

# IZMB – struktura hmoty - 2

# Částice

- Elementární částice (nejdou dělit)

- Kvarky

- Leptony

- Bosony

# Částice - kvarky

- Kvarky se dělí do 6 základních vůní
- Každý je jinak hmotný a mají různé části elementárního náboje

Symbol	Vůně	Klidová hmotnost [MeV/c <sup>2</sup> ]	Elektrický náboj [e]
d	dolů (down)	3,5 – 6	-1/3
u	nahoru (up)	1,5 – 3,3	2/3
s	podivný (strange)	92,4	-1/3
c	půvabný (charm)	1270	2/3
b	krásný (beauty)	4200	-1/3
t	Pravdivý (truth)	174 980	2/3

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1.79 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

# Částice - kvarky

- Kvarky podléhají všem interakcím
- Mají poločíselný spin (jsou fermiony)
- Splňují Pauliho vylučovací princip
- Jsou základními stavebními prvky hadronů
  - Baryony (obsahují 3 kvarky)
    - Proton (uud), neutron (udd)
  - Mezony (obsahují 1 kvark a 1 antikvark)
    - Mezon  $\pi^+$  (pion) ( $\bar{u}d$ ) nebo ( $u\bar{d}$ )



# Částice - leptony

- Známe 6 základních leptonů

Částice	Značka	Klidová hmotnost [MeV/c <sup>2</sup> ]	Elektrický náboj [e]
Elektron	e <sup>-</sup>	0,511	-1
Mion	μ <sup>-</sup>	105,7	-1
Tauon	τ <sup>-</sup>	1777	-1
Neutrino elektronové	ν <sub>e</sub>	< 0,000 002	0
Neutrino mionové	ν <sub>μ</sub>	< 0,170	0
Neutrino tauonové	ν <sub>τ</sub>	< 18	0

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1.79 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

# Částice - leptony

- Leptony podléhají pouze slabé a gravitační interakci (pokud mají náboj tak i elektromagnetické)
- Mají poločíselný spin (jsou fermiony)
- Není známá vnitřní struktura
- Splňují Pauliho vylučovací princip

# Částice - bosony

- Bosony mají celočíselný spin (nemusí splňovat Pauliho vylučovací princip)
- Patří zde částice zprostředkovávající interakce

Částice	Značka	Klidová hmotnost [MeV/c <sup>2</sup> ]	Elektrický náboj [e]
Foton	$\gamma$	0	0
Gluon	g	0	0
Boson W	W	80 387	1
Boson Z <sup>0</sup>	Z <sup>0</sup>	91 187	0

- Ale i další

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1.79 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

# Antičástice

- Je známo, že každý kvark i lepton mají své anti-protějšky a mohou tvořit antičástice
- Proton ( $uud$ ) vs. antiproton ( $\overline{uud}$ )
- Elektron ( $e^-$ ) vs. pozitron ( $e^+$ )
- Neutrino ( $\nu$ ) vs. antineutrino ( $\bar{\nu}$ )



# Antičástice

- Setká-li se částice se svojí antičásticí, může dojít k anihilaci
- Při anihilaci se veškerá energie částic (jak kinetická, tak klidová  $E = m_0 c^2$ ) přemění do energie bosonů, které zprostředkovávají interakce (foton, W, Z)
- Vzniklý produkt se může dále rozpadat v závislosti na celkové energii částice-antičástice

# Interakce

- Základní interakce

- Gravitační
- Elektromagnetická
- Slabá
- Silná

➤ Je nutno upozornit, že slabost či síla těchto interakcí silně závisí na interakční vzdálenosti!!!!!!!!!!!!!!

# Interakce

- Gravitační

- Nejslabší

- Rozhodující pro velké vzdálenosti

- Pouze přitažlivá

- Kvadraticky ubývá se vzdálenosti

- První popis I. Newton

- $F_g = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2}$  kde  $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

- Lepší popis A. Einstein

- Obecná teorie relativity říká, že hmota/energie zakřivuje časoprostor, což můžeme pozorovat jako gravitaci a změnu plynutí času

# Interakce

- Elektromagnetická
  - Působí mezi elektricky nabitými částicemi
  - Relativně silná i na velké vzdálenosti
  - Přitažlivá i odpuzivá dle náboje
  - Kvadraticky ubývá se vzdálenosti
  - Komplexnější popis J. C. Maxwell
  - V mikrosvětě kvantová elektrodynamika
    - Přenos energie zprostředkovávají fotony
    - Popisuje i interakci záření s hmotou



# Interakce

- Slabá

- Působí na leptony a kvarky
- Je 2. nejslabší a  $10^{13}$ -krát slabší než silná
- Je zprostředkovávána bosony  $W$  a  $Z^0$  (mají nenulovou klidovou hmotnost)
- Dosah je velmi omezen (max.  $10^{-18}$  m)
- Je odpovědná za  $\beta$ -rozpad
- Znázorňuje se pomocí Feynmanových diagramů

# Interakce

- Silná

- Působí pouze mezi kvarky
- Je nejsilnější s dosahem kolem  $10^{-15}$  m
- Je zodpovědná za soudržnost jader
- Je zprostředkována gluony

# Interakce

- Srovnání síly a dosahu základních interakcí

Interakce	Relativní velikost	Úbytek	Dosah [m]
Silná	$10^{38}$	$r^{-7}$	$10^{-15}$
Elektromagnetická	$10^{36}$	$r^{-2}$	$\infty$
Slabá	$10^{25}$	$r^{-5} - r^{-7}$	$10^{-18}$
Gravitační	1	$r^{-2}$	$\infty$

- Elektromagnetická a slabá interakce se dají popsat jako projev jediné tzv. elektroslabé interakce

# Teorie relativity

- Speciální teorie relativity
- Jde pouze o speciální případ, kdy můžeme zanedbat gravitační interakci. Ta je předmětem až obecné teorie relativity
- Zmíníme si pouze základní úvahy a vzorce plynoucí z STR, které se nám mohou v praxi hodit



# Teorie relativity

1. Všechny mechanické i elmag. děje dopadnou ve všech inerciálních soustavách stejně. Inerciální soustavy nejsou nijak privilegovány.
  - Pokud v soustavě nepůsobí žádná síla nebo je výslednice sil nulová, pak je těleso v klidu nebo se pohybuje rovnoměrně přímočaře. Tato soustava je inerciální.

# Teorie relativity

2. Rychlost světla je ve všech inerciálních soustavách stejná.

- Z těchto 2 principů lze odvodit několik základních vztahů:

- S rostoucí rychlostí roste hmotnost

$$m = \gamma m_0$$

- S rostoucí rychlostí plyne čas pomaleji

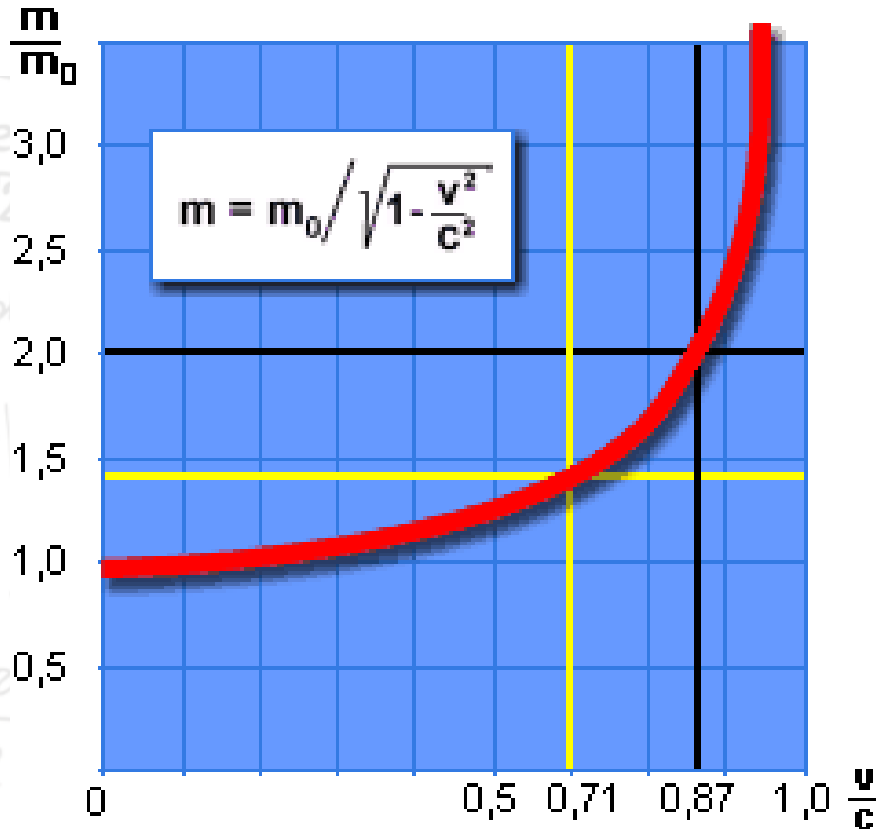
$$t = \gamma t_0$$

- S rostoucí rychlostí se délka tělesa zmenšuje

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

# Teorie relativity

- Relativistický  $\gamma$ -faktor  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$



[Podrobněji relativita](#)

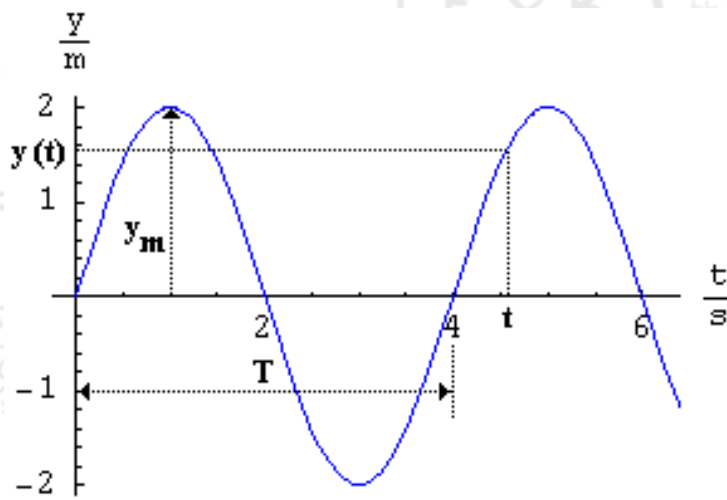
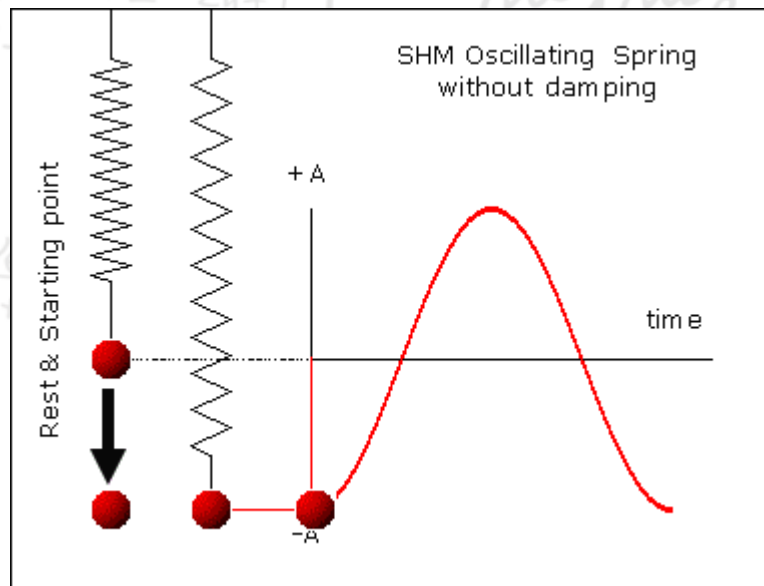
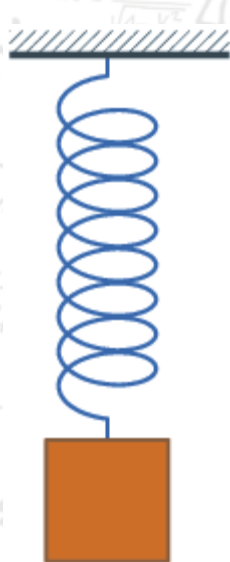
# Dualismus a vlnění

- Harmonické kmitání je (obvykle) časová změna nějaké veličiny, která se pravidelně opakuje
- Kmitavý pohyb popisujeme:
  - Okamžitou výchylkou
  - Amplitudou výchylky
  - Frekvencí (periodou) kmitání
  - Fází kmitání



# Dualismus a vlnění

$E_k = \frac{1}{2} m v^2$   
 $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V \psi = E \psi$   
 $U_{ef} = U_m$   
 $\vec{B} = \mu_0 \frac{NI \sqrt{2}}{2\pi r}$   
 $k = \rho \frac{e^2}{2m} m_0 = \frac{M_m}{N_A}$   
 $\lambda = \frac{h}{p}$   
 $\sqrt{2eU_m}$   
 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$   
 $\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{J} d\vec{S}$   
 $C(s)$   
 $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kTN_A}{M_m}}$   
 $\lambda = \frac{\ln 2}{T} F_h$   
 $\left(\frac{E_t}{E_0}\right)_{\parallel} = \frac{2 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2}{\cos(\vartheta_1 - \vartheta_2)}$   
 $E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$   
 $S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt}$



$$y = y_m \sin(\omega t + \varphi)$$

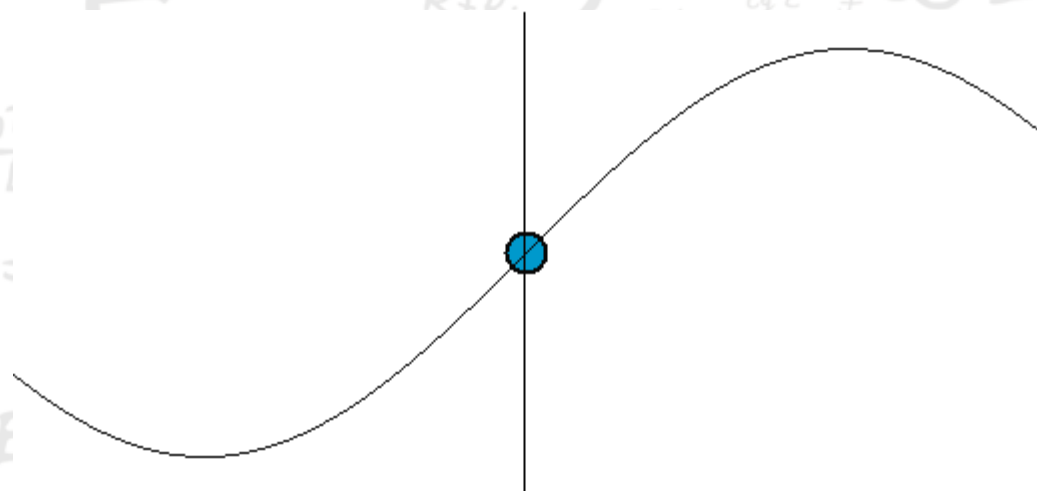
$\omega / \tau$

# Dualismus a vlnění

- Perioda (T) – doba za kterou dojde k 1 kmitu
- Frekvence (f) – převrácená hodnota periody  $f = \frac{1}{T}$  jednotka  $Hz = s^{-1}$
- Úhlová rychlost ( $\omega$ ) – velikost úhlu v radiánech, který opíše za 1 s  $\omega = 2\pi f$
- Fáze kmitání ( $\varphi$ ) – počáteční výchylka kmitání v radiánech

# Dualismus a vlnění

- Vlnění můžeme popsat jako kmitání, které se pohybuje prostorem



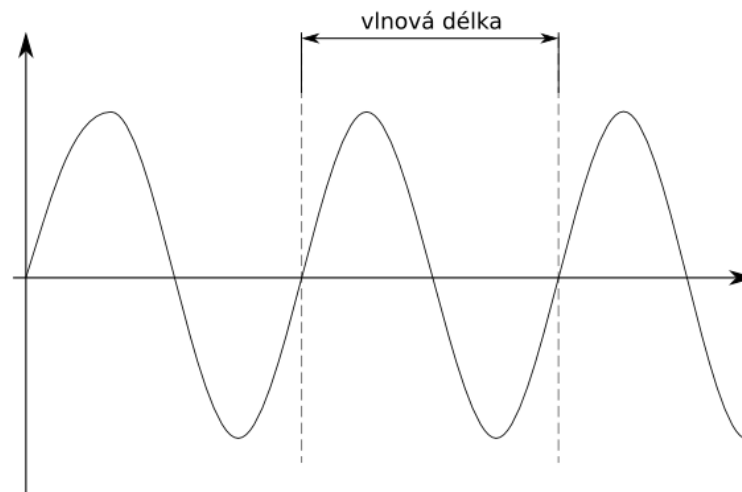
$$y = y_m \sin\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

$E_k = \frac{1}{2} m v^2$   
 $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi$   
 $U_{ef} = U_m$   
 $\vec{B} = \mu_0 \frac{NI\sqrt{2}}{2\pi r}$   
 $k = \frac{p^2}{2m} m_0 = \frac{M_0}{N_A}$   
 $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}}$   
 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$   
 $\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} d\vec{S}$   
 $C(s)$   
 $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kTN_A}{M_m}}$   
 $\lambda = \frac{\ln 2}{T} F_h = \frac{Sh\rho g}{2m}$   
 $\left(\frac{E_t}{E_0}\right)_{\parallel} = \frac{2\cos\vartheta_1\cos\vartheta_2}{\cos(\vartheta_1-\vartheta_2)\sin(\vartheta_1+\vartheta_2)}$   
 $E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$   
 $S = \frac{1}{A} \frac{d\omega}{dt}$

# Dualismus a vlnění

- Vlnová délka ( $\lambda$ ) – Vzdálenost, kterou urazí vlnění při jednom kmitu (neboli za dobu jedné ~~frekvence~~ **periody**)

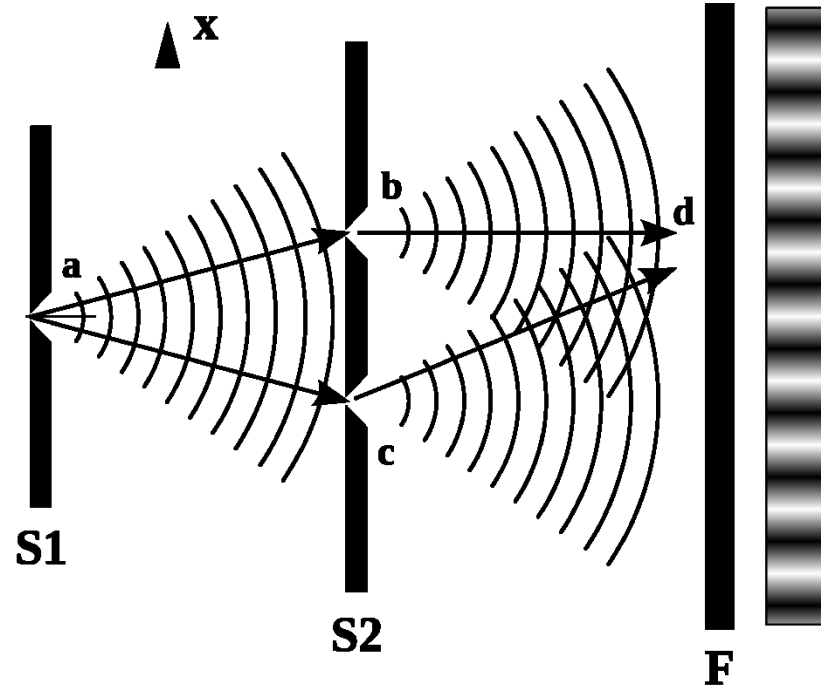
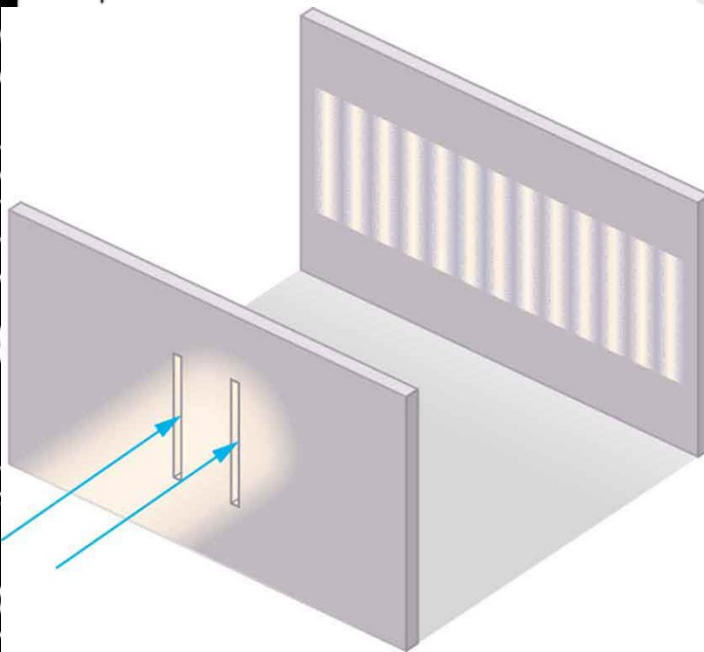
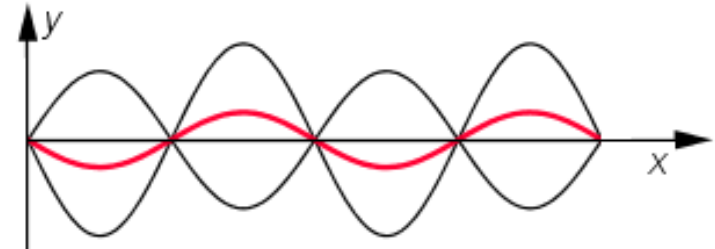
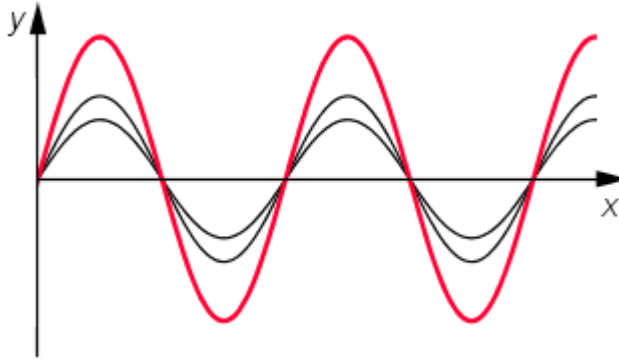
$$\lambda = vT = \frac{v}{f} = \frac{2\pi v}{\omega}$$





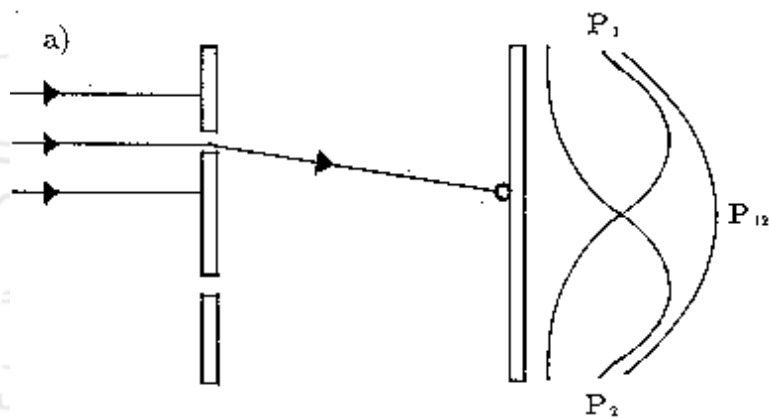
# Dualismus a vlnění

- Interference vlnění

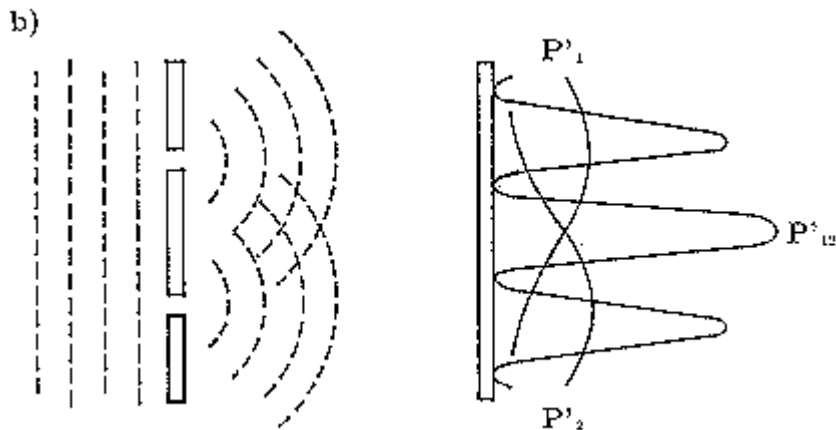


# Dualismus a vlnění

- Co když totéž provedeme s částicemi?



Pohled klasické fyziky



Pohled kvantové  
mechaniky – částice  
interferují jako vlny

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V \psi = E \psi$$

$$U_{ef} = U_m$$

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{NI \sqrt{2}}{2\pi r m}$$

$$k = \frac{p^2}{2m} m_0 = \frac{M_0}{N_0}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eU}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \psi(\alpha)$$

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{C}(s)$$

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kTN_A}{M_m}}$$

$$\lambda = \frac{h \nu_2}{T} F_h = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{1}{T} \cos(\nu_1 - \nu_2) \sin(\nu_1 + \nu_2)$$

$$\left( \frac{E_t}{E_0} \right)_{\parallel} = \frac{2 \cos \nu_1 \cos \nu_2}{\cos(\nu_1 - \nu_2) \sin(\nu_1 + \nu_2)}$$

$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt}$$

# Dualismus a vlnění

- Louis de Broglie (1924)
- Částice může mít za určitých podmínek vlnový charakter a naopak
- Pro částici i vlnu jde určit vlnová délka

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

$h$  – Planckova kons.



# Zákony zachování

- Ve světě fyziky existuje celá řada zákonů zachování
- Je důležité vědět, kdy který platí a jak jej použít. Pak jdou fyzikální problémy jednodušeji vyřešit a interpretovat
- Zmíníme si zde jen pár z následujících
  - Zachování energie, hybnosti, el. náboje, momentu hybnosti, baryonového čísla, leptonového čísla, barevného náboje, symetrie...



# Zákony zachování

- Zákon zachování energie
- Nejznámější a nejjednodušší je zachování mechanické energie, kdy zůstává zachován součet potenciální a kinetické energie systému

$$E_k + E_p = \textit{konst.}$$

- Ale tento zákon platí i obecně pro libovolný druh energie

# Zákony zachování

- Zákon zachování hybnosti (ZZH)
- Celková hybnost izolované soustavy se nemění
- Při práci se ZZH si musíme uvědomit, že hybnost je vektorová veličina a podle toho upravovat výpočty

$$\Delta \vec{p} = 0$$

# Zákony zachování

- Zákon zachování momentu hybnosti
- Celkový moment hybnost izolované soustavy se nemění
- Jedná se o analogii zachování hybnosti, avšak pro rotační pohyb
- Je-li výsledný moment vnějších sil působících na danou soustavu nulový, pak se celkový moment hybnosti zachovává vzhledem k danému bodu

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = 0$$



# Zákony zachování

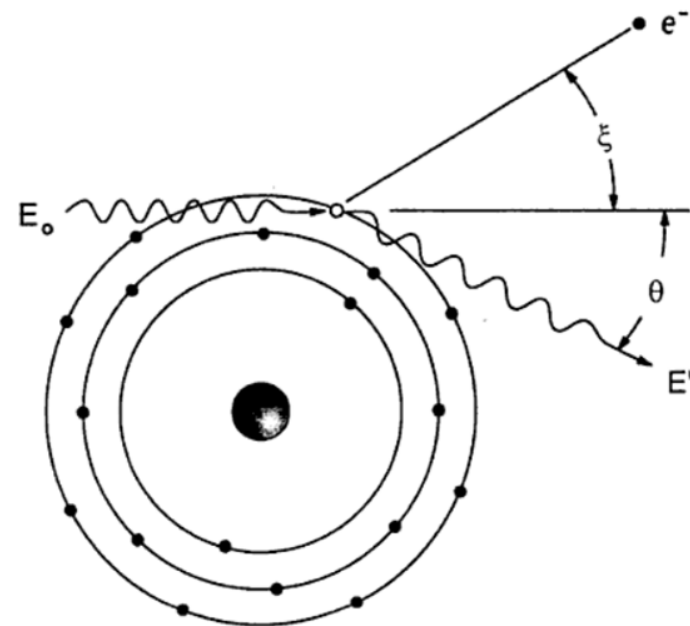
- Zákon zachování el. náboje
- Celkové množství náboje v elektricky izolované soustavě zůstává konstantní
- Elektrický náboj nelze vytvořit ani zničit, ale pouze přemístit.

$$\frac{dQ}{dt} = 0$$



# Comptonův jev

- Dopadající foton, může interagovat s elektronem z vnější vrstvy atomového obalu, který je slaběji vázán
- V takovémto případě může dojít k uvolnění elektronu z obalu a k rozptylu fotonu, který změní svou vlnovou délku



# Comptonův jev

- Tento jev hraje důležitou roli při interakci RTG s látkou (při ozařování pacienta)
- Také se jedná o hezkou demonstraci zákona zachování energie a hybnosti.

Konec





# Dodatky 4

- Teorie relativity byla ve své době velmi kontroverzní a obtížně prokazatelná. I to mohlo sehrát roli při udílení Nobelovy ceny, kterou Einstein získal za vysvětlení fotoelektrického jevu, nikoliv za teorii relativity. Její platnost byla několikrát potvrzena a nebyla doposud vyvrácena.

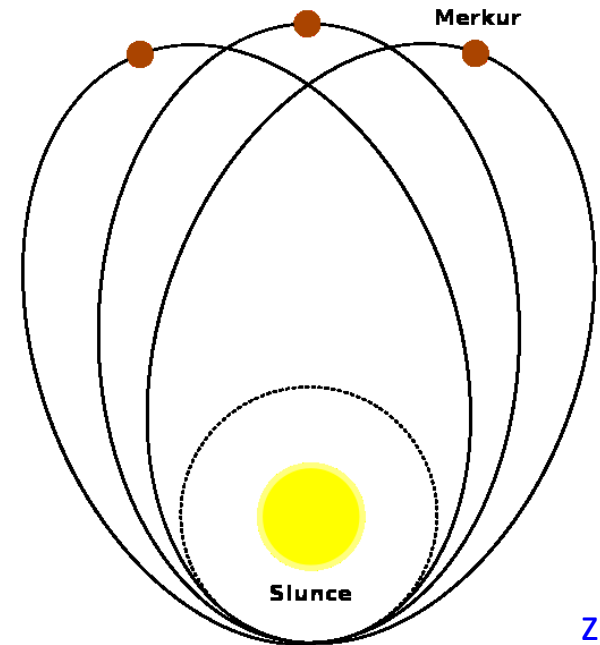


# Dodatky 4

- Skutečnost, že planety obíhají okolo Slunce po eliptických drahách, formuloval již J. Kepler ve svých zákonech v 17. století.
- Tyto zákony platí vcelku přesně. Ovšem u Merkuru byly pozorovány zajímavé skutečnosti

# Dodatky 4

- Pouze dráha Merkuru se pozvolná mění (dochází k stáčení perihelia) s rychlostí cca 43 obloukových vteřin za století. Tento jev vysvětlila až obecná teorie relativity (OTR).
- Merkur je tak blízko Slunci, že se zakřivení časoprostoru projevuje víc než u ostatních planet



# Dodatky 4

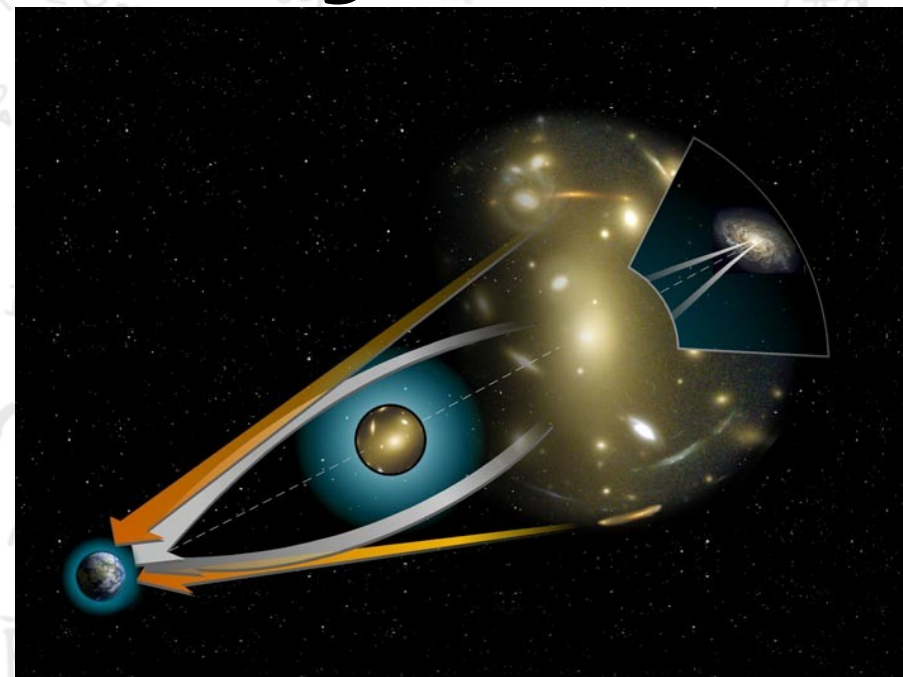
- Silné gravitační pole dokáže ohýbat dráhu elektromagnetického vlnění (světla). Tomuto jevu se říká gravitační čočka.
- Tento jev nastává, pokud se mezi pozorovatelem a objektem nachází velmi hmotný objekt (černá díra, galaxie, kvasary)



# Dodatky 4

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V \psi = E \psi$$
$$U_{ef} = \frac{U_m}{2}$$
$$\vec{B} = \mu_0 \frac{NI \sqrt{2}}{4\pi r}$$
$$k = \frac{p^2}{2m} m_0 = \frac{M_r \cdot 10^{-3}}{N_A}$$
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}}$$
$$f_c = \frac{1}{T} \nu$$

$$2 \operatorname{tg} \chi_B = \frac{w_2}{w_1} = w_{21}$$
$$M_e = \sigma T^4$$
$$\phi_e = \frac{L}{4\pi r^2}$$
$$U = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{|E_{PA} - E_{PB}|}{q}$$
$$v = \frac{wh}{2\pi r m_e}$$
$$m = N \cdot m_0 = \frac{Q}{ve}$$
$$l_t = l_0(1 + \alpha \Delta t)$$
$$R = \rho \frac{l}{S}$$
$$E = v$$



Gravitační čočka

[zpět](#)



# Dodatky 4

- Dalším pokusem pro ověření platnosti OTR byl Shapirův experiment. Byla měřena doba letu radiových vln, které se odrážely od Venuše. Tyto vlny procházely v těsné blízkosti Slunce a z důsledku pomalejšího plynutí času v blízkosti tak hmotného tělesa mělo dojít ke zpoždění cca 200  $\mu\text{s}$ . Tento čas byl skutečně naměřen.

Konec 4. dodatku.

[zpět](#)

# Dodatky 5

## • Maxwellovy rovnice (1865)

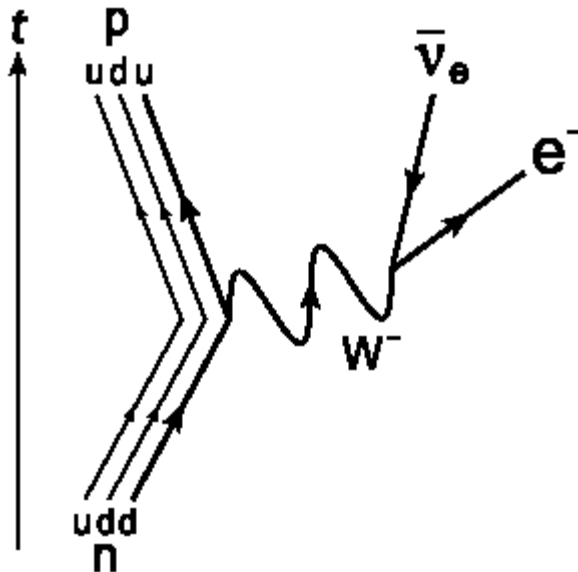
Integrální tvar	Diferenciální tvar
$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$

- Obrácený trojúhelník je operátor pro gradient zvaný nabla – vlastně návod, jak se má derivovat. Počítání s těmito operátory podléhá určitému formalismu.

Konec 5. dodatku.

# Dodatky 6

- Slabá interakce může za  $\beta$ -rozpad
- Je zprostředkováván bosonem  $W^-$



Feynmanovy diagramy jsou bez dalších vysvětlení nefyzikovy zcela nesrozumitelné, snad tu: [http://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath\\_feynman.htm](http://atlas.physicsmasterclasses.org/cz/zpath_feynman.htm)

Konec 6. dodatku.

[zpět](#)