



FAKULTA MATEMATIKY,  
FYZIKY A INFORMATIKY  
Univerzita Komenského  
v Bratislave

# Kvantová štruktúra časopriestoru

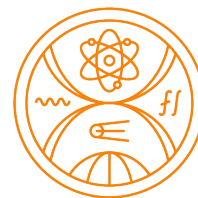
**Juraj Tekel**

Katedra teoretickej fyziky

27. 3. 2023, Smery fyzikálneho výskumu, FMFI UK, Bratislava





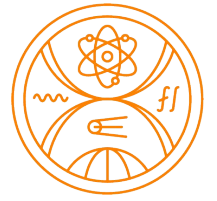


Podte robiť bakalárku, a potom  
možno aj výskum, na  
katedru teoretickej fyziky.





**Yeah, if you could just,  
come to the dark side,  
that'd be great.**





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

Priestor sa z niečoho skladá.



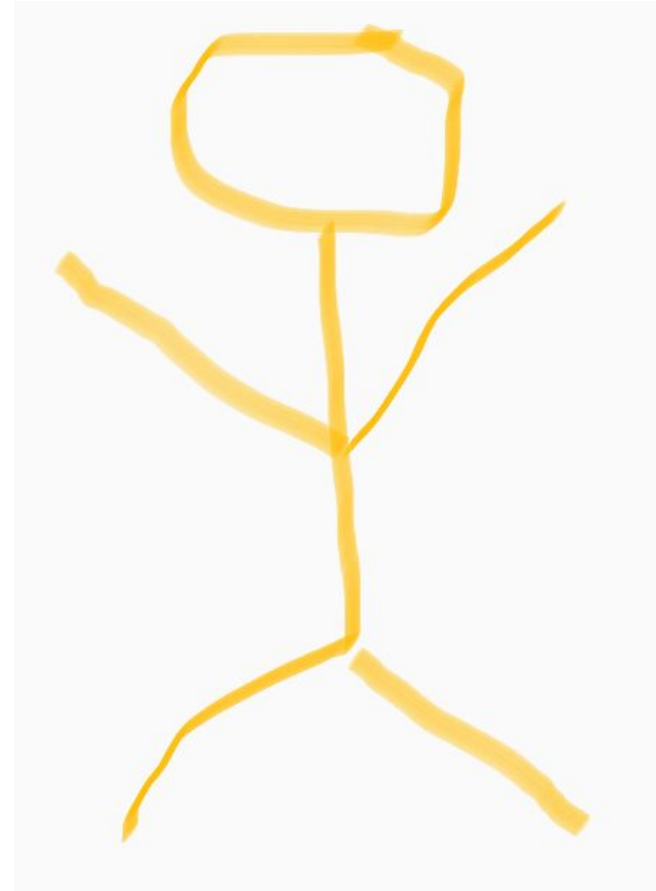


Čo to znamená  
skladať sa z  
niečoho?



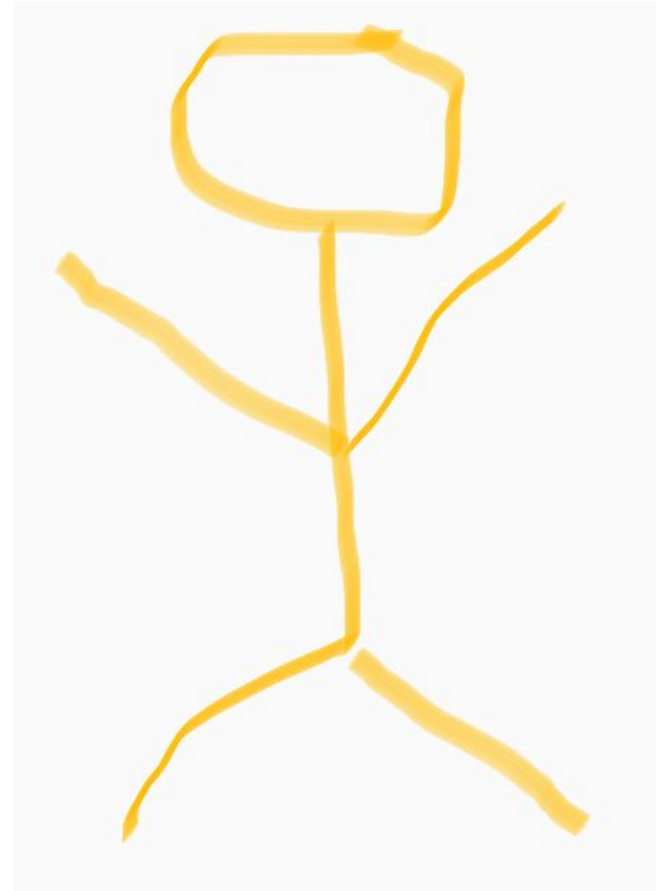
# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

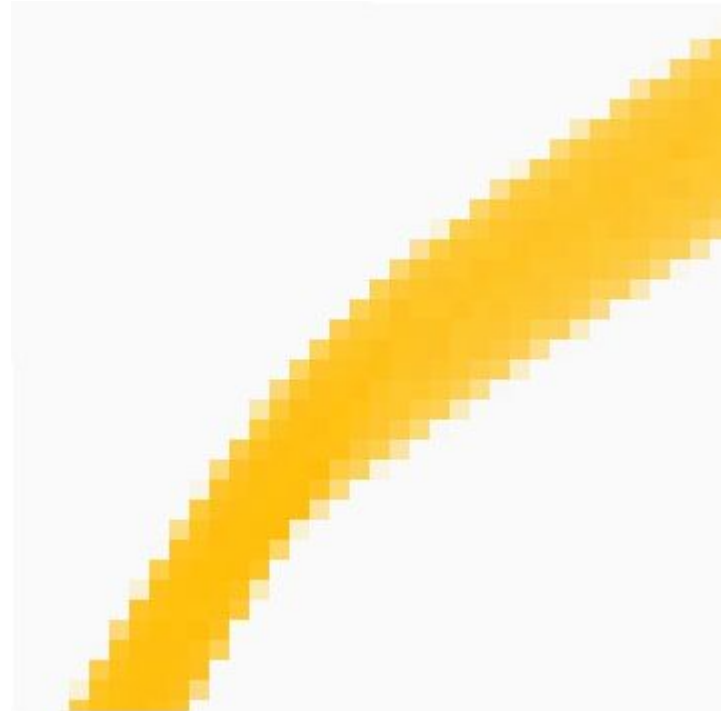
- **Človek** sa skladá z hlavy, krku, trupu, rúk a nôh.
- **Obrázok** sa skladá z pixelov.





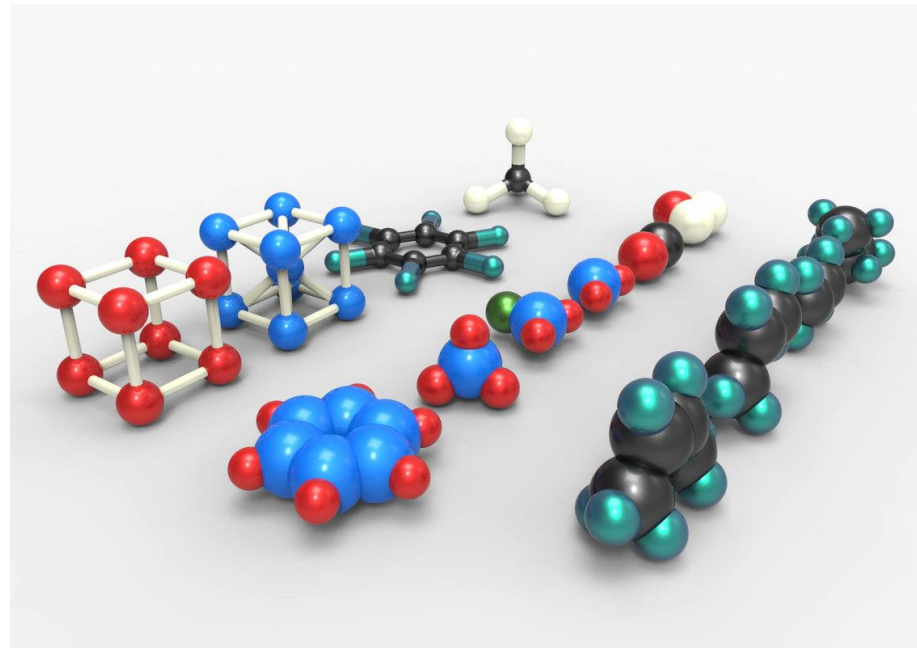
# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



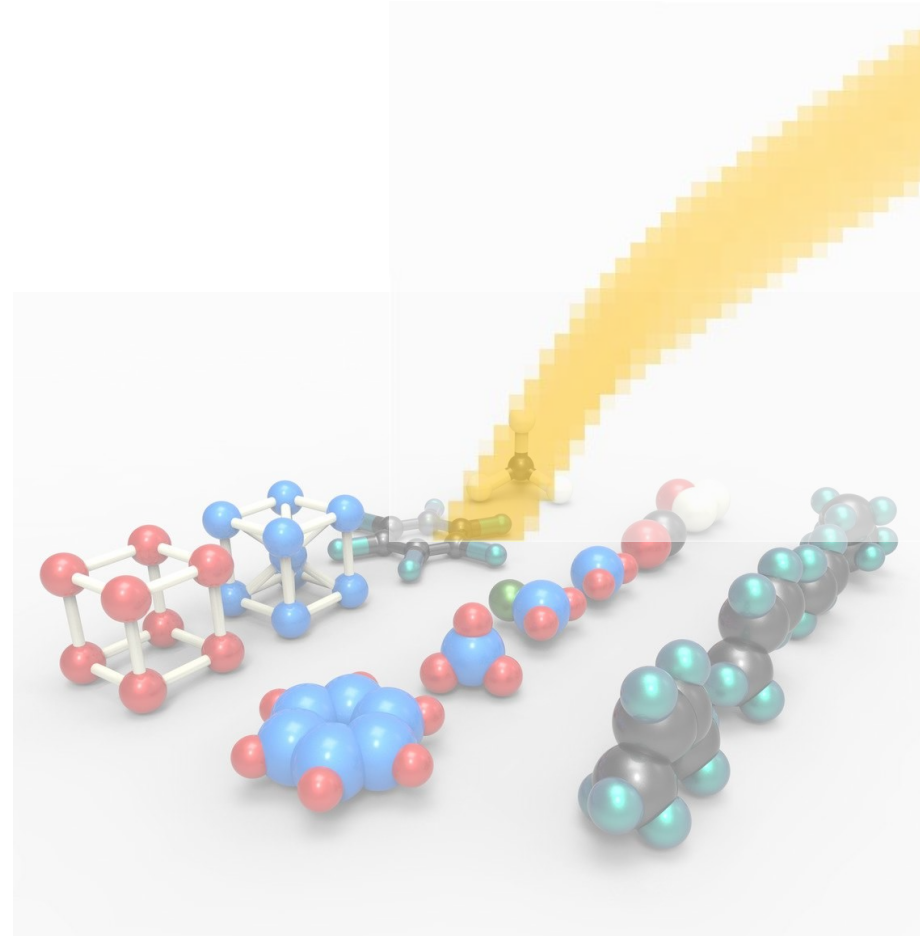
# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



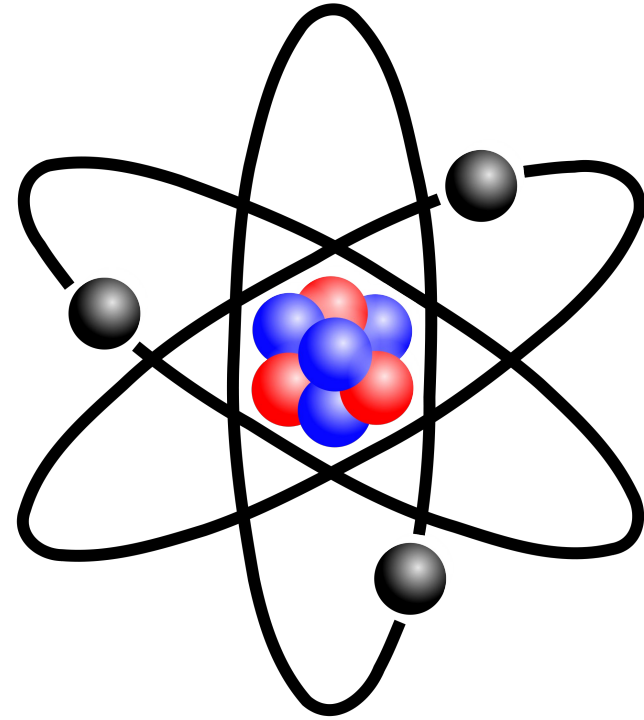
# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **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.



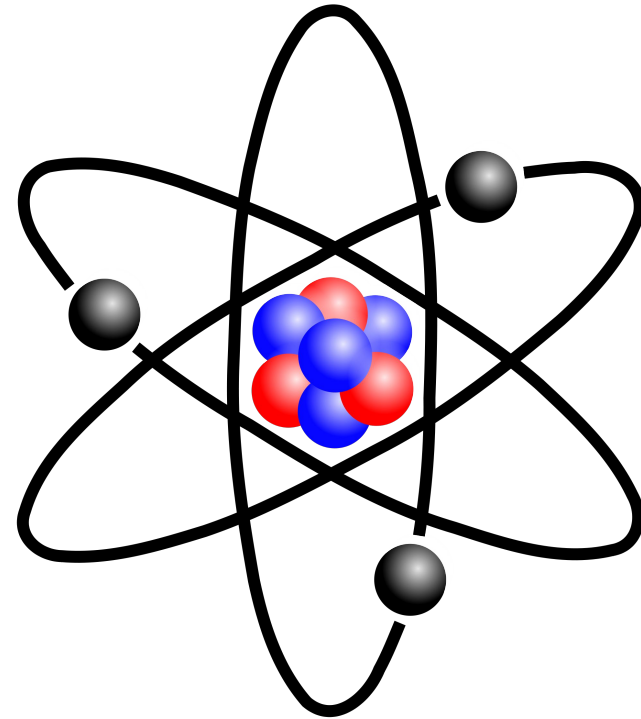
# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

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



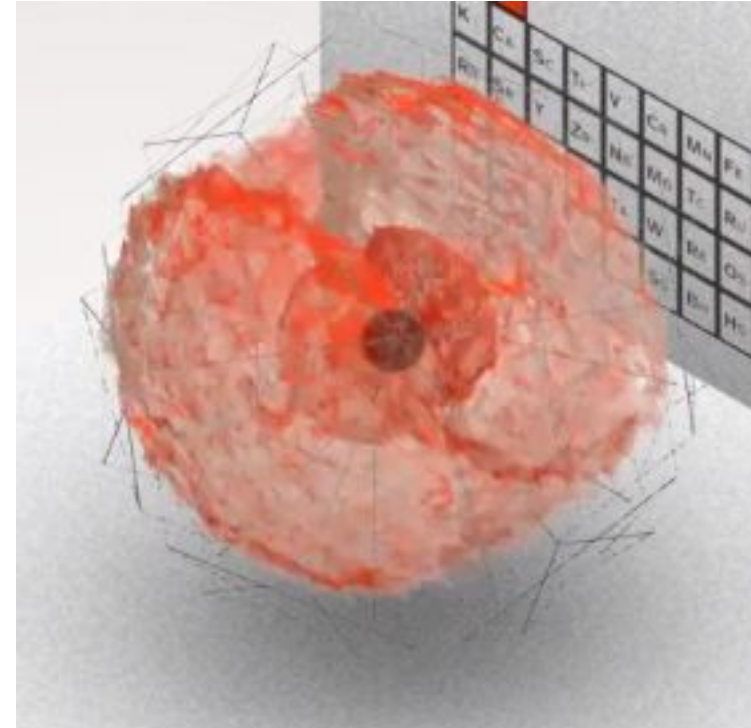
# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **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?





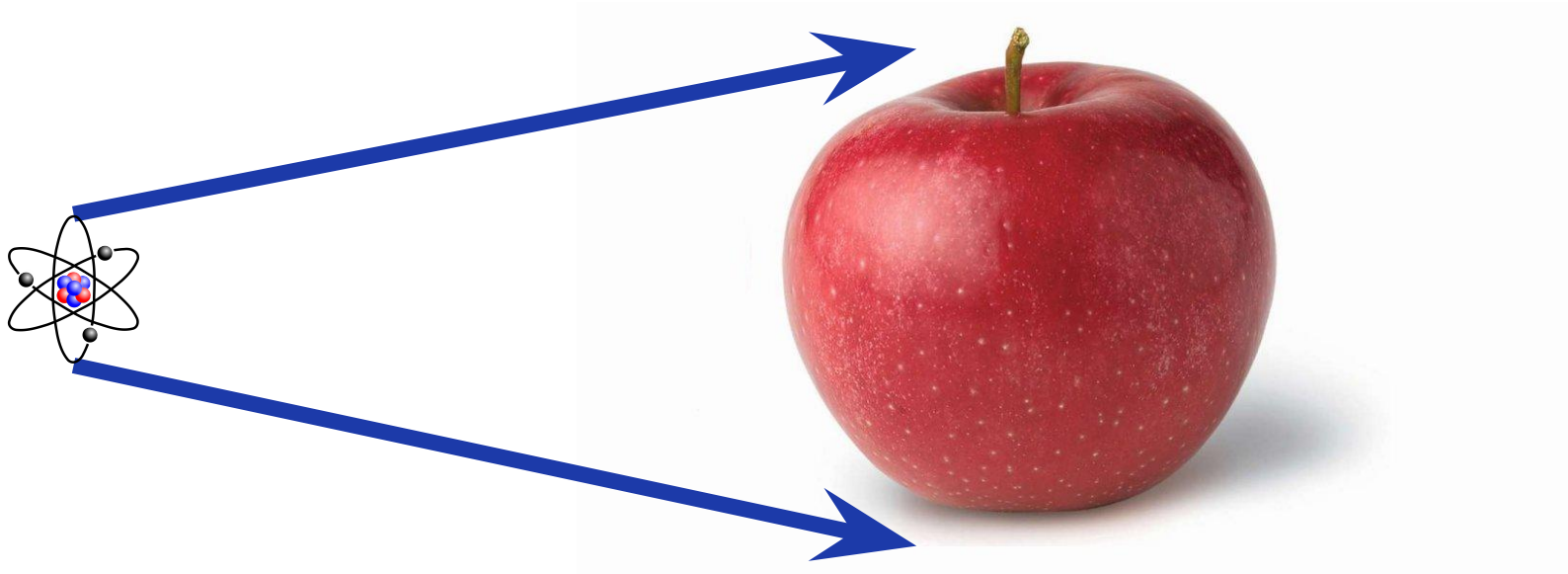
# Aké veľké sú atómy?

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



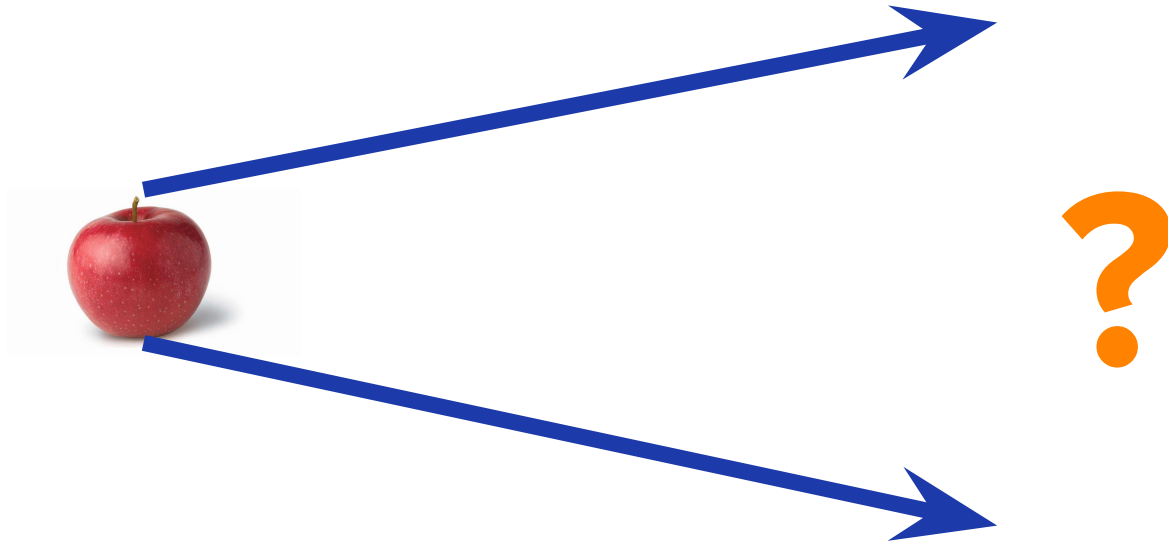
# Aké veľké sú atómy?

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



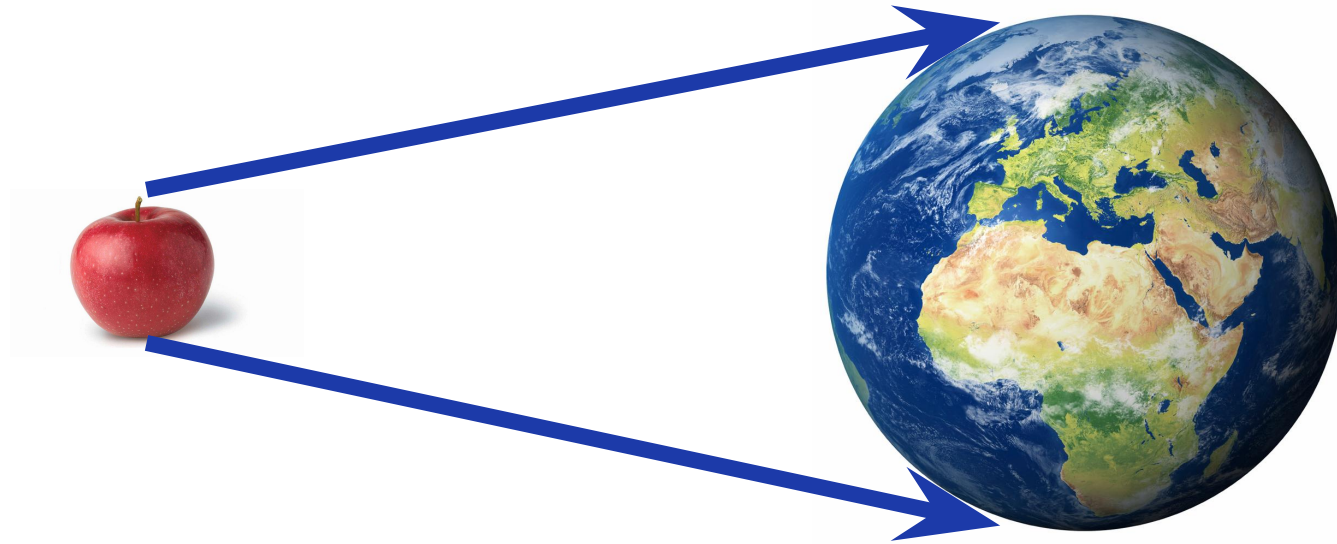
# Aké veľké sú atómy?

- **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.



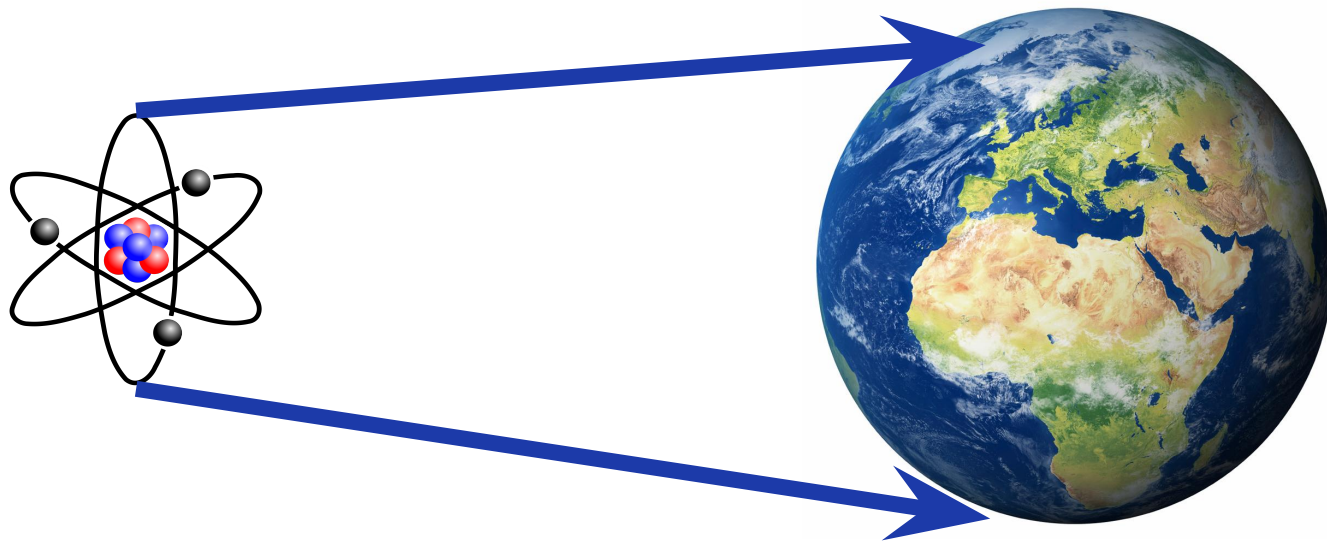
# Aké veľké sú atómy?

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



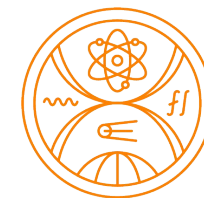
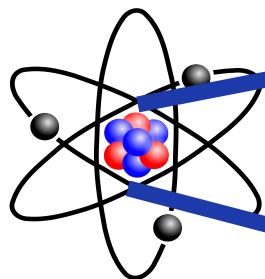
# Aké veľké sú atómy?

- **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. **Pre nás.**
- **Jadro** atómu asi  $10^{-15}$  m.

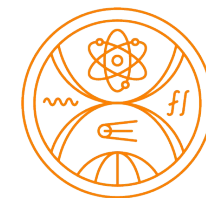


# Aké veľké sú atómy?

- **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<sup>3</sup>



# 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<sup>3</sup>
- Toto sú prirodzené jednotky prírody. Pri procesoch na tejto úrovni hrajú úlohu všetky tri fundamentálne teórie.
- Z ich pohľadu je **človek veľký**  $10^{35} L_p$ .







Prirodzené jednotky prírody sú na  
míle vzdialené nášmu svetu.





Prirodzené jednotky prírody sú na  
míle vzdialené nášmu svetu.

Fundamentálna fyzika je na míle  
vzdialené nášmu svetu.



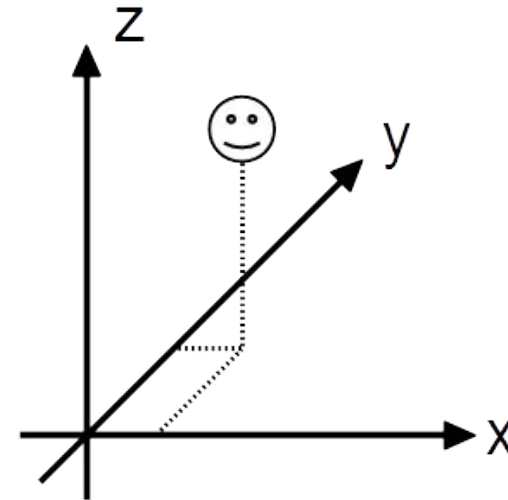


Čo to znamená  
skladať sa z  
niečoho?



# Čo to znamená skladať sa z niečoho?

- **Priestor** priestor je javisko, na ktorom sa deje fyzika.
- Ako sa môže z niečoho skladať?



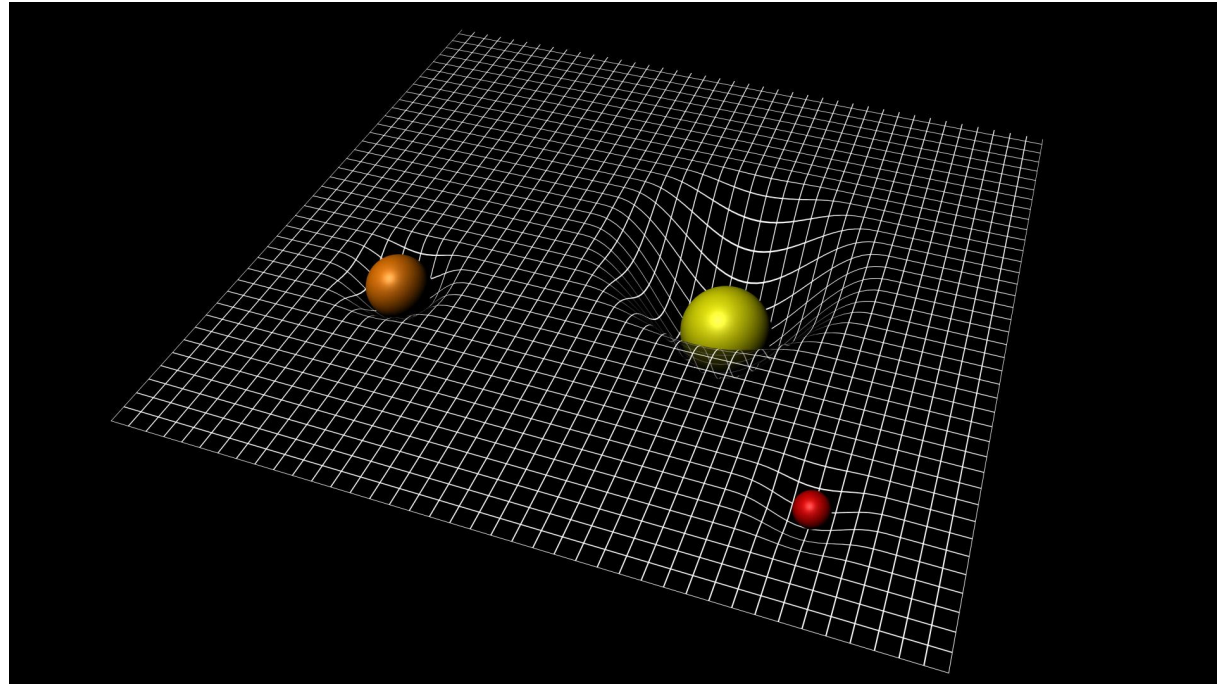


# Einstein - priestor je dynamický



# Einstein - priestor je dynamický

- Hmota zakrivuje priestor.
- Zakrivenie priestoru je gravitácia.



# Einstein - priestor je dynamický



- Hmota zakrivuje priestor.
- Zakrivenie priestoru je gravitácia.

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



# Einstein - priestor je dynamický



- Hmota zakrivuje priestor.
- Zakrivenie priestoru je gravitácia.

hmota

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





# Einstein - priestor je dynamický

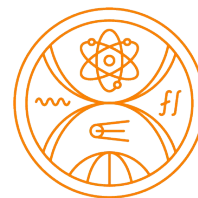


- Hmota zakrivuje priestor.
- Zakrivenie priestoru je gravitácia.

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

priestor





Priestor je oveľa viac ako pasívnym javiskom pre všetko ostatné.



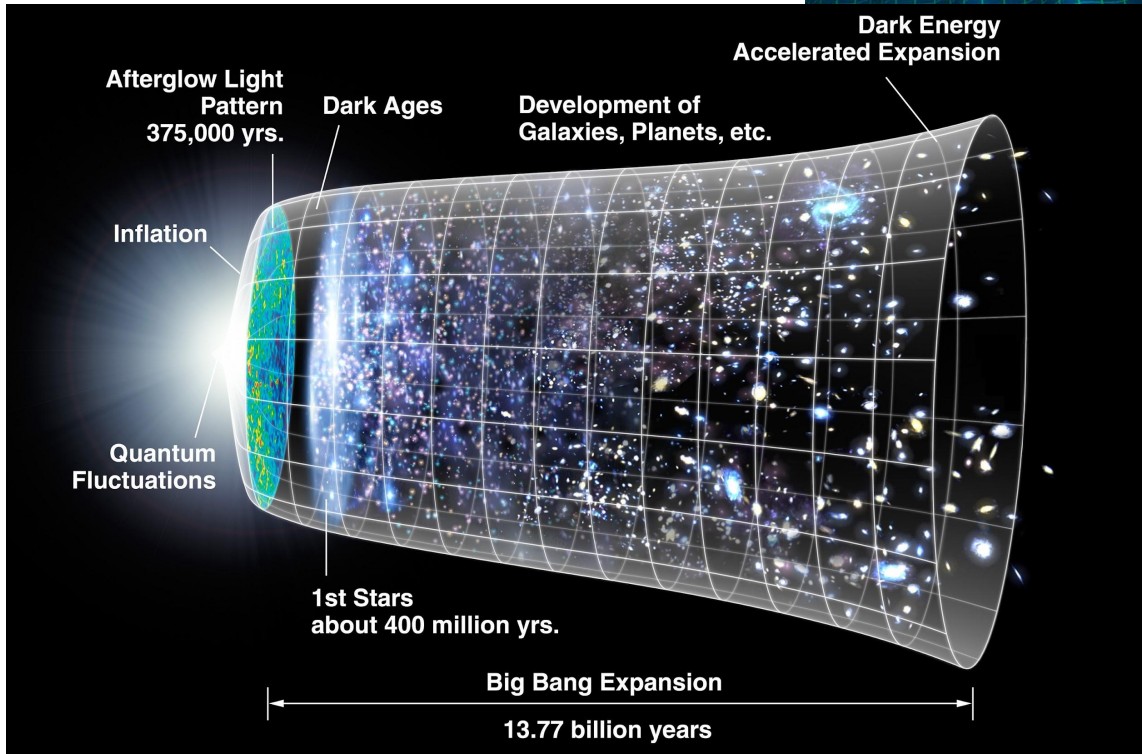
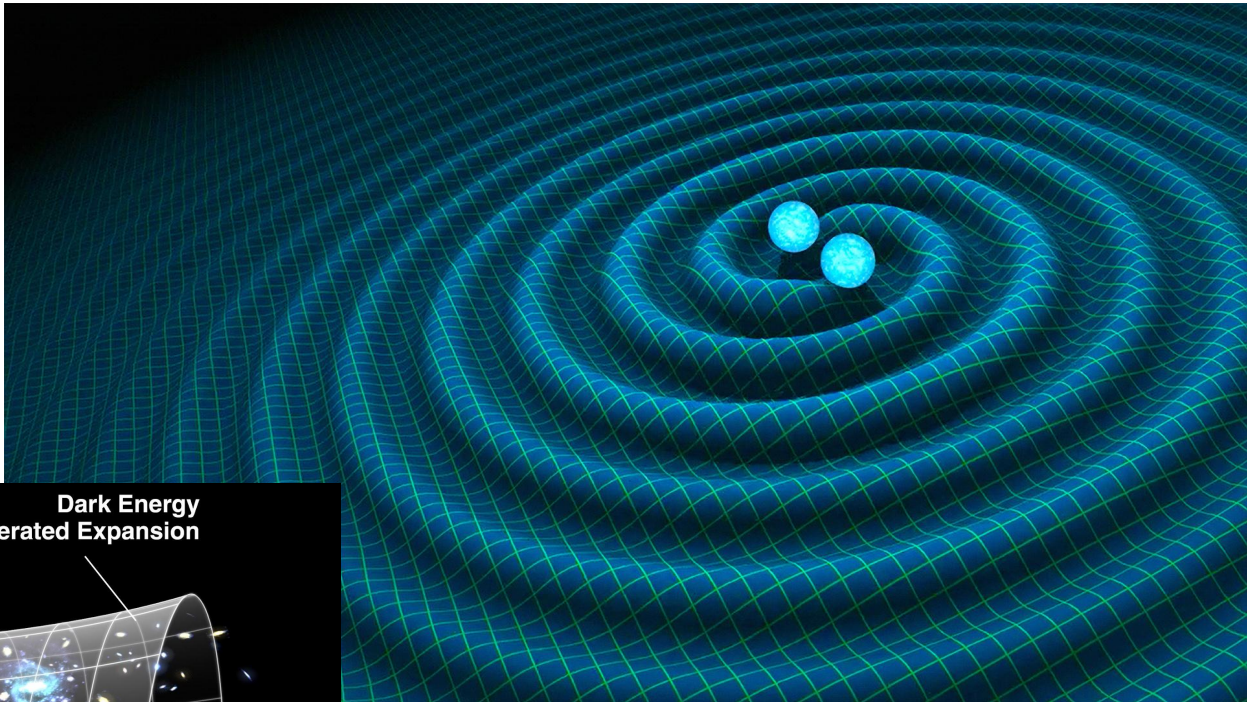


fig.: NASA, wiki

# Kvantová gravitácia



# Kvantová gravitácia



- **Hmota** je popísaná kvantovou teóriou.
- **Priestor** je popísaný klasickou teóriou.

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

hmota

priestor



# Kvantová gravitácia

- **Hmota** je popísaná kvantovou teóriou.
- **Priestor** je popísaný klasickou teóriou.





Naivné spojenie klasickej a  
kvantovej teórie vedie na čosi divné.





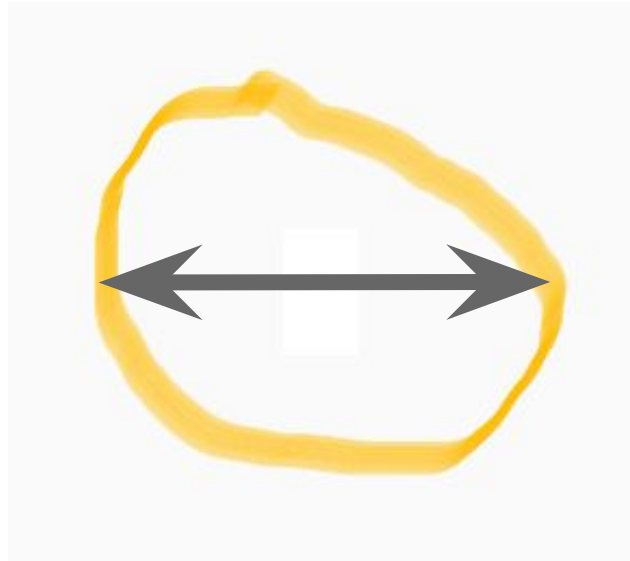
# Malé častice a čierne diery





# Kvantová gravitácia

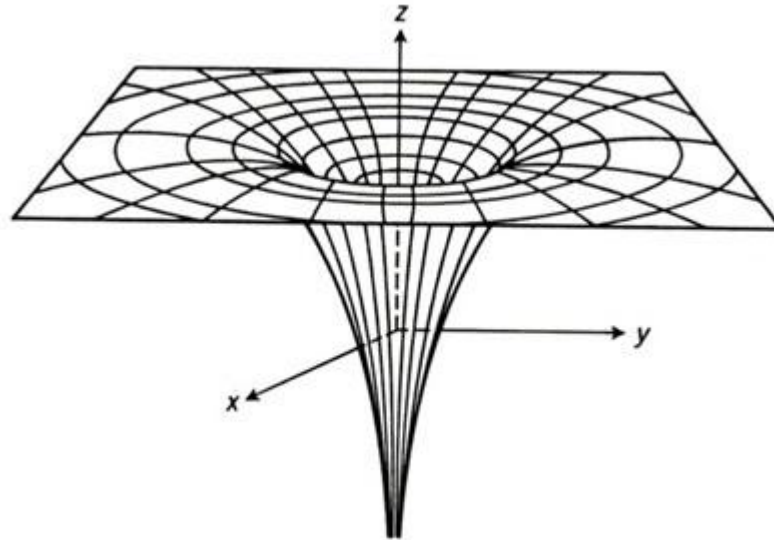
- $\hbar$  - čím menšia častica, tým väčšia energia



# Kvantová gravitácia



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

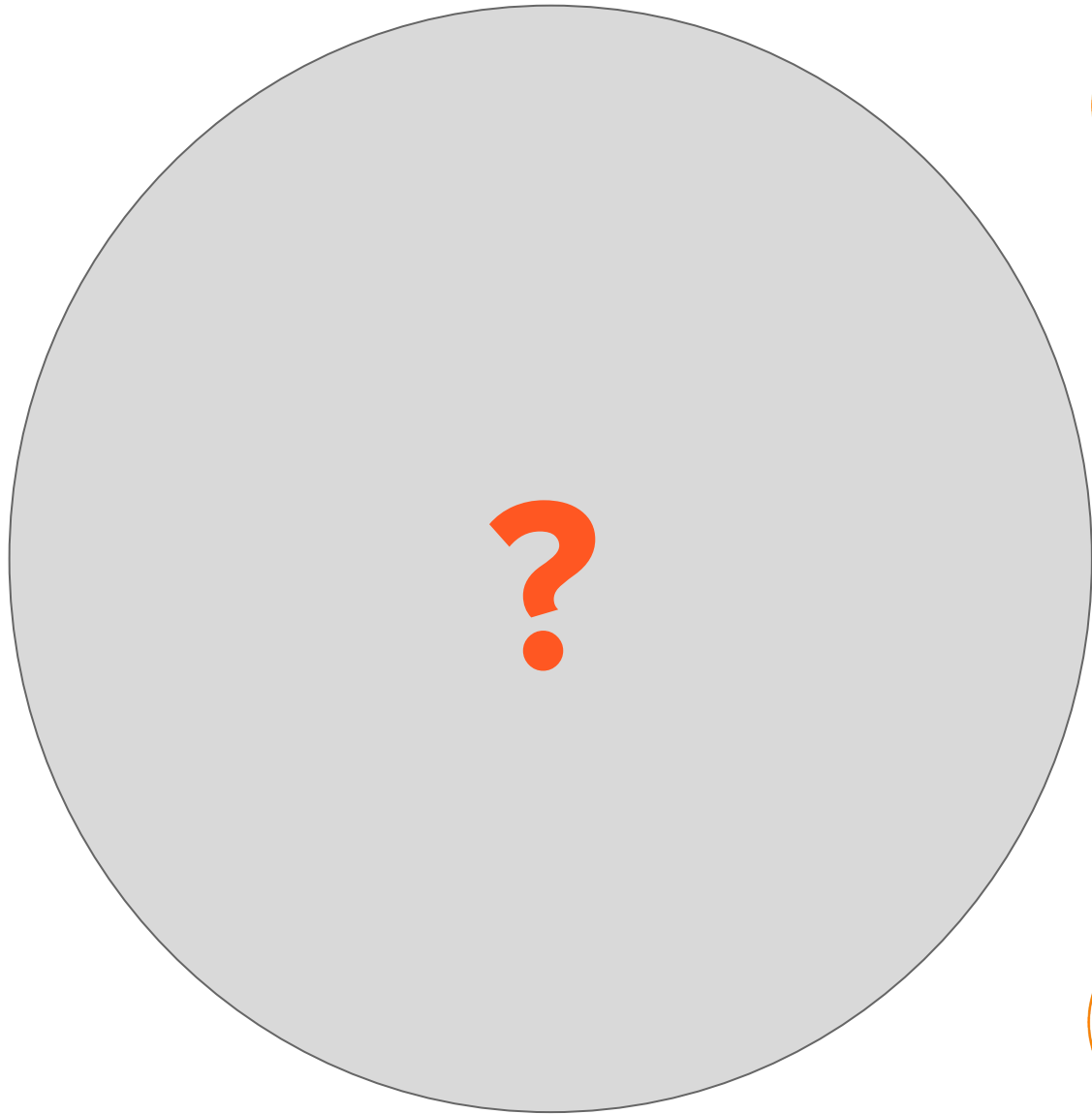


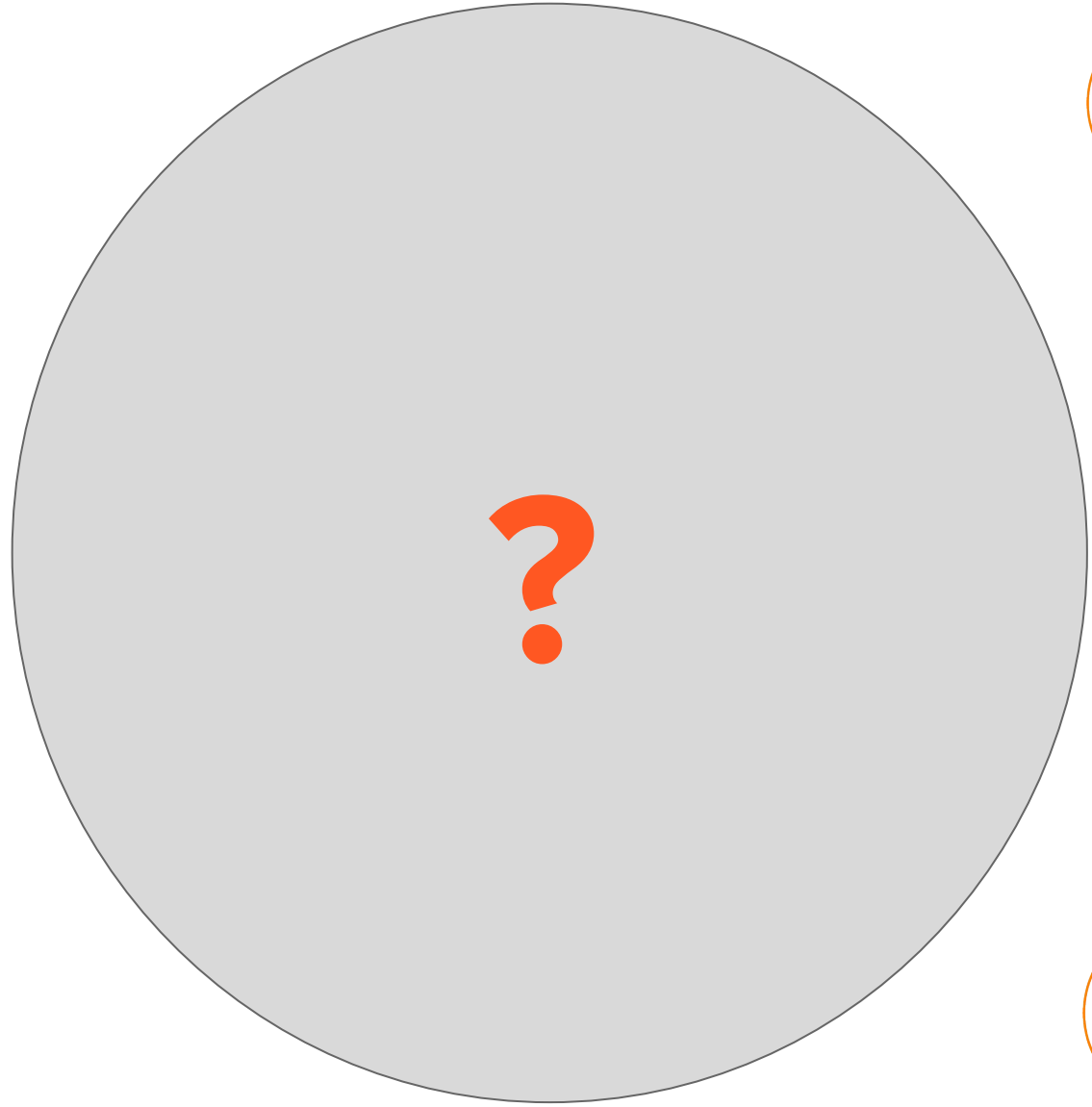
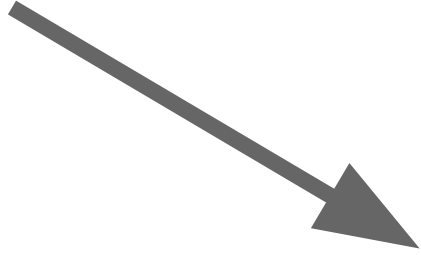
# Kvantová gravitácia

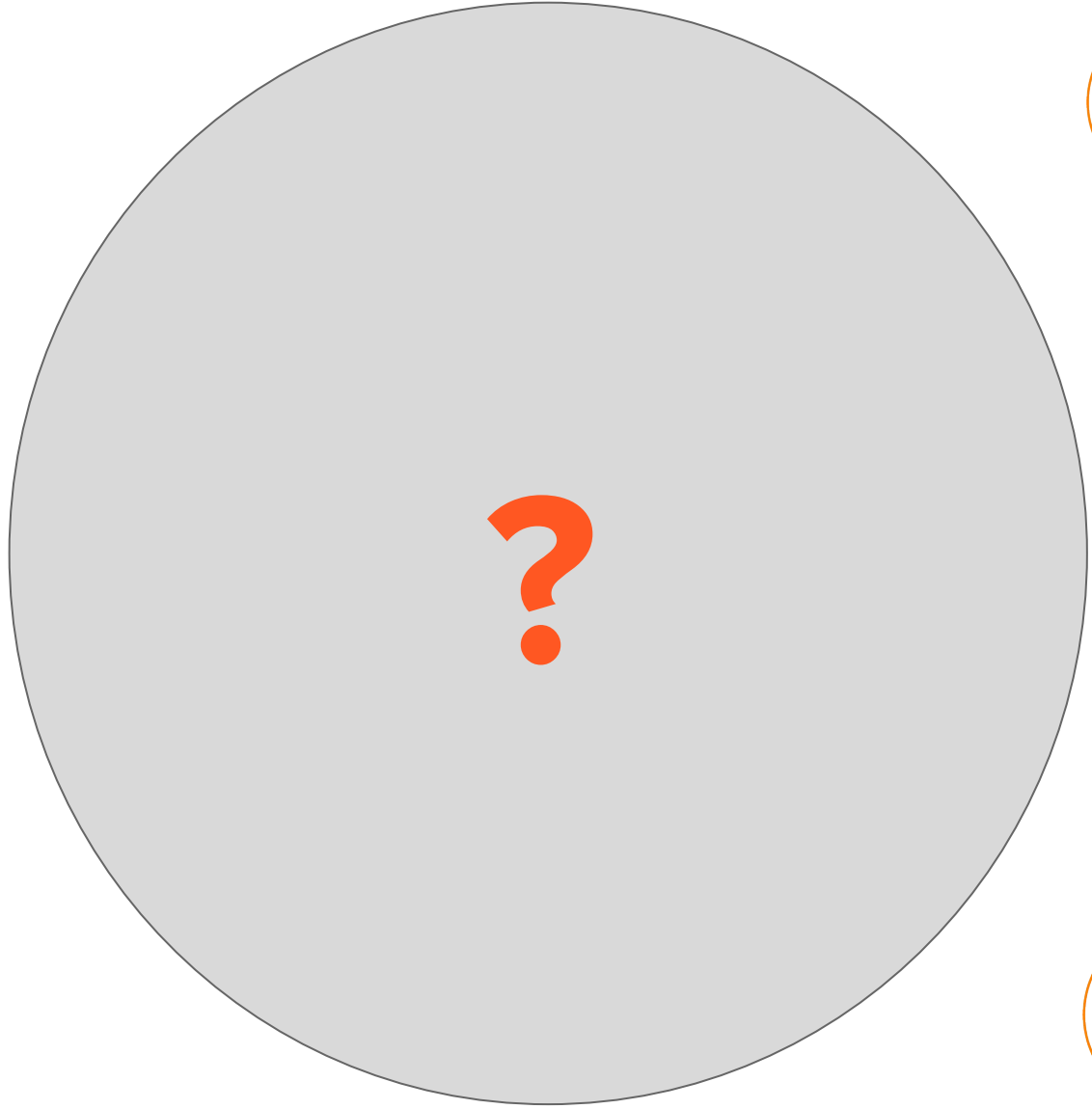
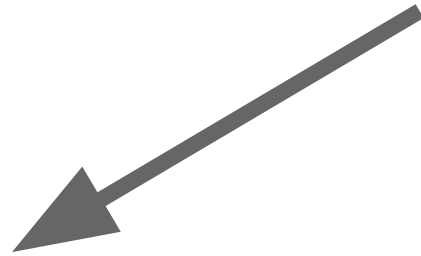
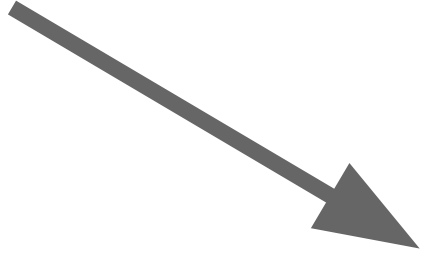


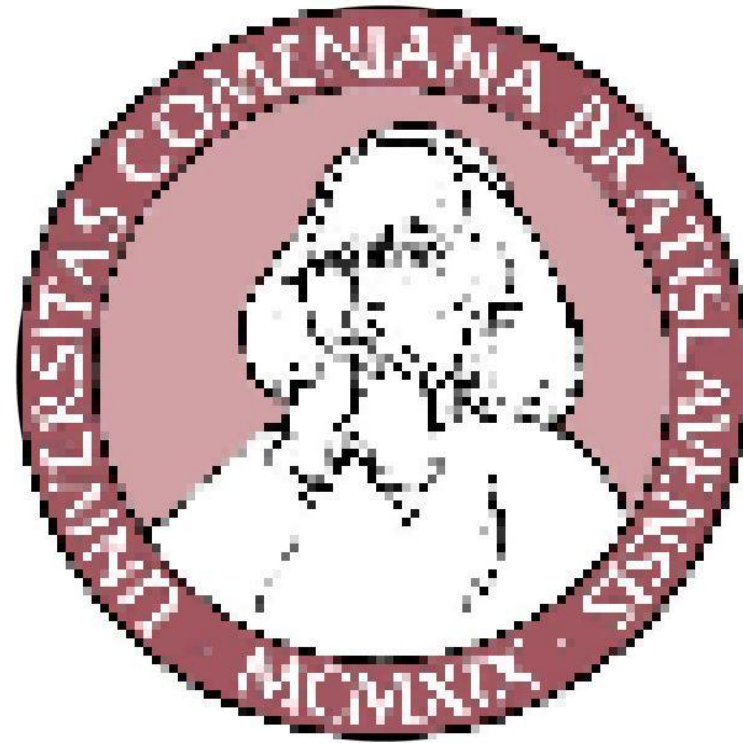
- $\hbar$  - čím menšia častica, tým väčšia energia
- $G$  - priveľa energie na jednom mieste vytvorí čiernu dieru
- $\hbar+G$  - veľmi lokalizované častice okolo seba tvoria čierne diery

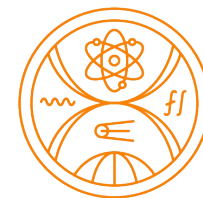
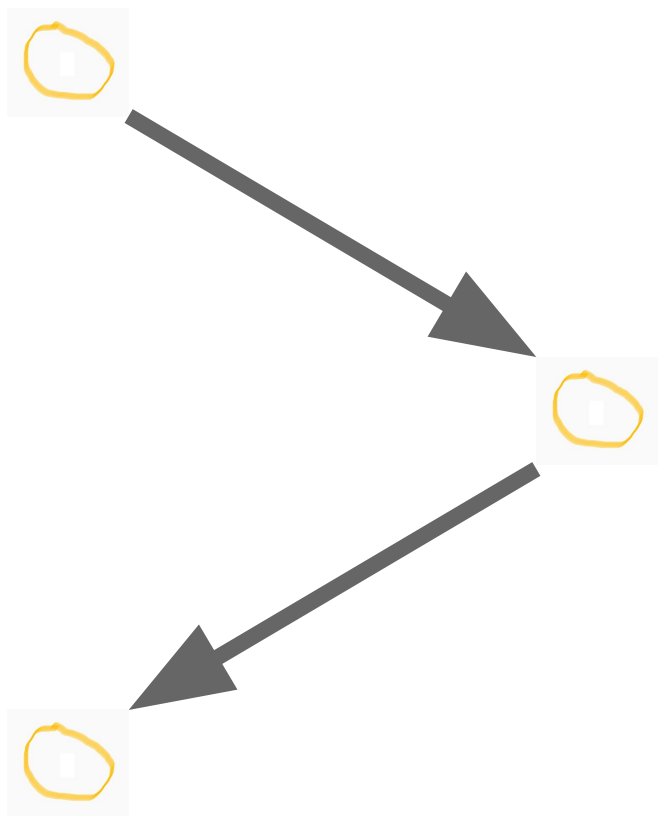




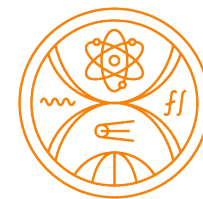




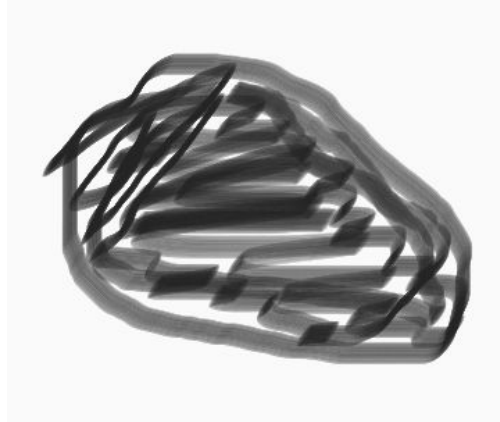




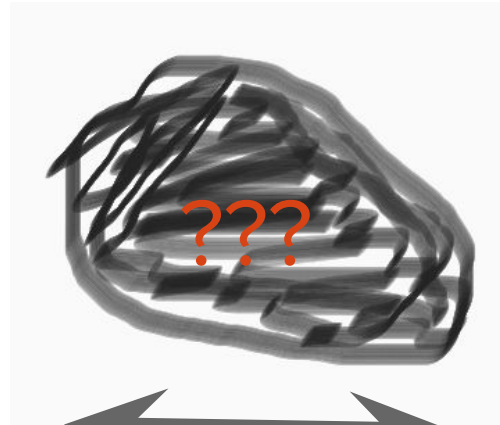












$L_p$



# 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)

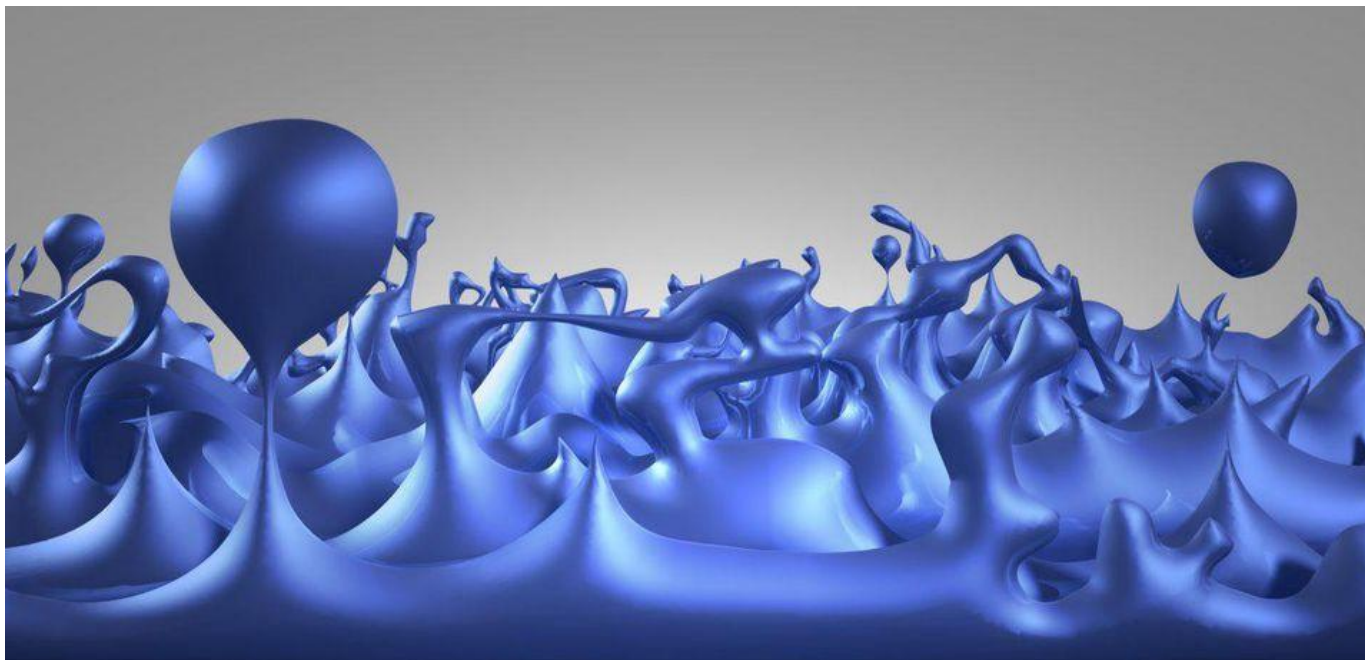


fig.: NASA/CXC/M.WEISS



# 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.



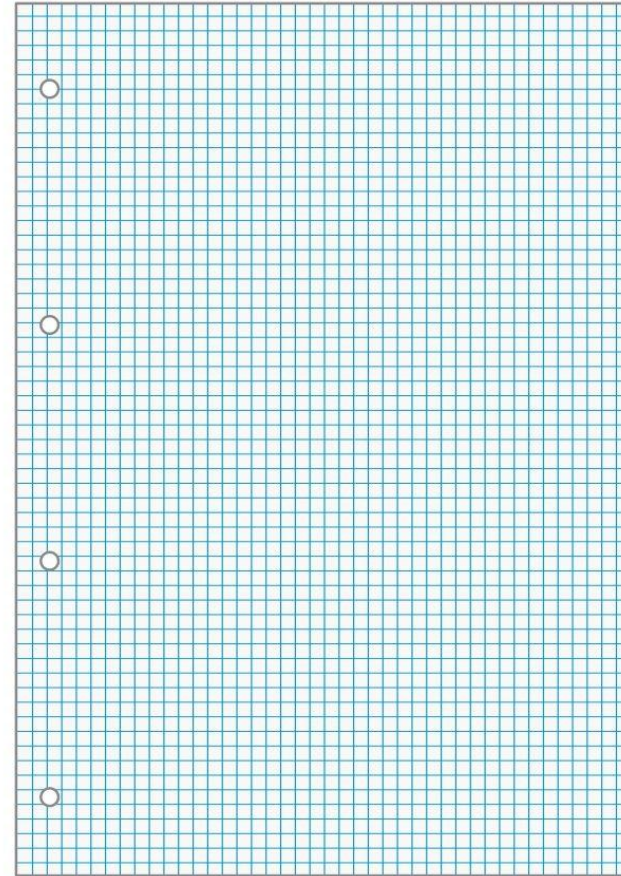


# Kvantová štruktúra časopriestoru



# Čo to znamená skladať sa z niečoho? - Priestor

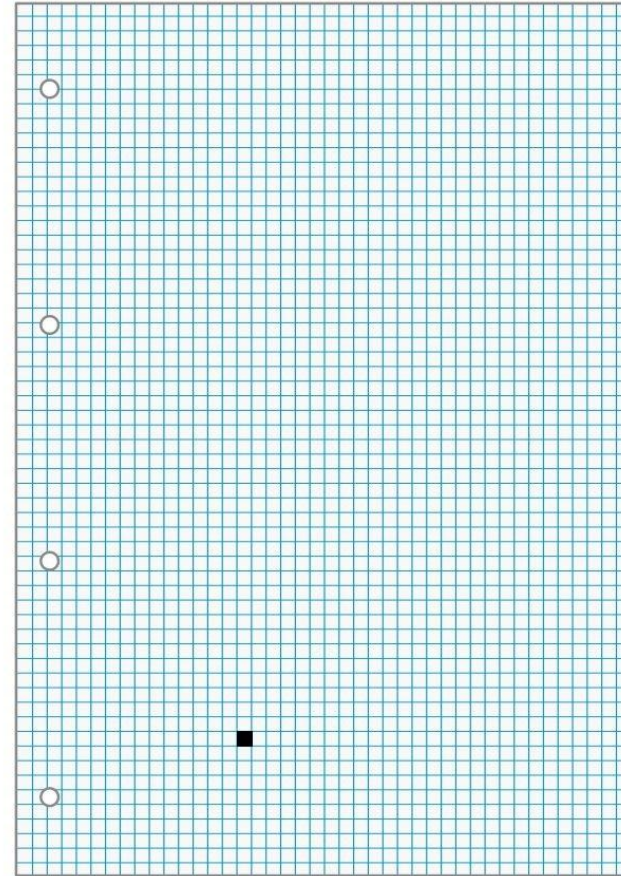
- Štvorčekový papier





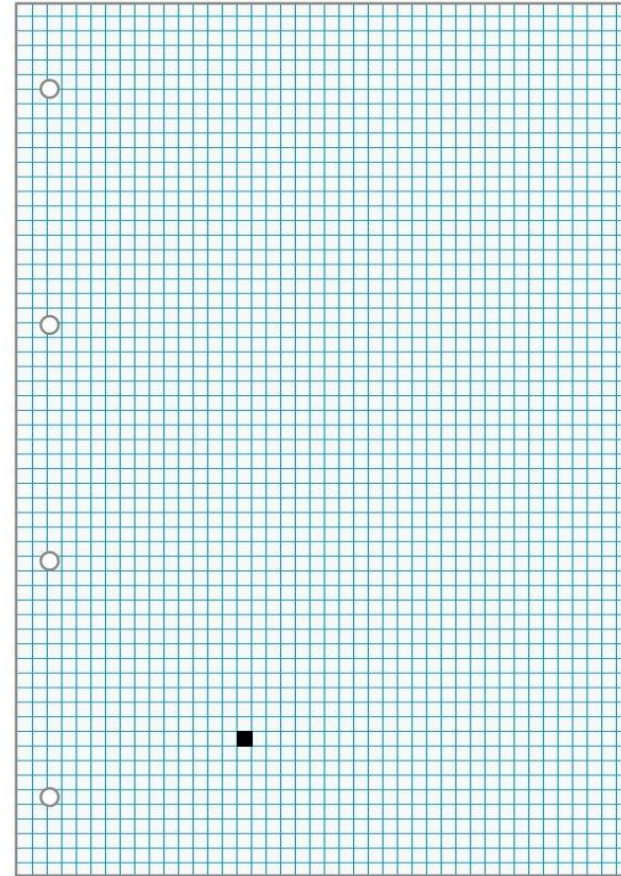
# Čo to znamená skladať sa z niečoho? - Priestor

- Štvorčekový papier



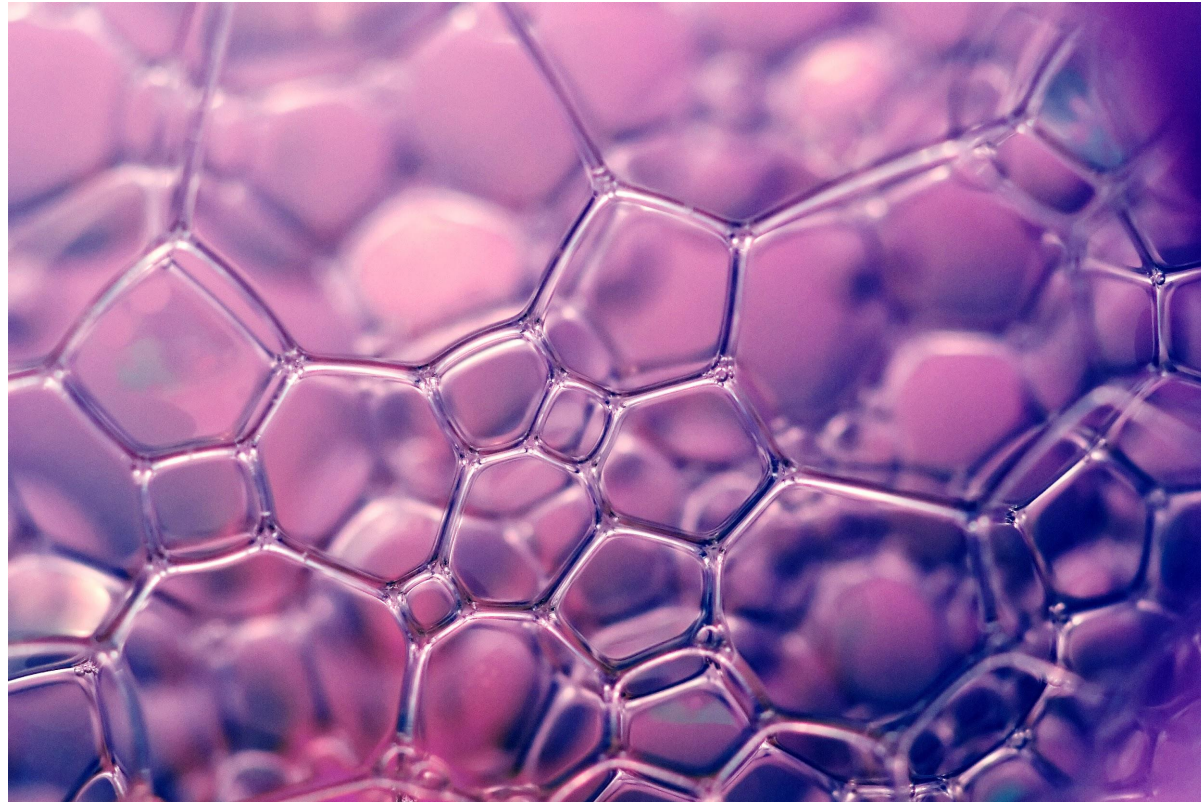
# Čo to znamená skladať sa z niečoho? - Priestor

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



# Čo to znamená skladať sa z niečoho? - Priestor

- Štvorčekový papier
- Bublincový priestor



# Čo to znamená skladať sa z niečoho? - Priestor

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



# Čo to znamená skladať sa z niečoho? - Priestor



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

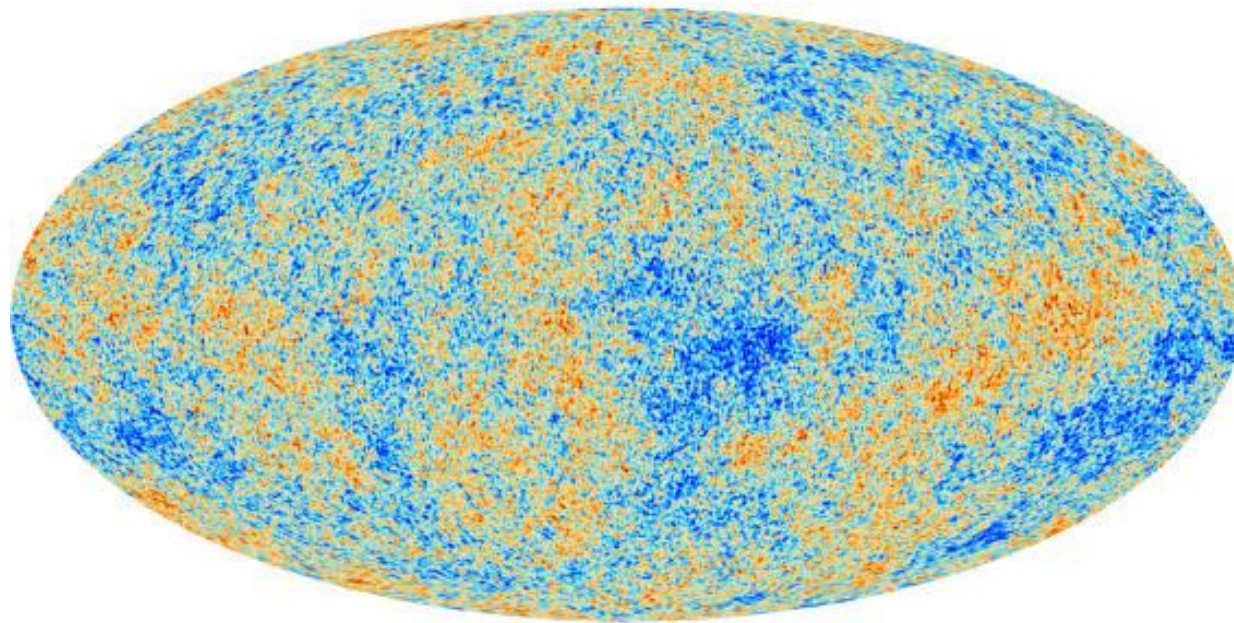


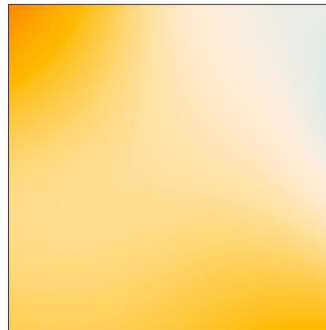
fig.: ESA



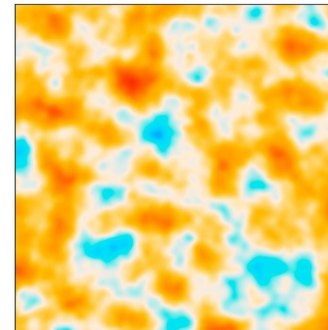
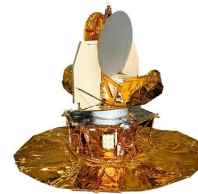


# Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

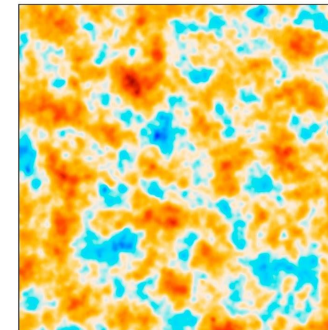
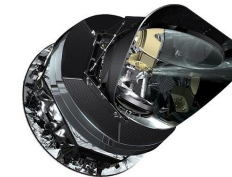
- Priamo **nie**. (V horizonte 100 rokov.)
- Nepriamo **áno**. (Dôsledky.)



COBE



WMAP



Planck



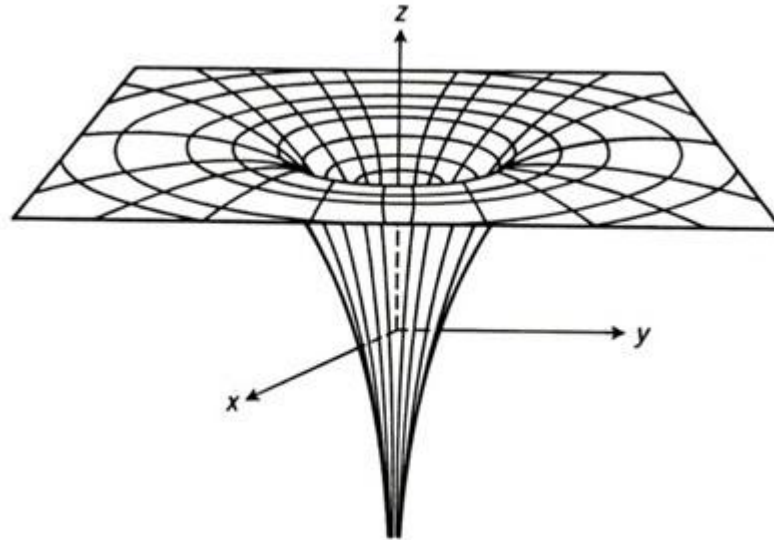
# Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

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



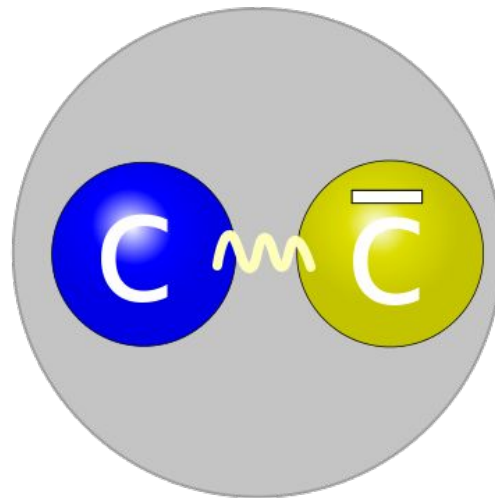
# Dá sa štruktúra priestoru uvidieť?

- 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  $L_P$ .
- 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.





Podte robiť bakalárku, a potom  
možno aj výskum, na  
katedru teoretickej fyziky.

Samo Kováčik, ja, niektorý z našich  
študentov.





**Ďakujem za  
pozornosť!**

