

Částicová fyzika

- cesta za hranice selského rozumu

Jiří Dolejší, Ústav částicové a jaderné fyziky MFF UK

12. 4. 2021, U3V

Dnešní program:

- Stručně o čem budeme mluvit
- Částicová fyzika – minimum pro vzdělance 21. století
- Srážka koumáka a mikrosvěta, aneb kde „selský rozum selhává“
- Je to fyzika nedávné minulosti, dneška a zítřka

Dnešní program:

- Stručně o čem budeme mluvit
- Částicová fyzika – minimum pro vzdělance 21. století
- Srážka koumáka a mikrosvěta, aneb kde „selský rozum selhává“
- Je to fyzika nedávné minulosti, dneška a zítřka

Svět částic

THE STANDARD MODEL OF FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of $\hbar$, which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is $1.60 \times 10^{-19} \text{ coulombs}$.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV/c}^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Neutrinos

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e , ν_μ , or ν_τ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite-mass neutrinos ν_1 , ν_2 , and ν_3 for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$ but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

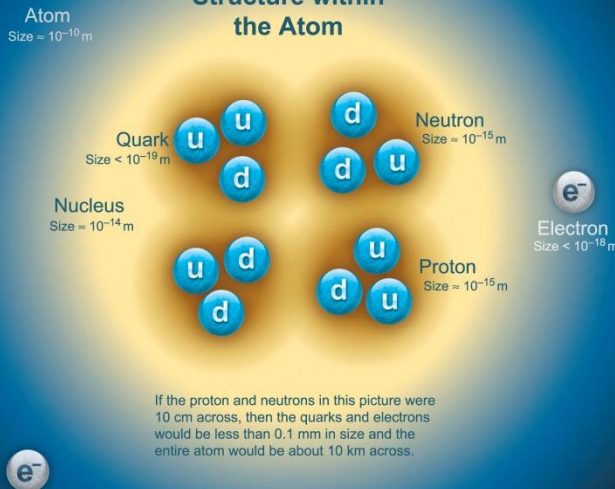
Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Orange shaded areas represent the cloud of gluons.

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W^- boson. This is neutron β (beta) decay.

An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and B^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\begin{cases} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.39	-1	Higgs Boson spin = 0		
W^+	80.39	+1	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
Z^0 Z boson	91.188	0	H Higgs	126	0

Higgs Boson

The Higgs boson is a critical component of the Standard Model. Its discovery helps confirm the mechanism by which fundamental particles get mass.

Color Charge

Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated – they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge.

Two types of hadrons have been observed in nature **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq . Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), and neutron (udd). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge 1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ ($u\bar{d}$), kaon K^- ($s\bar{u}$), and B^0 ($d\bar{s}$).

Learn more at ParticleAdventure.org



Unsolved Mysteries

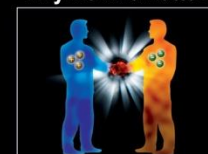
Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, microscopic black holes, and/or evidence of string theory.

Why is the Universe Accelerating?



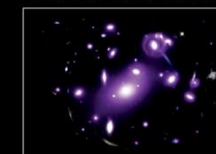
The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?



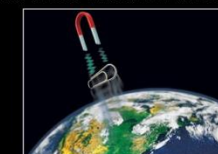
Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

What is Dark Matter?



Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

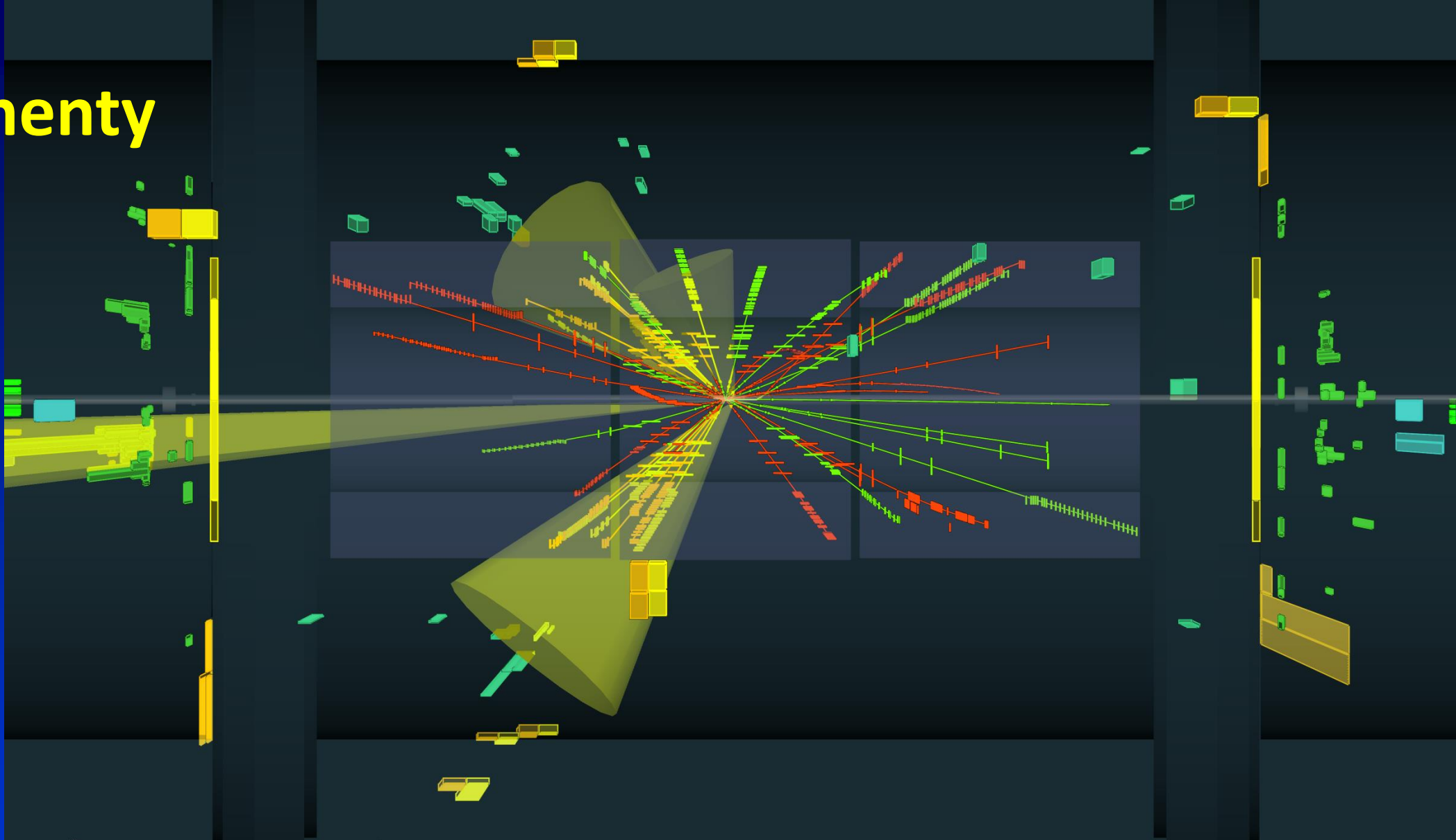
Are there Extra Dimensions?



An indication for extra dimensions may be the extreme weakness of gravity compared with the other three fundamental forces (gravity is so weak that a small magnet can pick up a paper clip overwhelming Earth's gravity).

<http://www.cpepphysics.org/>

Experimenty



Jet Event at 2.36 TeV Collision Energy

2009-12-14, 04:30 CET, Run 142308, Event 482137

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

Urychlovače



Laboratoře



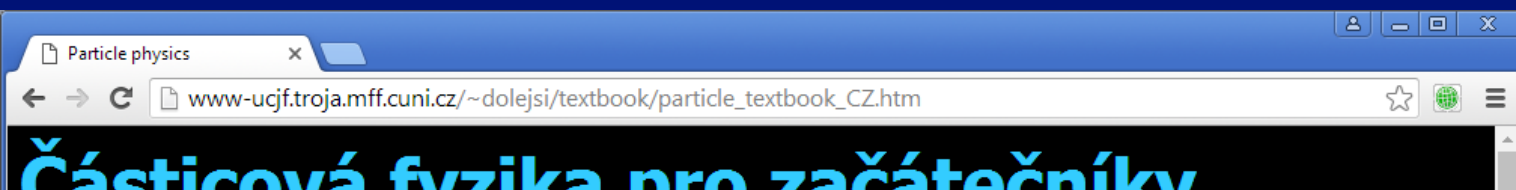
Lidi



4. 7. 2012

Současný pohled na jednu oblast fyziky ... „Standardní model“

http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~dolejsi/textbook/particle_textbook_CZ.htm



Částicová fyzika pro začátečníky
psaná fyziky pro středoškolské kantory a zvědavé studenty
Cílem je vytvořit most mezi popularizačními materiály pro širokou veřejnost a nepoučené st poskytnout zvláště učitelům materiál, který mohou využít ve svých hodinách, doplňovat, mo

Rozsah a podoba:

- ♦ zhruba 6 kapitol (viz níže), z nichž každá reprezentuje jednu nebo více lekcí ve škole nebo příležitostech.
- ♦ ppt/pdf/ps prezentace nebo html stránky, které lze publikovat na WWW nebo distribuovat animace musí být postradatelné).
- ♦ možná v několika různých stylech podle preferencí a zkušeností různých autorů, ale s jas do této oblasti fyziky
- ♦ pokud možno víceúrovňová, dovolující základní přehled při povrchním čtení a poskytující je na žlutých stránkách, podrobnější či náročnější doplňky jsou na modrých stránkách)
- ♦ v [anglické verzi](#) pro mezinárodní diskusi, v národních verzích pro usnadnění přístupu v da

Varování:

Po značnou dobu, ne-li stále, bude tento projekt ve stadiu rozpracovanosti. To znamená, že budou podle poznámek čtenářů a uživatelů doplňovány, opravovány a jinak modifikovány. nebude identická česká a anglická verze.

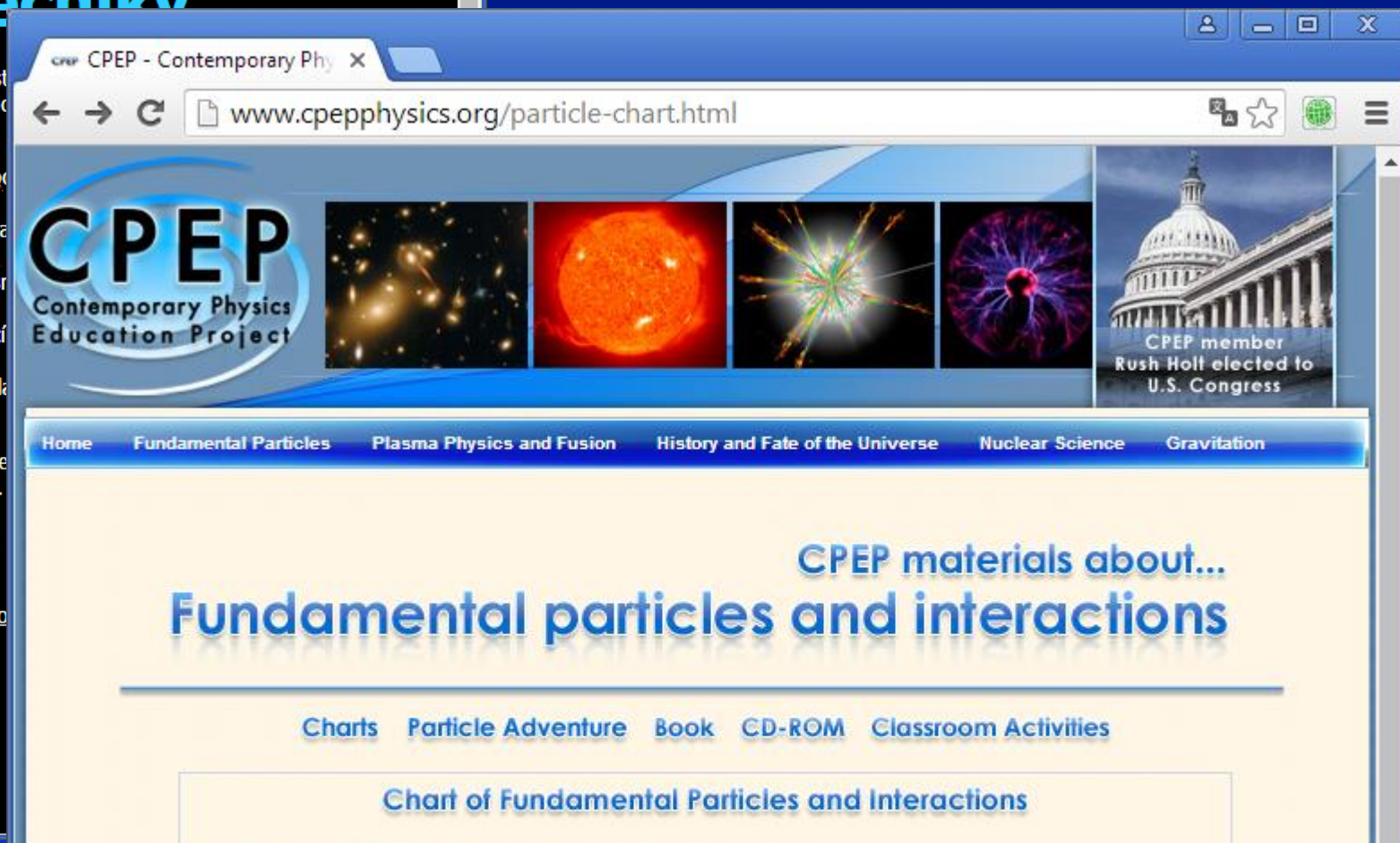
Kapitola 1. Jaký je současný standardní model mikrosvěta?

- relevantní škály
- atomy, jádra, částice, ilustrace procesů v mikrosvětě, leptony, kvarky, interakce, teorie, co
- plakát o standardním modelu, jeho druhá strana

Kapitola 2. Typické uspořádání experimentu ve fyzice částic

- účinný průřez, trocha kinematiky, Rutherfordův experiment
- proč jsou potřeba vysoké energie, urychlovač
- detektory částic a jejich principy

Kapitola 3. Jak jsme dospěli ke standardnímu modelu?



Dnešní program:

- Stručně o čem budeme mluvit
- Částicová fyzika – minimum pro vzdělance 21. století
- Srážka koumáka a mikrosvěta, aneb kde „selský rozum selhává“
- Je to fyzika nedávné minulosti, dneška a zítřka

Atom a jeho části

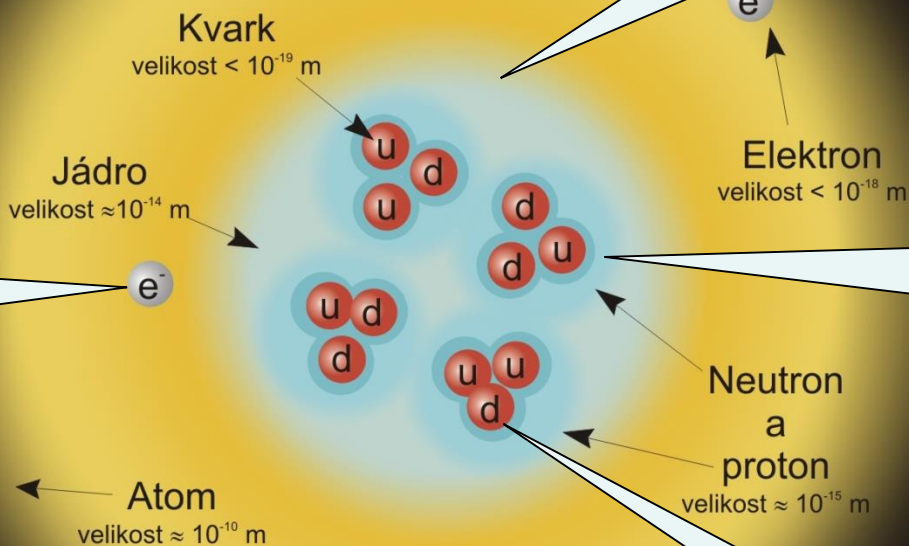
Atomisté - představa o atomech jako o nedělitelných stavebních kamenech hmoty.

Objev jádra E. Ruthefordem v roce 1911
(Jádro by mělo být nakreslené daleko menší, s průměrem menším než 0,0001 průměru atomu)

Struktura atomu

Objev elektronu (Thomson 1897) - Thomsonův model atomu (1903).

Objev protonu (E. Rutheford 1916) a neutronu (J. Chadwick 1932).



Objev kvarků 1964.

Kvarky

Během let, kdy fyzikové používali urychlovače ke studiu srážek, objevili postupně více než stovku dosud neznámých částic. V roce 1964 vyslovili Gell-Mann a Zweig novou revoluční myšlenku, že téměř všechny částice jsou složeny z malého počtu druhů ještě menších objektů nazvaných kvarky, které musí mít elektrické náboje $+2/3$ a $-1/3$ náboje protonu. Pro takovéto zlomkové náboje nebyl tehdy znám žádný důkaz.

Kvarky		spin = 1/2	
Vůně		Přibližná hmotnost GeV/c ²	Elektrický náboj
u	up	0.003	2/3
d	down	0.006	-1/3
C	charm	1.3	2/3
S	strange	0.1	-1/3
t	top	175	2/3
b	bottom	4.3	-1/3

Teprve na konci šedesátých a na začátku sedmdesátých let ukázaly experimenty na urychlovačích, že kvarky s předpokládanými vlastnostmi skutečně existují, avšak zůstávají uvězněny uvnitř částic s celočíselným nábojem.

Důvěrně známý svět kolem nás je složen téměř jen z kvarků *u* a *d*. Existují i další čtyři kvarky - *s*, *c*, *b* a *t*. Ty mají větší hmotnost, jsou nestabilní a rodí se jen na urychlovačích nebo ve srážkách působených kosmickým zářením.

Leptony

Vedle kvarků existuje další třída šesti základních částic nazývaných **leptony**. Jejich nejznámějším příslušníkem je **elektron**. Další dva nabité leptony, **mion** (μ) a lepton **tau** (τ), se liší od elektronu pouze tím, že mají mnohem větší hmotnost a jsou nestabilní. Další tři leptony jsou těžko polapitelná **neutrino**, která nemají elektrický náboj a mají velmi malou hmotnost.

Elektron je první objevená elementární částici vůbec. Je stabilní, nerozpadá se.

Mion se chová velmi podobně jako elektron. Jeho hmotnost je $207m_e$. Doba života mionu je přibližně 2×10^{-6} s, potom se rozpadá na elektron a neutrino:
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Byl objeven v kosmickém záření za pomoci mlžné komory C. Andersonem v roce 1936.

Leptony		spin = 1/2	
Vůně		Hmotnost GeV/c^2	Elektrický náboj
ν_e	elektronové neutrino	$<10^{-8}$	0
e	elektron	0.000511	-1
ν_μ	mionové neutrino	<0.0002	0
μ	mion	0.106	-1
ν_τ	tauonové neutrino	<0.02	0
τ	tauon	1.777	-1

Všude tam, kde při různých slabých rozpadech částic vznikne elektron, vzniká i jeho neutrino (přesněji antineutrino).

Podobně jako elektronové neutrino doprovází při slabých rozpadech elektron, doprovází mionové neutrino mion a tauonové neutrino tauon. Tento fakt je příkladem zachování tzv. **leptonového čísla**.

Tauon je 3 484-krát těžší než elektron. Byl objeven v roce 1977 M. Perlem. Jde o nestabilní částici s dobou života 3×10^{-13} s. Rozpadá se na své lehčí dvojníky (elektron nebo mion) a neutrino.

Fermiony

Kvarky a leptony tvoří tři rodiny, vždy po dvou kvarcích a dvou leptonech. Leptony mají menší hmotnost než odpovídající kvarky. Obyčejná hmota je složená jen z kvarků u a d a elektronů, členů první rodiny.

Fermiony jsou tedy stavební kameny hmoty.

Fermiony jsou částice se spinem $1/2, 3/2, \dots$

Spin je vnitřní moment hybnosti částice. Udává se v násobcích $\hbar$, což je kvantová jednotka momentu hybnosti, kde $\hbar = h/2\pi = 6,58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Leptony		spin = 1/2	
Vůně		Hmotnost GeV/c^2	Elektrický náboj
ν_e	elektronové neutrino	$<10^{-8}$	0
e	elektron	0.000511	-1
ν_μ	mionové neutrino	<0.0002	0
μ	mion	0.106	-1
ν_τ	tauonové neutrino	<0.02	0
τ	tauon	1.777	-1

Kvarky		spin = 1/2	
Vůně		Přibližná hmotnost GeV/c^2	Elektrický náboj
u	up	0.003	2/3
d	down	0.006	-1/3
c	charm	1.3	2/3
s	strange	0.1	-1/3
t	top	175	2/3
b	bottom	4.3	-1/3

Elektrický náboj se vyjadřuje v násobcích náboje protonu. V soustavě SI je elektrický náboj protonu $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Bosony

Sem patří taky
Higgsův boson!

Kvarky a leptony jsou základní stavební kameny hmoty. Jaké síly je však drží pohromadě? Všechny síly jsou projevem interakcí částic. Existují čtyři základní typy interakcí: gravitační, elektromagnetická, silná a slabá. Síly jsou důsledkem výměny dalších fundamentálních částic nazývaných **bosony**. Pro každý typ síly existuje jeden nebo více „nosičů“, které zprostředkovávají interakci. Dobře známý foton je například boson, který zprostředkovává elektromagnetickou sílu.

Nosiče sil

Sjednocená elektroslabá spin=1		
Název	Hmotnost GeV/c ²	Elektrický náboj
γ foton	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.188	0

Na konci šedesátých let se podařilo vytvořit teorii sjednocující elektro-magnetické a slabé interakce, odpovídající např. za radioaktivitu beta - teorii **elektroslabých interakcí**.

Bosony jsou částice se spinem 0, 1, 2, ...

Silná (barevná) spin=1		
Název	Hmotnost GeV/c ²	Elektrický náboj
g gluon	0	0

Každý kvark nese jednu ze tří hodnot „silného náboje“, kterému se také říká „**barevný náboj**“. Tyto barevné náboje nemají nic společného s barvami ve viditelném světle. **Gluony mají osm možných hodnot barevného náboje**. Stejně jako elektricky nabité částice interagují tak, že si vyměňují fotony, v silných interakcích interagují barevně nabité částice prostřednictvím výměny gluonů. Leptony, fotony, W a Z bosony silně neinteragují a nemají tedy žádný barevný náboj.

Kvarky uvězněné v mezonech a baryonech

Kvarky a gluony není možné od sebe odtrhnout, jsou uvězněny v barevně neutrálních částicích nazývaných **hadrony**. Toto uvěznění (vazba) je důsledkem mnohonásobné výměny gluonů mezi barevně nabitými kvarky i gluony samými. Když se barevně nabitě částice (kvarky, gluony) pokusíme oddělit, energie gluonového pole mezi nimi roste. Tato energie se nakonec přemění na další pár kvark-antikvark. Kvarky a antikvarky nakonec vytvoří hadrony, které pozorujeme. V přírodě existují dva typy hadronů: **mezony** $q\bar{q}$ a **baryony** qqq .

Fermiony

Baryony qqq a antibaryony $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryony jsou hadrony s poločíselným spinem. Existuje okolo 120 druhů baryonů.					
Symbol	Název	Kvarkové složení	Elektrický náboj	Hmotnost GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Bosony

Mezony $q\bar{q}$					
Mezony jsou hadrony s celočíselným spinem (bosony). Existuje okolo 140 druhů mezonů.					
Symbol	Název	Kvarkové složení	Elektrický náboj	Hmotnost GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	ro	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
B^0	B-nula	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Ke každému typu **částice** existuje odpovídající typ **antičástice** (označená pruhem nad příslušným symbolem dané částice). Částice a antičástice mají **stejnou hmotnost a spin**, ale **opačné náboje**. Některé elektricky neutrální bosony (např. Z^0 , γ a $\eta_c = c\bar{c}$, avšak nikoli $K^0 = d\bar{s}$) jsou samy sobě antičásticí.

Příliš mnoho „elementárních“ částic

Baryon Summary Table

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the status of baryons in the Review. Only the baryons with 3- or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established as baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For N , Δ , and Ξ resonances, the partial wave is indicated by the symbol $L_{2J,2J}$, where L is the orbital angular momentum (S , P , D , ...), I is the isospin, and J is the total angular momentum. For Λ and Σ resonances, the symbol is $L_{J,2J}$.

[illegible]

**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.

*** Existence ranges from very likely to certain, but further confirmation is desirable and/or quantum numbers, branching fractions, etc. are not well determined.

** Evidence of existence is only fair.

* Evidence of existence is poor.

Dosud objevené baryony a mezony.
Ani tak moc nejde o to, jaké jsou a jaké mají
vlastnosti, ale o poznání, že JE JICH MOC na to,
abychom je všechny nazývali elementární částice.

Meson Summary Table

See also the table of suggested $q\bar{q}$ quark-model assignments in the Quark Model section.

• Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established.

† Indicates that the value of J given is preferred, but needs confirmation.

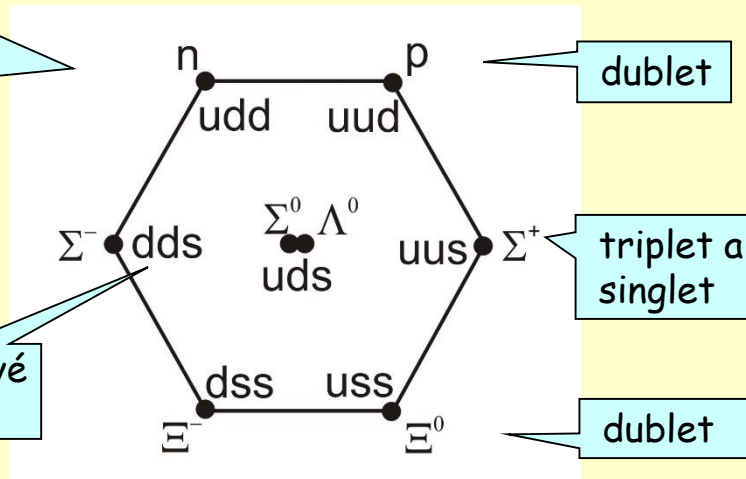
LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)		STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$)		BOTTOM ($B = \pm 1$)	
$J^G(J^PC)$	$J^G(J^PC)$	$J^G(J^PC)$	$J^G(J^PC)$	$J^G(J^PC)$	$J^G(J^PC)$
$\pi^\pm$ $1^-(0^-)$ π^0 $1^-(0^-)$ η $0^+(0^-)$ $f_0(600)$ $0^+(0^+)$ $\rho(770)$ $1^+(1^-)$ $\omega(782)$ $0^-(1^-)$ $\eta'(958)$ $0^+(0^-)$ $f_0(980)$ $0^+(0^+)$ $a_0(980)$ $1^-(0^+)$ $\phi(1020)$ $0^-(1^-)$ $h_1(1170)$ $0^-(1^-)$ $f_4(1235)$ $1^+(1^-)$ $a_1(1260)$ $1^-(1^+)$ $f_2(1270)$ $0^+(2^+)$ $f_1(1285)$ $0^+(1^+)$ $\eta(1295)$ $0^+(0^-)$ $\pi(1300)$ $1^-(0^-)$ $a_2(1320)$ $1^-(2^+)$ $f_0(1370)$ $0^+(0^+)$ $h_1(1380)$ $?^-(1^+)$ $\pi_1(1400)$ $1^-(1^-)$ $\eta(1405)$ $0^+(0^-)$ $f_1(1420)$ $0^+(1^+)$ $\omega(1420)$ $0^-(1^-)$ $f_2(1430)$ $0^+(2^+)$ $a_0(1450)$ $1^-(0^+)$ $\rho(1450)$ $1^+(1^-)$ $\eta(1475)$ $0^+(0^-)$ $f_0(1500)$ $0^+(0^+)$ $f_1(1510)$ $0^+(1^+)$ $f_2'(1525)$ $0^+(2^+)$ $f_2(1565)$ $0^+(2^+)$ $h_1(1595)$ $0^-(1^-)$ $\pi_1(1600)$ $1^-(1^+)$ $a_1(1640)$ $1^-(1^+)$ $f_2(1640)$ $0^+(2^+)$ $\eta_2(1645)$ $0^+(2^+)$ $\omega(1650)$ $0^-(1^-)$ $\omega_3(1670)$ $0^-(3^-)$	$\pi_2(1670)$ $1^-(2^-)$ $\phi(1680)$ $0^-(1^-)$ $\rho_3(1690)$ $1^+(3^-)$ $\rho(1700)$ $1^+(1^-)$ $a_2(1700)$ $1^-(2^+)$ $f_0(1710)$ $0^+(0^+)$ $\eta(1760)$ $0^+(0^-)$ $\pi(1800)$ $1^-(0^-)$ $f_2'(1810)$ $0^+(2^+)$ $\phi_3(1850)$ $0^-(3^-)$ $\eta_2(1870)$ $0^+(2^-)$ $\rho(1900)$ $1^+(1^-)$ $f_2(1910)$ $0^+(2^+)$ $f_2(1950)$ $0^+(2^+)$ $\rho_3(1990)$ $1^+(3^-)$ $f_2(2010)$ $0^+(2^+)$ $f_0(2020)$ $0^+(0^+)$ $a_4(2040)$ $1^-(4^+)$ $f_4(2050)$ $0^+(4^+)$ $\pi_2(2100)$ $1^-(2^-)$ $f_0(2100)$ $0^+(0^+)$ $f_2(2150)$ $0^+(2^+)$ $\rho(2150)$ $1^+(1^-)$ $f_0(2200)$ $0^+(0^+)$ $f_2(2220)$ $0^+(2^+)$ - or 4^+ $\eta(2225)$ $0^+(0^-)$ $\rho_3(2250)$ $1^+(3^-)$ $f_2(2300)$ $0^+(2^+)$ $f_4(2300)$ $0^+(4^+)$ $f_2(2340)$ $0^+(2^+)$ $\rho_3(2350)$ $1^+(5^-)$ $a_6(2450)$ $1^-(6^+)$ $f_6(2510)$ $0^+(6^+)$	$K^\pm$ $1/2(0^-)$ K^0 $1/2(0^-)$ K_S^0 $1/2(0^-)$ K_L^0 $1/2(0^-)$ $K_S^*(800)$ $1/2(0^+)$ $K^*(892)$ $1/2(1^-)$ $K_1(1270)$ $1/2(1^+)$ $K_1(1400)$ $1/2(1^+)$ $K^*(1410)$ $0^+(2^-)$ $K_S^*(1430)$ $1/2(0^+)$ $K_S^*(1430)$ $1/2(2^+)$ $K(1460)$ $1/2(0^-)$ $K_2(1580)$ $1/2(2^-)$ $K(1630)$ $1/2(?^?)$ $K_1(1650)$ $1/2(1^+)$ $K^*(1680)$ $1/2(1^-)$ $K_2(1770)$ $1/2(2^-)$ $K_3^*(1780)$ $1/2(3^-)$ $K_2(1820)$ $1/2(2^-)$ $K(1830)$ $1/2(0^-)$ $K_0^*(1950)$ $1/2(0^+)$ $K_S^*(1980)$ $1/2(2^+)$ $K_S^*(2045)$ $1/2(4^+)$ $K_2(2250)$ $1/2(2^-)$ $K_3(2320)$ $1/2(3^+)$ $K_S^*(2380)$ $1/2(5^-)$ $K_4(2500)$ $1/2(4^-)$ $K(3100)$ $?^?(?^?)$	$B^\pm$ $1/2(0^-)$ B^0 $1/2(0^-)$ $B^\pm/B^0$ ADMIXTURE $B^\pm/B^0/B_s^\pm/b$-baryon ADMIXTURE V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements B^* $1/2(1^-)$ $B_s^*(5732)$ $?^?(?^?)$		
				BOTTOM, STRANGE ($B = \pm 1, S = \pm 1$)	
				B_s^0 $0(0^-)$ $B_s^\pm$ $0(1^-)$ $B_{s,J}^*(5850)$ $?^?(?^?)$	
				BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm 1$)	
				$B_c^\pm$ $0(0^-)$	
				$c\bar{c}$	
				$\eta_c(1S)$ $0^+(0^-)$ $J/\psi(1S)$ $0^-(1^-)$ $\chi_{c0}(1P)$ $0^+(0^+)$ $\chi_{c1}(1P)$ $0^+(1^+)$ $h_{c1}(1P)$ $?^?(?^?)$ $\chi_{c2}(1P)$ $0^+(2^+)$ $\eta_c(2S)$ $0^+(0^-)$ $\psi(2S)$ $0^-(1^-)$ $\psi(3770)$ $0^-(1^-)$ $\psi(3836)$ $0^-(2^-)$ $\chi(3872)$ $?^?(?^?)$ $\psi(4040)$ $0^-(1^-)$ $\psi(4160)$ $0^-(1^-)$ $\psi(4415)$ $0^-(1^-)$	
				$b\bar{b}$	

Počátek kvarkového modelu

Postupně bylo objeveno velké množství baryonů a mezonů, viz. tabulky na předchozí straně. Fyzici se snažili v tomto „zvěřinci“ najít nějaký řád, podobně jako například periodickou tabulku prvků u atomů. Všimli si, že některé částice - například nám dobře známý neutron a proton - s podobnými vlastnostmi (stejný spin, téměř stejné hmotnosti, ale různý náboj) se chovají stejně v silných interakcích. Vzhledem k této interakci by tedy existovala pouze „jedna“ částice - nukleon. Podobně se chová i trojice pionů π^- , π^0 a π^+ . Takovýmto malým rodinám částic se říká multiplety - existují singlety, dublety (n, p), triplety (piony), ... V roce 1963 se podařilo tyto malé rodiny částic, jejichž hmotnosti se téměř neliší, uspořádat ještě do větších společenství - supermultipletů, ve kterých jsou hmotnosti částic stále velmi blízké. Kromě blízkých hmotností mají částice v těchto společenstvích vždy stejný spin. Uspořádání do těchto společenství lze dát hlubší matematický význam v rámci teorie grup a jejich reprezentací. Grupa, která se zde hodí, je $SU(3)$.

Jedním z takovýchto „společenství“ je **baryonový oktet a singlet**. Tvoří ho částice se spinem 1/2.

kvarkové složení

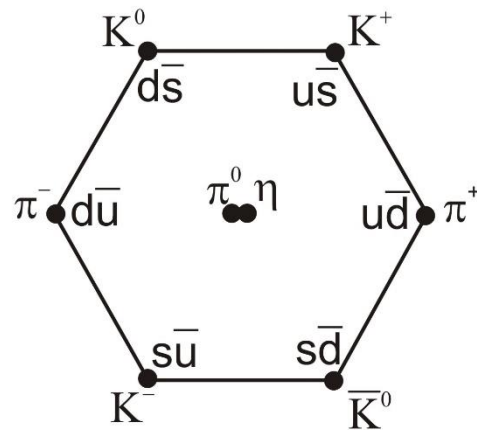


Jednotlivé rodiny se liší podivností*. Rozdíl hmotností mezi jednotlivými rodinami je maximálně 35%.

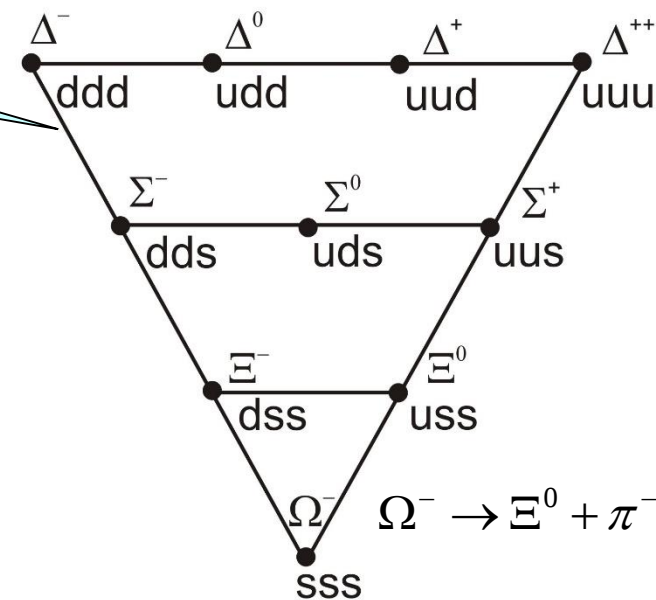
Podivnost je další vlastnost resp. kvantové číslo, které některé částice mají. V kvarkovém modelu je spojeno s kvarkem s.

Počátek kvarkového modelu

Mezonový oktet
tvoří částice se
spinem 0.



Baryonový dekuplet,
spin 3/2.



Jak jsme již řekli, uspořádání do těchto společenství, resp. poskládání hadronů z kvarků, je popsitelné pomocí teorie grup - reprezentace grupy SU(3) nabízejí oktety a singlet. Právě proto je grupa SU(3) vhodná pro popis osmičlenných společenství částic. Předpovídá ale i další multiplety, např. baryonový dekuplet. Symetrie neplatí úplně přesně, mezi hmotnostmi v oktetech jsou malé rozdíly.

Tato částice s podivností 3 byla předpovězena a pak teprve objevena v roce 1964 v Brookhavenu, což znamenalo potvrzení kvarkového modelu.

Kvarkový model, tj. „skládačka“ hadronů s podtextem grupy symetrie SU(3) se postupně rozvinul do dynamické teorie silných interakcí - kvantové chromodynamiky, o které se ještě zmíníme dále.

Síly a interakce

Zodpovědná za většinu rozpadů v přírodě.

Typická pro atomy, molekuly, strukturu pevných látek, je také schopna produkovat nové částice a způsobit rozpad některých částic.

Typická pro produkci nových částic nebo pro velmi rychlé rozpady, jádro drží pohromadě díky silné interakci.

Vlastnosti	Interakce		Silná	
	Gravitační	Slabá (Elektroslabá)	Základní	Zbytková
„Náboj“, na který působí:	hmota	vůně	elektrický náboj	barevný náboj
Částice, které ji cítí:	všechny	kvarky, leptony	elektricky nabitě	kvarky, gluony
Zprostředkující částice:	graviton (dosud neobjeven)	W^+ W^- Z^0	γ	gluony
Síla v poměru k elektromagnetické mezi dvěma u kvarky ve vzdálenosti 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
... a mezi dvěma protony v jádře 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60
	10^{-36}	10^{-7}	1	netýká se kvarků
			netýká se hadronů	20

Působí mezi všemi částicemi, ale v mikrosvětě je zanedbatelná.

Působí mezi všemi kvarky a leptony, ale pouze na velmi krátkých vzdálenostech, menších než 10^{-18} m.

Působí jen mezi nabitými částicemi. Zprostředkující částicí je nehmotný foton a proto mají elektromagnetické síly nekonečný dosah.

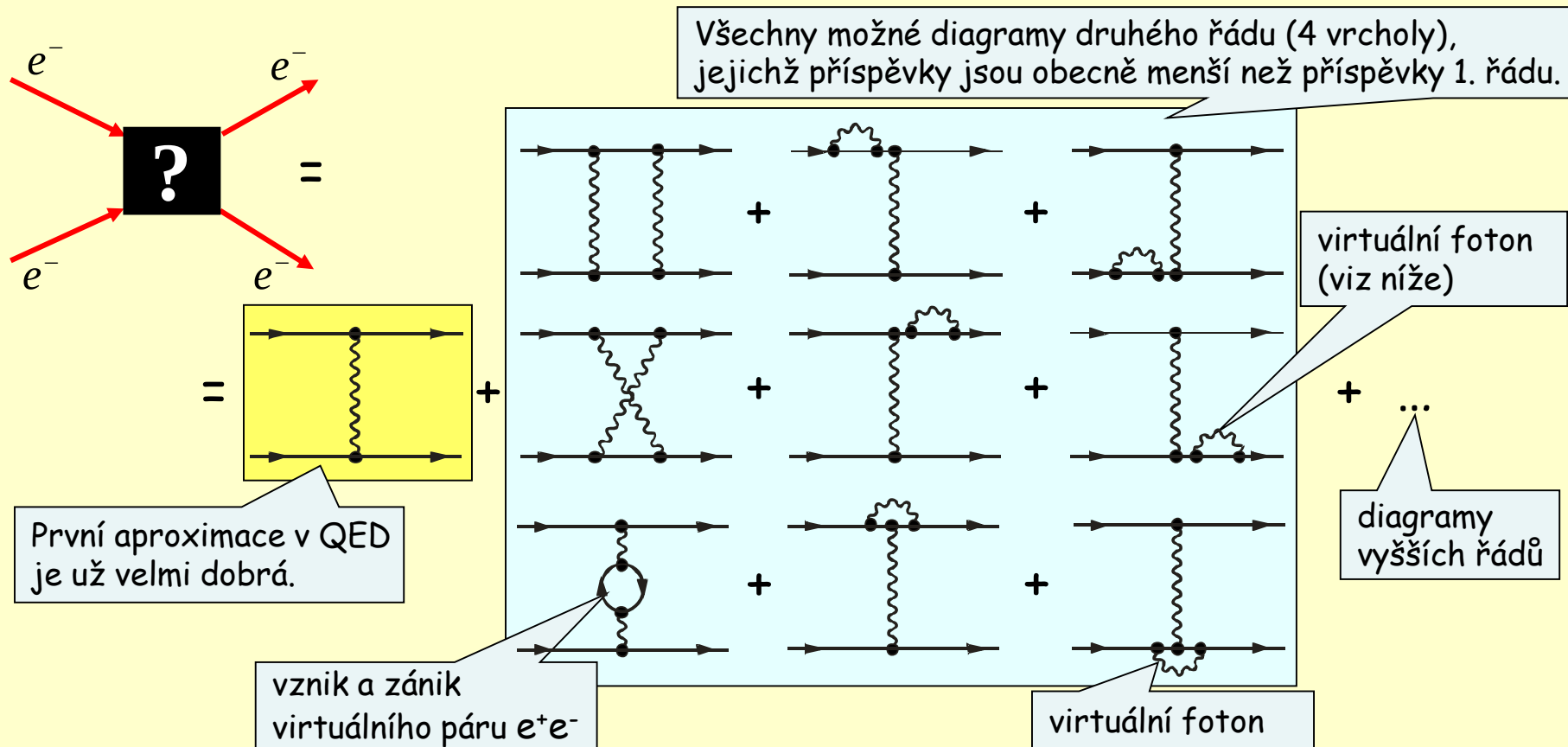
Silná vazba barevně neutrálních protonů a neutronů tvořících jádro je způsobena **zbytkovou silnou interakcí** mezi jejich barevnými složkami. Je to podobné jako zbytková elektromagnetická interakce, která váže elektricky neutrální atomy do molekul. Lze ji také chápat jako výměnu mezonů mezi hadrony.

Při popisu vzájemného působení objektů v makrosvětě se osvědčil pojem síly. V mikrosvětě častěji používáme univerzálnější pojem **interakce**, abychom mohli mluvit o celé plejádě procesů, které ve srážkách částic nastávají.

Feynmanovy diagramy - elektromagnetická interakce

Příkladem interakce, která dovoluje poruchový přístup a na které se celá tato technika ve čtyřicátých letech minulého století zrodila, jsou elektromagnetické interakce. Jejich teorii se říká kvantová elektrodynamika (QED).

Nejjednodušším příkladem děje, který musí kvantová elektrodynamika popsat, je interakce dvou elektronů. Podívejme se tedy na Feynmanovy diagramy, které vyplňují černou skříňku, do které dva elektrony vstupují a dva vystupují:



Feynmanovy diagramy

Když pořádně nevíme, co se v interakční oblasti děje, můžeme (a musíme) se spokojit s předpovědí toho, co bude výsledkem, tj. jaké částice z interakce vyletí a jaké budou jejich hybnosti. V kvantovém světě to nebudou striktní výpovědi, ale pravděpodobnosti. S tím ale už dávno umíme pracovat, pro srovnávání předpovědí teorie a výsledků experimentu používáme účinné průřezy.

Jakékoli výpočty v kvantové teorii pole jsou technicky velmi náročné. Ale i většina jiných vzrušujících lidských výtvorů dá spoustu práce. Například vytvořit realistickou sochu jistě není vůbec triviální. Sochař asi nejdřív uplácă cosi, co připomíná postavu a pak upřesňuje podobu, výraz, detaily. Řečeno fyzikální hantýrkou, postupuje **poruchově**. Nejdřív je tu **první aproximace**, hrubá představa. Pak **první oprava**, korekce, upřesnění (např. dáma, pán). Pak další a další korekce, opravy, „**členy poruchové řady**“. Snazší je situace, kdy několik málo oprav stačí k uspokojivému výsledku („**poruchová řada rychle konverguje**“), může se ale také stát, že ani nekonečné opravy nedávají hotové dílo („**poruchová řada nekonverguje**“).

Výpočty v kvantové teorii pole dramaticky ovlivnil Richard Feynman, který navrhl grafickou řeč ke znázorňování jednotlivých členů poruchového rozvoje - **Feynmanovy diagramy**. Jednotlivé členy reprezentují příspěvky při výpočtu pravděpodobnosti interakce.

Poruchová řada

Jednoduchým příkladem **poruchové řady** je Taylorův rozvoj, kterým můžeme rozvinout například funkci sinus v okolí 0 do nekonečné řady:

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} - \frac{x^{11}}{11!} + \dots$$

1. přiblížení 1. oprava ...

Pro představu si dosadíme za x 60° do prvních pěti členů rozvoje:

$$\sin 60^\circ = \sin \pi / 3 \cong \sin 1,047198 \cong$$

$$\begin{aligned} & \approx 1,047\ 198 \\ & - 0,191\ 397 \\ & + 0,010\ 495 \\ & - 0,000\ 274 \\ & + 0,000\ 004 \end{aligned}$$

5. přiblížení máme s přesností 10^{-6} .

3. přiblížení je už velmi dobré s přesností 1%.

Podobně můžeme napsat několik dalších rozvojů:

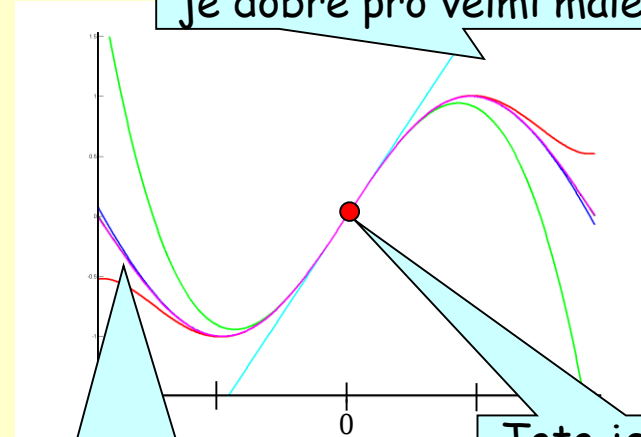
$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots \quad e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

$$\operatorname{tg} x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \frac{17x^7}{315} + \dots$$

Odvážní a poučení si spočítají rozvoj pro libovolnou funkci v bodě x_0 :

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \frac{f'''(x_0)}{3!}(x - x_0)^3 + \dots$$

Vidíme, že 1. přiblížení je dobré pro velmi malé hodnoty x .



5. přiblížení je velmi přesné na $\langle -\pi, \pi \rangle$

Toto je bod, v jehož okolí sinus rozvíjíme.

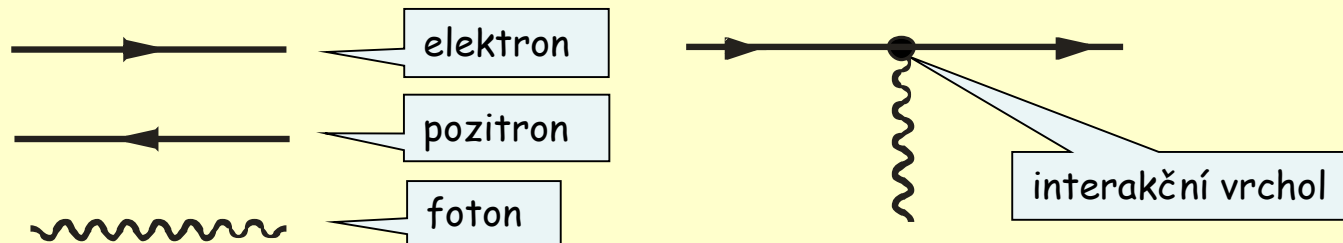
logaritmus i odmocninu rozvineme v okolí 1:

$$\ln(1+x) = \frac{x}{1} - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

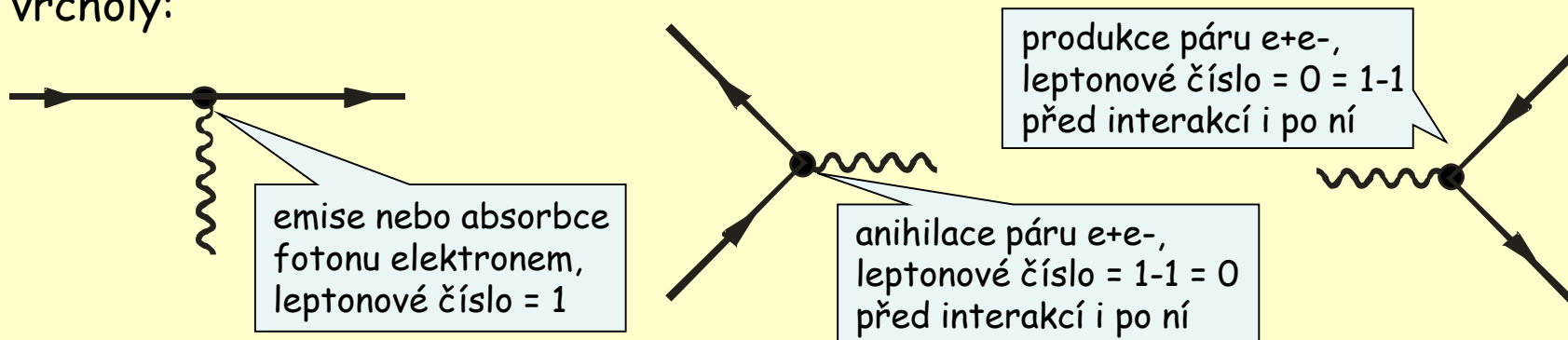
$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} - \frac{5x^4}{128} + \dots$$

Feynmanovy diagramy - elektromagnetická interakce

Vidíme, že „konstrukční prvky“ Feynmanových diagramů jsou:



Feynmanovy diagramy se skládají z vnějších čar reprezentujících částice vstupující do interakce a vystupující z ní, vrcholů a případně dalších vnitřních čar spojujících vrcholy. Všimněte si, že fotony - zprostředkující částice - se rodí a zanikají na rozdíl od elektronů, které se zachovávají, přesněji: zachovává se počet elektronů-počet pozitronů = leptonové číslo. Ve vrcholech se zachovává i energie a hybnost. Podívejte, co všechno mohou popisovat vrcholy:

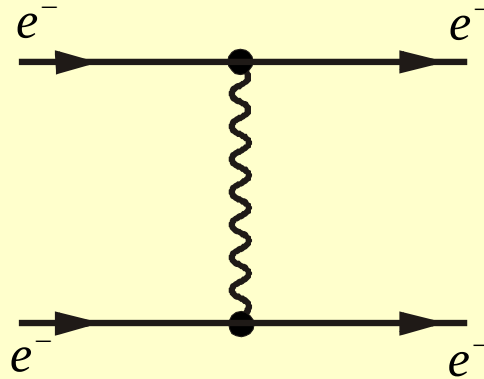


Tyto diagramy neodpovídají žádným reálným dějům, jak jsme viděli při diskusi anihilace v kapitole o experimentování na str. 42, nelze totiž splnit zákon zachování hybnosti a energie

Feynmanovy diagramy - pružný rozptyl elektronů

Elektronové čáry jsou spojené fotonovou čarou, proto říkáme, že si **elektrony vyměňují foton**.

Jinak řečeno, jeden elektron vyzáří foton a druhý ho absorbuje, čímž se oba elektrony rozptýlí.



Částicím, které odpovídají vnitřním čarám, říkáme **virtuální částice**. Zde máme virtuální foton.

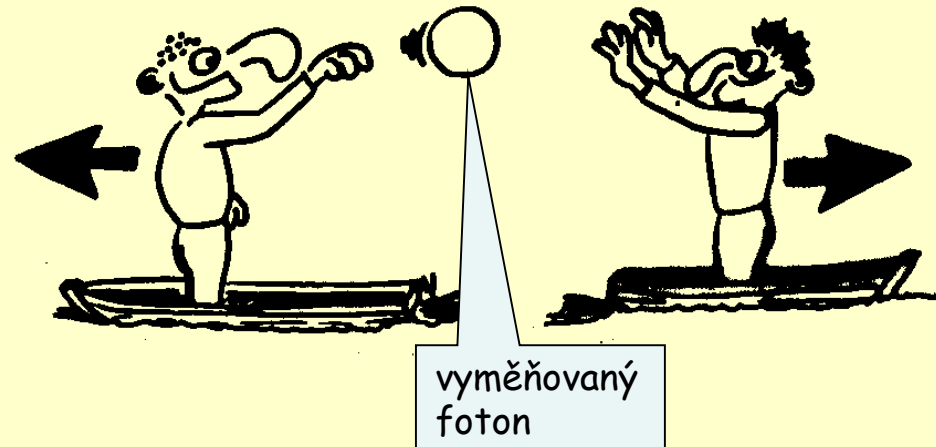
Virtuální částice žijí v černé krabici a tedy nejsou vidět.

Řada diagramů na straně 17 ukazuje, že virtuálních částic může přispívat různý počet.

Virtuální částice trochu připomínají postavy v našich představách či snech. Poznáme je, můžeme o nich diskutovat, ovlivňují náš život, nemusí mít však všechny vlastnosti úplně reálné. Existují nebo neexistují? Do výpočtů kvantové teorie pole virtuální částice bezpochyby patří.

Oblíbenou a často používanou analogií výměny částice mezi dvěma objekty, která zprostředkovává interakci - předává hybnost a energii, je házení míče mezi dvěma chlapíky - hybnost udělená míči jedním je předána druhému (jestliže míč chytí nebo je jím trefen). Tak se díky přehazování míče chlapíci odpuzují.

Na vysvětlení přitažlivé síly je ovšem tato analogie krátká.

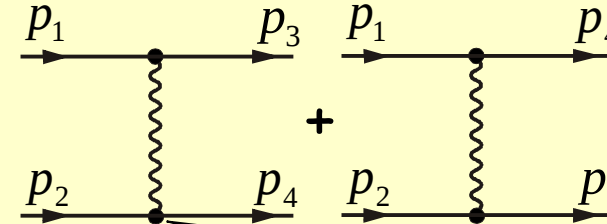


Feynmanovy diagramy jsou pomůcka pro výpočty

Počítání s Feynmanovými diagramy (Zde se opravdu, ale opravdu nelekejte!)

Na předchozích stránkách jsme viděli, že konkrétní Feynmanův diagram odpovídá určitému řádu poruchového rozvoje. Každý diagram představuje dílčí příspěvek k „elementu S-matice“. Úplná S-matice je formálně součtem všech relevantních diagramů. Kvadrát absolutní hodnoty elementu S-matice vyjadřuje pravděpodobnost, že uvažovaný proces proběhne a lze z ní poměrně jednoduše vyjádřit nám již dobře známý účinný průřez.

Jen pro ilustraci se podívejte, jak vypadá S-matice 1. řádu pro rozptyl dvou elektronů. Ještě se musíme přiznat k další komplikaci - kvůli nerozlišitelnosti elektronů musíme počítat ještě s diagramem, který má přehozené hybnosti.



pravděpodobnost rozptylu

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{konst} \frac{|S|^2}{(E_1 + E_2)^2}$$

kvadrát energie elektronů

Každému vrcholu odpovídá vazbová konstanta $g = \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_0 \hbar c}} \approx 0,3$

integrace přes všechny hybnosti

člen odpovídající virtuálnímu fotonu

člen odpovídající elektronové čáře $p_1 - p_3$

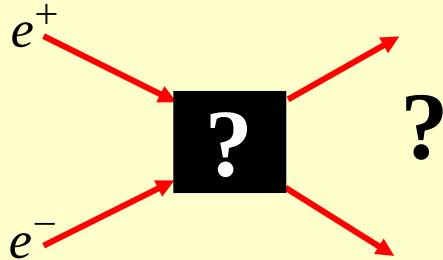
člen odpovídající elektronové čáře $p_2 - p_4$

$$S = \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{-ig_{\mu\nu}}{k^\alpha k_\alpha + i\epsilon} \left\{ \bar{u}(p_3, s_3) (-ig) (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_3 - k) \gamma^\mu u(p_1, s_1) \cdot \bar{u}(p_4, s_4) (-ig) (2\pi)^4 \delta^4(p_2 - p_4 + k) \gamma^\nu u(p_2, s_2) - \right. \\ \left. - \bar{u}(p_4, s_4) (-ig) (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - k) \gamma^\mu u(p_1, s_1) \cdot \bar{u}(p_3, s_3) (-ig) (2\pi)^4 \delta^4(p_2 - p_3 + k) \gamma^\nu u(p_2, s_2) \right\}$$

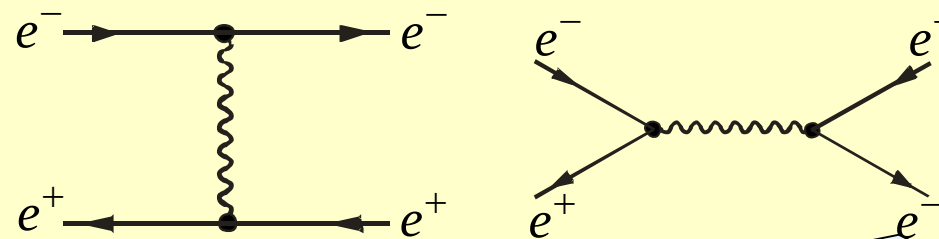
první řádka odpovídá prvnímu grafu, druhá druhému

Feynmanovy diagramy – elektromagnetická interakce

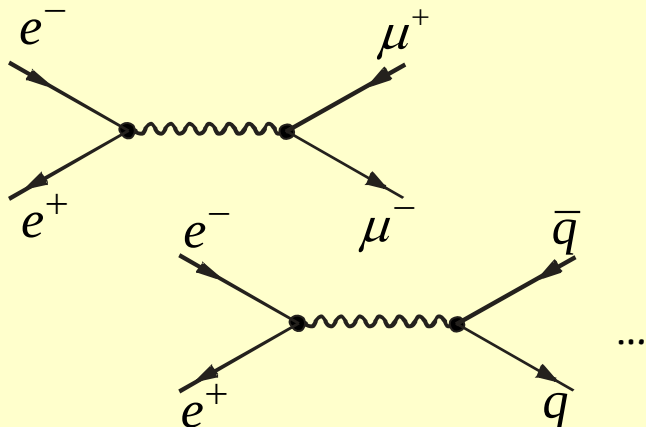
Dalším příkladem elektromagnetické interakce je srážka elektronu a pozitronu. Jaký může být koncový stav této interakce?



1) V koncovém stavu může být zase jeden elektron a jeden pozitron, navenek je to pružný rozptyl

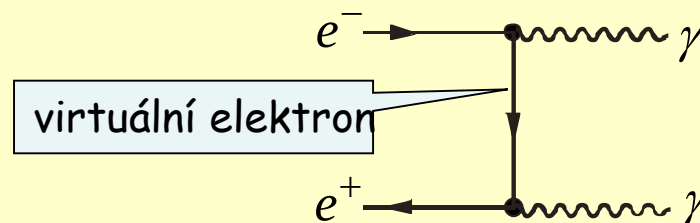


2) V koncovém stavu může být pár lepton-antilepton i jiný než e^+e^- , pár kvark-antikvark, ... Musíme ale na to mít dostatek energie.



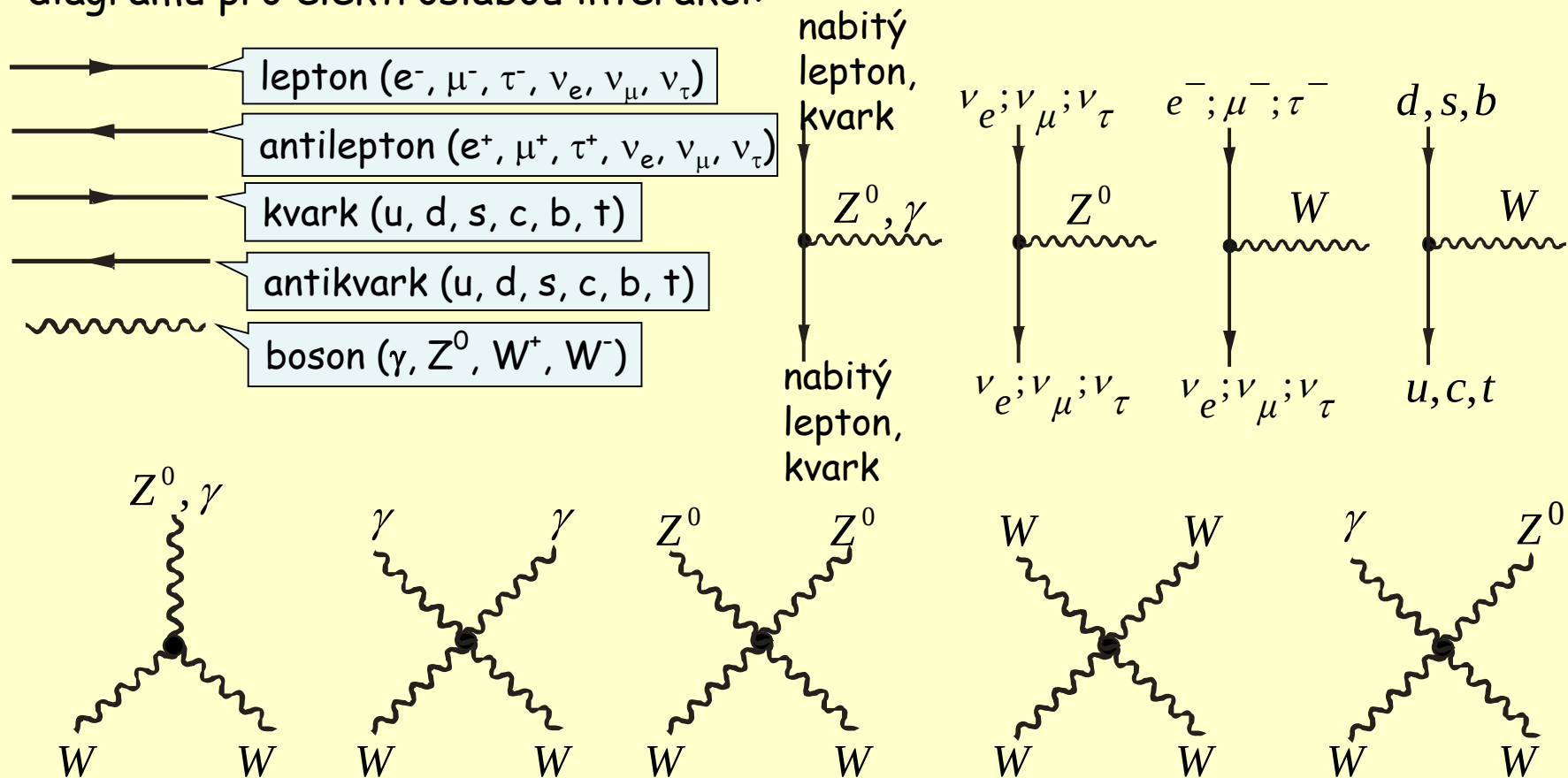
Anihilací elektronu a pozitronu vzniká virtuální foton, a z něho opět elektron a pozitron. Částice stejného druhu jsou nerozlišitelné a tak nikdo nepozná, že to nejsou původní elektron a pozitron.

3) Výsledkem může být anihilace elektronu a pozitronu na dva fotony:



Feynmanovy diagramy – elektroslabá interakce

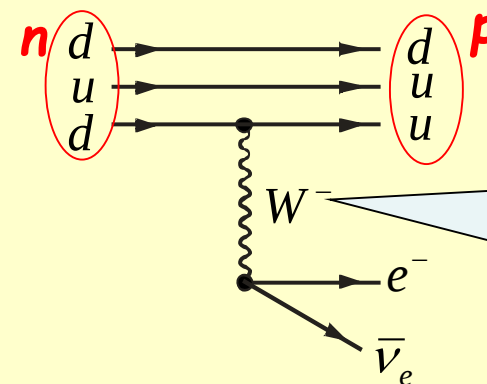
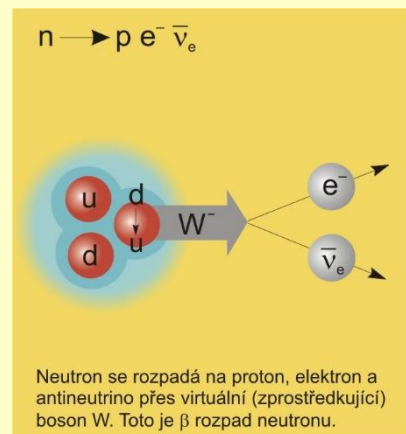
V teorii slabých (přesněji elektroslabých interakcí) hrají roli zprostředkujících částic γ , Z^0 , W^+ , W^- . Podívejme se na „konstrukční prvky“ Feynmanových diagramů pro elektroslabou interakci:



Znaménka bosonů W^+ a W^- jsou taková, aby se ve vrcholech zachovával elektrický náboj.

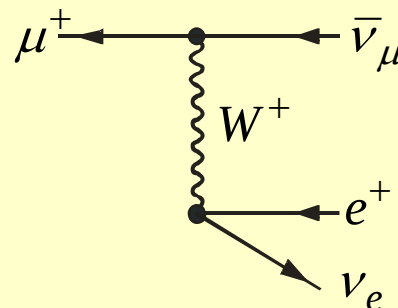
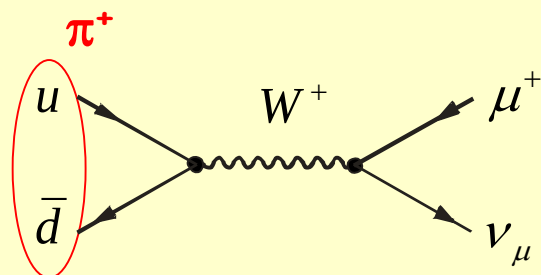
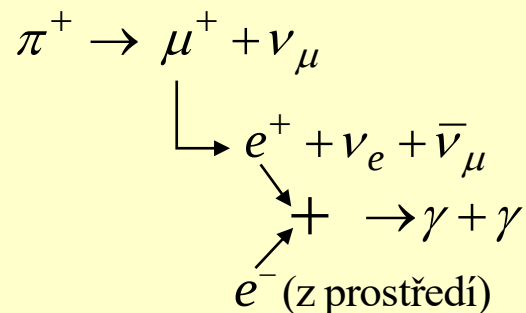
Feynmanovy diagramy – elektroslabá interakce

Pro ilustraci je na obrázku znázorněn příklad slabé interakce - **rozpad neutronu**.

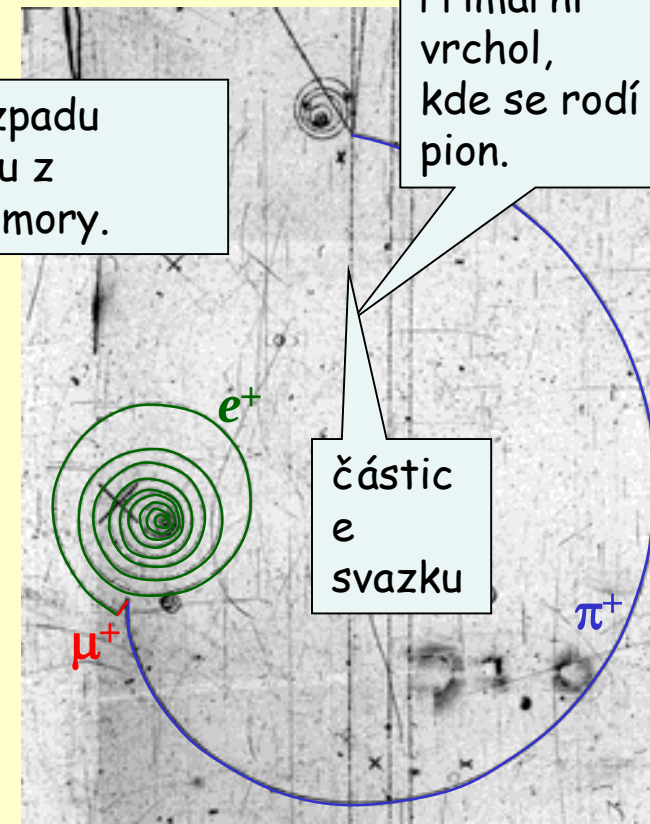


Neutron se rozpadá emisí W^- , který vytvoří elektron a neutrino.

Další příklad slabé interakce:



Obrázek rozpadu pionu a mionu z bublinové komory.



Primární vrchol, kde se rodí pion.

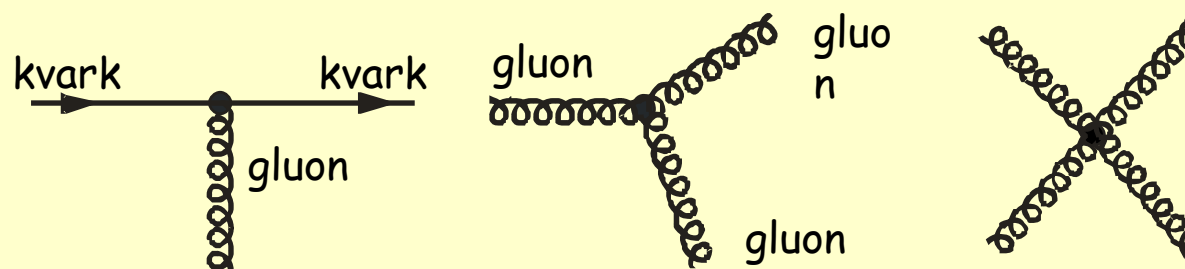
částic e svazku

Feynmanovy diagramy – silná interakce

Interakci mezi kvarky zprostředkovává 8 druhů gluonů. Gluony jsou většinou „dvoubarevné“ – nosí jednu barvu a jednu antibarvu na rozdíl od fotonů, které nepřenášejí žádný náboj, dva jsou ale komplikovanější „zmalované“, neboť teorie silné interakce – kvantová chromodynamika (QCD) – je přece jen trochu komplikovanější než povídání o barvách.

Ve srovnání s předcházejícími teoriemi je počítání v QCD obtížnější: Poruchový přístup je použitelný jedině ve specifických podmínkách, speciálně v procesech, kde si kvarky vyměňují velkou hybnost. Tehdy můžeme pracovat opět s Feynmanovými diagramy:

Základní vrcholy QCD:

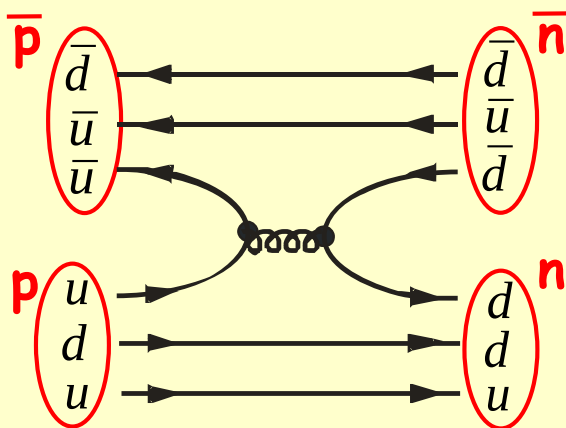


Takové problémy, jako například popis silné interakce nukleonů v jádrech a jaderných reakcích nebo vysvětlení struktury hadronů, poruchově zvládnutelné nejsou a jen pomalu se nacházejí a zdokonalují techniky, jak tyto problémy řešit.

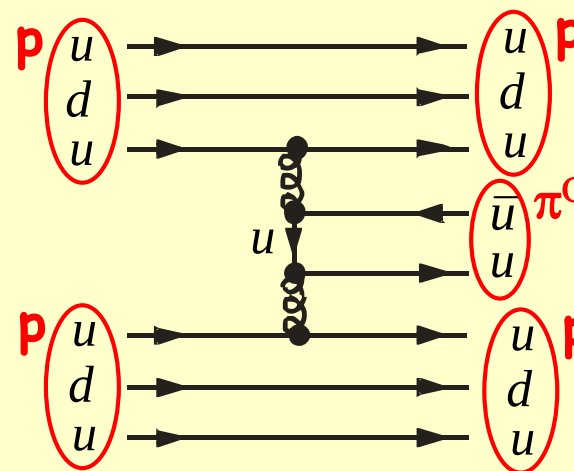
Feynmanovy diagramy – silná interakce

Podstatné je to, že například proton není jen trojice kvarků, ale spíše komplikovaný slepenec kvarků, gluonů a virtuálních kvark-antikvarkových párů, kde všechno se vším interaguje. Následující ilustrační diagramy tak mají jednoduchou poruchovou část, ve které vystupují tři kvarky v protonu, a symbolické červené oválky pro hadrony, jejichž nitru ne úplně rozumíme.

$$p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{n}$$

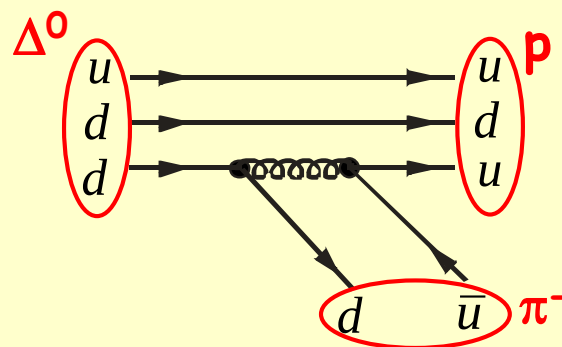


$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0$$



Produkce pionu ve srážce dvou protonů.

$$\Delta^0 \rightarrow p + \pi^-$$



Částice se mohou rozpadat díky slabé, elektromagnetické i silné interakci.

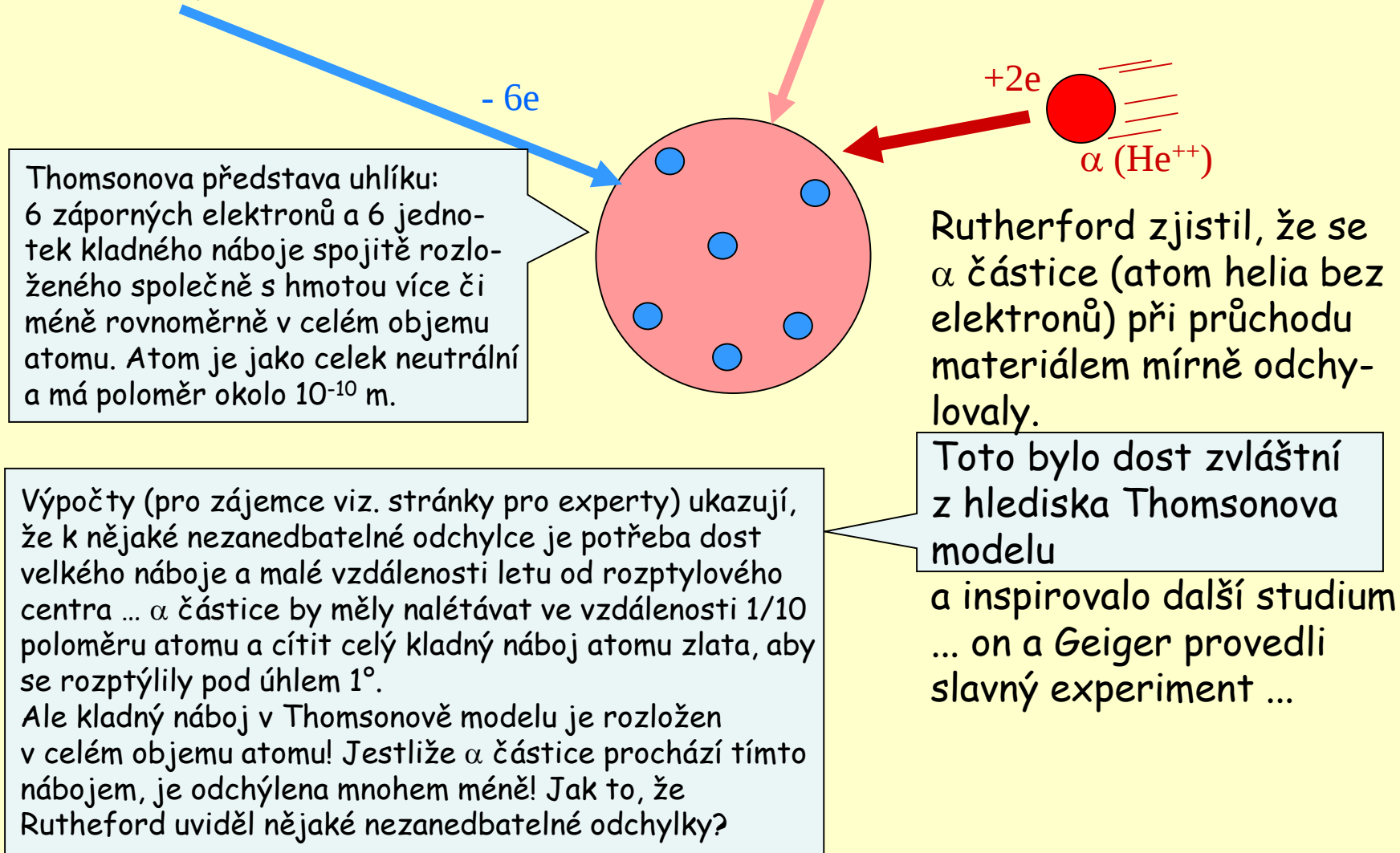
Δ^0 se rozpadá silně, proto velmi rychle, řádově za 10^{-23} s.

Dnešní program:

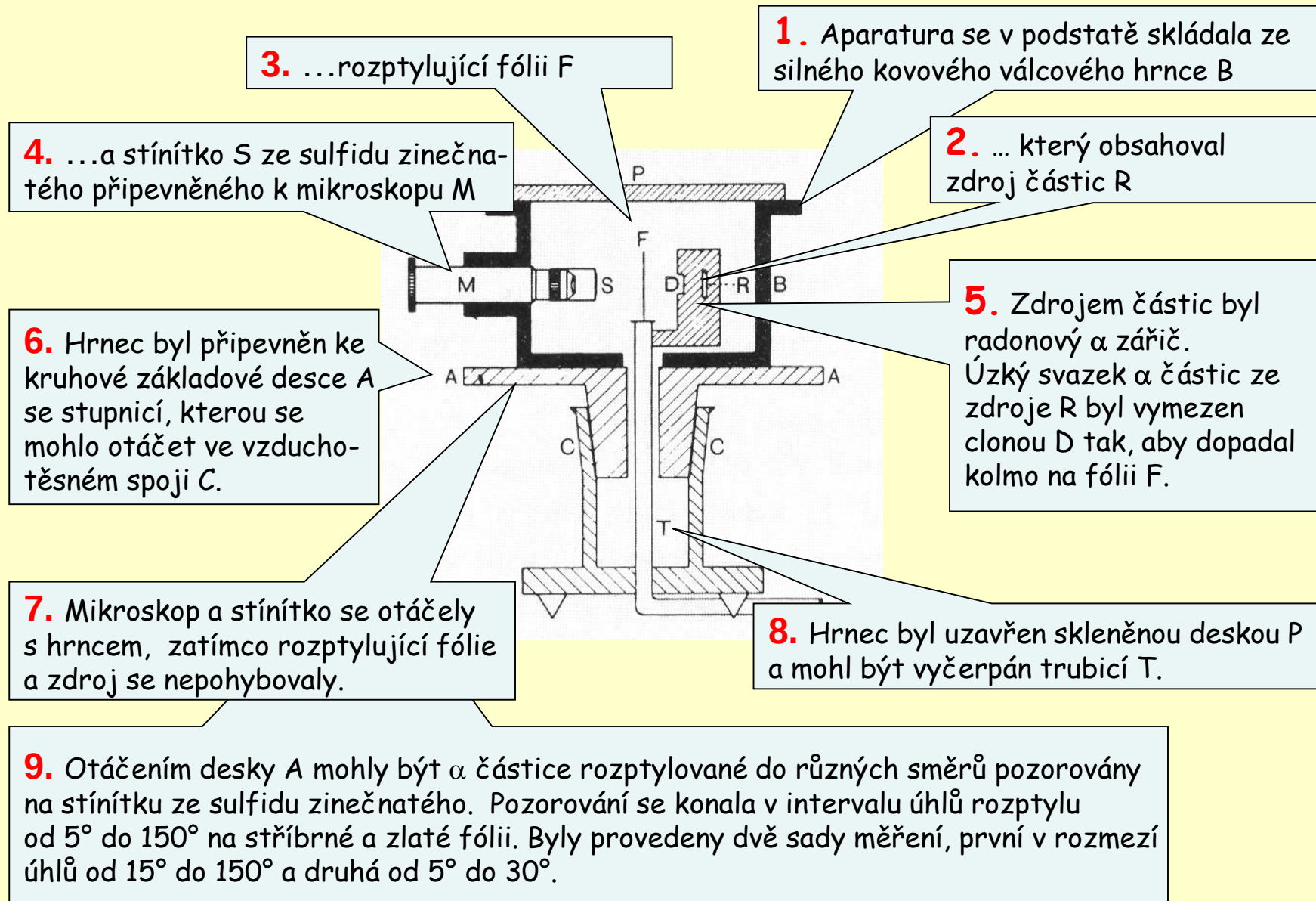
- Stručně o čem budeme mluvit
- Částicová fyzika – minimum pro vzdělance 21. století
- Srážka koumáka a mikrosvěta, aneb kde „selský rozum selhává“
- Je to fyzika nedávné minulosti, dneška a zítřka

Ted' chvílku o experimentu:

Rutherford zkusil rozptylovat α částice na tenké zlaté fólii v době, kdy byl atom považován za něco jako kladně nabitý pudink se zápornými zrníčky elektronů.



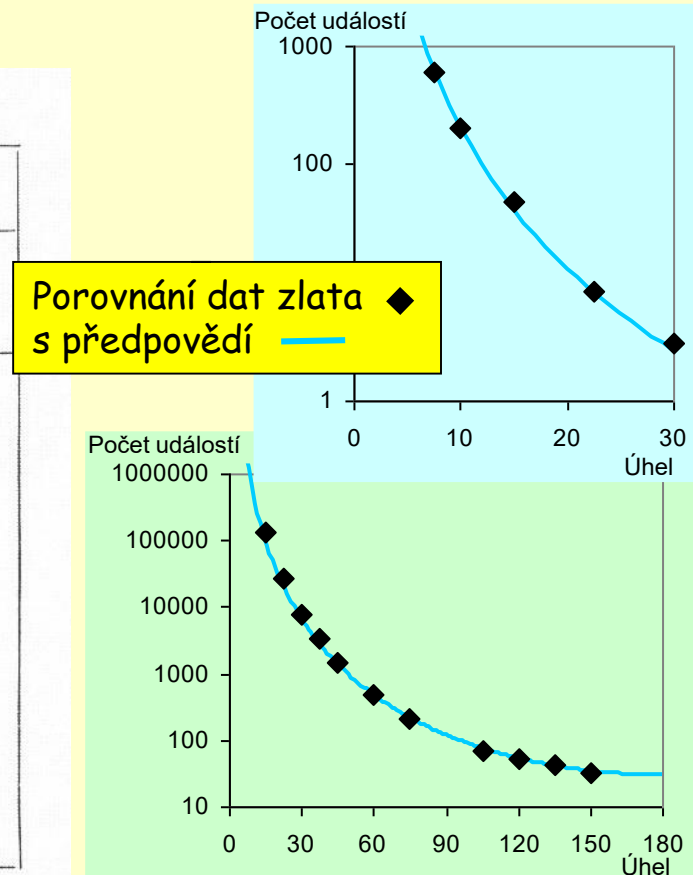
Experiment provedený Geigerem (1911) a Geigerem & Marsdenem (1913)



Výsledky Geigera & Marsdena porovnané s Rutherfordovou předpovědí založenou na modelu atomu s malým těžkým jádrem a elektrony kolem:

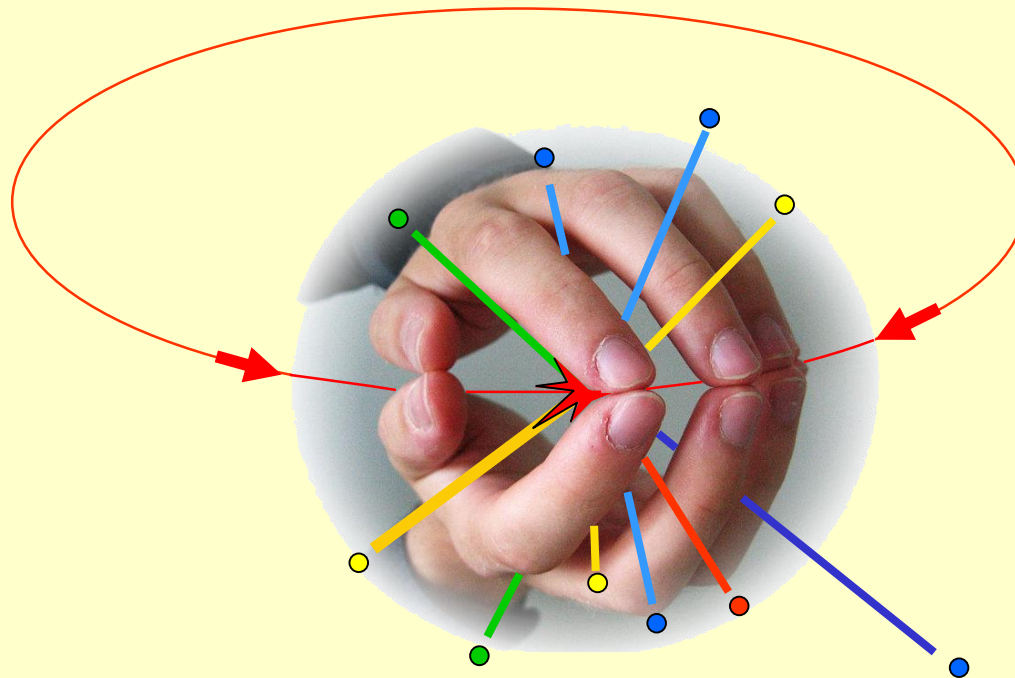
Variation of scattering with angle.

I Angle of deflection, ϕ	II $\operatorname{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi$	III SILVER		V GOLD	
		Number of scintilla- tions, N	$\frac{N}{\operatorname{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi}$	Number of scintilla- tions, N	$\frac{N}{\operatorname{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi}$
150°	1.15	22.2	19.3	33.1	28.8
135	1.38	27.4	19.8	43.0	31.2
120	1.79	33.0	18.4	51.9	29.0
105	2.53	47.3	18.7	69.5	27.5
75	7.25	136	18.8	211	29.1
60	16.0	320	20.0	477	29.8
45	46.6	989	21.2	1435	30.8
37.5	93.7	1760	18.8	3300	35.3
30	223	5260	23.6	7800	35.0
22.5	690	20300	29.4	27300	39.6
15	3445	105400	30.6	132000	38.4
30	223	5.3	0.024	3.1	0.014
22.5	690	16.6	0.024	8.4	0.012
15	3445	93.0	0.027	48.2	0.014
10	17330	508	0.029	200	0.0115
7.5	54650	1710	0.031	607	0.011
5	276300	—	—	3320	0.012



Extrakt z *Radiations from Radioactive Substances* od Ernesta Rutherforda, Jamese Chadwicka a C. D. Ellis, publikováno v Cambridge University Press, 1930

Základní princip experimentů:
urychlit částice,
nechat je srazit,
studovat částice
vylétající
z místa srážky



Jak vypadá a jak funguje dnešní urychlovač?

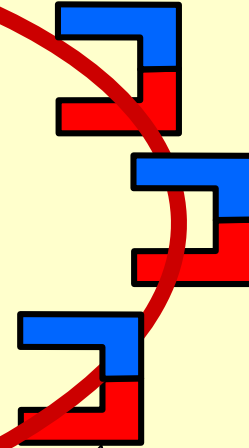
Urychlovač je vestavěn v tunelu podobném tunelu metra.

Kromě „zahýbacích“ magnetů má urychlovač magnety na zaostřování svazku.



Na několika místech jsou částice urychlovány vysokofrekvenčním polem v urychlovacích dutinách.

Urychlované částice létají ve vakuu v trubce zahnuté do kruhu. K letu po kruhové dráze jsou nuceny magnetickým polem magnetů obklopujících trubku.

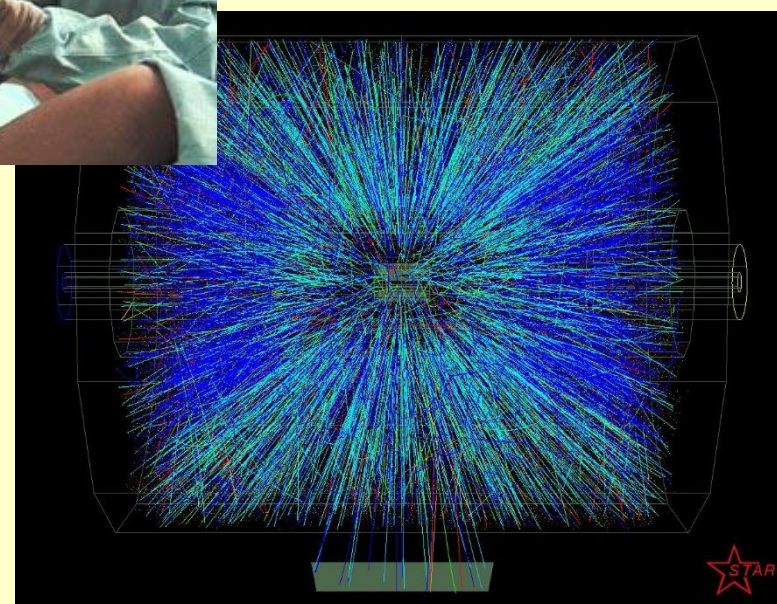


Proč částice urychlujeme ?

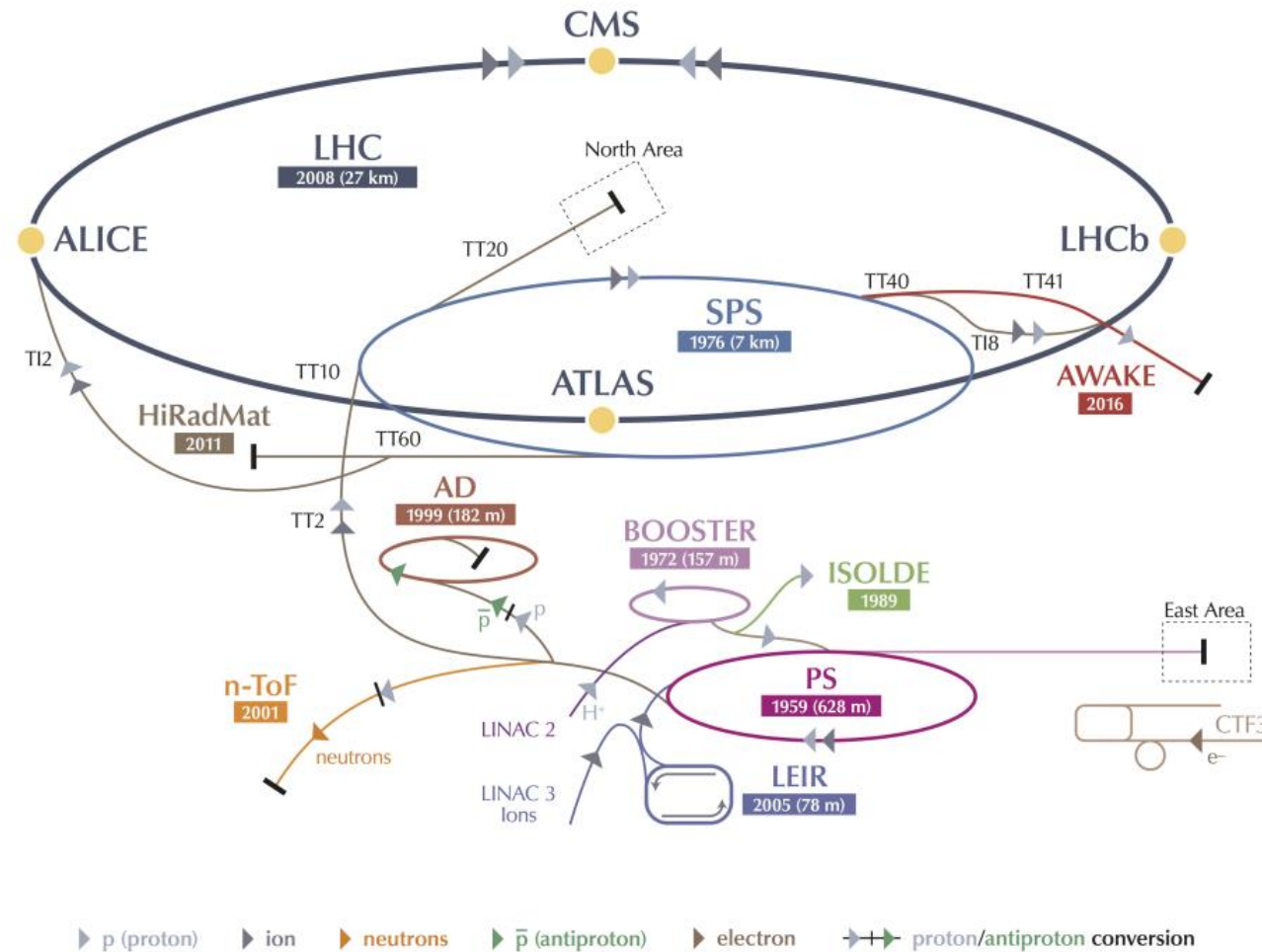
Dalším důvodem, proč se hodí částice s vysokou energií, je možnost **vzniku nových částic** při srážkách.

„Rození“ nových částic není nic samozřejmého, nic podobného z makrosvěta neznáme s výjimkou rození dětí. Při čelní srážce aut vznikne maximálně hromada šrotu, ale rozhodně nic nového.

Zato v mikrosvětě, pokud máme k dispozici dostatečnou energii, může při srážce vzniknout velké množství částic – vpravo vidíte dráhy částic ze srážky dvou jader zlata v urychlovači RHIC v USA. Kromě nukleonů z rozbitých jader projektilů zachytil detektor STAR **přes tisíc nově narozených částic.**



CERN's Accelerator Complex



LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

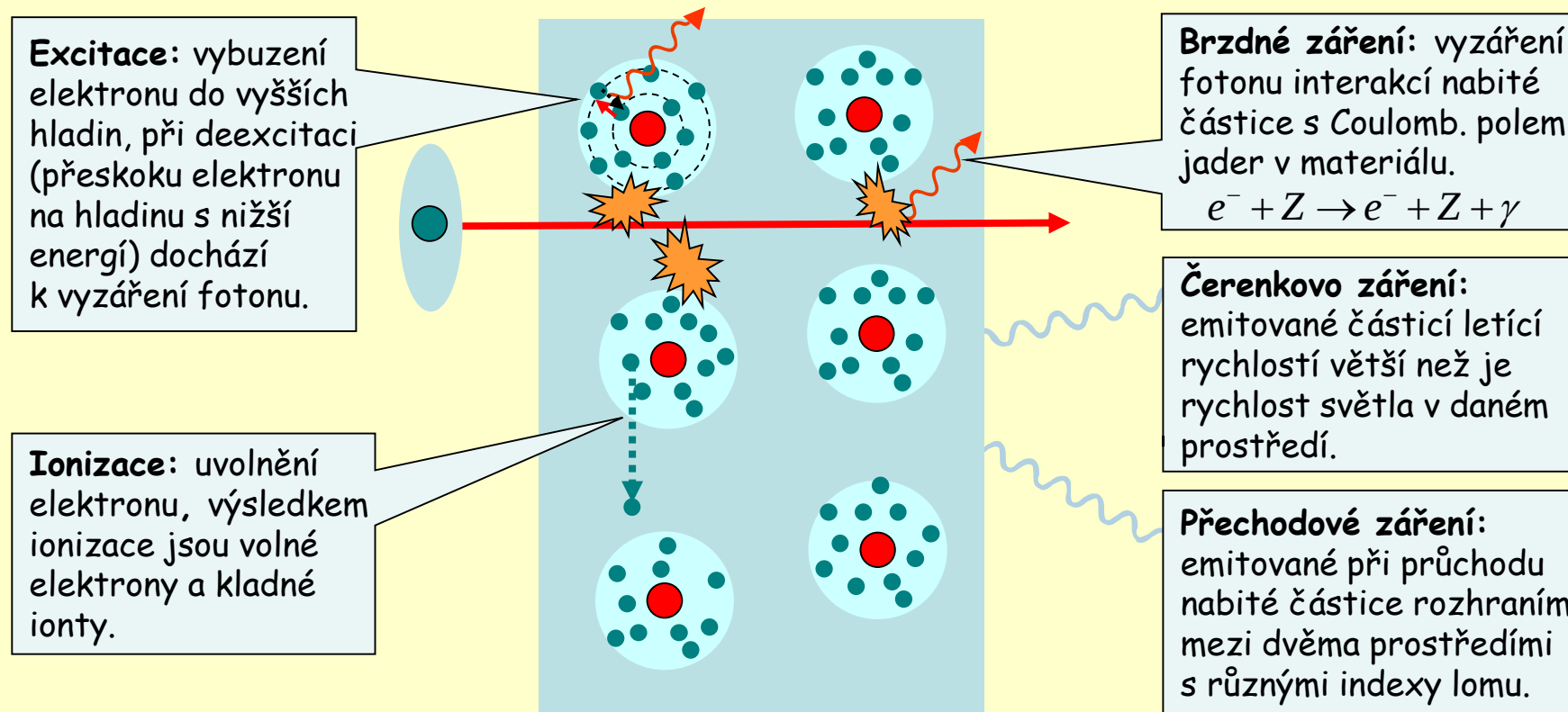
AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility AWAKE Advanced WAKEfield Experiment ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight HiRadMat High-Radiation to Materials



Interakce nabité částice

Elektrické pole letící nabité částice je schopno vybudit (**excitovat**) elektrony v atomech a molekulách nějaké látky nebo je dokonce z atomů vytrhnout - **ionizovat**. Letící nabitá částice ionizací látky ztrácí energii, brzdí se. Svou energii ztrácí také zářením. Všechny tyto procesy znamenají, že částice „zanechává stopy“, které lze při její detekci využít.



Interakce lehkých nabitých částic

Lehké nabité částice - elektrony a pozitrony - ztrácí svou energii při průchodu materiálem také **ionizací** jako ostatní nabité částice, ale její role nad jistou energií (tzv. kritickou) rychle klesá. Na celé čáře vítězí ztráty **brzdným zářením**,

Ostatní efekty (pružný rozptyl, anihilace pozitronů) jsou daleko méně podstatné.

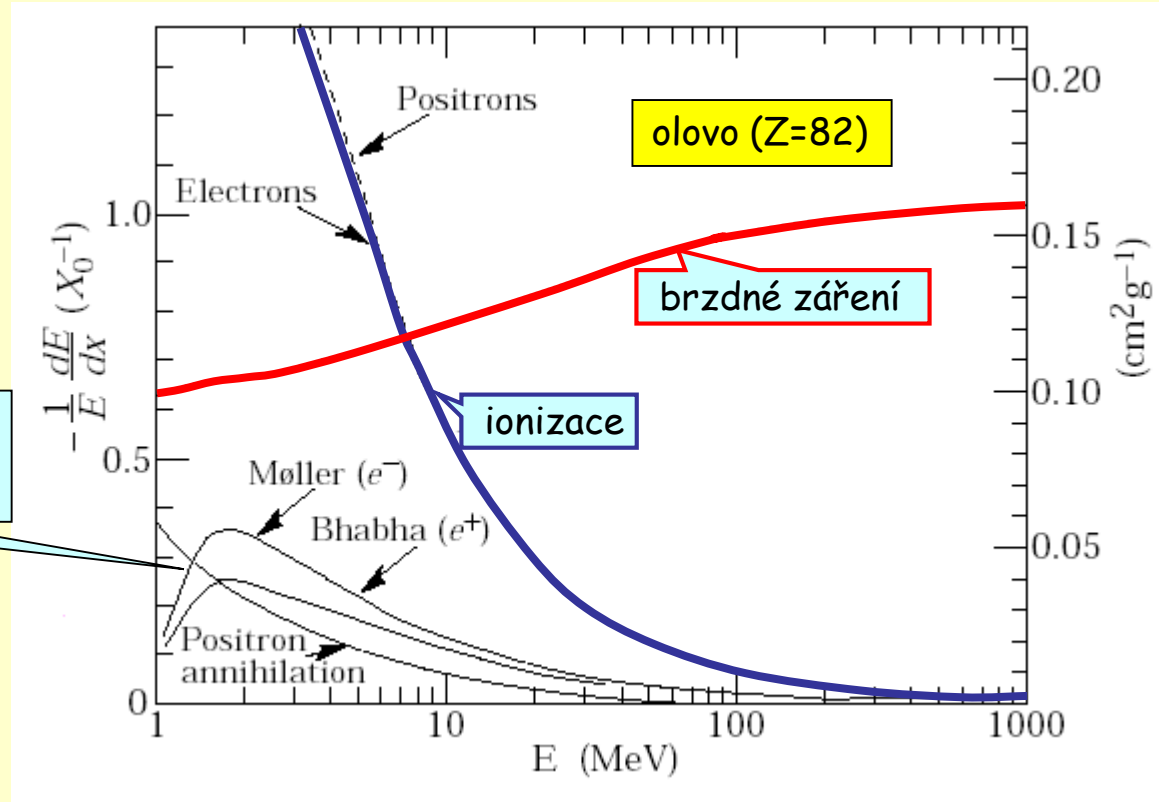
Pro ztráty brzdným zářením platí přibližně:

$$-\frac{dE}{dx} \approx \frac{Z^2 z^2 e^4}{A^2} \frac{E}{m^2 c^4} = \frac{E}{X_0}$$

a tedy $E = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$

Při téže energii vyzáří lehounké elektrony milionkrát více energie než těžké protony. Brzdné záření protonů bude významné až při velmi vysokých energiích.

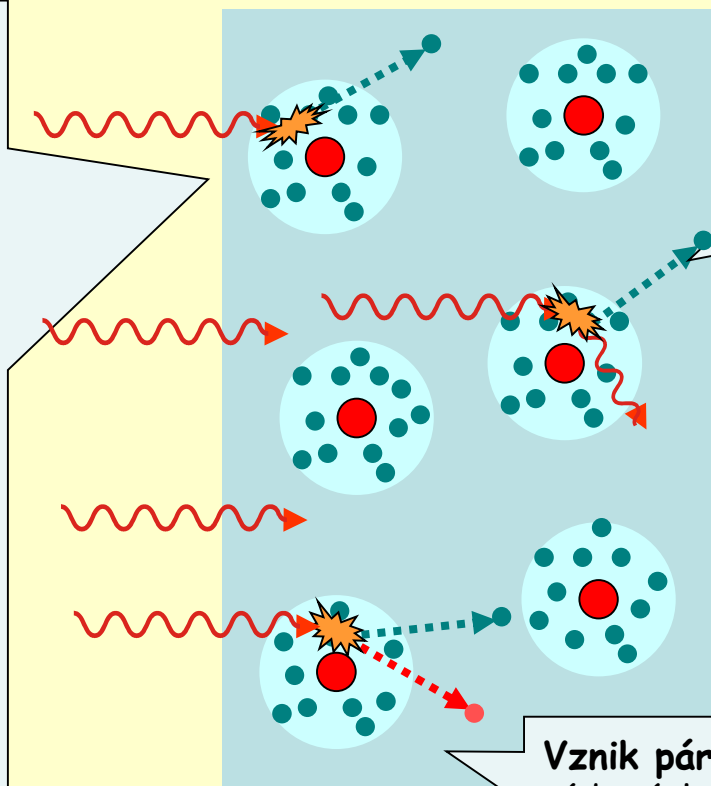
Radiační délka X_0 je vzdálenost, na které vysokoenergetický elektron (pozitron) ztrácí $1/e$ energie brzdným zářením. Například v olovu je $X_0=5,6$ mm, ve vodě $X_0=36,1$ cm.



Interakce fotonů

Interakce fotonů je zcela odlišná od interakce nabitých částic. Svazek fotonů se při průchodu materiálem zeslabuje, fotony jsou v atomech absorbovány. To je způsobena třemi ději ...

Při **fotoefektu** se absorbuje foton, který uvolní elektron z atomu (k absorpci dochází hlavně v K slupkách). Zachování energie znamená, že vylétavající e^- má kinetickou energii $E_{k,e^-} = E_\gamma - E_{vazba}$ (rozdíl energii dopadajícího fotonu a energie potřebné na uvolnění elektronu). Výsledkem fotoefektu je tedy absorpce fotonu, vznik volného elektronu a ionizovaného atomu.
 $\gamma + \text{atom} \rightarrow e^- + \text{iont}$



Comptonův rozptyl je rozptyl fotonu na „volném“ elektronu v atomu. Směr letu dopadajícího fotonu se změní a zasažený elektron je nakopnut - získá kinetickou energii. Tuto energii foton ztratil a tak odlétá s menší energií, tj. s větší vlnovou délkou.
 $\gamma + \text{atom} \rightarrow \gamma + e^- + \text{iont}$

Vznik páru elektron-pozitron z fotonu v poli jádra (elektronu). Aby nalétávající foton mohl e^+e^- produkovat, musí mít energii alespoň $2m_e c^2$.
 $\gamma + \text{atom} \rightarrow \gamma + e^- + e^+ + \text{atom}$

Interakce fotonů

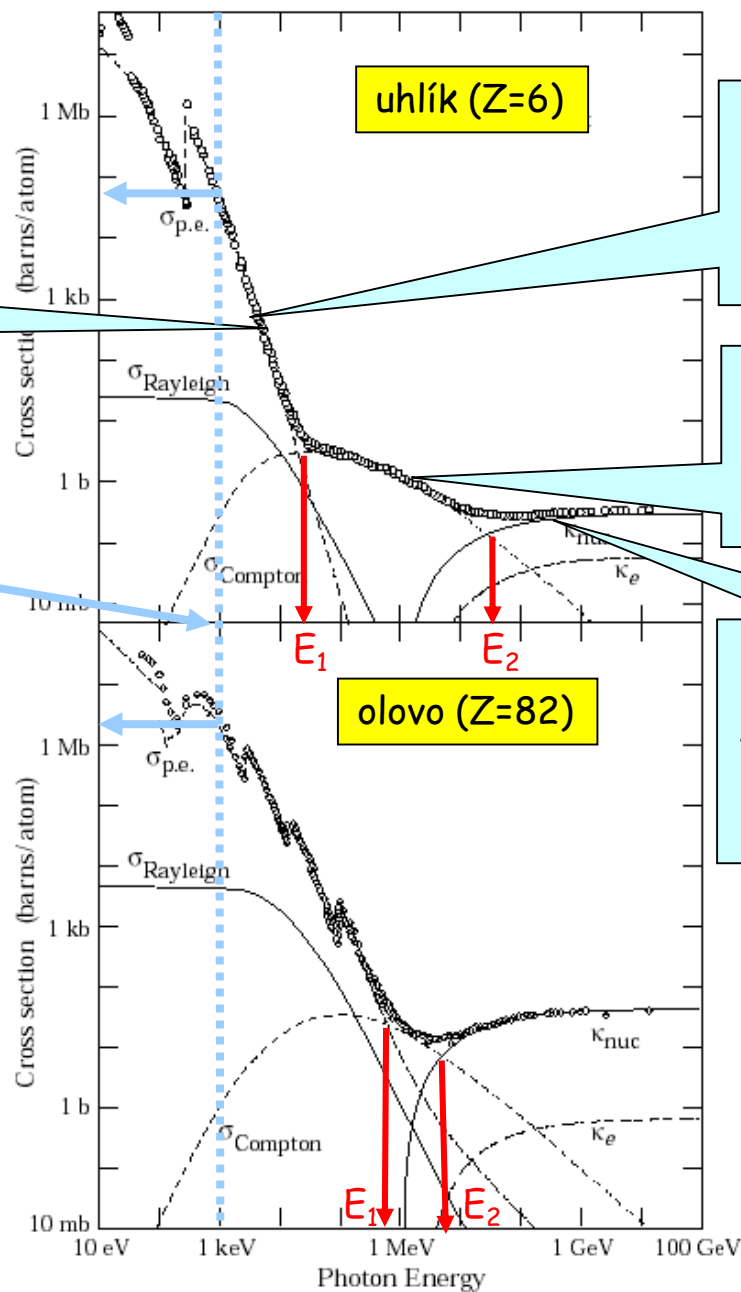
Pravděpodobnost interakce (účinný průřez) fotonů závisí na **energii** fotonu a na **druhu** (Z) materiálu.

Pro zeslabování svazku je podstatný celkový účinný průřez.

Porovnejme účinné průřezy pro uhlík a olovo při nějaké energii (např. 1keV):

V olovu se fotony absorbují více než o řád silněji než v uhlíku ... obecně pravděpodobnost absorpce fotonu roste se Z.

Proto jsou také kosti obsahující vápník vidět na rentgenových snímcích proti pozadí měkkých tkání s H, C, O.



Pro nízké energie $E_\gamma < E_1$ (100 keV) převládá **fotoefekt**.

$$\sigma_f \approx Z^5 / E_\gamma^{7/2}$$

Pro $E_1 < E_\gamma < E_2$ (~ MeV) převládá **Comptonův rozptyl**.

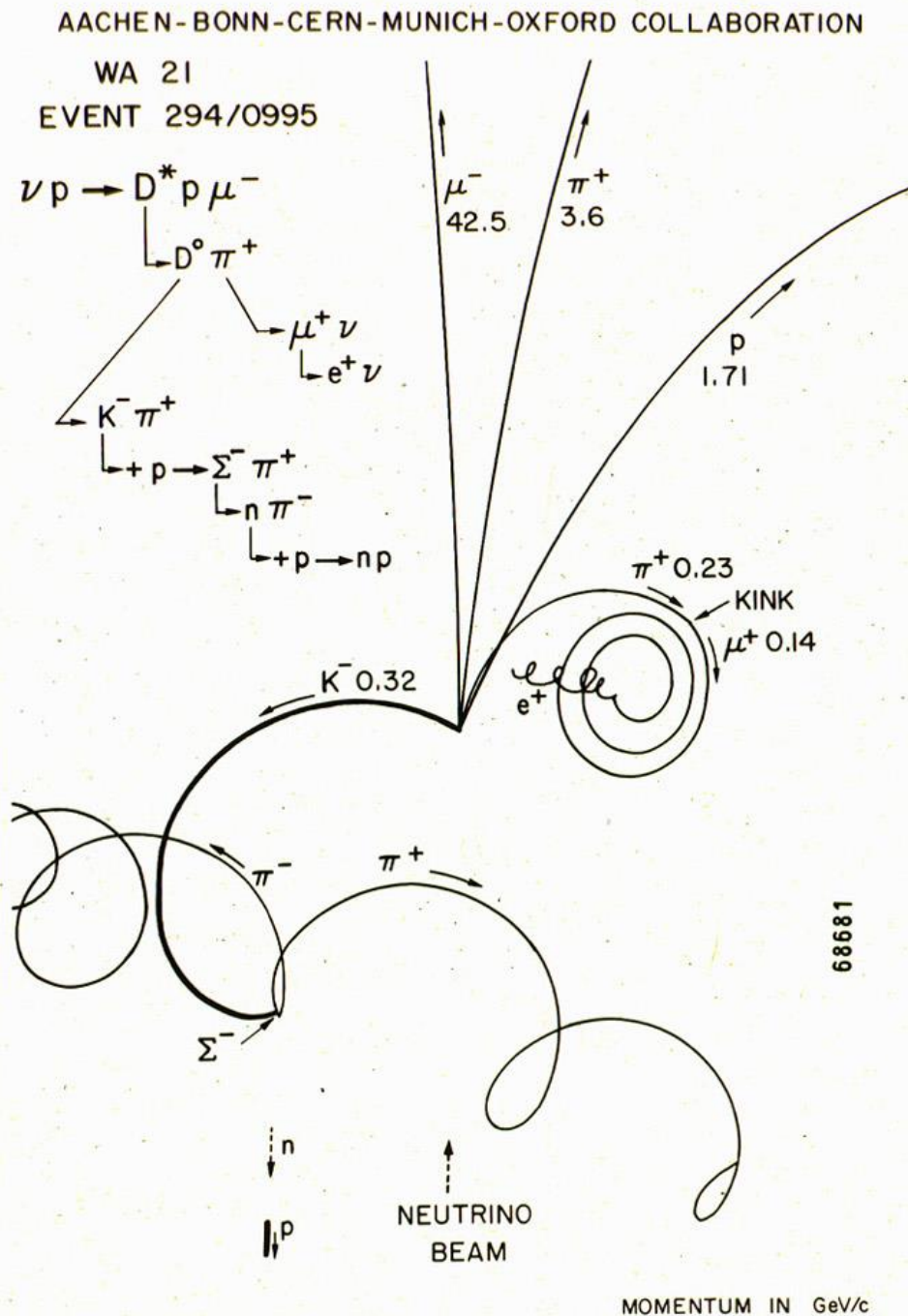
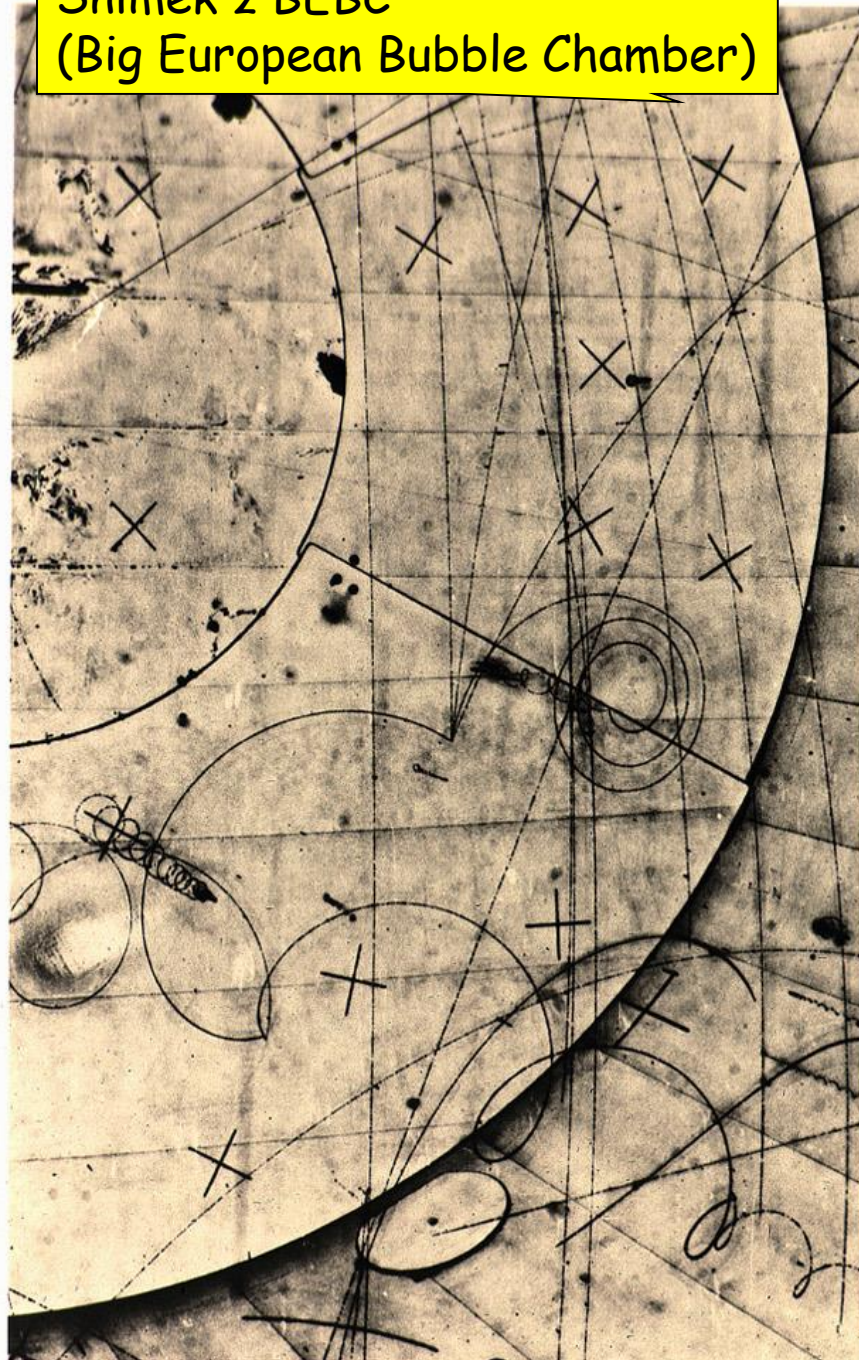
$$\sigma_C \approx Z / E_\gamma$$

Pro vysoké energie $E_\gamma > E_2$ (> 10 MeV) převládá **tvorba páru e^+e^-** .

$$\sigma_p \approx Z^2 \ln 2 E_\gamma$$

Energie E_1, E_2 jsou různé pro různé prvky (viz. graf pro uhlík a olovo).

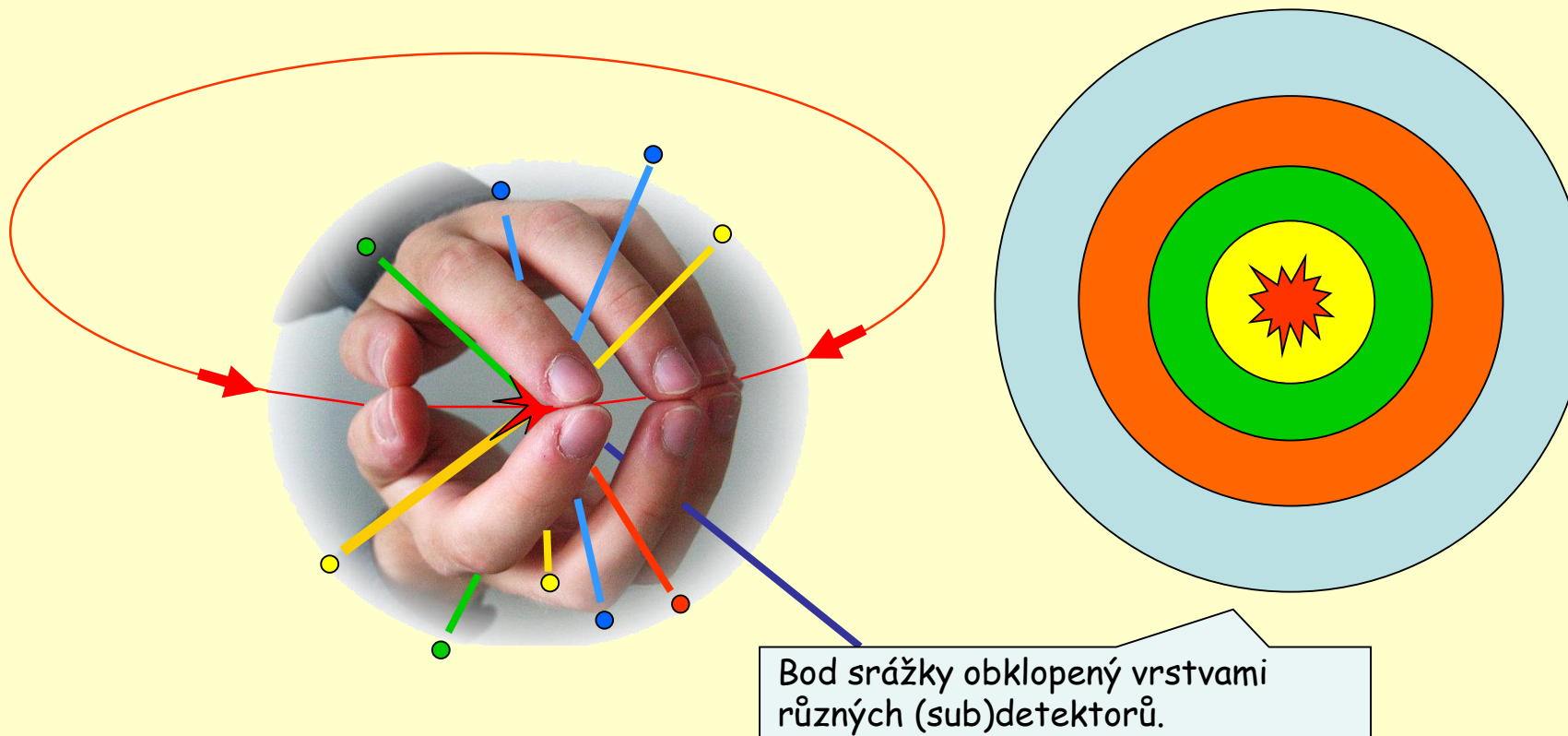
Snímek z BEBC
(Big European Bubble Chamber)

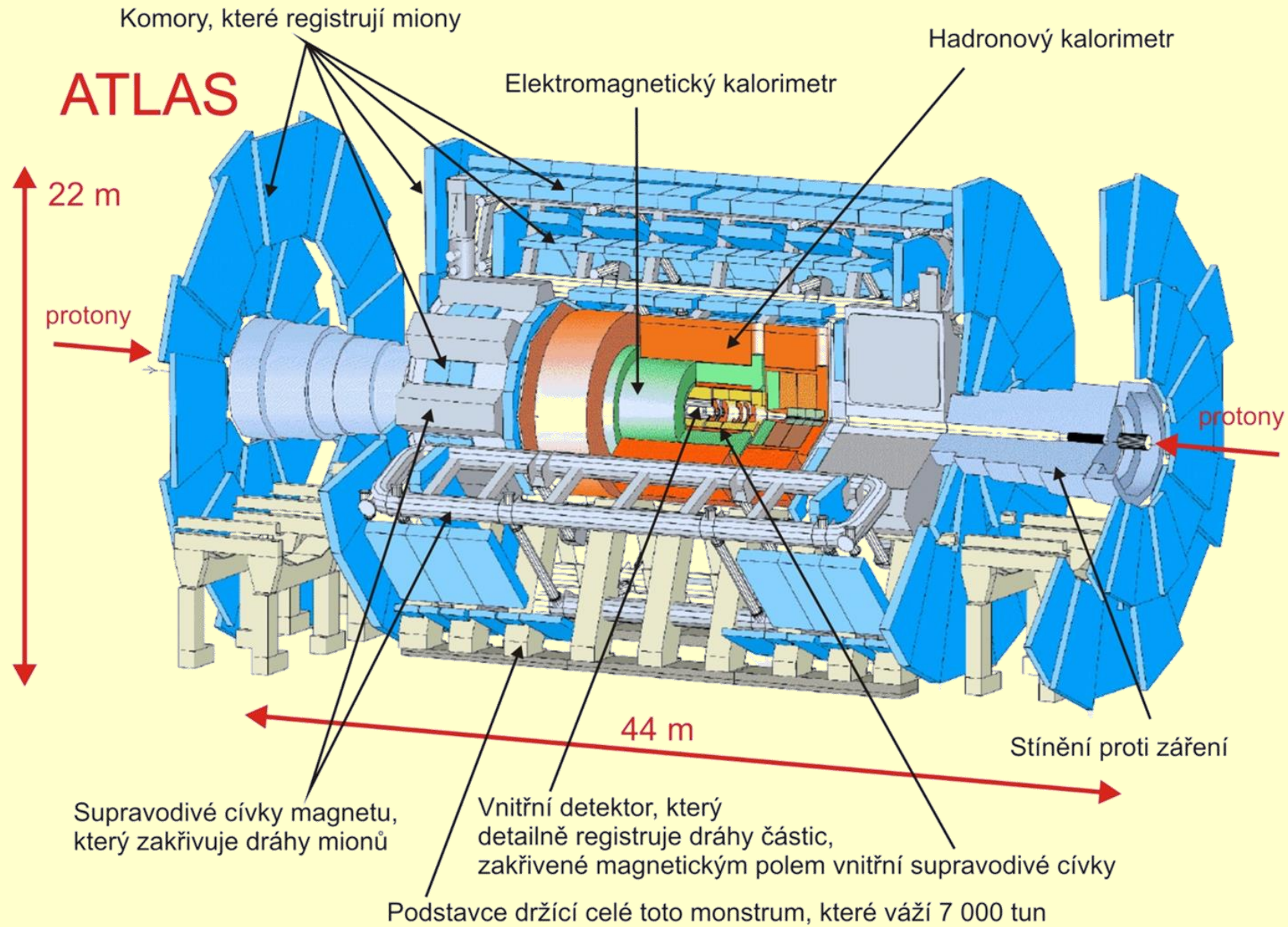


Složené detektory

Odezva, kterou získáme z detektoru po průletu částice závisí jak na jejím typu, tak i na zvolené detekční metodě. Proto je celý detektor sestaven ze subdetektorů různých typů. Každý subsystém poskytne trochu jinou informaci, teprve složením všeho dohromady a náročným počítačovým zpracováním získáme maximální možnou informaci.

Na obrázku jsou schematicky znázorněny vrstvy celého detektorového systému, na další straně poznáte jejich funkci.





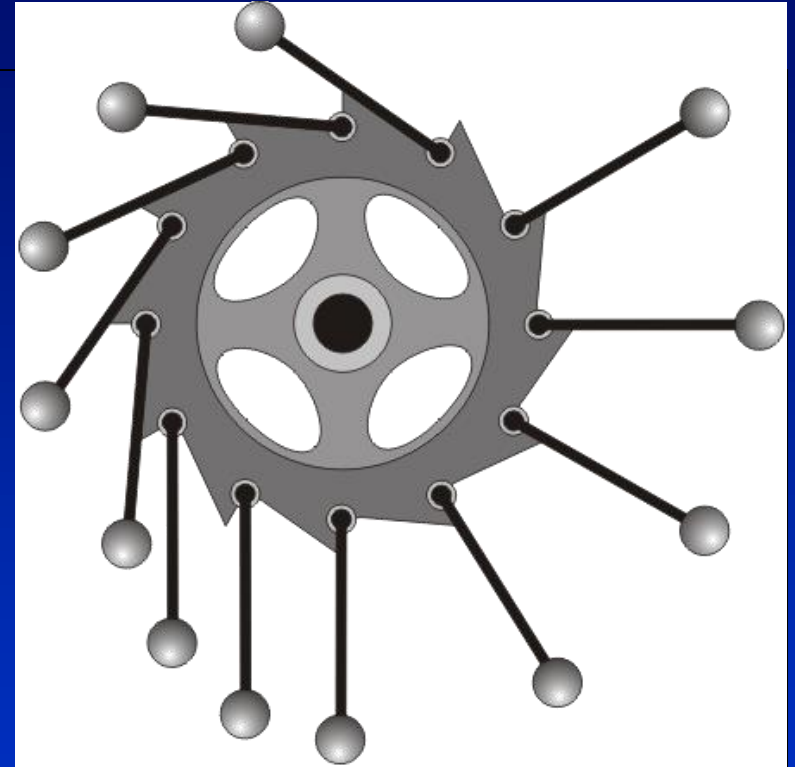
Dnešní program:

- Stručně o čem budeme mluvit
- Částicová fyzika – minimum pro vzdělance 21. století
- Srážka koumáka a mikrosvěta, aneb kde „selský rozum selhává“
- Je to fyzika nedávné minulosti, dneška a zítřka

Srážky „zdravého rozumu“ s vědou

Perpetuum mobile

... zachování energie (+ termodynamika)



viz např. https://en.wikipedia.org/wiki/Perpetual_motion

Srážky „zdravého rozumu“ s vědou

Speciální relativita

Například **dilatace času** – k dlouhověkosti se lze propracovat pohybem, například nestabilní částice žijí tím déle, čím rychleji se pohybují:

Střední doba života ve vlastní (klidové) soustavě částice	... τ_0 ,
střední doba života v pohybující se soustavě	... $\tau = \gamma * \tau_0$,
kde relativistický faktor γ	... $\gamma = E/E_0$

... třeba miony

Speciální relativita

Střední doba života mionu je zhruba $2,2 \mu\text{s}$
tj. bez dilatace by uletěl rychlostí světla asi 660 m.

Když má energii například 3 GeV, tj. zhruba 30x větší než klidovou, má střední dráhu do rozpadu zhruba 20 km.

<https://pdg.lbl.gov>

LEPTONS

e

$$J = \frac{1}{2}$$

$$\text{Mass } m = (548.579909070 \pm 0.000000016) \times 10^{-6} \text{ u}$$

$$\text{Mass } m = 0.5109989461 \pm 0.0000000031 \text{ MeV}$$

$$|m_{e^+} - m_{e^-}|/m < 8 \times 10^{-9}, \text{ CL} = 90\%$$

$$|q_{e^+} + q_{e^-}|/e < 4 \times 10^{-8}$$

Magnetic moment anomaly

$$(g-2)/2 = (1159.65218091 \pm 0.00000026) \times 10^{-6}$$

$$(g_{e^+} - g_{e^-}) / g_{\text{average}} = (-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$$

$$\text{Electric dipole moment } d < 0.11 \times 10^{-28} \text{ e cm, CL} = 90\%$$

$$\text{Mean life } \tau > 6.6 \times 10^{28} \text{ yr, CL} = 90\% [a]$$

μ

$$J = \frac{1}{2}$$

$$\text{Mass } m = 0.1134289257 \pm 0.0000000025 \text{ u}$$

$$\text{Mass } m = 105.6583745 \pm 0.00000024 \text{ MeV}$$

$$\text{Mean life } \tau = (2.1969811 \pm 0.00000022) \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\tau_{\mu^+}/\tau_{\mu^-} = 1.00002 \pm 0.00008$$

$$c\tau = 658.6384 \text{ m}$$

$$\text{Magnetic moment anomaly } (g-2)/2 = (11659209 \pm 6) \times 10^{-10}$$

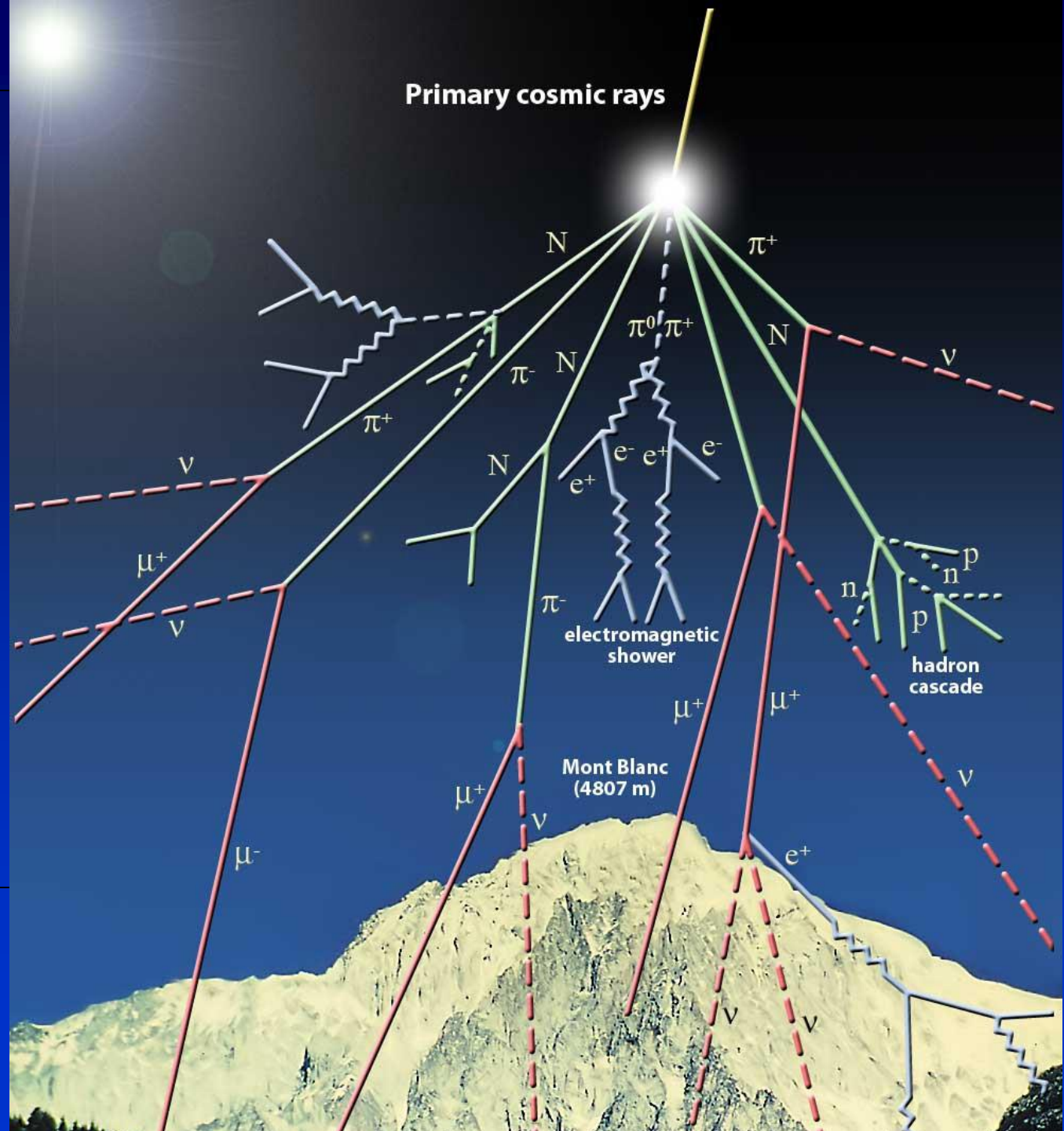
$$(g_{\mu^+} - g_{\mu^-}) / g_{\text{average}} = (-0.11 \pm 0.12) \times 10^{-8}$$

$$\text{Electric dipole moment } |d| < 1.8 \times 10^{-19} \text{ e cm, CL} = 95\%$$

Speciální relativita

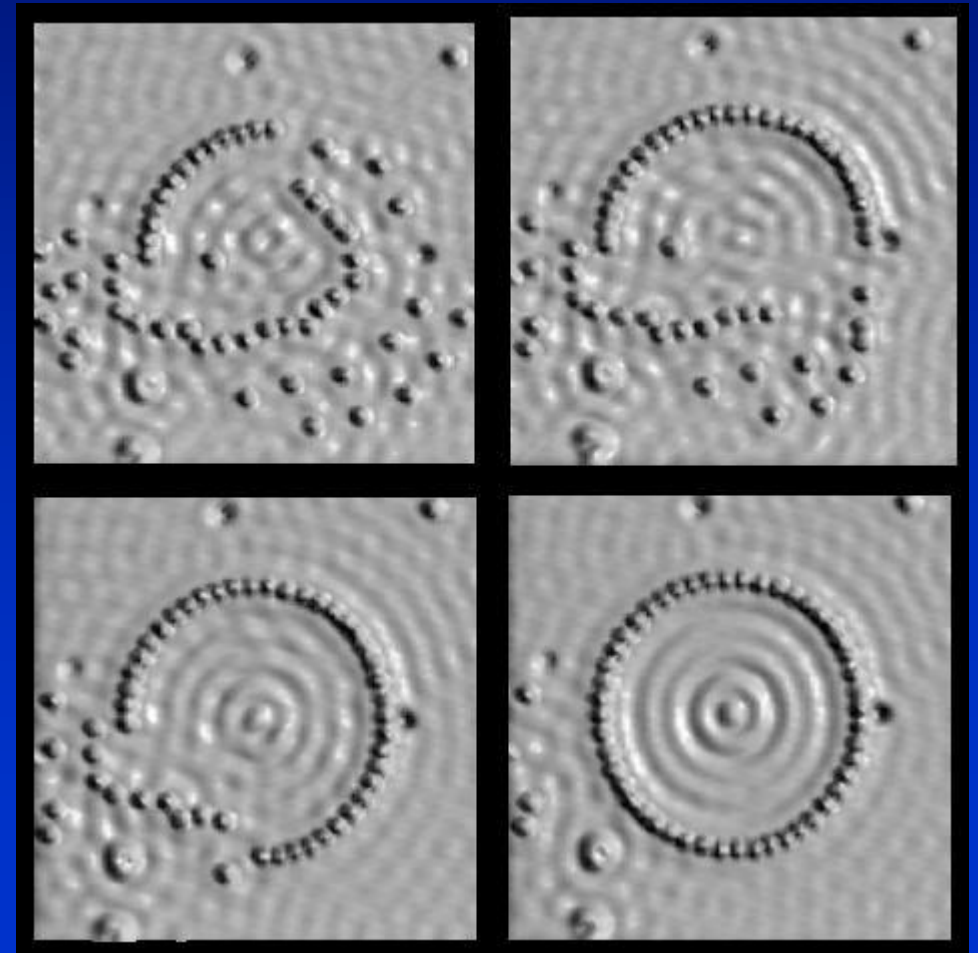
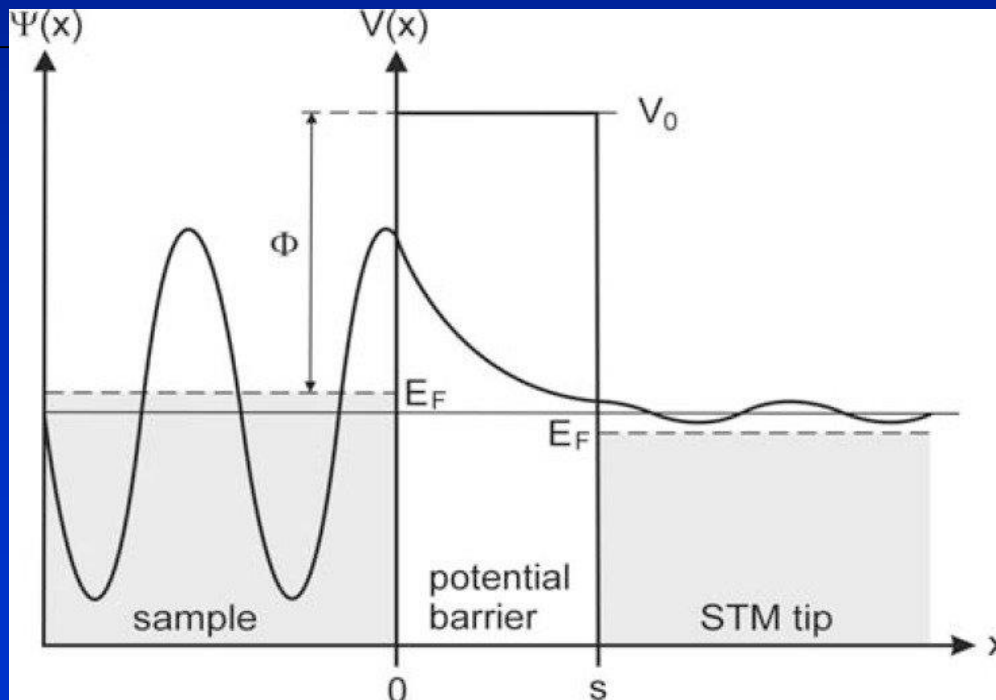
... když má mion energii například 3 GeV, tj. zhruba 30x větší než klidovou, má střední dráhu do rozpadu zhruba 20 km.

Na zemský povrch dopadají miony s intenzitou zhruba **1 mion/cm² za minutu**



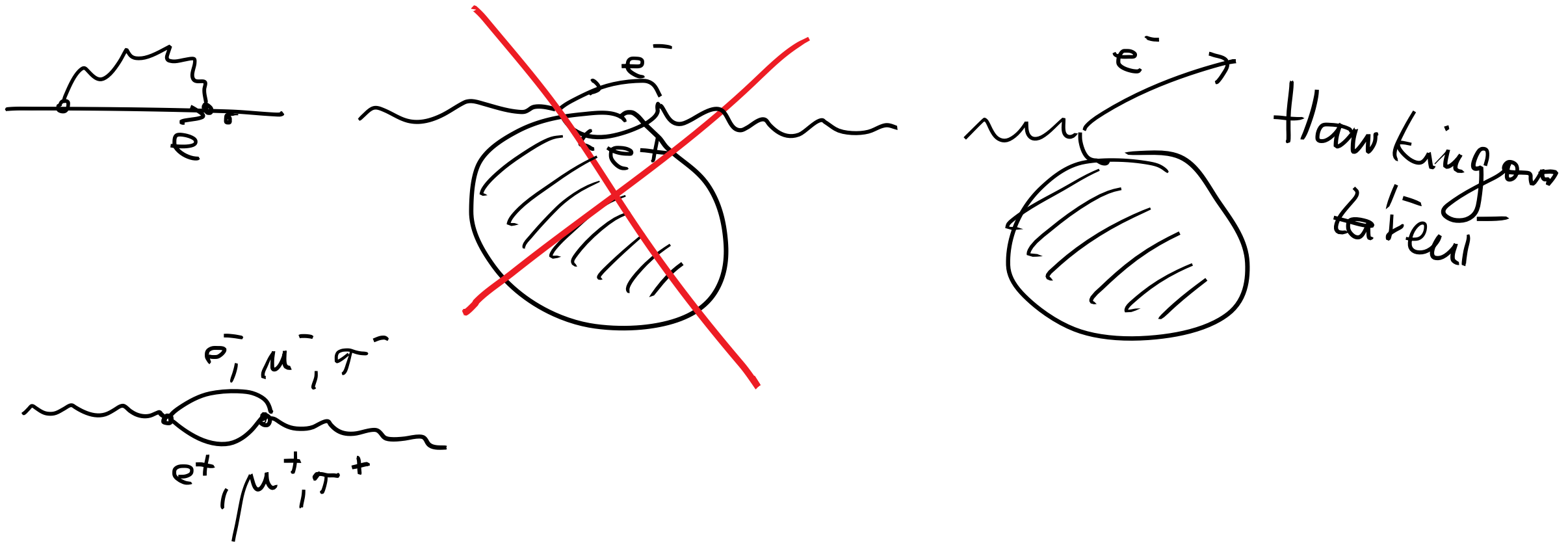
Srážky „zdravého rozumu“ s vědou

Kvantová mechanika - třeba tunelový jev
(...[https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning
tunneling microscope](https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope))



Srážky „zdravého rozumu“ s vědou

Kvantová teorie pole



Dnešní program:

- Stručně o čem budeme mluvit
- Částicová fyzika – minimum pro vzdělance 21. století
- Srážka koumáka a mikrosvěta, aneb kde „selský rozum selhává“
- Je to fyzika nedávné minulosti, dneška a zítřka ...

Minulý týden

The screenshot shows a web browser window with a single tab titled "Vědci z laboratoře v USA tvrdí, že...". The address bar displays the URL "https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/3294...". The page header features the "CT24" logo on the left and navigation buttons for "ŽIVĚ" (Live) and "RUBRIKY" (Categories) on the right. The main headline reads "Vědci z laboratoře v USA tvrdí, že našli důkazy pro pátou základní fyzikální sílu". Below the headline, the date "8. 4. 2021" is shown. The article text states: "Vědci z laboratoře Fermilab poblíž Chicaga se domnívají, že při svých experimentech objevili důkazy existence páté základní fyzikální interakce, neboli síly. Narazili na ně při zkoumání vlastností mionů, tedy částic menších než atomy, které jsou podle fyziků jedním ze základních stavebních kamenů veškeré hmoty ve vesmíru, napsal server BBC."

Vědci z laboratoře v USA tvrdí, že našli důkazy pro pátou základní fyzikální sílu

8. 4. 2021

Vědci z laboratoře Fermilab poblíž Chicaga se domnívají, že při svých experimentech objevili důkazy existence páté základní fyzikální interakce, neboli síly. Narazili na ně při zkoumání vlastností mionů, tedy částic menších než atomy, které jsou podle fyziků jedním ze základních stavebních kamenů veškeré hmoty ve vesmíru, napsal server BBC.

News

[First results from Fermilab's Muon g-2 experiment strengthen evidence of new physics | News \(fnal.gov\)](#)



Newsroom

[News and features](#)

[Press releases](#)

[Fermilab in the news](#)

[Fact sheets and brochures](#)

[DUNE at LBNF newsroom](#)

[Photo, video and graphics galleries](#)

[Search photo, video and graphics](#)

First results from Fermilab's Muon g-2 experiment strengthen evidence of new physics

April 7, 2021



Media contact

- Tracy Marc, Fermilab, media@fnal.gov, 224-290-7803

The long-awaited [first results](#) from the Muon g-2 experiment at the U.S. Department of Energy's Fermi National Accelerator Laboratory show fundamental particles called muons behaving in a way that is not predicted by scientists' best theory, the Standard Model of particle physics. This [landmark result](#), made with unprecedented precision, confirms a discrepancy that has been gnawing at researchers for decades.

Teoretický výpočet:

„Základní hodnota“ tzv. g-faktoru
je přesně $g = 2$,

s uvážením všech korekcí
kvantové teorie pole

$$g = 2.002\,331\,836\,20(86)$$

Experimentální hodnota

$$g = 2.002\,331\,841\,22(82)$$

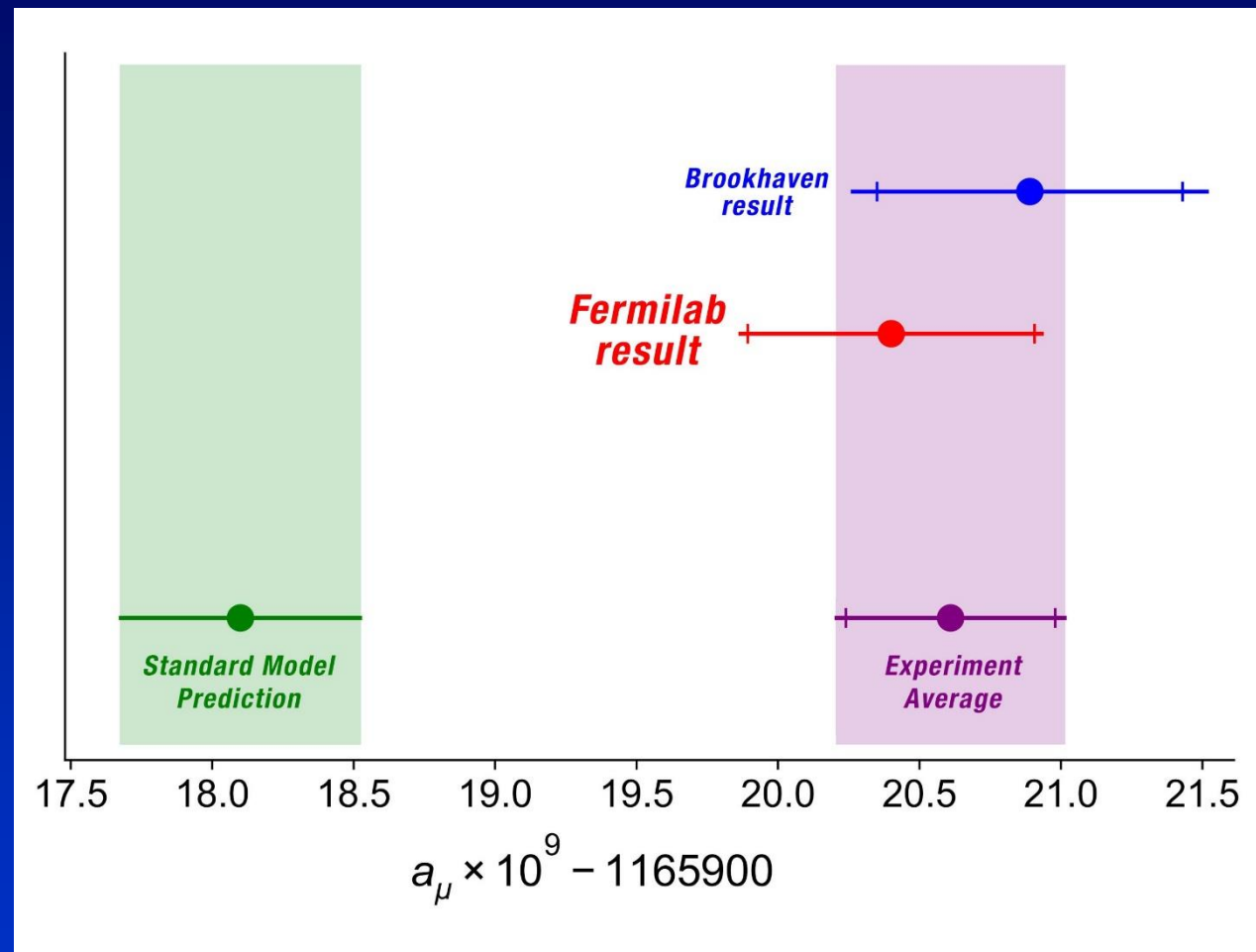
Srovnání v řeči rozdílu od dvojky

$$a_\mu = (g-2)/2:$$

$$\text{teorie: } a_\mu = 0.001\,165\,918\,10(43)$$

$$\text{exp.: } a_\mu = 0.001\,165\,920\,61(41)$$

$$\text{FNAL: } a_\mu = 0.001\,165\,920\,40(54)$$



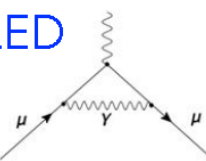
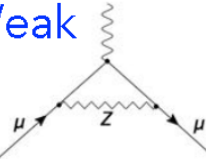
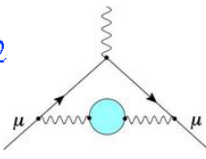
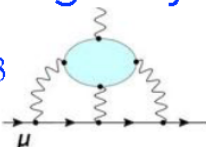
The first result from the Muon g-2 experiment at Fermilab confirms the result from the experiment performed at Brookhaven National Lab two decades ago. Together, the two results show strong evidence that muons diverge from the Standard Model prediction. Image: Ryan Postel, Fermilab/Muon g-2 collaboration

Teorie:

<https://indico.cern.ch/event/1019685/attachments/222563/3763931/lehner.pdf>

Contributions from known particles: The Standard Model

$$a_{\mu}(\text{SM}) = a_{\mu}(\text{QED}) + a_{\mu}(\text{Weak}) + a_{\mu}(\text{Hadronic})$$

QED		+ ...	$116\,584\,718.9(1) \times 10^{-11}$	0.001 ppm
Weak		+ ...	$153.6(1.0) \times 10^{-11}$	0.01 ppm
Hadronic...				
...Vacuum Polarization (HVP)		+ ...	$6845(40) \times 10^{-11}$ [0.6%]	0.37 ppm
...Light-by-Light (HLbL)		+ ...	$92(18) \times 10^{-11}$ [20%]	0.15 ppm

Numbers from Theory Initiative Whitepaper

Uncertainty dominated by hadronic contributions

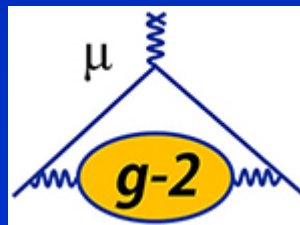
Experiment:

Kladné miony získané rozpadem pionů létají v „urychlovači“ s hybností $3,09 \text{ GeV}/c$ ($\gamma = 29,3$) a rozpadají se na pozitrony (ty jsou měřeny) a neutrina, zatím mají zpracováno 6% dat

https://indico.cern.ch/event/1019685/attachments/2222563/3763959/gv_CERN080421_s.pdf

.... https://en.wikipedia.org/wiki/Muon_g-2

Rozdíl mezi teorií, tj. Standardním modelem, a hodnotou FNAL je $4,2 \sigma$



Dnešní program:

- Stručně o čem budeme mluvit
- Částicová fyzika – minimum pro vzdělance 21. století
- Srážka koumáka a mikrosvěta, aneb kde „selský rozum selhává“
- Je to fyzika nedávné minulosti, dneška a zítřka ...

a proto na ni lákáme mladé

Cesta k částicové fyzice ... lákání středoškoláků



Cesta k částicové fyzice ... lákání na fakultu a na obor

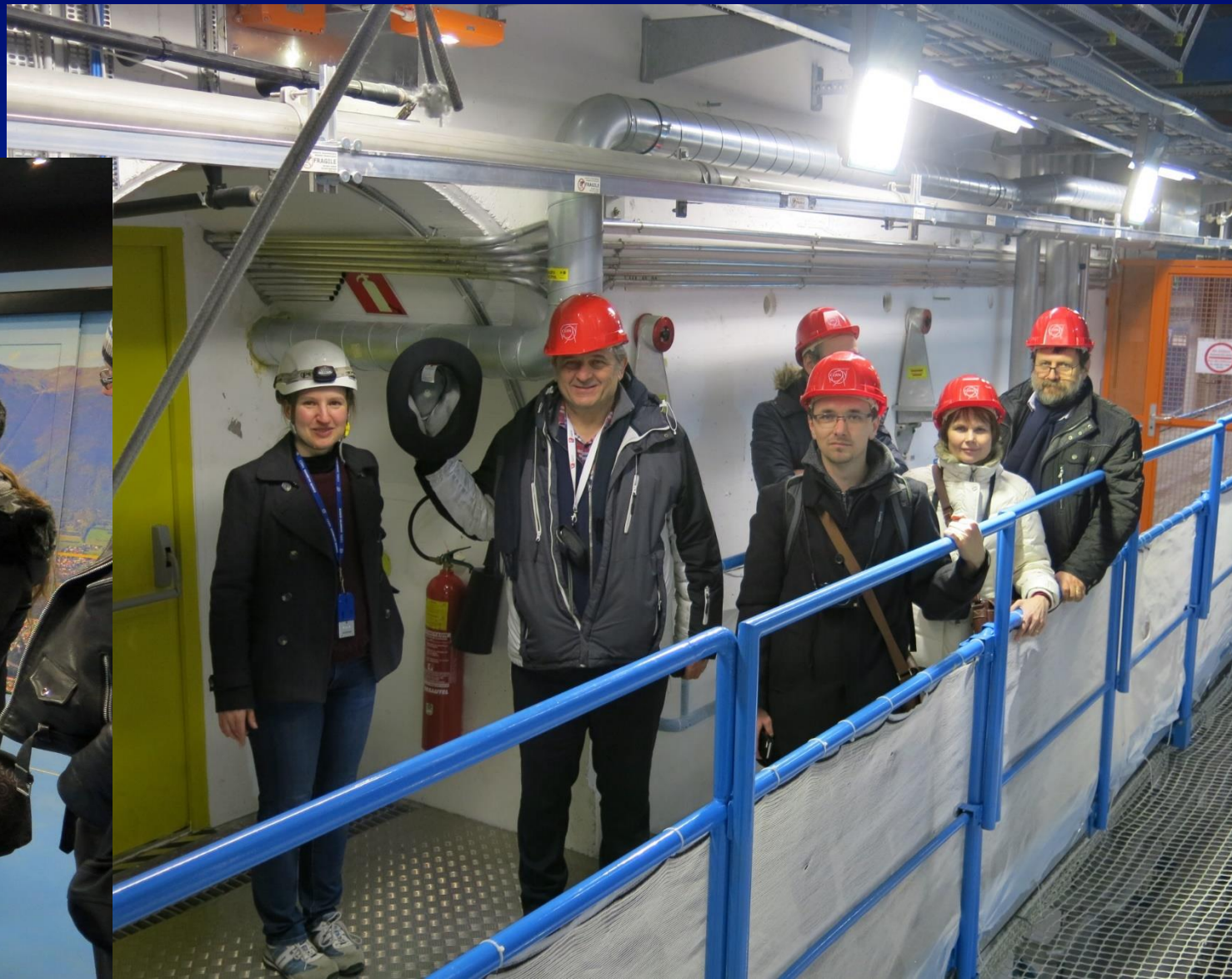




Cesta k částicové fyzice ... učitelské aktivity



Cesta k částicové fyzice ... učitelské aktivity



Cesta k částicové fyzice ... mladí a veřejnost



Accelerating science České Budějovice, podzim 2016

Cesta k částicové fyzice ... teď, HSSIP CERN





Život fyzika je
báječný ...



Postoj nefrustrovaného duchodce

Děkuji za pozornost