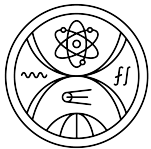
Základy fyziky

Juro Tekel

Katedra teoretickej fyziky
FMFI, UK



FACULTY OF MATHEMATICS,
PHYSICS AND INFORMATICS
Comenius University
Bratislava



juraj.tekel@gmail.com

Čo je to fyzika



Čo je to fyzika

Fyzika je veda = popisuje pravidlá a predpovedá budúcnosť.

Objekt záujmu teraz

$\Downarrow$

Nejaké pravidlá

$\Downarrow$

Objekt záujmu neskôr

Tiež nás zaujíma aké sú zaujímave vlastnosti systému a ako sa menia.

Objektom záujmu fyziky sú neživé veci alebo systémy.



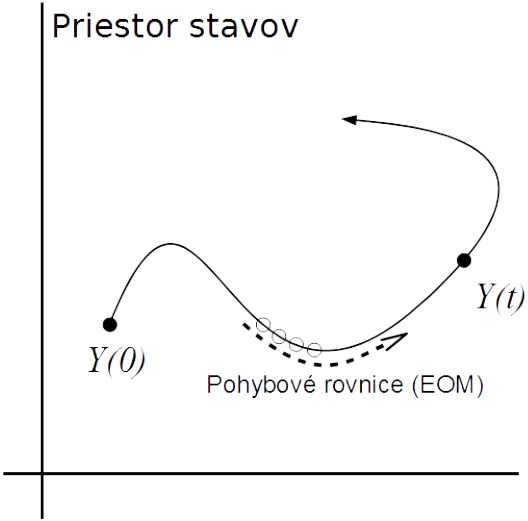
Čo je to fyzika

V prípade fyziky to konkrétne znamená:

- systém je popísaný množinou všetkých svojich možných stavov,
- pravidlá sú dané vo forme rovníc, ktoré hovoria ako sa tento stav mení,
- tieto rovnice sú zväčša diferenciálne, tj. iterujú zmenu za veľmi krátky čas,
- zaujímavé vlastnosti (fyzikálne veličiny) sú potom funkcie meniaceho sa stavu.

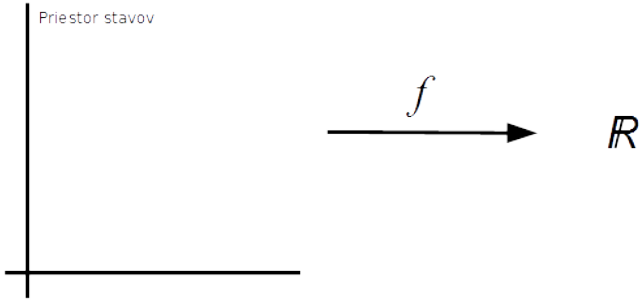


Čo je to fyzika



Čo je to fyzika

Fyzikálna veličina:



$$f(t)=f(Y(t))$$

Čo je to fyzika

Príklady.

- **Voľná vec na priamke.**
  Stavy = $\mathbb{R}^2$ (poloha a rýchlosť)
  Veličiny = rýchlosť, zrýchlenie, energia, hybnosť
  EOM $\frac{d^2x}{dt^2} = 0$
- **Vec na priamke v konštantom silovom poli.**
  Stavy = $\mathbb{R}^2$ (poloha a rýchlosť
  Veličiny = rýchlosť, zrýchlenie, energia, hybnosť
  EOM $\frac{d^2x}{dt^2} = F$
- **Dve veci v rovine s interakciou.**
  Stavy = $\mathbb{R}^8$ ($2 \times 2\times$poloha a $2 \times 2\times$rýchlosť)
  Veličiny = rýchlosť, zrýchlenie, energia, hybnosť, celková energia, celková hybnosť, potenciálna energia
  EOM $\frac{d^2\vec{x}_{1,2}}{dt^2} = -\vec{\nabla}_{1,2}V(|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|)$
- **Elektromagentické pole.**
  Stavy = dve sady vektorových polí $\vec{E}(\vec{x}), \vec{B}(\vec{x})$
  Veličiny = hustota energie, hustota hybnosti, tok energie, magnetický tok (cez nejakú plochu),



Čo je to fyzika

K tomuto treba povedať, že to je strašne pozoruhodné.

- Je zaujímavé, že vôbec existujú pravidlá sveta. Naviac tie naše sú ohromne jednoduché.
- Je zaujímavé, že tieto pravidlá sa dobre popisujú matematikou.
- Je zaujímavé, že sa v tak zložitom svete vôbec niečo dá rozumne porátať.



Čo je to fyzika

K tomuto treba povedať, že to je strašne pozoruhodné.

- Je zaujímavé, že vôbec existujú pravidlá sveta. Naviac tie naše sú ohromne jednoduché.
- Je zaujímavé, že tieto pravidlá sa dobre popisujú matematikou.
- Je zaujímavé, že sa v tak zložitom svete vôbec niečo dá rozumne porátať.
  - Fyzika je matematika plus škály.
  - Toto tak trochu definuje, čo je predmetom záujmu fyziky.
  - Do hry vstupuje presnosť pozorovania.



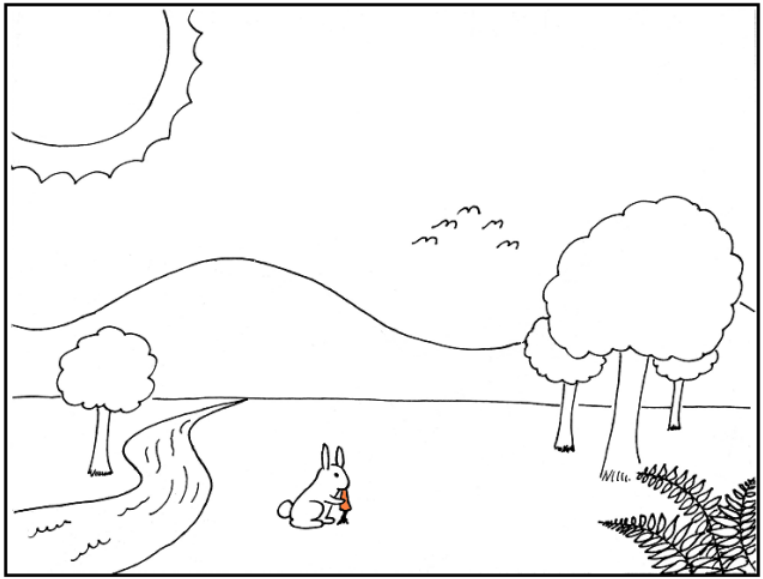
Čo je to fyzika

K tomuto treba povedať, že to je strašne pozoruhodné.

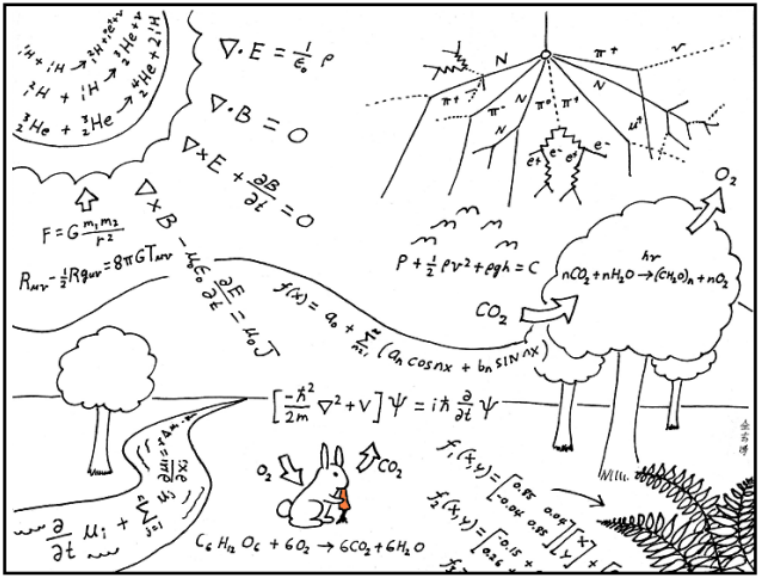
- Je zaujímavé, že vôbec existujú pravidlá sveta. Naviac tie naše sú ohromne jednoduché.
- Je zaujímavé, že tieto pravidlá sa dobre popisujú matematikou.
- Je zaujímavé, že sa v tak zložitom svete vôbec niečo dá rozumne porátať.
  - Fyzika je matematika plus škály.
  - Toto tak trochu definuje, čo je predmetom záujmu fyziky.
  - Do hry vstupuje presnosť pozorovania.

Delenie prírody na fyziku, chémiu, biológiu je tak vcelku umelé. Príroda je len jedna.





zdroj : http://abstrusegoose.com/275



zdroj : http://abstrusegoose.com/275

Teoretický vs. Experimentálny prístup



Teoretický vs. Experimentálny prístup

- Sú dva principiálne rôzne prístupy k fyzike a fyzikálnym problémom.
- Experimentálny - "stláčam gombíky a kukám, čo to robí", ale aké gombíky? ako stláčať? na čom? na čo sa pozerať?
- Teoretický - ako matematizovať problém tak, aby to dávalo zmysel a čo z takejto matematizácie vyplýva.
- Zväčša sa dopĺňajú, podporujú a navzájaom si kladú otázky.
- V každej z oblastí fyziky to znamená vždy niečo trochu iné.

Táto prednáška a celý tento kurz je skôr z teoretického pohľadu.



Všetky modely sú zlé, niektoré sú užitočné



O sférických kravách vo vákuu

- Systém je vec, ktorá vo svete v skutočnosti existuje.
- Vo fyzike systém popisujeme modelom – matematickou alebo inou konštrukciou, ktorá má zachytiť nejaké jeho vlastnosti.
- To môže v roznych situáciách znamenať niečo rôzne a veľká časť úspechu je pre daný systém a danú situáciu nájsť rozumný model.
- Napríklad rôzne popisy matematického kyvadla.
- Ale stotožňovať systém z našim matematickým popisom je na mnohých úrovniach problematické. (Zas funguje to veľmi dobre a dosť to zvádza spraviť.)



Základné princípy fyziky



Presne riešiteľné problémy.

- Skutočné problémy sa ukazujú byť veľmi komplikované a rovnice je možné doriešiť do konca len občas.
- Preto sú situácie kedy sa to dá extrémne dôležité.
- Nie je ich veľa.
- Na nich sa potom stavajú ostatné. Niekedy prevedením, niekedy (rozumnou) modifikáciou.



Základné princípy fyziky

Rozumné aproximácie.

- Nájsť takúto rozumnú modifikáciou je často hlavným problémom.
- Ide o to popísať systém tak, aby bol náš popis dostatočne presný a zahrňoval javy, ktoré chceme na systéme sledovať. Ale aby bol súčasne dostatočne blízko k niečomu, čo vieme presne spočítať.
- Tu musíme mať na pamäti presnosť, s akou sa vieme na systém pozerať. Často to chce, hlavne pre experimentátorov, veľký cit pre daný problém.
- Kľúčové slovo je zanedbávanie a kľúčové je vedieť, čo môžme a čo nemôžme v danej situácií zanedbať.



Škály.

- Rôzne procesy sa dejú na rôznych škálach – časové, priestorové, energetické, ...
- To môže určovať vzťahy medzi nimi a ich relatívny alebo absolútny význam.
- Príklad: časové skály v procesoch na našej planéte.



Základné princípy fyziky

Zotrvačnosť.

- Systémy ponechané samé na seba majú tendenciu niektoré svoje charakteristiky nemeniť. Na zmenu stavu systému je potrebná nejaká vonkajšia dynamika.
- Originál v mechanike a Newtonovi, ale objavuje sa takmer všade vo fyzike, a nie len tam.

Zákony zachovania.

- Ak existuje veličina, ktorá sa pri časovom vývoji nemení. Napríklad energia, hybnosť, elektrický náboj.
- Existencia zachovávajúcej sa veličiny výrazne obmedzuje možnú dynamiku systému.

Symetrie.

- Transformácie, ktoré nemenia systém a/alebo jeho dynamiku. Môžu byť vonkajšie (rotácie, časová inverzia, ...) ale aj vnútorné (výmena nábojov, protón/neutrón, ...).
- Ak vieme, že náš systém a/alebo jeho dynamika má nejakú symetriu, tiež výrazne to obmedzuje možnosti, čo sa môže diať. Dôležité aj keď iba približné symetrie.



Rovnovážne, stacionárne situácie.

- Špeciálne riešenia pohybových rovníc, pri ktorých je časový vývoj stavu triviálny.

$$Y(t) = Y(0)$$

- Vyžaduje špeciálne počiatočné podmienky.
- Dôležité kvôli disipatívnym efektom, lebo pod ich pôsobením sytém skôr či neskôr skončí v takomto stave.
- V ich okolí sa často výrazne zjednodušuje dynamika systému a je možné čosi porátať.
- Niekedy môže rovnováha znamenať aj celkom čulý ruch vo vnútri systému, ak sa jeho dôležité vonkajšie vlastnosti nemenia.



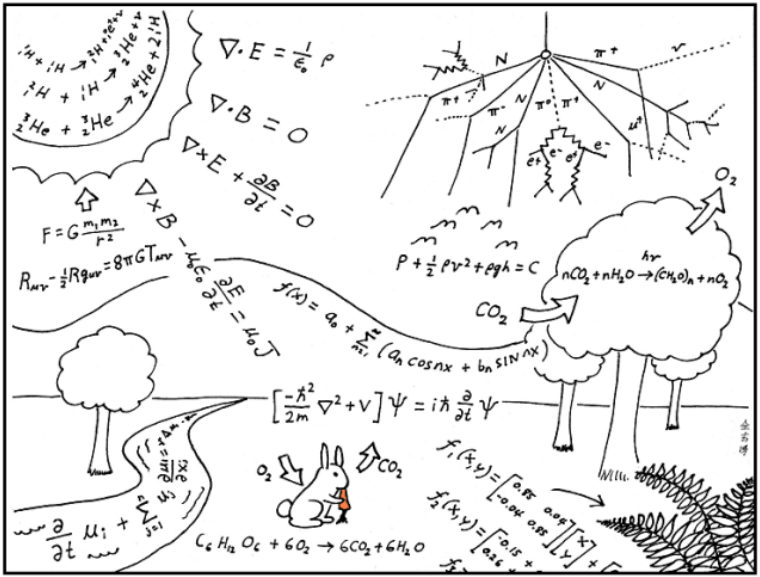
Rozdiel medzi stabilnou a labilnou rovnováhou.

- Nainicializovať systém do rovnovážneho stavu znamená, že v ňom zostane.
- To sa všad dá len veľmi ťažko a vlastne vôbec. Lebo konečná presnosť merania, konečná vedomosť o systéme, motýle v Mexiku.
- Dôležité sú také rovnovážne stavy, v ktorých malé vychýlenie nespôsobí (veľké) vzďaľovanie sa od pôvodného stavu. Hovoríme im stabilné rovnovážne stavy.
- Tie druhé sú labilné a zväčša až také užitočné nie sú.
- Predstava : guličkа na kopci vs. guličkа v doline.

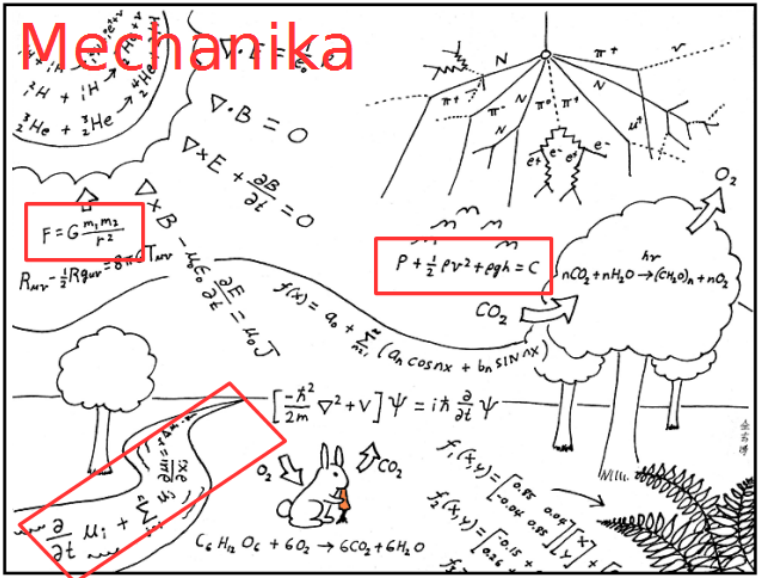


Mapa fyziky

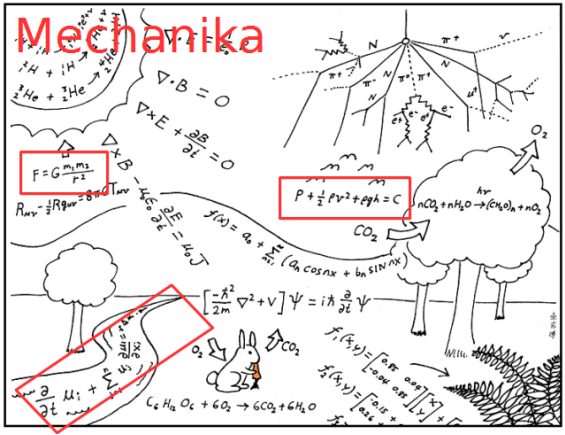


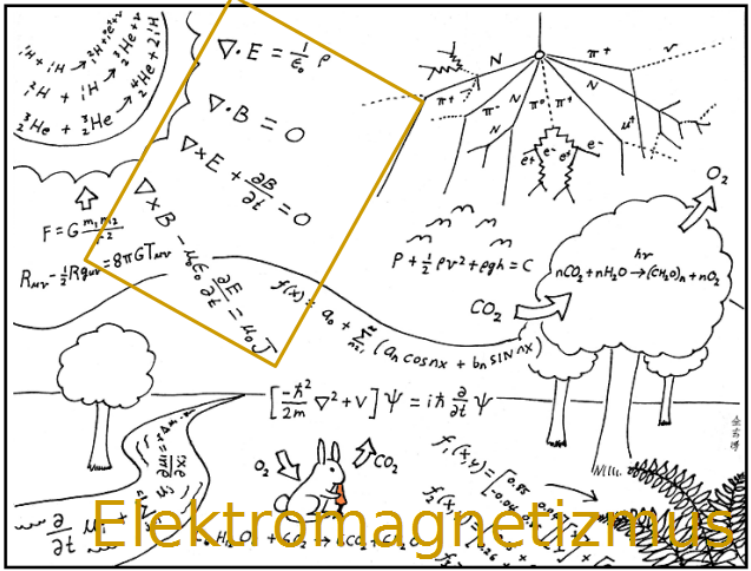

$\nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon_0}\rho$
$\nabla \cdot B = 0$
$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$
$\nabla \times B - \mu_0\epsilon_0\frac{\partial E}{\partial t} = \mu_0 J$
$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$
$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$
$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = C$
$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx)$
$\left[\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right]\Psi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi$
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$
$nCO_2 + nH_2O \xrightarrow{hv} (CH_2O)_n + nO_2$
CO_2
O_2
N
π^+
π^-
π^0
ν
μ^2
e^-

Mechanika

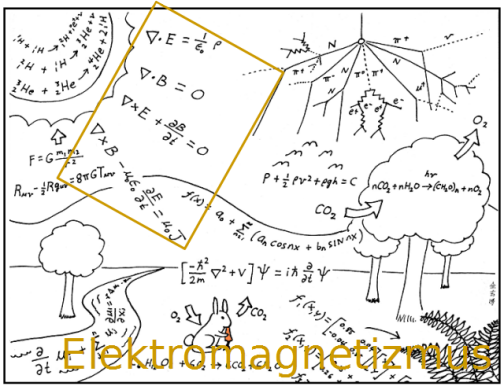

$\nabla \cdot B = 0$
$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$
$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$
$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = C$
$nCO_2 + nH_2O \rightarrow (CH_2O)_n + nO_2$
CO_2
O_2
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$

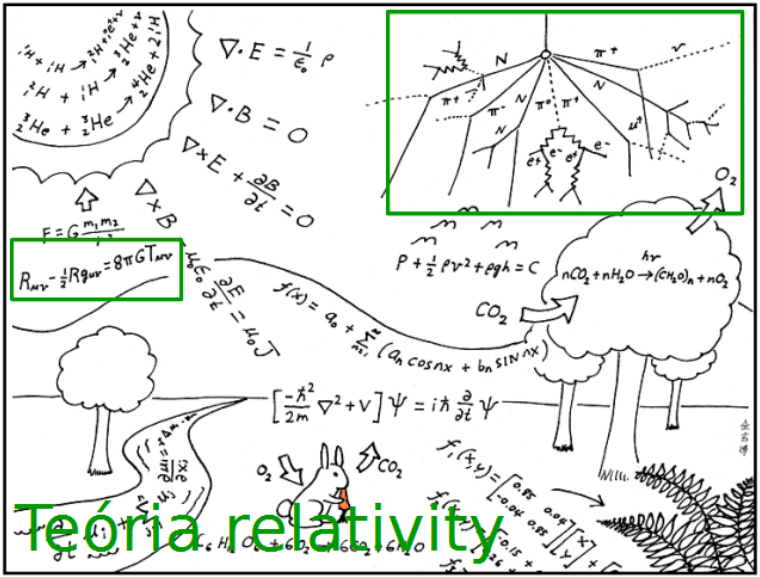
- Pohyb telies alebo skupín telies pod vplyvom rôznych síl.
- Pravidlá - Newtonove pohybové zákony
  1. zotrvačnosť,
  2. sila $F = ma$,
  3. akcia a reakcia.
- Pohyb planét okolo Slnka, tečenie vody, ohýbanie stromov.
- Historicky najstaršia, lebo študuje najdostupnejšie javy.



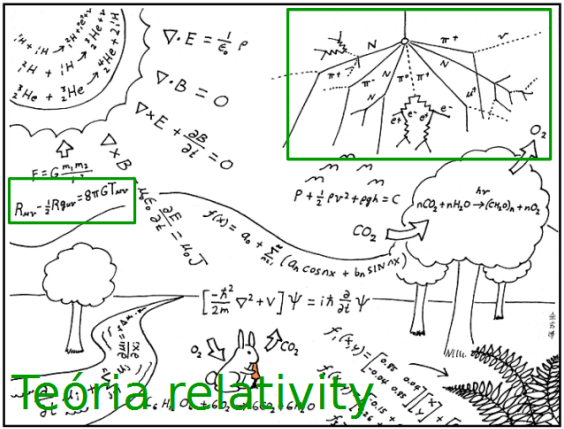

$\nabla \cdot E = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho$
$\nabla \cdot B = 0$
$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$
$\nabla \times B - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E}{\partial t} = \mu_0 J$
$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$
$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$
$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = C$
$nCO_2 + nH_2O \xrightarrow{h\nu} (CH_2O)_n + nO_2$
$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx)$
$\left[\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right]\Psi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi$
O_2
CO_2
Elektromagnetizmus

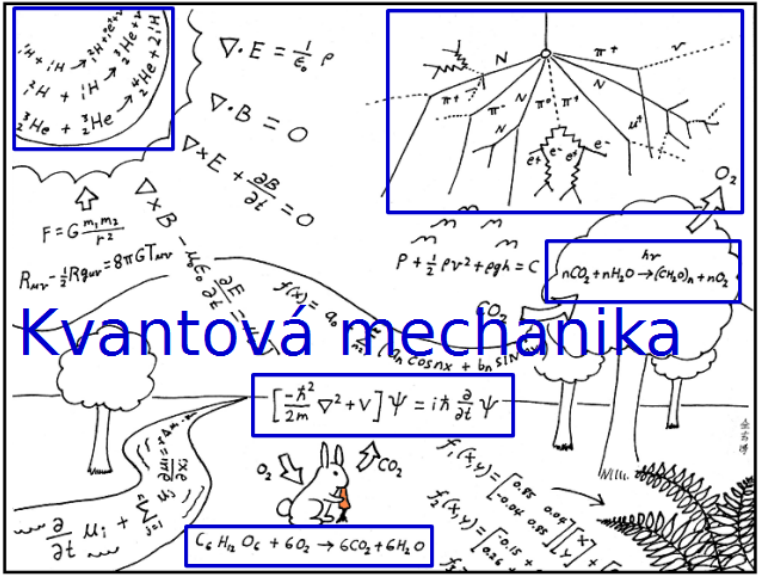
- Pohyb nabitých telies pod vplyvom elektrickej a magnetickej sily. Napríklad elektrické prúdy, vodiče. Viac menej mechanika s Coulombovym zákonom $F = kq_1q_2/r^2$ (prípadne Lorentzovou silou)
- Ale k tomu čosi (oveľa viac). Elektrické a magnetické polia majú vlastnú dynamiku. Túto popisujú Maxwellove rovnice.
- Elektromagnetické vlny, interakcia týchto vlný s nabitými telesami, optika, viditeľné a neviditeľné žiarenie telies.



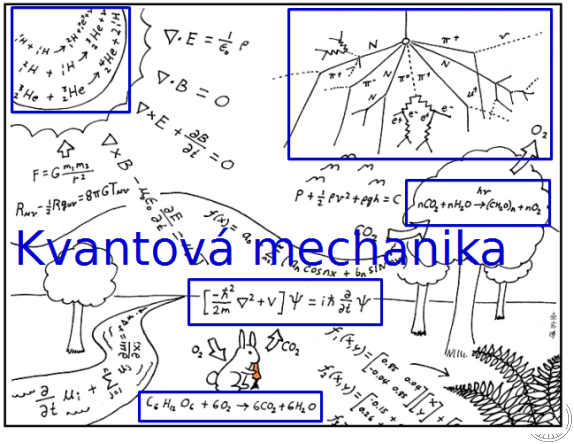

Teória relativity

- ”Popisuje veci, ktoré sa pohybujú veľmi rýchlo.”
- ”Nadstavba nad mechanikou.”
- Pohybujúci sa elektromagnetizmus. Výsledok snahy spojiť mechaniku a elektromagnetizmus do jedného balenia.
- Objavuje sa fundamentálna rýchlosť ”c”, rýchlosť svetla. Výsledky ako kontrakcia dĺžky, dilatácia času, ale hlavne relatívnosť súčasnosti a ekvivalencia hmotnosti a energie.
- Efekty zväčša na úrovni v^2/c^2.
- Zahrnutie gravitácie vedie na ”všeobecnú” relativitu a tá na čierne diery, gavitačné vlny.

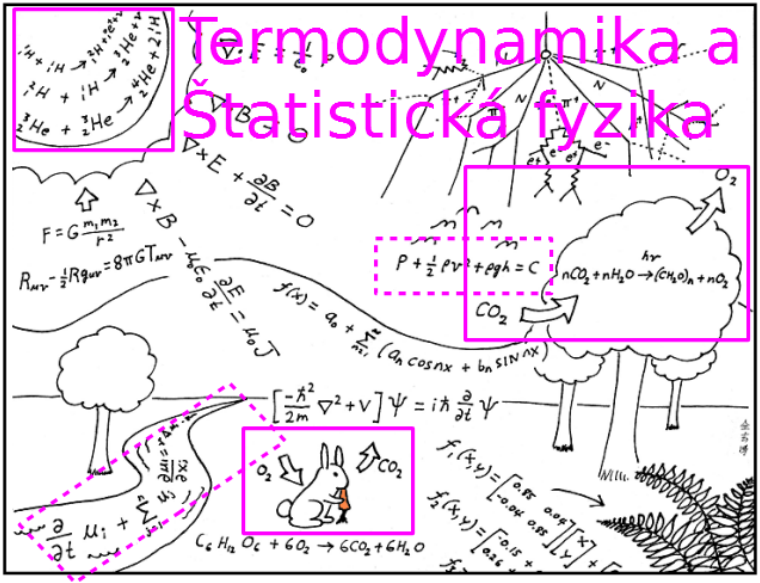



Kvantová mechanika

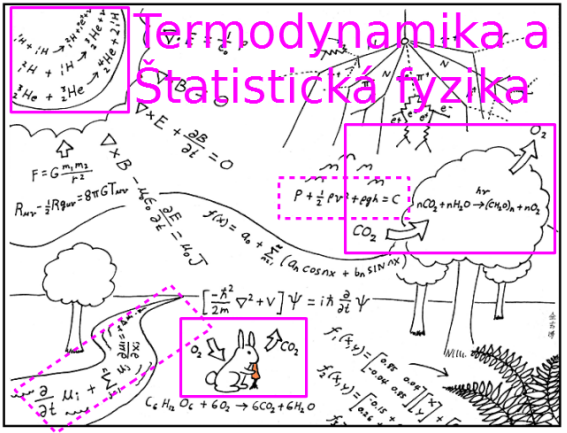
- "Fyzika veľmi malého."
- "Nadstavba nad mechanikou."
- Nadstavba nad časťou mechaniky.
- Riešenie rozporu medzi pozorovanými vlastnosťami sveta a mechanikou. Fotoelektrický efekt, Comptonov rozptyl, diskrétne spektrum prvkov.
- "Energia sa môže šíriť iba po dávkach." Vlnovo - časticová dualita.
- Opäť nová fundamentálna konštanta $\hbar$, schrödingerova rovnica, objavujú sa pravdepodobnosti.
- Prakticky všetko, čo si viem predstaviť, sa s istou pravdepodobnosťou môže stať. Pre "veľké" veci je tá pravdepodobnosť lokalizovaná na jednom jave, pre "malé" sú rozumne pravdepodobné rôzne možnosti. Tieto možnosti sú často diskrétne.
- Chémia je (tak trochu) fyzika.



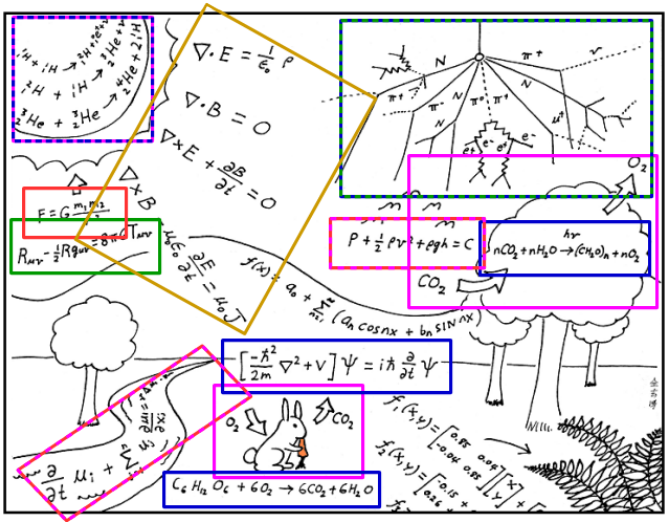
Termodynamika a Statistická fyzika



- Systémy s obrovským množstvom stupňov voľnosti $\sim 10^{23}$. Vtedy sú dôležité iba nejaké "priemerné" vlastnosti, vzťahy medzi nimi sú často vcelku nezávislé od mikroskopickej fyziky systému.
- Termodynamické zákony - prvý = zákon zachovania energie, druhý = systémy sa chcú dostávať do (spoločného) rovnovážneho stavu.
- Štatistická fyzika toto všetko vysvetľuje z prvých princípov, tj. vysvetľuje priemerovanie.
- Zaujímavé sú rozdelenia pravdepodobnosti na množine stavov.
- Dôležitú úlohu hrá zákon veľkých čísel.

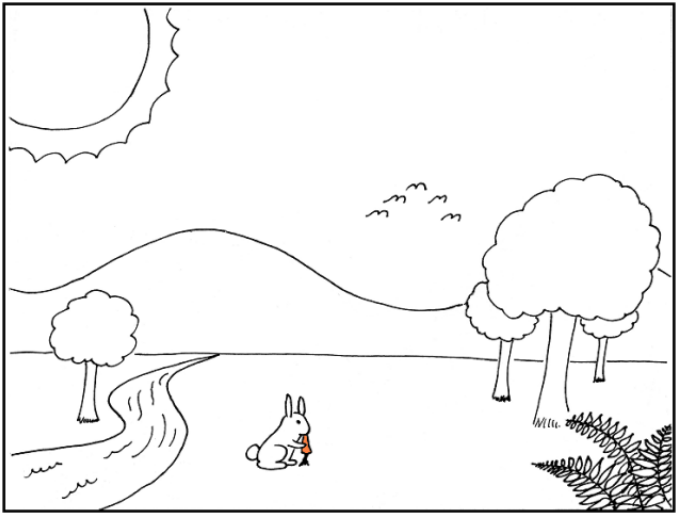


Mapa fyziky



$\nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon_0}\rho$
$\nabla \cdot B = 0$
$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$
$\nabla \times B$
$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$
$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$
$\mu_0\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \mu_0 J$
$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx)$
$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = C$
$nCO_2 + nH_2O \xrightarrow{h\nu} (CH_2O)_n + nO_2$
CO_2
O_2
$\left[\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right]\psi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi$
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$

Mapa fyziky



História fyziky



História fyziky

$$\leftarrow \begin{matrix}\text{Newton}\\ 1666\end{matrix} \longleftrightarrow \text{"klasická fyzika"} \longleftrightarrow \begin{matrix}\text{Einstein}\\ 1905\end{matrix} \rightarrow \text{"moderná fyzika"}$$



História fyziky

1666 - Annus Mirabilis

- Mor a zavretý Camridge, Newton vymyslel calculus a jeho aplikáciu v mechanike a geometrickej optike.
- 1687 - Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica
- Tri strašne dôležité veci
  - Zotrvačnosť.
  - Zákony prírody sú napísané v matematike.
  - Zjednotenie nebeskej a pozemskej mechaniky.

1905 - Annus Mirabilis

- Einstein publikoval 5 prác, ktoré znamenali kľúčový obrat v troch z oblastí fyziky.
- Špeciálna relativita - fundamentálnosť rýchlosti svetla.
- Fotoelektrický efekt - svetlo môže byť aj častica.
- Brownov pohyb - definitívny test existencie atómov.

Oba tieto zázračné roky nespadli z neba, ale sú dôsledkom postupného kumulovania vedomostí a nápadov od veľkého množstva ľudí. Len to vždy chcelo génia s finálnou ideou, čo to dal všetko dohromady.



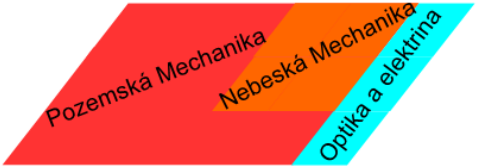
História fyziky

Dva ďalšie dôležité momenty.

- Aristoteles (384-322 BC) - vznik prírodných vied oddelených od filozfie v tom, že hlavným testom platnosti hypotéz je experiment.
- 1862 - Maxwellova elektrodynamika a zahrnutie optiky do elektromagnetizmu.

Pokrok vo fyzike je veľmi často spojený v pokrokom v technológií a s potrebou lepšie vysvetliť staré alebo aspoň nejak pochopiť novoobjavé javy.

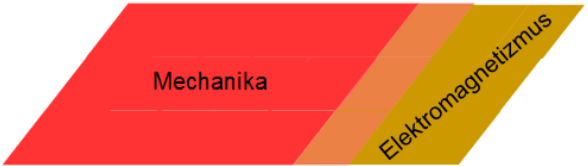



Pozemská Mechanika
Nebeská Mechanika
Optika a elektrina

1666

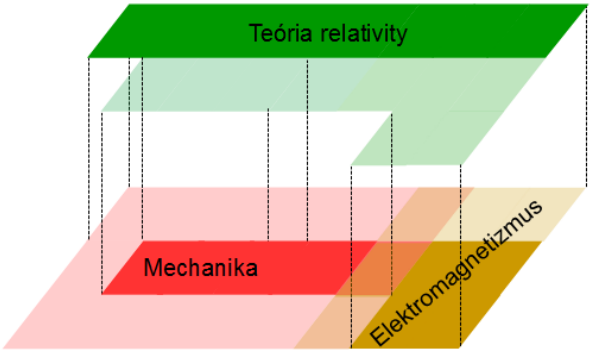


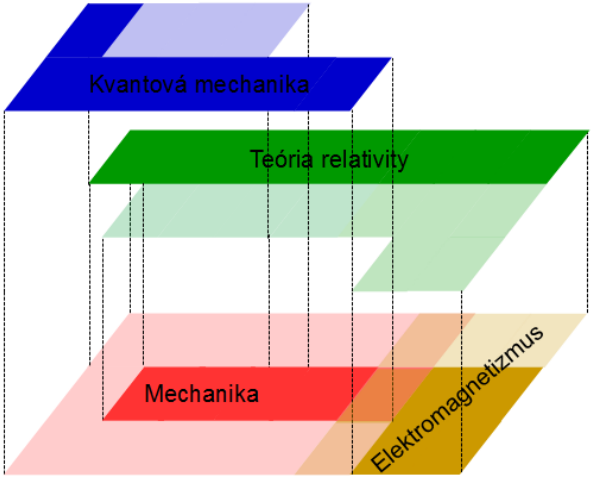
$\sim$1865

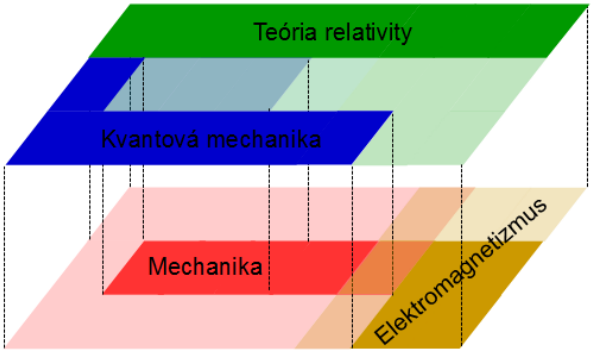


1865-1905

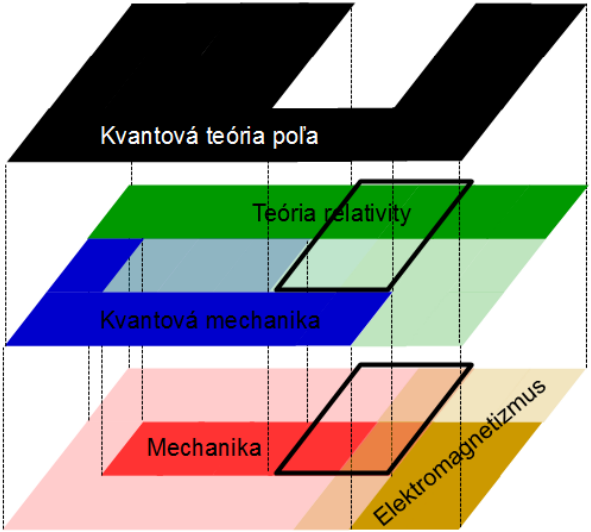



Teória relativity
Mechanika
Elektromagnetizmus


Kvantová mechanika
Teória relativity
Mechanika
Elektromagnetizmus

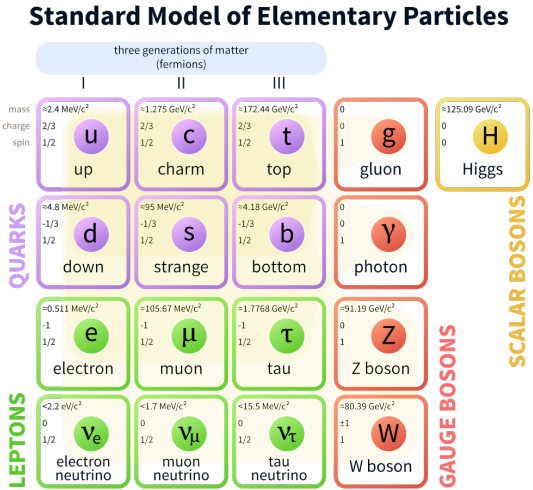

Teória relativity
Kvantová mechanika
Mechanika
Elektromagnetizmus

∼2020

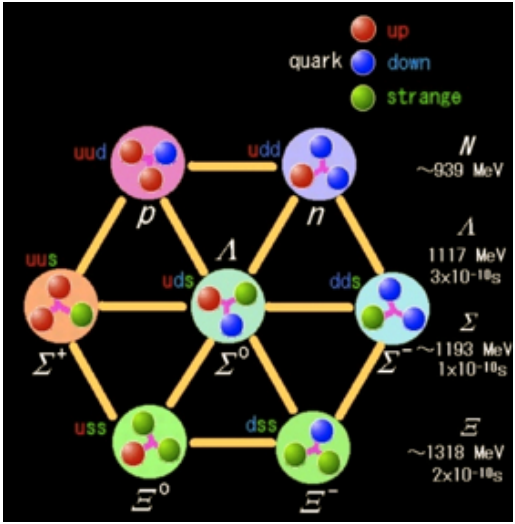

Kvantová teória poľa
Teória relativity
Kvantová mechanika
Mechanika
Elektromagnetizmus

Od kvarkov po vesmír

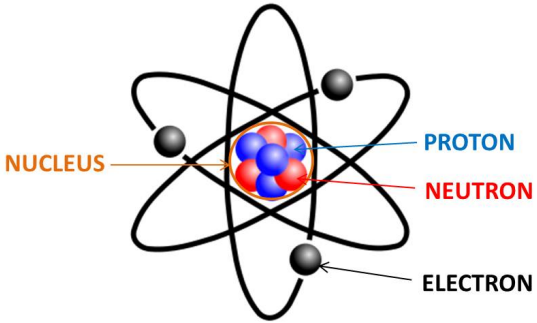



Standard Model of Elementary Particles
three generations of matter (fermions)
I
II
III
mass
charge
spin
≈2.4 MeV/c²
2/3
1/2
u
up
≈1.275 GeV/c²
2/3
1/2
c
charm
≈172.44 GeV/c²
2/3
1/2
t
top
0
0
1
g
gluon
≈125.09 GeV/c²
0
0
H
Higgs
SCALAR BOSONS
QUARKS
≈4.8 MeV/c²
-1/3
1/2
d
down
≈95 MeV/c²
-1/3
1/2
s
strange
≈4.18 GeV/c²
-1/3
1/2
b
bottom
0
0
1
γ
photon
GAUGE BOSONS
LEPTONS
=0.511 MeV/c²
-1
1/2
e
electron
=105.67 MeV/c²
-1
1/2
μ
muon
=1.7768 GeV/c²
-1
1/2
τ
tau
=91.19 GeV/c²
0
1
Z
Z boson
<2.2 eV/c²
0
1/2
νe
electron neutrino
<1.7 MeV/c²
0
1/2
νμ
muon neutrino
<15.5 MeV/c²
0
1/2
ντ
tau neutrino
≈80.39 GeV/c²
±1
1
W
W boson

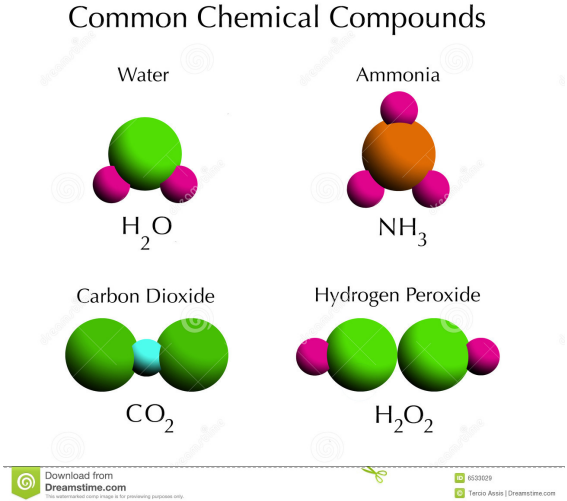
Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta



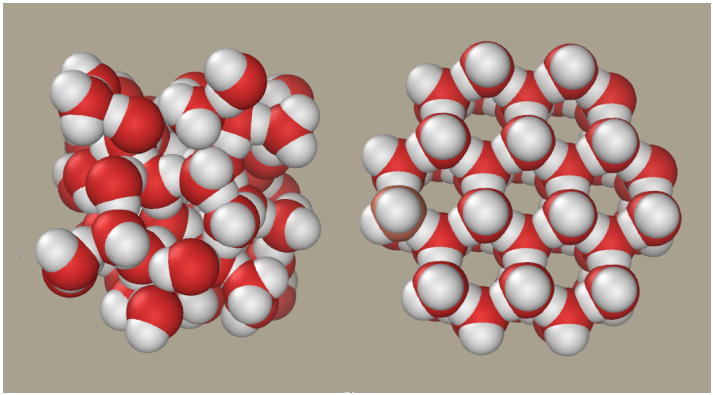
Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta





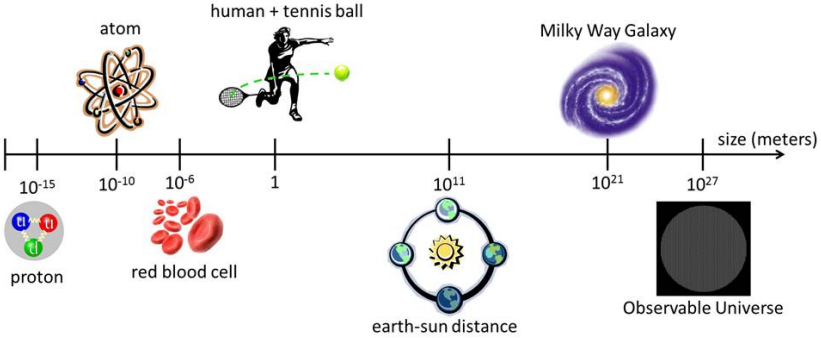

Common Chemical Compounds
Water
H_2O
Ammonia
NH_3
Carbon Dioxide
CO_2
Hydrogen Peroxide
H_2O_2
Download from
Dreamstime.com
ID 6533029
Tercio Assis | Dreamstime.com

Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta



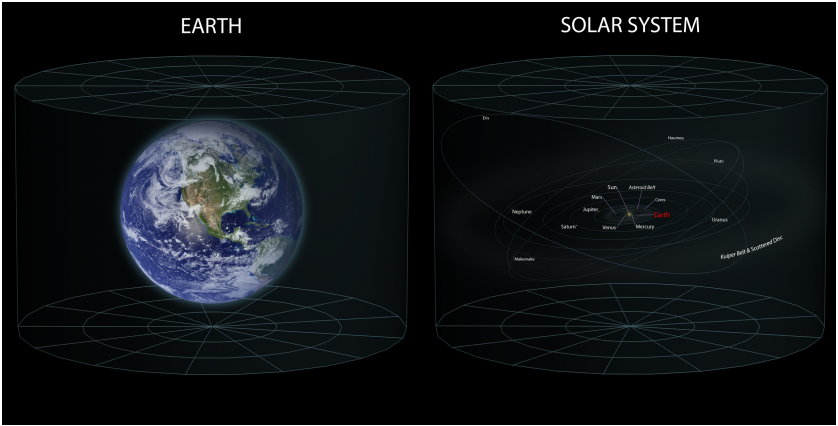


Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta

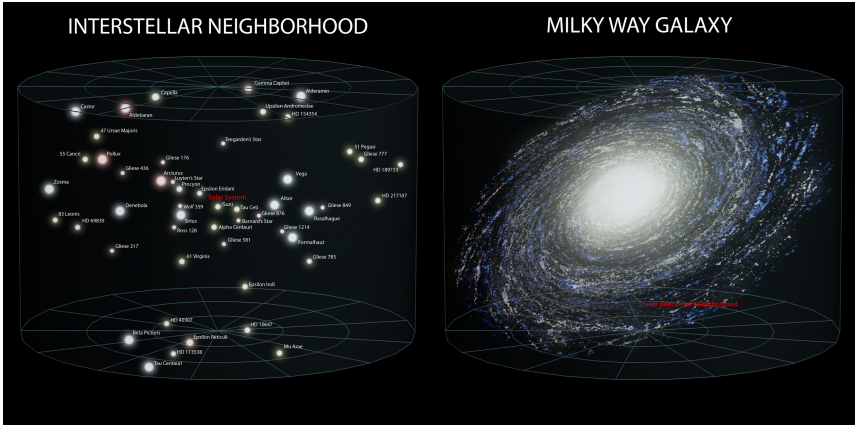




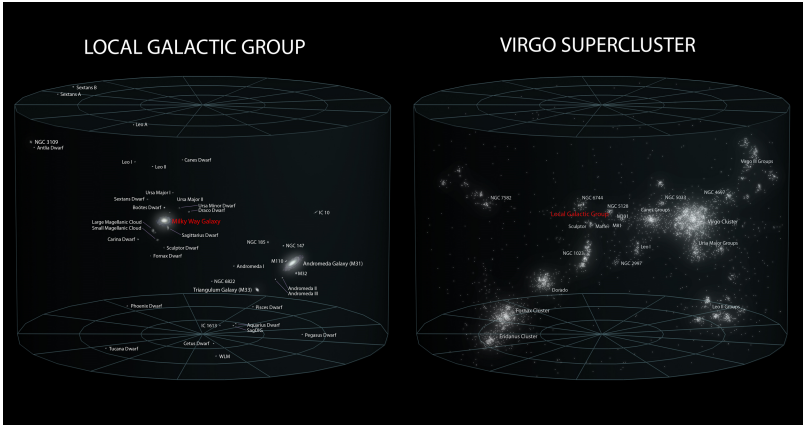
Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta



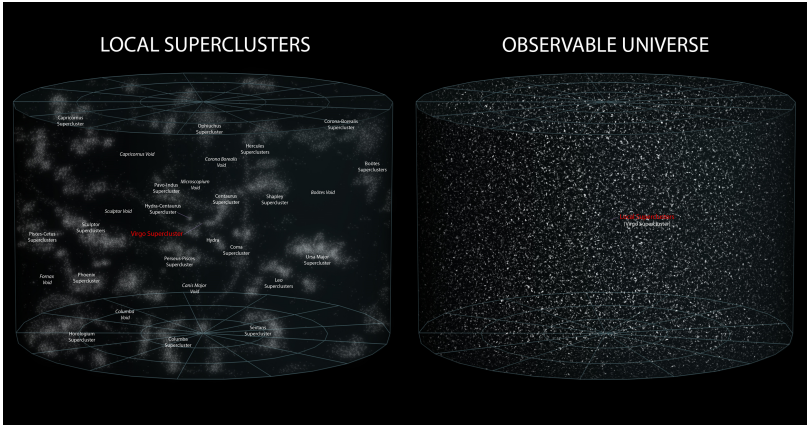
Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta



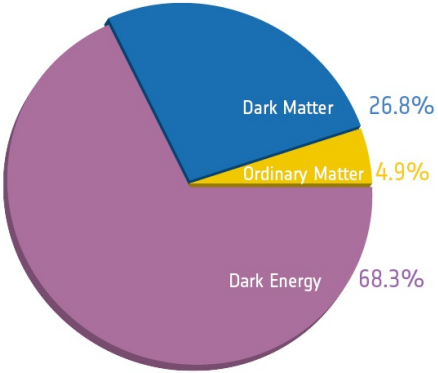
Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta



Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta

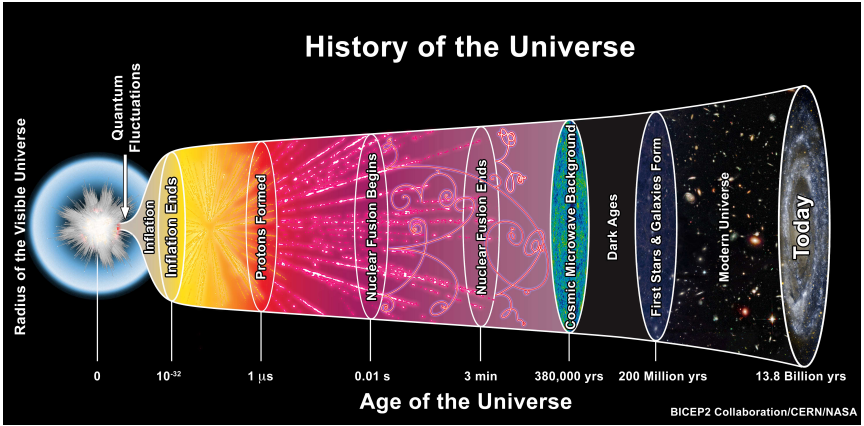


Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta





Od kvarkov po vesmír - zhrnutie stavby sveta



Nevyriešené problémy súčasnosti



Nevyriešené problémy

Veľmi subjektívny výber najzaujímavejších problémov, na ktorých fyzici v súčasnosti pracujú.

- Prečo je svet taký, ako je, aj keď by nemusel.
- Kvantová informácia a kvantové počítače.
- Chémia z prvých princípov.
- Vysokoteplotná supravodivosť.
- Turbulencia.
- Exoplanéty.
- Tmavá hmota a tmavá energia.
- Supersymetria.
- Ranný vesmír.
- Kvantová teória gravitácie.



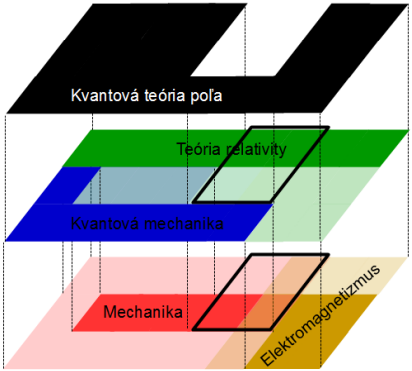
Náš predmet



Náš predmet

O čom to bude?

- Prejdeme vcelku podrobne klasickú mechaniku a základy špeciálnej teórie relativity.





Náš predmet

O čom to bude?

- Prejdeme vcelku podrobne klasickú mechaniku a základy špeciálnej teórie relativity.
- Stretneme sa tak so spústou základných myšlienok, slovíčok a techník, ktoré sa objavujú všade vo fyzike.
- Formát bude prednáška v **pondelok** a nadväzujúce cvičenie vo **štvrtok** (???).
- Po každom cvičení bude domáca úloha. Časť nasledujúceho cvičenia budeme venovať jej riešeniu, časť riešeniu príkladov spojených s minulou prednáškou.
- Domáce úlohy budú hodnotené sytémom výborne/dostatočne/nedostatočne.
  - Výborná úloha je výborná.
  - Za nedostatočnú úlohu dostanete vypočítať nejaké dodatočné príklady hodnotené rovnako.
  - Dostatočná úloha je dostatočná, ale na Ačko by ich človek nemal mať príliš veľa.
- Všetko podstatné na : `davinci.fmph.uniba.sk/~tekel1/teaching.html`

