sim m_1 \cdot m_2 / r^2$$



A co třeba více hm. bodů vzájemně na sebe působících?
Například struna, **1D pole**, kde $\phi(x)$ je výchylka v bodě x .

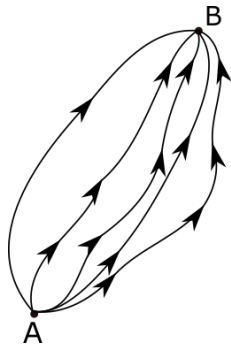


Kvantová teorie pole - Quantum Field Theory (QFT)

Je relativisticky (Lorentzovsky) invariantní (výsledky se nemění) teoretický rámec pro popis kvantových stavů v mikrosvětě.

Základním objektem je lagrangián **L**, který je to funkcí souřadnic a hybností našeho systému. Systém se v čase vyvíjí ve svých proměnných tak, že integrál **L** po této cestě je neměnný - princip minimální akce, **S**. V klasické mechanice to vypadá asi takto:

$$\delta S = \int_A^B L(x(t), \dot{x}(t)) dt = 0$$



Kvantová teorie pole

V QFT je situace matematicky složitější. Interakce polí (částic) je řešena tzv. poruchovým přístupem ... Lagrangián obsahuje interakční členy, kde se hodnoty polí násobí, například základní elmg interakce:

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu$$

člen řešící spin

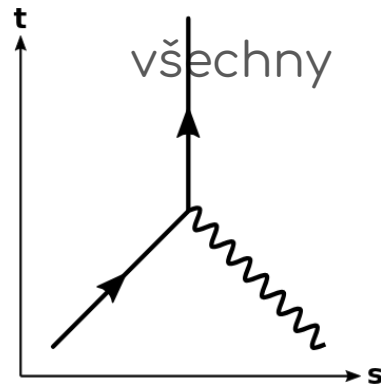
síla interakce (náboj e)

anti-fermion (pozitron)

fermion (elektron)

foton

popisuje časové a prostorové kombinace



Velmi užitečná je metoda **Feynmanových diagramů**

Kvantová teorie pole

QFT pro elektromagnetické interakce se nazývá kvantová elektrodynamika (QED).

Pro silné interakce kvantová chromodynamika (QCD).

QED spolu je spojena se slabou interakcí do elektroslabé a všechny tvoří tzv. **Standarní model** elementárních částic.

Názvosloví částic I

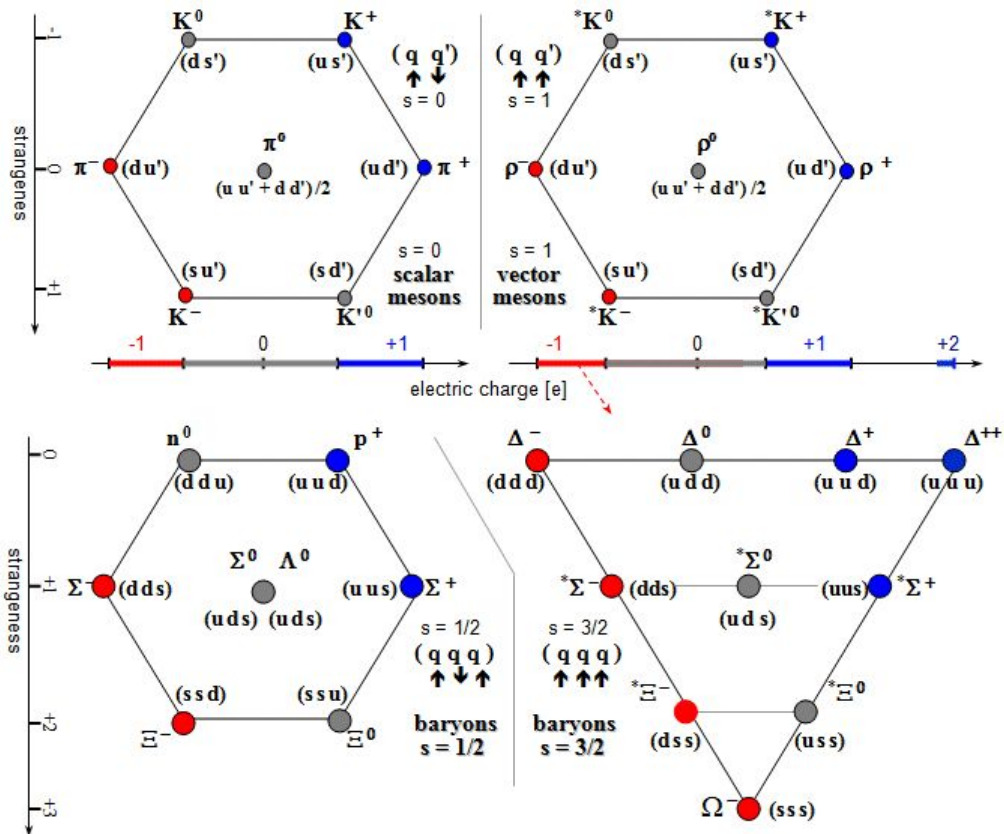
typ	náboj	barva	fermion $s = n/2$	boson $s = n$	lepton	hmotná
kvarky	$\pm \frac{1}{3}$ $\pm \frac{2}{3}$	3 stavy	ano	ne	ne	ano
$e / \mu / \tau$	± 1	ne	ano	ne	ano	ano
$\nu_e / \nu_\mu / \nu_\tau$	0	ne	ano	ne	ano	ano
γ	0	ne	ne	ano	ne	ne
W	± 1	ne	ne	ano	ne	ano
Z	0	ne	ne	ano	ne	ano
g	0	ne	ne	ano	ne	ne
H	0	ne	ne	ano	ne	ano

Názvosloví částic II

Kvarky nejsou pozorovatelné.
Pouze jejich kombinace, **hadrony**.

interagující **silnou** interakcí

- baryony ... 3 kvarky
- mezony ... 2 kvarky

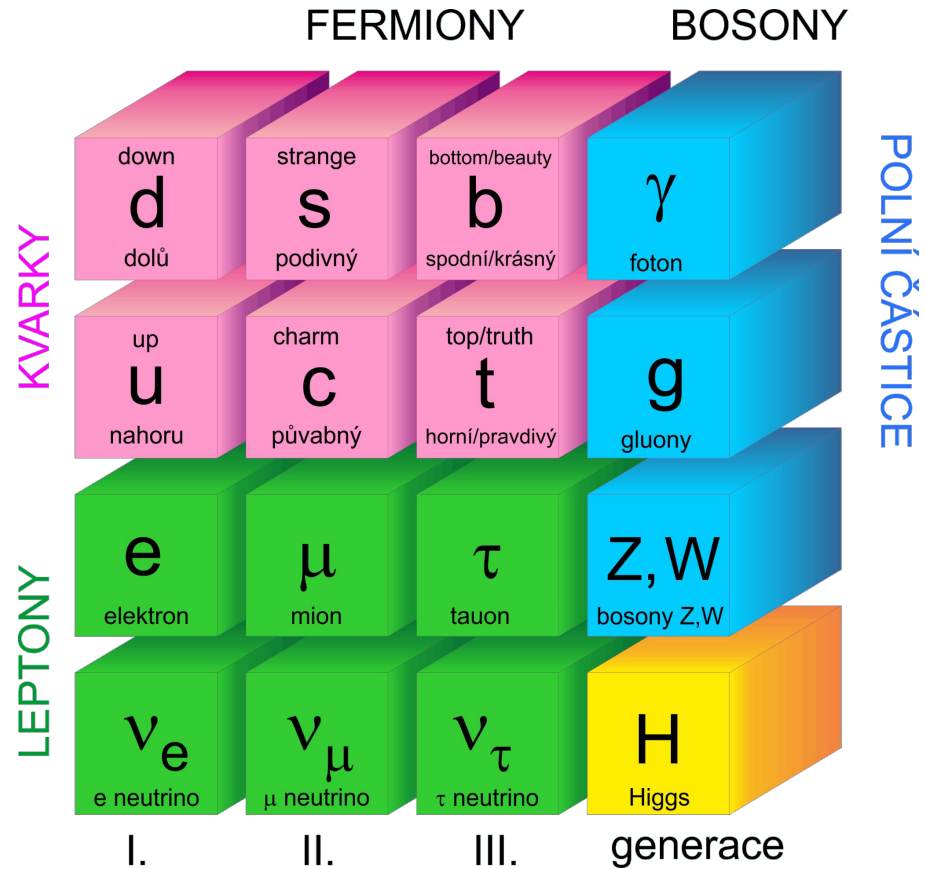


... toto je ta částicová ZOO z 50. let

Standarní model

Standardní model je nejúspěšnější fyzikální teorie popisující základní stavební kameny hmoty a jejich interakce.

Kombinuje kvantovou mechaniku s teorií relativity a zahrnuje také Higgsův boson. Model nezahrnuje gravitaci.

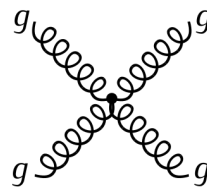
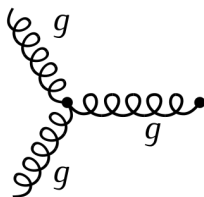
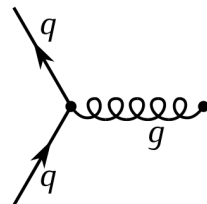


Hmoty elementárních částic $m = E / c^2$

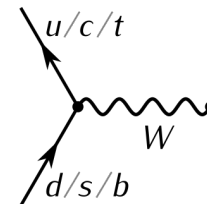
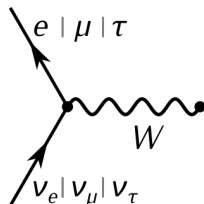
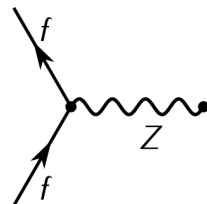
částice	hmotnost
foton	0
neutrino	$< 1 \text{ eV}/c^2$
elektron	$\sim 0.511 \text{ MeV}/c^2$
u,d kvarky	jednotky MeV/c^2
mion	$\sim 105 \text{ MeV}/c^2$
s-kvark	$\sim 100 \text{ MeV}/c^2$
c-kvark	$\sim 1.27 \text{ GeV}/c^2$
τ -lepton	$\sim 1.77 \text{ eV}/c^2$
b-kvark	$\sim 4.2 \text{ GeV}/c^2$
W a Z bozony	~ 80 a $\sim 91 \text{ GeV}/c^2$
Higgsův bozon H	$\sim 125 \text{ GeV}/c^2$
t-kvark	$\sim 173 \text{ GeV}/c^2$ nejhmotnější elem. částice

Interakce

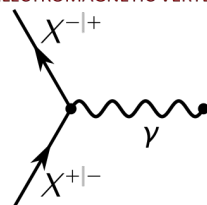
STRONG VERTICES



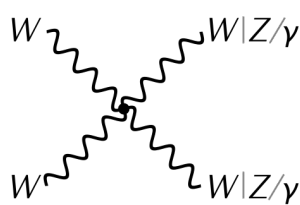
WEAK VERTICES



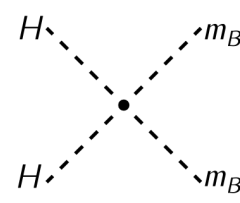
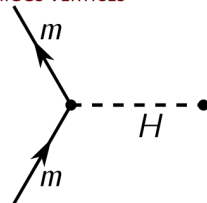
ELECTROMAGNETIC VERTEX



ELECTROWEAK VERTICES



HIGGS VERTICES



Interakce ve Standardním modelu (SM). Všechny Feynmanovy diagramy v SM jsou z sestaveny z kombinací těchto diagramů.

- q ... kvark
- g ... gluon
- X ... jakákoliv elektricky nabitá částice
- γ ... foton
- f ... jakýkoliv fermion
- m ... hmotná částice, mimo neutrin
- mB ... těžký boson W nebo Z

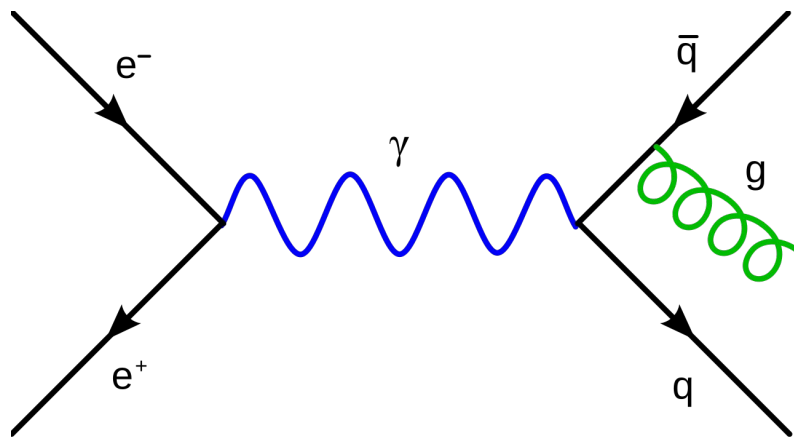
V diagramech s možnostmi .. /.. si vybereme jakoukoliv možnost.

V diagramech s možnostmi .. | .. si vybereme jednu možnost a dodržíme pořadí.

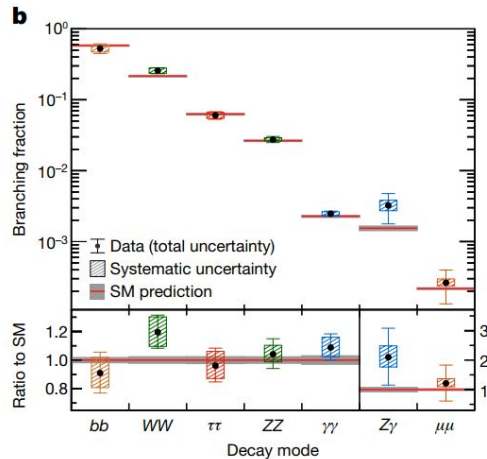
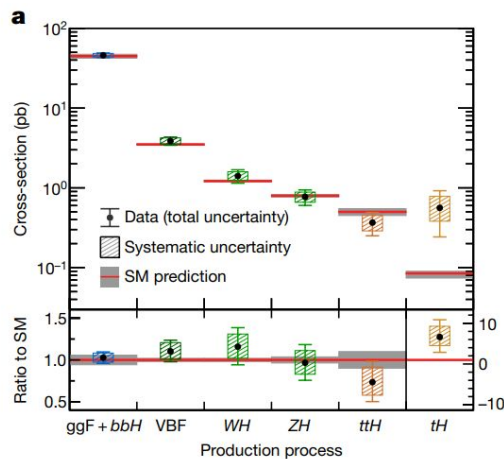
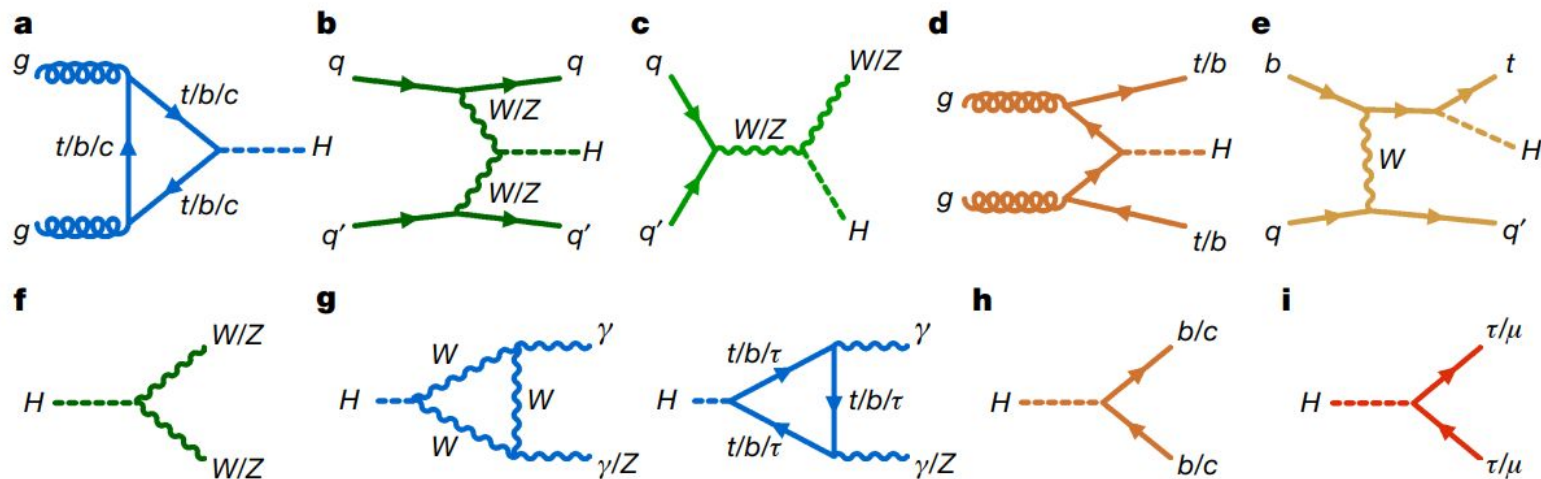
Např. WWWW, WWZZ, WWγγ, WWZγ

Příklady procesů

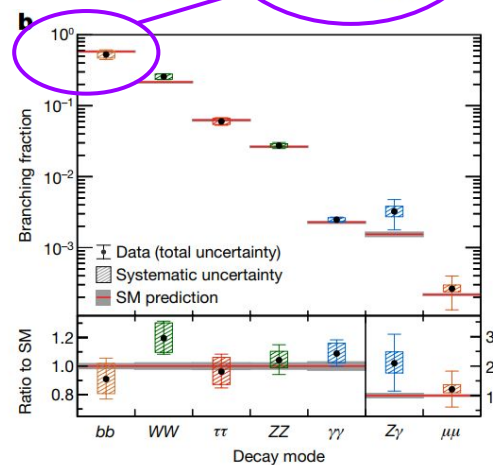
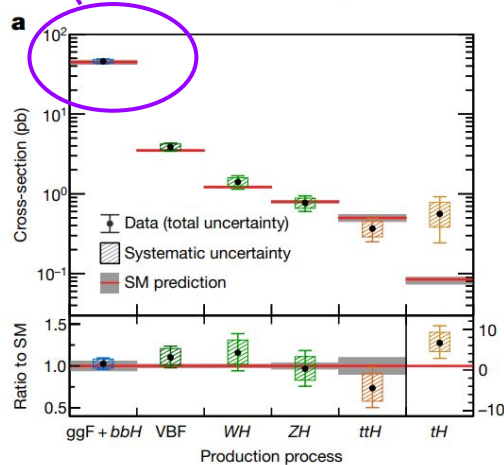
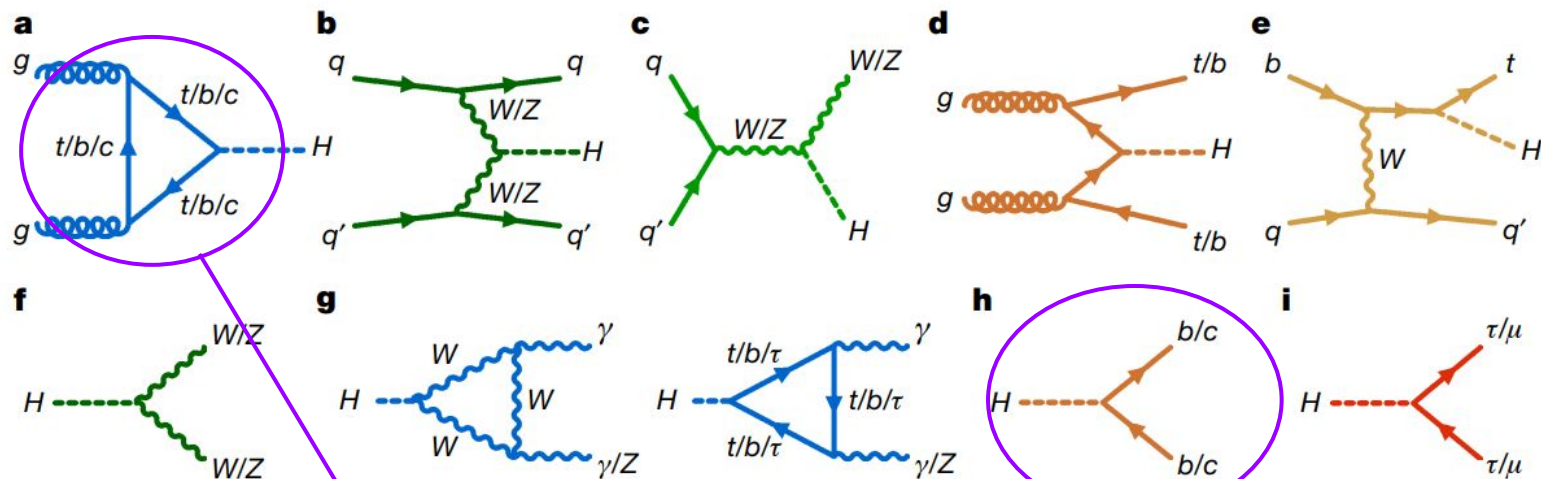
Proces v QED & QCD $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$



Příklady procesů Produkce a rozpad Higgsova bosonu



Příklady procesů Produkce a rozpad Higgsova bosonu



Experimentální částicová fyzika

Základními fenomény ve fyzice částic jsou jejich vzájemná interakce, tedy **rozptyl**, dále jejich **rozpady** a finální **detekce**.

Proto stavíme **urychlovače** pro přípravu srážek.

Místo srážek osadíme **detektory** pro měření následků srážek.

Největší urychlovač světa - **Large Hadron Collider (LHC)** aktuálně připravuje srážky protonu s protonem při těžišťové energii 13,6 TeV.

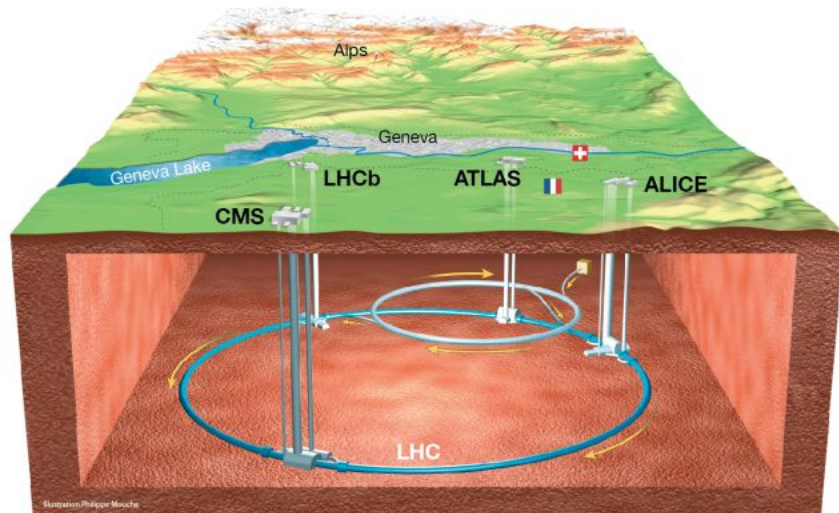
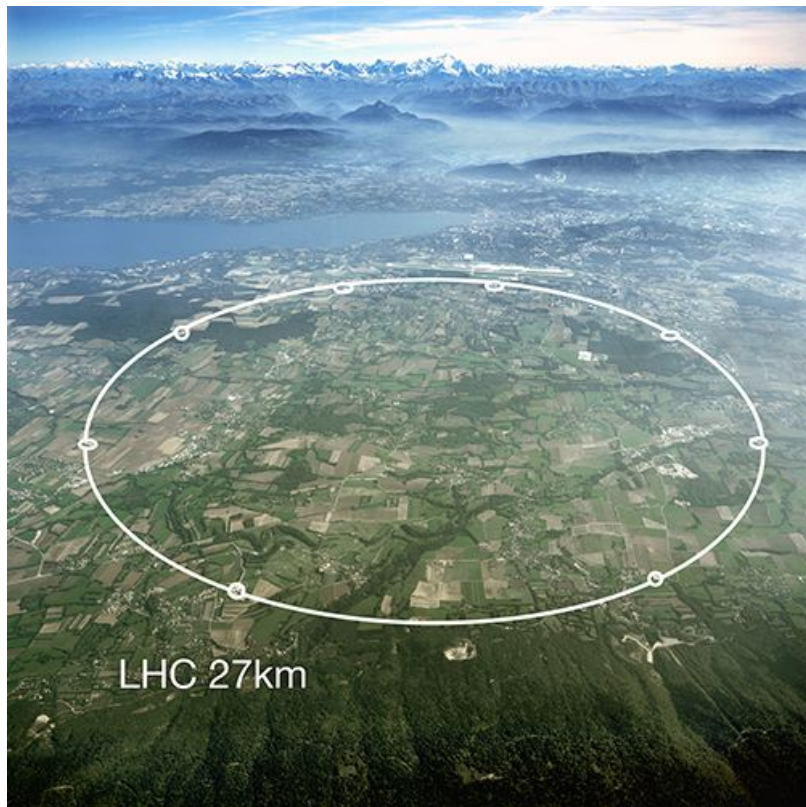
$$13,6 \text{ TeV} = 13,6 \cdot 10^{12} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \mathbf{2,18 \cdot 10^{-6} \text{ J}}$$

$$m_{\text{komár}} = \mathbf{2,5 \text{ mg}} \quad \text{a} \quad v_{\text{komár}} = \mathbf{1 \text{ m/s}}$$



$$\sim 5 \text{ mg} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \Rightarrow E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1^2 = \mathbf{2,5 \cdot 10^{-6} \text{ J}}$$

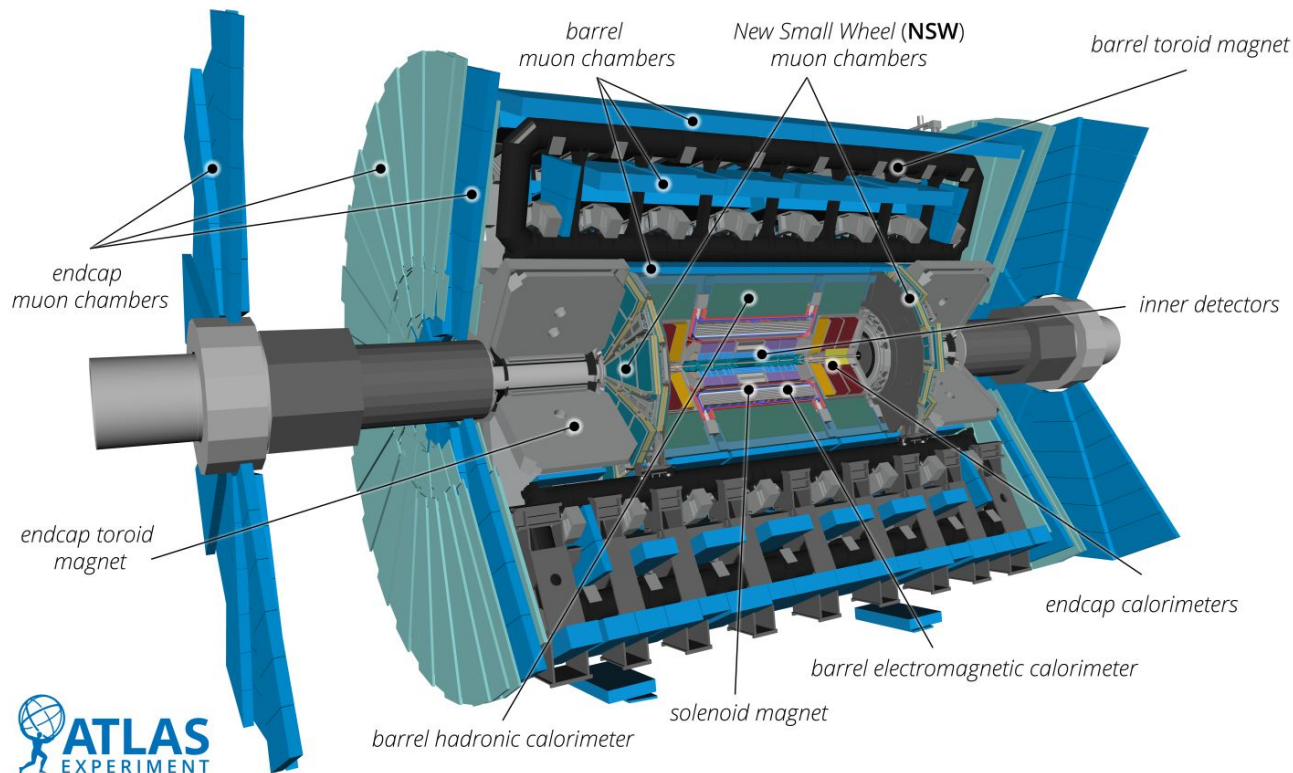
Urychlovač LHC v CERN



V provozu od roku 2008 (reálně 2010)
CERN, Ženeva, 26 member states
obvod 27 km, 100 m pod zemí,
spotřeba ~1.3 TWh CERN, 750 GWh LHC

Experiment a detektor ATLAS

Asi 40 zemí a 5000 lidí (3000 vědců) provozuje největší detektor částic na světě.



parametry

délka 46 m, osa z
průměr 25 m

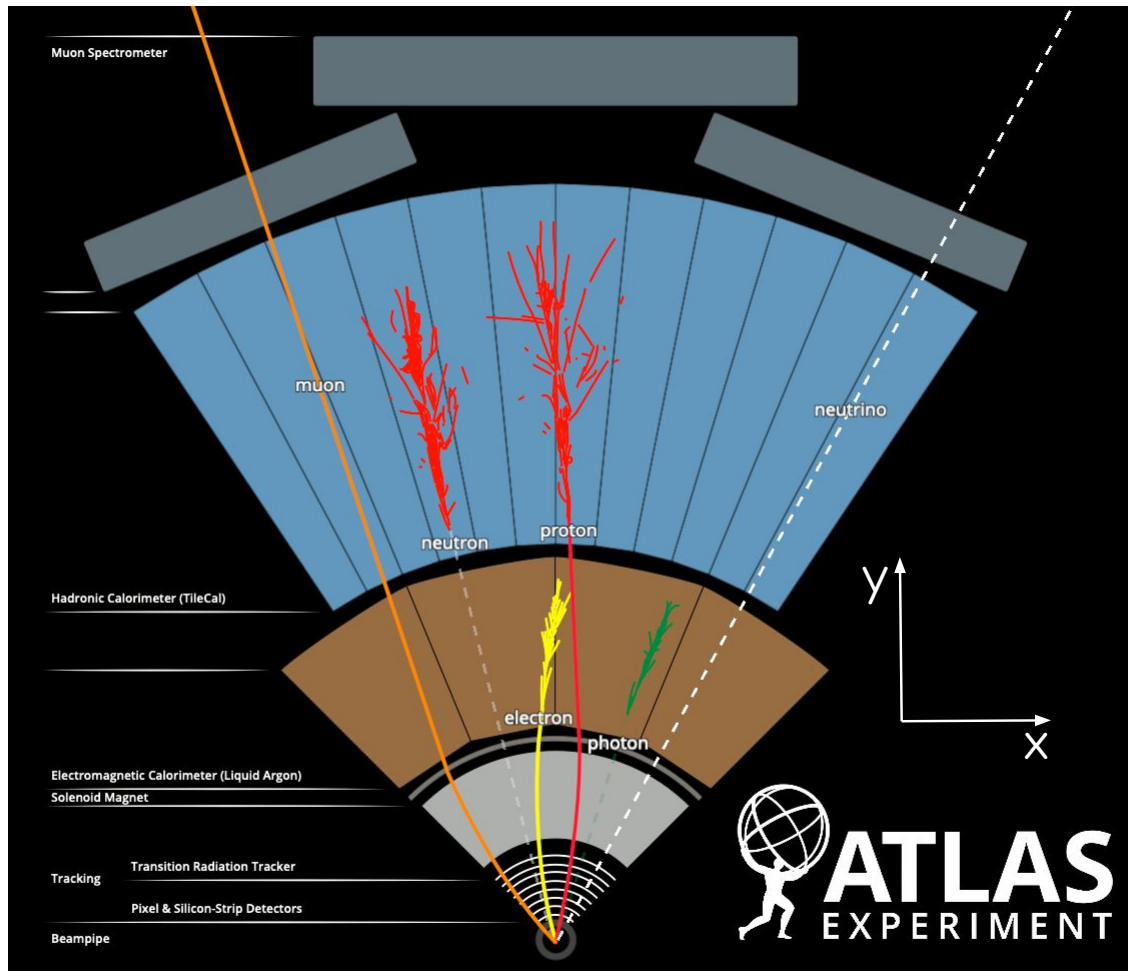
hmotnost 7000 t

magnety

solenoid (8kA) 2T

torroid (20kA) 4T

Vrstvy detektoru



Příroda byla milosrdná a nechala nám možnost většinu částic registrovat v detektorech, které mají obvykle slupkovitou stavbu..

Nejdůležitějším úkolem ATLAS detektoru je měřit hybnosti a energie sekundárních částic po rozptylu.

Magnetické pole pomáhá měřit hybnost, díky Lorentzově síle.

$$\vec{F} = q \left(\vec{v} \times \vec{B} \right)$$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Hierarchie detekce

1. Centrální dráhový detektor

- a. většinou křemíkový detektor s velkým počtem kanálů
- b. umístěn v magnetickém poli - solenoid - zatáčí v x-y rovině
- c. z prohnutí drah **nabitých částic** určí hybnost

2. Elektromagnetický kalorimetr (pro měření energie)

- a. pro elektrony a fotony
- b. rozvoj elmg. kaskády fotonů a elektro-pozitronových párů
- c. elektrony a fotony ztratí v tomto kalorimetru **všechnu energii**

3. Hadronový kalorimetr

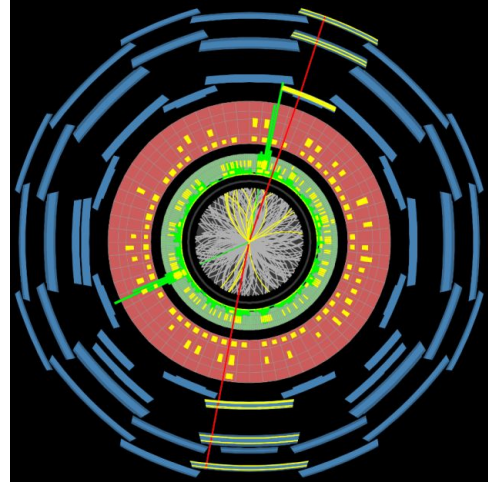
- a. hadrony interagují s jádry absorbátoru silně a vznikají sekundární spršky
- b. spršky jsou **plně pohlceny** v kalorimetru

4. Mionové komory

- a. miony málo ionizují a projdou skrze předchozí systémy

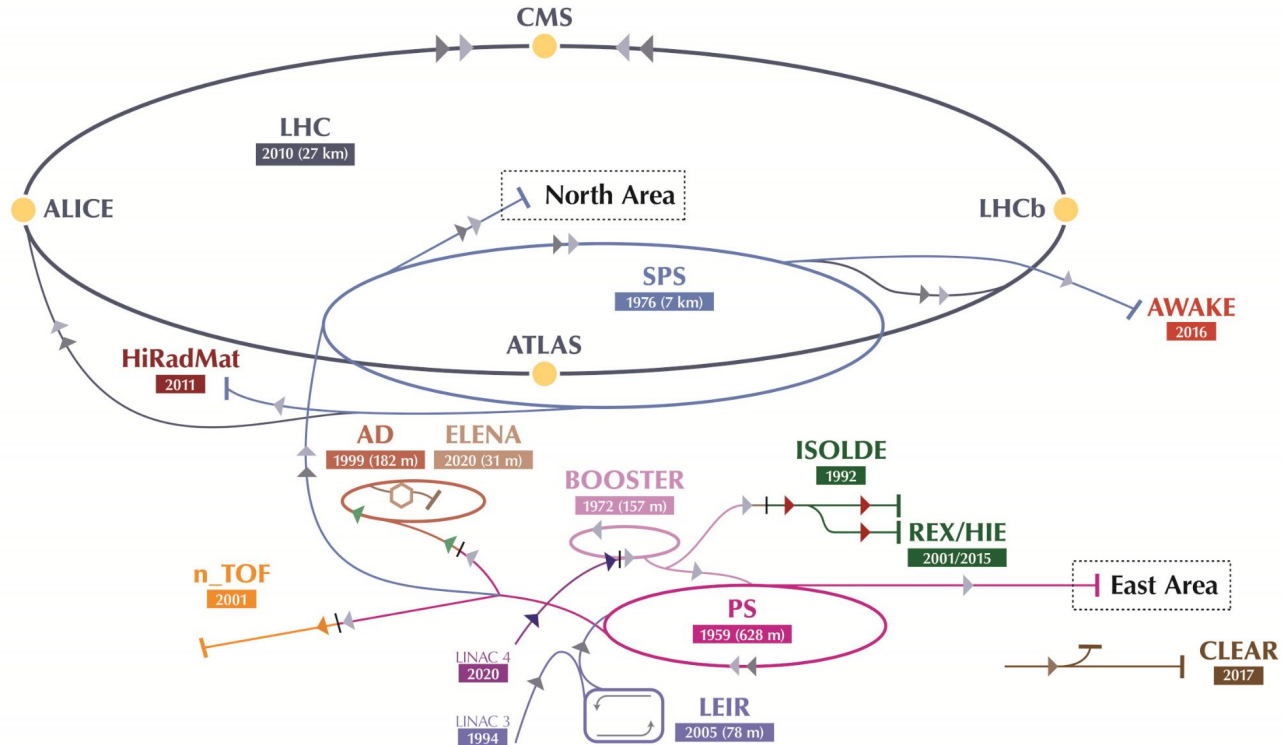
5. Neutrino a jiné (hypotetické) částice

- a. **prjdou** nedetekované
- b. přesné měření v předchozích detektorech dovoluje tyto neviditelné částice měřit, protože chybí do počtu



Cyklus LHC a nabírání dat

LHC není jediný urychlovač v CERN. Potřebuje pomocníky sloužící i jiným účelům.



Cyklus LHC a nabírání dat

Protony se do LHC injektují z urychlovače SPS ve shlucích (bunch), kterých je po obvodu v každém směru asi 2500.

Každý bunch oběhne LHC 11245 x za sekundu tedy.

Nejmenší vzdálenost mezi bunchi je 7,5 m tedy 25 ns.

Maximální frekvence srážek je tedy **40 MHz**.

Experimenty mají algoritmy - **triggery**- vybírající jen zajímavé případy.

LHC typicky drží svazky několik hodin.

Experimenty během této doby nabírají data v tzv. bězích "**runech**".

Dnešní ATLAS runy mají číslo vyšší než 516000.

Příklad identifikace částice z jejich produktů

Mějme dvě rekonstruované částice B a C a jejich hybnosti.

Přiřadíme každé z nich **hmotnostní hypotézu** m_B, m_C

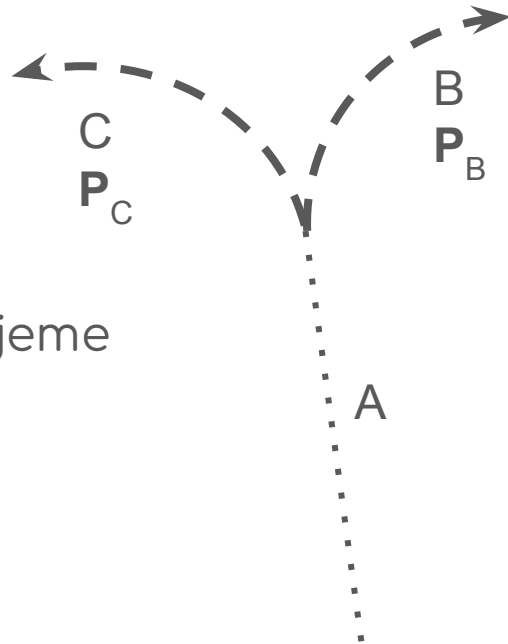
Zkonstruujeme tedy 4-hybnosti sečteme je uděláme kvadrát - tzv. **invariantní hmotnost**.

Pokud jsme hmotnosti přiřadili správně, zrekonstruujeme takto hmotu částice A, m_A

$$P_i = (E_i, \vec{p}_i) \dots E_i = \sqrt{|\vec{p}_i|^2 c^2 + m_i^2 c^4}$$

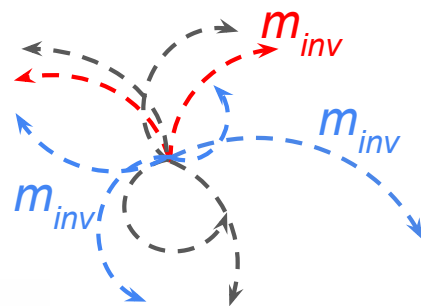
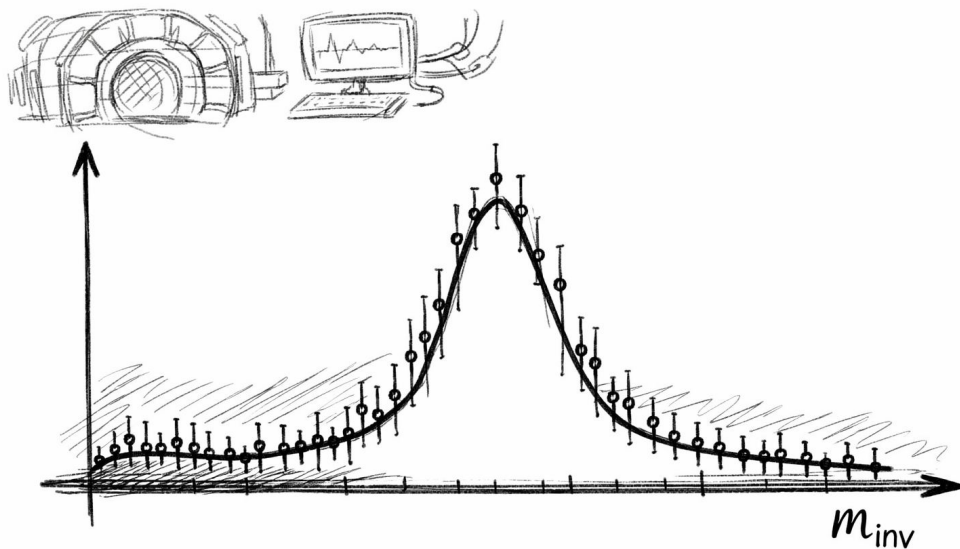
$$(P_B + P_C)^2 = m_B^2 c^4 + m_C^2 c^4 + 2P_B \cdot P_C \quad \overset{?}{\longleftrightarrow} \quad m_A^2 c^4$$

$$P_B \cdot P_C = E_B \cdot E_C - \vec{p}_B \cdot \vec{p}_C$$

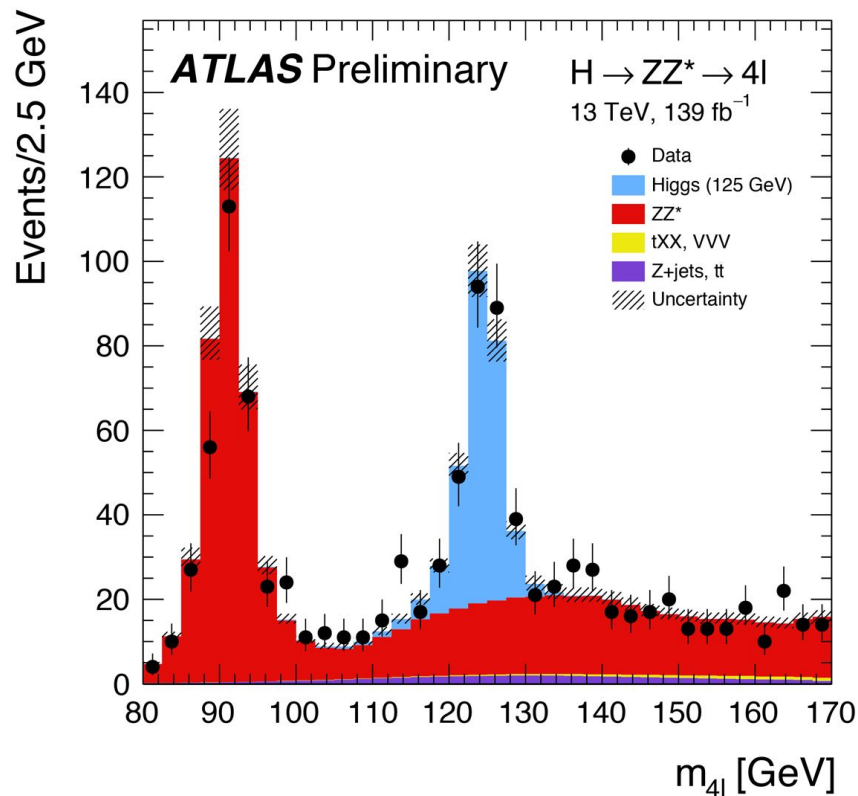


Je-li drah částic více, nevyhneme se chybnému označení a nesmyslným hypotézám o m_{inv} .

Pro mnoho podobných případů “eventů” začneme analyzovat statistické rozdělení m_{inv} hodnot.

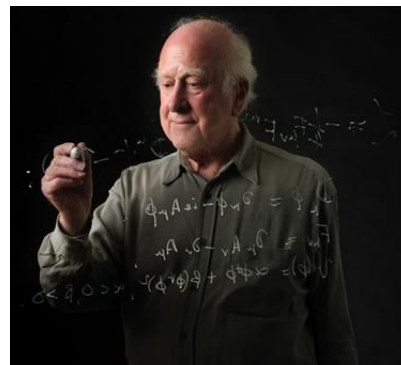


Skutečnost



Rozpadový kanál $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ je tzv. “zlatý” pro rozpad Higgsova bozonu jelikož je má nejasnější signaturu ze všech ostatních rozpadových módů.

Signatura 4 leptonů, kdy některý pár pochází z rozpadu Z a druhý také (ale daleko od jeho hmoty, off-shell)



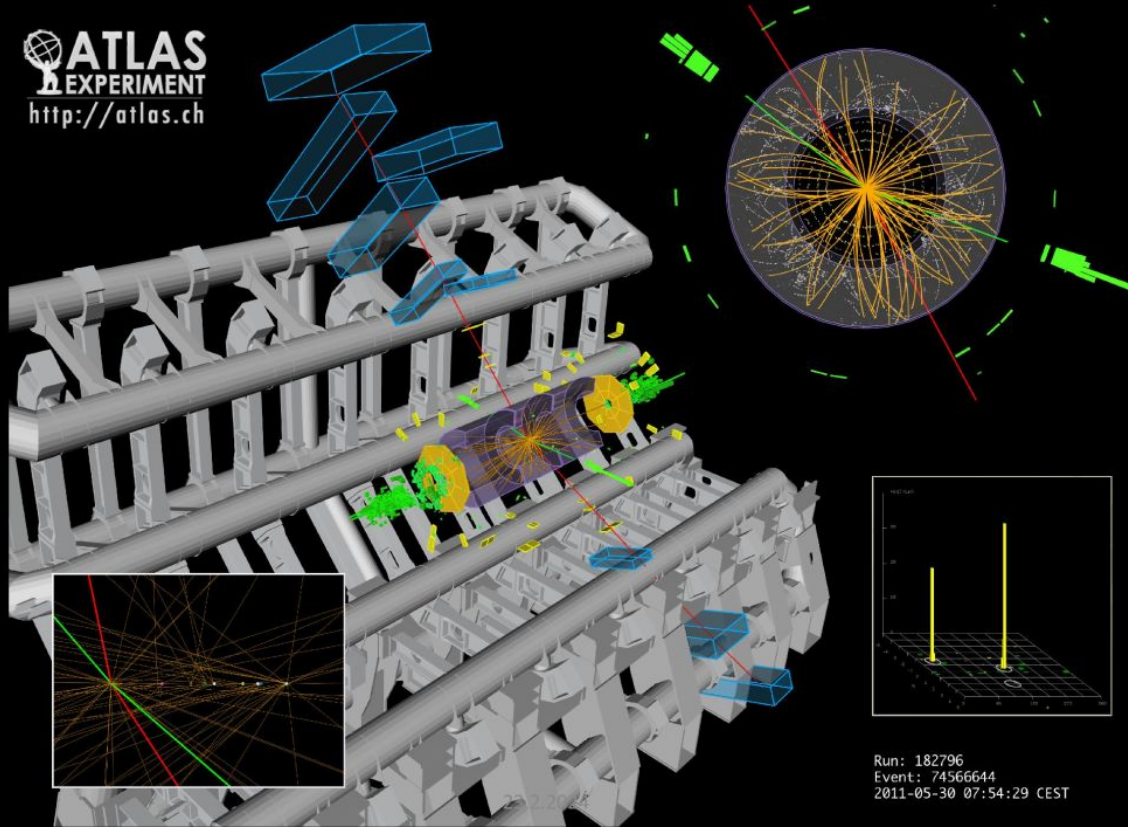
Příklady eventů z ATLAS detektoru

Obvykle se zaznamenané případy (**eventy**) vizuálně neanalyzují, ale pouze statisticky zpracují.

Event se zobrazují zejména pro účely příležitostí jako je ta dnešní ale také pro rychlou kontrolu nabírání dat - ověření, že systémy fungují.

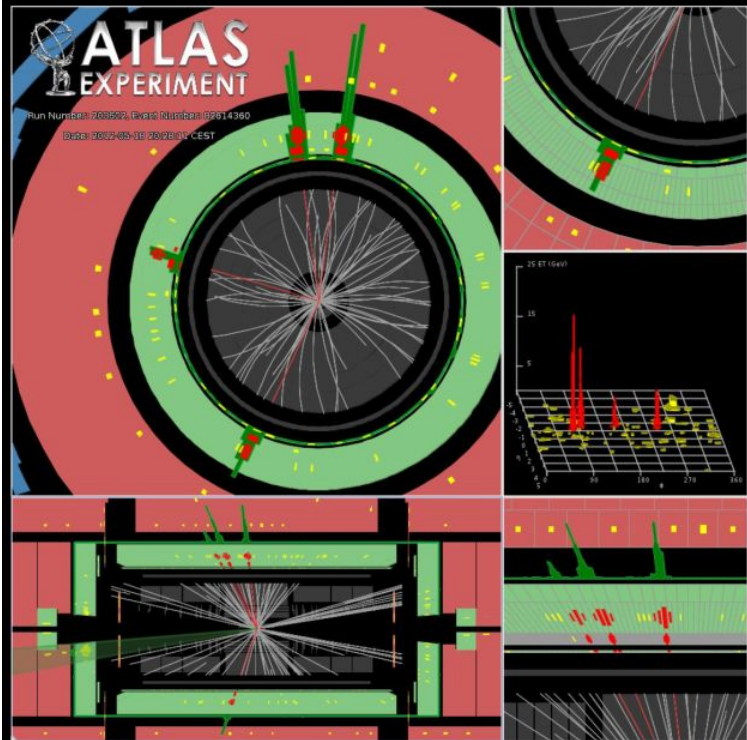
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ee \mu \mu$$


ATLAS
 EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

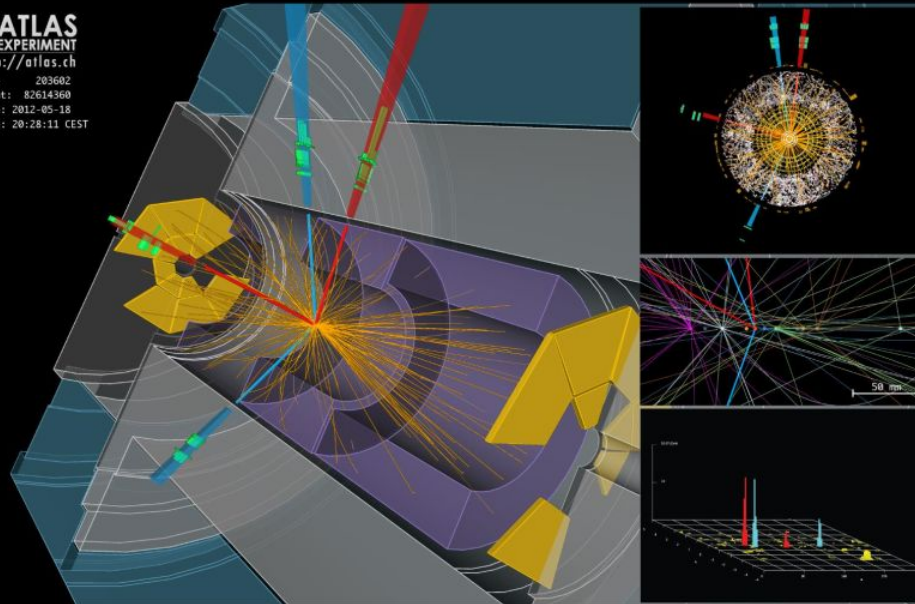


Run: 182796
 Event: 74566644
 2011-05-30 07:54:29 CEST

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$$

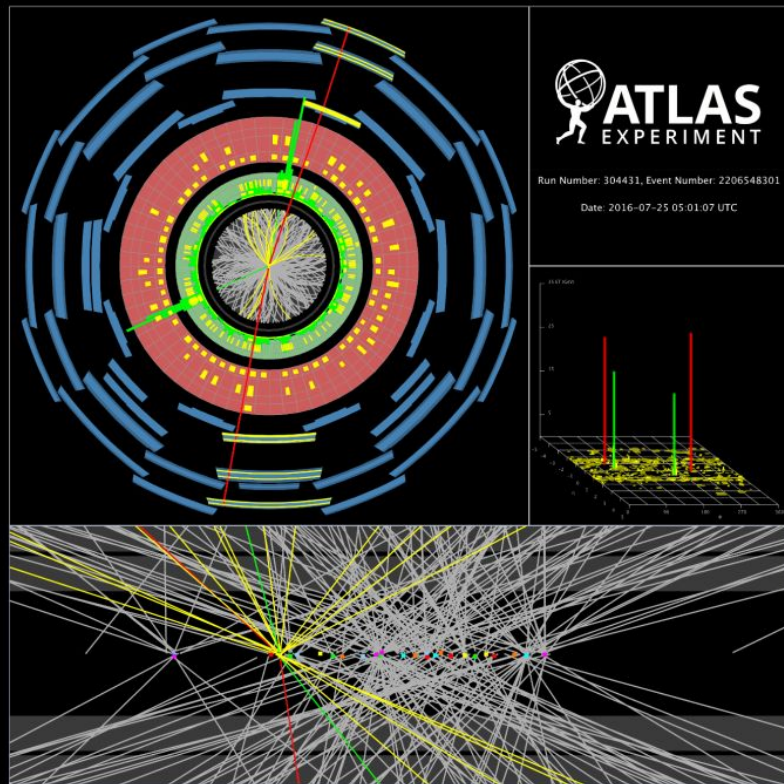


ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>
Run: 203602
Event: 82614360
Date: 2012-05-18
Time: 20:28:11 CEST

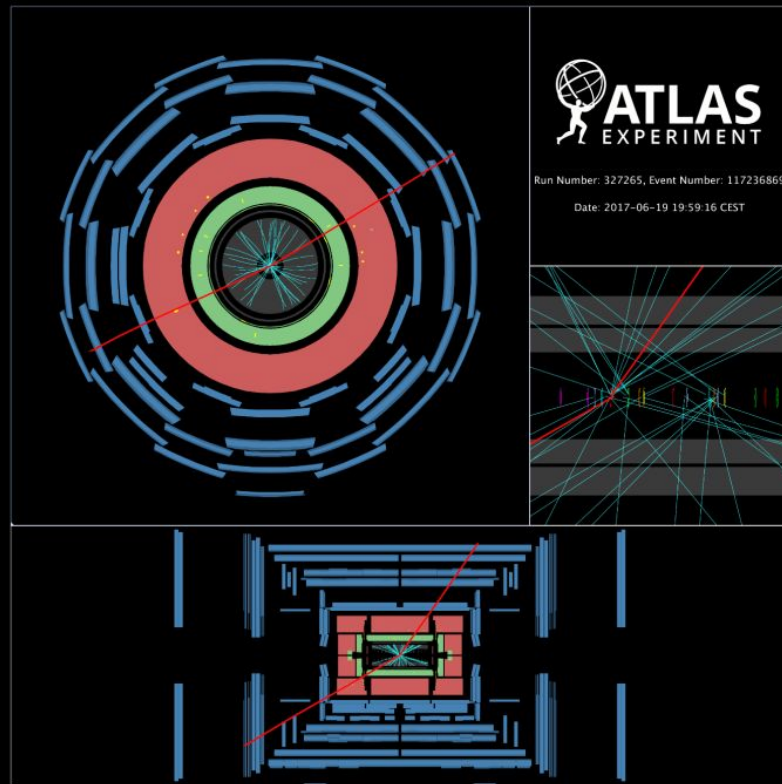


díky doc. Jiřímu Kvitovi

$$pp \rightarrow H \rightarrow e e \mu \mu$$

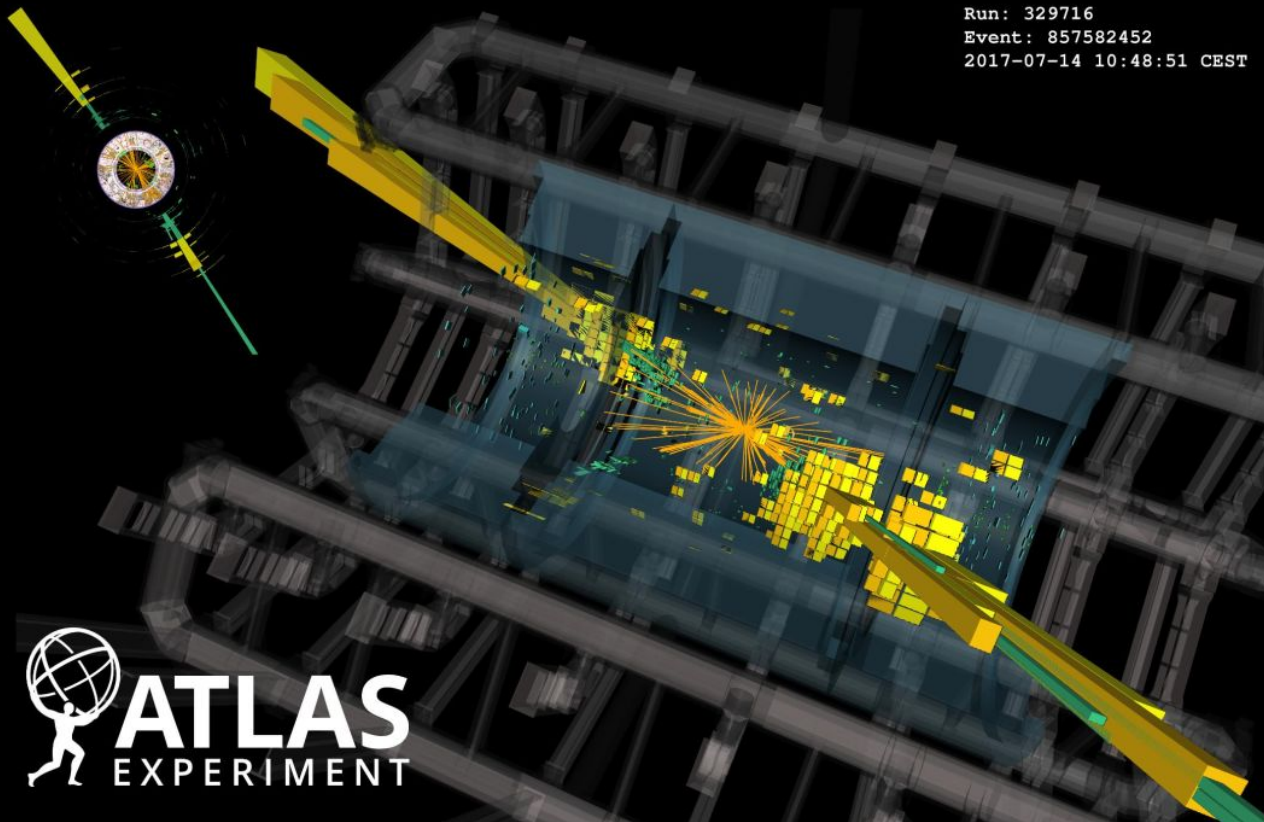


$$pp \rightarrow Z \rightarrow \mu \mu$$

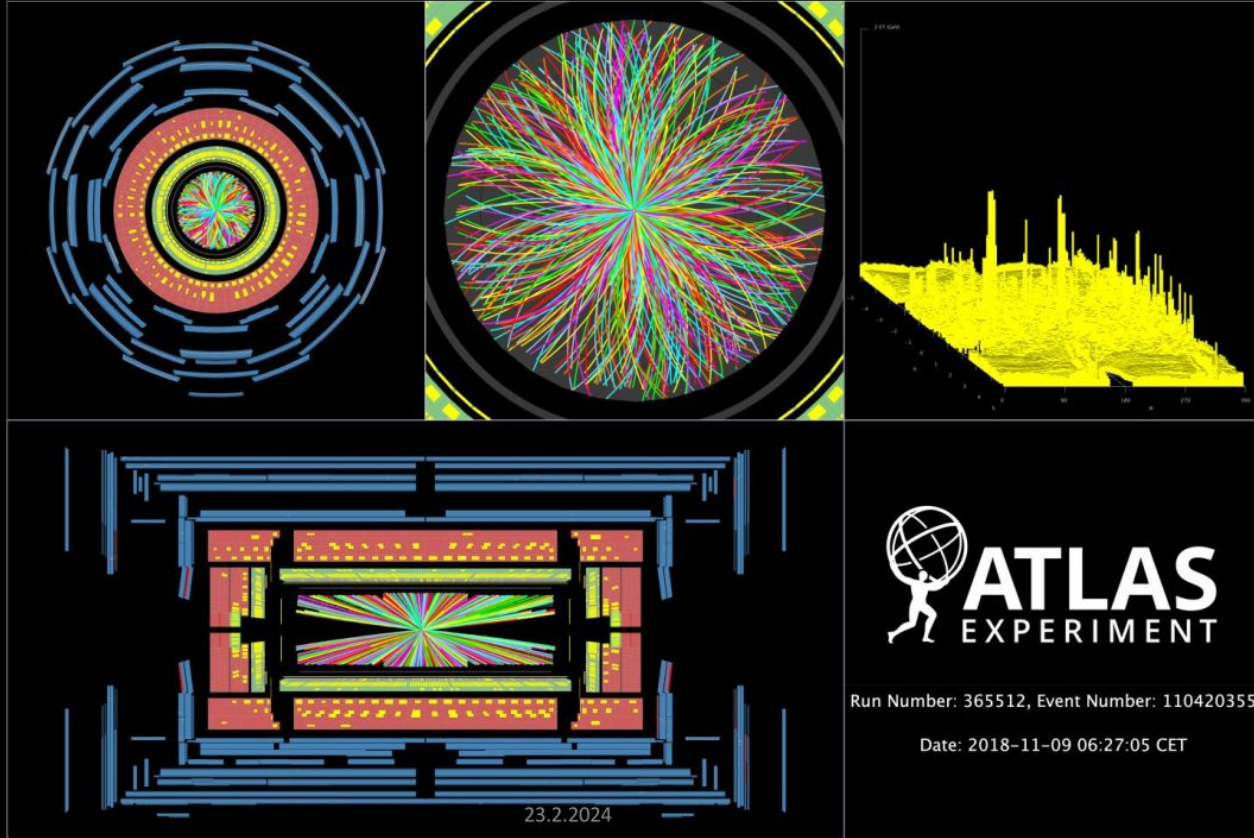


$pp \rightarrow \text{jety}$

Run: 329716
Event: 857582452
2017-07-14 10:48:51 CEST



Srážky jader olova ☺



Slovo na závěr

Téma částic stimuluje vývoj teorie a experimentů více než 100 let.

Tento obor stojí za největšími objevy lidstva.

Je unikátní škálami a nákladností, proto se sdružuje do kolaborací.

Má nesmírné množství aplikací.

- základní výzkum
- detektory a materiálový výzkum
- výpočetní metody a informační technologie
- aplikace v medicíně

Děkuji za pozornost

Bozony $W^\pm$ a Z

Pole zprostředkovávající slabou interakci.

$$m_W = 80.3692 \pm 0.0133 \text{ GeV}/c^2$$

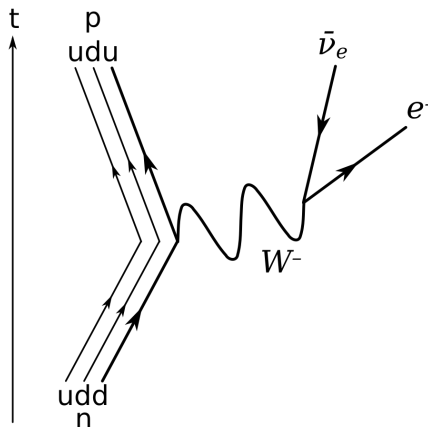
$$m_Z = 91.1880 \pm 0.0020 \text{ GeV}/c^2$$

W^+ W^- jsou si antičásticemi, Z^0 si je svou antičásticí

Ve feynmanových diagramech je zobrazujeme vlnovkou.

Z^0 je takový hmotný foton.

W jsou zodpovědné za β rozpad.



Rozpady Z^0

10% leptonové

$$Z^0 \rightarrow e^+e^- \text{ or } \mu^+\mu^- \text{ or } \tau^+\tau^-$$

20% neviditelné

$$Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$$

70 % hadronové

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$

Rozpady W

leptonové

$$W^- \rightarrow l^- \bar{\nu}_l \text{ or } W^+ \rightarrow l^+ \nu_l$$

hadronové

$$W^\pm \rightarrow q\bar{q}'$$

Eventy s leptonovými rozpady Z^0 mohou sloužit pro kalibraci detektorů, protože dráhy většinou měříme velmi přesně.