

Částicová fyzika s experimentem ATLAS

UP MasterClass 2023

Radek Přívára, PŘF UP Olomouc

31. 3. 2023

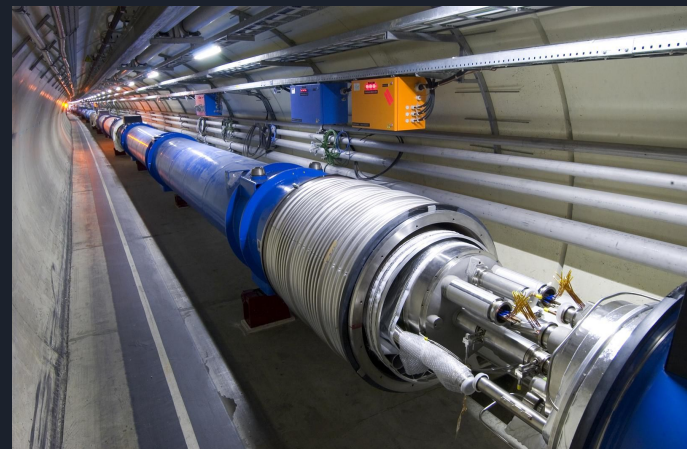
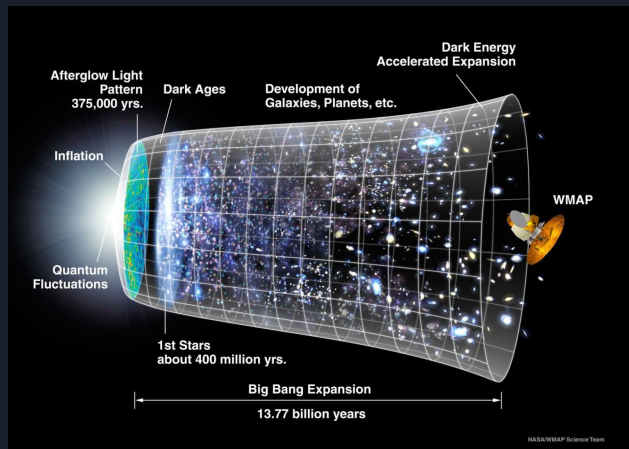
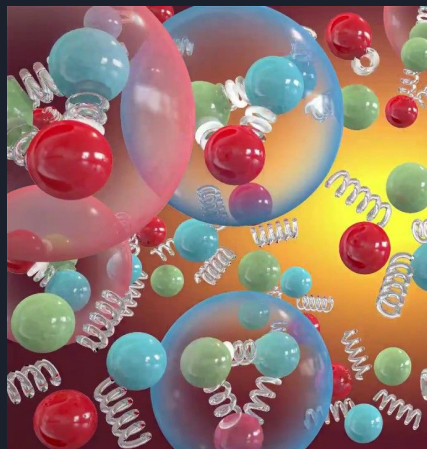


Obsah

1. Motivace
2. Energie a délky
3. Struktura hmoty
 - a. historický vývoj
 - b. metody zkoumání
4. Částicové srážky
5. Analýzy dat
6. Rozpadové kanály

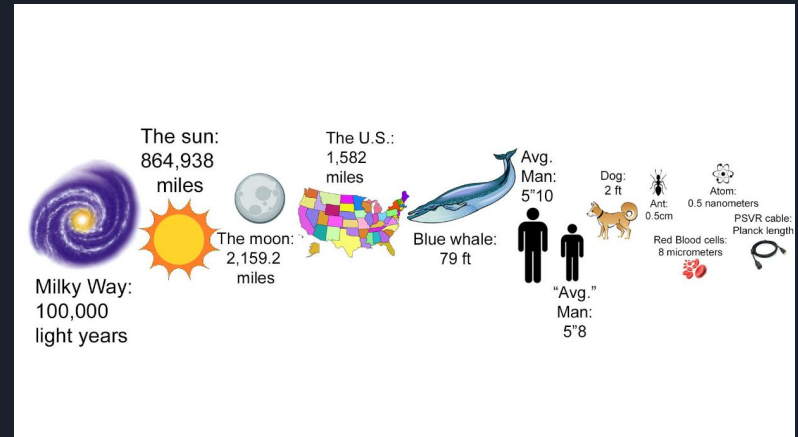
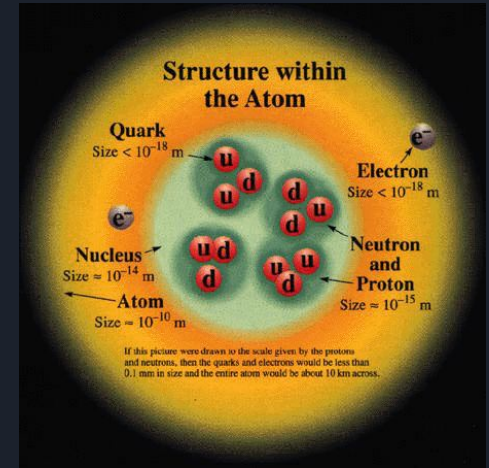
Motivace

- Zkoumáme vesmír na těch největších i nejmenších škálách.
- Pochopení struktury hmoty a atomů (5% vesmíru).
 - A co temná energie (68%) a temná hmota (27%)?
- Porozumění okolnostem počátku vesmíru (Velký třesk) pomáhá osvětlit jeho současný stav.
 - Urychlovače vytváří prostředí podobné raným fázím vesmíru.
 - Energetické kosmické záření je nositelem informace z minulosti.



Škály energií a délek

- Energie částic udáváme v jednotkách elektronvolt (eV).
 - Energie, kterou získá elektron urychlený napětím 1 V.
 - $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- Škály energií:
 - foton viditelného světla - **2 eV**,
 - protony na urychlovači LHC - **7 TeV ($7 \cdot 10^{12} \text{ eV}$)**,
 - ultra-energetické kosmické záření - **10^{20} eV** ,
 - tenisový míč při podání - **70 J = $4 \cdot 10^{20} \text{ eV}$** .
- Obrovské rozpětí délek:
 - pozorovatelný vesmír - **10^{26} m** ,
 - galaxie - **10^{20} m** ,
 - Země - **12 742 km**,
 - atomy - **10^{-10} m** ,
 - jádro - **10^{-14} m** ,
 - proton - **10^{-15} m** .
- Čím menší objekt chceme zkoumat, tím větší energie jsou potřeba.



Klidová energie

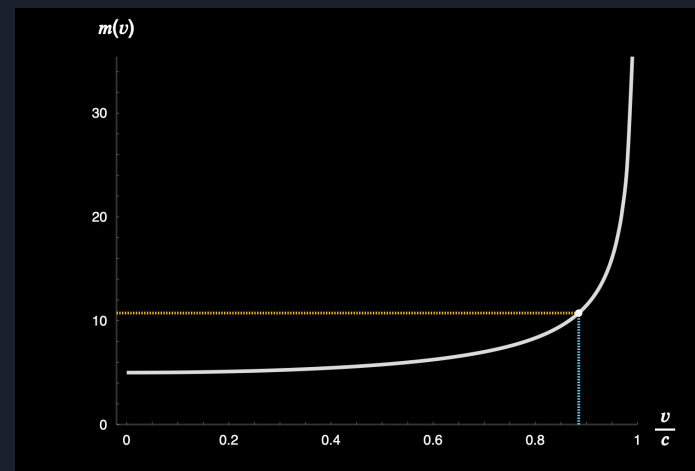
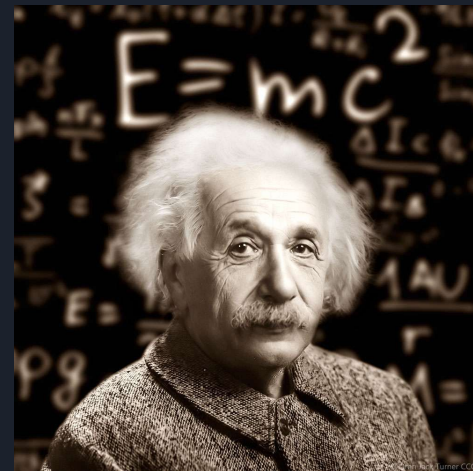
- Částice mají klidovou energii, danou jejich klidovou (invariantní) hmotností:

$$E_0 = m_0 c^2$$

- Energie částice roste při rychlém pohybu - teorie relativity:

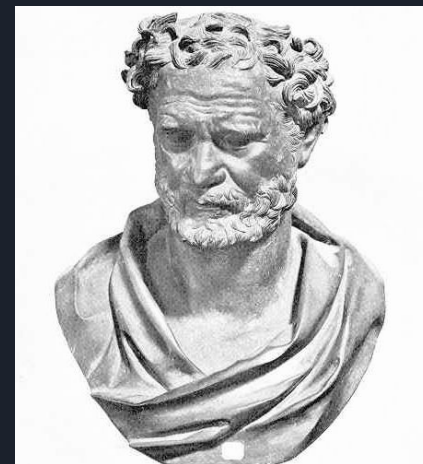
$$E = \gamma E_0, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- Elektron - **0.511 MeV**,
- Neutron - **939 MeV**,
- Proton - **938 MeV**,
- Z boson - **91.2 GeV**,
- Higgsův boson - **125 GeV**.

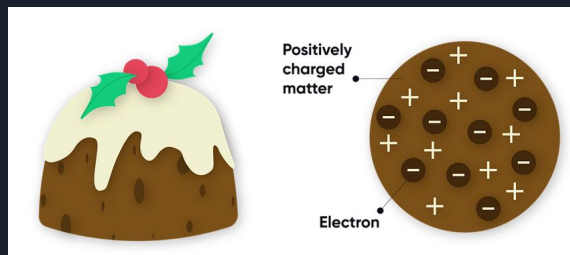
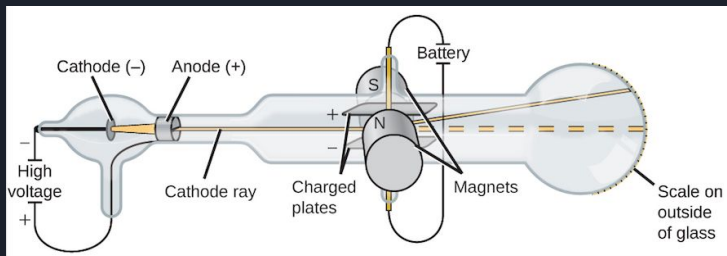


Představy o struktuře hmoty (1)

- **400 př. n. l.:** Démokritos - atomisté: představa nedělitelné částice.
- **1897:** Objev elektronu (J. J. Thomson).
 - Proud elektronů jako katodové záření v trubici, vychýlení poli.
- **1904:** pudinkový model.
 - Kladně nabitá hmota, uvnitř záporně nabitě částice (elektrony).

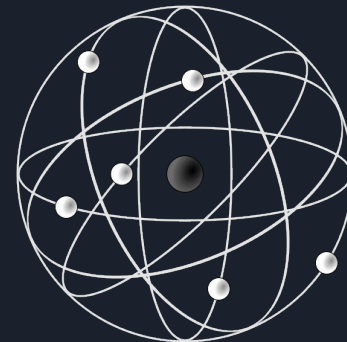


Démokritos

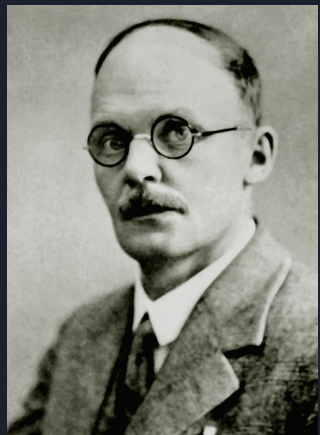


Joseph John Thomson

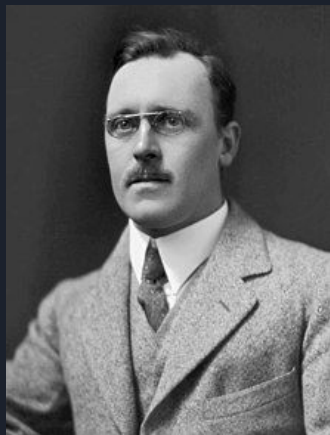
Představy o struktuře hmoty (2)



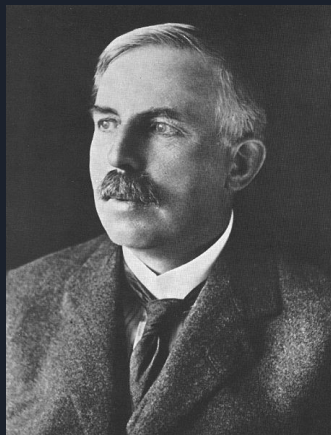
- **1909:** experiment H. Geigera a E. Marsdena:
 - dopad alfa částic na tenkou zlatou fólii.
 - očekával se průchod většiny částic beze změny směru.
 - pozorovány zpětné odrazy částic → hmota a náboj koncentrovány v malém jádře.
- **1911:** E. Rutherfordova interpretace → planetární model.
 - Hmotné, kladně nabitě jádro a záporně nabitě elektrony na kruhových drahách okolo.



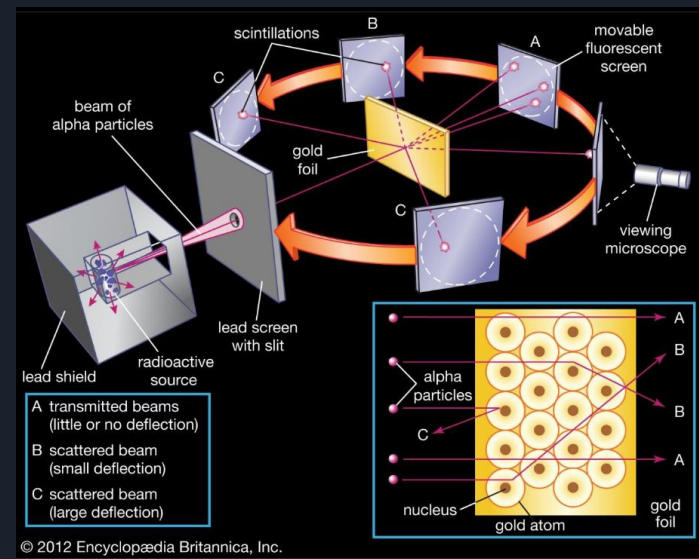
Hans Geiger



Ernest Marsden



Ernest Rutherford

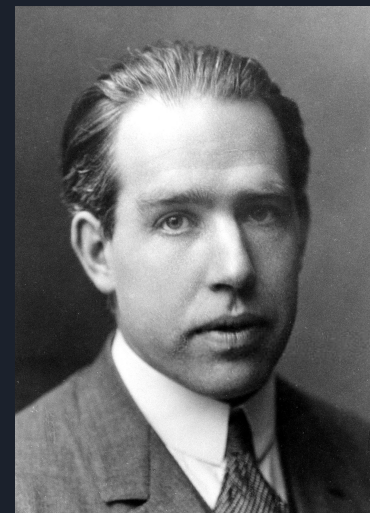


Představy o struktuře hmoty (3)

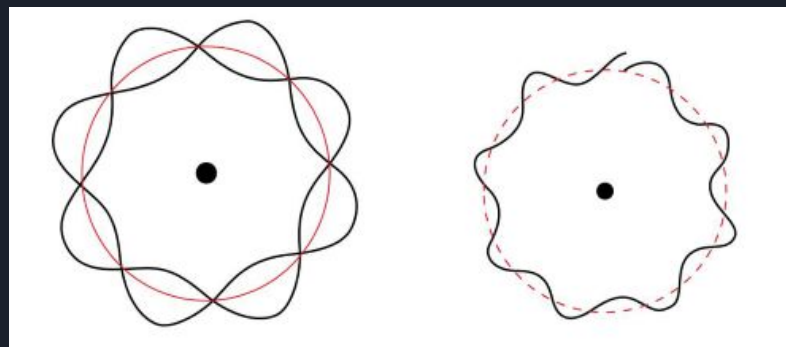
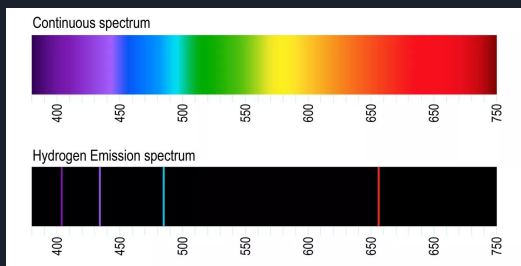
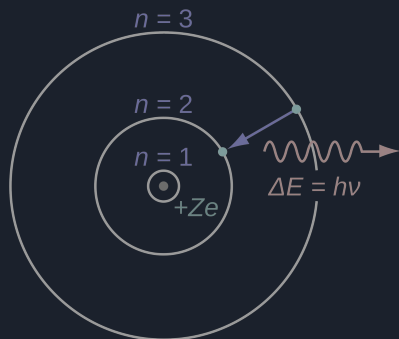
- **1913:** N. Bohřův model atomu.
 - Pohybujícím se elektronům přísluší odpovídající de Broglieho vlna.
 - Elektron se v obalu může pohybovat pouze po drahách, na kterých se vlna uzavírá, a neztrácí přitom samovolně energii.
 - Přechody mezi hladinami jsou možné pouze při přijetí/vyzáření kvanta energie (fotonu).
- **1920:** E. Rutherford - objev protonu.
- **1932:** J. Chadwick - objev neutronu.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$n\lambda = 2\pi r$$

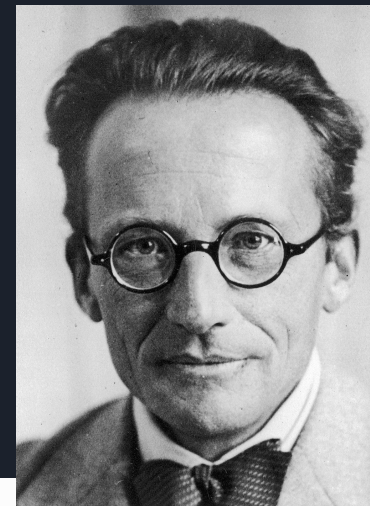


Niels Bohr

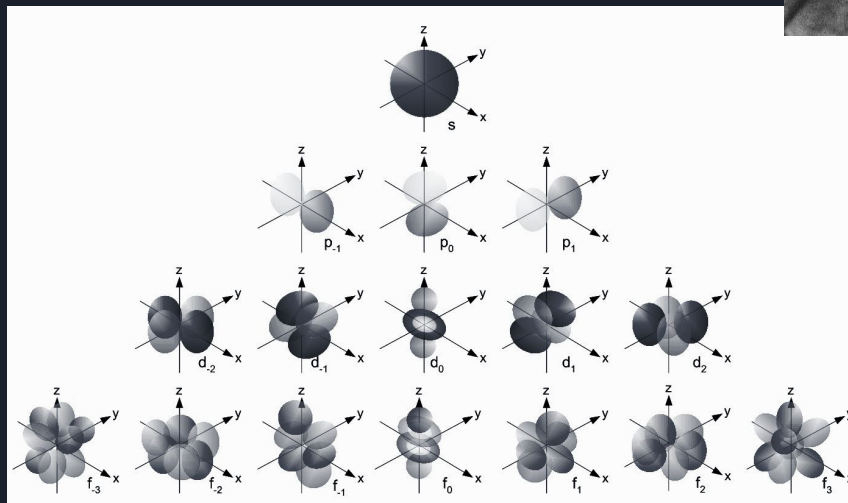
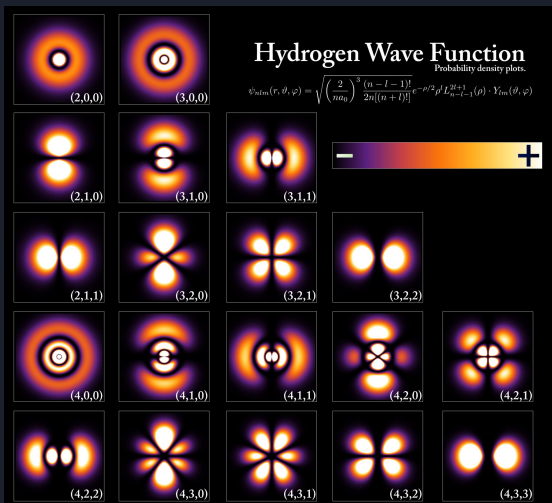


Představy o struktuře hmoty (4)

- E. Schrödinger - kvantově-mechanický model.
 - Elektron je popisován vlnovou funkcí - nelze jej lokalizovat v prostoru, lze určit pouze pravděpodobnost jeho výskytu.
 - Oblast s vysokou pravděpodobností výskytu = elektronový orbital.
 - Stav elektronu dán jeho kvantovými čísly.

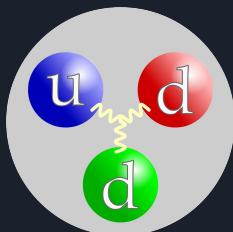


Erwin Schrödinger

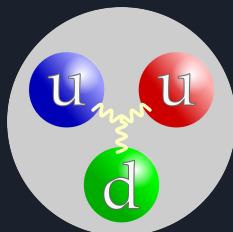


Představy o struktuře hmoty (4)

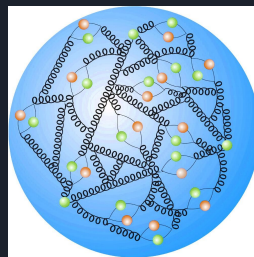
- Zkoumání struktury protonu a neutronu.
- **1964:** M. Gell-Mann a G. Zweig - předpověď existence kvarků.
- Počátek éry objevů na urychlovačích:
 - **60. léta:** objev mnoha částic považovaných za elementární - snahy o systematizaci (částicová zoo).
 - **1969:** objev kvarků u (up), d (down), s (strange),
 - **1974:** objev kvarku c (charm),
 - **1977:** objev kvarku b (bottom),
 - **1995:** objev kvarku t (top).
- Objevy bosonů:
 - **1979:** gluon - nositel silné jaderné interakce,
 - **1983:** Z^0 , W^+ , W^- - nositelé slabé jaderné interakce.



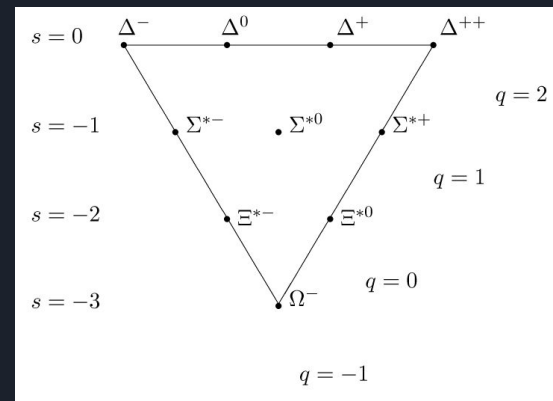
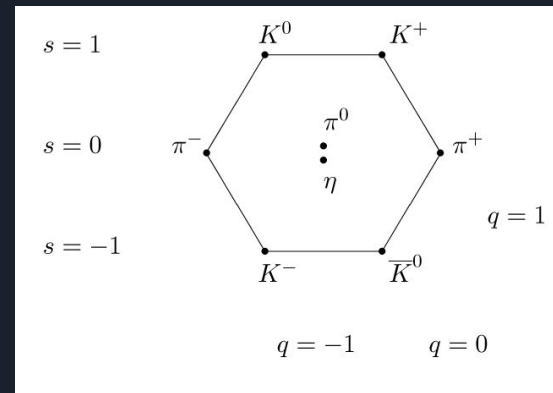
Neutron



Proton

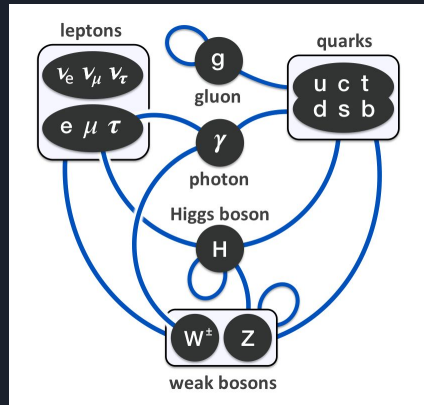
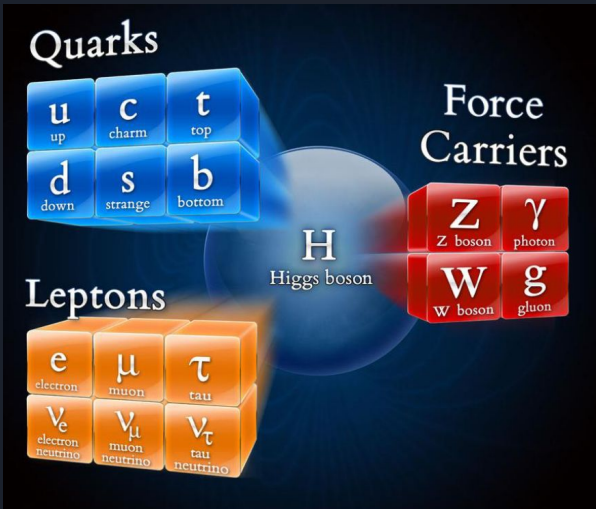


Také proton



Představy o struktuře hmoty (5)

- Současné poznání je shrnuto v tzv. Standardním modelu elementárních částic (není finální).
 - Veškerá hmota je složena z 6 kvarků a 6 leptonů.
 - Částice na sebe působí silami prostřednictvím bosonů.
 - Matematicky zapsáno ve formě Lagrangianu.
- **2012:** nejnovější přírůstek - Higgsův boson objeven experimenty CMS a ATLAS na urychlovači LHC.

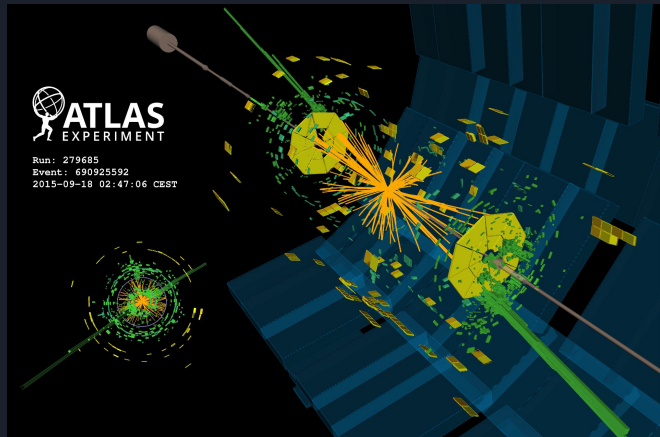


$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\mu g_a^\mu g_a^\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g_a^\mu g_b^\mu g_c^\mu - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc}f^{ade}g_a^\mu g_b^\mu g_c^\mu g_d^\mu - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\nu^\mu \partial_\mu Z_\nu^\mu - \frac{1}{24}M^2 Z_\nu^\mu Z_\nu^\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{cw}(\partial_\mu Z_\nu^\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^\mu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\nu^\mu (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)) - \\
 & ig_{sw}(\partial_\mu A_\nu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\nu (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + g^2 c_w^2 (Z_\nu^\mu W_\mu^+ Z_\nu^\mu W_\nu^- - \\
 & Z_\nu^\mu Z_\nu^\mu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\nu^\mu W_\mu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{\Lambda^2} + \frac{2M}{\Lambda} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^2}{\Lambda^2} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & gMW_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g\frac{M}{\Lambda} Z_\nu^\mu Z_\nu^\mu H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w} (Z_\nu^\mu (H \partial_\nu \phi^0 - \phi^0 \partial_\nu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\nu^\mu \partial_\nu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\nu \phi^- - W_\mu^- \partial_\nu \phi^+) - ig\frac{M}{c_w} Z_\nu^\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig_{sw} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\nu^\mu (\phi^+ \partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu \phi^+) + ig_{sw} A_\mu (\phi^+ \partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\nu^\mu Z_\nu^\mu (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{M}{c_w} Z_\nu^\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig\frac{M}{c_w} Z_\nu^\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{M}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\nu^\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_\lambda \lambda_{ij}^2 (\bar{q}_i^\mu \gamma^\mu q_j^\mu) g_\mu^2 - e^2 (\gamma \partial + m_e^2) e^2 - \bar{\nu}^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) \nu^2 - \bar{u}_j^2 (\gamma \partial + \\
 & m_u^2) u_j^2 - \bar{d}_j^2 (\gamma \partial + m_d^2) d_j^2 + ig_{sw} A_\mu (-e^2 \bar{\nu}^2 \gamma^\mu \nu^2 + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^2 \gamma^\mu u_j^2) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^2 \gamma^\mu d_j^2)) + \\
 & \frac{1}{2}ig_{sw} Z_\nu^\mu \{ (\bar{\nu}^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^2) + (e^2 \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^2) + (\bar{d}_j^2 \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^2) + \\
 & (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^2) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^\pm ((\bar{\nu}^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep} \nu^c) + (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda k} d_j^2)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^\pm ((e^c U^{lep} \nu^c) \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^2) + (\bar{d}_j^2 C_{\lambda k}^+ \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^2) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (-m_e^c (\bar{\nu}^2 U^{lep} \nu^c) (1 - \gamma^5) e^2) + m_\nu^c (\bar{\nu}^2 U^{lep} \nu^c) (1 + \gamma^5) e^2) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_\nu^c (e^2 U^{lep} \nu^c) (1 + \gamma^5) \nu^2) - m_\nu^c (e^2 U^{lep} \nu^c) (1 - \gamma^5) \nu^2) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{M}{\Lambda} H (e^2 e^2) + \frac{ig}{2} \frac{M}{\Lambda} \phi^0 (\bar{\nu}^2 \gamma^\mu \nu^2) - \frac{ig}{2} \frac{M}{\Lambda} \phi^0 (e^2 \gamma^\mu e^2) - \frac{1}{4} \nu_\lambda M_{\lambda\lambda}^R (1 - \gamma_5) \nu_\lambda - \\
 & \frac{1}{4} \nu_\lambda M_{\lambda\lambda}^R (1 - \gamma_5) \nu_\lambda + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_u^c (\bar{u}_j^2 C_{\lambda k} (1 - \gamma^5) d_j^2) + m_\nu^c (\bar{u}_j^2 C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_j^2) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^c (\bar{d}_j^2 C_{\lambda k}^+ (1 + \gamma^5) u_j^2) - m_\nu^c (\bar{d}_j^2 C_{\lambda k}^+ (1 - \gamma^5) u_j^2) - \frac{g}{2} \frac{M}{\Lambda} H (\bar{u}_j^2 u_j^2) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{M}{\Lambda} H (\bar{d}_j^2 d_j^2) + \frac{ig}{2} \frac{M}{\Lambda} \phi^0 (\bar{u}_j^2 \gamma^5 u_j^2) - \frac{ig}{2} \frac{M}{\Lambda} \phi^0 (\bar{d}_j^2 \gamma^5 d_j^2) + G^a \partial^a G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b G_c^\mu + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^\pm (\partial_\mu \bar{X}^0 X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^\pm (\partial_\mu \bar{X}^- X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^+) + ig_{cw} W_\mu^\pm (\partial_\mu \bar{X}^0 X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^+) + ig_{sw} W_\mu^\pm (\partial_\mu \bar{X}^- X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^+) + ig_{cw} Z_\nu^\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^0 \phi^+ - \bar{X}^0 X^0 \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^0 \phi^+ - \bar{X}^0 X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

Metody zkoumání

- Měření často nelze provádět přímo na částici, je třeba pozorovat její interakce.
- Sledujeme změny a usuzujeme na předchozí stav.

- Přechody (energetické hladiny atomu vodíku).
- Rozpady (radioaktivní prvky, rozpad neutronu).
- Srážky (urychlovače, kosmické záření).



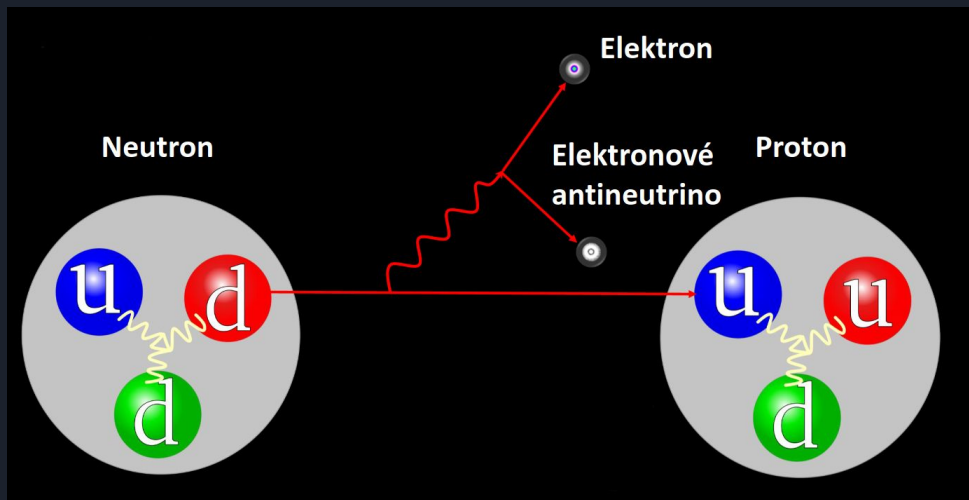
Rozpad neutronu

- Volné neutrony (ne v jádře) jsou nestabilní a rozpadají se ($\tau \sim 15$ min).
 - Přeměna kvarku d na kvark u .
 - Prostřednictvím bosonu W^- .
 - Změna ve stabilní proton ($\tau > 10^{34}$ let).

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

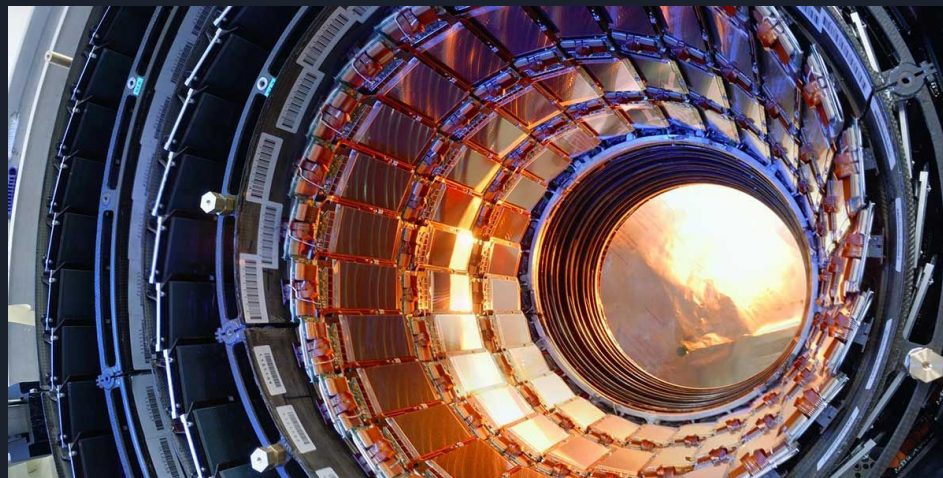
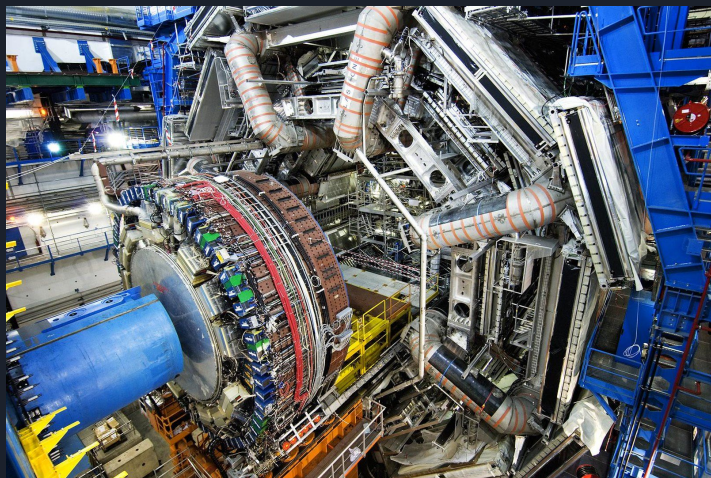
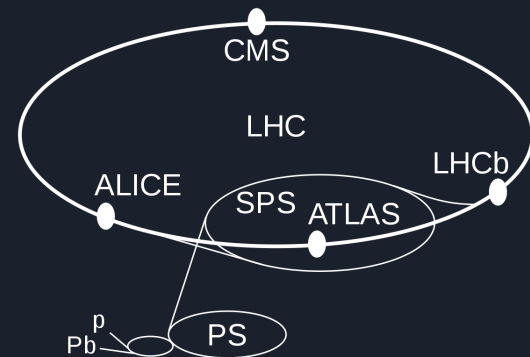
$$d^{-\frac{1}{3}} \rightarrow u^{\frac{2}{3}} + W^-$$

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$



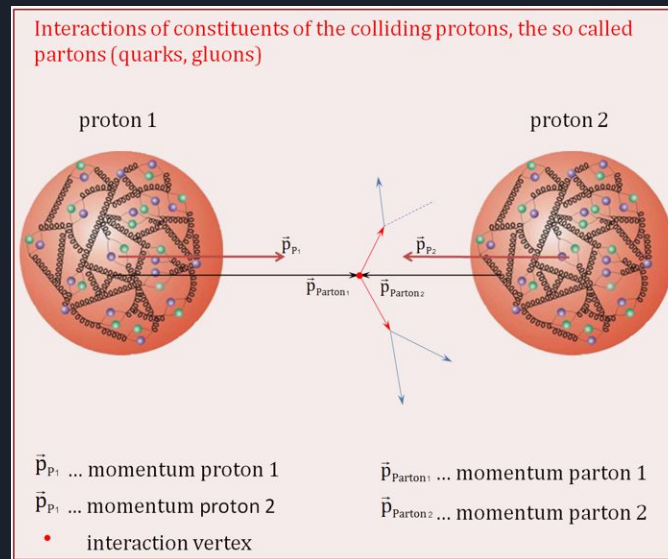
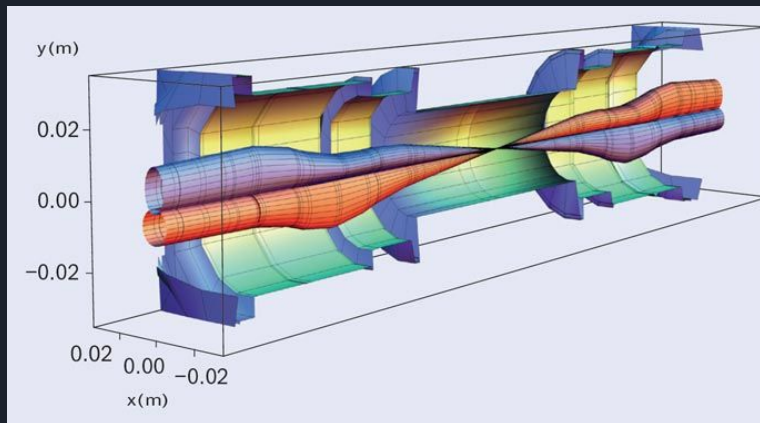
Časticové srážky

- Podle energie srážejících se částic může vzniknout nová částice.
 - Nutnost částice urychlit na velmi vysoké energie.
- Nové částice nemusí žít dlouho → detektory poblíž místa srážky.
- Pro zajímavé a exotické procesy potřebujeme mnoho srážek.



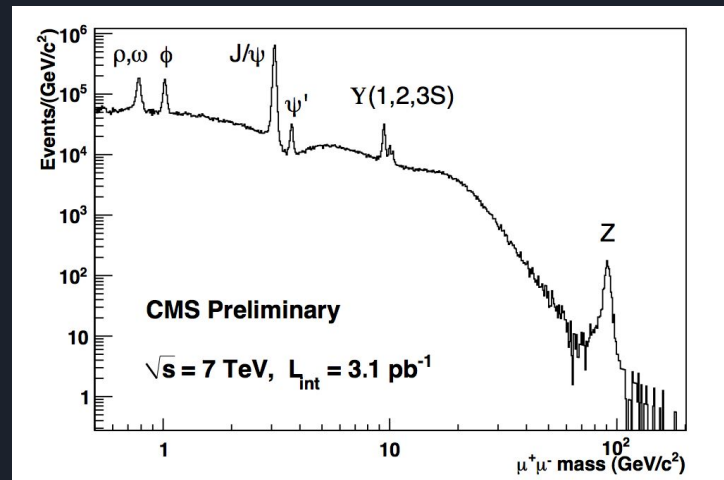
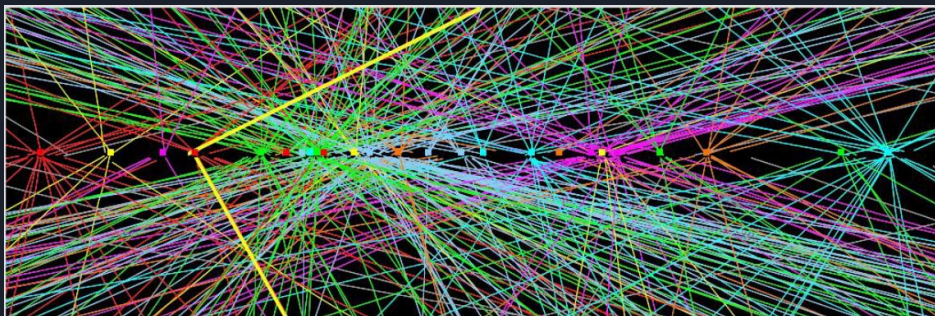
Srážky protonů na LHC

- Na LHC se sráží shluky protonů.
 - Každých 25 ns (40 MHz).
 - Shluky 10^{10} protonů.
 - Lokální teplota 10^{16} K.
 - Průměrně 30 interakcí.
- Při srážce protonů interagují jednotlivé kvarky nebo gluony (partony).



Analýza dat ze srážek

- Obrovské množství interakcí, zajímají nás ale jen některé.
- Hledání signálu v šumu (pozadí).
- Částice se objevují jako kopečky, píky na konkrétních energiích (odpovídající invariantní hmotě).
- Různé techniky - jednoduché prahy až AI a neuronové sítě.



Rozpadové kanály

- Vzniklá částice může projít různými ději, rozpadnout se různými způsoby.
- Pravděpodobnosti jednotlivých dějů definovány principy kvantové mechaniky, lze je spočítat.
- Z boson:
 - 10% případů - pár lepton-antilepton
 - 20% případů - pár neutrino-antineutrino
 - 70% případů - pár kvark-antikvark → vznikají jety
- Higgsův boson: rozpad na dva fotony nebo pár bosonů Z (jeden s nižší energií)
 - $125 \text{ GeV} < 91 \text{ GeV} + 91 \text{ GeV}$
 - $125 \text{ GeV} = 91 \text{ GeV} + 34 \text{ GeV}$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H \rightarrow ZZ^*$$

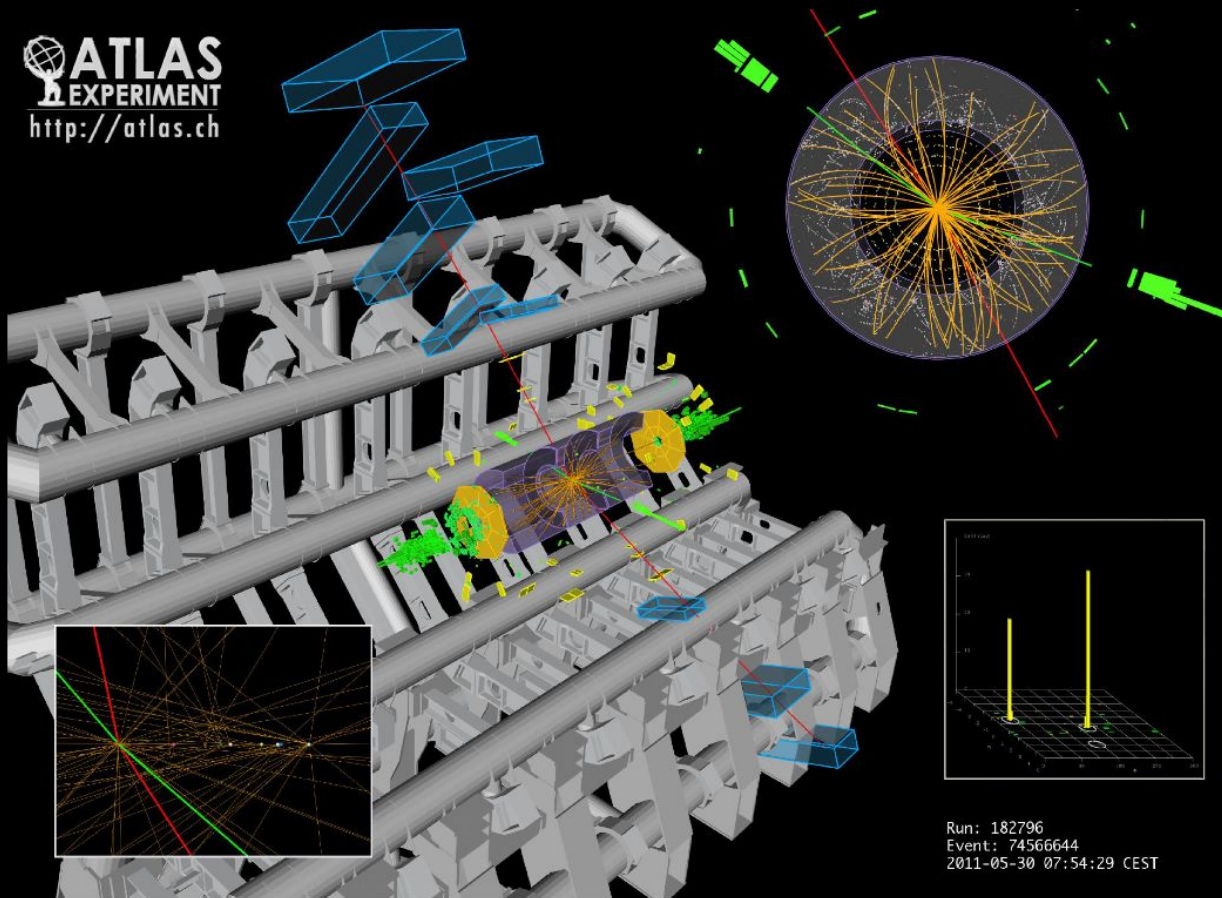
$$Z \rightarrow e^+ + e^-$$

$$Z \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$$

$$Z \rightarrow q + \bar{q}$$

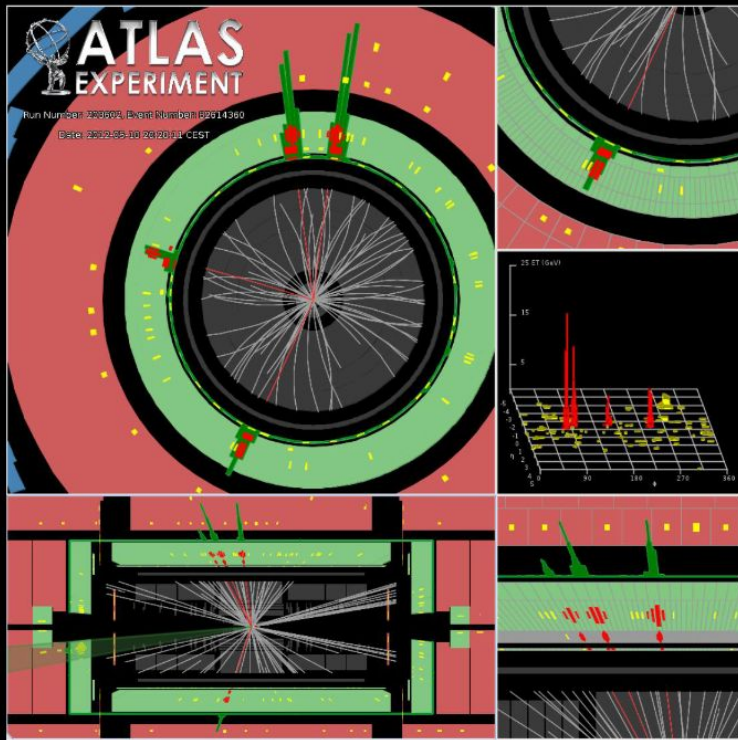
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ee \mu \mu$

 ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

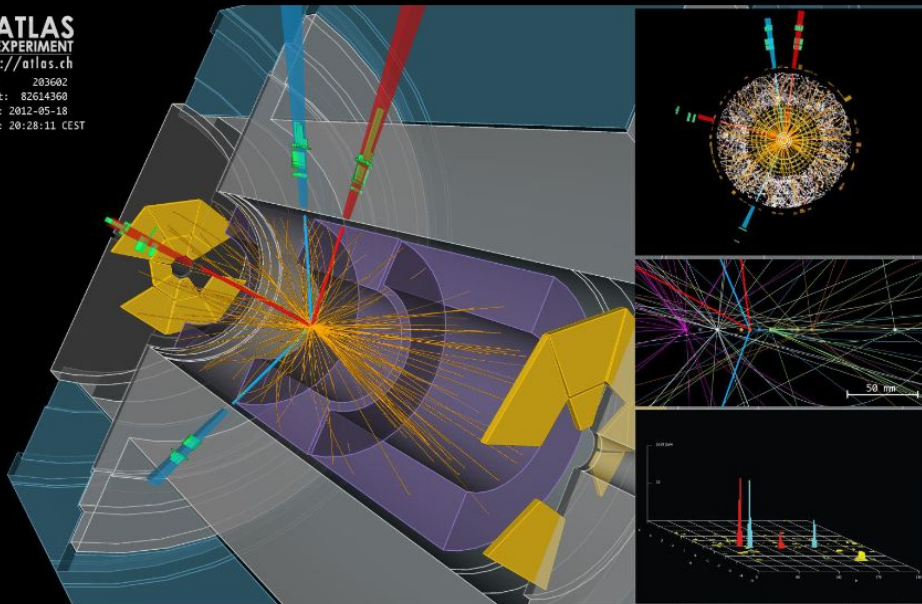


Run: 182796
Event: 74566644
2011-05-30 07:54:29 CEST

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

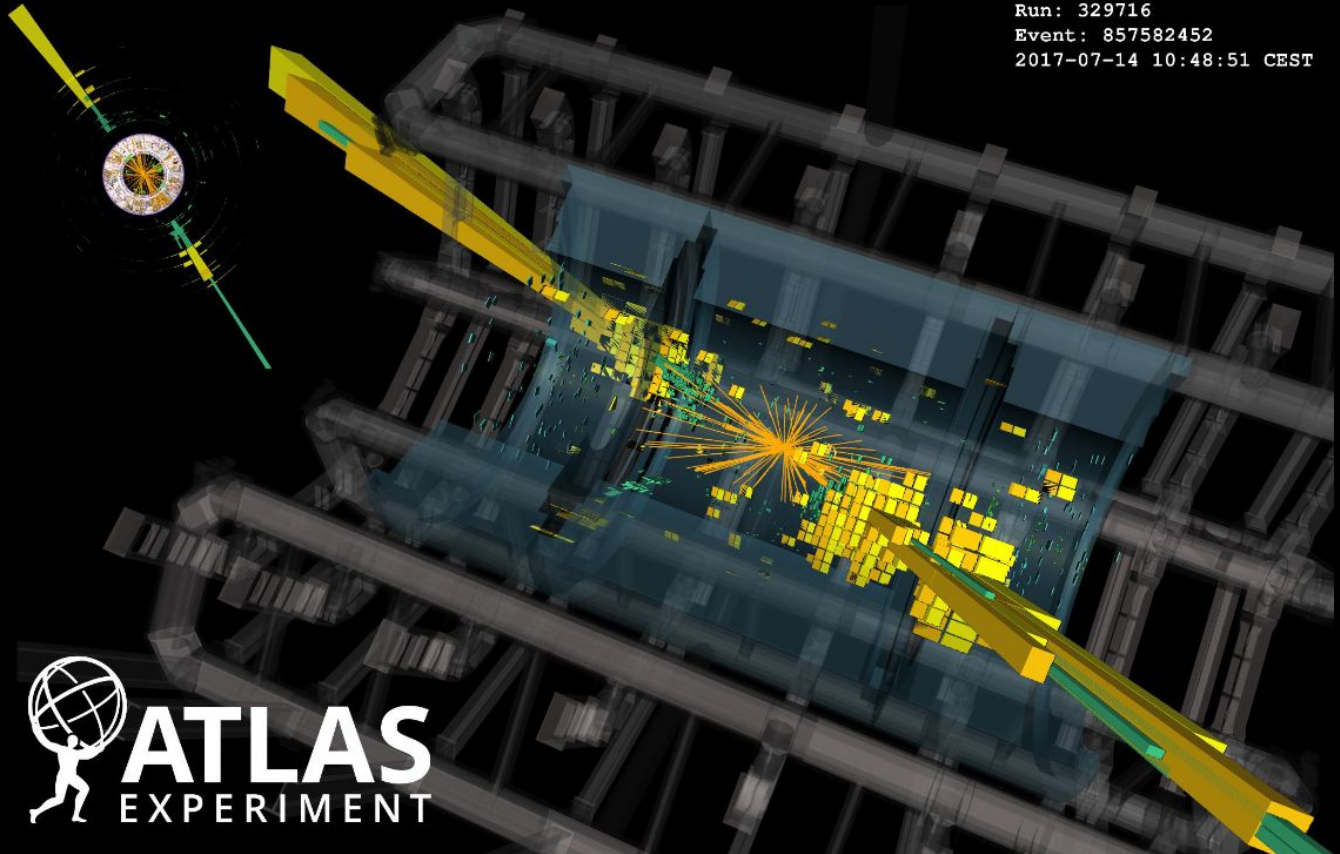


ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>
Run: 203602
Event: 82614360
Date: 2012-05-18
Time: 20:28:11 CEST



pp \rightarrow jety

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



 **ATLAS**
EXPERIMENT

Díky za pozornost!