



FAKULTA MATEMATIKY,
FYZIKY A INFORMATIKY
Univerzita Komenského
v Bratislave

Kvantová štruktúra časopriestoru

Juraj Tekel
Katedra teoretickej fyziky



5. 2. 2025, sústredenie FKS, Kysak

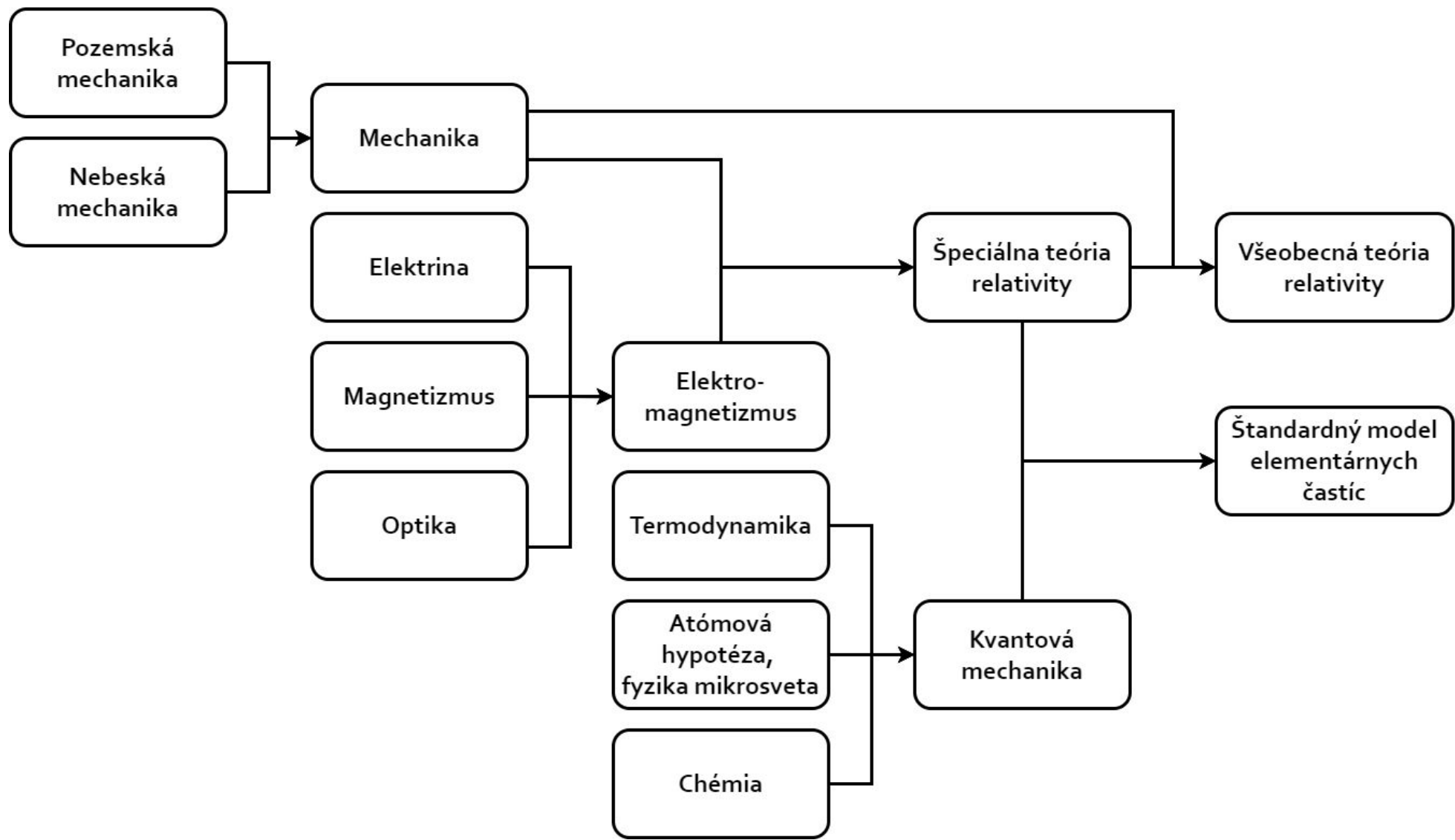


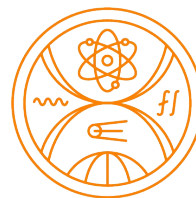
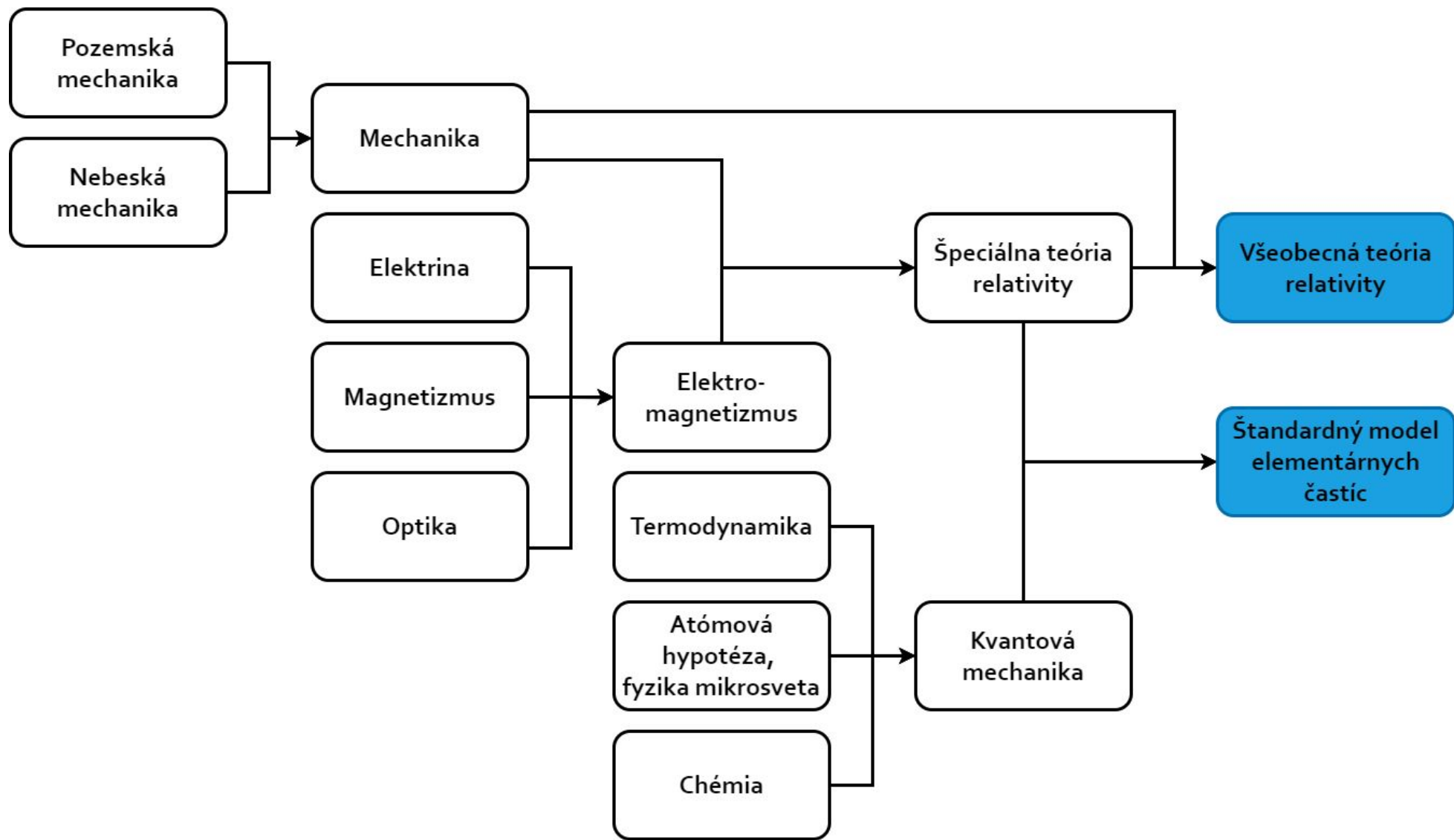




História fiziky









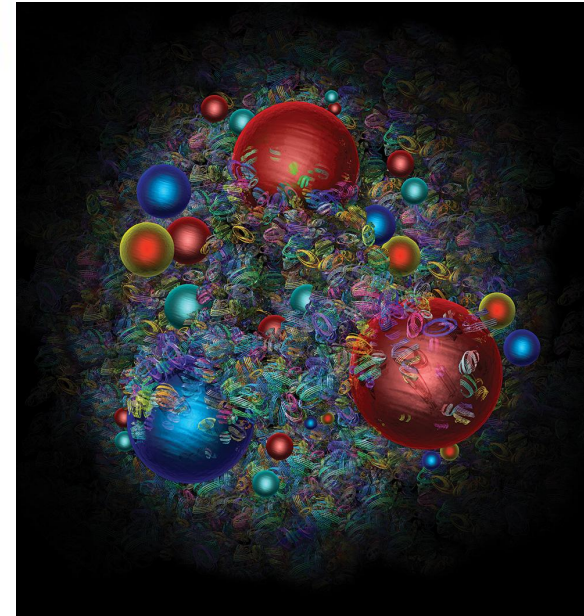
Kvantová teória gravitácie



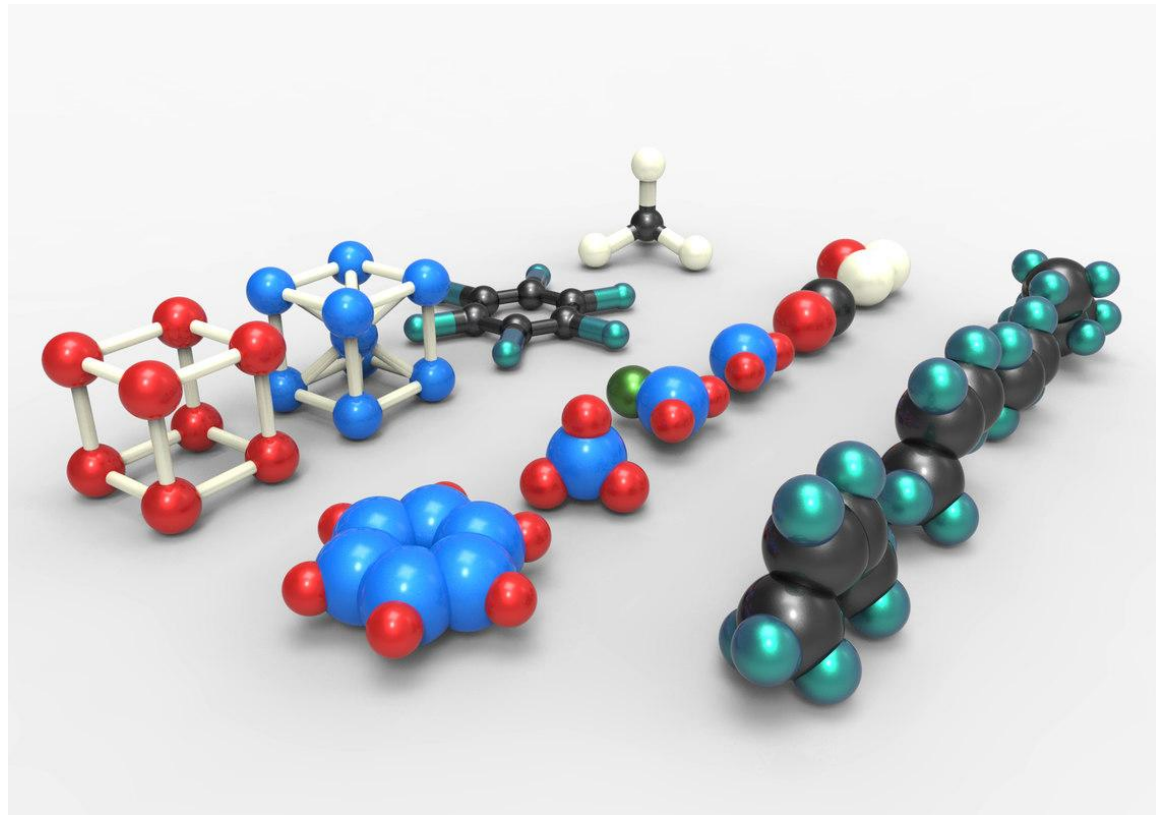
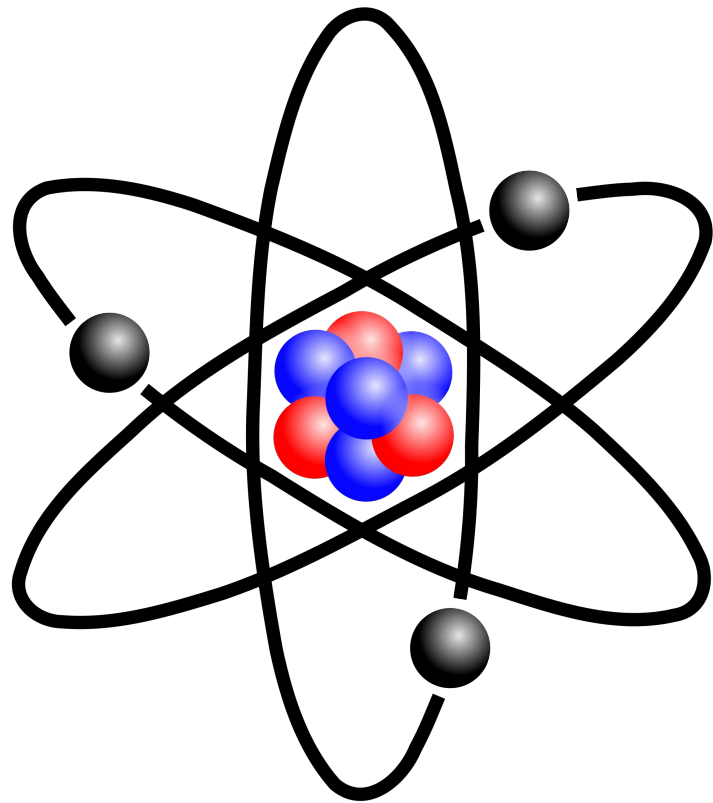
Kvantová teória



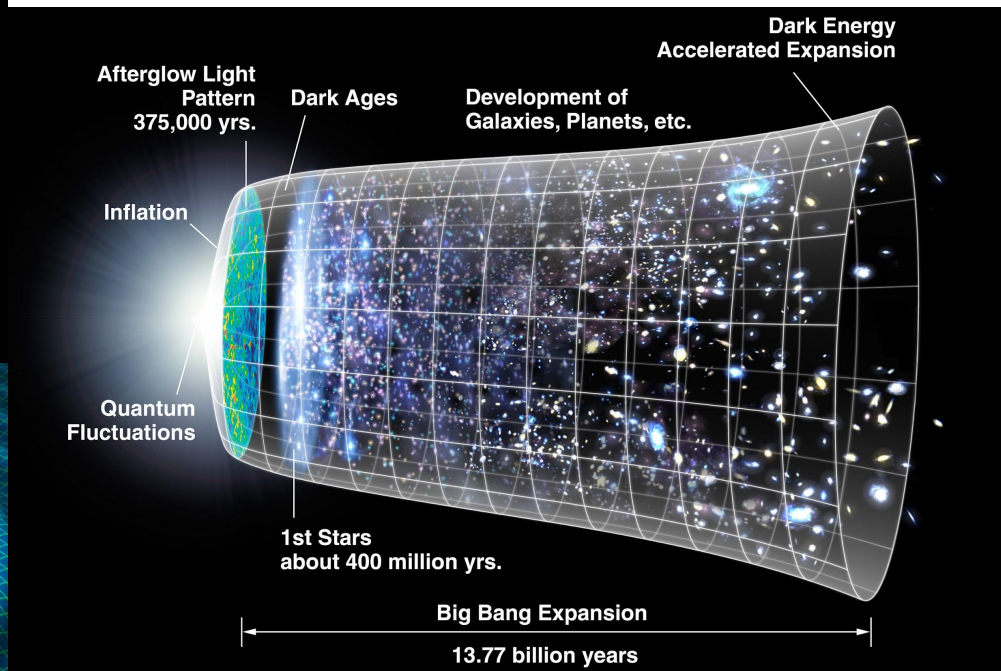
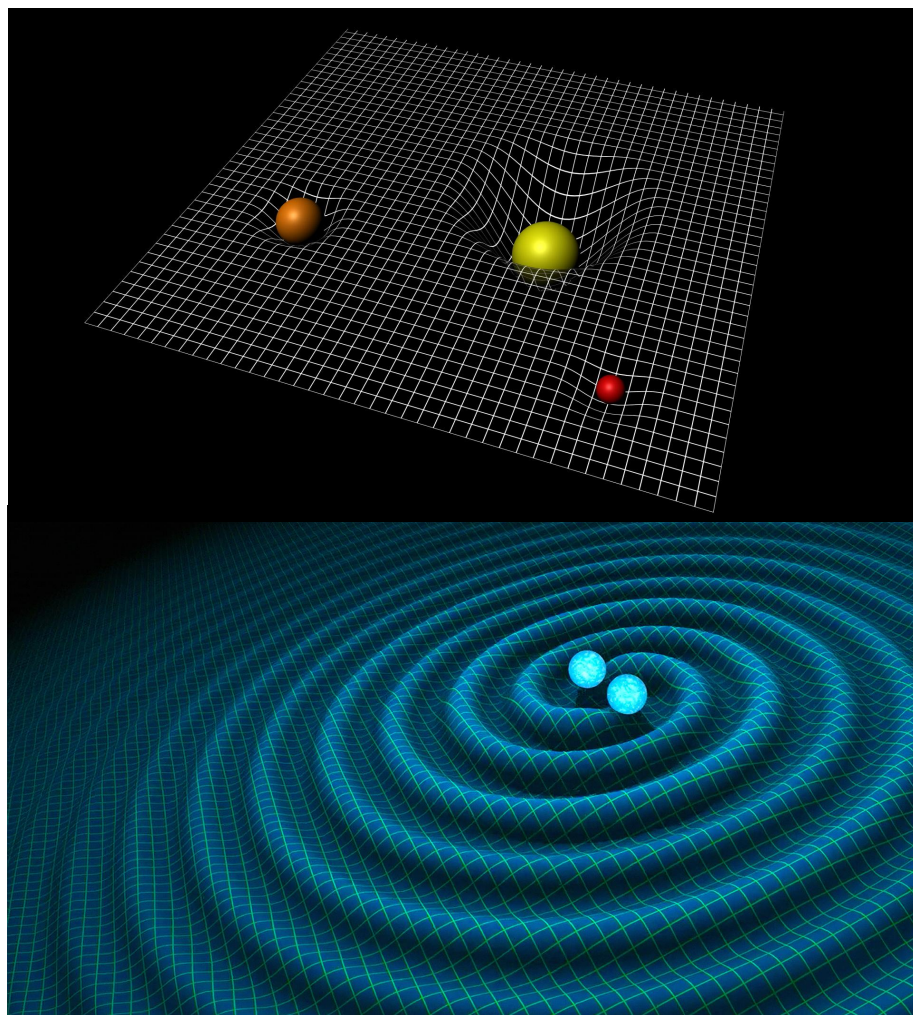
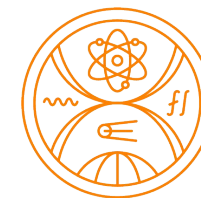
KVARKY	hmotnosť $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ náboj $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ u up	hmotnosť $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ náboj $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ c charm	hmotnosť $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ náboj $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluón	hmotnosť $\approx 124.97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







???









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



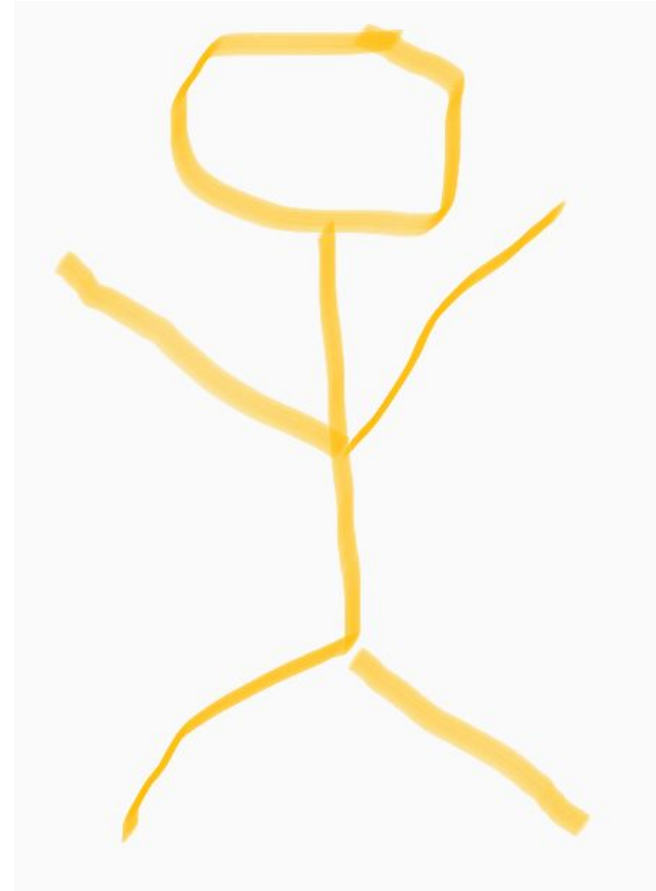


Čo to znamená
skladať sa z
niečoho?



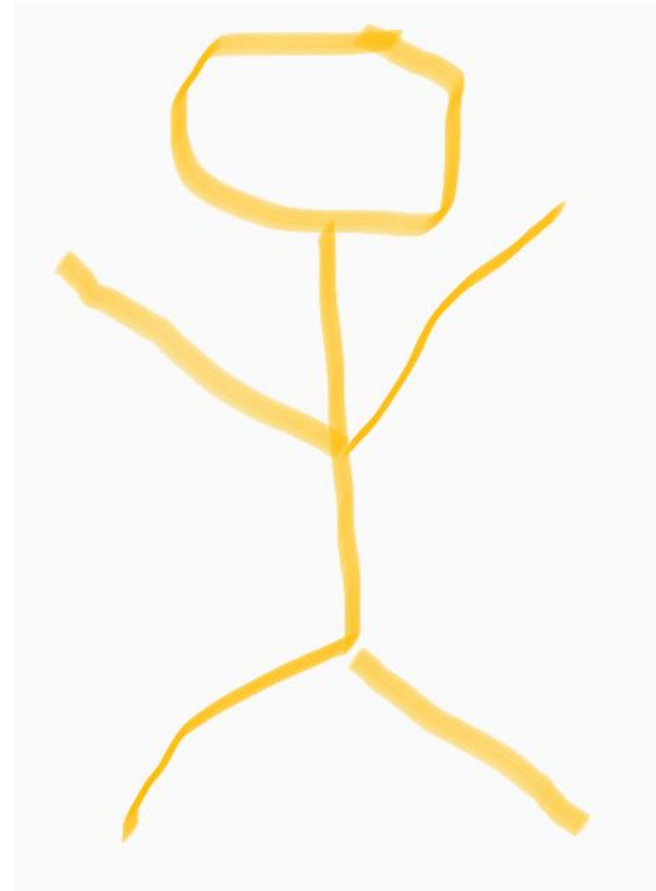
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



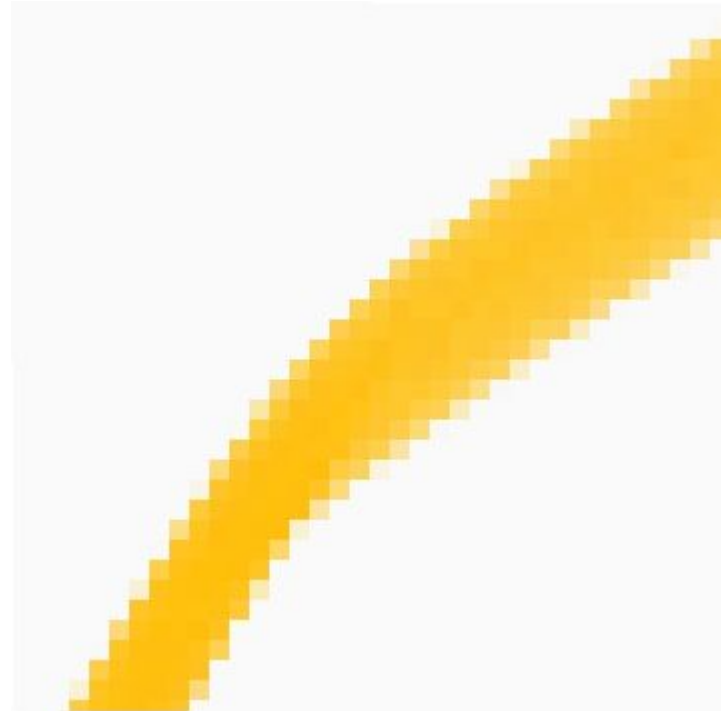
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



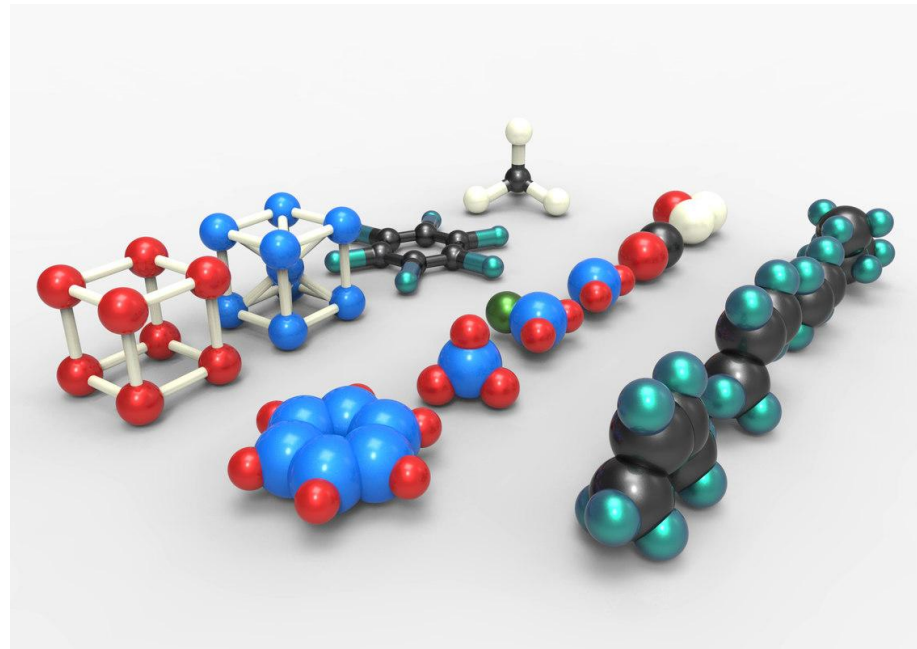
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



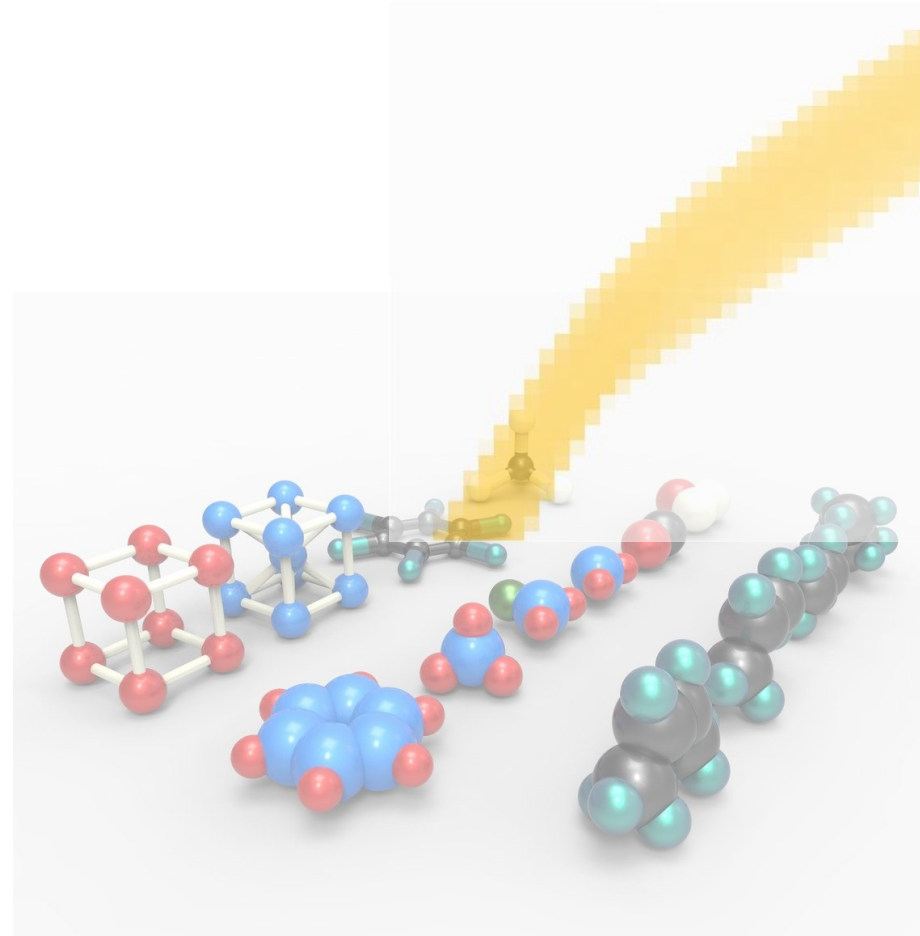
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



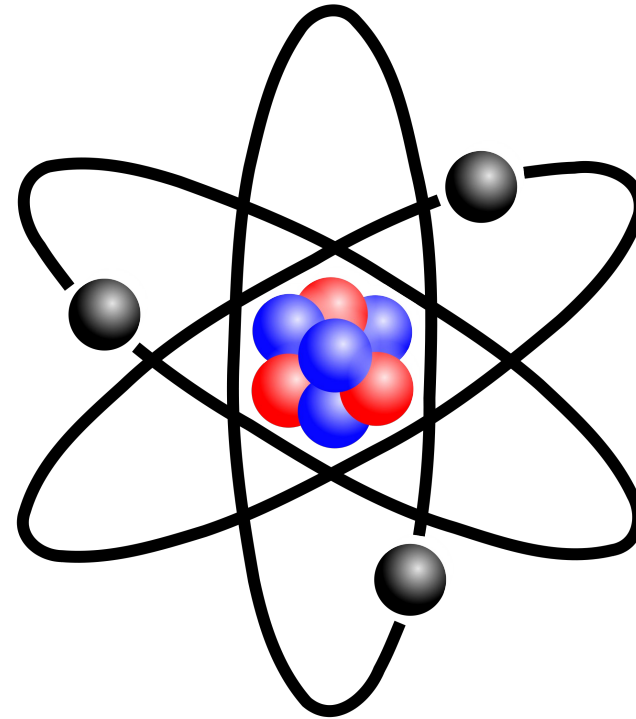
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **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.



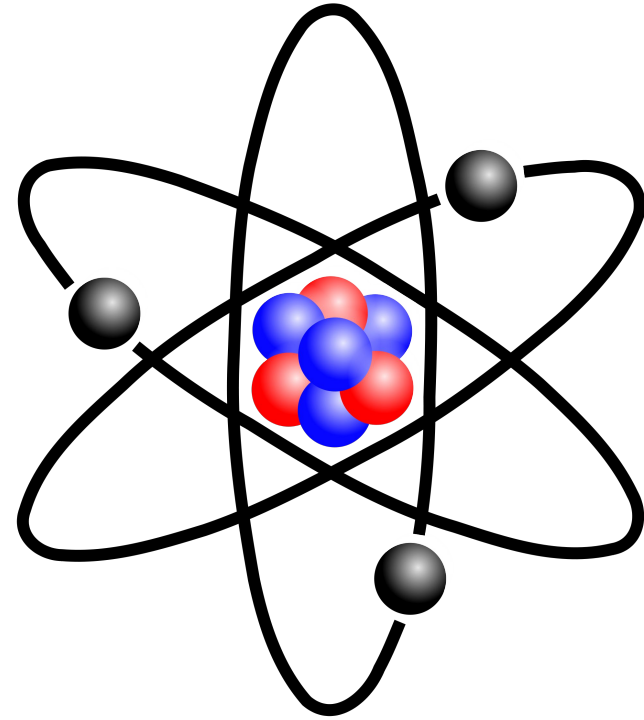
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



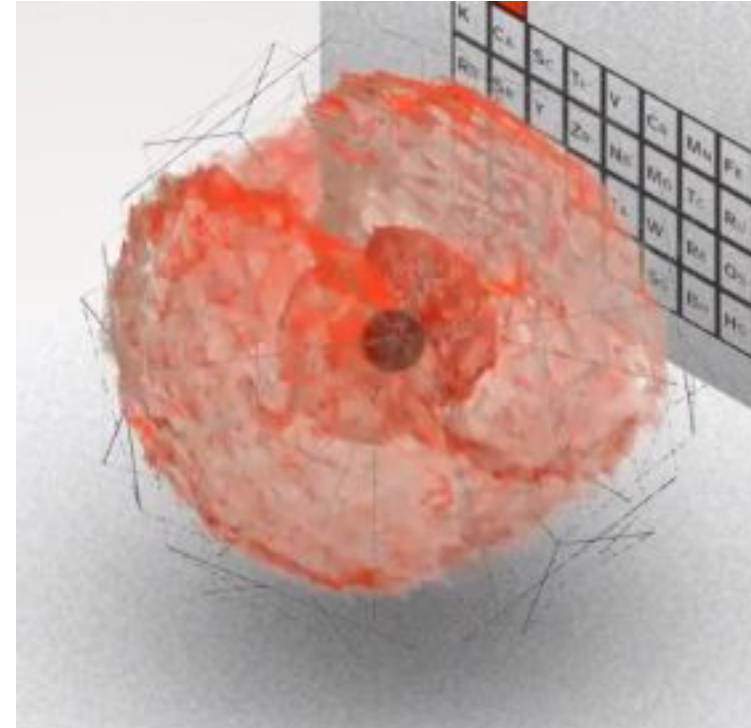
Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **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?



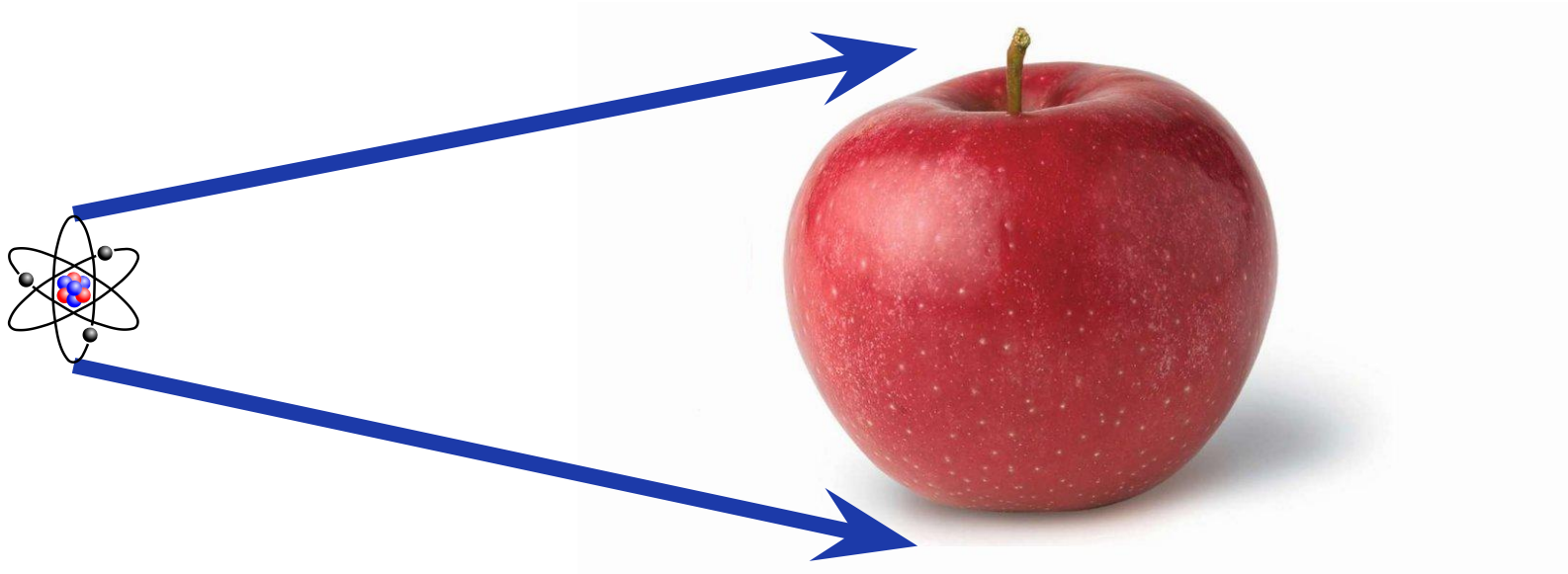
Aké veľké sú atómy?

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



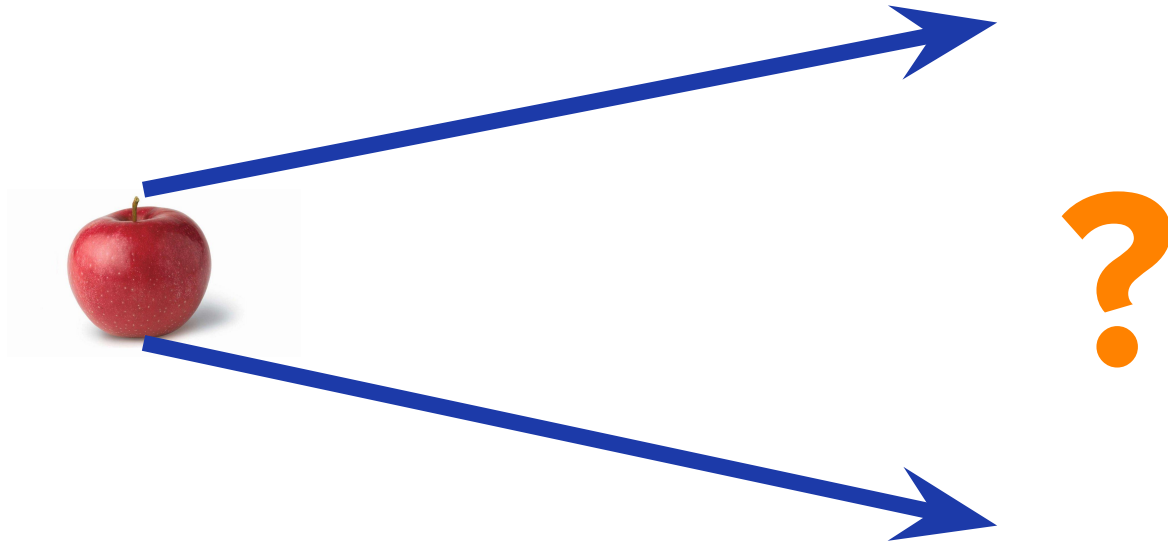
Aké veľké sú atómy?

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



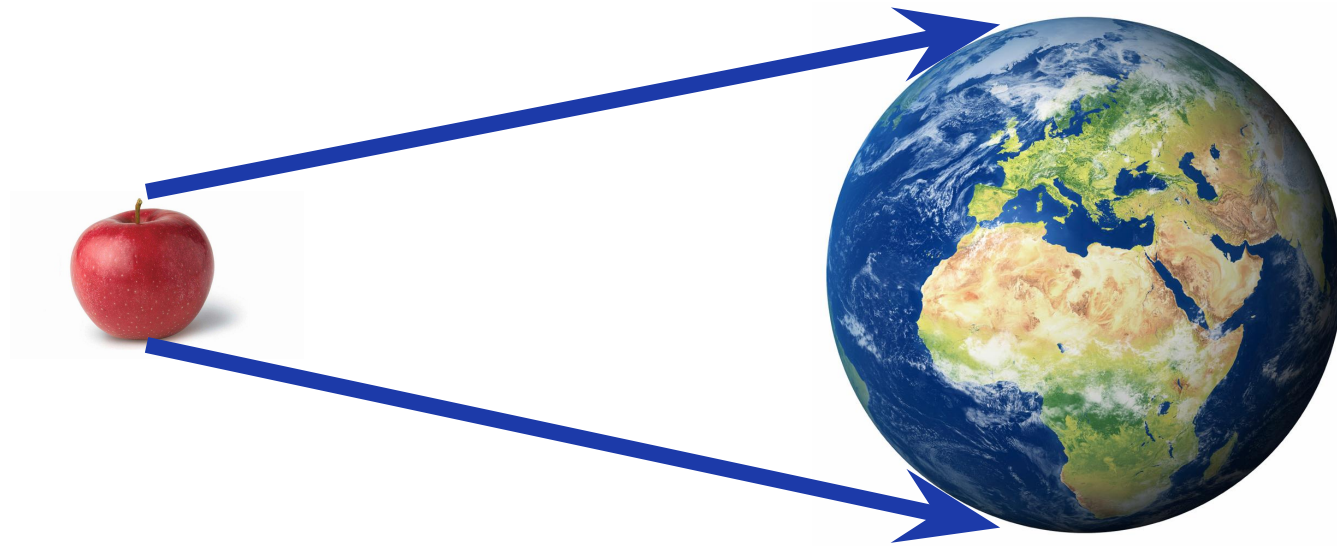
Aké veľké sú atómy?

- **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.



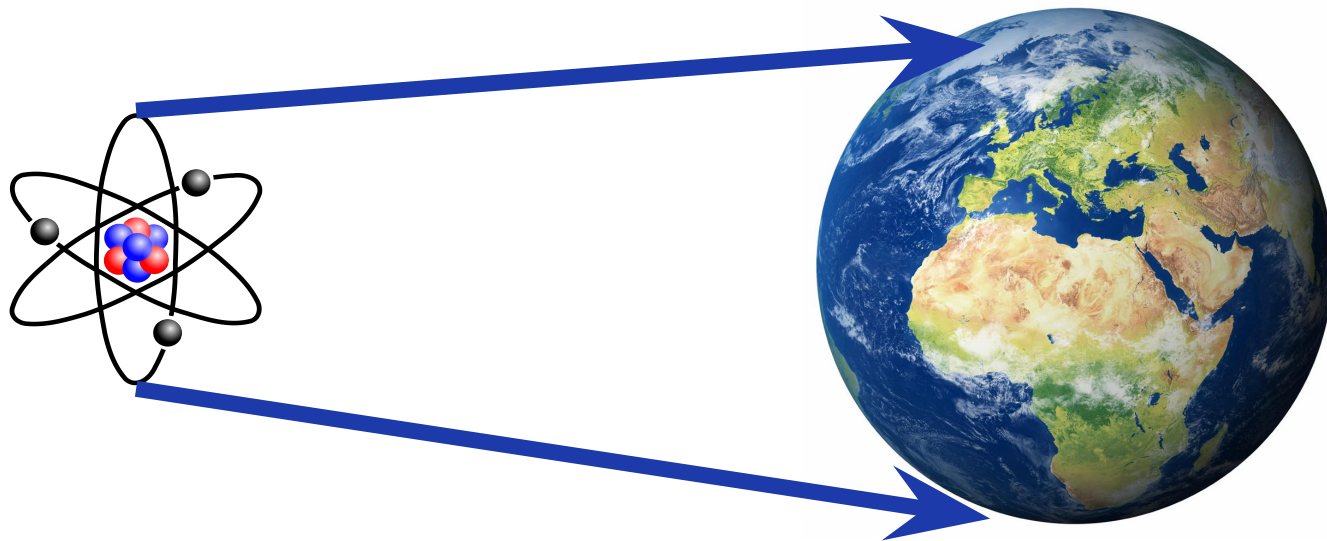
Aké veľké sú atómy?

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



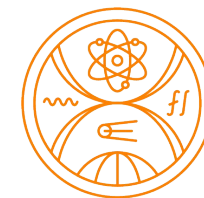
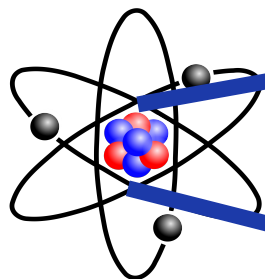
Aké veľké sú atómy?

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



Aké veľké sú atómy?

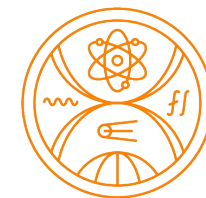
- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- To je veľmi málo. **Pre nás.**
- **Jadro** atómu asi 10^{-15} m.



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/m³



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/m³
- Toto sú prirodzené jednotky prírody. Pri procesoch na tejto úrovni hrajú úlohu všetky tri fundamentálne teórie.
- Z ich pohľadu je **človek veľký** $10^{35} L_p$.



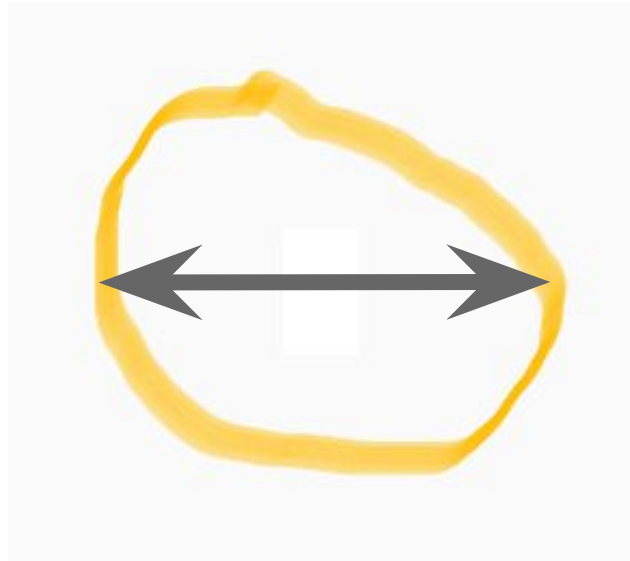


Malé častice a čierne diery



Kvantová gravitácia

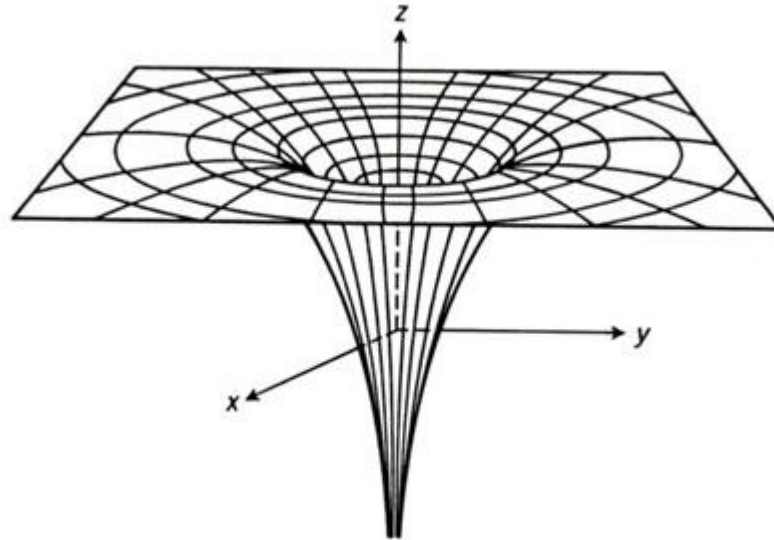
- \hbar - čím menšia častica, tým väčšia energia



Kvantová gravitácia



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

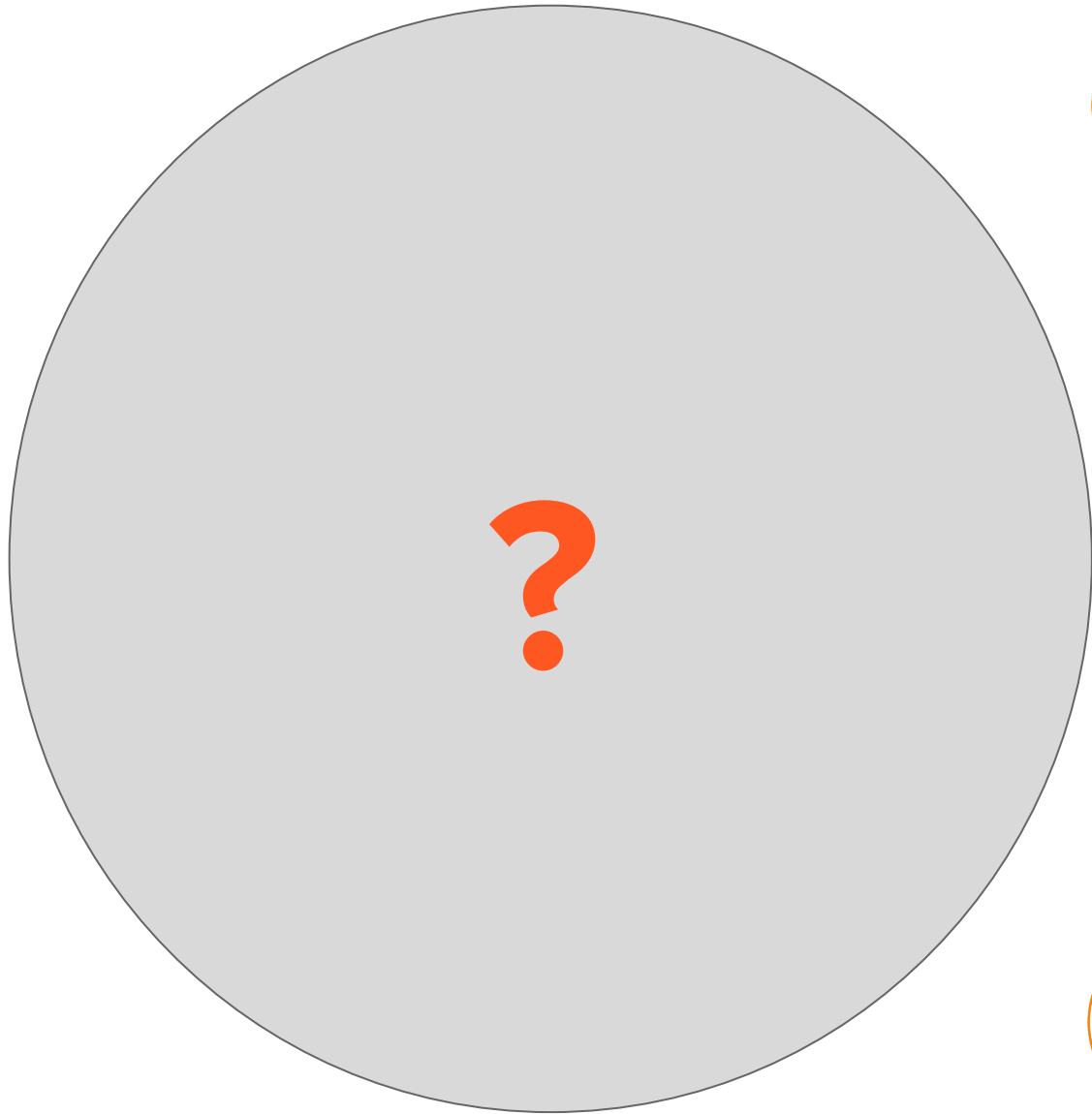


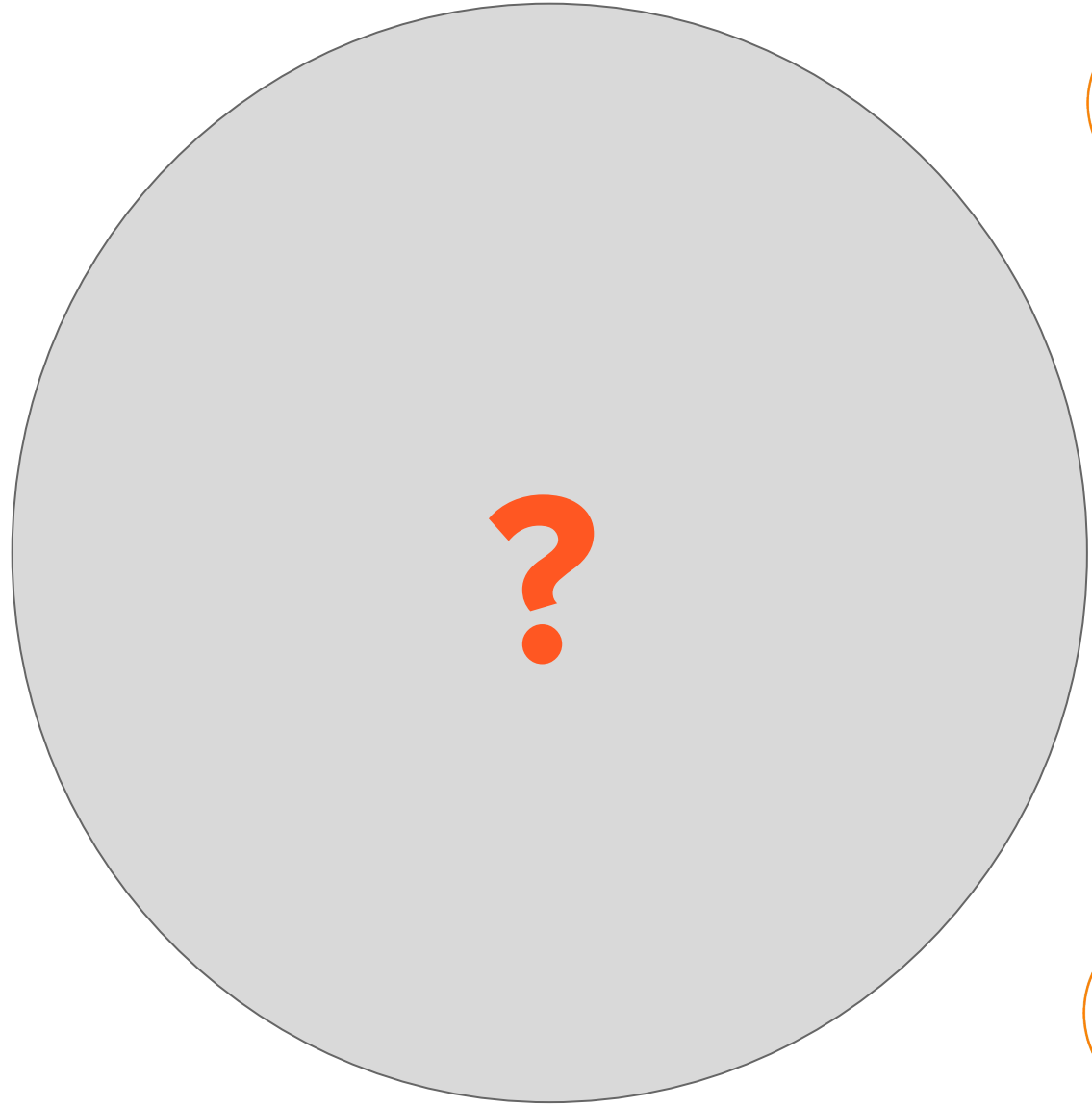
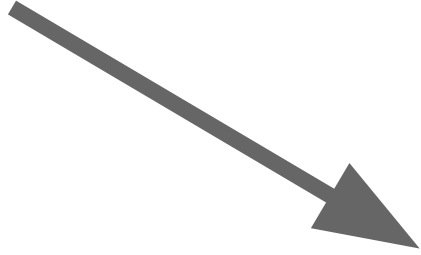
Kvantová gravitácia

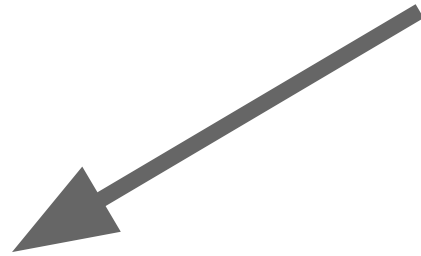
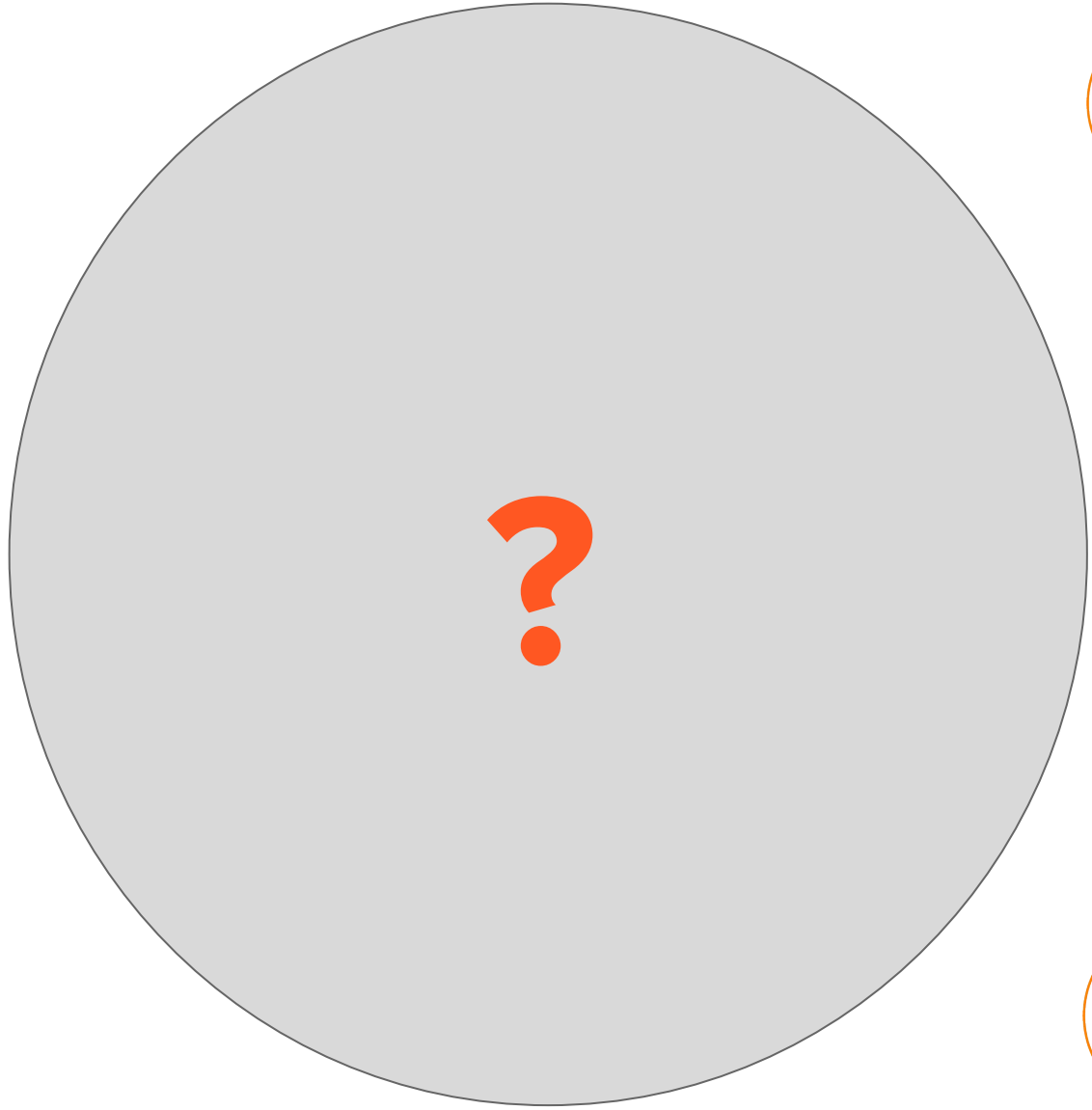
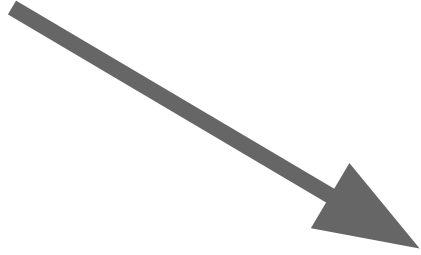


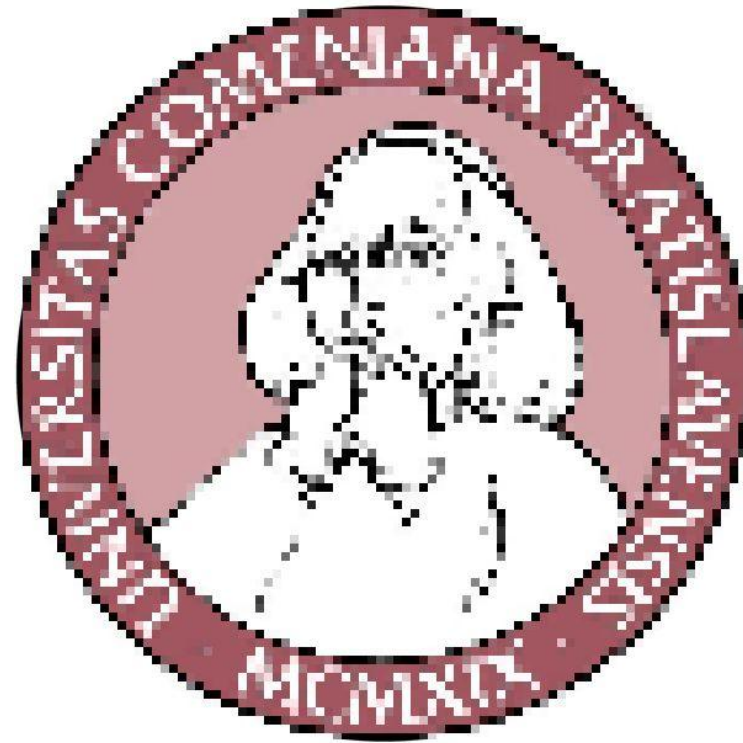
- \hbar - čím menšia častica, tým väčšia energia
- G - priveľa energie na jednom mieste vytvorí čiernu dieru
- $\hbar+G$ - veľmi lokalizované častice okolo seba tvoria čierne diery

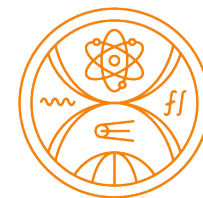
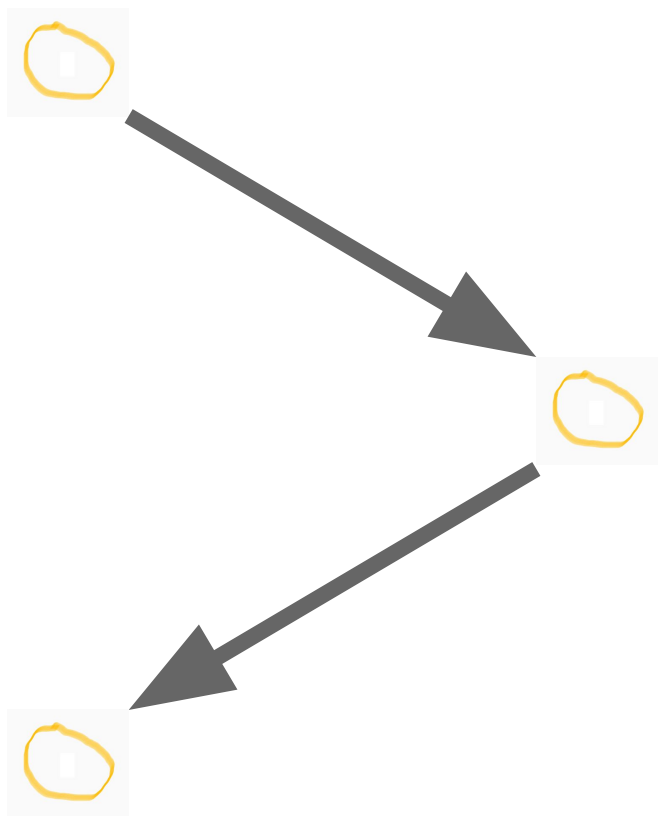






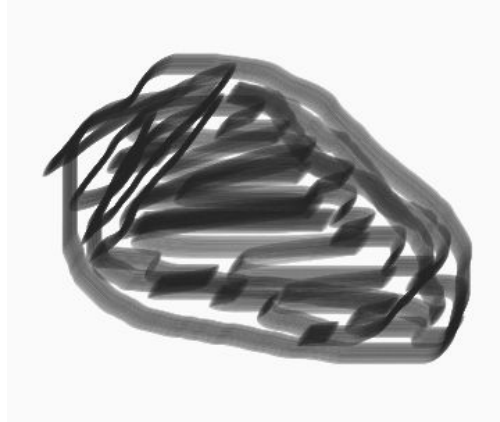




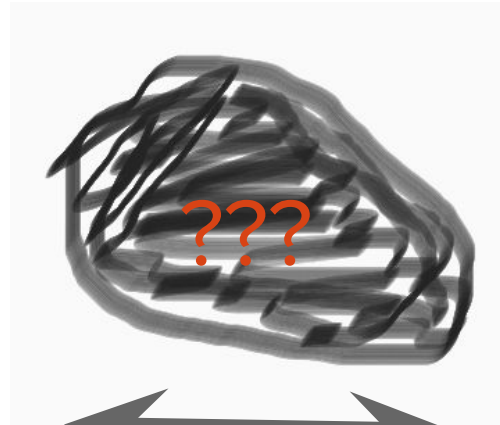












L_p



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 - 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**.
- To ale ešte neznamená, že nemôžu existovať.



Kvantová gravitácia



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

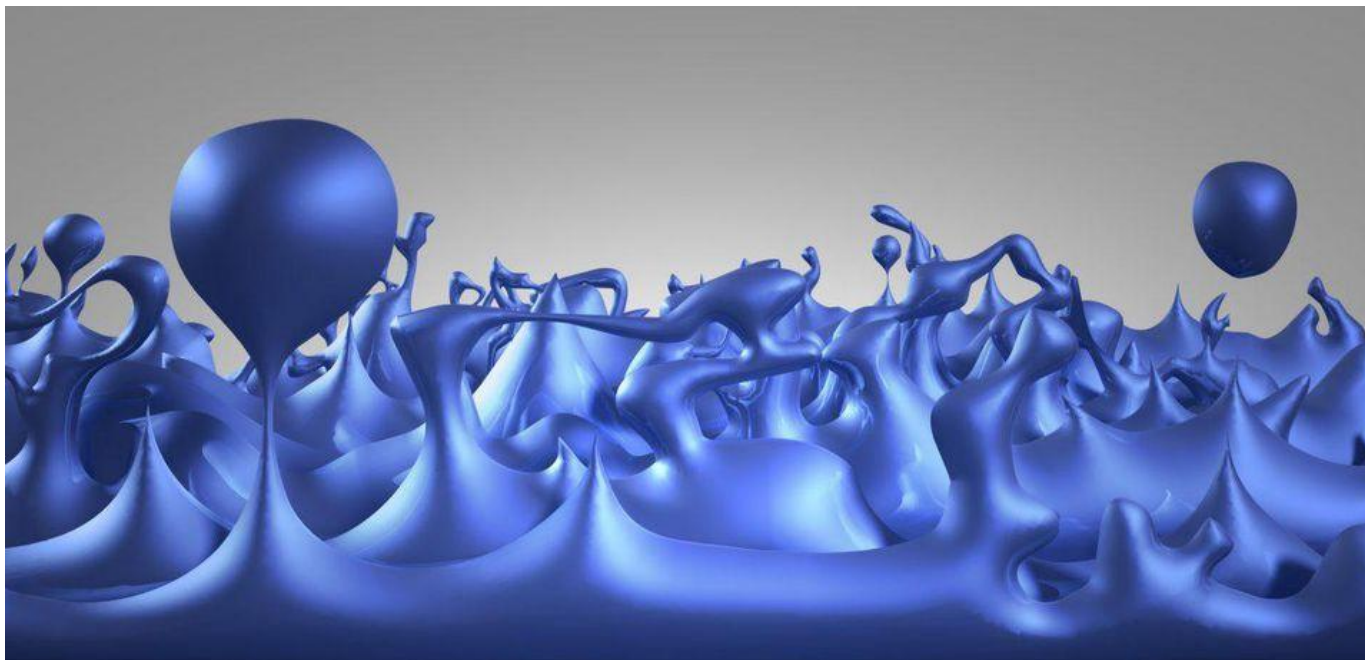


fig.: NASA/CXC/M.WEISS

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: nič také ako veľmi
lokalizované v priestore neexistuje.



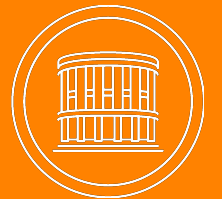
Riešenie

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



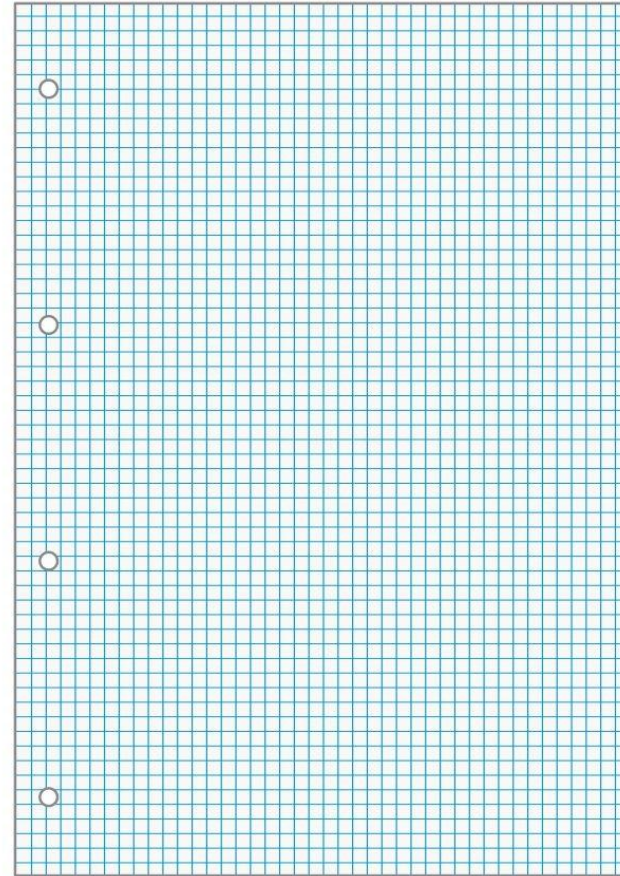


Kvantová štruktúra časopriestoru



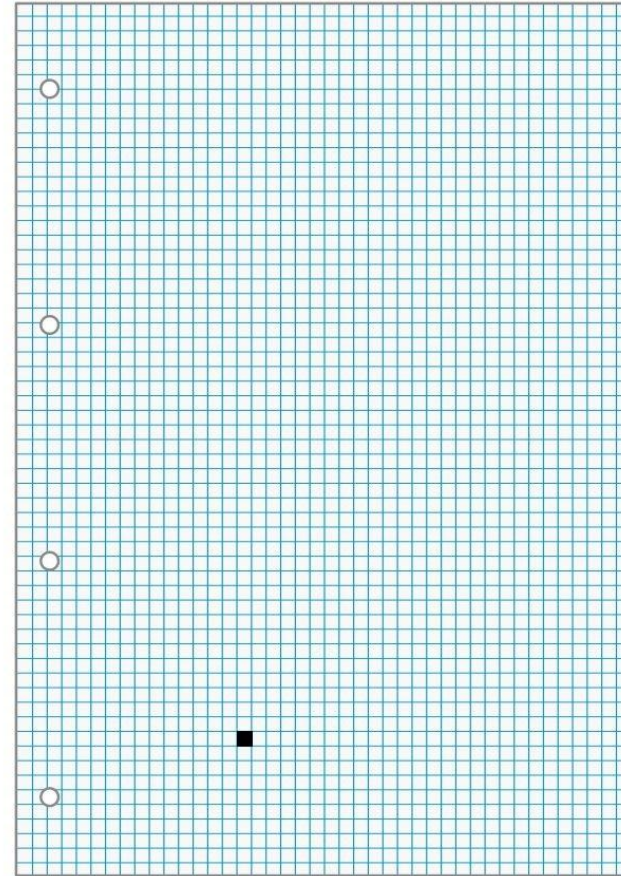
Kvantová štruktúra časopriestoru

- Štvorčekový papier



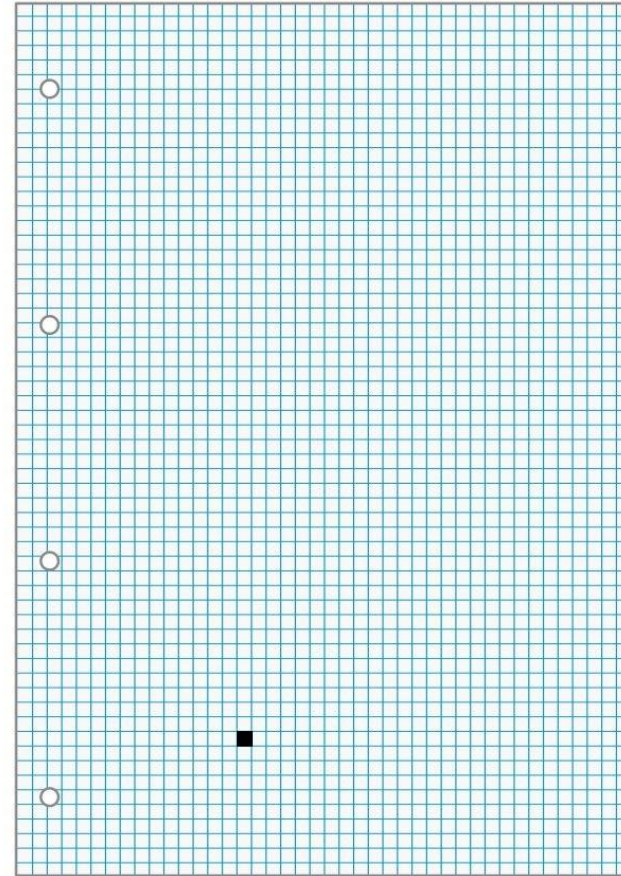
Kvantová štruktúra časopriestoru

- Štvorčekový papier



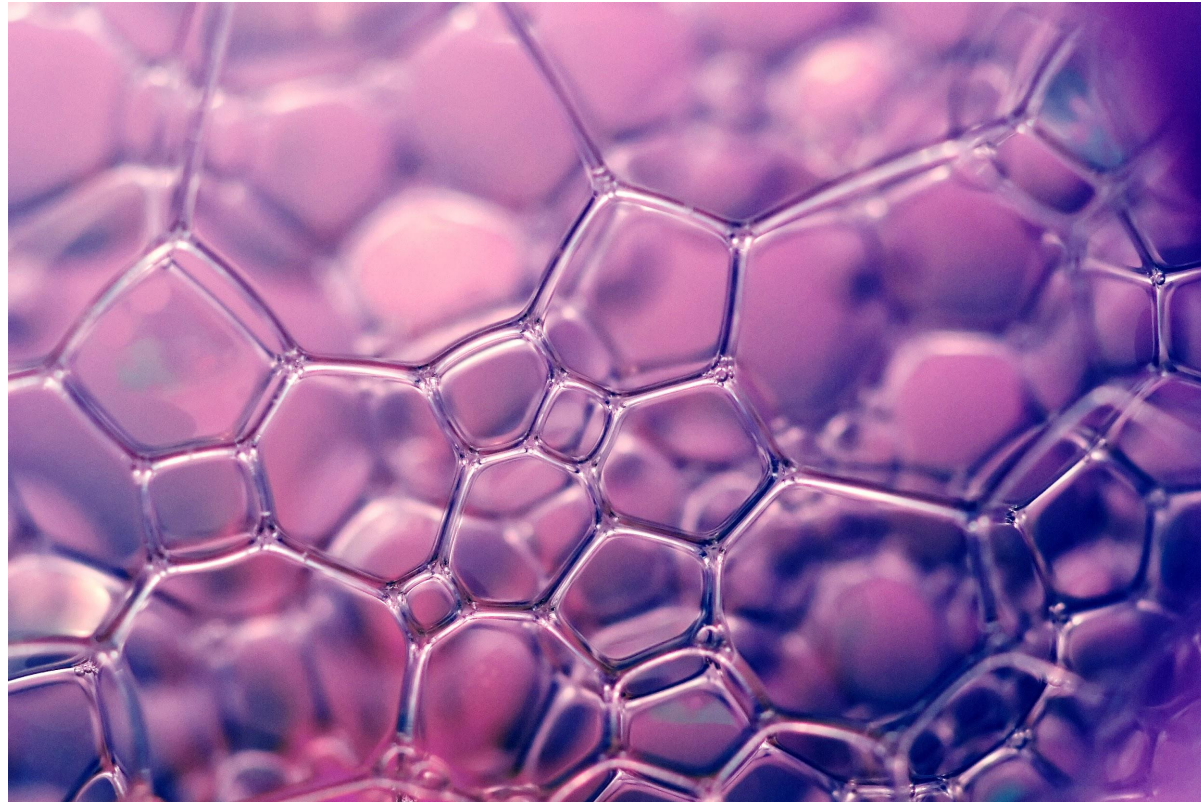
Kvantová štruktúra časopriestoru

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



Kvantová štruktúra časopriestoru

- Štvorčekový papier
- Bublincový 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
- Vynárajúci sa (emerging) priestor
 - Priestor v skutočnosti **neexistuje**.
 - Vlastnosti častíc ako poloha, rýchlosť, vzájomná vzdialenosť sú dôsledkom **interakcie s niečim iným**.
 - Jedna z možností je **teória strún**. To iné sú **D_0 -brány**.





**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.)

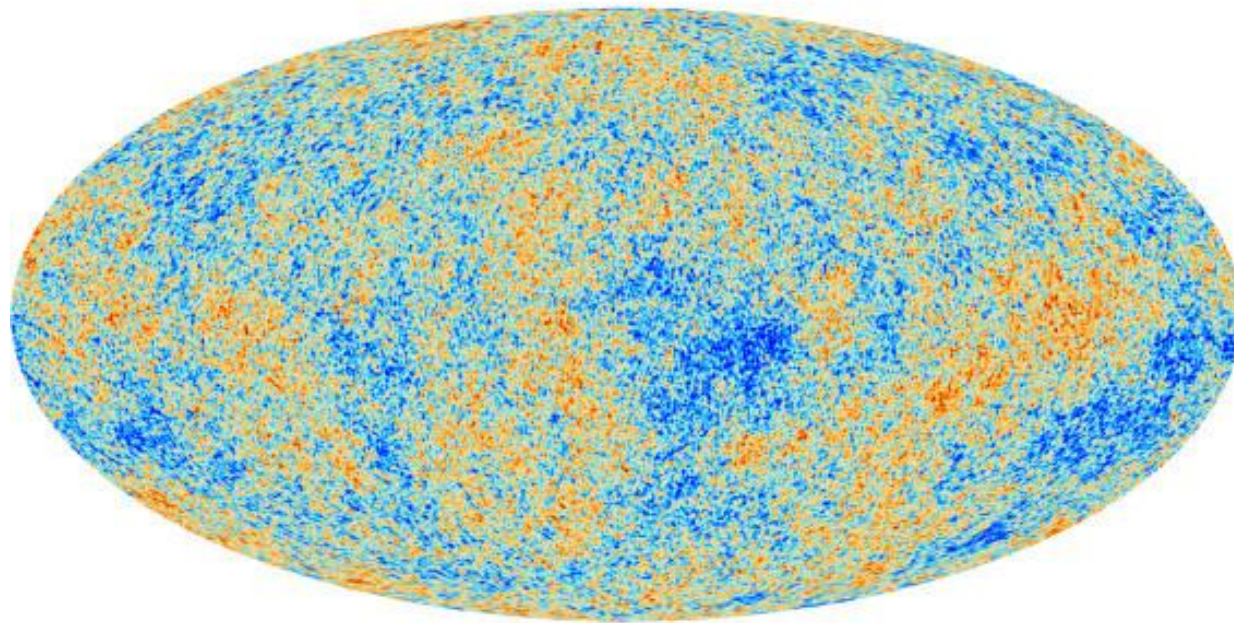


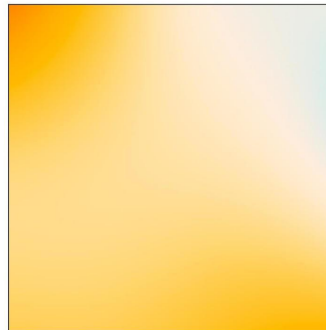
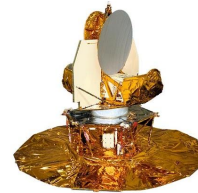
fig.: ESA



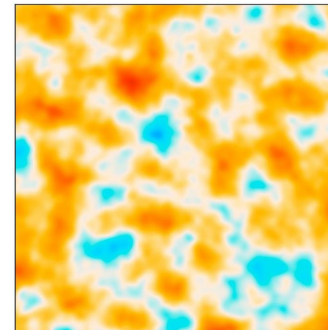
Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?



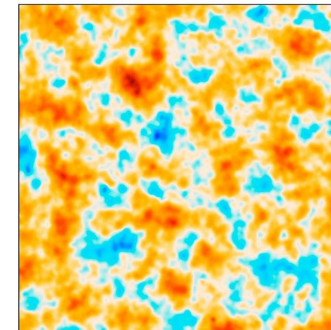
- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)



COBE



WMAP



Planck



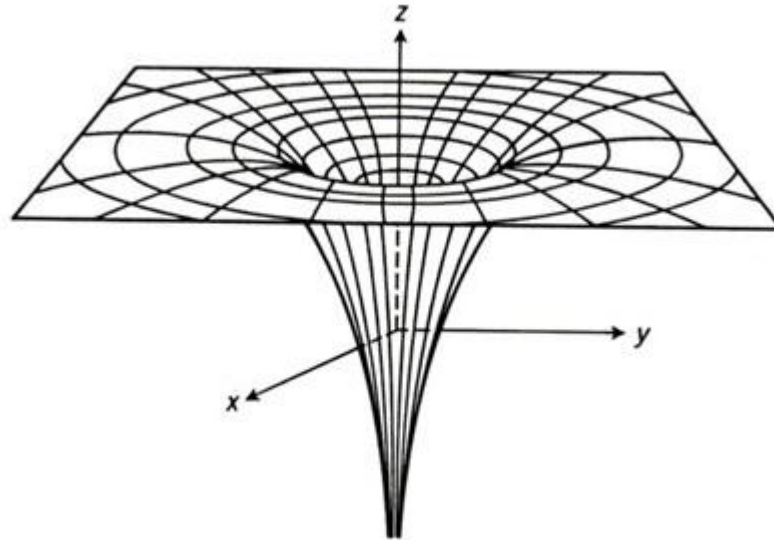
Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

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



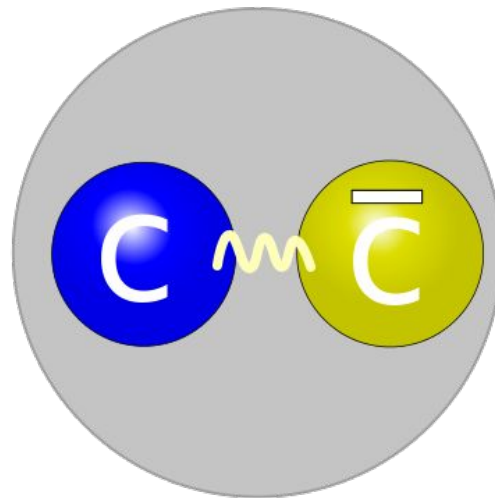
Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

- 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?



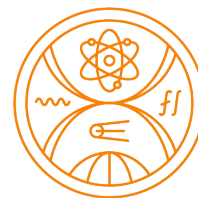
- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)
- Štruktúra priestoru môže mať merateľné dôsledky na oveľa väčšej škále ako L_P .
- Matematická konzistentnosť fundamentálnej teórie môže mať dôsledky na oveľa väčšej škále ako L_P .





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!**

