(Fundamentalna) Fizika Elementarnih Čestica

Dan 01: Priroda ekseperimenta i opažanja Prirode

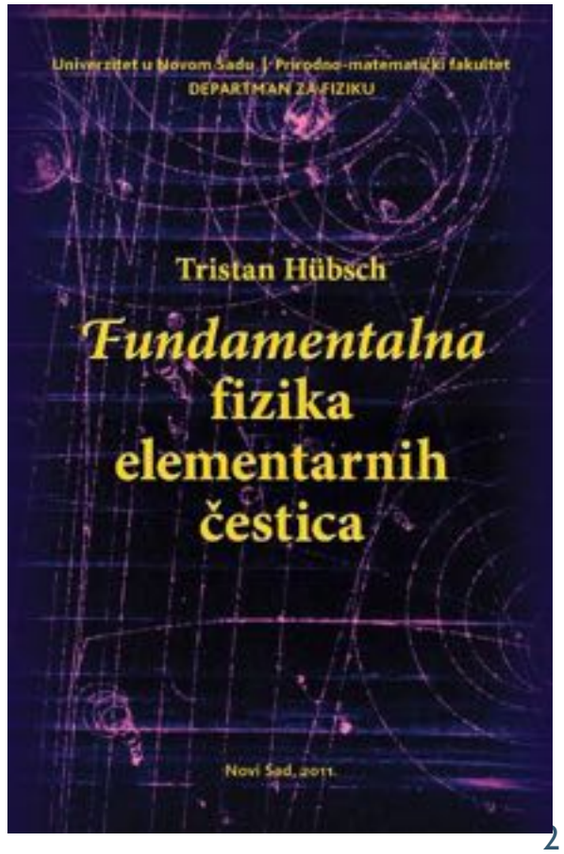
Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC
Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD
Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia
https://tristan.nfshost.com/

Da se dogovorimo:

thubsch@mac.com

- Upoznavanje — anketica (e-mail)
- Skripte i materijali
  - knjiga (~~u skriptarnici~~)
  - https://tristan.nfshost.com/HEP/FEC.html
  - i inače: https://tristan.nfshost.com/
  - https://en.wikipedia.org/
    (*oprez: nije baš sve uvek tačno!*)
  - A ako Vas (za)interesuje ova oblast:
    - *pre*print arhiva: https://arXiv.org/ kao i
      feed://export.arxiv.org/rss/hep-th
      (*po 40-tak novih radova dnevno!*)
- Ocene: Prof. Mrđa



Da se dogovorimo:

Ako ništa drugo ne zapamtite...

- Telegrafski rezime osobenosti opisa Prirode:

	Osobenost	Univerzalno svojstvo	Ujedinjuje/opisuje
	kvantnost	stabilizuje atome	talase i čestice
kalibracioni princip	**spec. relativnost**	povezuje simetrije, zakone očuvanja, sile/interakcije i geometriju	prostor-vreme, energiju-impuls
	opšta relativnost		ubrzanje-gravitaciju, masu-inerciju
	relativnost faza (talasnih funkcija)		elektro-magnetnu+slabu, kao i jaku interakciju
	supersimetrija*	stabilizuje vakuum	bozone i fermione

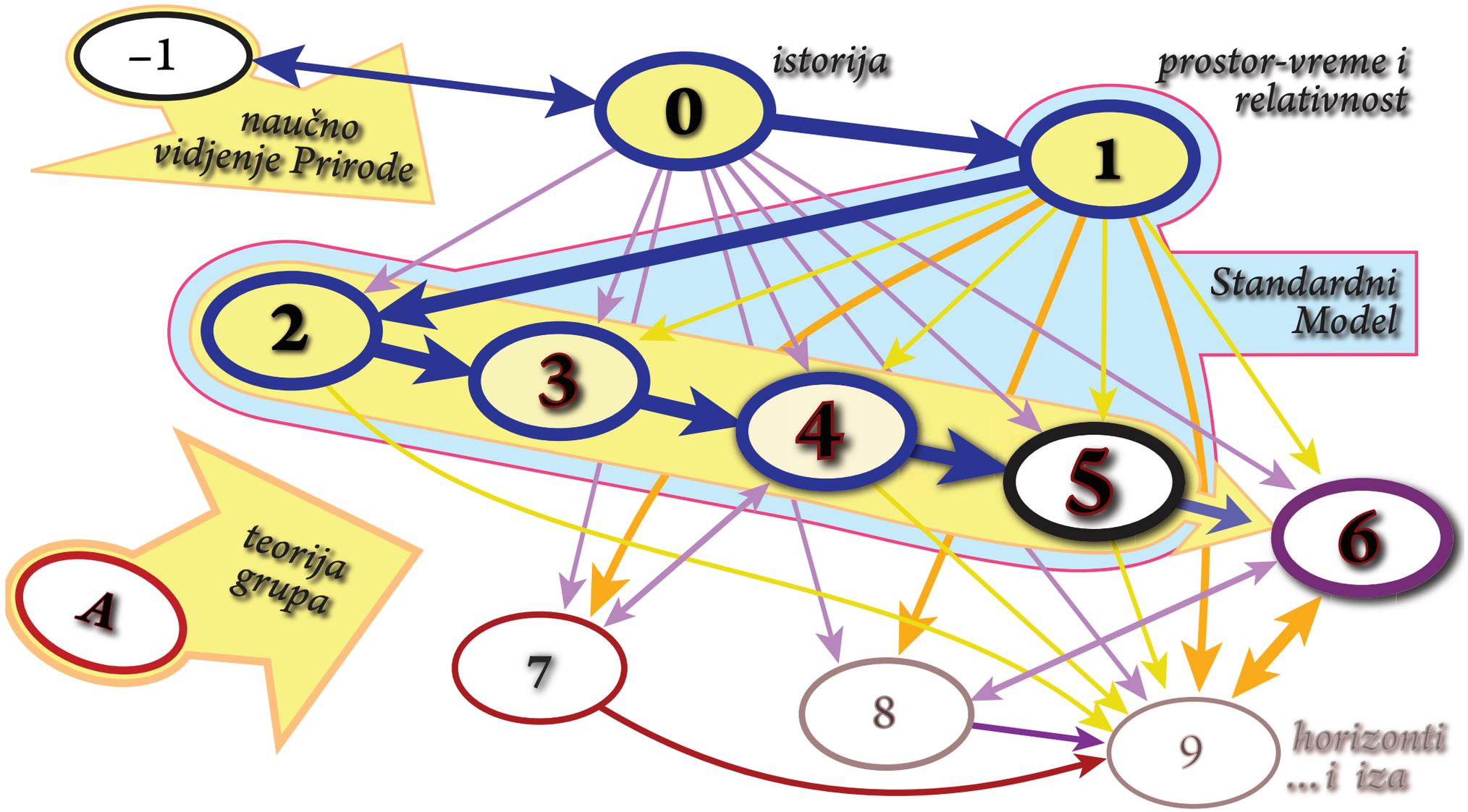
*Supersimetrija je jedina od ovde navedenih osobenosti koja još nije neposredno potvrđena eksperimentima, ali je jedino univerzalno svojstvo—za koje znamo—čije posledice uključuju i stabilizaciju vakuuma.

- Priroda je jedna i jedinstvena; razni predmeti koje proučavate su tek silom prilika izdvojeni delovi celine
- Integracija ostaje na Vama

Da se dogovorimo:

Putokaz

- Shematski pregled materijala:



Priroda opažanja Prirode

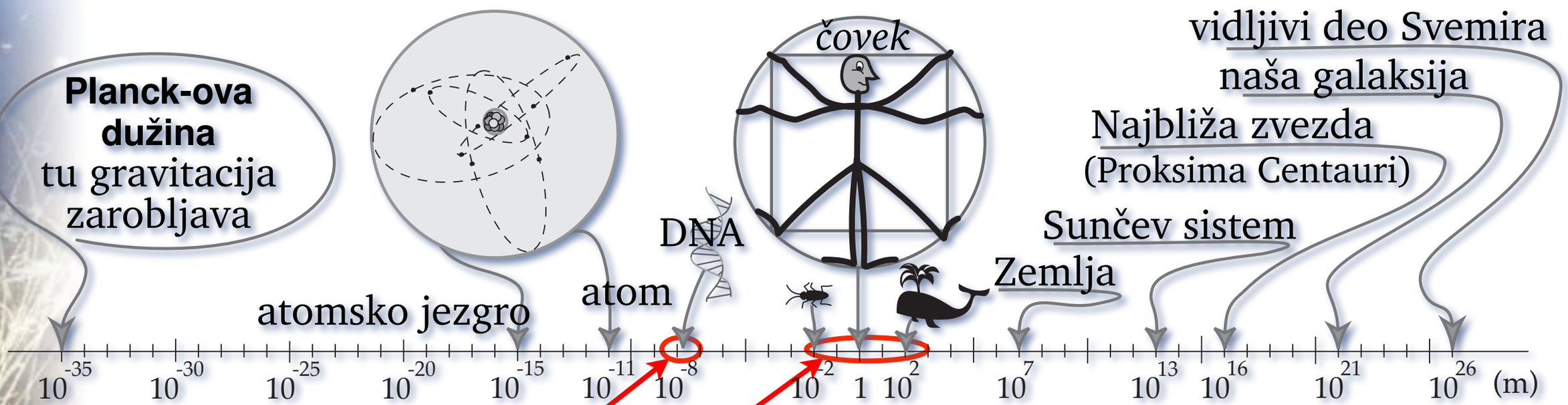
Program za danas

- Priroda eksperimenta i opažanja
  - Logaritamski pregled fizike prethodna tri veka
  - Fundamentalna Fizika
- Jedinice mere i dimenziona analiza
  - cgs/mks/SI $\Rightarrow$ $M^{\alpha} \cdot L^{\beta} \cdot T^{\gamma}$ račun
  - računanje do na numeričke faktore — i oprez
- Kvantna priroda Prirode
  - prirodne jedinice i informaciona granica saznanja
  - pomak u poimanju
- Fundamentalne čestice i interakcije

Logaritamski pregled prirode

Ptičija perspektiva

- Pre svega:



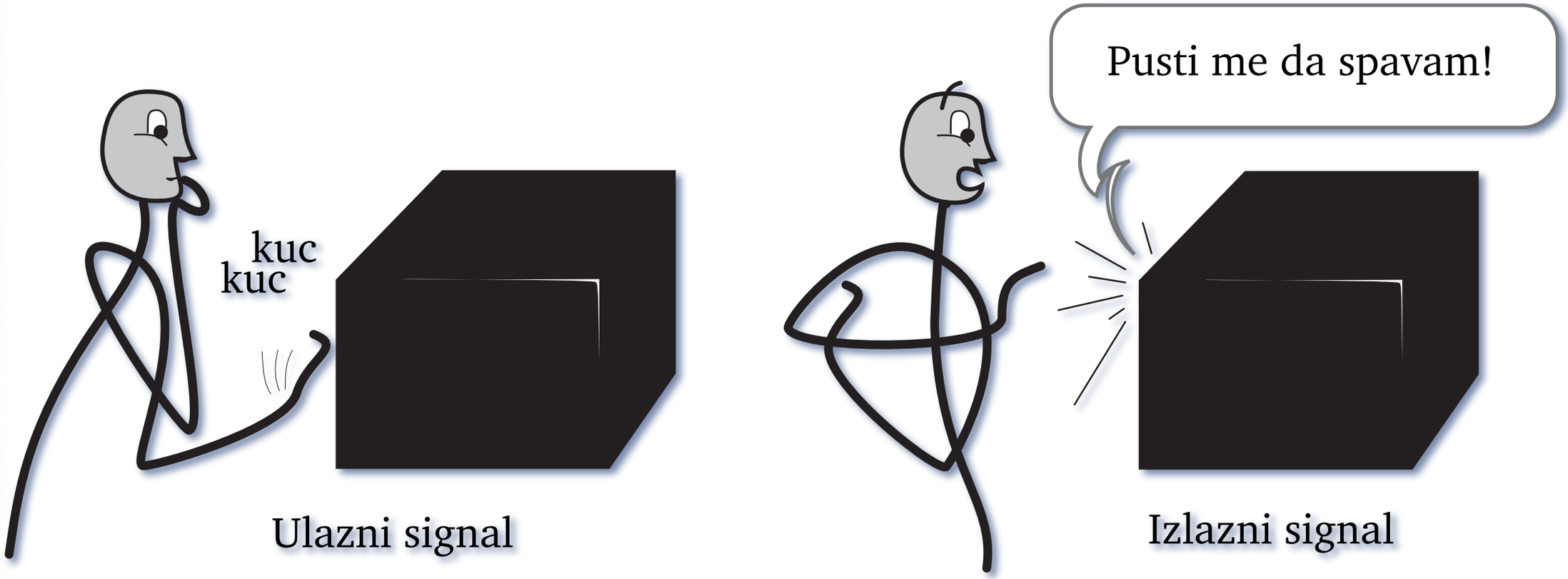
- Oblast oko 10^{-9}–10^{-7}m se zove hemija.
- Oblast oko 10^{-2}–10^{+2} m se zove biologija.
- Sve ostalo je fizika.

Priroda eksperimenta i opažanja

Paradigma/Obrazac

- Naučni metod:
  - Opažanje
  - Model (matematički)
  - Predvidjanje i provera

Go to 1.

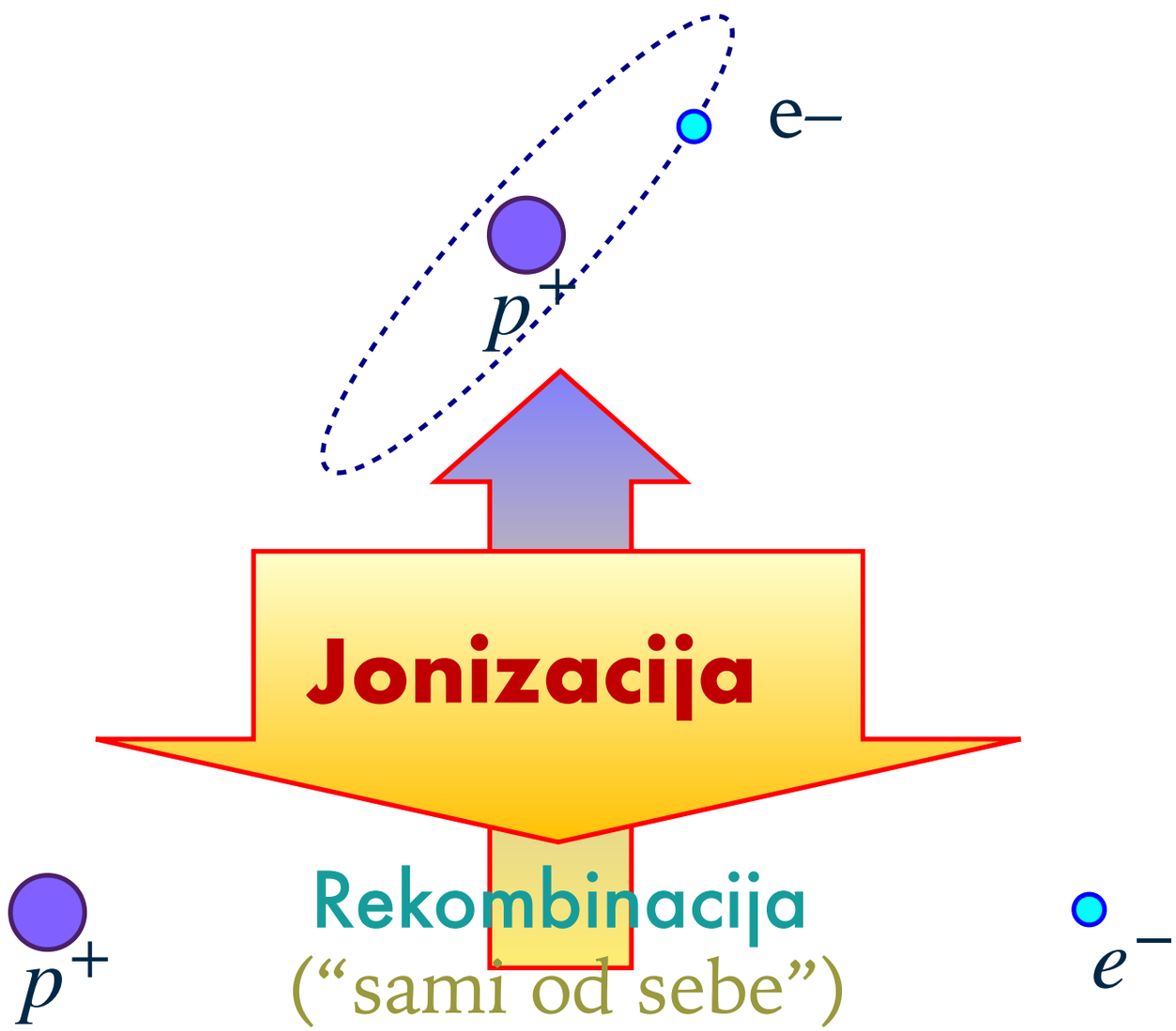


Iz razlike zaključimo šta (ko) je „unutra“.

Priroda eksperimenta i opažanja

Deljivost

- Nedeljivost ne podrazumeva nedostatak (sub)strukture:
  - Vodonikov atom:



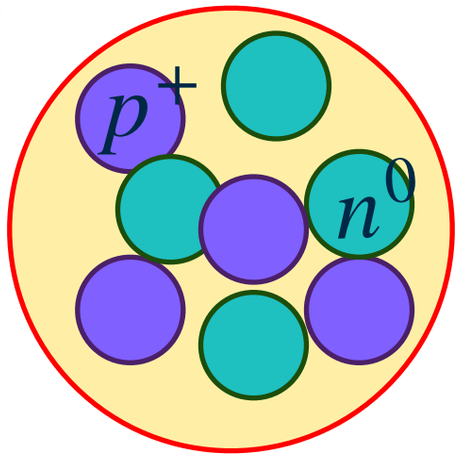
Stoga, stvarno, vodonikov atom nikada nije *sasvim* podeljen.

Uprkos tome, ima savršenog smisla reći da ima (sub)strukturu

Priroda eksperimenta i opažanja

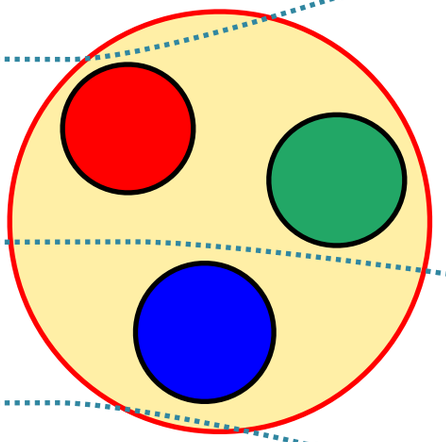
Deljivost

- Nedeljivost ne podrazumeva nedostatak (sub)strukture:
  - Atomsko jezgro:



Opet, postoji (sub)struktura.

  - Proton, neutron:



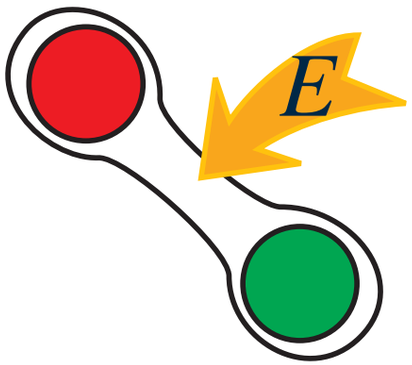
Opet, postoji (sub)struktura.

(Bez obzira na to što kvarkove nije moguće izdvojiti proizvoljno daleko od ostalih!)

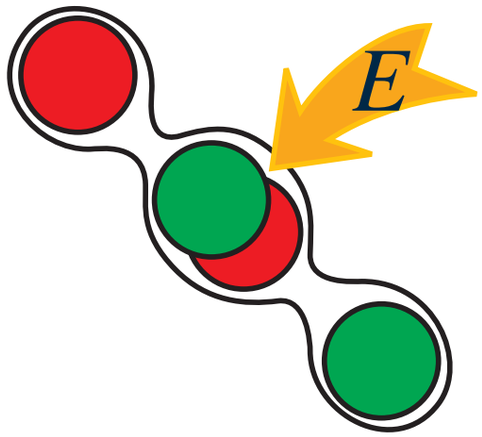
Priroda eksperimenta i opažanja

Deljivost

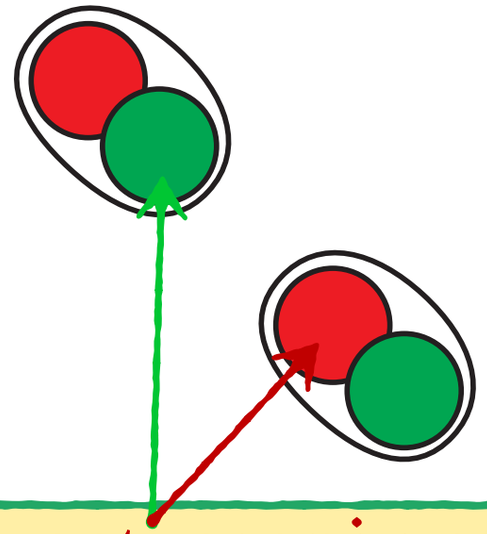
- Nedeljivost ne podrazumeva nedostatak (sub)strukture:
  - Hadroni:



Pri sudarima se mezon “razvuče” i ponaša kao vezani sistem dve čestice



Pri intenzivnijim sudarima deo energije proizvede kvark–antikvark par



se razdvoji i sa po jednom od izvornih čestica oformi dva nova mezona

Priroda eksperimenta i opažanja

Deljivost

- Deljivost i domet

Objekat	Deljivost	Substruktura	Domet
Cigla	Da	Da	$\ll \infty$
Molekul	Da	Da	$< \infty$
Atom	Da	Da	∞
Jezgro	Da	Da	$< \infty$
Proton	Ne	Da	—
Kvark	Ne	Ne*	—
Elektron	Ne	Ne*	—
?	—	—	—

Fundamentalna fizika

Orijentacija

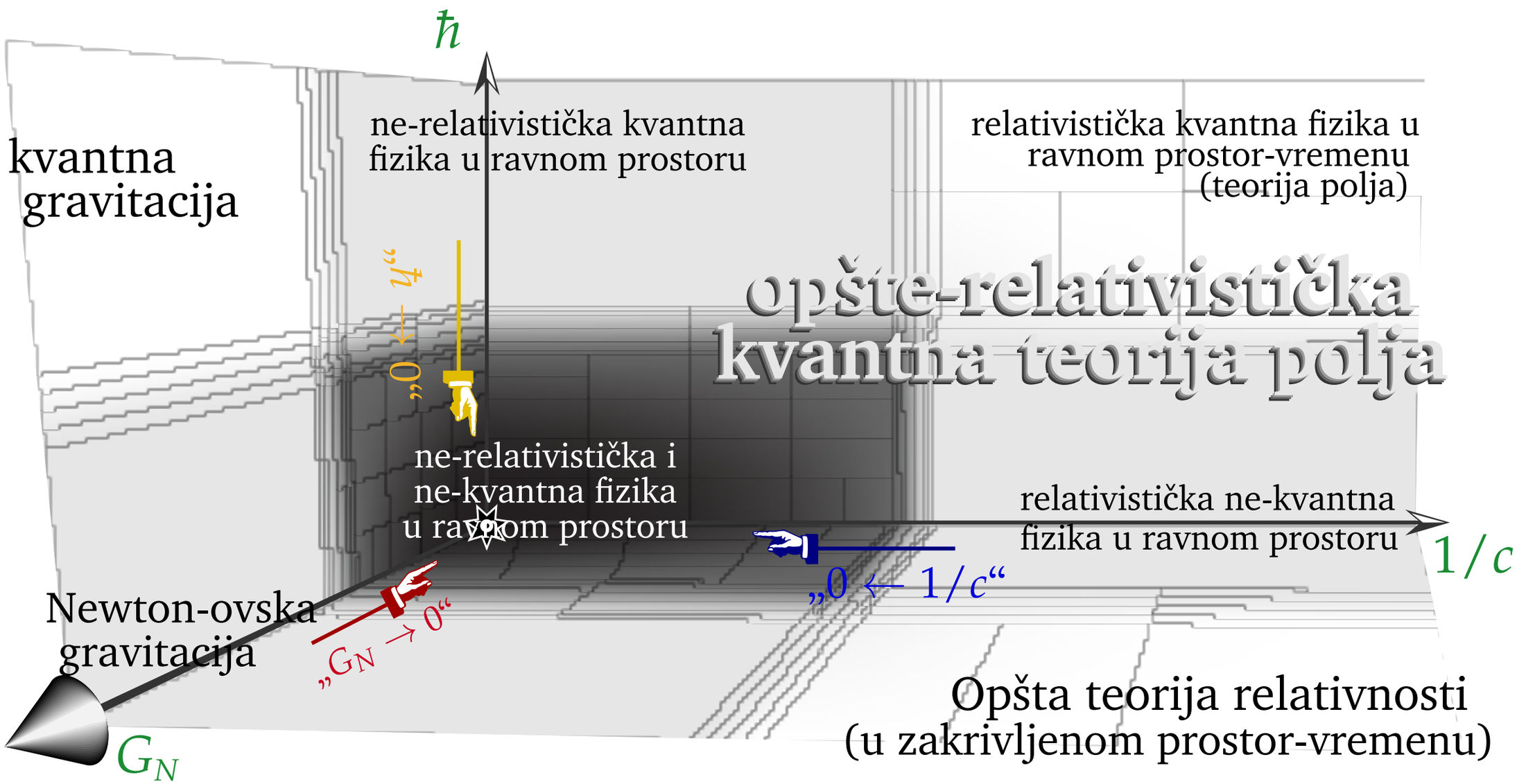
- Osam (2^3) domena:
  - Relativnost: poredjenje sa c $\Rightarrow$ brzina
  - Kvantnost: poredjenje sa $\hbar$ $\Rightarrow$ dejstvo, ugaoni momenat
  - Gravitacija: poredjenje sa G_N $\Rightarrow$ krivina slobodnih putanja
- Makroskopski eksperimenti mikro-sveta
  - Coulomb-ov zakon je otkriven eksperimentisanjem (igranjem) sa naelektrisanim lopticama
  - Newton-ov zakon se testira torzionim klatnom sa masivnim loptama
  - Elektrone, protone, itd. ne možemo nameštati pincetom
  - niti ih možemo obeležiti (npr. u snopu)
  - niti ih "vidimo" kao makroskopske čestice
    - npr. spin $\Leftarrow$ magnetni momenat ("povratni inžinjering")

Ali...

Fundamentalna fizika

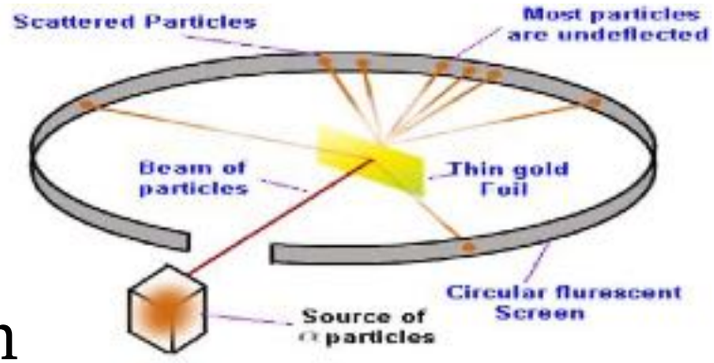
Osam domena:

- Klasična granica, "$\hbar \to 0$" tj. $S[q_i], |\vec{L}|, \ldots \gg \hbar$
- Nerelativistička granica, "$c \to \infty$" tj. $v_{ij} \ll c$



Fundamentalna fizika

Eksperimenti



- Izvori elementarnih čestica:
  - Kosmički zraci i njihova interakcija sa atmosferom
  - Nuklearni reaktori, α- β- i γ-zračenje tj. čestice
  - Akceleratori čestica i njihovi sudari
- Detektori
  - Geiger-ov i Čerenkov-ljev brojač
  - Magla, mehurići, varnice, fotografska emulzija
  - Coulomb-ova i Lorentz-ova sila; & $R = \frac{m v_\perp}{|q||\vec{B}|}$, $\omega = \frac{|q||\vec{B}|}{m}$
  - Kompjuterski korelisani sistemi detektora
- (Ne)naelektrisane čestice su (ne)vidljive
  - Nenaelektrisane čestice se “vide” samo posredno

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- cgs/mks/SI jedinice:
  - proizvoljno odabrane jedinice za masu, dužinu i vreme
  - standardno (za čestičare), pogodnije: $1\ \mathrm{eV} = 1.602\times10^{-19}\ \mathrm{J}$
- Dimenziona analiza
  - *Liliputanci:*
    - *Koliko tereta može poneti?*
    - *Koliko visko može skočiti?*
    - *Koliko brzo kuca srce?*
- Praktičn(ij)e primene:
  - Matematičko klatno
  - Larmor-ova formula
  - Perturbacije u kvantnoj mehanici
  - Vodonikov atom

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- cgs/mks/SI jedinice:
  - proizvoljno odabrane jedinice za masu, dužinu i vreme
  - standardno (za čestičare), pogodnije: $1\,\mathrm{eV} = 1.602\times10^{-19}\,\mathrm{J}$
    - energija koju elektron dobije "penjanjem" uz 1 V potencijala
    - $1\,\mathrm{MeV} = 10^6\,\mathrm{eV}$
    - korišćenjem $E_0 = mc^2,\ m_e = 0.511\,MeV/c^2$
  - Prirodne jedinice:

$[c]$	=	$L\cdot T^{-1}$	brzina ~ dužina/vreme
$[\hbar]$	=	$L^2\cdot M^1\cdot T^{-1}$	energija·vreme ~ ugaoni momenat
$[G_N]$	=	$L^3\cdot M^{-1}\cdot T^{-2}$	$[G_N\, m_1 m_2 / r^2]$ ~ [sila] ~ $[M^1\cdot L^1\cdot T^{-2}]$

  - …za fundamentalnu fiziku

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- Liliputanci i jednostavna homotetija:
  - Liliputanac je $\lambda = 40$ puta manji (visinom), a proporcionalan
  - Koliko tereta može poneti?
    - Težina tereta $\Rightarrow$ sila raspoloživa za podizanje
    - $\propto$ površini poprečnog preseka mišića $\Rightarrow \lambda^2 = 1\,600 \times$ manji.
  - $\Rightarrow$ Liliputanac podigne $^1/_{1\,600}$-nu tereta kao običan čovek
    - Težina Liliputanca je $m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$.
    - Liliputanac je $40 \times$ manji, zapremina mu je $\lambda^3 = 64\,000 \times$ manja
    - $\Rightarrow$ težina je $64\,000 \times$ manja.
    - Nosivost Liliputanca je $\lambda^{-2}/\lambda^{-3} = \lambda = 40$ puta više — u jedinicama sopstvene težine — nego običan čovek.
    - Srazmerno, Liliputanac je $\lambda = 40$ puta jači od običnog čoveka.

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- Liliputanci i jednostavna homotetija:
  - Liliputanac je $\lambda = 40$ puta manji (visinom), a proporcionalan
  - Koliko visko može skočiti?
    - Masa Liliputanca ($m = \rho \cdot V$) je $\lambda^3 = 64\,000 \times$ manja.
    - Energija za skok $= F \cdot \Delta L$, $\Rightarrow$ $(\lambda^2)(\lambda) = 40^3 = 64\,000$ manja.
  - Energija zadobivena skokom $= m \cdot g \cdot h$
    - $(\lambda^3 E) = (\lambda^3 m)(g = \text{konstanta})(h)$
    - $\Rightarrow h =$ konstanta (Liliputanac skoči koliko i običan čovek)
    - Srazmerno, Liliputanac skoči $\lambda = 40$ puta više, u jedinicama sopstvene visine, od običnog čoveka.
    - Doista: male životinje uglavnom mogu da skoče (proporcionalno) mnogo više nego velike životinje

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- Matematičko klatno mase m i dužine ℓ.
- Frekvencija može zavisiti samo još od g.

$$[\ell] = L, \quad [m] = M, \quad [g] = \frac{L}{T^2},$$

$$\frac{1}{T} = [\ell]^\alpha\,[m]^\beta\,[g]^\gamma = L^\alpha\,M^\beta\left(\frac{L}{T^2}\right)^\gamma = \frac{L^{\alpha+\gamma}\,M^\beta}{T^{2\gamma}}$$

$$\left.\begin{aligned} \alpha+\gamma &= 0, \\ \beta &= 0, \\ 2\gamma &= 1, \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{aligned} \alpha &= -\tfrac{1}{2}, \\ \beta &= 0, \\ \gamma &= \tfrac{1}{2}, \end{aligned}\right.$$

$$\boxed{\nu \propto \sqrt{\frac{g}{\ell}}.}$$

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- Larmor-ova formula (snaga izgubljena radijacijom)
- Snaga je energija u jedinici vremena:

$$[P] = \frac{[\triangle E]}{[\triangle t]} = \frac{M\,L^2/T^2}{T} = \frac{M\,L^2}{T^3}$$

- Energija mora biti elektromagnetnog porekla

$$\frac{M\,L^2}{T^2} = [V_C] = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1\,q_2}{r}\right], \quad \Rightarrow \quad \boxed{\left[\frac{q}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}}\right] = \frac{M^{1/2}\,L^{3/2}}{T}}$$

- Ubrzanje je vektor a snaga skalar; mora da zavisi od

$$(\vec{a}\cdot\vec{a})^\beta = |\vec{a}|^{2\beta} = a^{2\beta}$$

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- Osim toga, snaga izgubljena radijacijom može da zavisi još samo od brzine svetlosti (radijacije), c.

$$[q^\alpha\, a^{2\beta}\, c^\gamma] = \left(\frac{M\,L^3}{T^2}\right)^{\alpha/2}\left(\frac{L}{T^2}\right)^{2\beta}\left(\frac{L}{T}\right)^{\gamma} = \frac{M^{\alpha/2}\,L^{3\alpha/2+2\beta+\gamma}}{T^{\alpha+4\beta+\gamma}} \stackrel{!}{=} \frac{M\,L^2}{T^3}.$$

$$\left.\begin{aligned} \tfrac{1}{2}\alpha \qquad\qquad\qquad &= 1, \\ \tfrac{3}{2}\alpha + 2\beta + \gamma &= 2, \\ \alpha + 4\beta + \gamma &= 3, \end{aligned}\right\} \quad \Rightarrow \quad \left\{\begin{aligned} \alpha &= 2, \\ \beta &= 2, \\ \gamma &= -3, \end{aligned}\right.$$

$$P \propto \boxed{\frac{q^2\,a^2}{c^3}}. \qquad P = \frac{q^2\,a^2}{6\pi\epsilon_0\,c^3} = \frac{2}{3}\,\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\,\boxed{\frac{q^2\,a^2}{c^3}}$$

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- Perturbacije u kvantnoj mehanici

$$H_0|n\rangle = E_n^{(0)}|n\rangle, \qquad U_0|n\rangle = e^{-i\omega_n t}|n\rangle, \qquad \omega_n := \frac{E_n^{(0)}}{\hbar},$$

$$H_0\Psi_n(x,0) = E_n^{(0)}\Psi_n(x,0), \qquad \Psi_n(x,t) = e^{-i\omega_n t}\,\Psi_n(x,0).$$

$$\mathscr{H} := \left\{ |n\rangle \,:\, H_0|n\rangle = E_n^{(0)}|n\rangle,\ \langle n|m\rangle = \delta_{n,m},\ \sum_n |n\rangle\langle n| = \mathbb{1} \right\}$$

- Neka je sada ovaj sistem promenjen, zamenom

$$H_0 \to H = H_0 + H'.$$

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

- Perturbacije u kvantnoj mehanici
  - Onda imamo:

$$E_n^{(1)} = \langle n|H'|n\rangle;$$

$$|n\rangle^{(1)} = -\sum_{m\neq n}\!\!\!\!\!\!\int \frac{\langle m|H'|n\rangle}{E_m^{(0)} - E_n^{(0)}}\,|m\rangle;$$

$$E_n^{(2)} = -\sum_{m\neq n}\!\!\!\!\!\!\int \frac{\left|\langle m|H'|n\rangle\right|^2}{E_m^{(0)} - E_n^{(0)}};$$

Invarijantno/kovarijantno u odnosu na smenu

$$|n\rangle \to |\widetilde{n}\rangle = \widehat{\mathcal{U}}\,|n\rangle$$

$$\langle n| \to \langle\widetilde{n}| = \langle n|\widehat{\mathcal{U}}^\dagger$$

$$\left(H \to \widetilde{H} = \widehat{\mathcal{U}}\,H\,\widehat{\mathcal{U}}^\dagger\right)$$

itd.

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

— *Oprez!!!*

- Vodonikov atom

$$[E_H] = \frac{M\,L^2}{T^2} = [(m_e)^x][(Ze^2)^y][\hbar^z] = M^x \left(\frac{M\,L^3}{T^2}\right)^y \left(\frac{M\,L^2}{T}\right)^z$$

$$\left.\begin{aligned} x + \ \ y + \ \ z &= 1, \\ 3y + 2z &= 2, \\ 2y + \ \ z &= 2, \end{aligned}\right\} \quad \Rightarrow \quad \left\{\begin{aligned} x &= 1, \\ y &= 2, \\ z &= -2, \end{aligned}\right.$$

$$E_H \propto \frac{m_e\,(Ze^2)^2}{(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2},$$

Tačno! —u Bohr-ovoj aproksimaciji!

…ali nije dovoljno; *znamo* da ima popravki!

…niti je jedinstveno!

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

— *Oprez!!!*

- Prava formula mora da zavisi i od c:
  - Dakle:

$$[E_H] = \left[\frac{M^1 L^2}{T^2}\right] = [(m_e)^x][(Ze^2)^y][\hbar^z][c^w] = (M)^x \underbrace{\left(\frac{ML^3}{T^2}\right)^y \left(\frac{ML^2}{T}\right)^z \left(\frac{L}{T}\right)^w}$$

  - pa

$$\left.\begin{aligned} x + y + z &= 1 \\ +3y + 2z + w &= 2 \\ +2y + z + w &= 2 \end{aligned}\right\}$$

$$\left[\frac{(Ze^2)}{\hbar c}\right] = \frac{\frac{ML^3}{T^2}}{\frac{ML^2}{T}\,\frac{L}{T}} = 1$$

bezdimenziona veličina

- "Teorema Pi": Ako sistem ima n karakterističnih fizičkih veličina, onda ima $(n-3)$ bezdimenzionih karakterističnih veličina
- Kontanta fine strukture: $\alpha = \frac{e^2}{(4\pi\epsilon_0)\,\hbar c} \approx \frac{1}{137}$

Jedinice i dimenziona analiza

Dimenziona analiza

— Oprez!!!

- Prava formula mora da zavisi i od c:

$$E_n = -2\alpha^2 \left(m_e c^2\right) \frac{Z^2}{(2n)^2},$$

$$\boxed{\alpha := \frac{e^2}{(4\pi\epsilon_0)\hbar c} \approx \frac{1}{137.036}.}$$

bezdimenzioni parametar i funkcija

$$E_n \propto f(\alpha; n) \boxed{\left(m_e c^2\right)},$$

Karakteristična energija

$E_n \ll m_e c^2$
(*slabo* vezana stanja)

Kvantna priroda Prirode

Kvantnost

- Planck-ovo rešenje ultra-violetne katastrofe (1900)
  - Kvantizacija emisije elektromagnetnog (EM) zračenja
- Einstein-ovo objašnjenje foto-efekta (1905)
  - Kvantizacija apsorpcije EM zračenja
  - — korpuskularna priroda EM zračenja
    (osporavana do Compton-ove analize e–+γ sudara)
- Bohr-ov model atoma (1913)
  - Linijski spektri vodonika
  - Klasična nestabilnost Rutherford-ovog atoma
  - Kvantna stabilnost “realih” atoma
- Compton-ovo rasejanje (1923): održanje energije-impulsa
- De Brogli-eva doktorska teza (1924) i dualnost

Kvantna priroda Prirode

Aksiomatska kvantna mehanika

- Svaka opažljiva veličina ima ermitski operator: $\hat{A}^\dagger = \hat{A}$
- Svako stanje sistema ima operator stanja, $\hat{\rho}$:
  - ermitski $\hat{\rho}^\dagger = \hat{\rho}$
  - normalizovan: $\mathrm{Tr}[\hat{\rho}] = 1$
  - pozitivan: $\hat{\rho} \geqslant 0$, i.e., $\hat{\rho}\,|r\rangle = r\,|r\rangle \Leftrightarrow r \geqslant 0$
- Čista stanja: postoji $|\psi\rangle$, takvo da je $\hat{\rho} = |\psi\rangle\langle\psi|$
  - ekvivalentno: (a) $\hat{\rho}^2 = \hat{\rho}$, (b) $\mathrm{Tr}[\hat{\rho}^2] = 1$
- Opšte (mešano) stanje: $\hat{\rho} = \sum_i r_i\,|r_i\rangle\langle r_i|$, $r_i \geqslant 0$ & $\sum_i r_i = 1$
  - čisto stanje je specijalan slučaj kada $r_i = \delta_{ij}$, za neko fiksno j.
- Dinamika: Schrödinger-ova jednačina za $|\psi\rangle$, ili
- $i\hbar \frac{\mathrm{d}\hat{\rho}}{\mathrm{d}t} = [\hat{H}, \hat{\rho}]$ — što bi trebalo da potseća…
- Merenje: opažanje konkretne veličine & kolaps (…)

Fundamentalna razdaljina

Kvantnost

- De Brogli-eva talasna dužina:

$$\lambda_s = \frac{2\pi\hbar}{p_s} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_s E_s}}, \qquad \text{ili} \qquad = \frac{2\pi\hbar c}{E_s},$$

ne-relativistička *relativistička* $(E = pc)$

- Horizont dogadjaja (i saznanja):

prva kosmička brzina

$$r_s = \frac{2\,G_N\,m_{m+s}}{c^2}, \qquad \Longleftrightarrow \qquad v_1 = \sqrt{\frac{2G_N\,m_{m+s}}{r_s}} = c,$$

$$r_S \sim \lambda_s \quad \Rightarrow \quad \frac{2\,G_N\,(m_m c^2 + E_s)}{c^4} \sim \frac{2\pi\hbar c}{E_s}$$

$$\Rightarrow \quad m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} \qquad \boxed{E_s \sim \sqrt{\pi}\,m_P\,c^2,}$$

Fundamentalna razdaljina

Kvantnost

Ime	Izraz	SI ekvivalent	Praktični ekvivalent
Dužina	$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}}$	$1.616\,25 \times 10^{-35}$ m	*fundamentalna razdaljina*
Masa	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}$	$2.176\,44 \times 10^{-8}$ kg	$1.220\,86 \times 10^{19}$ GeV$/c^2$
Vreme	$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^5}}$	$5.391\,24 \times 10^{-44}$ s	
Naelektrisanje*	$q_P = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$	$1.875\,55 \times 10^{-18}$ C	$e\sqrt{\alpha_e} \approx 11.706\,2\,e$
Temperatura	$T_P = \frac{1}{k_B} m_P c^2$	$1.416\,79 \times 10^{32}$ K	

Veličina	Čestičarska	SI ekvivalent
Energija	x MeV	$= x \times 1.602\,18 \times 10^{-13}$ J
Masa	x MeV$/c^2$	$= x \times 1.782\,66 \times 10^{-30}$ kg
Dužina	$x\,\hbar c$/MeV	$= x \times 1.973\,27 \times 10^{-13}$ m
Vreme	$x\,\hbar$/MeV	$= x \times 6.582\,12 \times 10^{-22}$ s

Fundamentalne čestice i interakcije

Kvantnost

- Detalji manji od fundamentalne razdaljine ne mogu opaziti
  - fizički objekat ne može da bude tačka
- Možemo dakle samo da govorimo:
  - o fizičkim objektima bez unutrašnje strukture — *Demokrit-ον ἄτομος* ***(nedeljivo)***
    - = fundamentalnim/elementarnim česticama
  - o fizičkim objektima sa (unutrašnjom) (sub-)strukturom
    - = vezanim stanjima fundamentalnih čestica
- "Tačkasta čestica" = gustina verovatnoće nalaženja objekta je tačkasto centrirana raspodela (*mnemonička karikatura*: oblak sa zadatim centrom)
- Interakcije fundamentalnih/elementarnih "čestica" su po definiciji fundamentalne interakcije

Hvala na pažnji

Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC
Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD
Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia
https://tristan.nfshost.com/