

Csereho astronomické dni, Bezovec 2020, 2. októbra 2020



Vesmír konečná hranica

Rudolf Gális, Ústav fyzikálnych vied PF UPJŠ v Košiciach

Laureáti Nobelovej ceny za fyziku v roku 2019



James
Peebles

„za teoretické objavy
vo fyzikálnej kozmológii“



Michel
Mayor

„za objav prvej exoplanéty obiehajúcej
okolo hviezdy slnečného typu“



Didier
Queloz

Primárny zdroj informácií o vesmírnych objektoch:

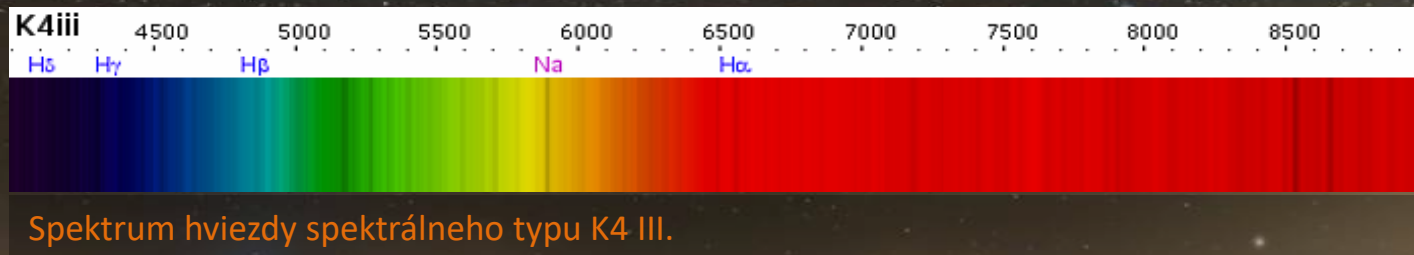
elektromagnetické žiarenie (svetlo)

Doplnkový zdroj informácií:

kozmicke lúče, vzorky z Mesiaca, meteority, gravitačné vlny, ...

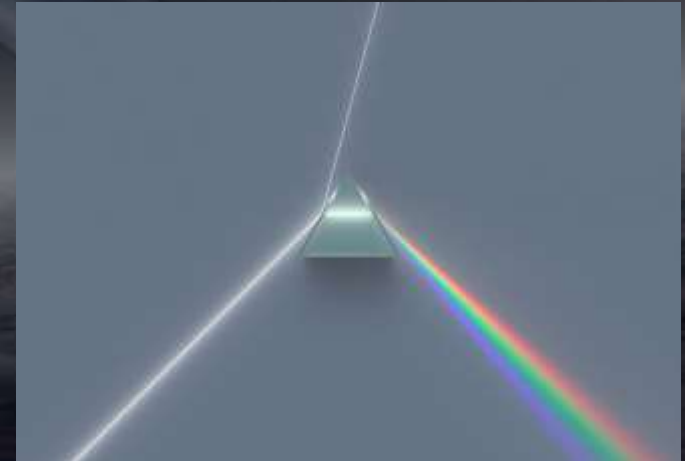
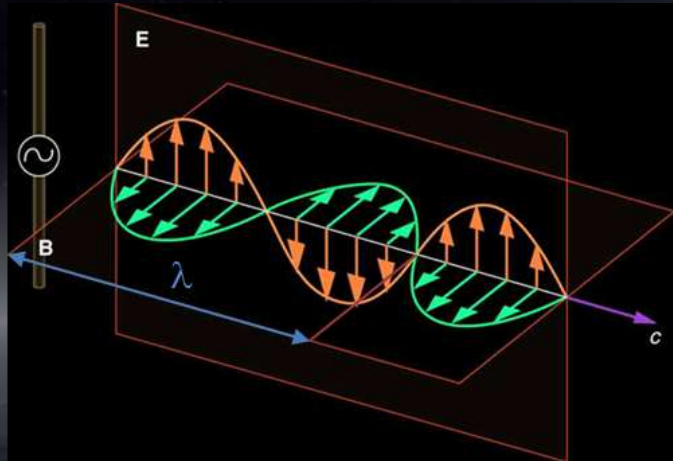
Na základe analýzy vlastností elektromagnetického žiarenia dokážeme určiť všetky základné fyzikálne vlastnosti vesmírnych objektov:

poloha a vzdialenosť, rozmery, hmotnosť, jasnosť, svietivosť, farba, spektrálny typ, teplota, rotácia, chemické zloženie, tlak, gravitačné zrýchlenie, magnetické a elektrické polia, ...



Elektromagnetické žiarenie

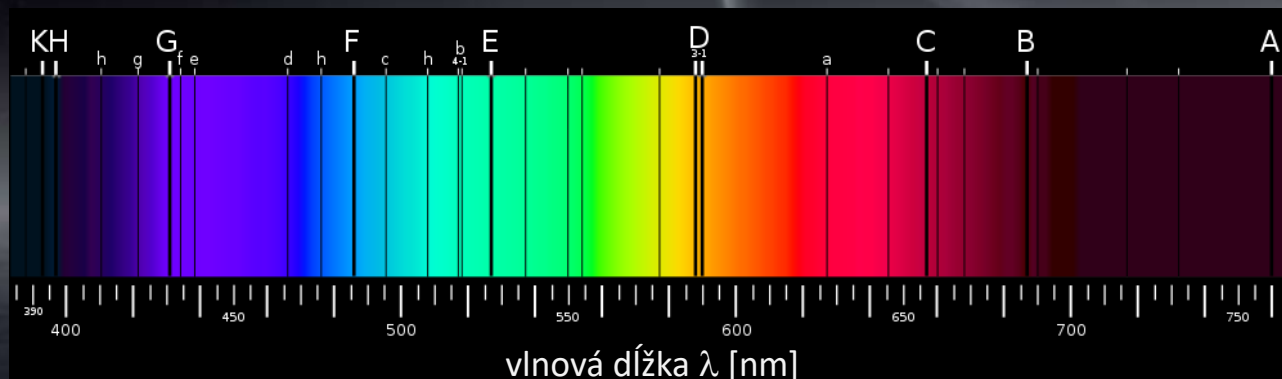
- ☀ Typ priečného vlnenia (vektory elektrickej intenzity a magnetickej indukcie oscilujú v priečnom smere vzhľadom na smer šírenia sa vlny).



Svetlo ako priečné vlnenie (vľavo). Vznik spektra disperziou na vodných kvapkách (v strede) a na hranole (vpravo).

Elektromagnetické žiarenie

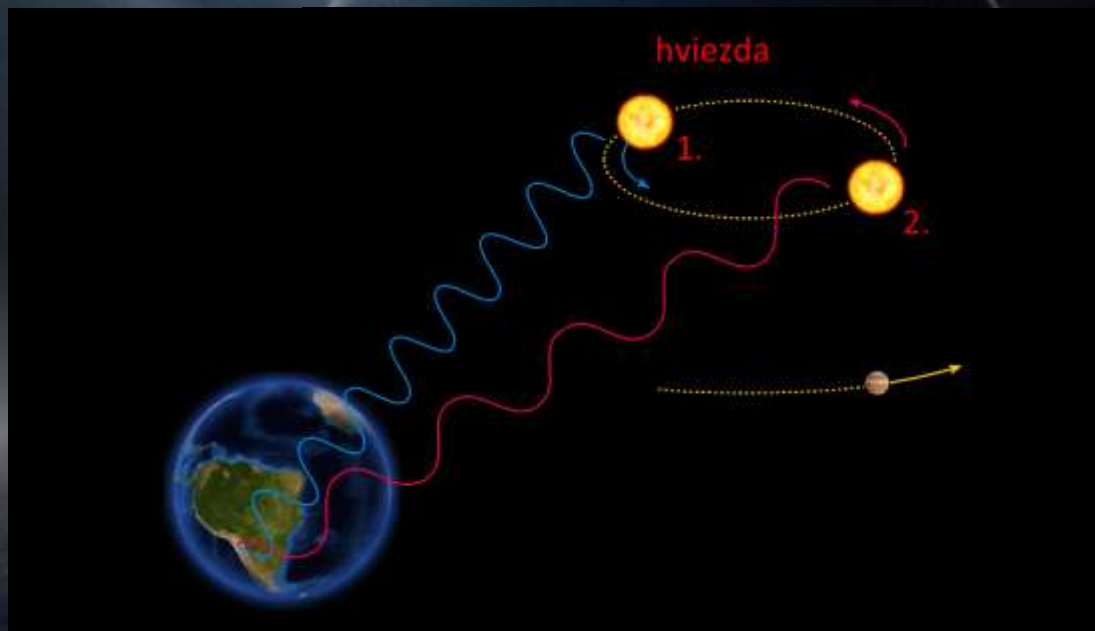
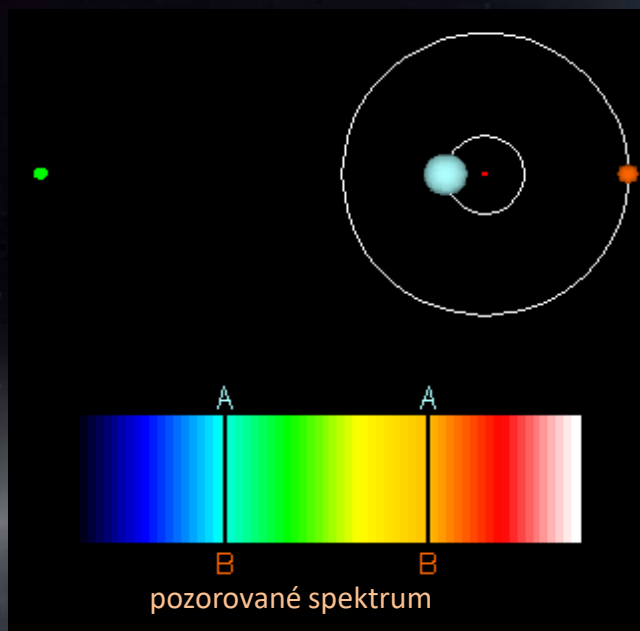
- ☀ Typ priečneho vlnenia (vektory elektrickej intenzity a magnetickej indukcie oscilujú v priečnom smere vzhľadom na smer šírenia sa vlny).
- ☀ Absorpčné spektrálne čiary objavil v spektre Slnka *Joseph von Fraunhofer* v roku 1814.
- ☀ O 45 rokov neskôr *G. R. Kirchhoff* a *R. W. E. Bunsen* zistili, že vznik spektrálnych čiar súvisí s absorpciou (vyžarovaním) atómov a molekúl.
- ☀ Vznik spektrálnych čiar vysvetlila až *kvantová mechanika*.
- ☀ Prítomnosť, intenzita a tvar spektrálnych čiar závisí od *teploty, tlaku, chemického zloženia, pohybového stavu* a prítomnosti *magnetického a elektrického poľa* v mieste ich vzniku (atmosféra hviezdy).



Fraunhoferove spektrum.

Dvojhviezdy

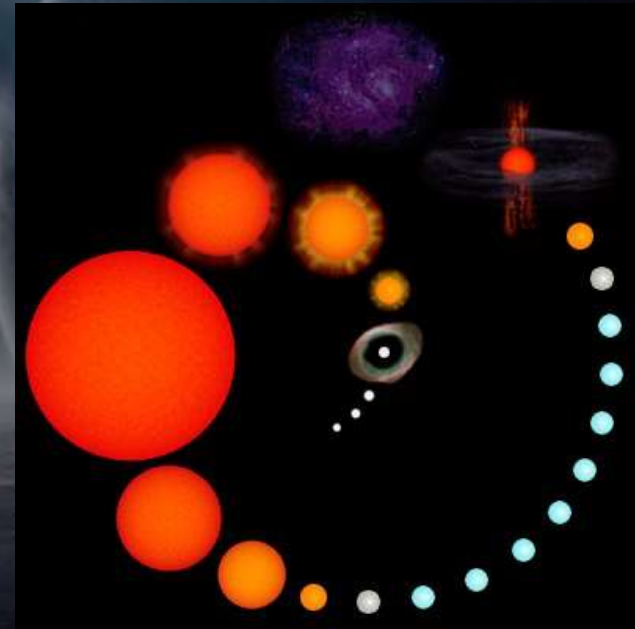
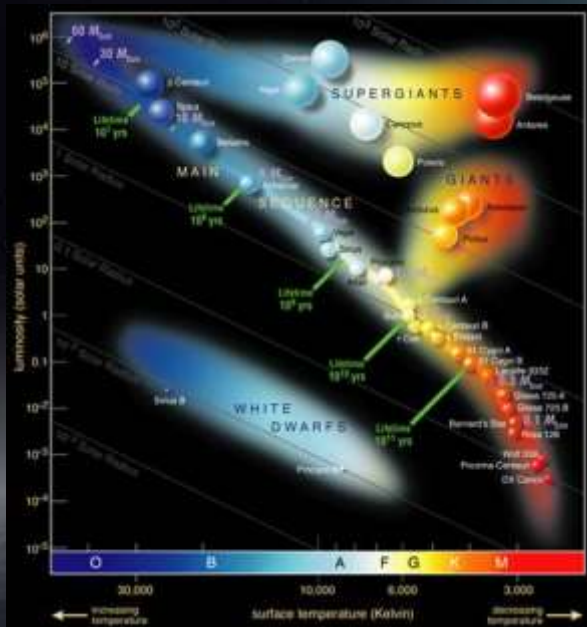
- ☀ Dvojhviezdny charakter sa prejaví zdvojením spektrálnych čiar, ktoré navyše pravidelne (s periódou obežnej doby dvojhviezdy) menia svoju polohu.
- ☀ Posun spektrálnych čiar je spôsobený *Dopplerovým javom*: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$ pre $v_r \ll c$.



Zmeny spektra dvojhviezdy v dôsledku pohybu jej zložiek okolo ťažiska (vľavo) a vlnovej dĺžky prijímaného svetla (vpravo): ak sa hviezda pohybuje k nám (1), vlnová dĺžka sa skráti, ak sa pohybuje od nás (2), vlnová dĺžka sa predĺži.

Dvojhviezdy

- ☀ Dvojhviezdny charakter sa prejaví zdvojením spektrálnych čiar, ktoré navyše pravidelne (s periódou obežnej doby dvojhviezdy) menia svoju polohu.
- ☀ Posun spektrálnych čiar je spôsobený *Dopplerovým javom*: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$ pre $v_r \ll c$.
- ☀ Pozorovania dvojhviezd umožňujú určiť parametre ich dráhy, vzdialenosti, ako aj fyzikálne charakteristiky samotných hviezd (hmotnosti, polomery, hustoty, svietivosti).
- ☀ Údaje získané analýzou dvojhviezd sa stali kľúčovými pre pochopenie vlastností, štruktúry a evolúcie hviezd.



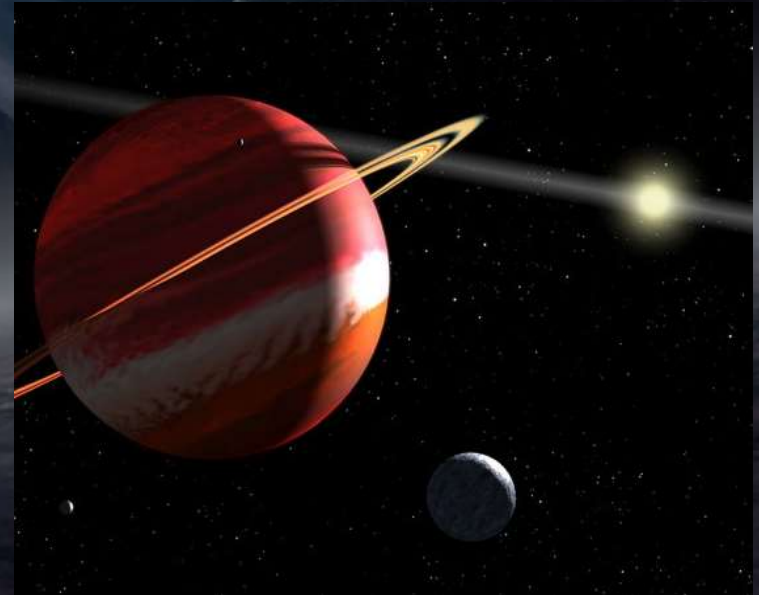
Hertzsprungov – Russellov diagram (vľavo) a evolúcia hviezd s hmotnosťou Slnka (vpravo).

Katedra teoretickej fyziky a astrofyziky

- ✿ Astrofyzikálny výskum sa špecializuje na:
 - ✿ štúdium fyzikálnych procesov v *interagujúcich premenných hviezdach*, hlavne na mechanizmy spojené s prenosom hmoty medzi zložkami týchto dvojhviezd, ktoré spôsobujú ich pozorovanú aktivitu,
 - ✿ výskum fyzikálnych a geometrických vlastností *exoplanét* (planét obiehajúcich iné hviezdy).
- ✿ Metódy vypracované pôvodne pre výskum dvojhviezd výrazne ovplyvnili vznik a rozvoj nových astrofyzikálnych disciplín, napr. *hľadanie a výskum extrasolárnych planét*.



Model (klasickej) kataklizmatickej premennej.



Umelecká predstava exoplanetárnej sústavy.

Exoplanéty

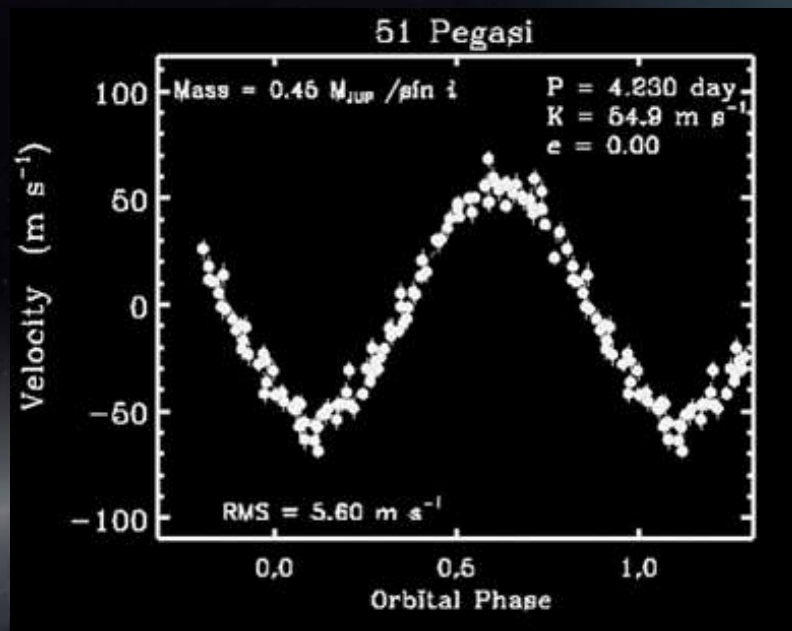
- ☀ Metódu radiálnych rýchlostí možno použiť aj na výskum exoplanét, problémom je však dostupná presnosť meraní (Jupiter „rozhýbe“ Slnko s amplitúdou rýchlosti asi 12 m/s).
- ☀ V 70. rokoch 20. storočia *Michel Mayor* zostrojil spektrograf na veľmi presné meranie radiálnych rýchlostí, no nedosahoval takú presnosť, aby sa s ním dali uskutočniť pozorovania zmien rýchlostí hviezd spôsobených ich planétami (chyba okolo 300 m/s).
- ☀ *M. Mayor* sa myšlienky nevzdal a v 90. rokoch poveril svojho vtedajšieho doktoranda *Didier Queloz*, aby presnosť merania zvýšil. Použitím celého radu vylepšení sa to podarilo a od roku 1994 mali k dispozícii spektrograf s presnosťou okolo 10-15 m/s.
- ☀ V roku 1995 *Michel Mayor* a *Didier Queloz* zo Ženevského observatória oznámili objav planéty, ktorá obieha okolo hviezdy 51 zo súhvezdia Pegas (51 Pegasi b – *Dimidium*).
- ☀ Exoplanéta *51 Pegasi b* sa nachádza vo vzdialenosti 50,9 svetelných rokov.

Michel Mayor a *Didier Queloz* - objavitelia prvej exoplanéty obiehajúcej s periódou 4,23 dňa okolo Slnku podobnej hviezdy 51 Pegasi. V ruke držia vydanie časopisu *Nature*, v ktorom bol uverejnený ich článok o objave tejto planéty.



Exoplanéty

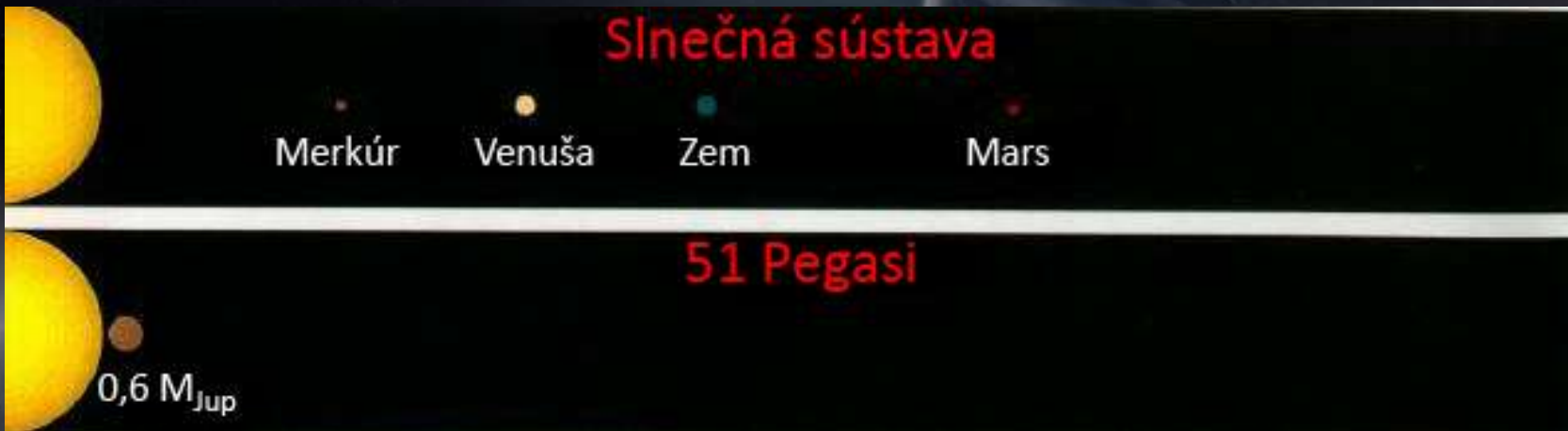
- ☀ 51 Pegasi b – *Dimidium* bola objavená metódou analýzy krivky radiálnych rýchlostí.
- ☀ Hviezda 51 Pegasi je hviezda podobná Slnku (spektrálny typ G4-5 V alebo IV; $1,06 M_{\odot}$, $1,14 - 1,15 R_{\odot}$; $1,30 L_{\odot}$; 1,6-krát bohatšia na ťažké prvky; vek 7-5 - 8,5 miliardy rokov).



Graf variácií radiálnej rýchlosti hviezdy 51 Pegasi spôsobených planétou.

Exoplanéty

- ☀ 51 Pegasi b – *Dimidium* bola objavená metódou analýzy krivky radiálnych rýchlostí.
- ☀ Hviezda 51 Pegasi je hviezda podobná Slnku (spektrálny typ G4-5 V alebo IV; $1,06 M_{\odot}$, $1,14 - 1,15 R_{\odot}$; $1,30 L_{\odot}$; 1,6-krát bohatšia na ťažké prvky; vek 7-5 - 8,5 miliardy rokov).
- ☀ 51 Pegasi b má 47 % hmotnosti Jupitera. Jej polomer je 1,2-krát väčší ako polomer Jupitera. Obežná dráha je takmer kruhová ($e = 0,013$) a obeh trvá 4,23 dňa. Materskú hviezdu 51 Pegasi obieha vo vzdialenosti iba 0,05 AU.



Porovnanie vzdialeností vnútorných planét slnečnej sústavy od Slnka a vzdialenosti planéty 51 Pegasi b od svojej materskej hviezdy.

Exoplanéty

- 51 Pegasi b – *Dimidium* bola objavená metódou analýzy krivky radiálnych rýchlostí.
- Hviezda 51 Pegasi je hviezda podobná Slnku (spektrálny typ G4-5 V alebo IV; $1,06 M_{\odot}$, $1,14 - 1,15 R_{\odot}$; $1,30 L_{\odot}$; 1,6-krát bohatšia na ťažké prvky; vek 7-5 - 8,5 miliardy rokov).
- 51 Pegasi b má 47 % hmotnosti Jupitera. Jej polomer je 1,2-krát väčší ako polomer Jupitera. Obežná dráha je takmer kruhová ($e = 0,013$) a obeh trvá 4,23 dňa. Materskú hviezdu 51 Pegasi obieha vo vzdialenosti iba 0,05 AU.
- Existenciu tohto nečakaného usporiadania vysvetľuje teória *migrujúcich planetárnych obrov*.

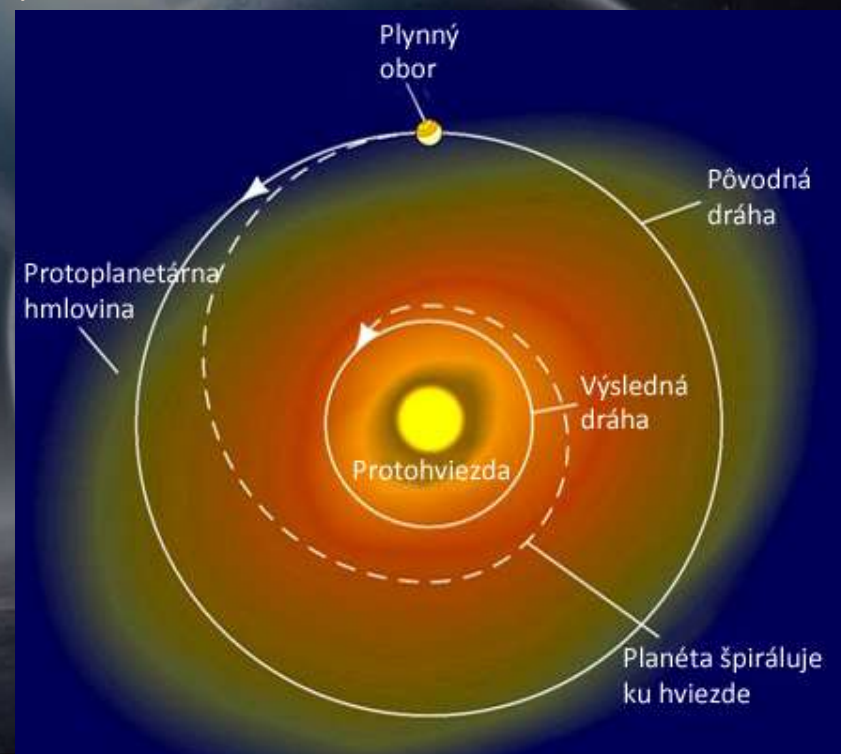
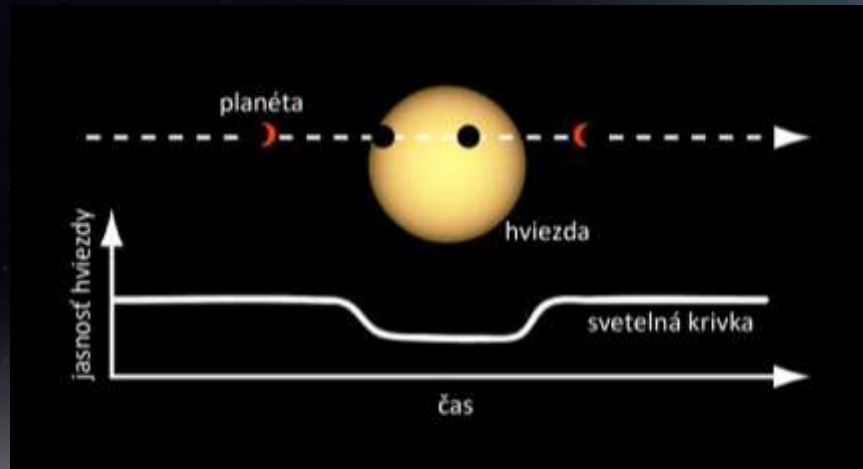


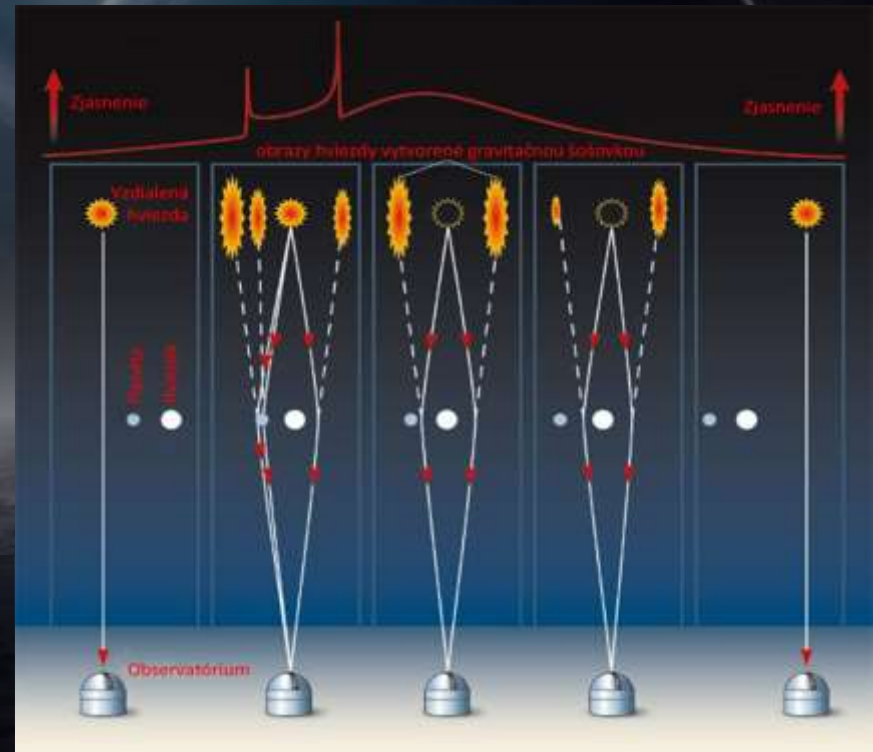
Schéma migrácie plynnej obrej planéty smerom ku svojej materskej hviezde.

Exoplanéty

- ☀️ Objav planéty 51 Pegasi b možno považovať, minimálne symbolicky, za začiatok novej éry v astronómii, “doby planét”.
- ☀️ Na objavovanie a výskum exoplanét sa používajú aj ďalšie metódy (tranzitov - sondy *Kepler*, *TESS*), gravitačnej šošovky, spektrálnych vlastností, priameho snímania, ...).



Pokles jasnosti hviezd spôsobený planétou, ktorá pred hviezdou prechádza (hore). Schéma zjasnení vzdialenej hviezd, ktoré sú spôsobené efektom gravitačnej šošovky vytvorenej medziľahlou hviezdou a jej planétou (vpravo).



Exoplanéty

- ☀️ Objav planéty 51 Pegasi b možno považovať, minimálne symbolicky, za začiatok novej éry v astronómii, “doby planét”.
- ☀️ Na objavovanie a výskum exoplanét sa používajú aj ďalšie metódy (tranzitov - sondy *Kepler*, *TESS*), gravitačnej šošovky, spektrálnych vlastností, priameho snímania, ...).
- ☀️ Dnes už poznáme viac ako 4 000 (4356, 2. 10. 2020) exoplanét a nie je pochyb o tom, že ich počet bude aj naďalej rásť.
- ☀️ Väčšina je podobná Jupiteru, no poznáme už aj viacero planét podobných Zemi, ktoré obiehajú v obývateľných zónach materských hviezd.

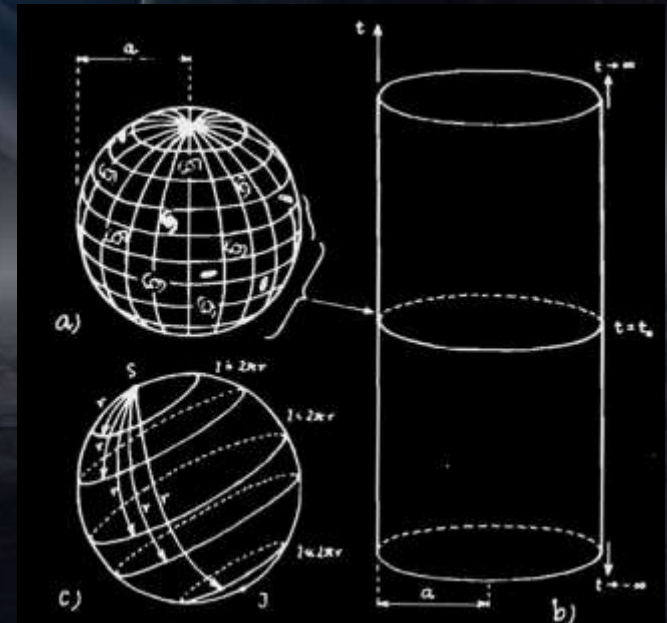
Prvá exoplanéta, ktorá bola priamo zaznamenaná v roku 2005. Exoplanéta obieha hviezdu *2MASSWJ1207334-393254*, ktorá sa nachádza vo vzdialenosti 230 svetelných rokov od Zeme. Snímka bola získaná v infračervenom svetle pomocou ďalekohľadov VLT (Paranal, ESO) v Čile.



Vesmír

- ✱ Až do 20. rokov 20. storočia vedci predpokladali, že vesmír je nemenný (*statický*), existujúci večne alebo stvorený v jeho súčasnej podobe.
- ✱ Príťažlivosť gravitačnej sily však narušuje silne vžitú predstavu statického vesmíru.
- ✱ V roku 1915 *Albert Einstein* (1879 – 1955) vypracoval novú teóriu gravitácie (*všeobecnú teóriu relativity*), ktorá nahradzuje koncepciu pohybu telies v dôsledku gravitačného silového pôsobenia koncepciou pohybu telies v zakrivenom časopriestore.
- ✱ *A. Einstein* sa pokúsil aplikovať svoje rovnice na *homogénny, izotropný a statický vesmír*, no dostal riešenie iba pre úplne prázdny vesmír, čo je v rozpore z pozorovaním.
- ✱ *A. Einstein* preto doplnil svoje rovnice o člen obsahujúci tzv. *kozmozologickú konštantu* Λ (nová, veľmi malá prírodná konštanta).
- ✱ V takomto prípade dostáva *A. Einstein* netriviálne riešenie *statického vesmíru*, v ktorom gravitačné pôsobenie zakriví časopriestor tak, že priestor je uzavretý (je konečný, no nemá žiadne hranice) a popisuje ho tzv. *sférická geometria*.

Einsteinov vesmír si možno predstaviť ako štvorrozmerný hypervalec vložený do fiktívneho päťrozmerného priestoru, ktorého rezy predstavujú trojrozmerný priestor so sférickou geometriou a konštantným polomerom krivosti a vo všetkých časoch.

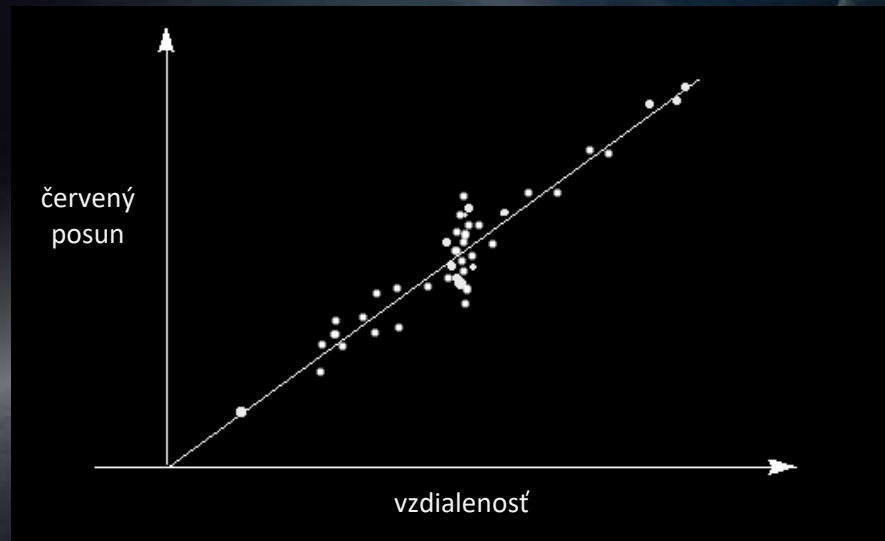


Rozpínanie vesmíru

- ✴ *Vesto M. Slipher* (1875 - 1969) si ako prvý všimol, že spektrá väčšiny galaxií vykazujú *červený posun*, ktorý môže byť interpretovaný (pomocou Dopplerovho javu) ako dôsledok ich vzdďalovania sa od nás.
- ✴ *Edwin P. Hubble* (1889 - 1953) skombinoval merania červených posunov a vlastných meraní vzdialeností galaxií (pomocou Cefeíd) a zistil, že červený posun galaxií *z* rastie lineárne s ich vzdialenosťou *r*:

$$c z = H r$$

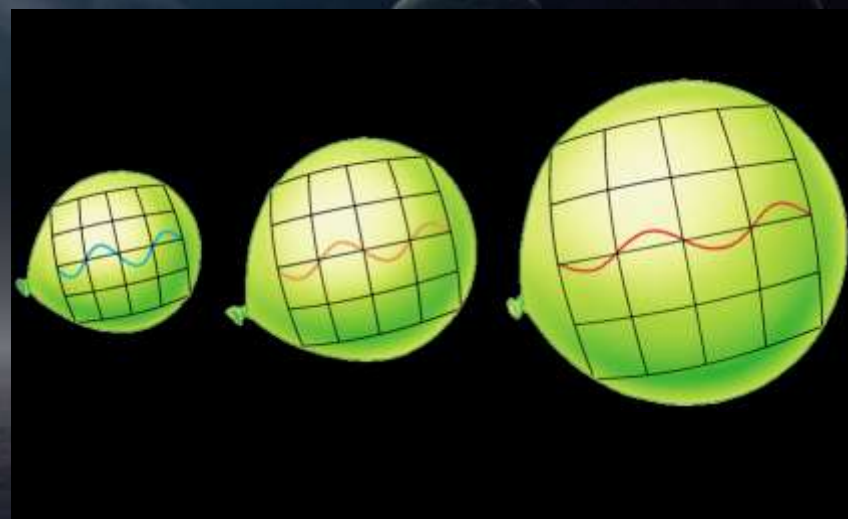
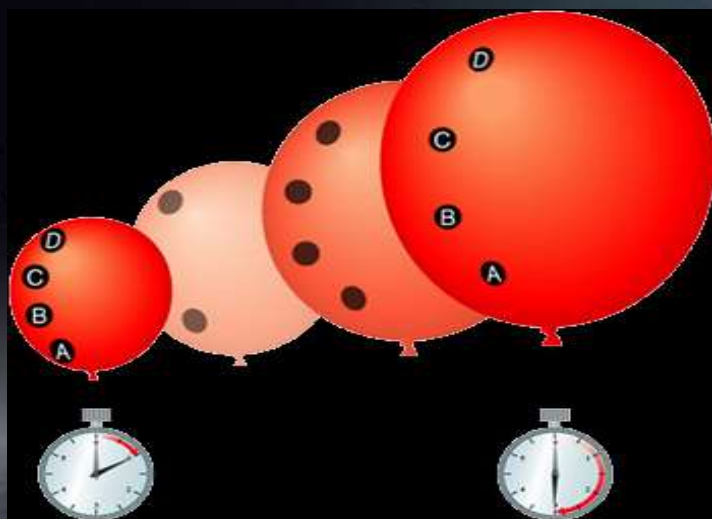
kde *c* je rýchlosť svetla vo vákuu a *H* je *Hubblova konštanta*. Tento vzťah sa označuje ako *Hubblev – Lemaîtreov zákon*.



Graf závislosti červených posunov spektier galaxií od ich vzdialenosti zostrojený *E. P. Hubblom*.

Rozpínanie vesmíru

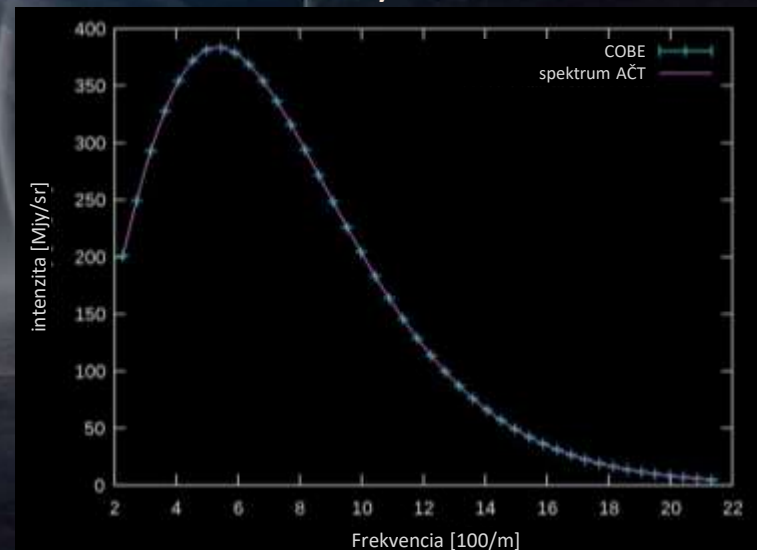
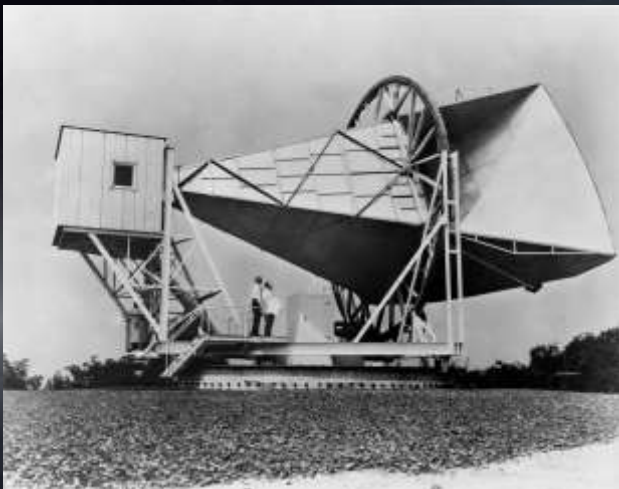
- ☀ Interpretácia červených posunov spektier galaxií ako rýchlosti ich vzdďalovania sa narádza na problémy s platnosťou *kozmozologického princípu* (nachádzame sa v „strede“ vesmíru a všetky galaxie sa od nás vzdďalujú; vesmír končí tam, kde rýchlosť vzdďalovania sa galaxií dosiahne rýchlosť svetla vo vákuu) a nevysvetľuje, prečo sa vzdialenejšie galaxie pohybujú rýchlejšie ako tie bližšie.
- ☀ Ďaleko prirodzenejším vysvetlením *Hubblevho – Lemaítovho zákona* je, že vesmír (časopriestor) sa *rozpína*, čo spôsobuje pozorované červené posuny spektier galaxií (medzi okamihom vyslania a okamihom prijatia žiarenia sa časopriestor natiahne a tým sa predĺži aj vlnová dĺžka žiarenia).



Príkladom rozpínania sa dvojrozmerného priestoru (plochy) je nafukujúci sa balónik. Z ľubovoľného miesta balónika vždy získame rovnaké pozorovanie: všetky ostatné miesta sa od nás vzdďalujú, pričom čím je miesto ďalej, tým rýchlejšie sa od nás vzdďaluje (vľavo). Príklad s nafukujúcim sa balónikom prirodzene vysvetľuje aj červené posuny – ako sa balónik nafukuje, vlnová dĺžka sa predlžuje.

Reliktové žiarenie

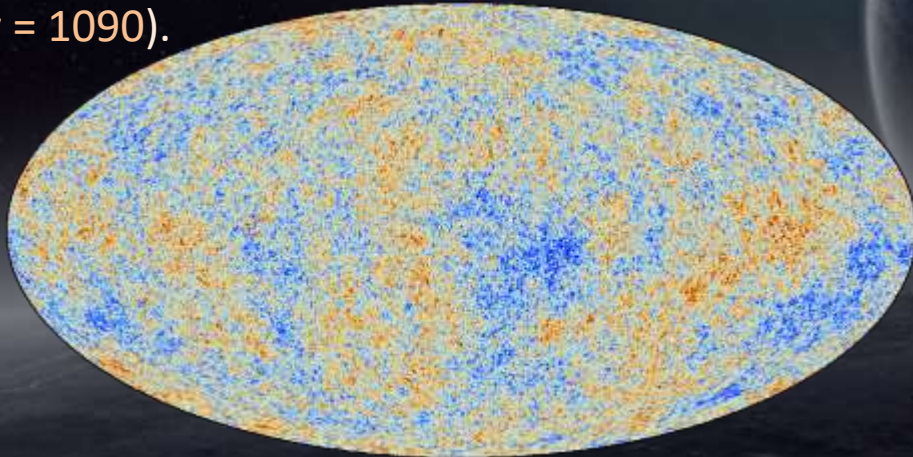
- ☀ Rozpínanie vesmíru znamená, že objekty boli v minulosti k sebe bližšie a existuje okamih, kedy sa všetky (a tiež celý časopriestor) nachádzali v jednom bode (*singularite*). Z toho vyplýva, že vesmír má svoj *počiatok v čase*.
- ☀ V 60. rokoch *Robert Dicke* (1916-1997) a *James Peebles* (1935) rozpracovali myšlienku *R. Alpher* (1921-2007), *R. Hermana* (1914 - 1997) a *G. Gamowa* (1904 - 1968) o prítomnosti žiarenia s teplotou ≈ 5 K ako pozostatku po horúcej fáze evolúcie vesmíru a *P. G. Roll* a *D. T. Wilkinson* (1935 – 2002) stavali anténu na nájdenie tohto žiarenia.
- ☀ *Reliktové žiarenie* náhodou objavili *Arno A. Penzias* (1933) a *Robert W. Wilson* (1936). Počas hľadania optimálneho rádiového pásma pre spojenie s družicami Echo v rokoch 1964 - 1965 objavili žiarenie, ktoré izotropne prichádzalo zo všetkých smerov a malo charakter AČT s teplotou $\approx 3,5$ K.



Anténa (Bell Telephone Laboratories, Crawford Hill, Holmdel Township) pomocou ktorej *A. A. Penzias* a *R. W. Wilson* objavili *reliktové žiarenie* (vľavo) a spektrum *reliktového žiarenia* a jeho model AČT (vpravo).

Reliktové žiarenie

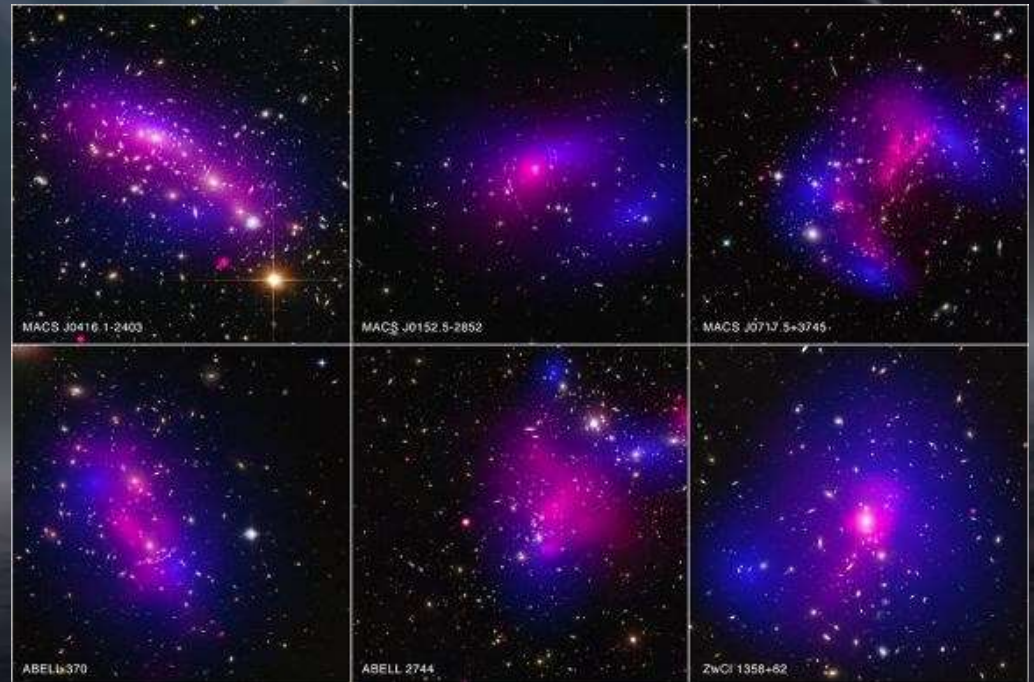
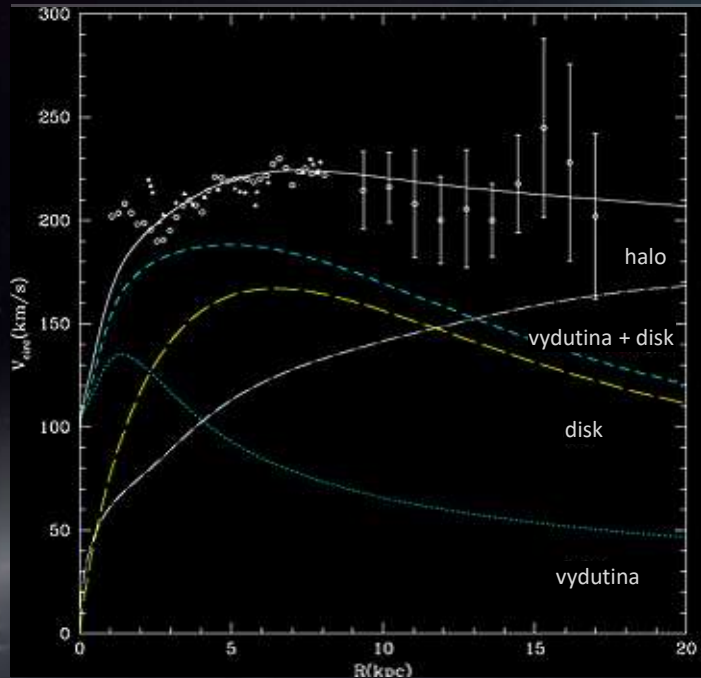
- ✱ Keď sa *R. Dicke* a *J. Peebles* dozvedeli o objave A. A. Penziasa a R. W. Wilsona, správne interpretovali toto žiarenie ako *pozorovací dôkaz Veľkého tresku*.
- ✱ Vesmír prešiel veľmi horúcim a hustým obdobím, kedy bola ionizovaná hmota v TD rovnováhe so žiarením. Ako vesmír expandoval, zároveň chladol. Keď teplota klesla pod ≈ 3000 K, začala rekombinácia, opacita vesmíru poklesla a rovnováha sa narušila. Došlo k oddeleniu žiarenia, ktoré je vo vesmíre prítomné dodnes.
- ✱ Objav reliktového žiarenia sa považuje za doposiaľ najdôležitejší kozmologický objav (*A. A. Penzias* a *R. W. Wilson*, Nobelova cena za fyziku 1974).
- ✱ Analýzou reliktového žiarenia možno určiť všetky základné vlastnosti vesmíru (vek: 13,8 miliardy rokov; globálna geometria: blízka plochej; súčasná rýchlosť rozpínania $H_0 = 67,8 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$; vznik reliktového žiarenia: 380 000 rokov; $2970 \text{ K} \Rightarrow 2,725 \text{ K}$, $z = 1090$).



Celooblohová mapa reliktového žiarenia (vľavo) získaná na základe meraní vesmírnej sondy *Planck* (ESA, 2009).

Tmavá hmota

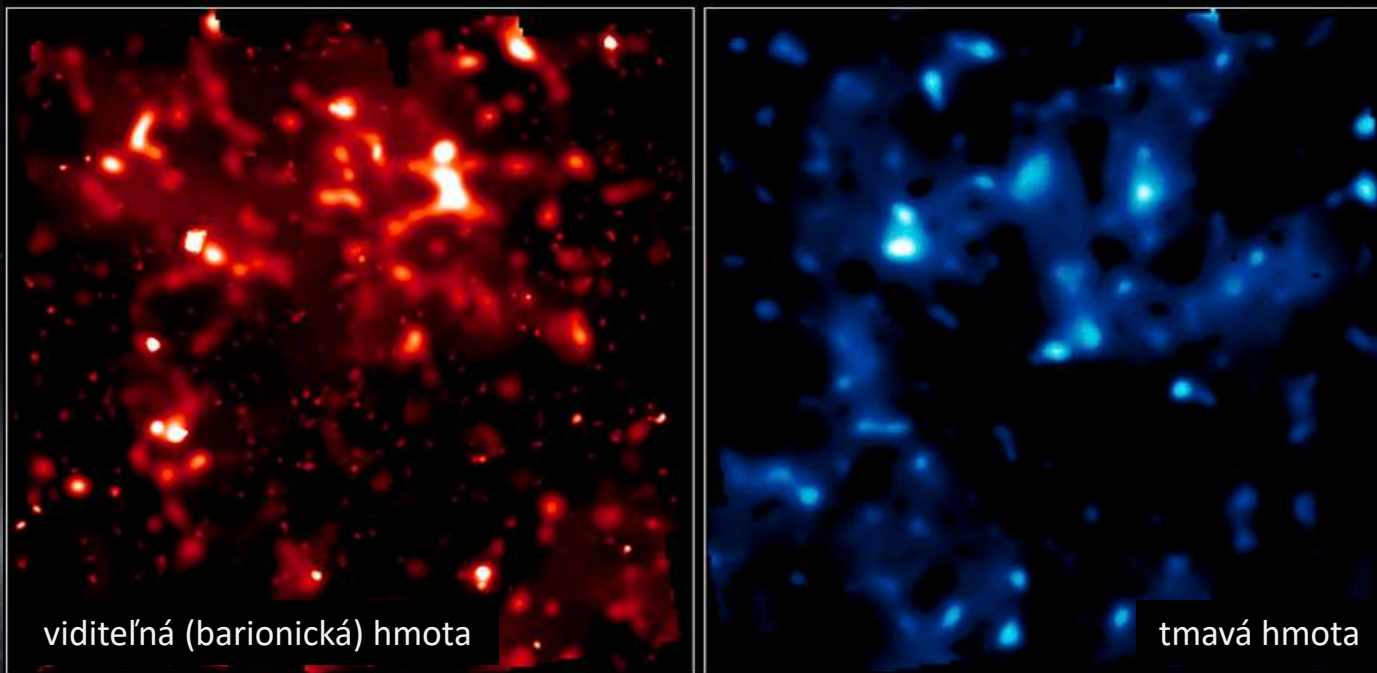
- Na „chýbajúce“ hviezdy upozornili *Jan Oort* (1932) na základe pohybu hviezd v Galaxii a *Fritz Zwicky* (1933) na základe pohybu galaxií v kopách galaxií za predpokladu Newtonovej dynamiky.



Krivku rotačných rýchlostí hviezd v Galaxii nedokáže popísať model, ktorý zahŕňa len viditeľnú hmotu. Realistický popis pozorovaní dostaneme až doplnením modelu o rozsiahle halo tmavej hmoty, do ktorej je galaxia ponorená (vľavo). Rozloženie tmavej hmoty v kopách galaxií určené na základe jej vplyvu na svetlo (efekt gravitačnej šošovky).

Tmavá hmota

- Na „chýbajúce“ hviezdy upozornili *Jan Oort* (1932) na základe pohybu hviezd v Galaxii a *Fritz Zwicky* (1933) na základe pohybu galaxií v kopách galaxií za predpokladu Newtonovej dynamiky.
- Na rozdiel od viditeľnej hmoty ju nie je možné pozorovať priamo (neemituje, resp. neabsorbuje elektromagnetické žiarenie). Prejavuje sa nepriamo, gravitačnými účinkami na viditeľnú hmotu, žiarenie, veľkoškálovú štruktúru vesmíru.



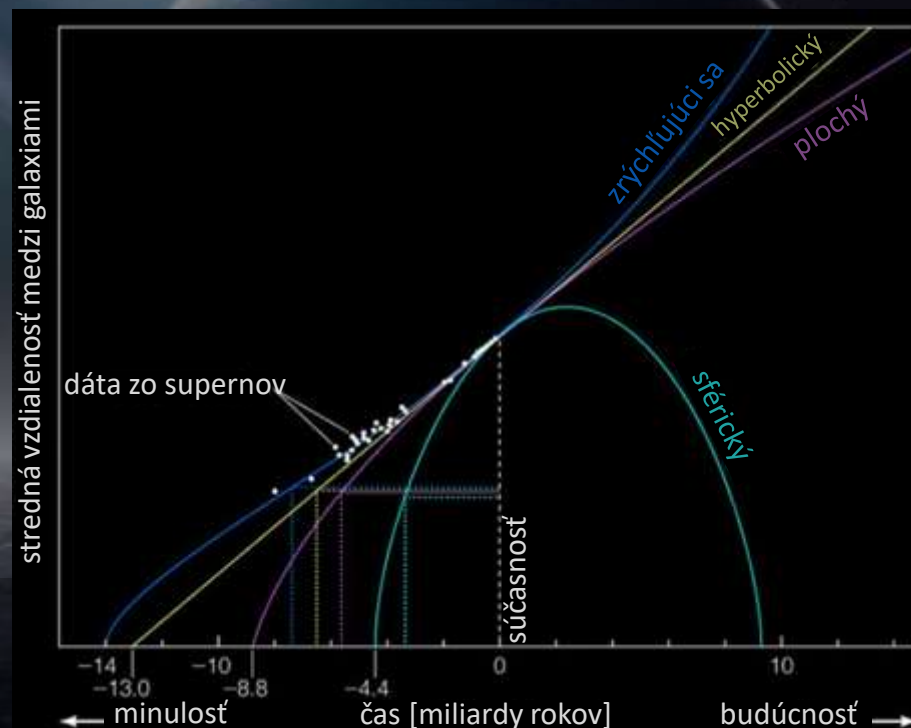
Rozloženie viditeľnej (priame pozorovanie) a tmavej hmoty (rekonštrukcia na základe efektu gravitačnej šošovky) vo vesmíre je podobné – viditeľná hmota sa zokupuje tam, kde sa nachádza tmavá hmota.

Tmavá hmota

- ✱ Na „chýbajúce“ hviezdy upozornili *Jan Oort* (1932) na základe pohybu hviezd v Galaxii a *Fritz Zwicky* (1933) na základe pohybu galaxií v kopách galaxií za predpokladu Newtonovej dynamiky.
- ✱ Na rozdiel od viditeľnej hmoty ju nie je možné pozorovať priamo (neemituje, resp. neabsorbuje elektromagnetické žiarenie). Prejavuje sa nepriamo, gravitačnými účinkami na viditeľnú hmotu, žiarenie, veľkoškálovú štruktúru vesmíru.
- ✱ Existuje viacero modelov, ktoré vysvetľujú zloženie tmavej hmoty:
 - ✱ **slabo svietivé objekty** (hnedé trpaslíky, neutrónové hviezdy čierne diery; MACHO) zložené z normálnej (barionickej) hmoty (CDM),
 - ✱ **známe elementárne častice** (neutrína, HDM),
 - ✱ **exotické, doteraz nedetegované elementárne častice** (axióny, WDM, ADMX; WIMPs, CDM).

Tmavá energia

- ☀ Pozorovania vzdialených supernov však ukazujú, že rýchlosť rozpínania sa počas evolúcie vesmíru menila: spočiatku sa síce (pod vplyvom gravitačného pôsobenia tmavej hmoty) *spomaľovala*, no asi pred 5 miliardami rokov sa začala *zrýchľovať*.
- ☀ Za objav zrýchľujúceho sa rozpínania vesmíru (1998) dostali v roku 2011 *Saul Perlmutter*, *Brian P. Schmidt* a *Adam G. Riess* Nobelovu cenu za fyziku.



Rôzne modely rozpínania sa vesmíru. Pozorovania vzdialených supernov však najlepšie popisuje model zrýchľujúceho sa rozpínania vesmíru.

Tmavá energia

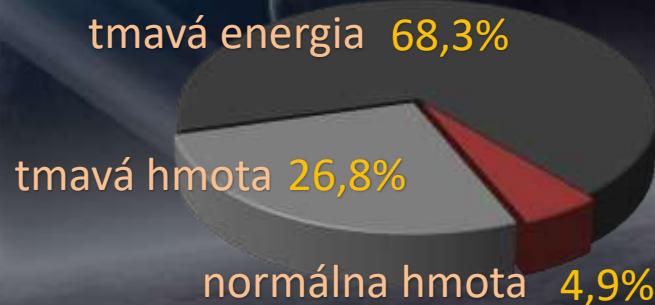
- ☀ Pozorovania vzdialených supernov však ukazujú, že rýchlosť rozpínania sa počas evolúcie vesmíru menila: spočiatku sa síce (pod vplyvom gravitačného pôsobenia tmavej hmoty) *spomaľovala*, no asi pred 5 miliardami rokov sa začala *zrýchľovať*.
- ☀ Za objav zrýchľujúceho sa rozpínania vesmíru (1998) dostali v roku 2011 *Saul Perlmutter*, *Brian P. Schmidt* a *Adam G. Riess* Nobelovu cenu za fyziku.
- ☀ V roku 1984 *James Peebles* spolu s ďalšími teoretikmi prispel k oživeniu Einsteinovej myšlienky *kozmoologickej konštanty* Λ .
- ☀ Zrýchľujúce sa rozpínanie vesmíru spôsobuje prítomnosť *tmavej energie*, ktorá tvorí až 70% celkového zloženia vesmíru, a ktorá sa najčastejšie spája s energiou fyzikálneho vákua.

James Peebles, jeden z nositeľov Nobelovej ceny za fyziku za rok 2019, počas prednášky na univerzite v Princetone v apríli 2018.



Tmavá energia

- ☀ Pozorovania vzdialených supernov však ukazujú, že rýchlosť rozpínania sa počas evolúcie vesmíru menila: spočiatku sa síce (pod vplyvom gravitačného pôsobenia tmavej hmoty) *spomaľovala*, no asi pred 5 miliardami rokov sa začala *zrýchľovať*.
- ☀ Za objav zrýchľujúceho sa rozpínania vesmíru (1998) dostali v roku 2011 *Saul Perlmutter*, *Brian P. Schmidt* a *Adam G. Riess* Nobelovu cenu za fyziku.
- ☀ V roku 1984 *James Peebles* spolu s ďalšími teoretikmi prispel k oživeniu Einsteinovej myšlienky *kozmoologickej konštanty* Λ .
- ☀ Zrýchľujúce sa rozpínanie vesmíru spôsobuje prítomnosť *tmavej energie*, ktorá tvorí až 70% celkového zloženia vesmíru, a ktorá sa najčastejšie spája s energiou fyzikálneho vákua.
- ☀ Dáta zo sondy Planck sú vo veľmi dobrej zhode s tzv. *Λ CDM modelom*.



Celkové zloženie vesmíru (vpravo) získané na základe meraní vesmírnej sondy *Planck* (2018).

Záver

- ☀ Za posledné desaťročia sa naše poznatky o vesmíre dramaticky rozšírili.
- ☀ A to aj vďaka výskumom, ktoré uskutočnili laureáti minuloročnej Nobelovej ceny za fyziku: *James Peebles* v kozmológii, *Michel Mayor* a *Didier Queloz* v oblasti štúdia exoplanét.
- ☀ Stále však zostáva mnoho nezodpovedaných otázok:
 - ☀ Čo je *tmavá hmota* a *tmavá energia*?
 - ☀ Sme vo vesmíre *sami*?
 - ☀ ...
- ☀ Túžba ľudí po objavovaní snád' nikdy neskončí.
- ☀ Ved' *konečnou hranicou* ľudského poznania je *vesmír*.



Ďakujem za pozornosť.