



FAKULTA MATEMATIKY,
FYZIKY A INFORMATIKY
Univerzita Komenského
v Bratislave

Kvantová štruktúra časopriestoru

Juraj Tekel

Katedra teoretickej fyziky

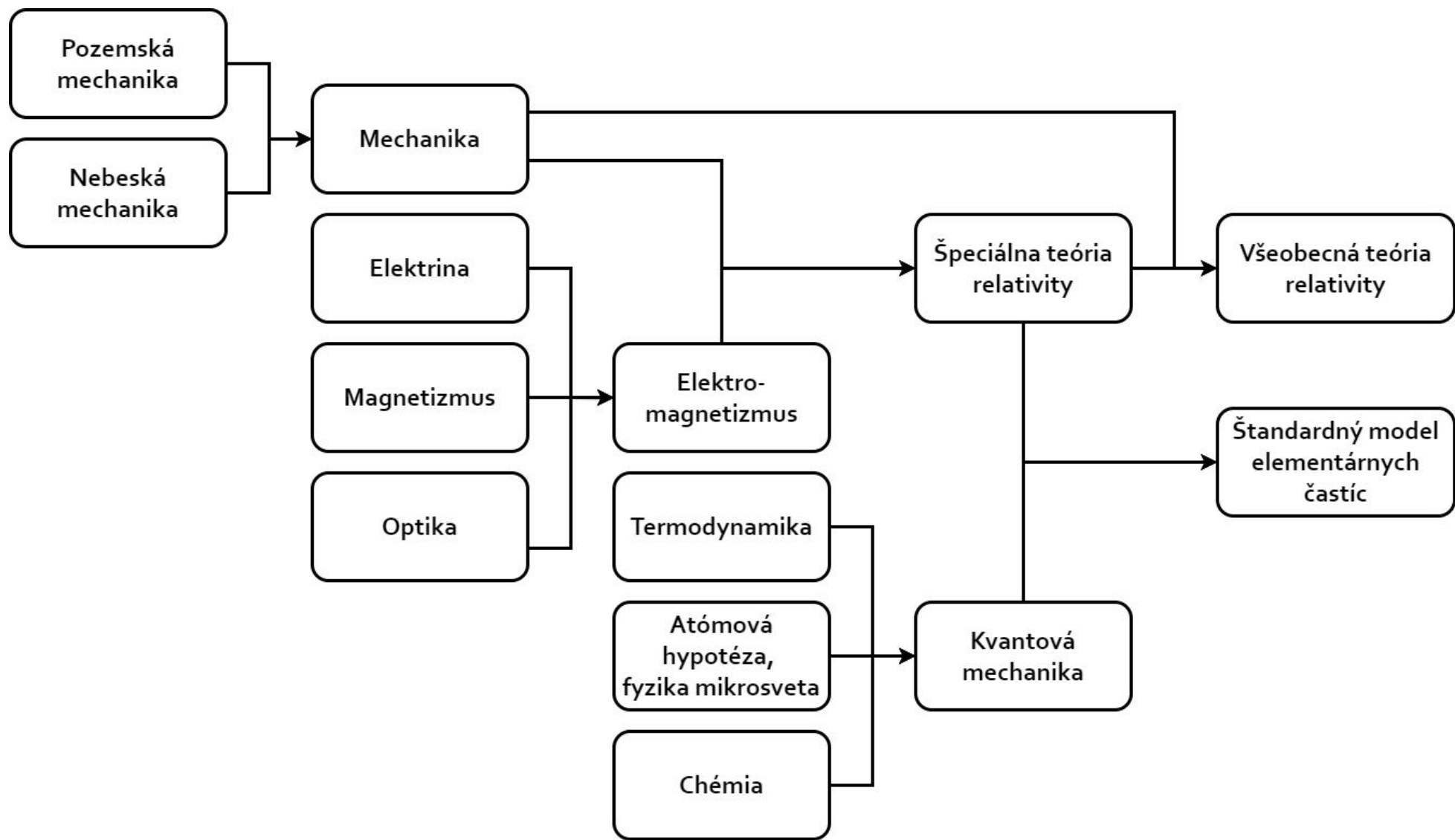
3. 10. 2025, Vedatour S6E1, Art Cafe, Banská Štiavnica

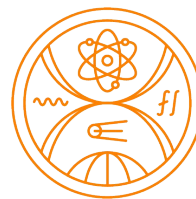
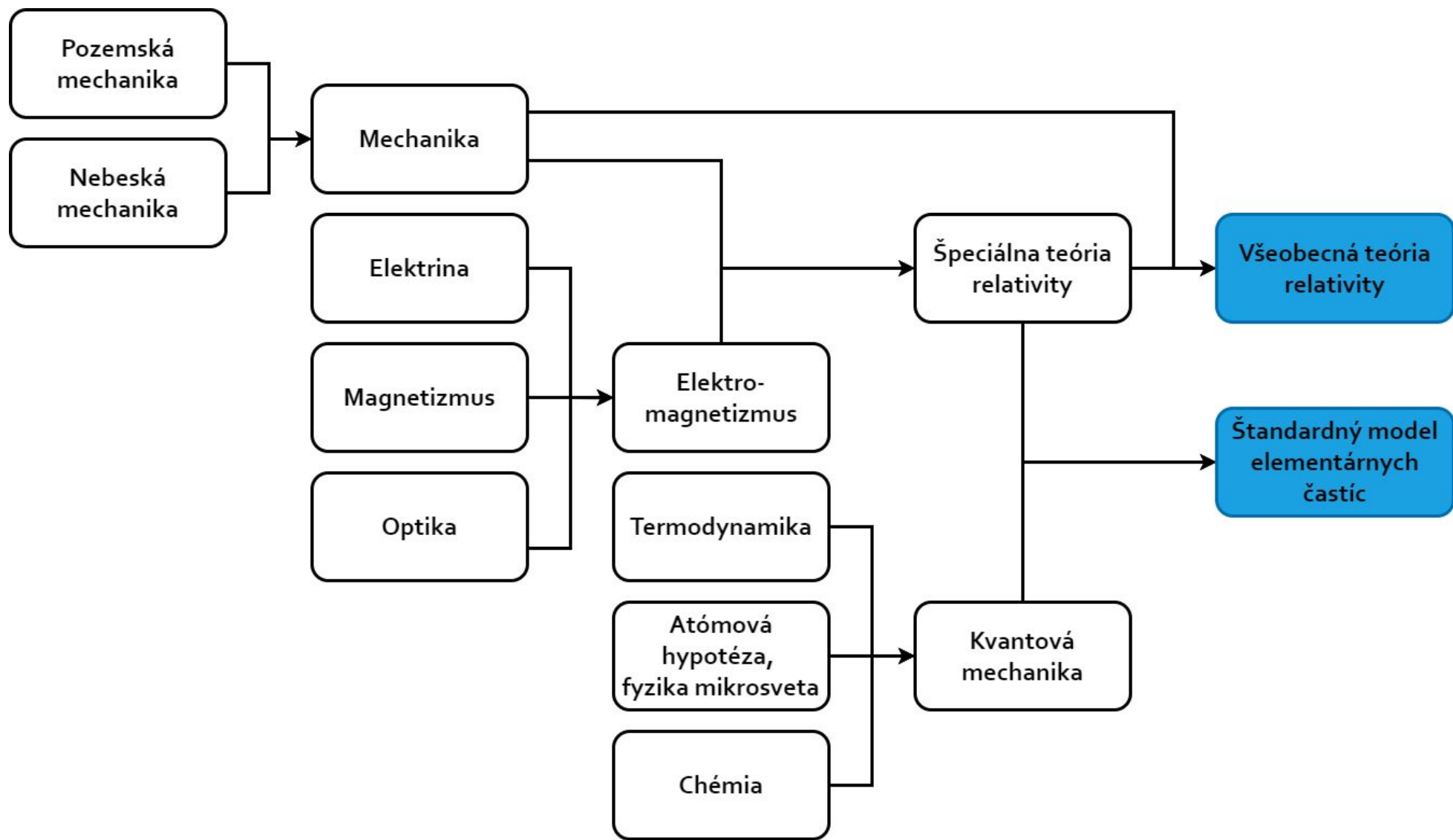




História fiziky

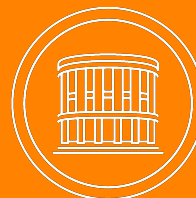








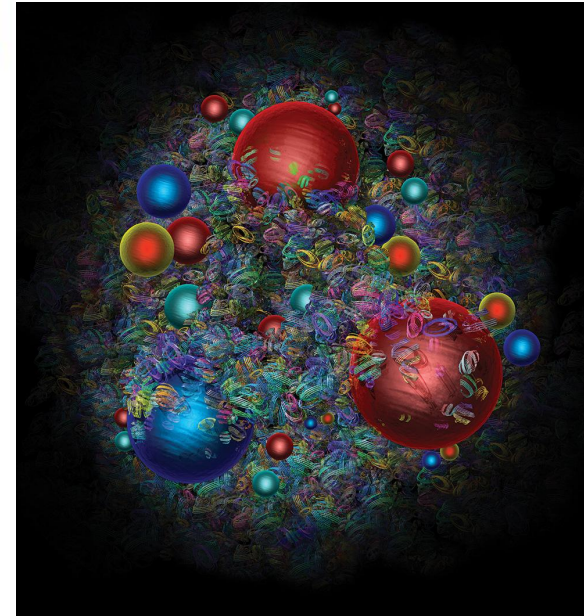
Kvantová teória gravitácie



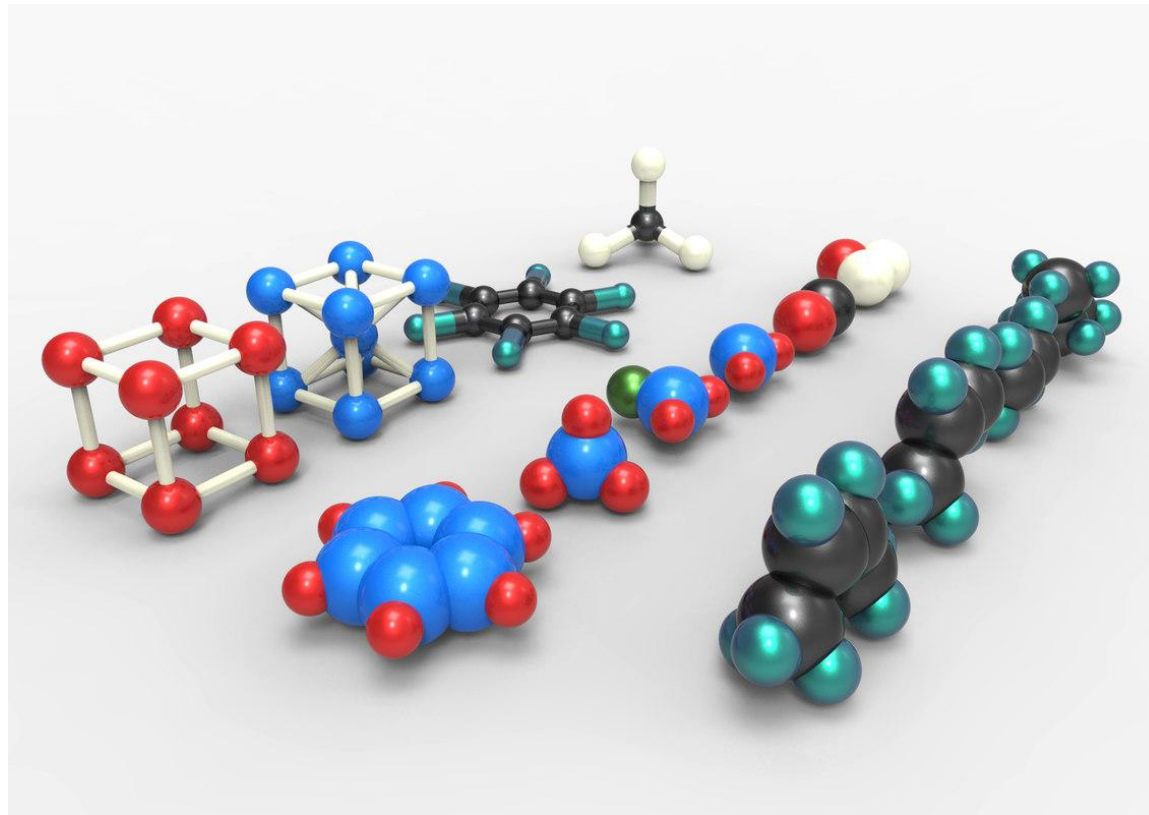
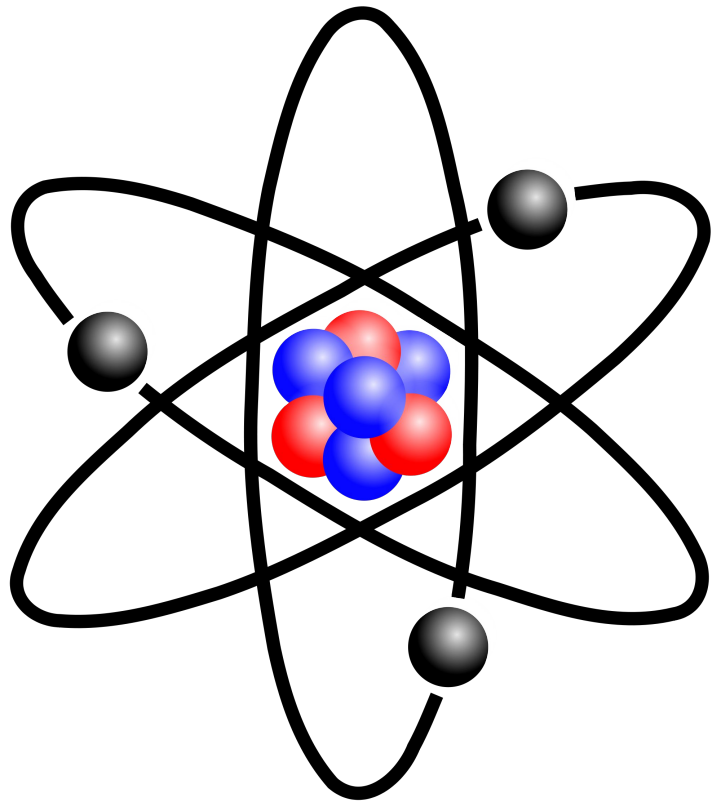
Kvantová teória



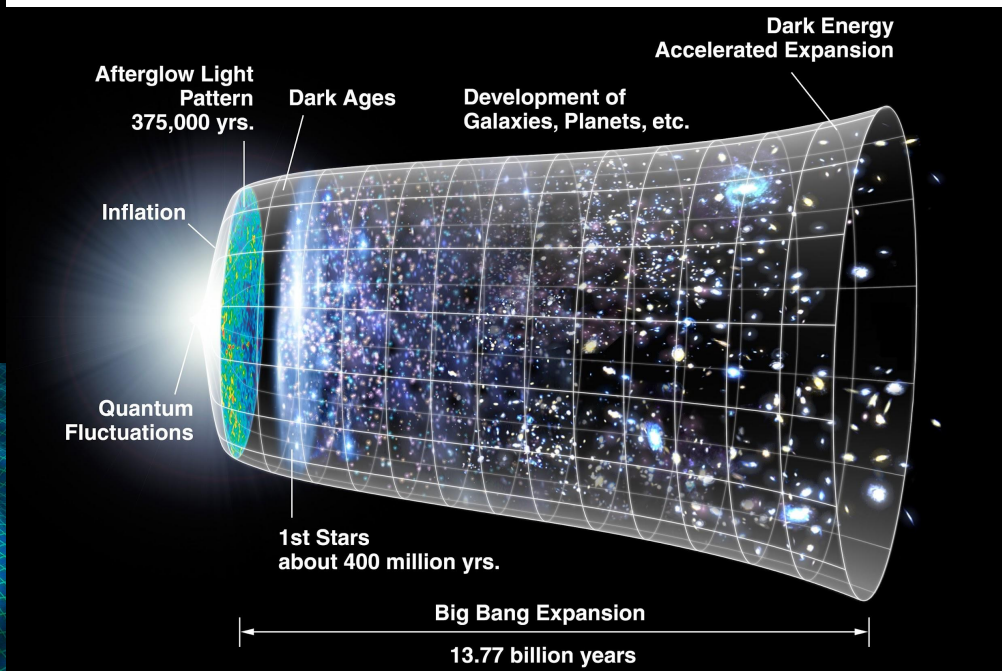
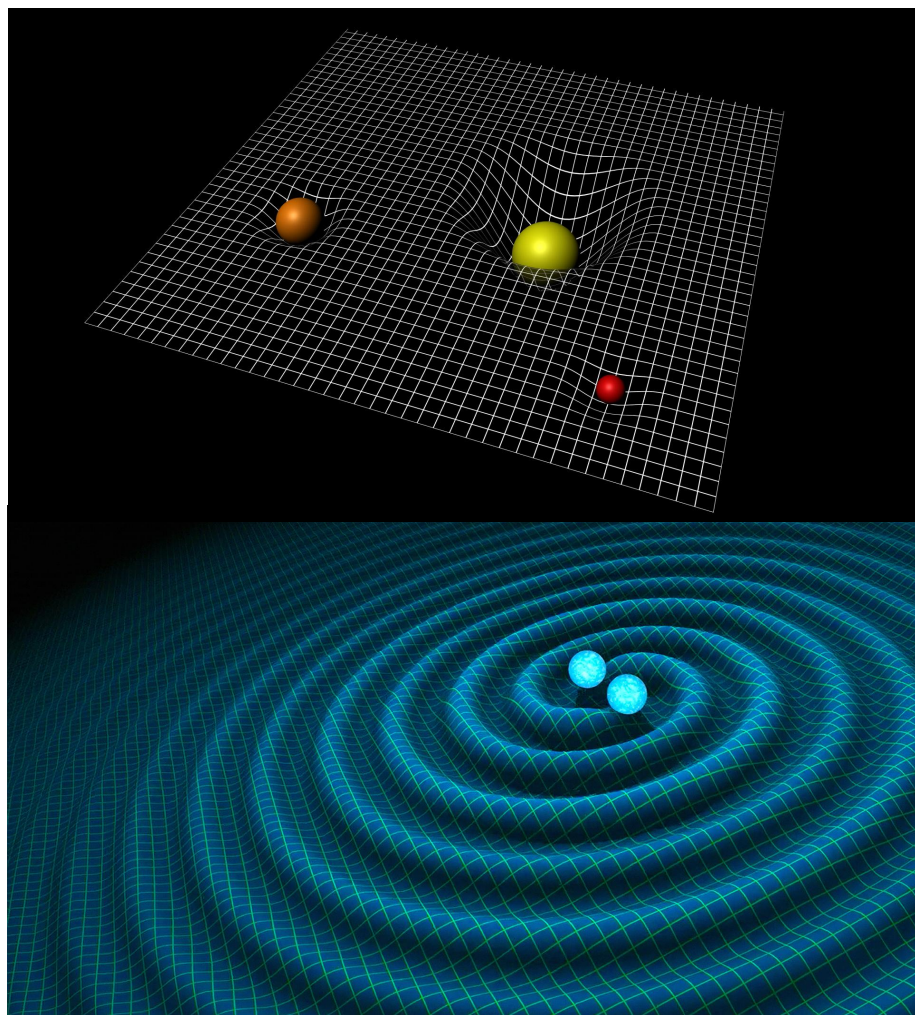
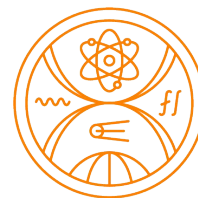
KVARKY	hmotnosť náboj spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluón	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 H higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ fotón	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektrón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muón	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z bozón	
LEPTÓNY		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e elektrónové neutríno	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muónové neutríno	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutríno	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W bozón	BOZÓNY



Kvantová teória



Všeobecná relativita



Všeobecná relativita



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$



Všeobecná relativita



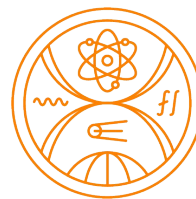
hmota

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

priestor

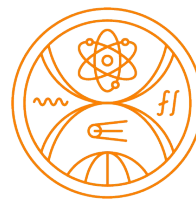




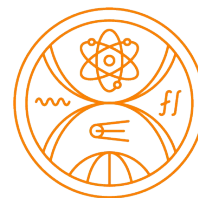


???





Všeobecná relativita



algebra

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

geometria







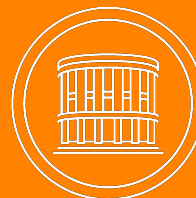
Spojenie **kvantovej** mechaniky a
teórie **gravitácie** predpovedá
štruktúru priestoru.

Priestor sa z niečoho skladá.



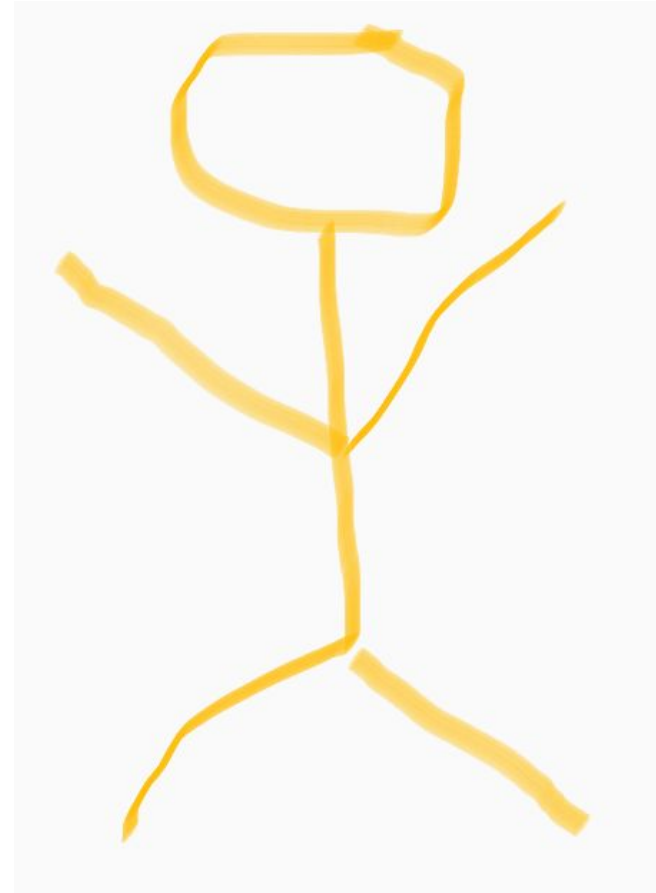


Čo to znamená
skladať sa z
niečoho?



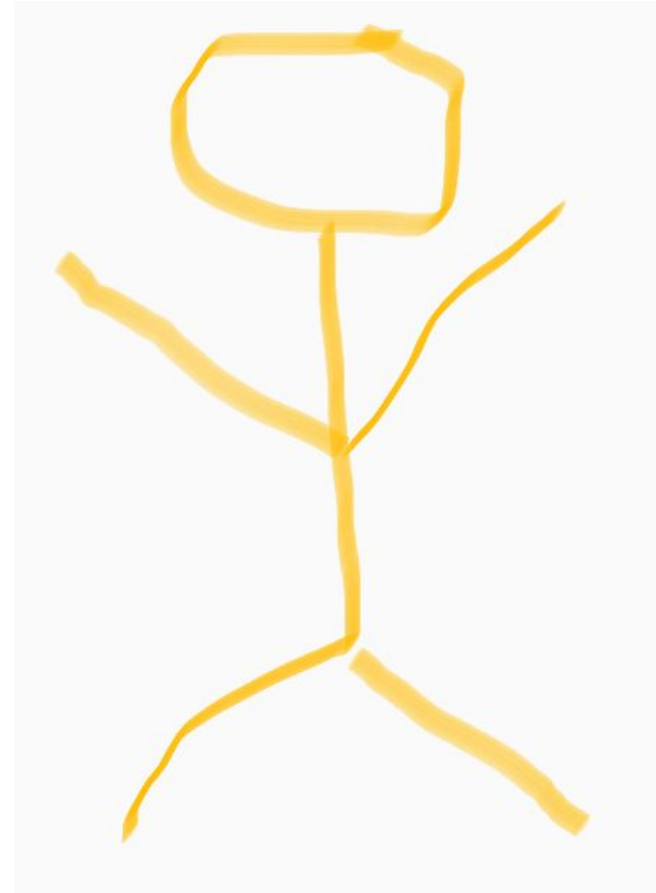
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **Človek** sa skladá z hlavy, krku, trupu, rúk a nôh.



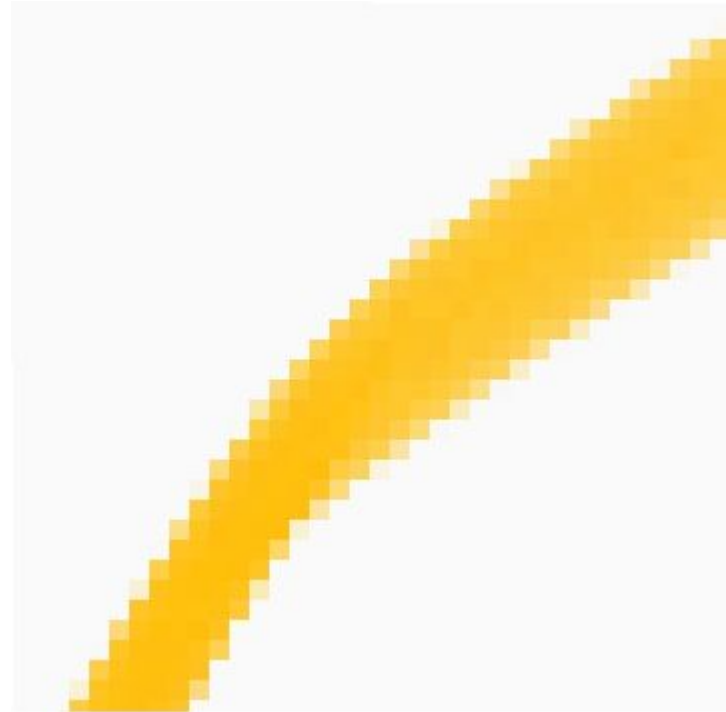
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **Človek** sa skladá z hlavy, krku, trupu, rúk a nôh.
- **Obrázok** sa skladá z pixelov.



Čo to znamená skladať sa z niečoho?

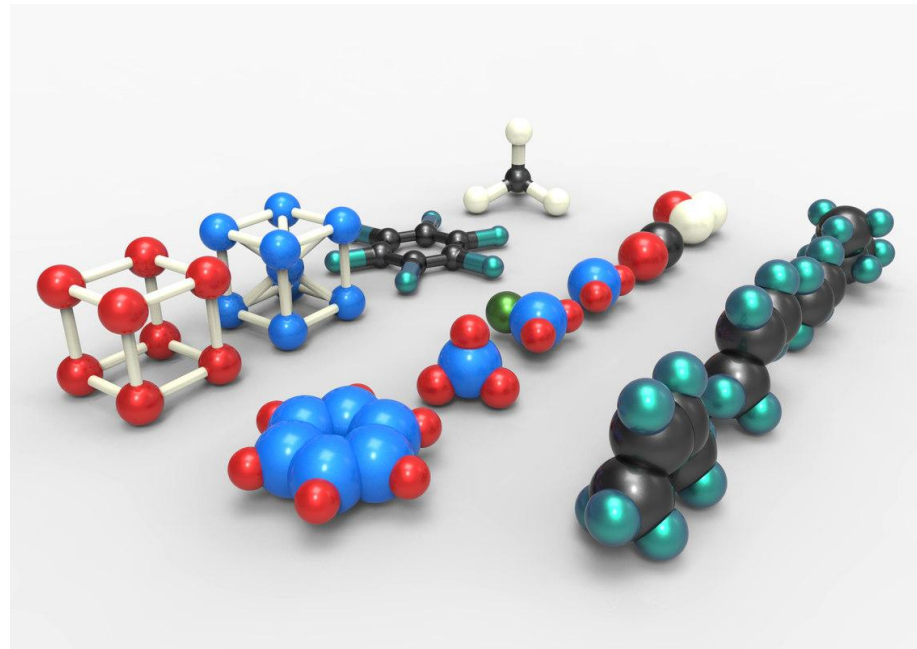
- **Človek** sa skladá z hlavy, krku, trupu, rúk a nôh.
- **Obrázok** sa skladá z pixelov.



Čo to znamená skladať sa z niečoho?

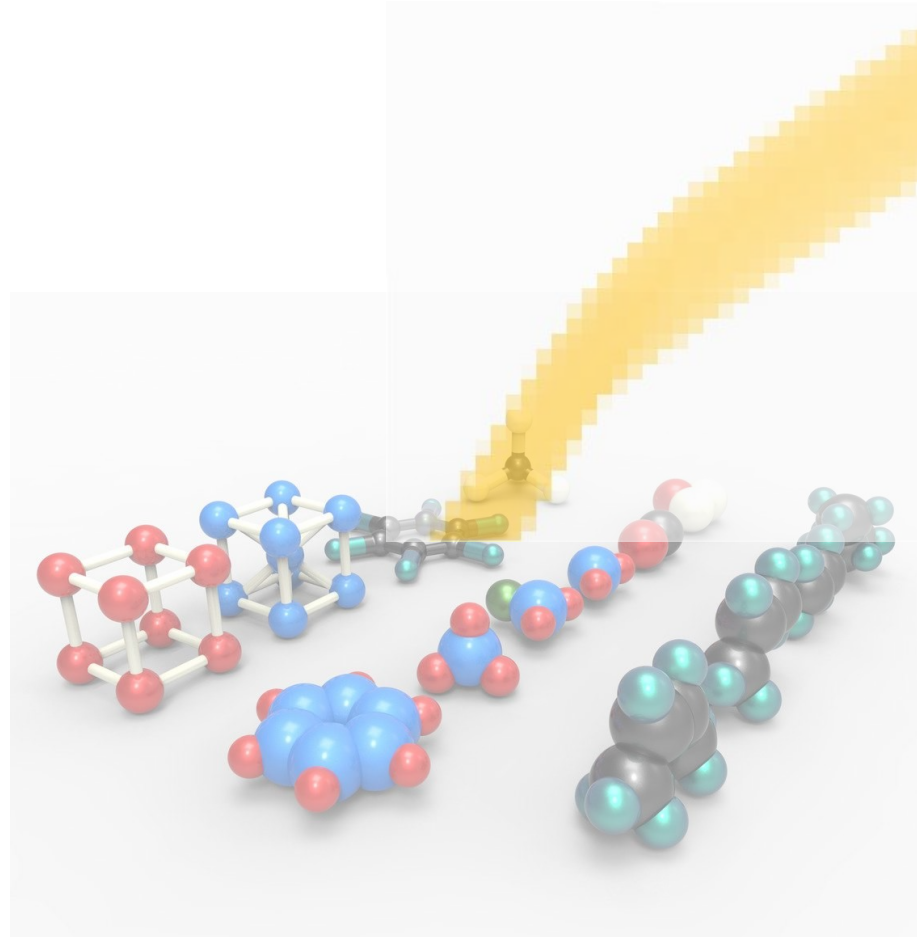


- **Človek** sa skladá z hlavy, krku, trupu, rúk a nôh.
- **Obrázok** sa skladá z pixelov.
- **Všetko** sa skladá z atómov.



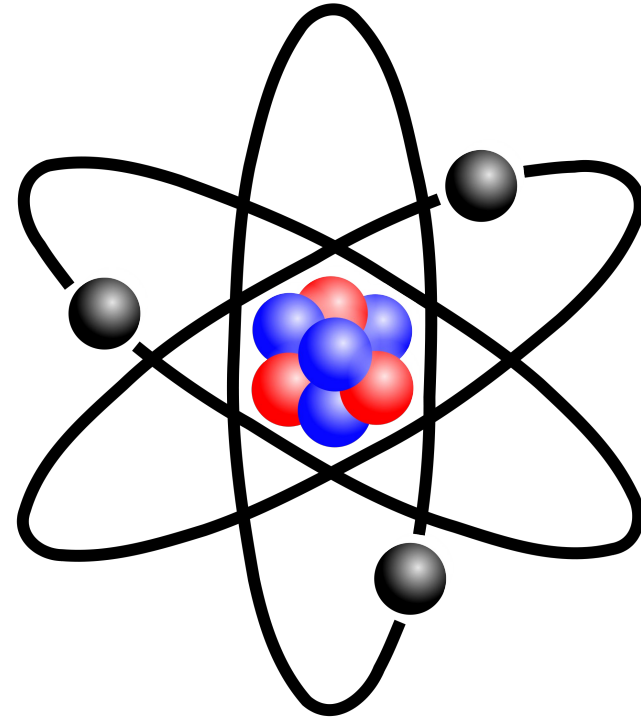
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **Človek** sa skladá z hlavy, krku, trupu, rúk a nôh.
- **Obrázok** sa skladá z pixelov.
- **Všetko** sa skladá z atómov.
Podobne ako obrázok z pixelov.



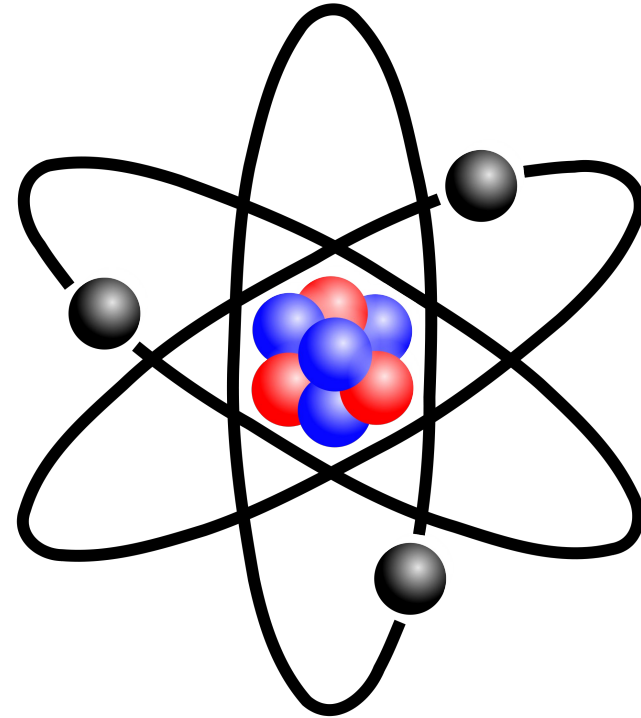
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **Atómy** sa skladajú z elektrónov, protónov a neutrónov.



Čo to znamená skladať sa z niečoho?

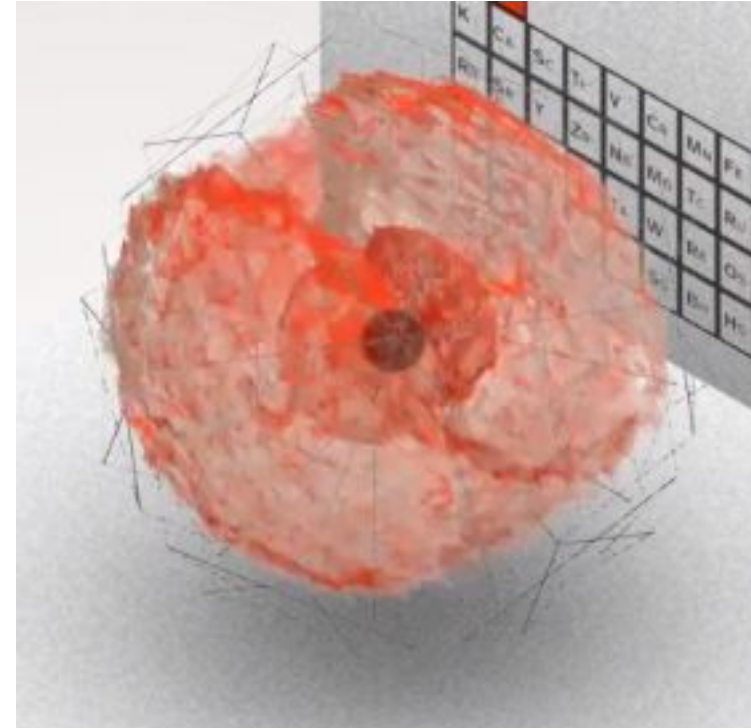
- **Atómy** sa skladajú z elektrónov, protónov a neutrónov.
- Inak, lebo to riadi **kvantová mechanika**.



Čo to znamená skladať sa z niečoho?



- **Atómy** sa skladajú z elektrónov, protónov a neutrónov.
- Inak, lebo to riadi **kvantová mechanika**.
- **Princíp neurčitosti** - nedá sa vedieť ľubovoľne presne poloha a rýchlosť.

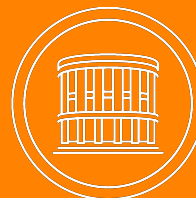




Na úrovni (naozaj) elementárnych
častíc znamená “skladať sa” čosi iné
ako sme zvyknutí.



Aké veľké sú
atómy?



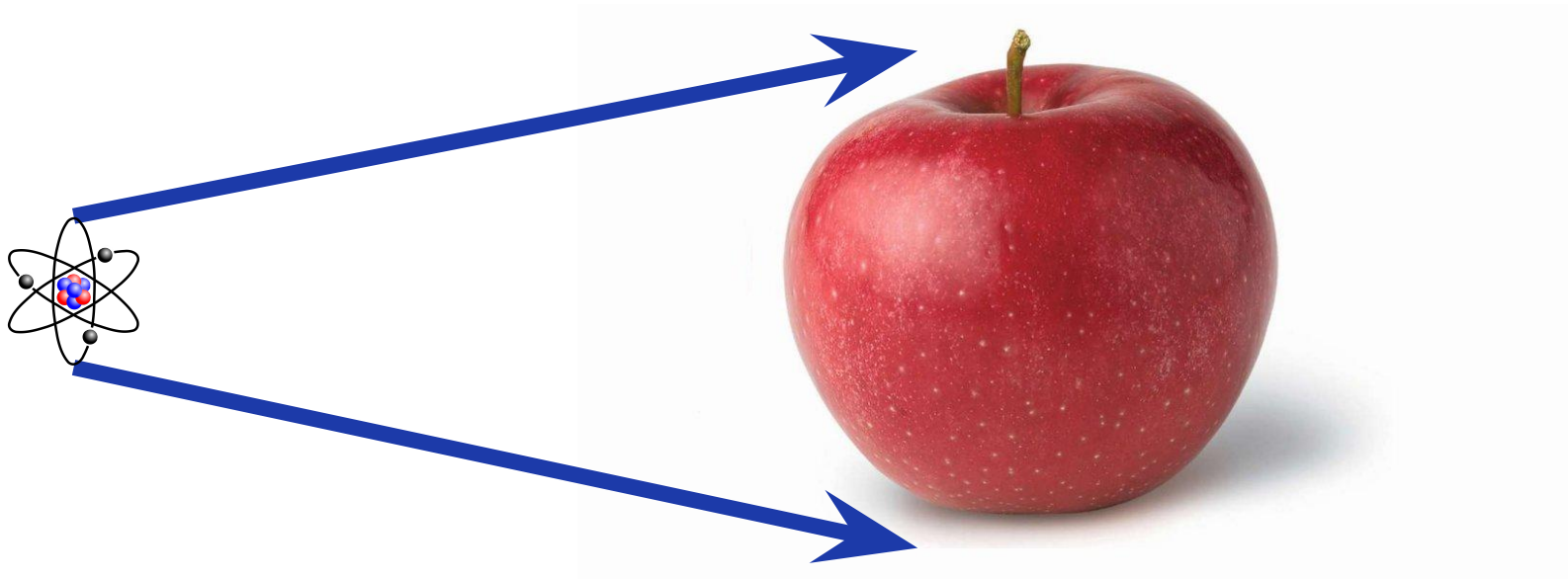
Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo.



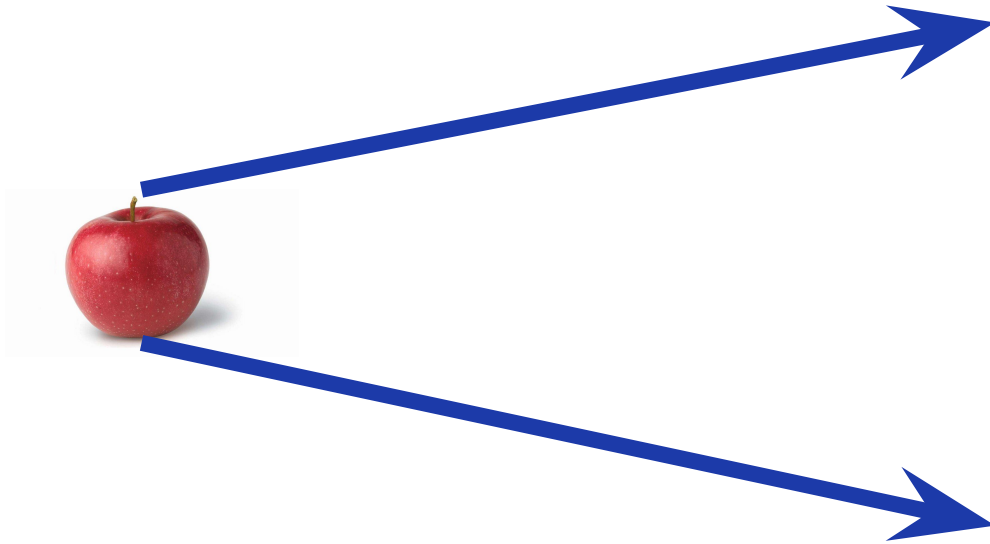
Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo.



Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo.

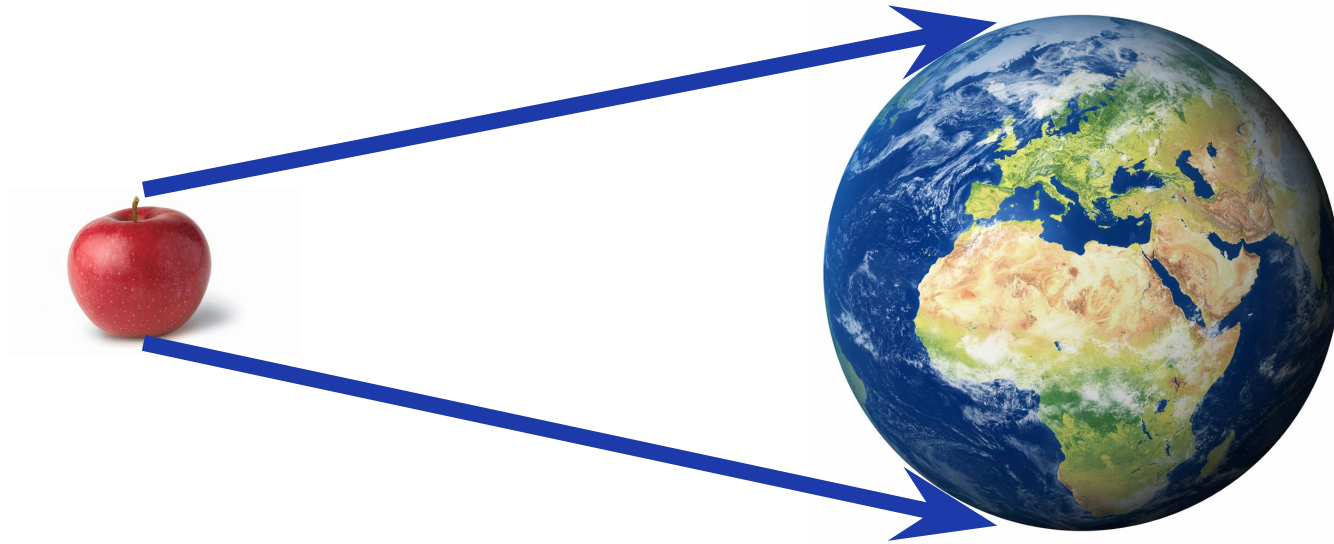


???



Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo.



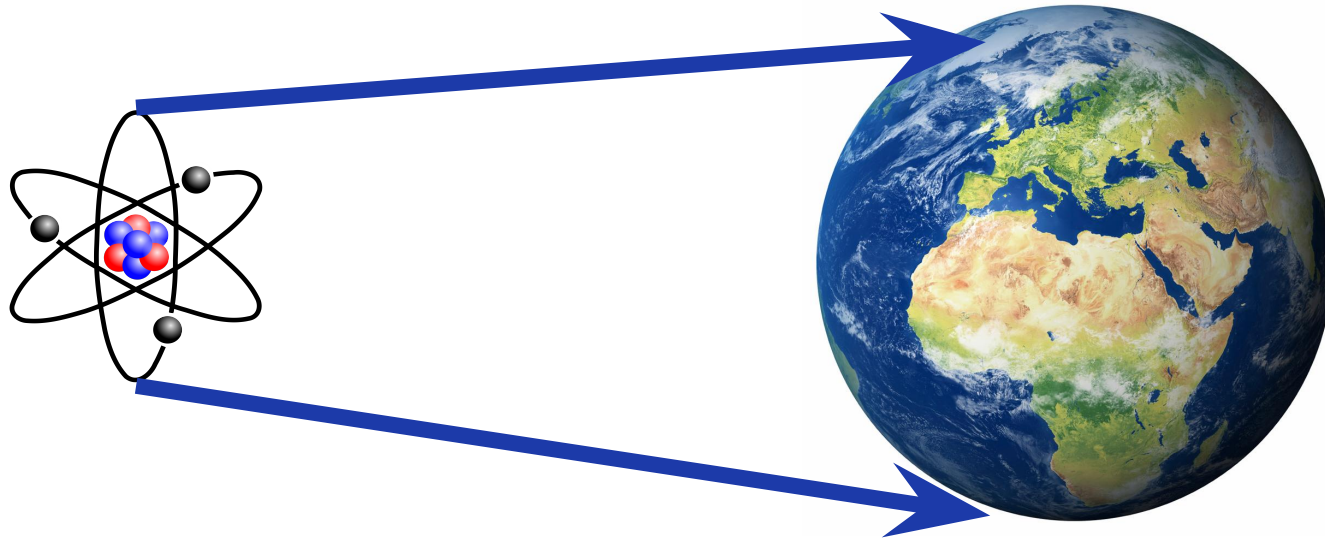
Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo. **Pre nás**.
- **Jadro** atómu asi 10^{-15} m.



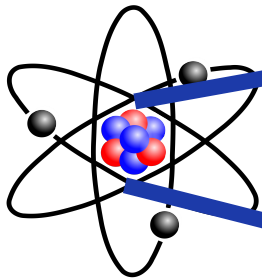
Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo. **Pre nás.**
- **Jadro** atómu asi 10^{-15} m.



Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo.
- **Jadro** atómu asi :

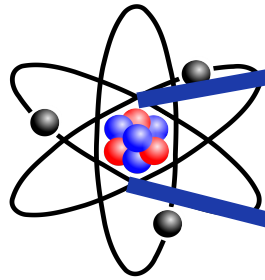


? ? ?



Aké veľké sú atómy?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo. **Pre nás.**
- **Jadro** atómu asi 10^{-15} m.

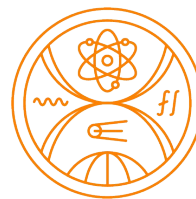


Aké veľké sú atómy?



- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo. **Pre nás**.
- **Jadro** atómu asi 10^{-15} m.
- **Meter, kilogram** a **sekunda** sú ušité na mieru ľuďom.
- Veci veľké/malé v týchto jednotkách sú také **pre ľudí**.





Pre rôzne situácie existujú rôzne
vhodné jednotky.



Prirodzené jednotky přírody



Prirodzené jednotky prírody



- Hľadáme fundamentálnu teóriu, ktorá bude popisovať:
 - kvantovú mechaniku
 - teóriu relativity
 - gravitáciu



Prirodzené jednotky prírody



- Hľadáme fundamentálnu teóriu, ktorá bude popisovať:
 - kvantovú mechaniku $\hbar$
 - teóriu relativity c
 - gravitáciu G



Prirodzené jednotky prírody



- Hľadáme fundamentálnu teóriu, ktorá bude popisovať:
 - kvantovú mechaniku $\hbar$
 - teóriu relativity c
 - gravitáciu G
- Z $\hbar$, c , G vieme nakombinovať jednotky vzdialenosti, času a hmotnosti
 - Planckova dĺžka
 - Planckov čas
 - Planckova hmotnosť



Prirodzené jednotky prírody



- Hľadáme fundamentálnu teóriu, ktorá bude popisovať:
 - kvantovú mechaniku $\hbar$
 - teóriu relativity c
 - gravitáciu G
- Z $\hbar$, c , G vieme nakombinovať jednotky vzdialenosti, času a hmotnosti
 - Planckova dĺžka 10^{-35} m
 - Planckov čas 10^{-43} s
 - Planckova hmotnosť 10^{-8} kg



Prirodzené jednotky prírody



- Hľadáme fundamentálnu teóriu, ktorá bude popisovať:
 - kvantovú mechaniku $\hbar$
 - teóriu relativity c
 - gravitáciu G
- Z $\hbar$, c , G vieme nakombinovať jednotky vzdialenosti, času a hmotnosti
 - Planckova dĺžka 10^{-35} m
 - Planckov čas 10^{-43} s
 - Planckova hustota 10^{97} kg/m^3



Prirodzené jednotky prírody



- Z $\hbar$, c , G vieme nakombinovať jednotky vzdialenosti, času a hmotnosti
 - Planckova dĺžka 10^{-35} m
 - Planckov čas 10^{-43} s
 - Planckova hustota 10^{97} kg/m^3
- Toto sú prirodzené jednotky prírody. Pri procesoch na tejto úrovni hrajú úlohu všetky tri fundamentálne teórie.



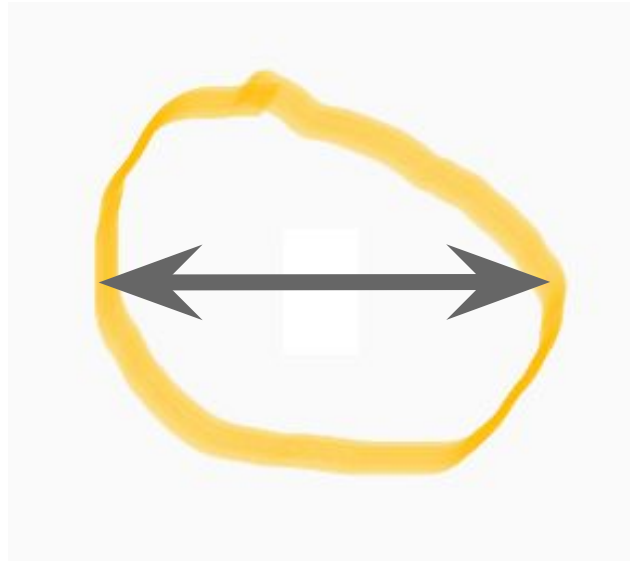


Malé častice a čierne diery



Kvantová gravitácia

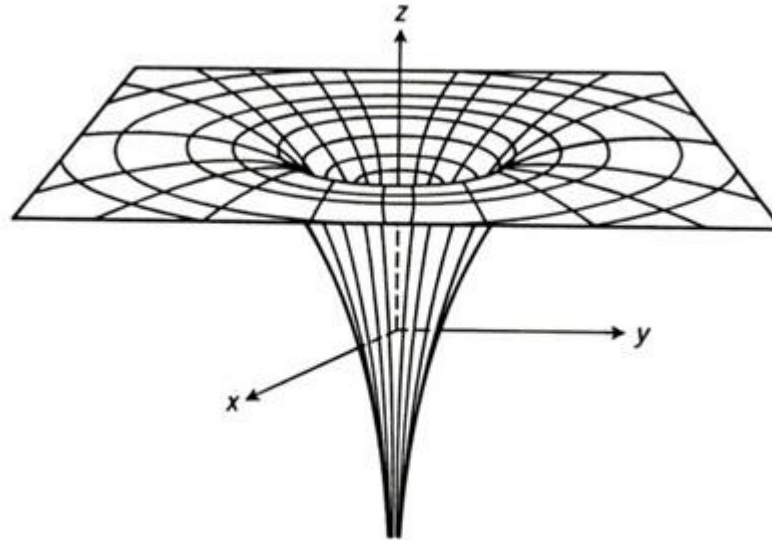
- $\hbar$ - čím menšia častica, tým väčšia energia



Kvantová gravitácia



- $\hbar$ - čím menšia častica, tým väčšia energia
- G - priveľa energie na jednom mieste vytvorí čiernu dieru

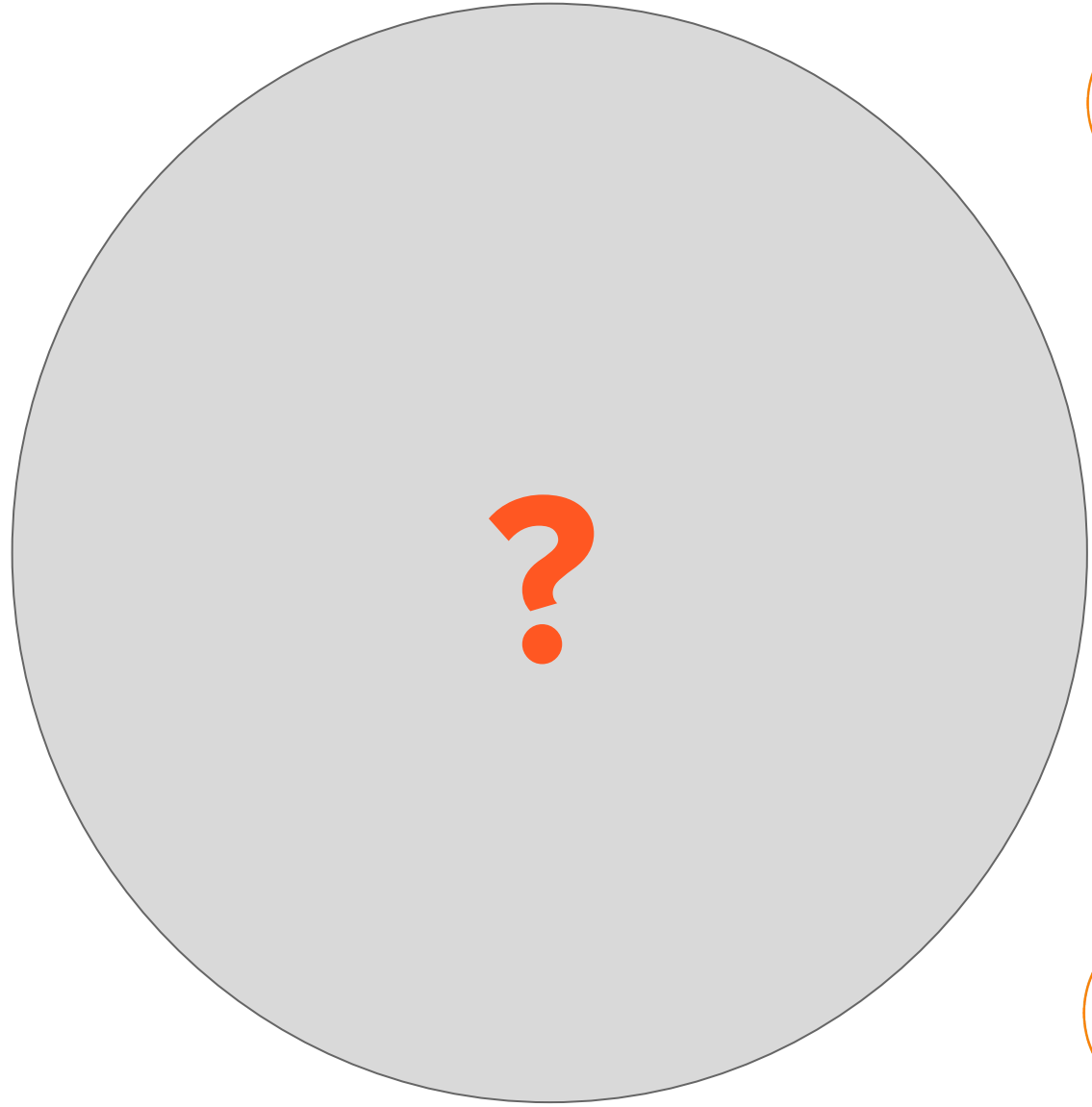


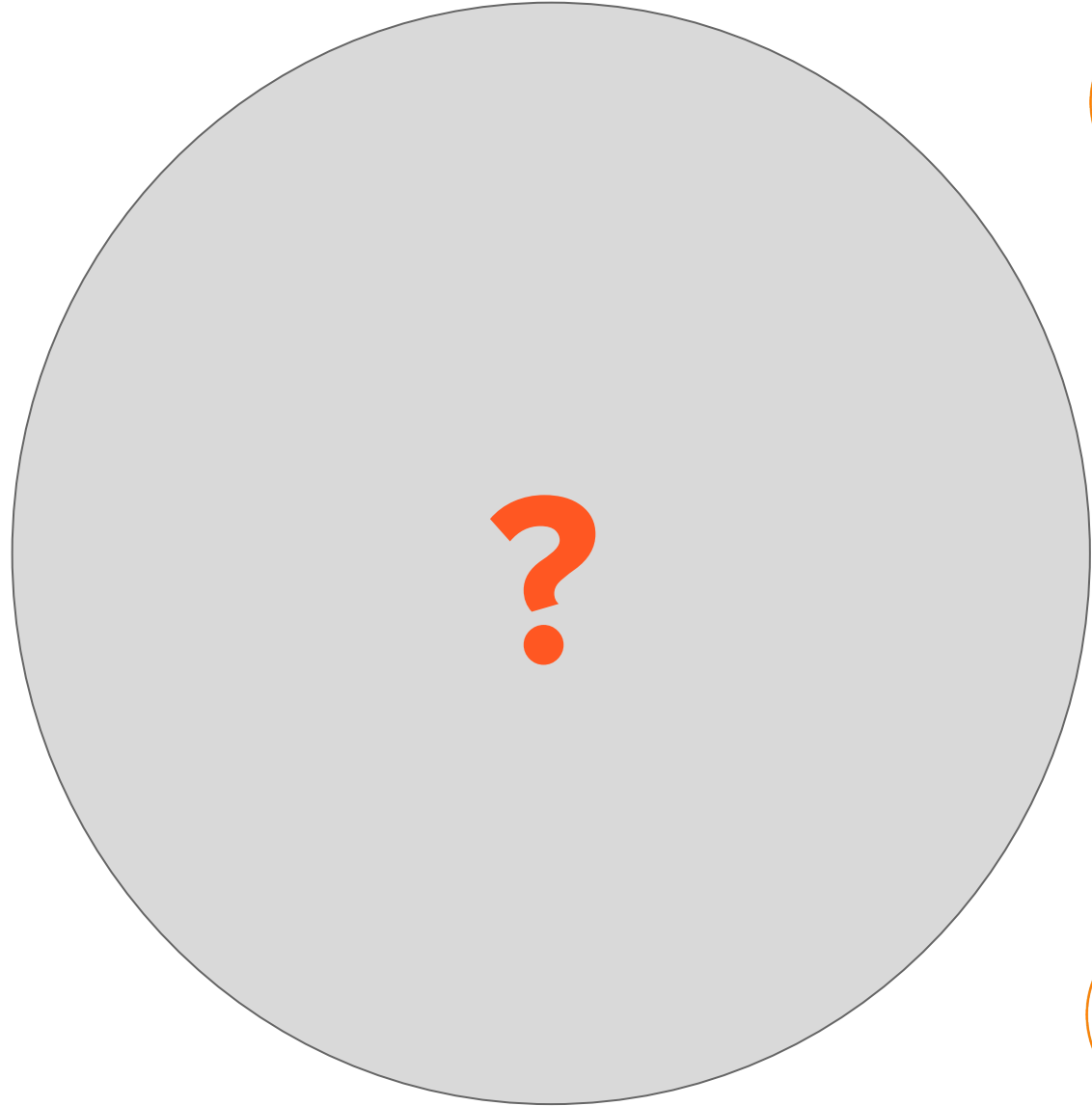
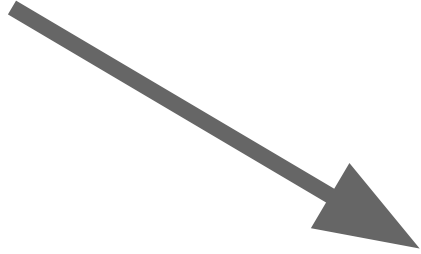
Kvantová gravitácia

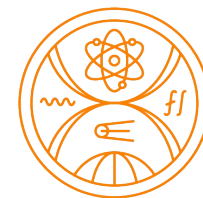
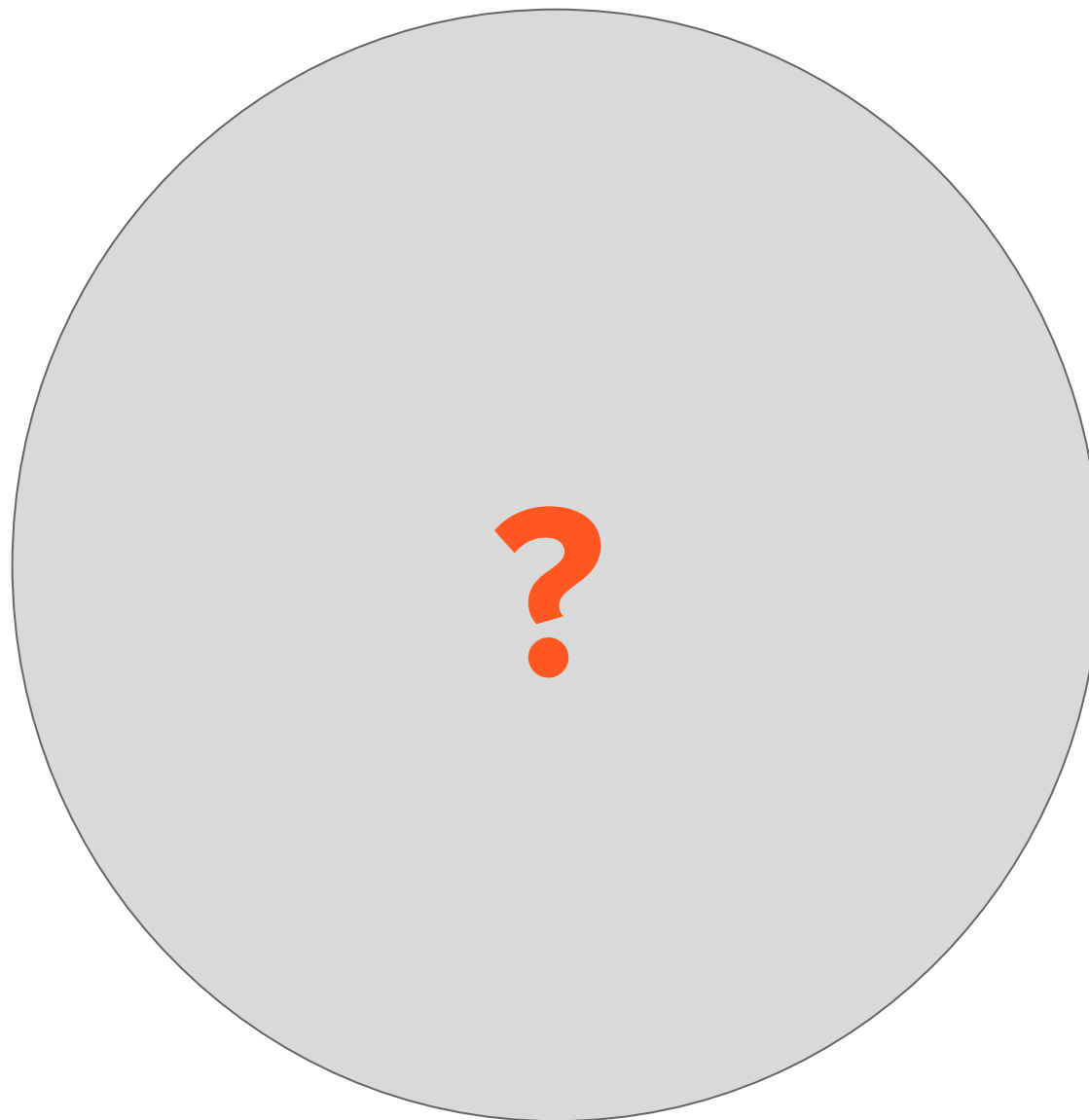
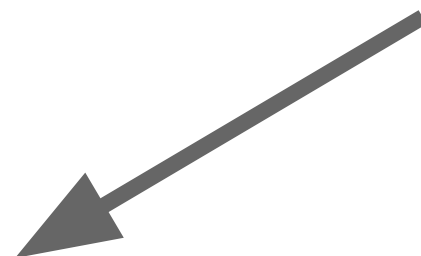
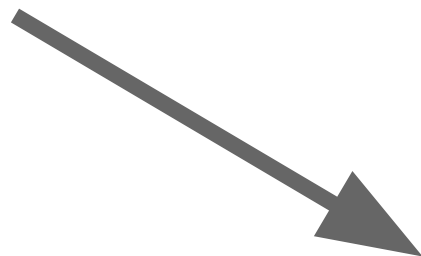


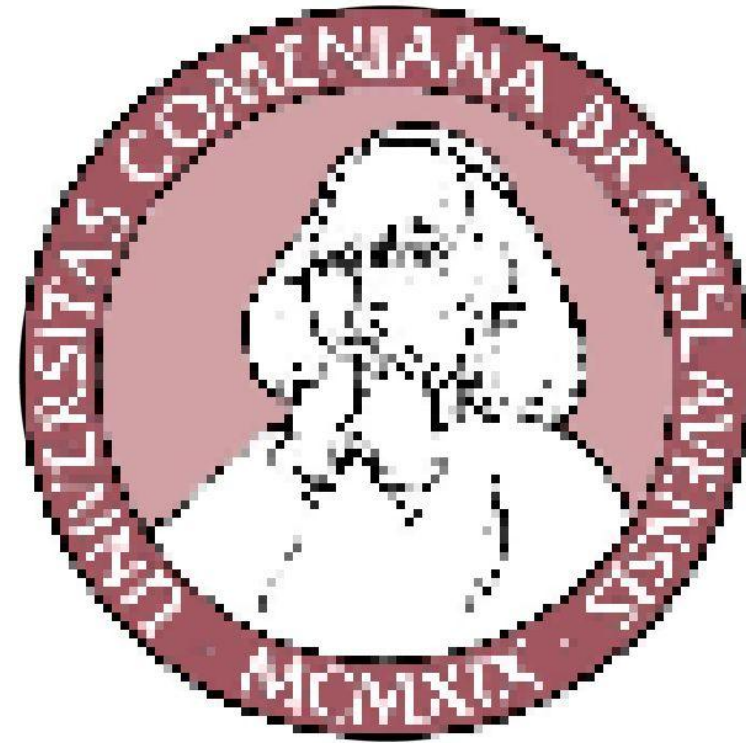
- $\hbar$ - čím menšia častica, tým väčšia energia
- G - priveľa energie na jednom mieste vytvorí čiernu dieru
- $\hbar+G$ - veľmi lokalizované častice okolo seba tvoria čierne diery

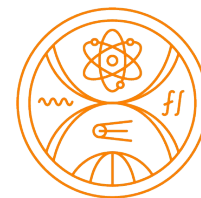
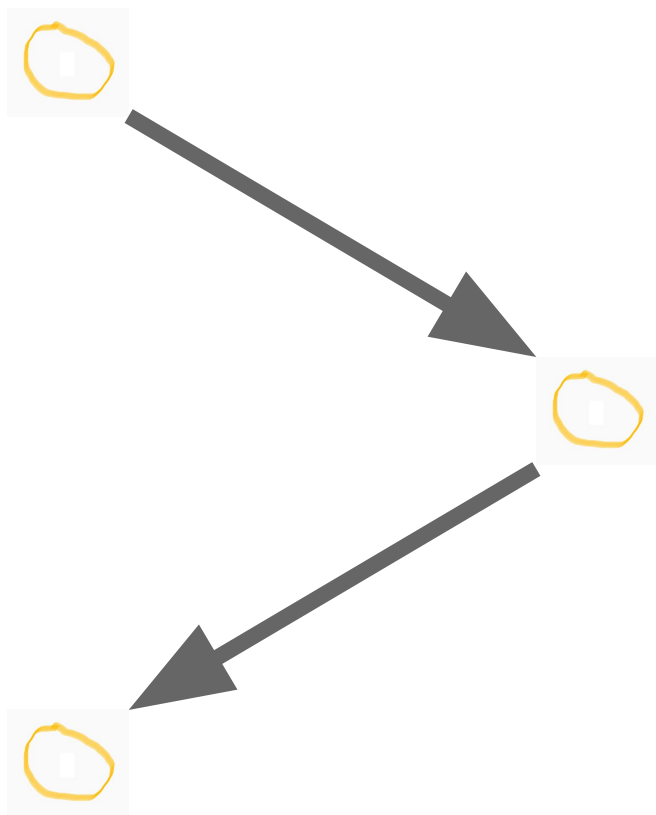


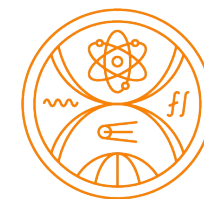




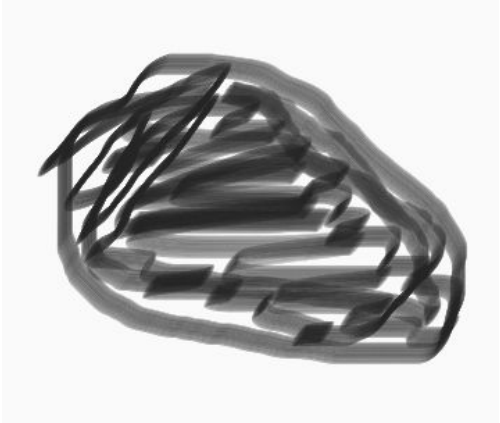
















L_p



Kvantová gravitácia



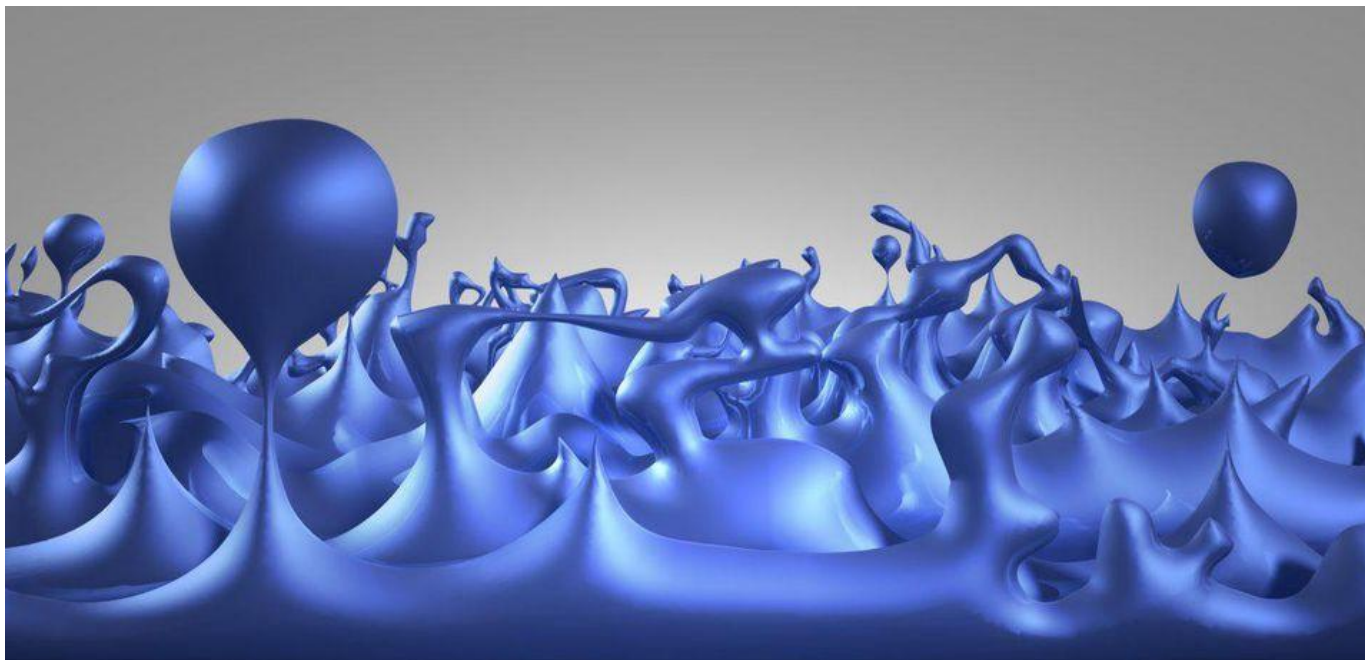
- $\hbar$ - čím menšia častica, tým väčšia energia
- G - priveľa energie na jednom mieste vytvorí čiernu dieru
- $\hbar+G$ - veľmi lokalizované častice okolo seba tvoria čierne diery
- Procesy na menších škálach ako L_P sú pred svetom na väčších vzdialenostiach **ukryté**.



Kvantová gravitácia



- $\hbar$ - vo vákuu neustále vznikajú a zanikajú častice (kvantové fluktuácie)



Kvantová gravitácia



- $\hbar$ - vo vákuu neustále vznikajú a zanikajú častice (kvantové fluktuácie)
- G - priveľa energie na jednom mieste vytvorí čiernu dieru
- $\hbar+G$ - vákuum sa rozpadne na spústu čiernych dier





Problém: veľmi lokalizovaná energia
spôsobuje nestability.



Experiment





Problém: veľmi lokalizovaná energia
spôsobuje nestability, ktoré
nepozorujeme.



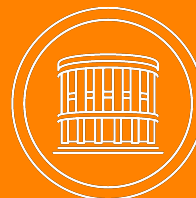
Riešenie

- V priestore sa nedá vytvoriť ľubovoľne malý objekt.
- Na vzdialenostiach L_P sa priestor skladá z kúskov.



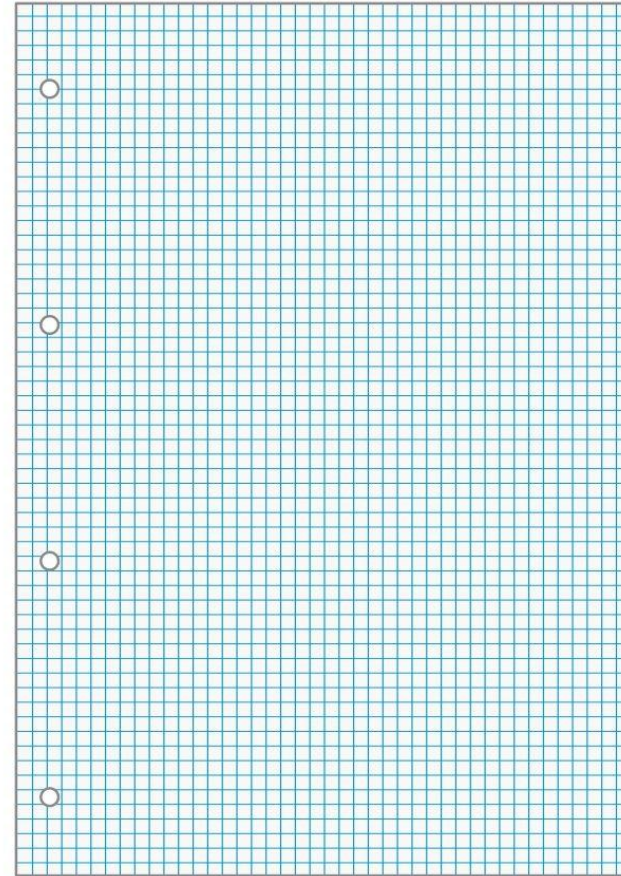


Kvantová štruktúra časopriestoru



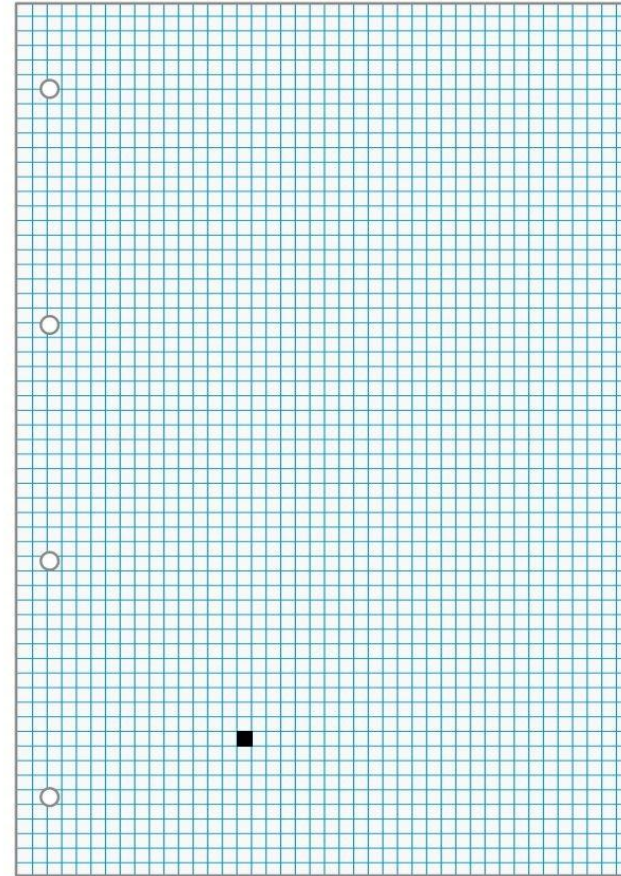
Kvantová štruktúra časopriestoru

- Štvorčekový papier



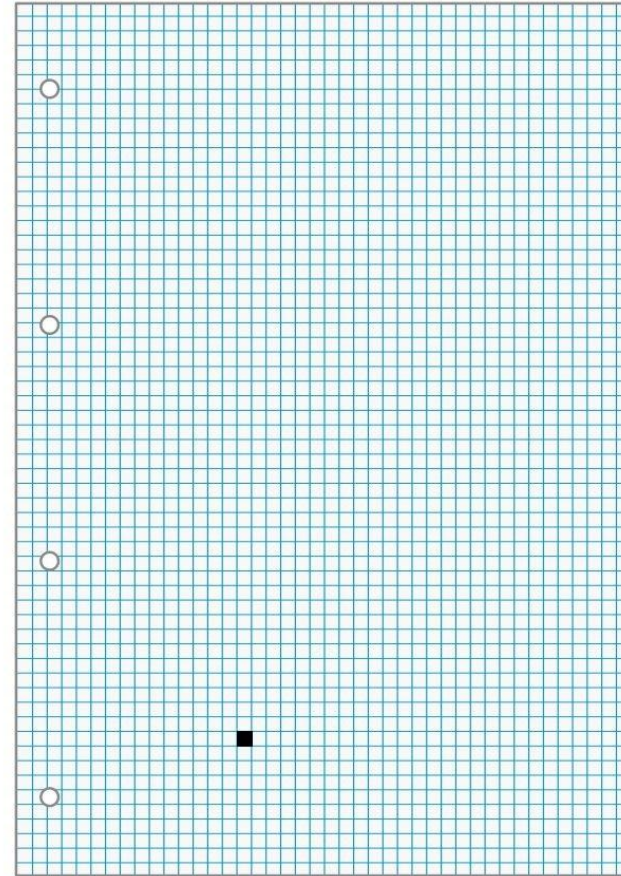
Kvantová štruktúra časopriestoru

- Štvorčekový papier



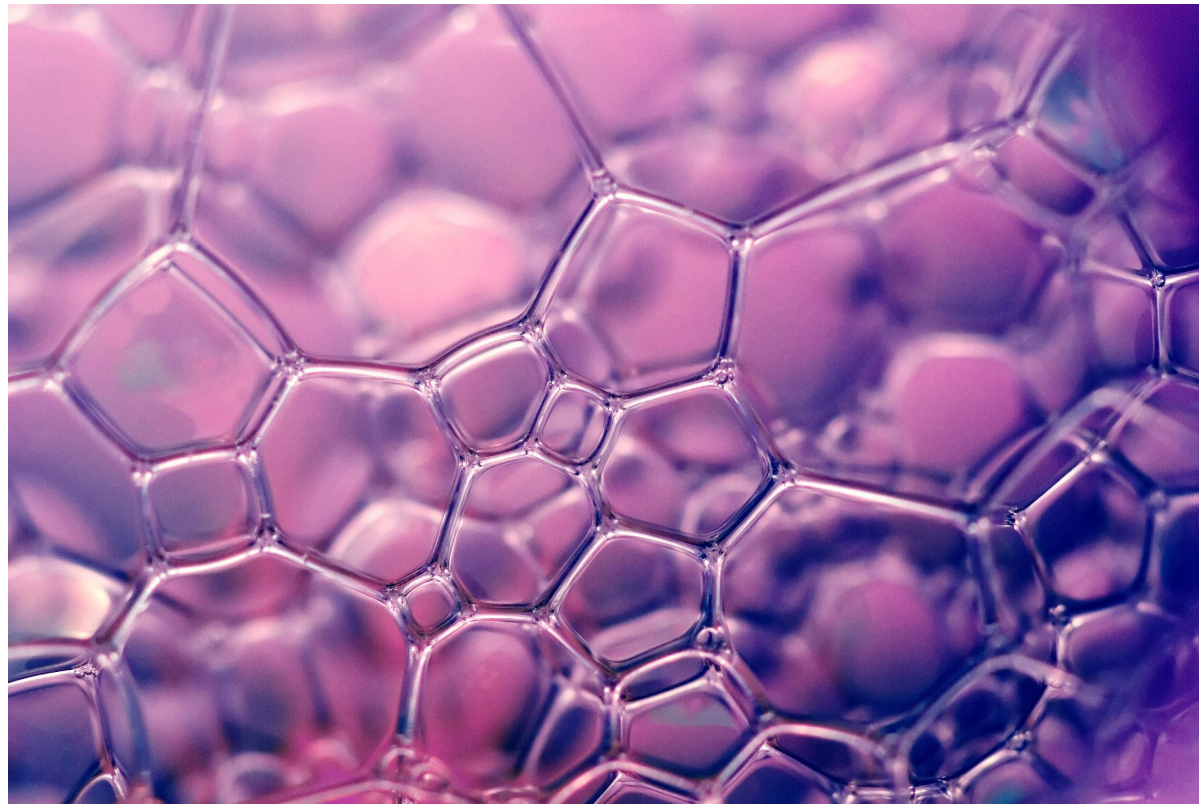
Kvantová štruktúra časopriestoru

- Štvorčekový papier
 - Takýto priestor má oveľa menšiu symetriu.
 - To je problém, na symetriách je založený náš popis sveta.



Kvantová štruktúra časopriestoru

- Štvorčekový papier
- Bublínkový priestor



Kvantová štruktúra časopriestoru



- Štvorčekový papier
- Bublínkový priestor
 - Takýto priestor priestor má úplnú symetriu.
 - Hovorí sa tomu nekomutatívny priestor.
 - Idea podobná ako v kvantovej mechanike.



Kvantová štruktúra časopriestoru



- Štvorčekový papier
- Bublínkový priestor
 - Takýto priestor priestor má úplnú symetriu.
 - Hovorí sa tomu **nekomutatívny** priestor.
 - Idea podobná ako v kvantovej mechanike.

$$[x,p]=i\hbar$$



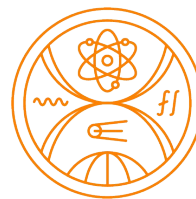
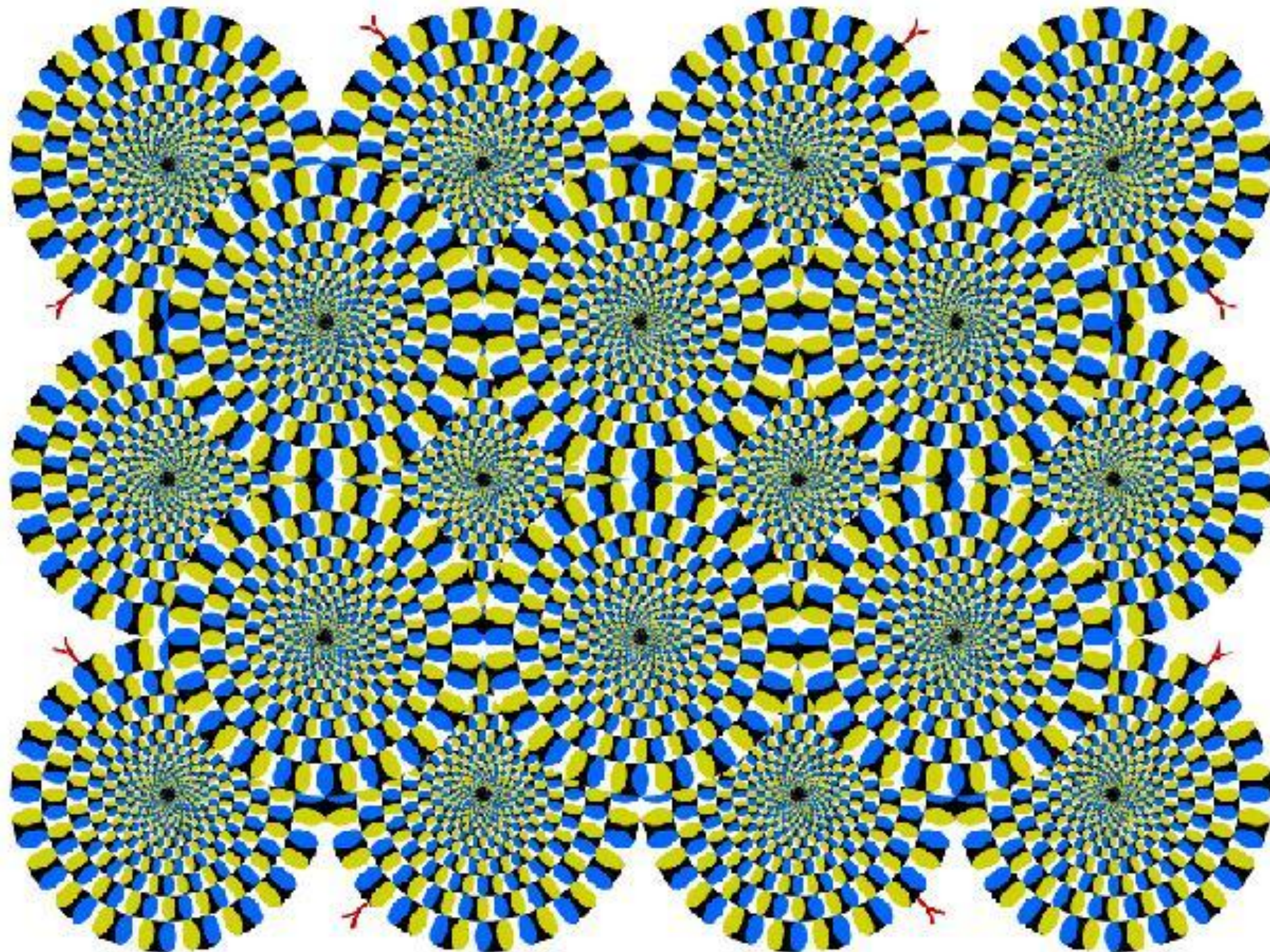
Kvantová štruktúra časopriestoru



- Štvorčekový papier
- Bublínkový priestor
 - Takýto priestor priestor má úplnú symetriu.
 - Hovorí sa tomu **nekomutatívny** priestor.
 - Idea podobná ako v kvantovej mechanike.

$$[x,y]=i\theta$$







Kvantová štruktúra časopriestoru

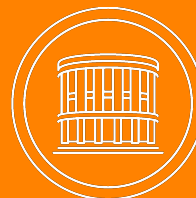


- Štvorčekový papier
- Bublínkový priestor
- Vynárajúci sa (emerging) priestor
 - Priestor v skutočnosti **neexistuje**.
 - Vlastnosti častíc ako poloha, rýchlosť, vzájomná vzdialenosť sú dôsledkom **interakcie s niečim iným**.





**Dá sa štruktúra
priestoru uvidieť?**



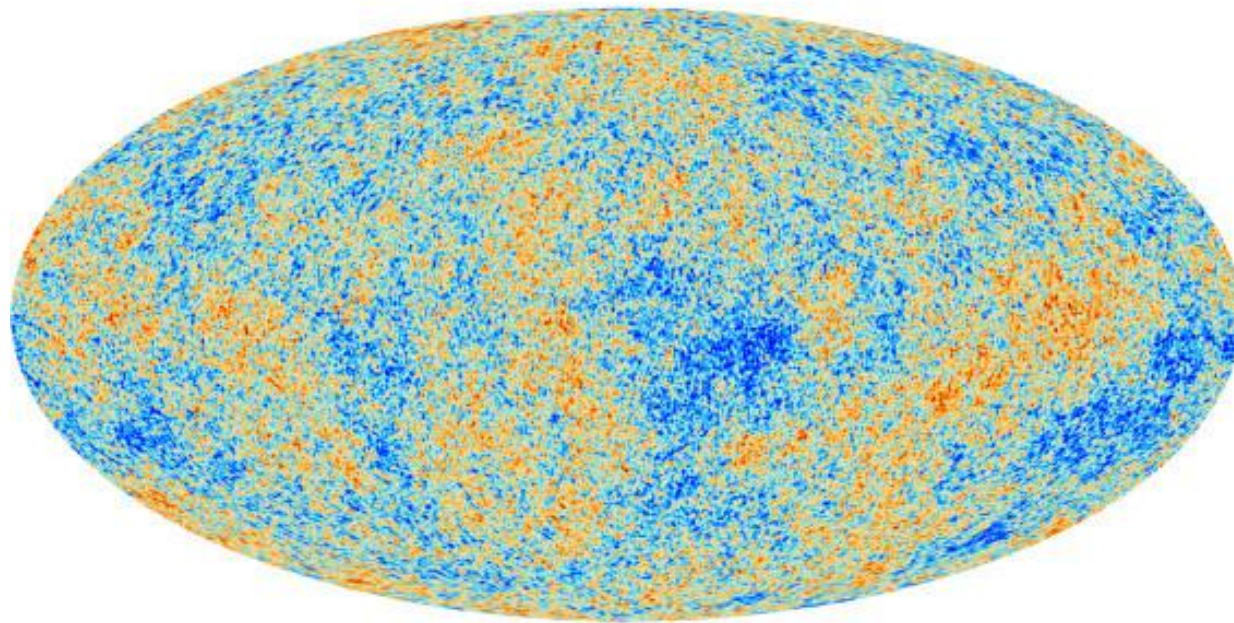
Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)



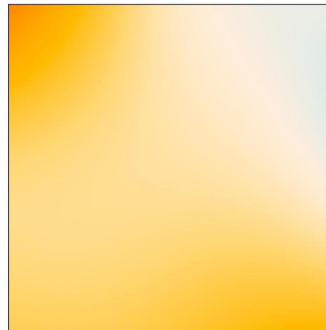
Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)

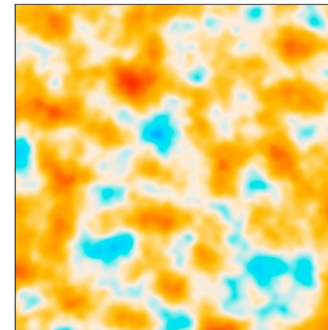
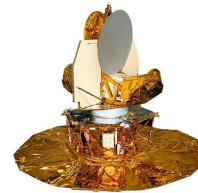


Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

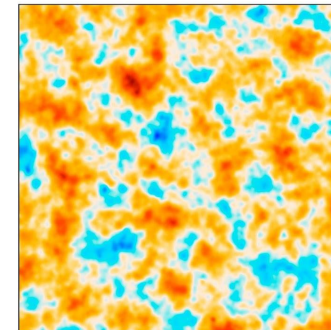
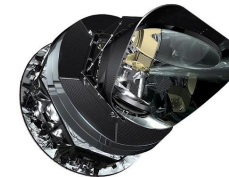
- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)



COBE



WMAP



Planck



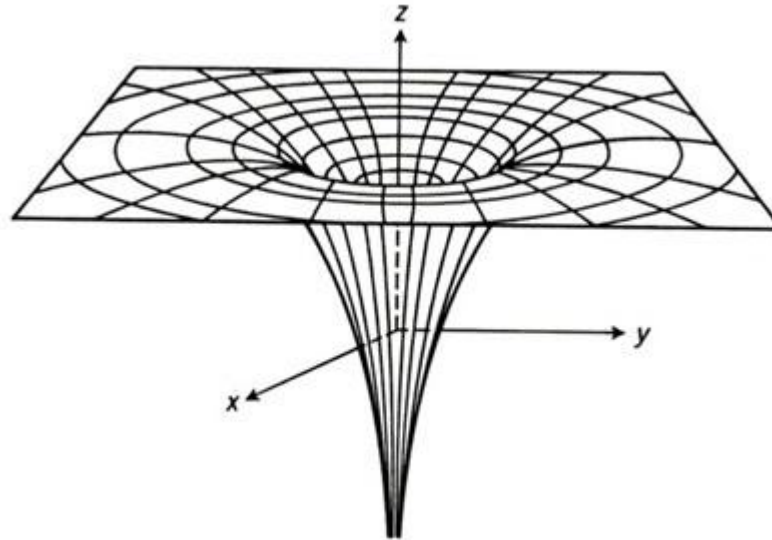
Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)



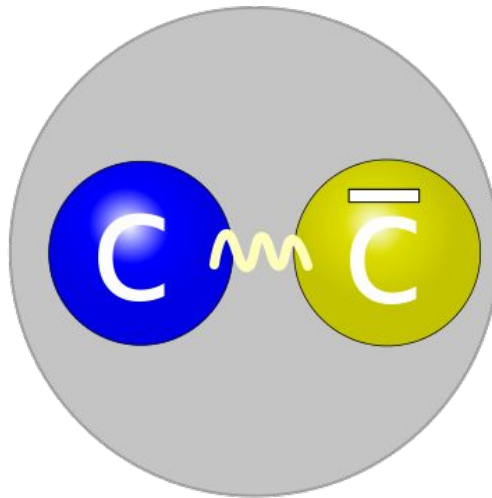
Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)



Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)



Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?



- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)
- Štruktúra priestoru môže mať merateľné dôsledky na oveľa väčšej škále ako L_P .



Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?



- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)
- Štruktúra priestoru môže mať merateľné dôsledky na oveľa väčšej škále ako L_P .
- Matematická konzistentnosť fundamentálnej teórie môže mať dôsledky na oveľa väčšej škále ako L_P .





Spojenie **kvantovej** mechaniky a
teórie **gravitácie** predpovedá
štruktúru priestoru.





S určitostou nevieme akú.

Ale rozmyslieť si to je kľúčovým
krokom v ceste za teóriou kvantovej
gravitácie.





Ďakujem za
pozornosť!

