

Úloha VI.P ... kompenzace vesmírné expanze

9 bodů; (chybí statistiky)

Podle současných pozorování a vesmírných modelů se zdá, že vesmír se rozpína a rychlost rozpínání se zvyšuje. Co kdyby to tak nebylo? Co kdyby byl vesmír stále stejně velký, ale měnily by se fyzikální zákony/konstanty? Jak by se musely konstanty měnit, aby se nám zdálo, že se vesmír rozpína, jak ukazují pozorování? Popište co nejvíce zákonů, které by se musely měnit.

Karel je zvědavý, jestli dokážete kompenzovat zvětšující se vesmír.

Na začiatku je potrebné uvedomiť si, ako dokážeme zo Zeme odmerať, že vesmír sa rozpína. Rozpínanie vesmíru objavil v roku 1930 americký astronóm Edwin Hubble. Hubble meral Dopplerov jav v spektrách vzdialených galaxií, aby určil ich rýchlosť voči nám. Ak vezmeme do úvahy predpoklad, že galaxie rovnomerne vyplňajú statický vesmír, malo by platiť, že pri dostatočne veľkom počte meraní bude počet približujúcich sa galaxií a počet vzdalujúcich sa galaxií približne rovnaký. Hubble ale nameral niečo úplne iné. Galaxie, ktoré sa od nás vzdalovali tvorili výraznú väčšinu v ním skúmanej vzorke. Tento fakt mu vnukol myšlienku, že galaxie sa od seba vzdalujú preto, lebo sa zvyšuje ich vzájomná vzdialenosť, oproti ktorej sú ich rozmery zanedbateľné, a teda, že vesmír sa rozpína. Hubble neskôr experimentálne ukázal, že rýchlosť vzdalovania nejakej galaxie vo vzdialenosti R je rovná

$$v = HR,$$

kde H je Hubblova konštanta, ktorá udáva rýchlosť rozpínania vesmíru a jej prevrátená hodnota je dobrým odhadom pre vek vesmíru. Z toho vidíme, že Hubblova konštanta nie je úplne konštantná, ale jej veľkosť sa mení s časom. Vidíme teda, že meranie rýchlosti rozpínania vesmíru je vlastne meranie hodnoty konštanty úmernosti medzi vzdialenosťou nejakej galaxie a rýchlosťou, akou sa vzdaluje. Do roku 1930 si ale všetci uvedomovali, že niektoré objekty sa od nás vzdalujú a niektoré zase nie, no nikto tomu neprikladal váhu. Nie je teda ničím novým, že vo vesmíre existujú mechanizmy, ktoré spôsobujú pohyb objektov nejakým smerom. Poďme teda vymyslieť nejaký mechanizmus, ktorý zapríčini, že sa budú od nás vzdialené galaxie vzdalovať, alebo aspoň, že my ich budeme pozorovať akoby sa vzdalovali. Ak by sme vymysleli nejakú silu, ktorá ťahá objekty smerom od nás tým silnejšie, čím sú ďalej, ale nijako inak ju nemôžeme pozorovať, malo by to hneď niekoľko problémov. Nedokázali by sme rozlíšiť tento stav od stavu, keď sa vesmír rozpína, takže táto teória je z tohto hľadiska ekvivalentná teórii expanzie. Čo je ale horšie, ak by sa rýchlosť vzdalovania objektov zväčšovala lineárne so vzdialenosťou od nás, znamenalo by to, že sme vo vesmíre na určitom privilegovanom mieste, čo ale nedáva vôbec žiadny zmysel. A nakoniec by toto vysvetlenie nebolo v súlade so zadaním úlohy, nakoľko chceme nielen aby sa vesmír nerozpínal tak, ako to vysvetľuje súčasná fyzika, ale aj aby bol statický. To teda znamená, že rýchlosť vzdalovania vzdialených galaxií, ktorú pozorujeme, je len zdanlivá, a ony sa v skutočnosti nehýbu. Ako je to ale možné? Ako vieme, rýchlosť vzdalovania meriame tak, že meriame červený posun spektrálnych čiar v spektre daného objektu. Predpokladajme teda, že červený posun nie je spôsobený tým, že sa od nás galaxie pohybujú preč obrovskou rýchlosťou, ale tým, že sa vlnová dĺžka svetla zmení po ceste z veľkej dĺžky. Alebo dokonca, že v čase, keď bolo vyžiarené svetlo z ďalekej galaxie, mala nejaká konkrétna spektrálna čiara inú vlnovú dĺžku ako má v našom čase. Potom keď my porovnávame vlnovú dĺžku pozorovanej čiary a vlnovú dĺžku tej istej čiary, ale vyžiarenej z pozemského alebo veľmi blízkeho zdroja v našom čase, tak vidíme, že majú rozličné hodnoty, a teda nameriame červený posun. Vlnová dĺžka svetla vo vákuu je úzko previazaná s jeho frekvenciou f vzťahom

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kde c je rychlost světla. Pri vytváraní nášho nového modelu, samozrejme chceme, aby sa zachovalo to najfundamentálnejšie. čo vo fyzike máme, a to je zákon zachovania energie. Ak teda fotón vyžiarime s energiou E , tak k nám dopadne tiež s energiou E , ak počas svojho letu nejakú časť energie nestratil. Energia fotónu je závislá od jeho frekvencie, vo vákuu to vieme ekvivalentne formulovať aj pomocou jeho vlnovej dĺžky či jeho relativistickej hmotnosti m . Potom platí

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} = mc^2.$$

Pre daný fotón sú všetky tieto veličiny konštantné. My však chceme, aby konštantné neboli, ale aby záviseli od času. Konkrétne, aby sa hodnota menila s narastajúcim vekom vesmíru. Ten je voči nami skúmaným časovým horizontom veľmi veľký, a teda by sa tieto veličiny javili ako konštanty, avšak pri časových škálach, na ktorých pozorujeme "rozpínanie vesmíru", by sa už tento efekt prejavil. Naším cieľom bude teraz určiť, ako sa musia meniť tieto veličiny/konštanty aby to zodpovedalo nami pozorovanému červenému posunu. Najprv sa teda zamyslíme, ktoré veličiny sa môžu meniť. Ak má platiť zákon zachovania energie, tak pre jeden konkrétny fotón musí platiť

$$mc^2 = \text{konst.}$$

Z toho vidíme, že ak by sa mala simultánne s tým, ako starne vesmír, meniť rýchlosť svetla, musela by sa meniť aj hmotnosť fotónu. Zo špeciálnej relativity ale vieme, že vek fotónu je vždy rovný nule, keďže sa pohybuje rýchlosťou svetla, a to bezohľadu na to, ako veľkú časť vesmíru preletí. Z jeho pohľadu by sa mu musela zmeniť hmotnosť o nenulovú hodnotu za nulový čas. Niečo také si veľmi dobre nevieme predstaviť a preto ponecháme myšlienku o meniacej sa rýchlosti svetla a hmotnosti fotónu bokom a budeme ďalej uvažovať, že tieto dve veličiny zostanú konštantné. Keďže zadaním požadujeme zmenu vlnovej dĺžky fotónu v dôsledku zmeny veku vesmíru, spolu s ňou sa bude meniť aj frekvencia svetla, nakoľko rýchlosť svetla považujeme v každom čase za konštantu. Z toho vidíme že sa musí meniť Planckova konštantna, aby platil zákon zachovania energie. Vyjadríme si teda vlnovú dĺžku fotónu s konštantnou energiou E v závislosti od veku vesmíru T ako

$$\lambda(T) = \frac{h(T)c}{E}.$$

Označíme si súčasný vek vesmíru ako t a vek vesmíru, v ktorom bol vyžiarený náš skúmaný fotón T . Potom červený posun z spôsobený rozdielnosťou Planckovej konštanty spočítame ako

$$z = \frac{\lambda_T - \lambda_t}{\lambda_t} = \frac{\frac{h(T)c}{E} - \frac{h(t)c}{E}}{\frac{h(t)c}{E}} = \frac{h(T) - h(t)}{h(t)}.$$

Ak máme nejaký objekt, u ktorého nameriame červený posun z , je jeho rýchlosť v smere od nás v rovná

$$v = \frac{z^2 + 2z}{z^2 + 2z + 2}c.$$

Ak poznáme empirický Hubblov vzťah, je potom táto rýchlosť úmerná Hubblovej konštantne a vzdialenosti galaxie, z ktorej k nám fotón doputoval. Túto vzdialenosť vieme zapísať ako rozdiel časov t a T vynásobený rýchlosťou svetla. Platí

$$v = \frac{z^2 + 2z}{z^2 + 2z + 2}c = H(t - T)c.$$

Po dosazení do výrazu pre z do tohto vzťahu a niekoľkých úpravách dostávame

$$\frac{h^2(T) - h^2(t)}{h^2(T) + h^2(t)} = H(t - T).$$

Predpokladajúc, že Hubblova konštanta je prevrátenou hodnotou veku nášho vesmíru t.j. $H = 1/t$ a prenásobením celej rovnice menovateľom dostávame

$$\begin{aligned} h^2(T) - h^2(t) &= (1 - TH)(h^2(T) + h^2(t)), \\ h^2(T)(1 - (1 - TH)) &= h^2(t)((1 - TH) + 1), \\ h(T) &= h(t) \sqrt{\frac{2 - TH}{TH}}. \end{aligned}$$

Pre konkrétnu hodnotu Planckovej konštanty ako ju poznáme dnes $h(t)$ vieme teda dopočítať späť, aká bola jej hodnota v minulosti. Môžeme si všimnúť, že člen TH hrá vlastne úlohu "veku vesmíru v jednotkách súčasného veku vesmíru". Nakoľko tento vzorec bol odvodený z predpokladu, že k nám prichádza svetlo z minulosti, nie je možné z neho získať informáciu o hodnote Planckovej konštanty v budúcnosti. Vidíme teda, že existuje spôsob, ktorým sa dá vysvetliť pozorovaný červený posun vzdialených objektov inak, ako rozpínaním vesmíru. Nakoľko je táto teória konzistentná s kvantovou fyzikou tu rozoberať nebudem, jedná sa skôr o prvý nástrel toho, ako inak by sa to dalo interpretovať, aby to nebolo úplne v rozpore so základmi fyziky. Toto riešenie ako autor považujem za úplné, to však neznamená, že nemôže existovať ďalšie, ktoré by túto problematiku rovnako dobre, alebo aj lepšie odôvodnilo.

Jakub Jamblich
jakubj@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.