

Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach
Prírodovedecká fakulta



Základy astronómie a astrofyziky

vysokoškolské učebné texty

Košice 2014

Rudolf Gális



Základy astronómie a astrofyziky

© 2014 *doc. RNDr. Rudolf Gális, PhD.*

Recenzenti:

RNDr. Ladislav Hric, CSc., Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica

doc. Mgr. Štefan Parimucha, PhD., Prírodovedecká fakulta UPJŠ v Košiciach

Rozsah strán: 160

Rozsah AH: 5

Elektronický vysokoškolský učebný text pre Prírodovedeckú fakultu UPJŠ v Košiciach.

Za odbornú a jazykovú stránku tohto vysokoškolského učebného textu zodpovedá autor.

Rukopis neprešiel redakčnou ani jazykovou úpravou.

Vydavateľ: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Umiestnenie: <http://www.upjs.sk/pracoviska/univerzitna-kniznica/e-publikacia/#pf>

Dostupné od: 07. 01. 2014


ISBN 978-80-8152-089-1

OBSAH

1. Základné vlastnosti hviezd a metódy ich určovania	7
<i>Elektromagnetické žiarenie</i>	8
<i>Tok žiarenia</i>	11
<i>Svietivosť</i>	12
<i>Zdanlivá a absolútna magnitúda</i>	13
<i>Určovanie vzdialeností vo vesmíre</i>	16
- trigonometrická, fotometrická a dynamická paralaxa	
- pulzujúce premenné hviezdy, supernovy typu Ia	
<i>Farba a farebný exces</i>	27
<i>Spektrum</i>	29
<i>Žiarenie absolútne čierneho telesa</i>	30
<i>Teplota hviezd</i>	34
<i>Spektrá atómov a molekúl</i>	36
- spektrum vodíka, záporného vodíka a iných chemických prvkov	
- spektrum Slnka, Fraunhoferove spektrum, spektrá hviezd	
<i>Spektrálna klasifikácia</i>	43
<i>Triedy svietivosti</i>	47
<i>Hertzsprungov – Russellov diagram</i>	49
<i>Určovanie hmotnosti hviezd</i>	50
- vizuálne, spektroskopické a zákrytové dvojhviezdy	

2. <i>Štruktúra a evolúcia hviezd</i>	56
<i>Hydrostatická rovnováha</i>	57
- odhad centrálného tlaku a teploty	
<i>Základné rovnice hviezdnej stavby</i>	59
- prenos energie žiarením, konvekciou a vedením	
<i>Štruktúra Slnka</i>	63
- slnečná fotosféra, chromosféra a koróna	
<i>Zdroje energie vo hviezdach</i>	68
- chemické reakcie, gravitačná a termonukleárna energia	
<i>Termonukleárne reakcie</i>	72
- termonukleárne syntézy vodíka, hélia a ťažších prvkov	
<i>Evolúcia hviezd</i>	77
- medzihviezdna hmota, Jeansovo kritérium, protohviezdy, fragmentácia	
- protostelárne disky, hviezdy hlavnej postupnosti, obri, planetárne hmloviny	
<i>Záverečné štádiá vývoja hviezd</i>	90
- bieli trpaslíci, neutrónové hviezdy a čierne diery	

3. Štruktúra a evolúcia vesmíru	110
<i>Štruktúra hmoty vo vesmíre</i>	111
- hviezdy, hviezdne asociácie, otvorené a guľové hviezdokopy	
<i>Galaxie</i>	112
- Galaxia, jej štruktúra a dynamika, typy galaxií	
<i>Skupiny galaxií</i>	120
<i>Kopy a nadkopy galaxií</i>	122
- zrážky galaxií, intergalaktická hmota, tmavá hmota	
<i>Veľkoškálová štruktúra vesmíru</i>	134
<i>Izotropnosť a homogenita vesmíru</i>	137
- Kozmologický princíp, Olbersov paradox, gravitačný paradox	
<i>Relativistická kozmológia</i>	141
- kozmologické riešenia Einsteinových rovníc	
- modely vesmíru a ich vlastnosti, kozmologická konštanta	
<i>Rozpínanie vesmíru</i>	147
<i>Reliktové žiarenie</i>	152
<i>Vznik a vývoj vesmíru</i>	156
- Veľký tresk, počiatočné štádiá vesmíru, nukleogenéza,	
- formovanie galaxií a kôp galaxií	
<i>Referencie</i>	160



Najnepochopiteľnejší na vesmíre je fakt, že je pochopiteľný.

(A. Einstein)



Základné vlastnosti hviezd a metódy ich určovania

Primárny zdroj informácií o vesmírnych objektoch:

elektromagnetické žiarenie (svetlo)

Doplňkový zdroj informácií:

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

Elektromagnetické žiarenie skúmame z 3 hľadísk:

1. *Smeru odkiaľ prichádza* (poloha, pohyb)
... **astrometria**
2. *Kvantitatívneho* (magnitúda)
... **fotometria**
3. *Kvalitatívneho* (farba, spektrum)
... **spektroskopia**

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 priečneho vlnenia (vektory elektrickej intenzity a magnetickej indukcie kmitajú v priečnom smere vzhľadom na smer šírenia sa vlny).
- ☀ Vo vákuu sa šíri rýchlosťou svetla vo vákuu ($c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$).
- ☀ Energia je daná frekvenciou, resp. vlnovou dĺžkou vlnenia:

$$E = h \nu \qquad E = hc / \lambda$$

kde h je *Planckova konštanta*, $h = 6,626068 \times 10^{-34}\text{ m}^2\text{ kg s}^{-1}$

- ☀ Interval frekvencií, resp. vlnových dĺžok nazývame *spektrum*.

Tok žiarenia

- ☀ Základná fyzikálna veličina, ktorá udáva množstvo energie elektromagnetického žiarenia, ktoré prejde jednotkou plochy za jednotku času do všetkých smerov.

$$F \text{ [J m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{]}$$

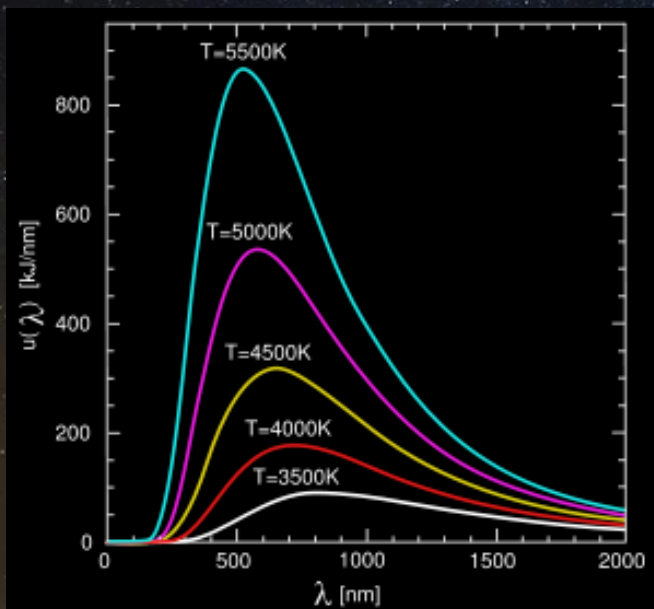
Celkový tok žiarenia

- ☀ Závisí od frekvencie, resp. vlnovej dĺžky elektromagnetického žiarenia:

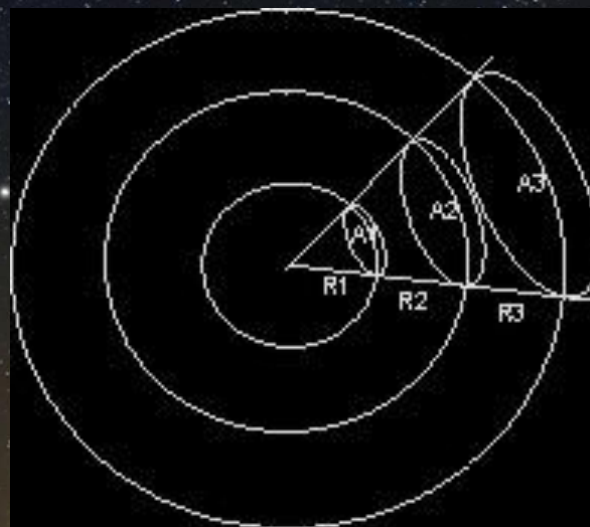
$$F_\nu \text{ [J m}^{-2}\text{]} \text{ resp. } F_\lambda \text{ [J m}^{-3} \text{ s}^{-1}\text{]}$$

- ☀ Závisí od vzdialenosti od zdroja $F(r)$:

$$F(r) \sim 1 / r^2$$



Závislosť toku žiarenia od vlnovej dĺžky pre žiarenie AČT s uvedenými teplotami.



Ako rastie plocha sféry so štvorcom polomeru, tok žiarenia proporcionálne klesá.

Svietivosť

- ☀ Svetivosť udáva celkové množstvo žiarivej energie, ktoré objekt vyžiari za jednotku času do celého priestoru.

$$L = F S \text{ [J s}^{-1}\text{]},$$

kde S je plocha povrchu telesa a F je tok na jeho povrchu. V prípade sféricky symetrického telesa (hviezdy) $S = 4 \pi R^2$, kde R je polomer telesa, dostávame:

$$L = 4 \pi R^2 F$$

Poznámky:

- ☀ Skutočný vs. zdanlivý tok žiarenia (F^* , F_{λ}^* , F_{ν}^*), *absorpcia žiarenia*.
- ☀ Slnčná konštanta ($1366 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- ☀ Svetivosť Slnka je $L_{\odot} = 3,839 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$

Magnitúda

- ☀️ Astronomická fotometrická veličina udávajúca jasnosť vesmírneho objektu.
- ☀️ Patrí k najstarším astronomickým veličinám - už v staroveku astronómovia rozdelili hviezdy do 6 hviezdnych veľkostí (*magnitúd*) porovnávaním ich jasností (metóda diferenciálnej fotometrie).
- ☀️ Magnitúdy boli určované voľným okom, preto sú dané citlivosťou oka. Tá je logaritmická, teda $p \sim \log s$, kde p je vnem a s je popud (*Weberov - Fechnerov zákon*).
- ☀️ Magnitúda je mierou osvetlenia E jednotkovej plochy kolmej na smer žiarenia. Pre magnitúdy dvoch objektov (hviezd) m_1, m_2 spôsobujúce osvetlenia E_1 a E_2 platí tzv. *Pogsonova rovnica*:
$$m_1 - m_2 = -2,5 \log (E_1 / E_2) \text{ [mag]}$$
- ☀️ Konštanta bola zvolená tak, aby bola zachovaná pôvodná škála magnitúd:
 $\Delta m = 6 - 1 = 5 \Leftrightarrow E_1 / E_6 = 100 \Rightarrow \rho = 100^{1/5} \cong 2,512$
- ☀️ Znamienko zodpovedá faktu, že čím je objekt slabší, tým je jeho magnitúda väčšie číslo.

Magnitúda

- ☀ Pôvodne bol rozsah 1 – 6 mag, dnes dokážeme pozorovať aj objekty 30 mag. Na druhej strane poznáme aj jasnejšie objekty: Sírirus (-1,46 mag), Venuša (-4,6 mag), Mesiac v splne (-13,6 mag), Slnko (-26,8 mag).
- ☀ Jednoduchá pomôcka: $\Delta m = 2,5n \Leftrightarrow E_1 / E_2 = 10^n$ a prevod na štandardné fyzikálne veličiny: $1 \text{ lx} \Leftrightarrow -13,89 \text{ mag}$, $1 \text{ mag} \Leftrightarrow 10^{-6} \text{ lx}$, $6 \text{ mag} \Leftrightarrow 10^{-8} \text{ lx}$.
- ☀ Osvetlenie E je dané zdanlivým tokom žiarenia, a preto:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log (F_1^* / F_2^*)$$

zdanlivá magnitúda

Keďže tok žiarenia závisí od vzdialenosti, zdanlivá magnitúda nemusí odrážať skutočnú jasnosť objektov. Napr. Sírirus (-1,46) mag má svietivosť 25,4 L_{\odot} , avšak zdanlivo menej jasný Deneb (1,25 mag) má svietivosť až 196 000 L_{\odot} .

- ☀ Zdanlivý tok však závisí nielen od vzdialenosti, ale aj od absorpcie v medziľahlom prostredí, citlivosti detektora, ...

$$m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2} = -2,5 \log (F_{\lambda_1}^* / F_{\lambda_2}^*)$$

Absolútna magnitúda

- ☀ Magnitúda objektu, akú by mal vo vzdialenosti 10 pc.

$$M_{\lambda_1} - M_{\lambda_2} = -2,5 \log \{F_{\lambda_1}^*(10) / F_{\lambda_2}^*(10)\}$$

kde $F_{\lambda_1}^*(10)$ a $F_{\lambda_2}^*(10)$ sú zdanlivé toky žiarenia objektov vo vzdialenosti 10 pc. Napr. absolútna magnitúda Slnka je 4,8 mag.

- ☀ Porovnanie zdanlivej m_λ a absolútnej magnitúdy M_λ pre ten istý objekt vedie k vzťahu:

$$m_\lambda - M_\lambda = 5 \log r - 5 + A_\lambda(r)$$

$m - M$ sa nazýva *modul vzdialenosti* a umožňuje určiť vzdialenosť objektu. $A_\lambda(r)$ udáva medzihviezdnu absorpciu.

- ☀ Ak vo vzťahoch vystupujú celkové toky žiarenia (F , $F(10)$, ...), zodpovedajúce magnitúdy (zdanlivá, absolútna) označujeme ako *bolometrické*. Pre absolútne bolometrické magnitúdy to vedie k vzťahu k zodpovedajúcim svietivostiam L :

$$M_{\text{bol},1} - M_{\text{bol},2} = -2,5 \log (L_1 / L_2)$$

$$1 \text{ pc} = 3.26156 \text{ l.y.} = 206\,264.8 \text{ AU} = 30.85678 \times 10^{15} \text{ m}$$

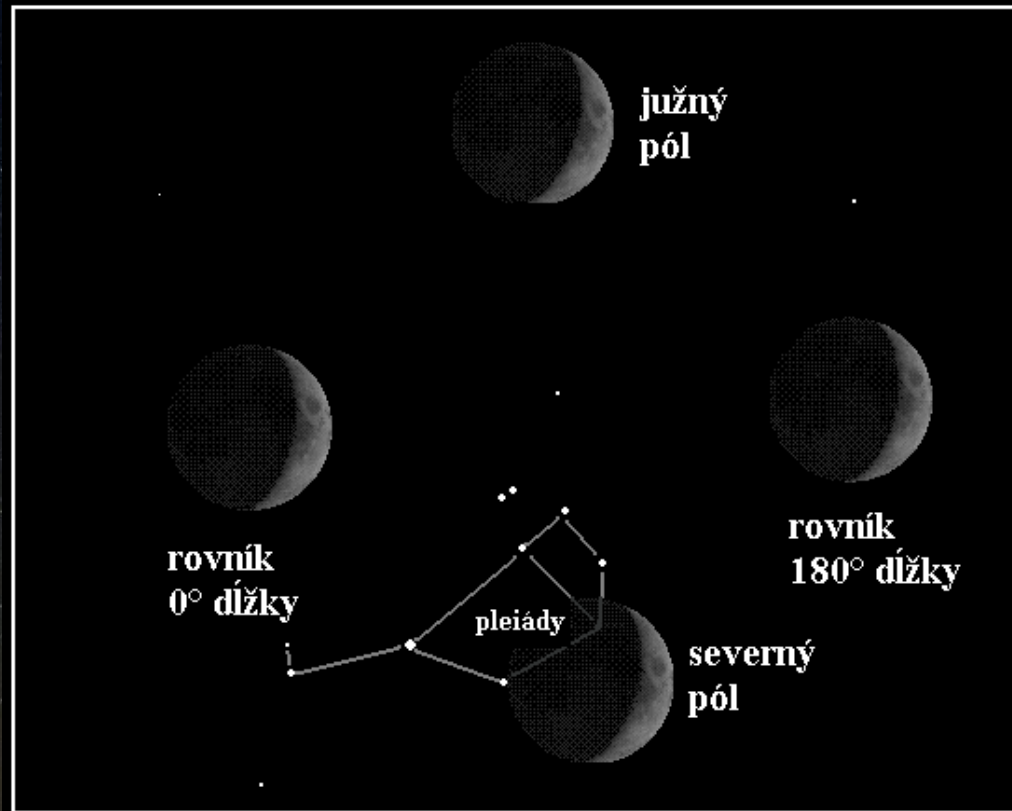
$$1 \text{ l.y.} = 63\,241.1 \text{ AU} = 9.46054 \times 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ AU} = 149\,597\,870\,700 \text{ m} = 1,49598 \times 10^{11} \text{ m}$$

Určovanie vzdialeností vo vesmíre

☀ Trigonometrická paralaxa

Paralaxa je zdánlivá zmena polohy pozorovaného objektu voči vzdialenému pozadiu, ak sa zmení miesto pozorovania.



Paralaxa Mesiaca. Pozorovanie Mesiaca z rôznych miest na Zemi spôsobuje zdánlivú zmenu jeho polohy voči hviezdному pozadiu.

Trigonometrická paralaxa

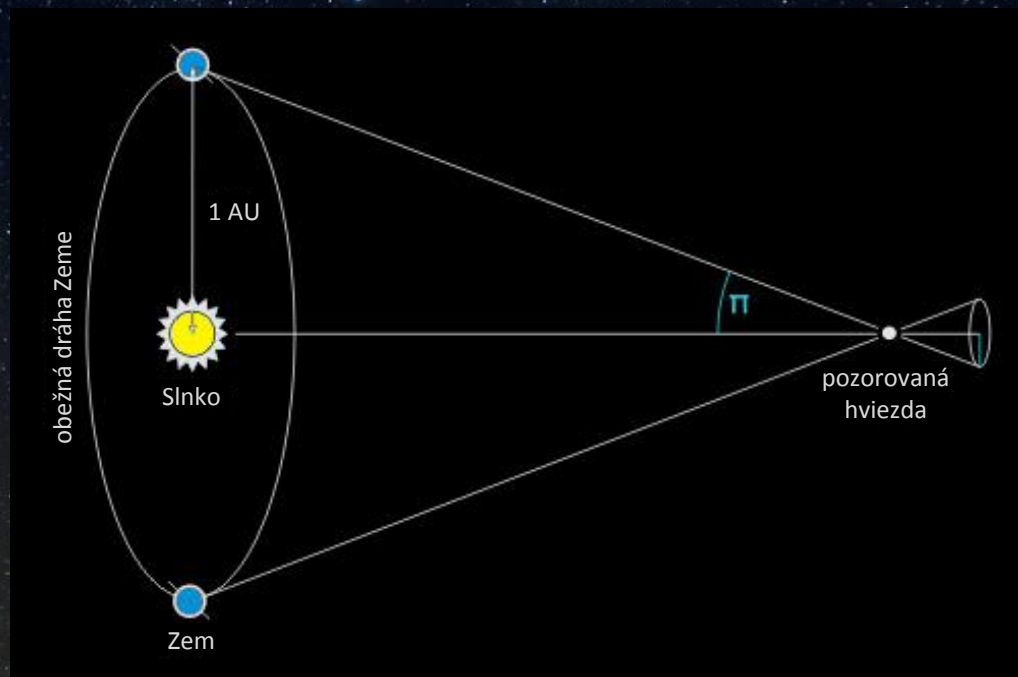
- ☀ Zdanlivú zmenu polohy objektu voči pozadiu popisuje tzv. *paralaktický uhol* π , ktorý rastie so vzájomnou vzdialenosťou pozorovacích miest (základňa D), no klesá so vzdialenosťou objektu od pozorovateľa (r).

$$\operatorname{tg}(\pi) = D / r$$

- ☀ Dánsky astronóm *Tycho Brahe* (1546 – 1601) spolu s *Tadeášom Hájkom z Hájku* (1525 – 1600) meraním paralaxy zistili, že kométa z roku 1577 sa pohybovala za dráhou Mesiaca, a teda ide o vesmírne teleso a nie jav v ovzduší, ako sa dovtedy predpokladalo.
- ☀ Zmerať paralaxu hviezd (napr. supernovy z roku 1572) sa však Tychovi Brahemu, vzhľadom na presnosť jeho meraní ($\approx 1'$), nepodarilo.
- ☀ Ako prví zmerali paralaxy hviezd (61 Cyg, α Lyr a α Cen) *Friedrich Bessel* (1784 - 1846), *Friedrich G. W. von Struve* (1793 - 1864) a *Thomas Henderson* (1798 – 1844) až v roku 1838.

Trigonometrická paralaxa

- ☀ Na meranie vzdialeností vesmírnych objektov sa využíva ročný pohyb Zeme okolo Slnka, pri ktorom má základňa dĺžku 1 AU ($1,49598 \times 10^{11}$ m).



- ☀ Vzhľadom na veľké vzdialenosti hviezd (napr. najbližšia hviezda Proxima Centauri so vzdialenosťou 4,2 l.y. má paralaxu len $0,77''$), $\text{tg}(\pi) \approx \pi$.
- ☀ Paralaxe $1''$ zodpovedá vzdialenosť 1 pc ($= 3,26 \text{ l.y.} = 206\,264,8 \text{ AU} = 30,86 \times 10^{15} \text{ m}$).
- ☀ Ak použijeme **parsek** [pc] ako jednotku vzdialenosti a paralaktický uhol budeme merať v oblúkových sekundách [“], potom platí:

$$r = 1 / \pi$$

Trigonometrická paralaxa

- ☀ Meraniu vzdialeností hviezd pomocou trigonometrickej paralaxy sa venovala sonda *Hipparcos* (High Precision Parallax Collecting Satellite, ESA, 1989). Zmerala paralaxy 118 218 hviezd s presnosťou $(0,6 - 1,0) \times 10^{-3}''$.
- ☀ S ešte vyššou presnosťou $(20 - 200) \times 10^{-6}''$ zmeria vzdialenosti miliardy hviezd sonda *Gaia* (ESA), ktorá bola úspešne vypustená 19. 12. 2013.



Určovanie vzdialeností vo vesmíre

☀ Fotometrická paralaxa

Na určenie vzdialenosti objektu sa použije vzťah pre *modul vzdialenosti*:

$$m_{\lambda} - M_{\lambda} = 5 \log r - 5 + A_{\lambda}(r)$$

Jednoduchou úpravou pre hľadajú vzdialenosť r dostaneme:

$$r = 10^{(m_{\lambda} - M_{\lambda} + 5 - A_{\lambda}(r))/5}$$

Pre absolútnu bolometrickú magnitúdu dvoch objektov $M_{\text{bol},1}$ a $M_{\text{bol},2}$ platí:

$$M_{\text{bol},1} - M_{\text{bol},2} = -2,5 \log (L_1 / L_2)$$

kde L_1 a L_2 sú svietivosti týchto objektov. Ak druhým objektom bude Slnko, potom:

$$M_{\text{bol},1} - M_{\text{bol},\odot} = -2,5 \log (L_1 / L_{\odot})$$

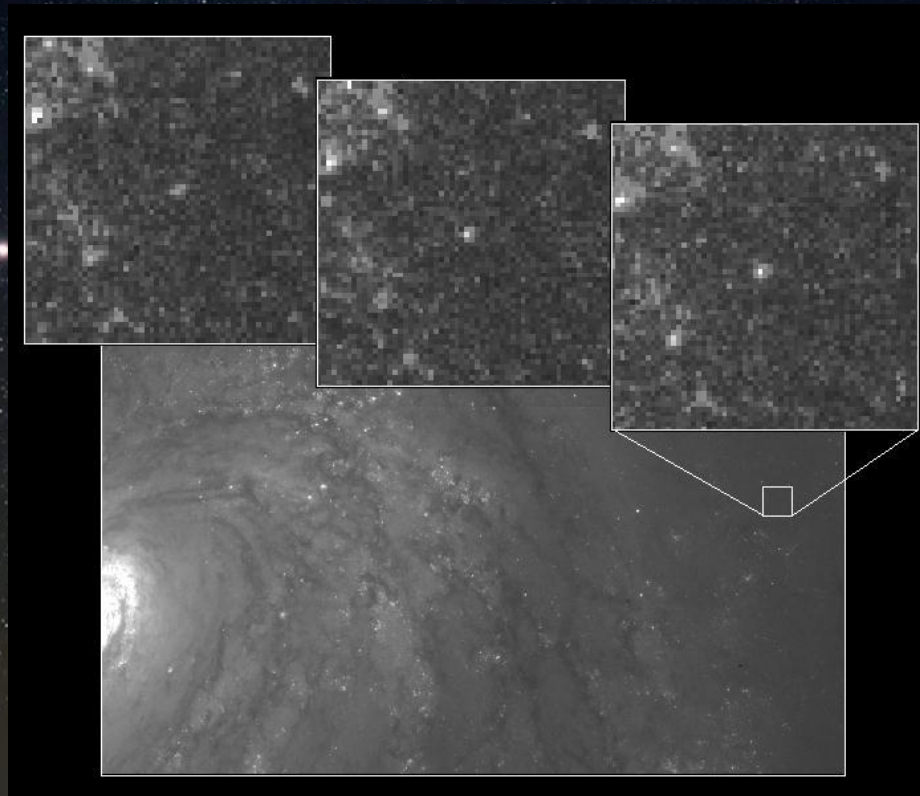
Ak použijeme svietivosť Slnka ($1 L_{\odot} = 3,839 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$) ako prirodzenú jednotku a $M_{\text{bol},\odot} = 4.74 \text{ mag}$, potom

$$M_{\text{bol}} = -2,5 \log (L) + 4.74 \quad (L[L_{\odot}])$$

Problém určenia vzdialenosti objektu sa previedol na určenie jeho absolútnej bolometrickej magnitúdy alebo svietivosti.

Fotometrická paralaxa

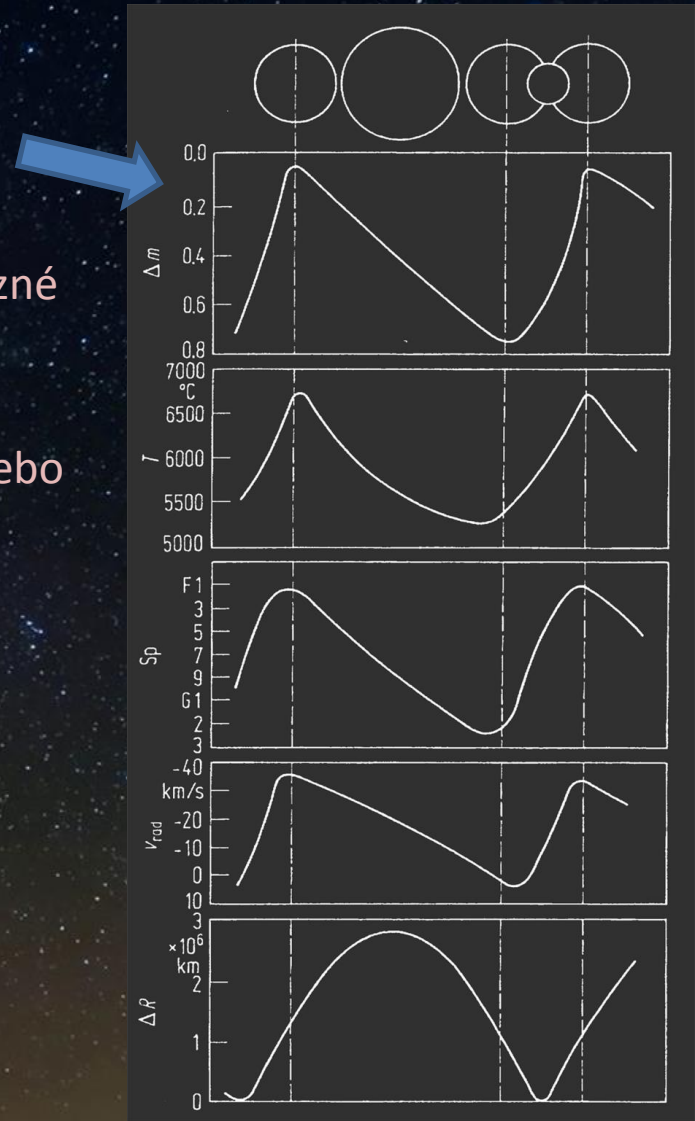
- ☀ Astronómovia preto hľadajú a skúmajú vo vesmíre také typy objektov, pre ktoré dokážu určiť ich svietivosť na základe merania iných vlastností (napr. pre *Cefeidy* - pulzujúce premenné hviezdy, na základe periódy ich pulzácií) alebo pre ktoré je ich svietivosť dobre známa (napr. maximálna svietivosť *supernov typu Ia*).



Pozorovanie zmien jasnosti pulzujúcej premennej hviezdy typu Cefeida v galaxii M100 pomocou *Hubble*ovho vesmírneho ďalekohľadu.

Pulzujúce premenné hviezdy

- ☀ Pulzácie (zmeny polomeru hviezdy ΔR) sú sprevádzané zmenami jasnosti (Δm), povrchovej teploty (T), spektrálneho typu (Sp) a radiálnej rýchlosti (v_{rad}) hviezdy s rovnakou periodicitou.
- ☀ Pulzácie môžu byť radiálne, ako aj neradiálne (torzné deformácie povrchu, stojaté povrchové vlny).
- ☀ Periodicita premennosti je buď veľmi presná (*Cefeidy*), viac menej pravidelná (typ *Mira Ceti*) alebo nepravidelná (typ *RV Tau*).
- ☀ Tvoria približne 70% všetkých premenných hviezd (výberový efekt).



Cefeidy

- ☀ Sú to obri a nadobri spektrálnych typov **F** a **G** s vysokou svietivosťou, ktorí ležia v hornej časti oblasti nestability. Sú to mladé hmotné hviezdy (**10 – 20 M_{\odot}**).
- ☀ Pulzácie spôsobujú zmeny spektra v rozmedzí jednej spektrálnej triedy so zmenou teploty v rozsahu zhruba 1500 K.
- ☀ Sú striktne periodické s periódami od 2 do 40 dní a amplitúdami zmien jasnosti do jednej magnitúdy.
- ☀ Vzťah medzi periódou pulzácií Cefeíd a ich svietivosťou odhalila v 20. rokoch 20. storočia **Henrieta Swan Leavittova** (1868 - 1921) na základe pozorovaní týchto premenných hviezd vo Veľkom a Malom Magellanovom mraku.
- ☀ Vzťah perióda - svietivosť umožňuje určovať vzdialenosti vo vesmíre. Ak na základe pozorovaní zmien jasnosti Cefeidy určíme periódu jej pulzácií, potom pomocou vzťahu:

$$M_V = -2,81 \log P - 1,43 \quad P[\text{dni}], \pm 0,1 \text{ mag}$$

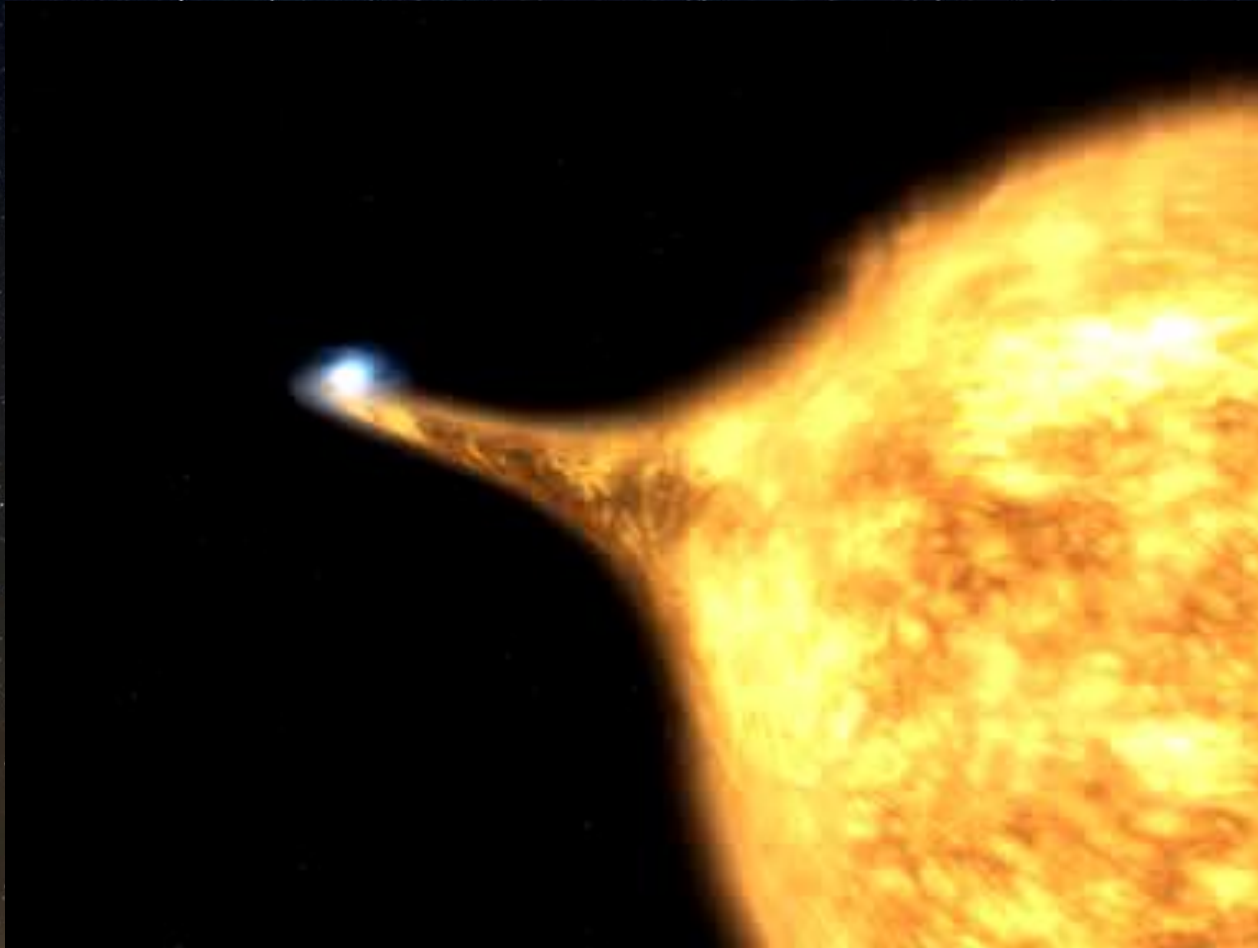
vieme určiť jej absolútnu magnitúdu (M_V). So znalosťou jej zdanlivej magnitúdy (m_V) a predpokladoch o medzihviezdnej absorpcii ($A_V(r)$), pomocou vzťahu

$$r = 10^{(m_V - M_V + 5 - A_V(r))/5}$$

vieme určiť jej vzdialenosť, ako aj vzdialenosť galaxie, v ktorej sa nachádza.

Supernovy typu Ia

- Progenitormi sú interagujúce dvojhviezdy zložené z (kyslíkovo – uhlíkového) bieleho trpaslíka (WD), na ktorého je prenášaná látka z blízkeho hviezdneho sprievodcu, zvyčajne červeného obra.

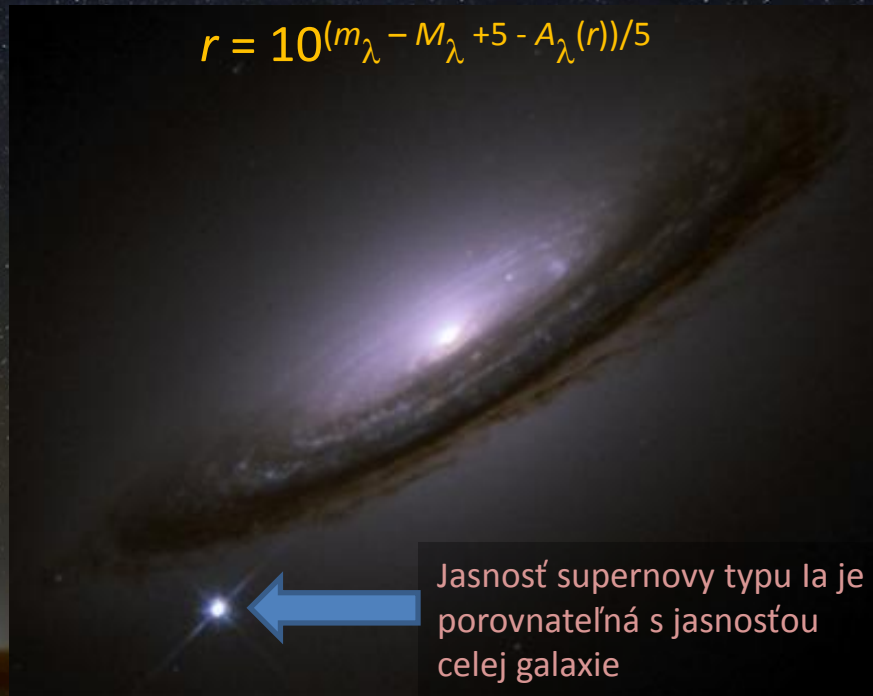


Simulácia priebehu vzplanutia supernovy typu Ia.

Supernovy typu Ia

- Keď sa hmotnosť WD priblíži k *Chandrasekharovej limitnej hodnote* ($1,4 M_{\odot}$), tlak degenerovaných elektrónov už nie je schopný zabrániť kolapsu. Teplota i hustota stúpnu a zapália sa TN reakcie uhlíka. Behom niekoľkých sekúnd sa reakcia rozhorí v značnej časti WD, pričom uvoľnená energia ($1 - 2 \times 10^{44}$ J) je schopná rozmetať WD - pozorujeme explóziu supernovy.
- Nárazové vlny sa šíria rýchlosťou $5000 - 20000 \text{ km s}^{-1}$ a absolútna magnitúda dosiahne **-19.3 mag** (4 miliardy krát viac ako Slnko).
- Keďže uvoľnená energia (a teda aj absolútna magnitúda) je vždy približne rovnaká, vieme určiť vzdialenosť supernovy na základe vzťahu pre modul vzdialenosti:

$$r = 10^{(m_{\lambda} - M_{\lambda} + 5 - A_{\lambda}(r))/5}$$



Jasnosť supernovy typu Ia je porovnateľná s jasnosťou celej galaxie

Určovanie vzdialeností vo vesmíre

Dynamická paralaxa

- ☀ Určuje sa pomocou vizuálnych dvojhviezd, pre ktoré poznáme dobu obehu P .
- ☀ Za predpokladu o hmotnostiach zložiek M_1, M_2 na základe 3. Keplerovho zákona

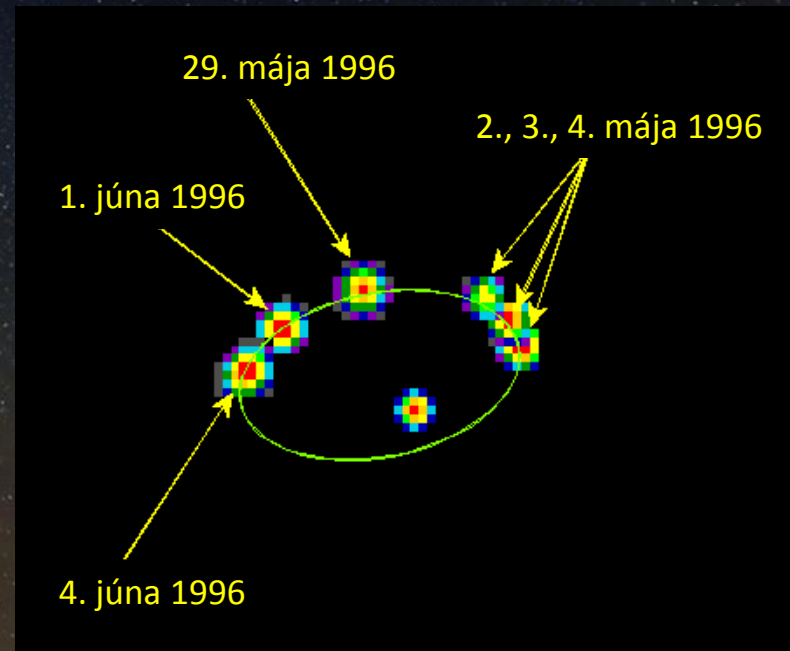
$$a^3 = (M_1 + M_2)P^2$$

vieme určiť dĺžku hlavnej polosi a .

- ☀ Ak poznáme uhlovú vzdialenosť zložiek a'' , vieme určiť vzdialenosť dvojhviezdy:

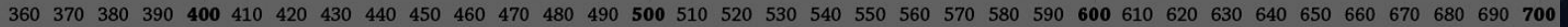
$$r = a / a''$$

$$r = (M_1 + M_2)^{1/3} P^{2/3} / a''$$



Zmena polohy zložiek vizuálnej dvojhviezdy Mizar A (USNO, NRL).

Farba



- ☀ Popisuje rozdelenie energie v spektre.
- ☀ V prípade tepelného žiarenia závisí od teploty zdroja žiarenia.
- ☀ Je vyjadrená pomocou *farebného indexu*:

$$CI = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}, \text{ kde } \lambda_1 < \lambda_2$$

- ☀ *Príklad*: $CI = m_B - m_V$, kde m_B je fotografická magnitúda a m_V je vizuálna magnitúda.
Ak $CI < 0$ ($m_B < m_V$), objekt je **modrejší** ako farebný štandard ($CI = 0$).
Ak $CI > 0$ ($m_B > m_V$), objekt je **červenší** ako farebný štandard ($CI = 0$).
- ☀ Meriame pomocou filtrov s priepustnosťou na rozličných vlnových dĺžkach.
- ☀ Ak použijeme viac ako 2 filtre, hovoríme o tzv. *fotometrických systémoch*.
- ☀ *Príklad*: medzinárodný Johnsonov systém: 3 širokopásmové ($\Delta\lambda \approx 100$ nm) filtre:

U	$\lambda \approx 364$ nm	$m_U = U$
B	$\lambda \approx 442$ nm	$m_B = B$
V	$\lambda \approx 540$ nm	$m_V = V$

Dva nezávislé farebné indexy: $U - B$ a $B - V$

Farebný štandard: hviezdy spektrálneho typu A0 V (Vega)

Slnko: $U - B = 0,13$ mag a $B - V = 0,65$ mag

Farebný exces

☀ Svetlo je ovplyvnené prostredím, ktorým prechádza.

☀ Rozptyl na medzihviezdnej látke závisí od λ :

$$A_\lambda = A_0 (\lambda_0 / \lambda)^n$$

☀ Keďže je viac rozptyľované krátkovlnné žiarenie, hovoríme o tzv. *medzihviezdnom sčervenaní*.

☀ *Farebný exces* udáva rozdiel pozorovaných a vlastných farebných indexov:

$$E_{U-B} = (U - B) - (U - B)_0$$

$$E_{B-V} = (B - V) - (B - V)_0$$

☀ Farebný exces je vzhľadom na medzihviezdne sčervenanie vždy kladný: $E_{U-B} > 0$, $E_{B-V} > 0$



Porovnanie farby hviezd otvorenej hviezdokopy Plejády pred (vľavo) a po (vpravo) oprave o medzihviezdne sčervenanie.

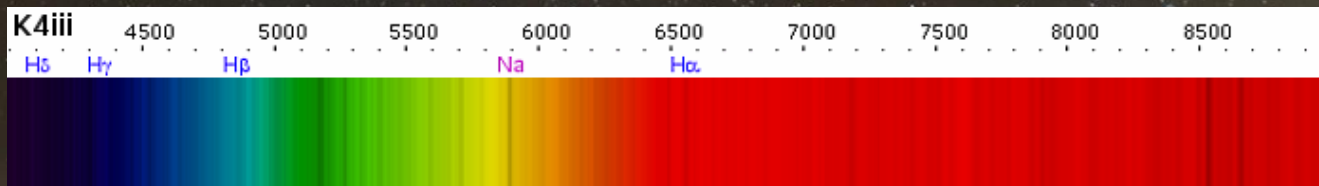
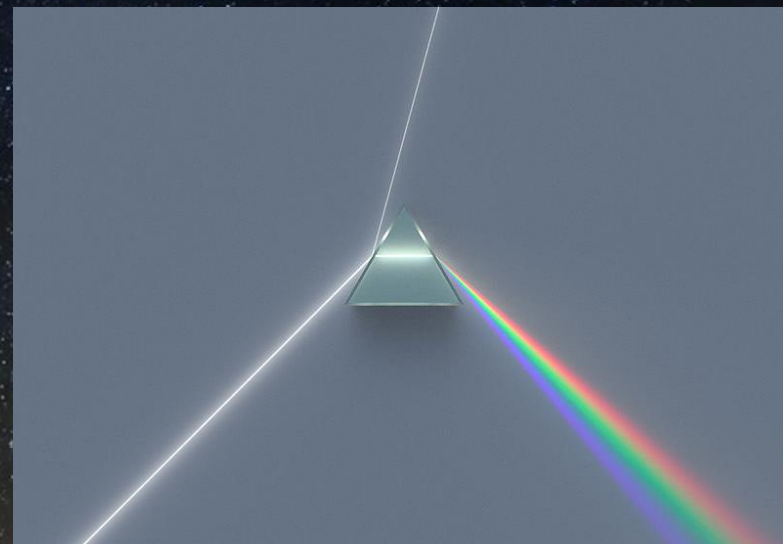
Spektrum

- ☀ Interval frekvencií, resp. vlnových dĺžok elektromagnetického žiarenia.
- ☀ Energia je daná frekvenciou, resp. vlnovou dĺžkou vlnenia:

$$E = h \nu$$

$$E = hc / \lambda$$

kde h je Planckova konštanta, $h = 6.626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$ a c rýchlosť svetla vo vákuu ($c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$).



Príklady vzniku spektra disperziou na vodných kvapkách - dúha (vľavo) a na hranole.
Spektrum hviezdy spektrálneho typu K4 III.

Žiarenie absolútne čierneho telesa

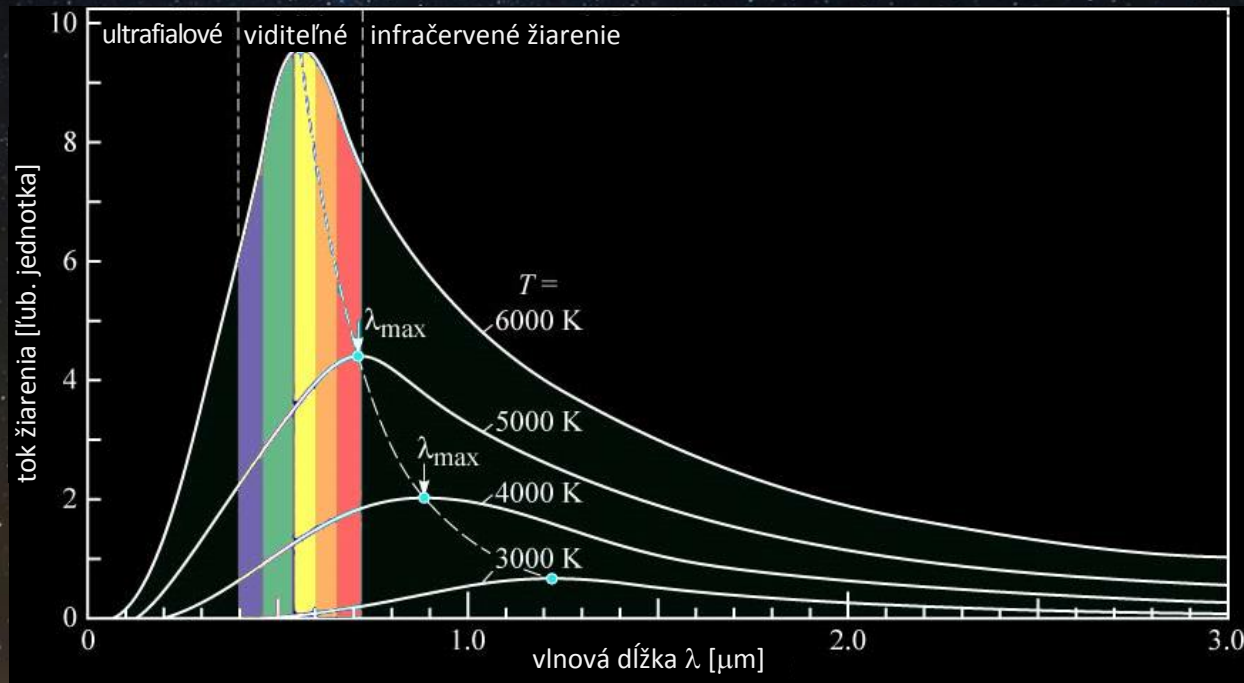
- ☀ Model AČT popisuje žiarenie telies s nenulovou teplotou ($T > 0 \text{ K}$), ktoré sú v termodynamickej rovnováhe.
- ☀ Spektrum AČT je dané Plankovou funkciou:

$$B_\nu(T) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$
$$d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$$

kde k je Boltzmanova konštanta $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ a T je teplota AČT.



Závislosť toku žiarenia od vlnovej dĺžky pre žiarenie AČT s uvedenými teplotami.

Žiarenie absolútne čierneho telesa

- ☀ Poloha maxima je daná Wienovým posunovacím zákonom:

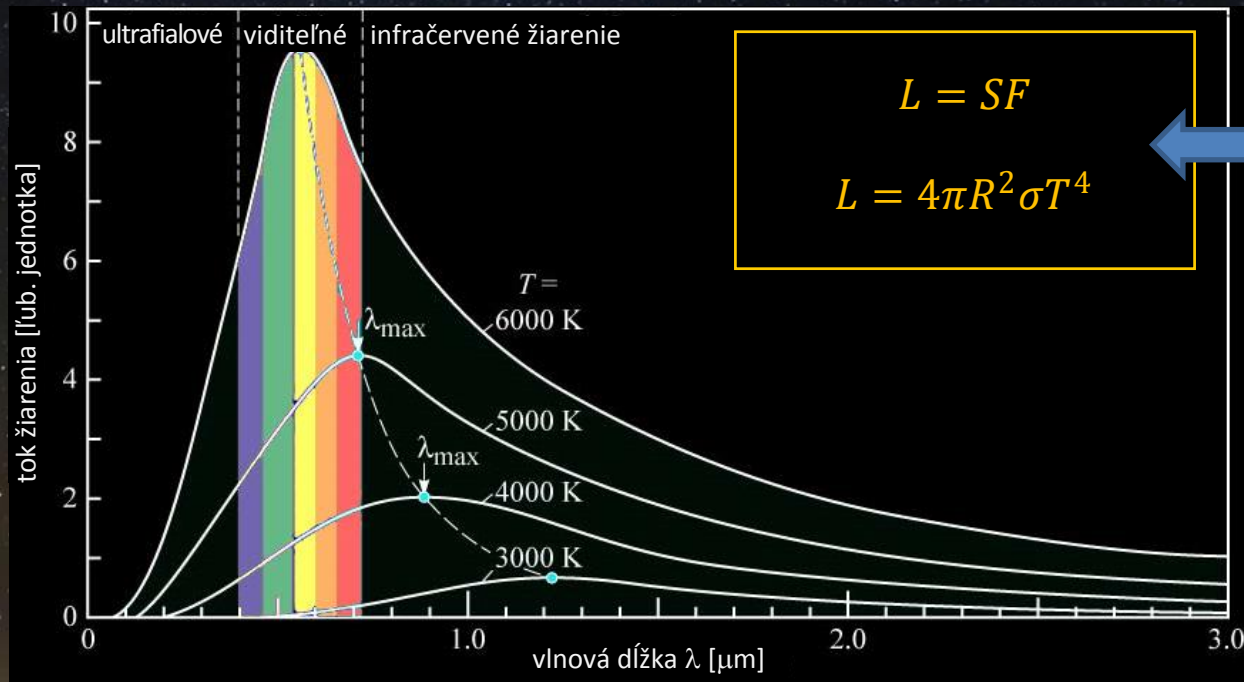
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

kde $b = 2,897 \times 10^{-3} \text{ m K}^{-1}$.

- ☀ Celkové množstvo vyžiarenej energie (cez všetky λ za jednotku času, z jednotky plochy, do všetkých smerov) je dané Stefanovým – Boltzmanovým zákonom:

$$F = \sigma T^4$$

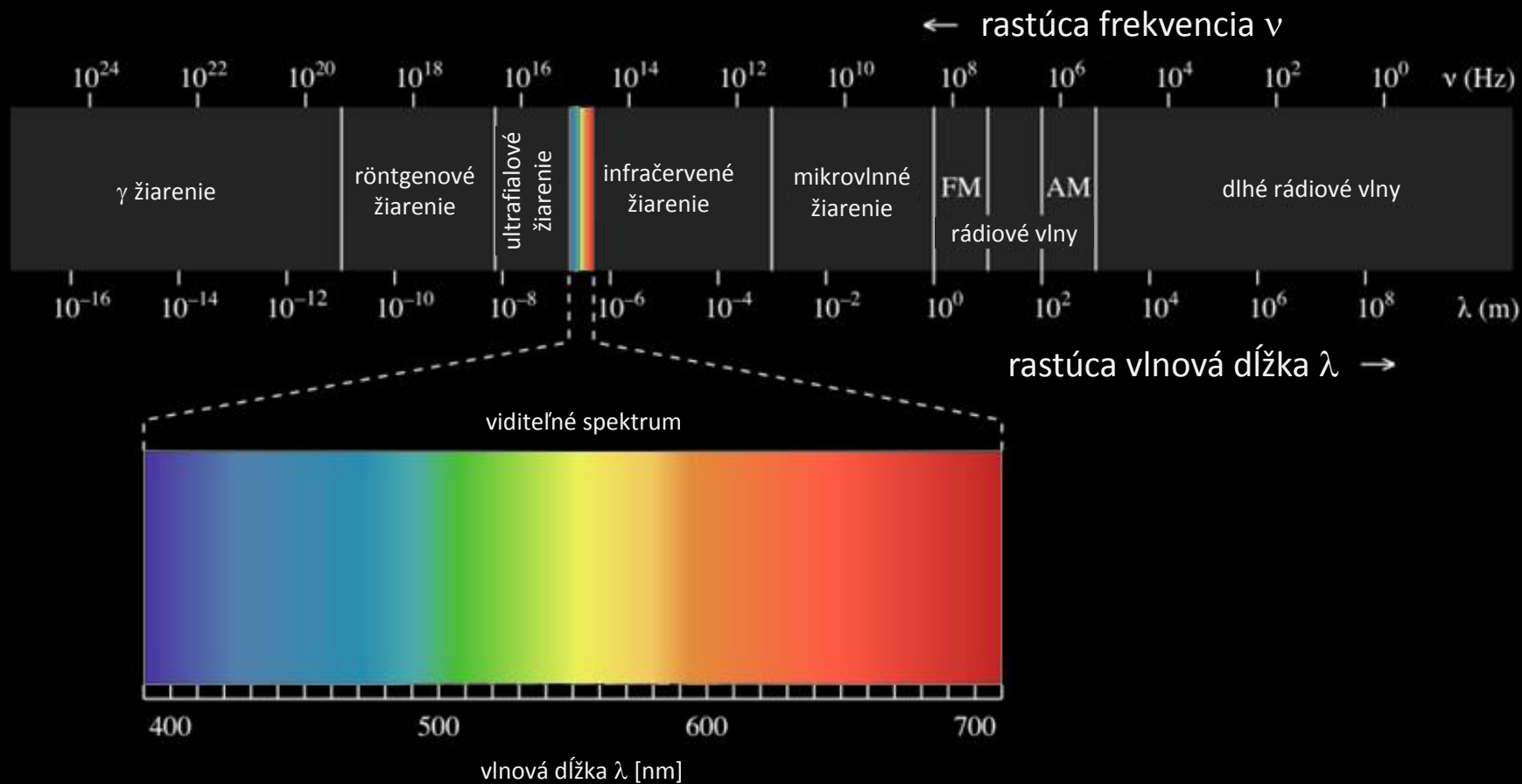
kde σ je Stefanova – Boltzmanova konštanta $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$.



Závislosť toku žiarenia od vlnovej dĺžky pre žiarenie AČT s uvedenými teplotami.

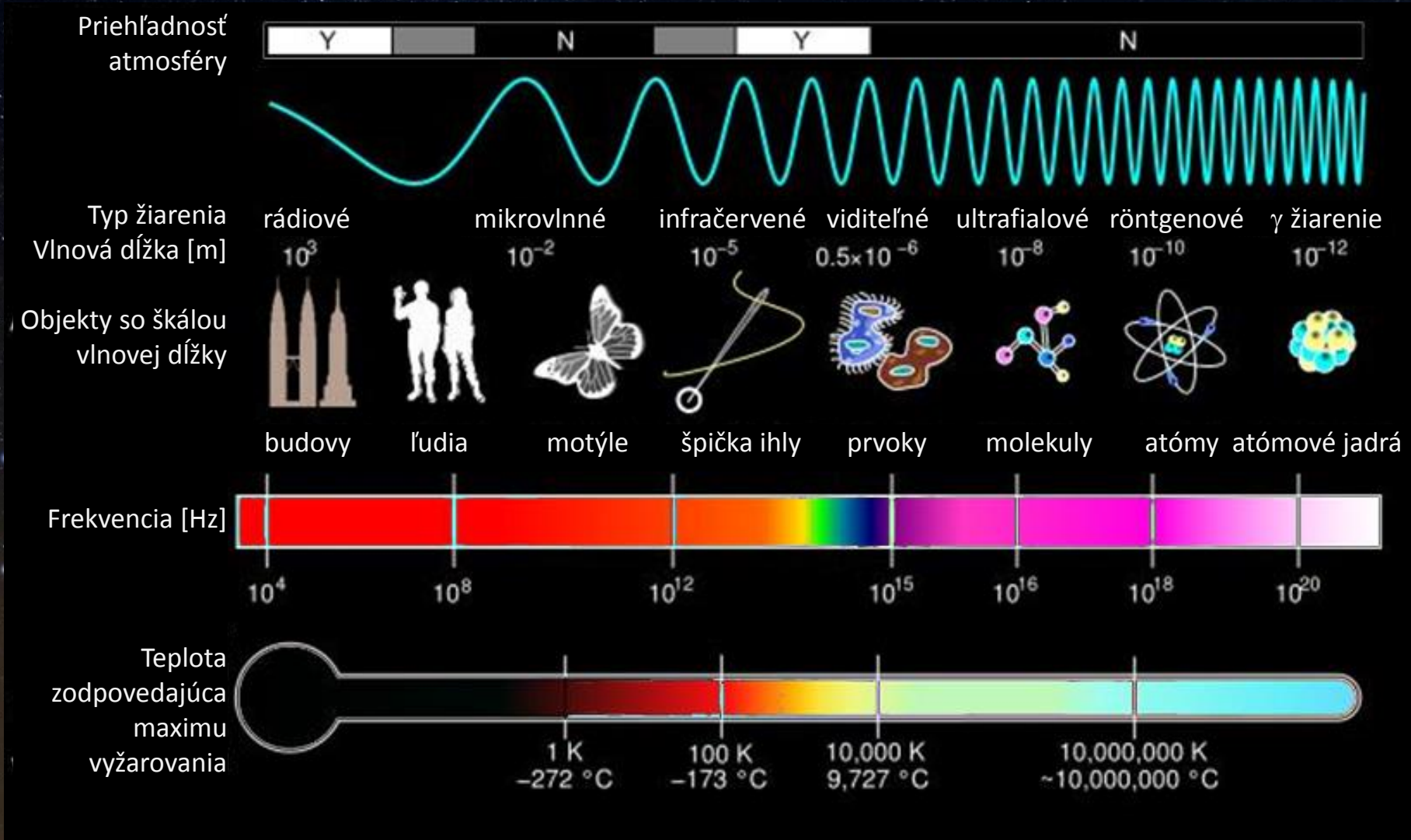
Svietivosť
sférickej
symetrickej
hviezdy, ktorá
žiari ako AČT.

Spektrum elektromagnetického žiarenia



Jednotlivé oblasti spektra elektromagnetického žiarenia.

Spektrum elektromagnetického žiarenia



Jednotlivé oblasti spektra elektromagnetického žiarenia.

Teplota hviezd

☀ Dôležitý fyzikálny parameter.

☀ Záleží na definícii:

☀ *Kinetická teplota* tepelného pohybu častíc: $E_k = \frac{3}{2}NkT$

☀ Pre svietivosť sféricky symetrickej hviezd, ktorá žiari ako AČT platí: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$

Polomer R i svietivosť L vieme merať \Rightarrow možno použiť na určenie teploty T

Lenže: hviezdly nežiaria ako AČT!

☀ *Efektívna teplota* T_{eff} – teplota takého AČT, ktorého celkový tok žiarenia (cez všetky vlnové dĺžky) je rovnaký ako skúmaného telesa: $F = \sigma T_{\text{eff}}^4$

☀ *Žiarivá teplota* T_R – teplota takého AČT, ktorého tok žiarenia v danej spektrálnej oblasti je rovnaký ako skúmaného telesa.

☀ *Farebná teplota* T_C – teplota takého AČT, ktorého (relatívny) priebeh toku žiarenia v danej spektrálnej oblasti je rovnaký ako skúmaného telesa.

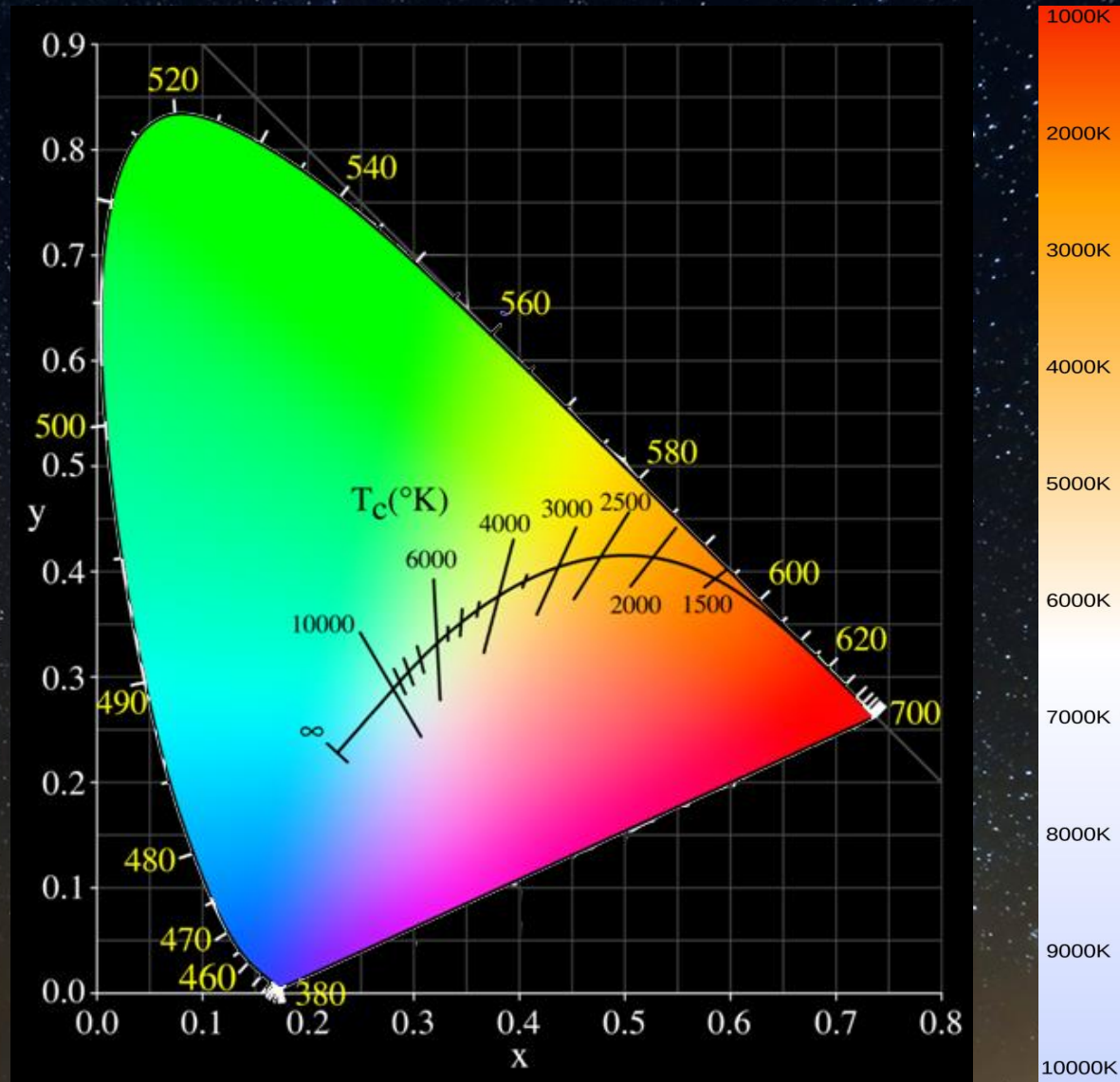
$$CI = m_{\lambda_1 - \lambda_2} = 12,5(\log \lambda_1 - \log \lambda_2) + 1,086 \frac{hc}{kT_C} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

Pre AČT platí: $T_{\text{eff}} = T_R = T_C$

Pre Slnko: $T_{\text{eff}} = 5770 \text{ K}$, $T_R(\text{viz.}) = 6050 \text{ K}$, $T_R(\text{UV}) = 5895 \text{ K}$

$T_C(300 - 400 \text{ nm}) = 4850 \text{ K}$, $T_C(410 - 950 \text{ nm}) = 7140 \text{ K}$

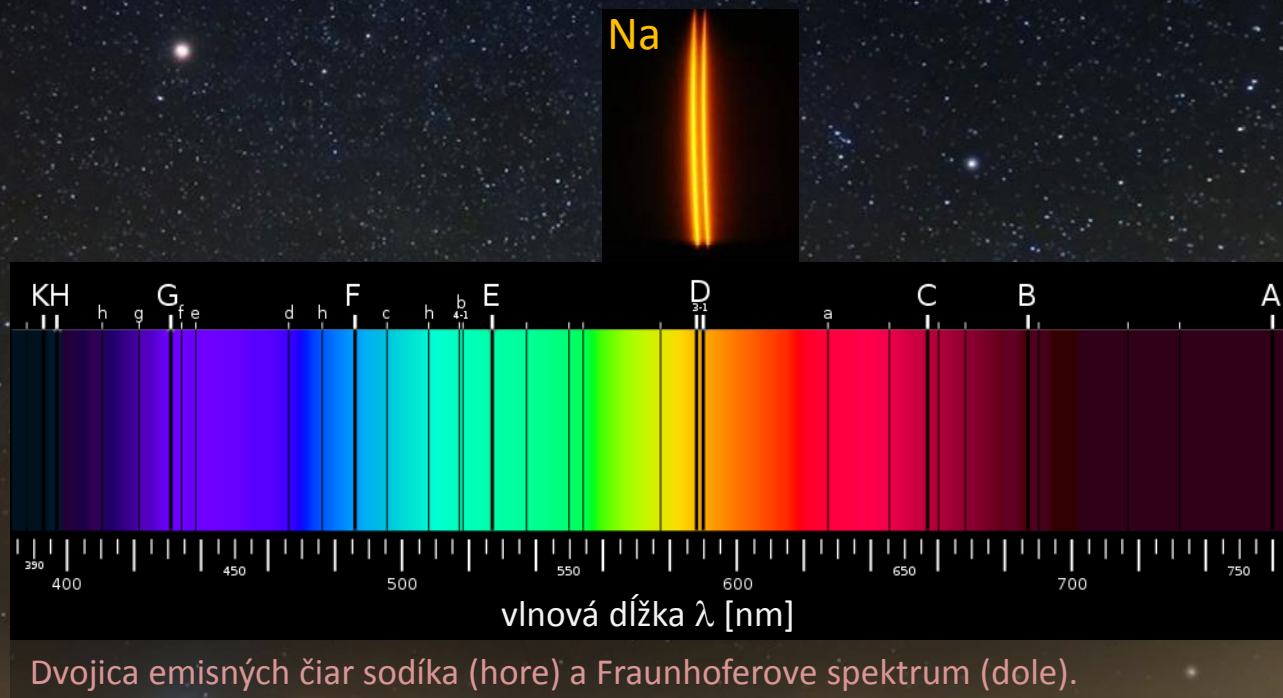
Teplota hviezd



Poloha telies s rôznou teplotou T_c vo farebnom priestore (vľavo) a zodpovedajúca farba (vpravo).

Spektrá atómov a molekúl

- ☀️ 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 vlnová dĺžka niektorých Fraunhoferových čiar zodpovedá charakteristikám emisných čiar v spektre rozžeravených kovov. Správne usúdili, že tmavé čiary v slnečnom spektre sú spôsobené absorpciou príslušných chemických prvkov v atmosfére Slnka.
- ☀️ Spektrum *spojité* a *čiarové (absorpčné, emisné)*.
- ☀️ Vznik spektrálnych čiar vysvetlila až *kvantová mechanika*.



Dvojica emisných čiar sodíka (hore) a Fraunhoferove spektrum (dole).

Spektrá atómov a molekúl

- ☀ Model atómu a *časticovo-vlnový dualizmus*. $\lambda = \frac{h}{p}$
- ☀ *B. H. Rutherfordov* vs. *N. Bohrov* model atómu, *Louis de Broglieho* stojatá vlna.

$$n\lambda = 2\pi r \quad \Rightarrow \quad mvr = \frac{h}{2\pi}n$$

- ☀ Táto podmienka vedie k tomu, že energia (rýchlosť, polomer dráhy) elektrónu v atóme je *kvantovaná*, t.j. môže nadobúdať iba celočíselné násobky tzv. hlavného kvantového čísla n , $n \in \langle 1, \infty \rangle$.

- ☀ Pre vodík: $r = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2$ $v = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 h n}$ $E(n) = -\frac{m e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -R_y \frac{1}{n^2}$

kde $R_y = 13,60$ eV je Rydbergova konštanta.

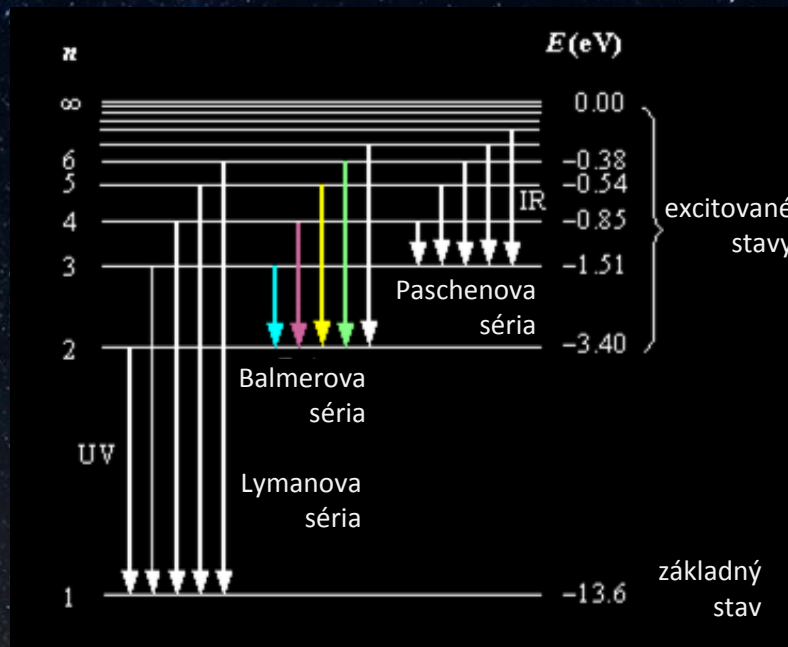
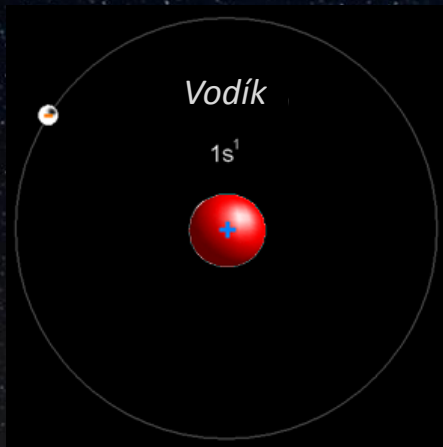
- ☀ Zmena energie (povolené prechody) sú len také, pre ktoré platí:

$$\frac{hc}{\lambda} = E(n_1) - E(n_2) = -R_y \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

- ☀ Podľa hodnoty n_1 , n_2 rozlišujeme prechody:

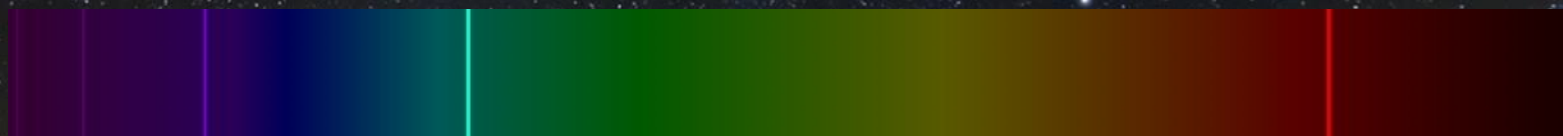
- ☀ *viazano-viazané* (n_1, n_2 konečné) \Rightarrow čiarové spektrum
($n_1 > n_2$ emisné spektrálne čiary, $n_1 < n_2$ absorpčné spektrálne čiary)
- ☀ *viazano-volné* (n_1 konečné, $n_2 = \infty$) \Rightarrow spojité spektrum (ionizácia)
- ☀ *volno-viazané* ($n_1 = \infty$, n_2 konečné) \Rightarrow spojité spektrum (rekombinácia)
- ☀ *volno-volné* ($n_1 = \infty$, $n_2 = \infty$) \Rightarrow spojité spektrum

Spektrum neutrálneho vodíka (H I)



Hrany sérií:

n	názov	λ
1	Lyman	91,2 nm
2	Balmer	364,7 nm
3	Paschen	820,6 nm
4	Brackett	1458,8 nm
5	Pfund	2279,0 nm



H δ

H γ

H β

H α

Spektrum záporného iónu vodíka H⁻

- ☀ Väzbová energia druhého e⁻ je 0,75 eV \Rightarrow fotón s $\lambda < 1650,2$ nm uvedie atóm späť do neutrálneho stavu.
- ☀ Dostupná iba jedna hladina \Rightarrow iba viazано-voľné a voľno-viazané prechody \Rightarrow vytvára *spojité spektrum*.

Spektra atómov

Vodík

Uhlík

Hélium

Dusík

Lítium

Neón

Kyslík

Horčík

Vápník

Kremík

Argón

Síra

Sodík

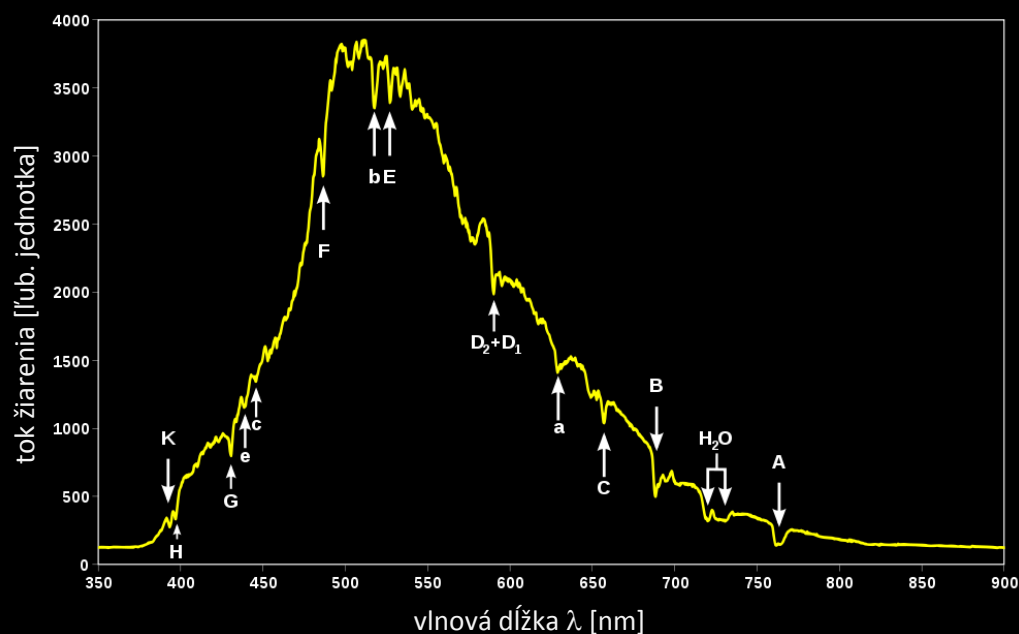
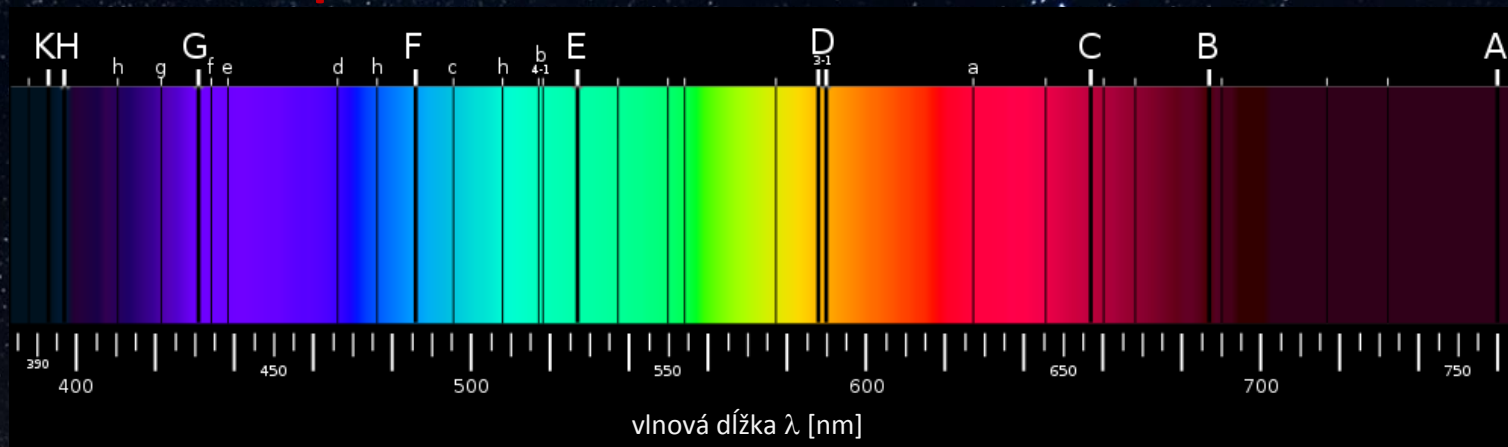
Železo

Kryptón

Hliník

Spektra jednotlivých chemických prvkov.

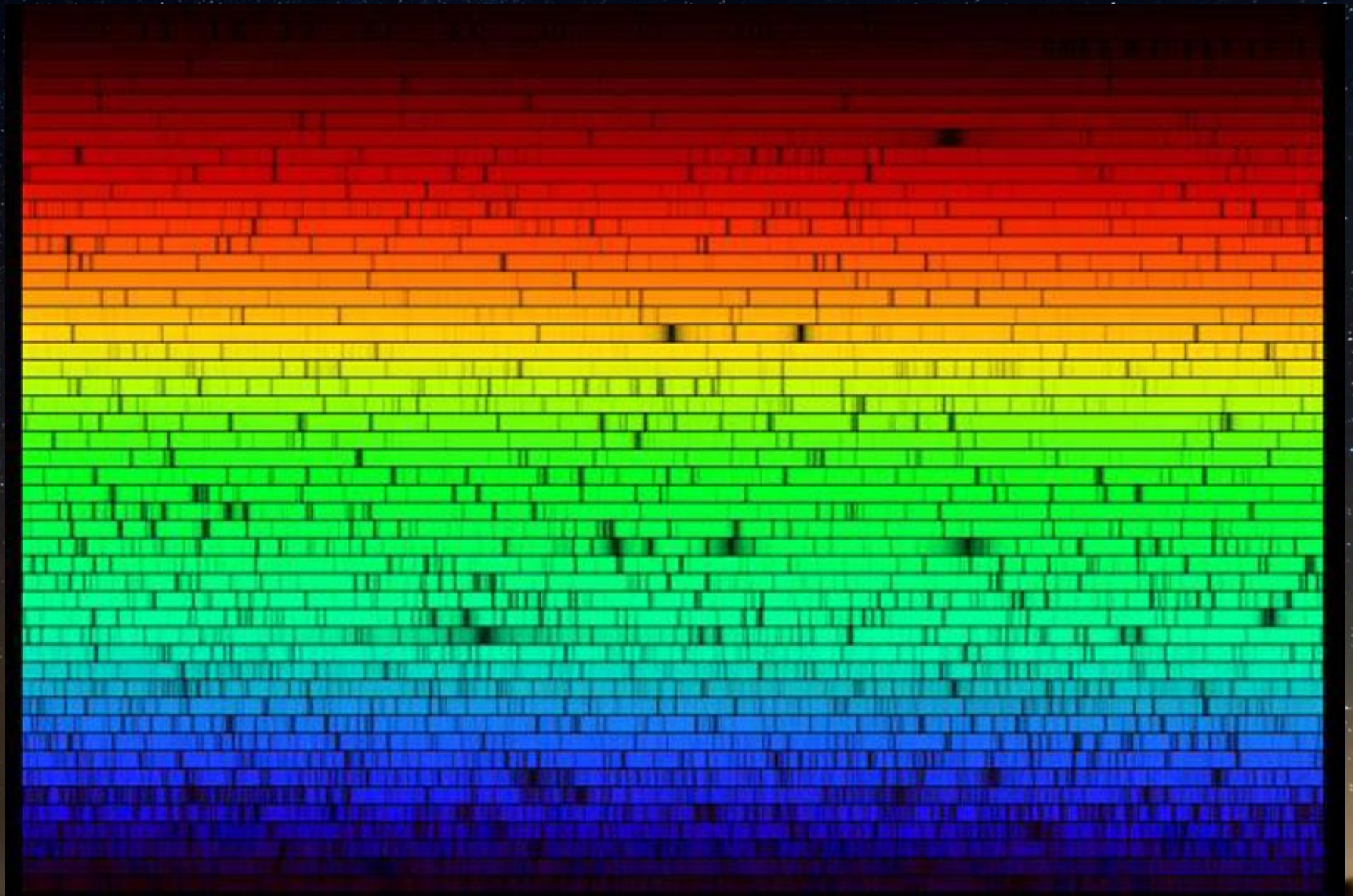
Fraunhoferove spektrum



Fraunhoferove spektrum (hore), spektrum Slnka s vyznačenými Fraunhoferovými spektrálnymi čiarami (dole) a tabuľka významných spektrálnych čiar s ich označením, prislúchajúcim chemickým prvkom a vlnovou dĺžkou (vpravo).

Ozn.	Prvok	λ [nm]	Ozn.	Prvok	λ [nm]
y	O ₂	898.765	c	Fe	495.761
z	O ₂	822.696	F	Hβ	486.134
A	O₂	759.370	d	Fe	466.814
B	O₂	686.719	e	Fe	438.355
C	Hα	656.281	G'	H γ	434.047
a	O ₂	627.661	G	Fe	430.790
D₁	Na	589.592	G	Ca	430.774
D₂	Na	588.995	h	H δ	410.175
d	He	587.562	H	Ca⁺	396.847
e	Hg	546.073	K	Ca⁺	393.368
E	Fe	527.039	L	Fe	382.044
b ₁	Mg	518.362	N	Fe	358.121
b ₂	Mg	517.270	P	Ti ⁺	336.112
b ₃	Fe	516.891	T	Fe	302.108
b ₄	Fe	516.891	t	Ni	299.444
b ₄	Mg	516.733			

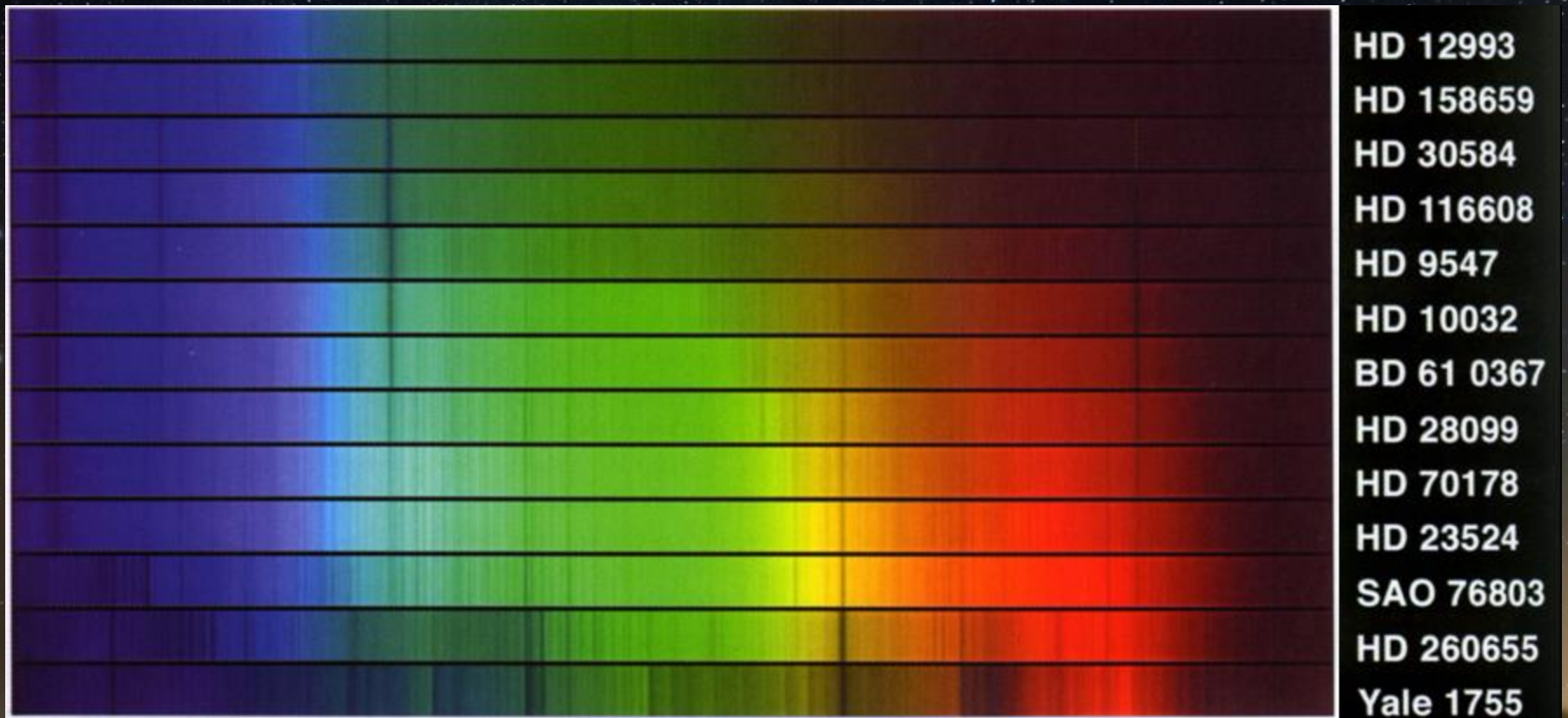
Spektrum Slnka



Spektrum Slnka vo vysokom spektrálnom rozlíšení.

Spektrá hviezd

- ☀ Spektrá hviezd sa líšia množstvom a vlastnosťami spektrálnych čiar jednotlivých chemických prvkov.
- ☀ Prítomnosť, intenzita a tvar spektrálnych čiar závisí od teploty, tlaku, chemického zloženia, pohybového stavu (rotácia) a prítomnosti magnetického a elektrického poľa v mieste ich vzniku (atmosféra hviezdy).



Spektrá jednotlivých hviezd, ktorých označenie je uvedené vpravo.

Spektrálna klasifikácia

- ☀ Rozmanitosť, ale zároveň aj podobnosť vlastností spektier jednotlivých hviezd vytvorila potrebu ich katalogizácie, tzv. *spektrálnej klasifikácie*.
- ☀ Opiera sa o prítomnosť (resp. neprítomnosť) dôležitých absorpčných čiar atómov a molekúl (He, He, H, Ca, Ca⁺, Fe, TiO, ...) a ich intenzitu.
- ☀ Prvá takáto klasifikácia (tzv. *Harvardská*) vznikla na pôde *Harvard College Observatory* pod vedením astronóma *Edwarda C. Pickeringa*.
- ☀ Spektrá (390 - 500 nm) boli fotografované malým fotografickým ďalekohľadom s objektívovým hranolom, čo umožnilo súčasne klasifikovať veľké množstvo hviezd.
- ☀ Výsledky boli prvýkrát publikované v roku 1890 v tzv. Draperovom katalógu hviezdnych spektier (10 351 hviezd).
- ☀ Katalogizácia tisícov hviezdnych spektier by nebola možná bez tzv. Pickeringovho alebo Harvardského „počítača“, ktorý tvorili: *Williamina Flemingová*, *Annie J. Cannonová*, *Henrietta S. Leavittová* a *Antonia Mauryová*.
- ☀ Ide o tzv. jednorozmernú klasifikáciu; zaradovanie do jednotlivých spektrálnych typov závisí iba od jedného parametra (teploty).

Harvardská spektrálna klasifikácia

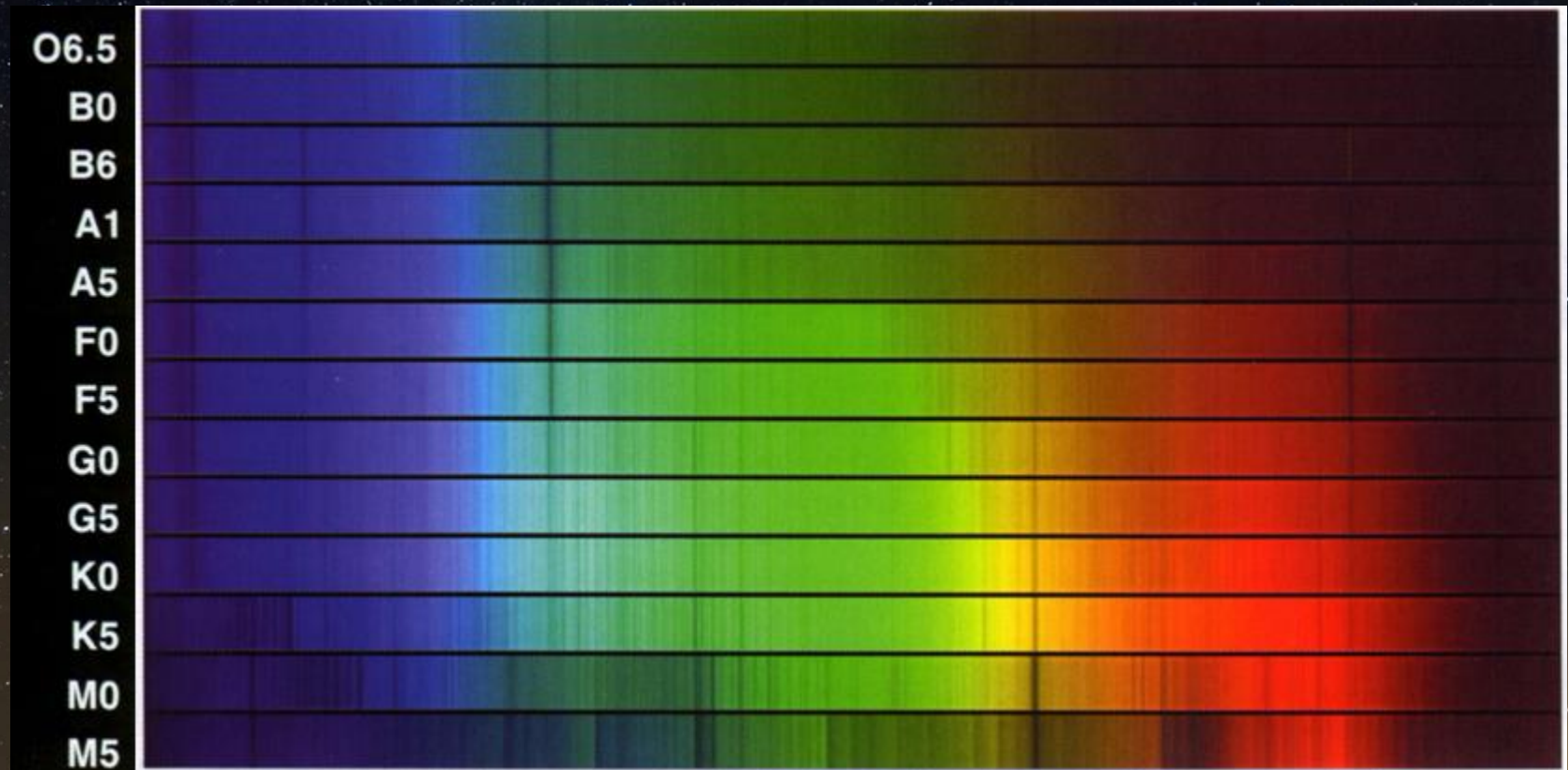
☀ Pôvodne bol použitý abecedný poriadok (podľa intenzity spektrálnych čiar H). Keď sa neskôr ukázalo, že prítomnosť a intenzita spektrálnych čiar závisí hlavne od teploty, bolo poradie zmenené. (mnemotechnická pomôcka: **Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me**).

Spektrálny typ	Spektrálne čiar	Farba	Zdanlivá farba	Teplota [K]	Hmotnosť [M_{\odot}]	Polomer [R_{\odot}]	Svietivosť [L_{\odot}]	Podiel
O	He ⁺ , C ⁺⁺ , N ⁺⁺ , He	Modrá	Modrá	≥ 33 000 K	≥ 16	≥ 6,6	≥ 30,000	~0,00003%
B	He, H	modrá až modrobiela	modrobiela	10 000 – 30 000 K	2,1 – 16	1,8 – 6,6	25 – 30 000	0,13%
A	H, He	biela	biela až modrobiela	7 500 – 10 000 K	1,4 – 2,1	1,4 – 1,8	5 – 25	0,6%
F	H, Ca ⁺	žltobiela	biela	6 000 – 7 500 K	1,04 – 1,4	1,15 – 1,4	1,5 – 5	3%
G	Ca ⁺ , H	žltá	žltobiela	5 200 – 6 000 K	0,8 – 1,04	0,96 – 1,15	0,6 – 1,5	7,6%
K	Ca, kovy	oranžová	žltooranžová	3 700 – 5 200 K	0,45 – 0,8	0,7 – 0,96	0,08 – 0,6	12,1%
M	Kovy, TiO	červená	oranžovočervená	≤ 3 700 K	≤ 0,45	≤ 0,7	≤ 0,08	76,45%

Tabuľka spektrálnych typov.

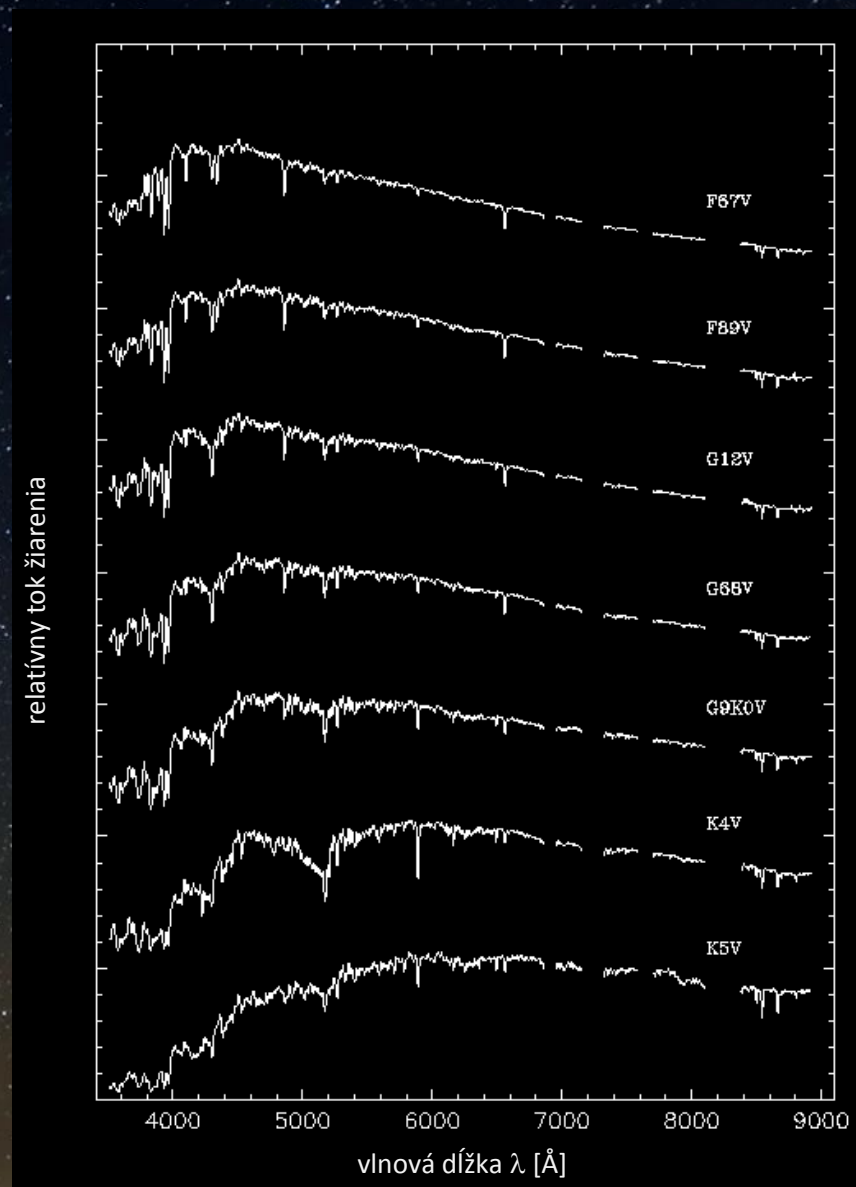
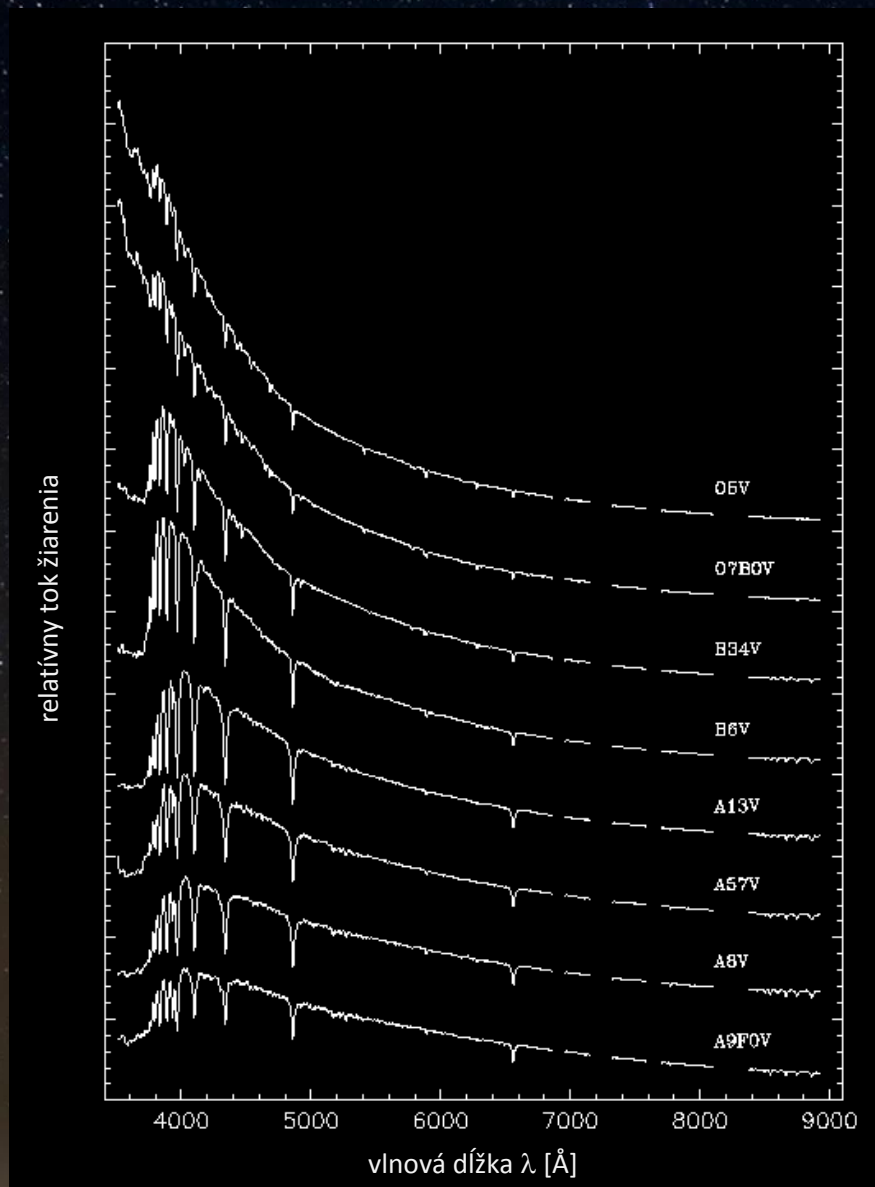
Harvardská spektrálna klasifikácia

- ☀ Neskôr bolo delenie do jednotlivých spektrálnych typov rozšírené na delenie do spektrálnych podtypov, ktoré sa označujú číslom (0 – 9) za písmenom označujúcim príslušný spektrálny typ.
- ☀ Spektrálny typ Slnka: **G**, presnejšie **G2**.



Príklady spektier hviezd jednotlivých spektrálnych typov.

Spektrálna klasifikácia



Príklady spektier hviezd jednotlivých spektrálnych typov.

Triedy svietivosti

- ☀ Pozorovania ukázali, že existujú hviezdy s rovnakým spektrálnym typom (teplotou T), no veľmi rozdielnou absolútnou magnitúdou (svietivosťou L).

- ☀ Ak budeme uvažovať, že hviezdy žiaria ako AČT:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

musia sa líšiť polomerom R .

- ☀ Hviezdy boli rozdelené do tried svietivosti:

0 - hyperobri

I(a, ab, b) - nadobri

II (a, ab, b) - jasní obri

III(a, ab, b) - obri

IV(a, b) - podobri

V(a, ab, b) - hviezdy hlavnej postupnosti

VI - podtrpaslíci

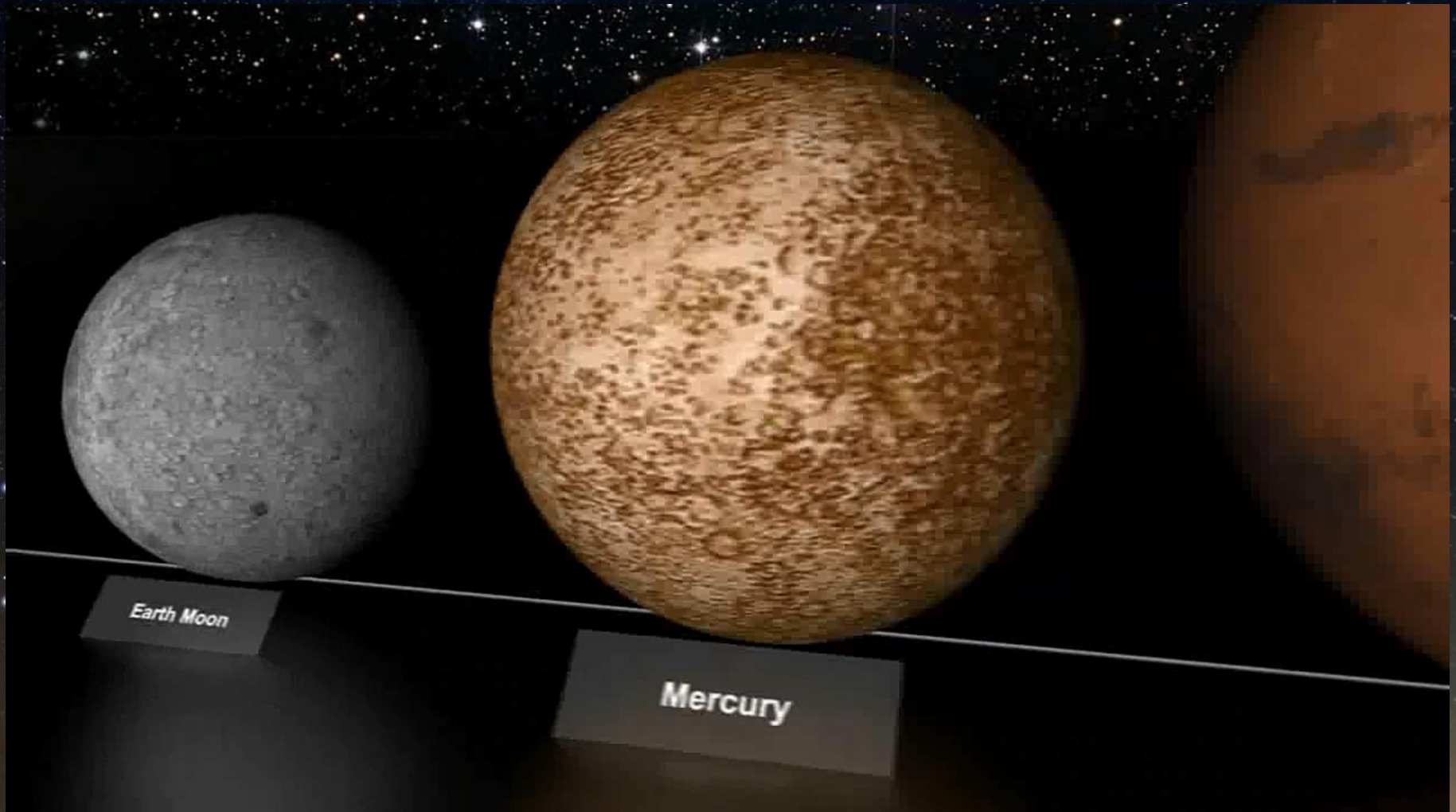
VII – bieli trpaslíci

- ☀ Klasifikácia podľa 2 parametrov sa označuje ako dvojrozmerná.

- ☀ Takáto klasifikácia je známa ako *Yerkesská klasifikácia*, alebo *klasifikácia MKK*, podľa astronómov *Williamu W. Morgana*, *Philipa C. Keenana* a *Edithy Kellmanovej*, ktorí tento systém prvý krát publikovali v roku 1943.

- ☀ Spektrálny typ Slnka je v MKK klasifikácii: **G2 V**.

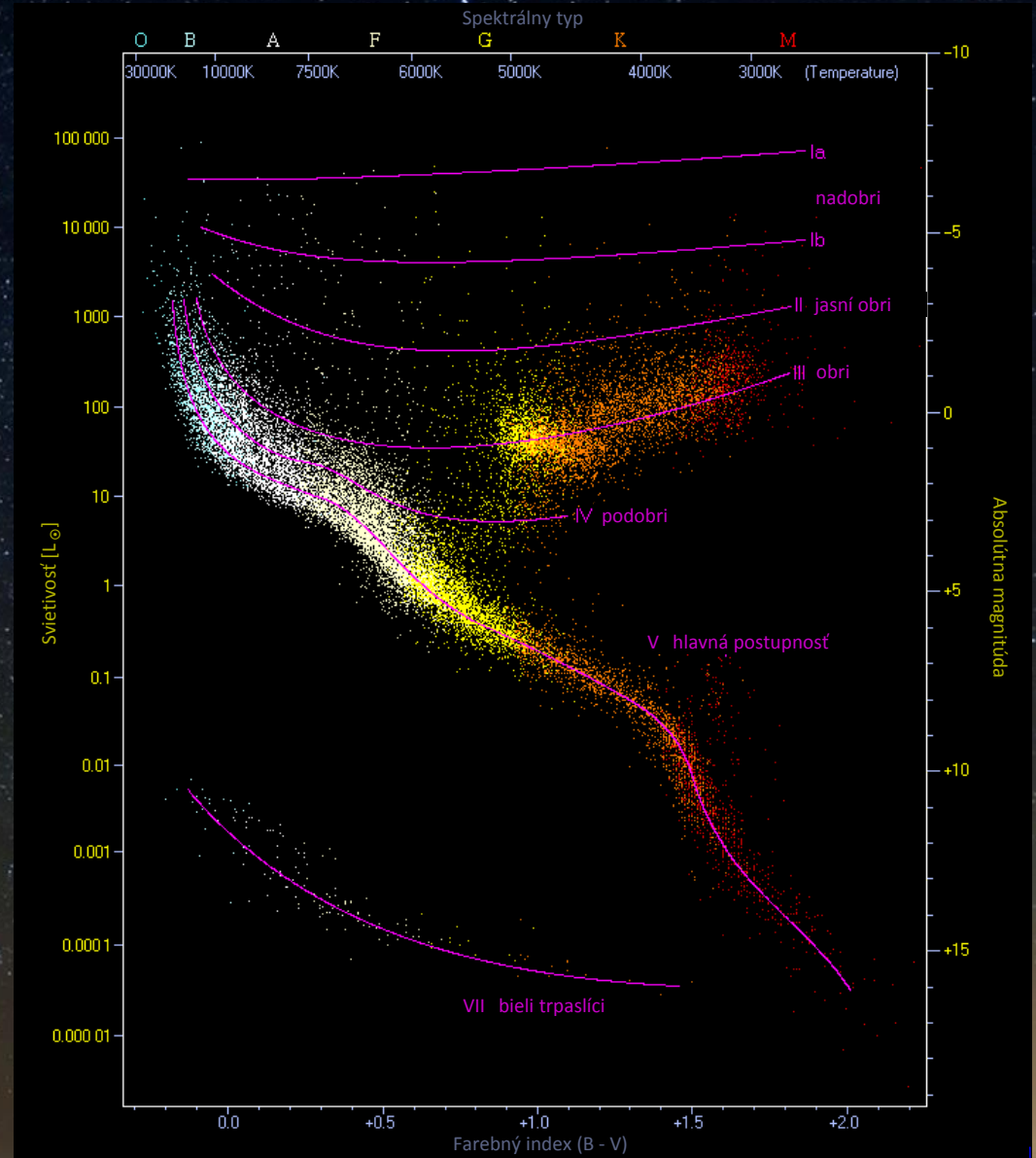
Veľkosti hviezd



Porovnanie veľkosti jednotlivých vesmírnych objektov, od planét slnečnej sústavy až po hviezdy jednotlivých tried svietivosti.

Hertzsprungov – Russellov diagram

- ☀ Hviezdy nie sú vo farebnom diagrame usporiadané náhodne.
- ☀ Hlavné oblasti:
 - ☀ Hlavná postupnosť
 - ☀ Vetva obrov
 - ☀ Oblasť trpaslíkov
- ☀ Využitie:
 - ☀ Určovanie vzdialeností hviezdokôp
 - ☀ Určovanie veku guľových hviezdokôp
 - ☀ Štúdium evolúcie hviezd




Hertzsprungov – Russellov diagram.

Určovanie hmotnosti hviezd

- ☀ Hlavný parameter, ktorý určuje stavbu a štruktúru hviezdy, jej vlastnosti, ako aj evolúciu.
- ☀ Interval hmotností: $M \in (0,1 - 100) M_{\odot}$, kde $1 M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$.
- ☀ Nie je možné určiť priamo.
- ☀ Určuje sa na základe gravitačného pôsobenia hviezdy na iné hmotné telesá pomocou všeobecného gravitačného zákona (I. Newton, 1687):

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \qquad F = m_1 a = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

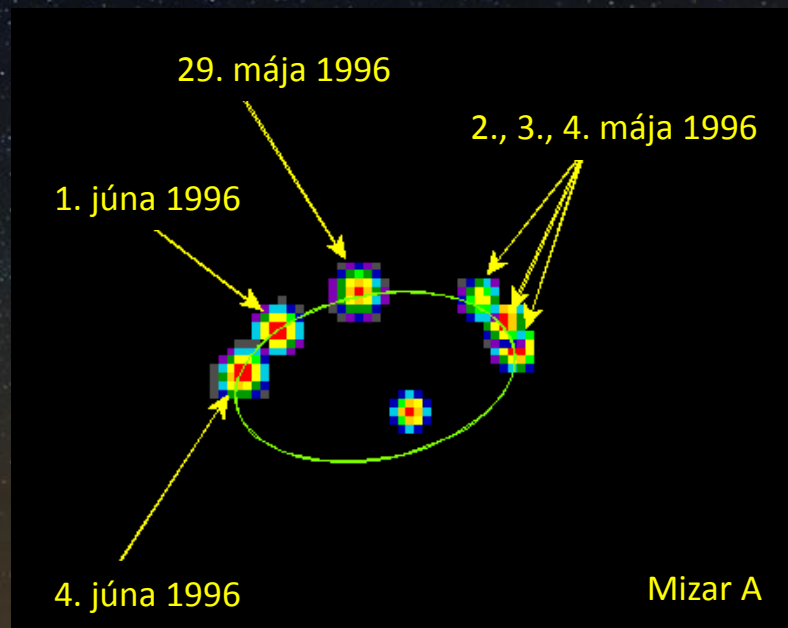
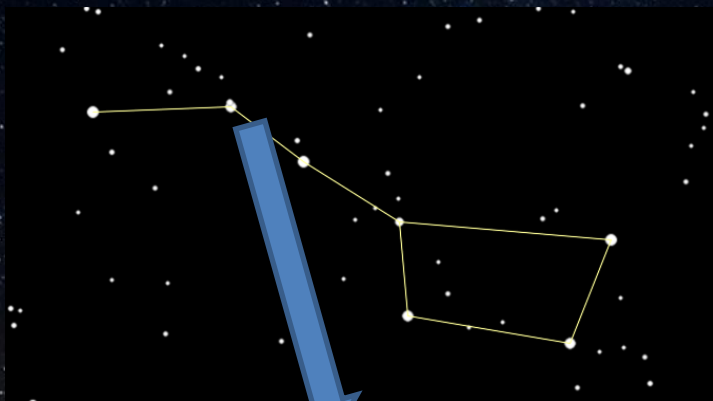
- ☀ Dvojhviezdy:
 - ☀ Optické
 - ☀ Vizuálne
 - ☀ Spektroskopické
 - ☀ Zákrytové



Vizuálna dvojhviezda Albireo (β Cyg).

Vizuálne dvojhviezdy

☀ Prvú vizuálnu dvojhviezdu (Mizar) objavil *Jean Baptiste Riccioli* v roku 1650.



Asterizmus Veľký voz (vľavo hore) s vyznačenou dvojicou hviezd Alcor a Mizar, ktoré tvoria optickú dvojhviezdu (vľavo dole). Mizar je však vizuálnou dvojhviezdou (vpravo hore) a jasnejšia zložka Mizar A je tiež dvojhviezdou (vpravo dole), ktorú však vieme rozlíšiť iba pomocou interferometrických pozorovaní.

Vizuálne dvojhviezdy

- ☀ Ak sa zložky dvojhviezdy pohybujú po kruhových dráhach musí platiť:

$$m_1 r_1 = m_2 r_2$$

- ☀ Ďalej musí platiť rovnováha gravitačnej a odstredivej sily:

$$F_G = F_0$$

$$G \frac{m_1 m_2}{(r_1 + r_2)^2} = m_1 r_1 \omega^2 = m_1 r_1 \frac{4\pi^2}{P^2}$$

- ☀ Dosadením dostaneme:

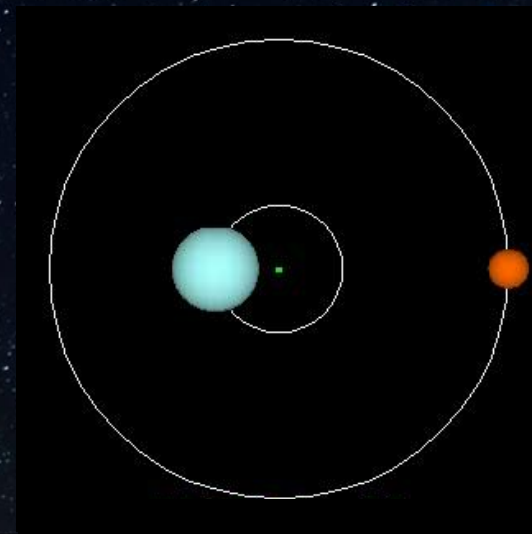
$$\frac{(r_1 + r_2)^3}{P^2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{4\pi^2}$$

čo je obdoba 3. Keplerovho zákona:

$$\frac{a^3}{P^3} = \frac{(a_1 + a_2)^3}{P^2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{4\pi^2}$$

pre dráhy (obecne) eliptické.

- ☀ Na základe odpozorovaných parametrov dráhy vizuálnej dvojhviezdy (P , a_1 , a_2 , príp. r_1 , r_2) vieme určiť hmotnosti zložiek m_1 a m_2 .



Dvojhviezda s kruhovými dráhami zložiek.

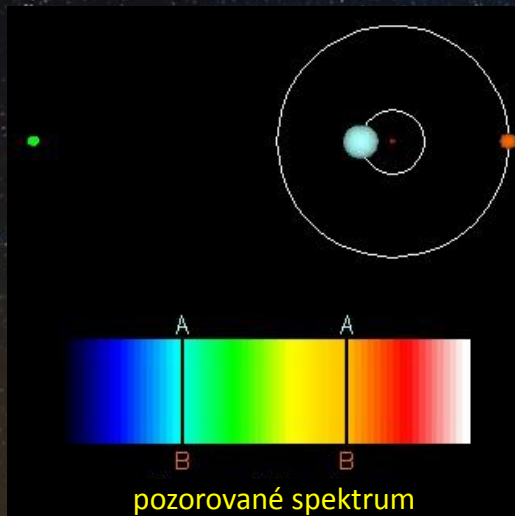


Dvojhviezda s eliptickými dráhami zložiek.

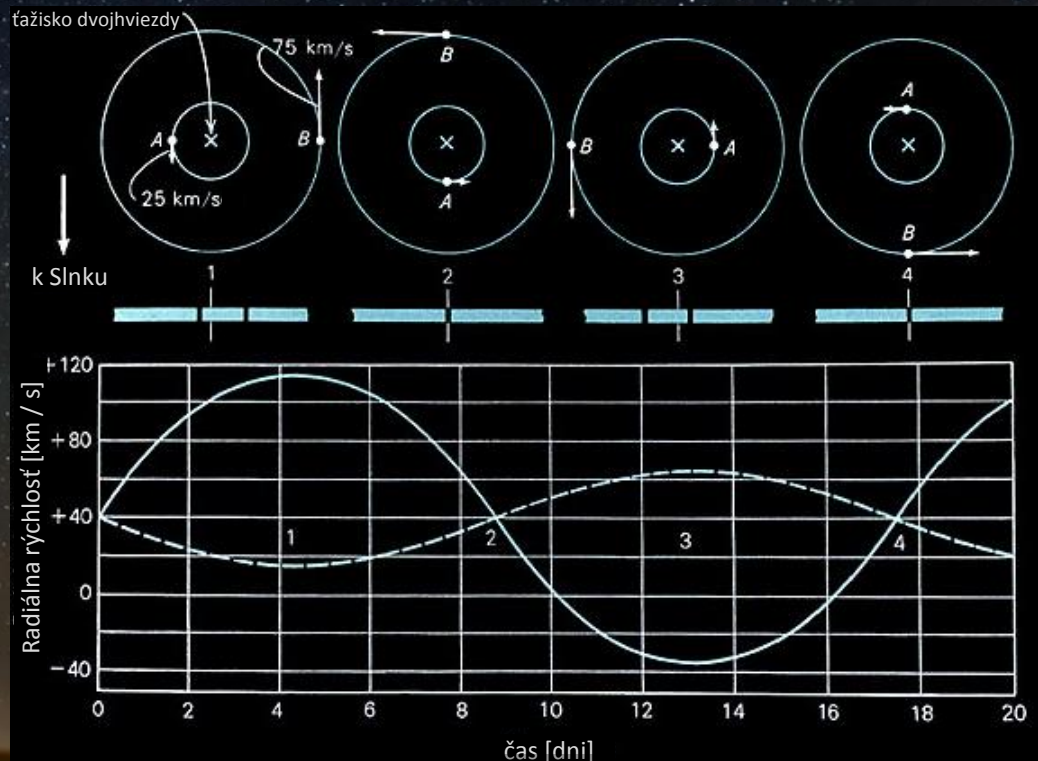
Spektroskopické dvojhviezdy

- ☀ Prvou objavenou bola jasnejšia zložka dvojhviezdy *Mizar* (*E. C. Pickering*, 1889).
- ☀ 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: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$
- ☀ V prípade kruhových dráh potom pre pomer hmotností q dostávame:

$$q = \frac{m_2}{m_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_{r,1}}{v_{r,2}} = \frac{v_{r,max,1}}{v_{r,max,2}}$$



Zmeny spektra spektroskopickej dvojhviezdy v dôsledku pohybu jej zložiek okolo ťažiska.



Krivky radiálnych rýchlostí zložiek spektroskopickej dvojhviezdy.

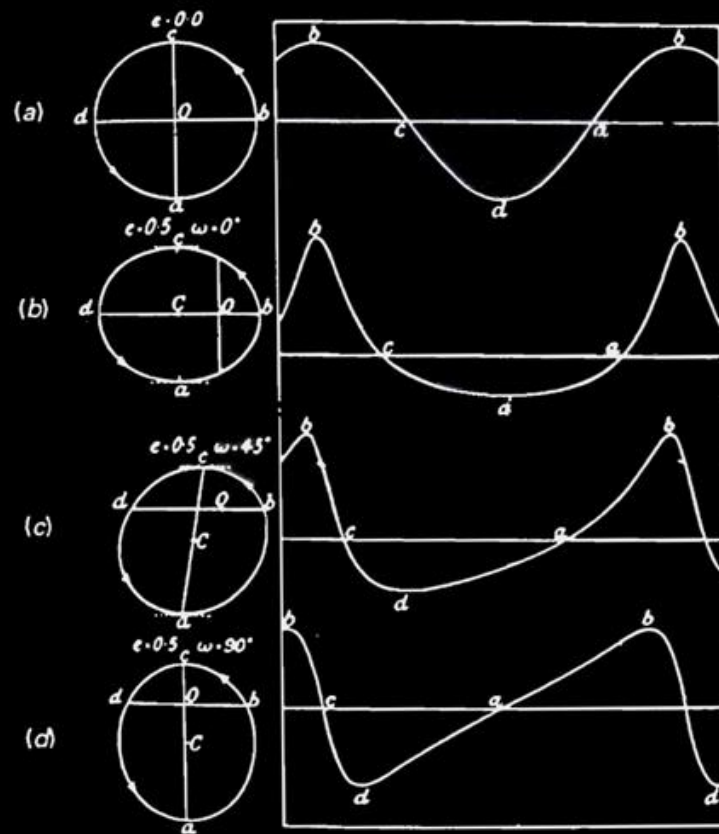
Spektroskopické dvojhviezdy

- ☀ V prípade kruhovej dráhy je krivkou radiálnych rýchlostí sínusoida. V prípade eliptickej dráhy sa krivka deformuje, pričom jej tvar závisí ako od vlastností elipsy (excentricity e), tak od smeru, z ktorého eliptickú dráhu pozorujeme.
- ☀ Ak inklinácia i (uhol dráhy) je odlišná od 90° , nemeríme radiálne rýchlosti, ale ich priemety \Rightarrow hmotnosť dostávame až na neurčitý faktor $\sin i$.

$$(m_1 + m_2) \sin^3 i = \frac{a_*^3}{P^2}$$



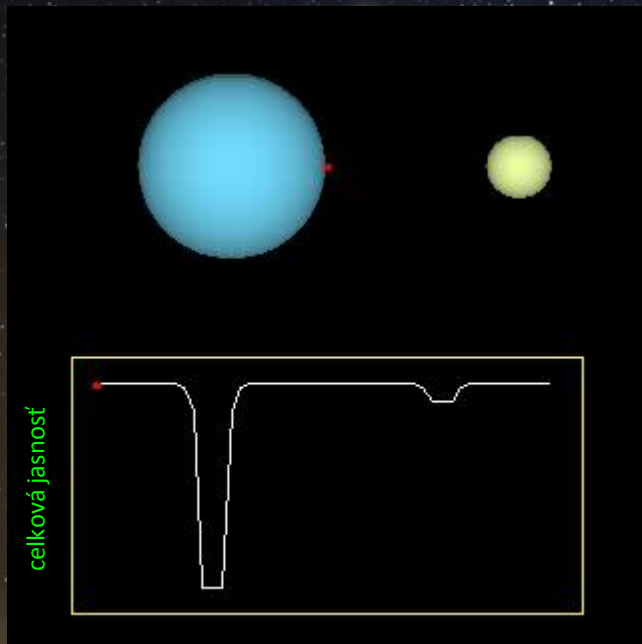
Dvojhviezda s eliptickými dráhami zložiek.



Krivky radiálnych rýchlostí pre rôzne tvary a otočenia dráhy spektroskopickej dvojhviezdy.

Zákrytové dvojhviezdy

- ✦ V roku 1667 objavil *G. Montanari* premennosť hviezdy *Algol* (β Per).
- ✦ *J. Goodricke* v rokoch 1782–1783 Algol systematicky pozoroval a ukázal, že jeho jasnosť sa mení s periódou necelých troch dní a správne vysvetlil príčinu jeho svetelných zmien.
- ✦ V roku 1880 *E. C. Pickering* dokázal Goodrickovu hypotézu o dvojhviezdnej povahe Algolu a z tvaru svetelnej krivky odvodil relatívne rozmery oboch zložiek.
- ✦ Model definitívne potvrdil v roku 1889 *H. Vogel*, keď ukázal, že Algol je spektroskopická dvojhviezda, ktorej krivka radiálnych rýchlostí presne zodpovedá modelu. Zaviedol pojem *zákrytové dvojhviezdy*.



- ✦ Špeciálny typ spektroskopických dvojhviezd, ktorých zmena jasnosti je spôsobená vzájomným zakrývaním sa zložiek dvojhviezdy ($i \approx 90^\circ$).
- ✦ Simultánna analýza svetelných kriviek a kriviek radiálnych rýchlostí umožňuje určiť parametre dráhy dvojhviezdy a jej vzdialenosť, ako aj základne fyzikálne charakteristiky samotných hviezd (hmotnosti, polomery, hustoty, svietivosti).
- ✦ Údaje získané analýzou zákrytových dvojhviezd sa stali kľúčovými pre pochopenie vlastností, štruktúry a evolúcie hviezd.

Model a svetelná krivka zákrytovej dvojhviezdy.

A night sky filled with stars, with the title 'Štruktúra a evolúcia hviezd' overlaid in red text.

Štruktúra a evolúcia hviezd

Stavba a štruktúra hviezd

- ✱ Štruktúru hviezd, ako aj vlastnosti v jej vnútri (napr. T_c , P_c) nie je možné určiť priamo.
- ✱ Je potrebné zostrojiť **model** založený na všeobecných **fyzikálnych predpokladoch**, ktorého parametrami sú pozorované vlastnosti hviezd (M , R , T_{eff} , L , A , ...) a na základe tohto modelu odvodiť požadované informácie.
- ✱ Fyzikálne predpoklady sa týkajú stavu hviezdnej látky, prenosu a tvorby energie.

Hydrostatická rovnováha

- ✱ Väčšina hviezd je stabilná (na bežných časových škálach).
- ✱ Keďže gravitačná sila je príťažlivá, aby nedošlo ku kolapsu, musí byť jej pôsobenie kompenzované tlakovou silou.
- ✱ V prípade sféricky symetrickej hviezd gravitačná sila pôsobiaca na objemový element ΔV :

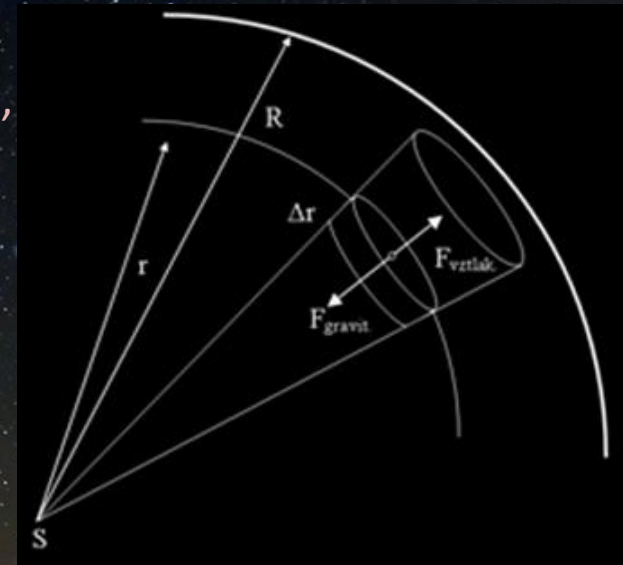
$$\Delta F_G(r) = G \frac{m(r)\Delta m}{r^2} = G \frac{m(r)\rho(r)\Delta V}{r^2} = G \frac{m(r)\rho(r)\Delta S\Delta r}{r^2}$$

vyvolá tlakovú silu F_T .

- ✱ V prípade rovnováhy $F_T = F_G$, pre rozdiel tlakov na podstavách bude platiť: $P(r) - (P(r) + \Delta P) = \frac{\Delta F}{\Delta S}$

- ✱ Pre prírastok tlaku potom dostávame **rovniciu hydrostatickej rovnováhy**:

$$\frac{\Delta P(r)}{\Delta r} = -G \frac{m(r)\rho(r)}{r^2} \quad \xrightarrow{\Delta r \rightarrow 0} \quad \frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{m(r)\rho(r)}{r^2}$$



Stavba a štruktúra hviezd

- ☀ Odhad centrálného tlaku P_C hviezd s hmotnosťou M a polomerom R .
- ☀ Prírastok tlaku odhadneme z hraničných hodnôt tlaku P a vzdialenosti r :

$$\frac{\Delta P}{\Delta r} \approx \frac{P_C - 0}{0 - R} = -\frac{P_C}{R}$$

- ☀ Hustota hviezd je približne:

$$\rho \approx \frac{3M}{4\pi R^3}$$

- ☀ Dosadením do rovnice hydrostatickej rovnováhy dostaneme:

$$-\frac{P_C}{R} \approx -G \frac{M^2}{R^5}$$

- ☀ A pre centrálny tlak P_C :

$$P_C \approx G \frac{M^2}{R^4}$$

- ☀ Pre Slnko: $P_C \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} (2 \times 10^{30} \text{ kg})^2 (7 \times 10^8 \text{ m})^{-4} = 10^{15} \text{ Pa} = 10^{10} \text{ atm}$.

- ☀ Centrálnu teplotu T_C odhadneme pomocou stavovej rovnice ideálneho plynu:

$$P_G = \frac{\rho k T}{\mu_s m_H}$$

- ☀ Dosadením vzťahov pre hustotu ρ a centrálny tlak P_C dostaneme:

$$T_C \approx \frac{G \mu_s m_H M}{k R}$$

kde μ_s je stredná molekulová hmotnosť ($\mu_s = 0,62$), m_H hmotnosť atómu vodíka ($m_H = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) a k Boltzmannova konštanta ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$).

- ☀ Pre Slnko dostaneme: $T_C \approx 1,4 \times 10^7 \text{ K}$.

Základné rovnice hviezdnej stavby - I

- ✿ Ak je hviezda stabilná, prírastok tlaku popisuje rovnica hydrostatickej rovnováhy:

$$\frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{m(r)\rho(r)}{r^2}$$

kde $P(r)$ je tlak, $\rho(r)$ je hustota vo vzdialenosti r od stredu hviezdy a $m(r)$ hmotnosť časti hviezdy od stredu po vzdialenosť r . G je gravitačná konštanta: $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

- ✿ Pre prírastok hmotnosti sféricky symetrickej hviezdy platí:

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

- ✿ Keďže hviezda žiari, musí mať vo svojom vnútri zdroj energie. Prírastok svietivosti popisuje rovnica:

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) (\varepsilon(r) - \varepsilon_\nu(r))$$

kde $L(r)$ je svietivosť a $\varepsilon(r)$ emisivita vo vzdialenosti r od stredu hviezdy. Emisivita udáva rýchlosť tvorby energie za jednotku času a na jednotku hmotnosti. $\varepsilon_\nu(r)$ je emisivita pre neutrína. Keďže neutrína len veľmi slabo interagujú s hmotou, po svojom vzniku odnášajú energiu mimo hviezdy, a preto je ich príspevok potrebné odpočítať od celkovej energetickej bilancie.

Základné rovnice hviezdnej stavby - II

- ☀ Keďže energia vzniká v jadre hviezd a je vyžiarená z jej povrchu, vo vnútri hviezd musí dochádzať k prenosu energie. Spôsoby prenosu energie sa líšia podľa toho, čo je nosičom energie.
- ☀ Ak je nosičom energie elektromagnetické žiarenie (fotóny), hovoríme, že energia sa prenáša *radiáciou (žiarením)*.
- ☀ Rovnica pre prírastok teploty pri *prenose energie radiáciou* je:

$$\frac{dT(r)}{dr} = - \frac{3\kappa_R}{4^3\pi\sigma r^2 T^3(r)} L(r)$$

kde $T(r)$ je teplota vo vzdialenosti r od stredu hviezd, κ_R je tzv. Rosselandov stredný absorpčný koeficient – opacita a $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$ je Stefanova – Boltzmannova konštanta. Opacita udáva mieru nepriehľadnosti prostredia pre žiarenie.

- ☀ Ak je opacita prostredia veľká, žiarenie už nie je schopné účinne prenášať všetku energiu a táto sa začne prenášať aj *konvekciou (prúdením)*. Nosičom energie sú v tomto prípade makroskopické objemy hmoty.
 - ☀ Rovnica pre prírastok teploty pri *prenose energie konvekciou* je:
- $$\frac{dT(r)}{dr} = - \frac{1 - \gamma}{\gamma} \frac{T(r)}{P(r)} \frac{dP(r)}{dr}$$
- kde γ je Poissonova konštanta (pre úplne ionizovaný plyn $\gamma = 5/3$).
- ☀ Konvekciu nájdeme v jadrách hmotných hviezd ($M \geq 1,5 M_\odot$). V menej hmotných hviezdach tvorí vonkajšiu obálku, v ktorej je dominantným spôsobom prenosu energie.

Základné rovnice hviezdnej stavby III

- ✱ Ak sú nosičom energie atómy a molekuly, ktoré tvoria samotnú látku, hovoríme, že energia sa prenáša *kondukciou (vedením)*.
- ✱ Rovnica pre prírastok teploty pri prenose energie *kondukciou* je :

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{L(r)}{4\pi k r^2}$$

kde k je koeficient tepelnej vodivosti látky.

- ✱ Kondukciou sa za normálnych podmienok vo hviezdnom vnútri prenáša len veľmi malá časť energie (v porovnaní s prenosom energie radiáciou a konvekciou). Významnou je v oblastiach s vysokou (napr. biely trpaslík) alebo nízkou hustotou (napr. v koróne).
- ✱ Látka, z ktorej sa skladá hviezda je zmesou plynu a žiarenia, preto má stavová rovnica hviezdnej látky dve zložky:

$$P(r) = \frac{\rho(r)kT(r)}{\mu_s(r)m_H} + \frac{4\sigma}{3c}T^4(r)$$

kde μ_s je stredná molekulová hmotnosť (pre Slnko $\mu_s = 0,62$), m_H hmotnosť atómu vodíka ($m_H = 1,67 \times 10^{-27}$ kg) a k Boltzmannova konštanta ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ JK⁻¹). Prvý člen rovnice udáva tlak ideálneho plynu, druhý člen tlak žiarenia.

- ✱ Táto sústava diferenciálnych rovníc má nasledujúce okrajové podmienky:

$$\begin{array}{cccccc} r = 0 & m = 0 & P = P_c & T = T_c & \rho = \rho_c & L = 0 \\ r = R & m = M & P = 0 & T = T_{\text{eff}} & \rho = 0 & L = L_* \end{array}$$

kde R , M , T_{eff} a L_* určíme z pozorovaní, P_c , T_c a ρ_c je výsledkom modelu hviezdy.

Základné rovnice hviezdnej stavby - zhrnutie

- ☀ Rovnica pre prírastok tlaku (hydrostatickej rovnováhy):

$$\frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{m(r)\rho(r)}{r^2}$$

- ☀ Rovnica pre prírastok hmotnosti:

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

- ☀ Rovnica pre prírastok svietivosti:

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) (\varepsilon(r) - \varepsilon_\nu(r))$$

- ☀ Rovnica pre prírastok teploty pri prenose energie radiáciou (žiarením):

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{3\kappa_R}{4^3 \pi \sigma r^2 T^3(r)} L(r)$$

- ☀ Rovnica pre prírastok teploty pri prenose energie konvekciou (prúdením):

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{1 - \gamma T(r)}{\gamma} \frac{dP(r)}{P(r) dr}$$

- ☀ Rovnica pre prírastok teploty pri prenose energie kondukciou (vedením):

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{L(r)}{4\pi k r^2}$$

- ☀ Stavová rovnica:

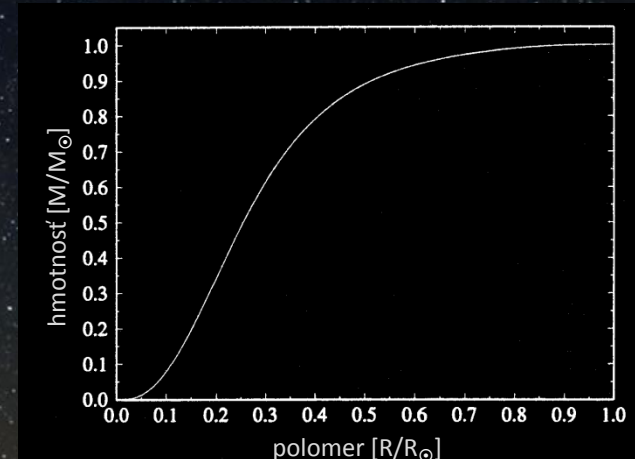
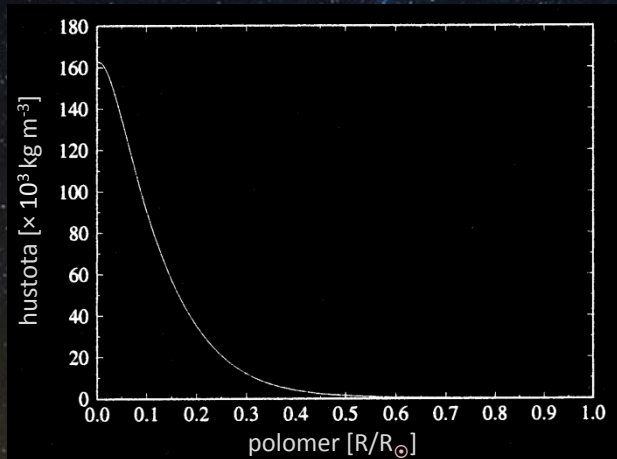
$$P(r) = \frac{\rho(r)kT(r)}{\mu_S(r)m_H} + \frac{4\sigma}{3c} T^4(r)$$

- ☀ Okrajové podmienky:

$r = 0$	$m = 0$	$P = P_c$	$T = T_c$	$\rho = \rho_c$	$L = 0$
$r = R$	$m = M$	$P = 0$	$T = T_{\text{eff}}$	$\rho = 0$	$L = L_*$

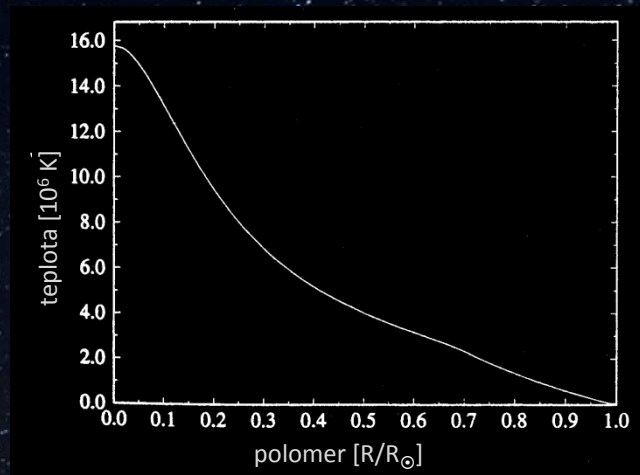
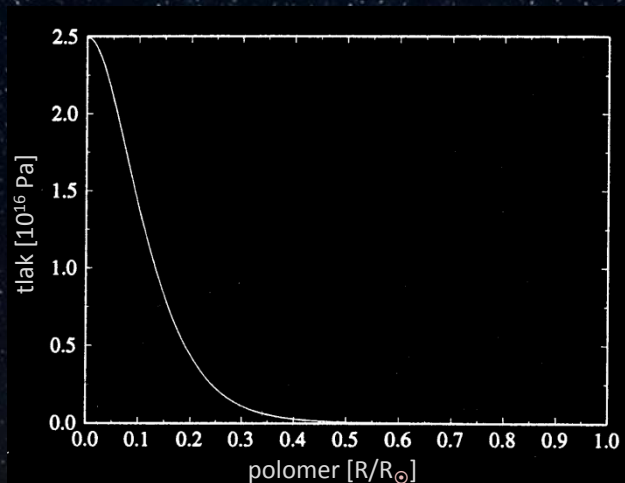
Štruktúra Slnka

- ☀ Rovnice hviezdnej stavby predstavujú sústavu diferenciálnych rovníc, ktoré je možné analyticky riešiť iba za istých špecifických predpokladov (napr. o správaní sa hviezdnej látky - tzv. polytropický model).
- ☀ Analyticky je možné riešiť túto sústavu diferenciálnych rovníc iba numericky.
- ☀ Výsledkom sú tabuľky alebo grafy, ktoré udávajú priebeh fyzikálnych veličín ako funkcie vzdialenosti od stredu hviezdy.
- ☀ Štruktúra slnečného vnútra:

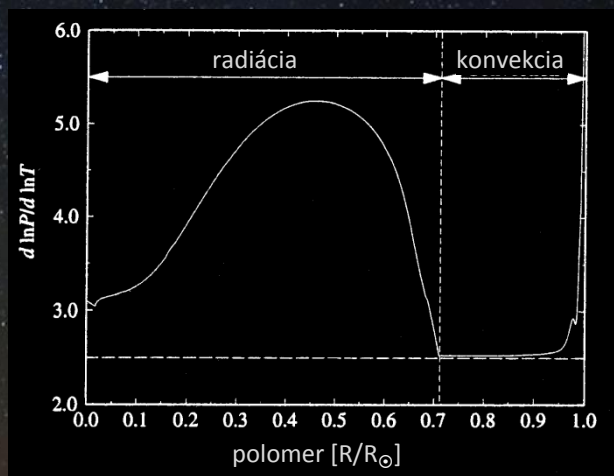


Priebeh hustoty (vľavo) a prírastku hmotnosti (vpravo) ukazuje, že Slnko má veľmi husté a kompaktné jadro. Do vzdialenosti $0,3 R_{\odot}$ sa nachádza vyše 60 % slnečnej hmotnosti a do vzdialenosti $0,5 R_{\odot}$ (polovica objemu) sa nachádza takmer 90 % hmotnosti Slnka.

Štruktúra Slnka

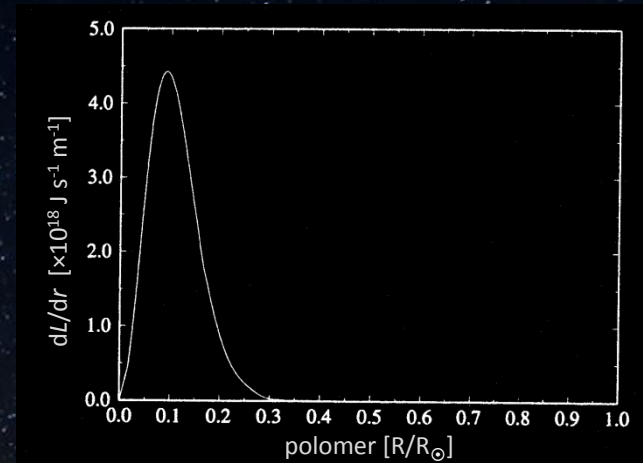
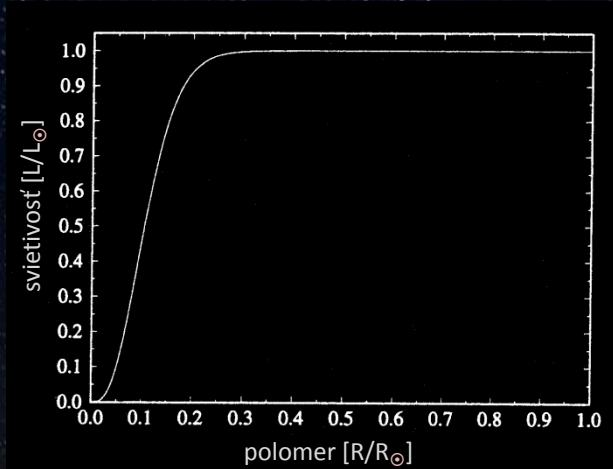


Priebeh tlaku (vľavo) tiež poukazuje na husté slnečné jadro, pričom tlak v strede Slnka dosahuje hodnotu $P_C = 2,5 \times 10^{16}$ Pa. Teplota (vpravo) klesá smerom k povrchu miernejšie. Teplota v strede Slnka je $T_C = 16 \times 10^6$ Pa.

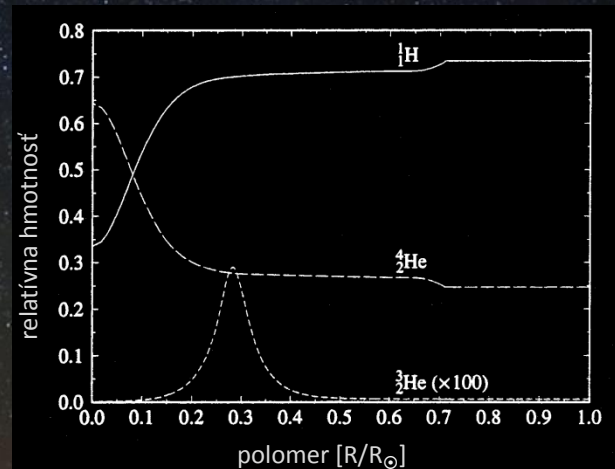


Priebeh gradientu tlaku jasne ukazuje, že zatiaľ čo do $0,7 R_{\odot}$ väčšina energie sa prenáša žiarením (radiáciou), vo vonkajšej obálke s hrúbkou asi $0,3 R_{\odot}$ je dominantným typom prenosu energie prúdenie (konvekcia).

Štruktúra Slnka



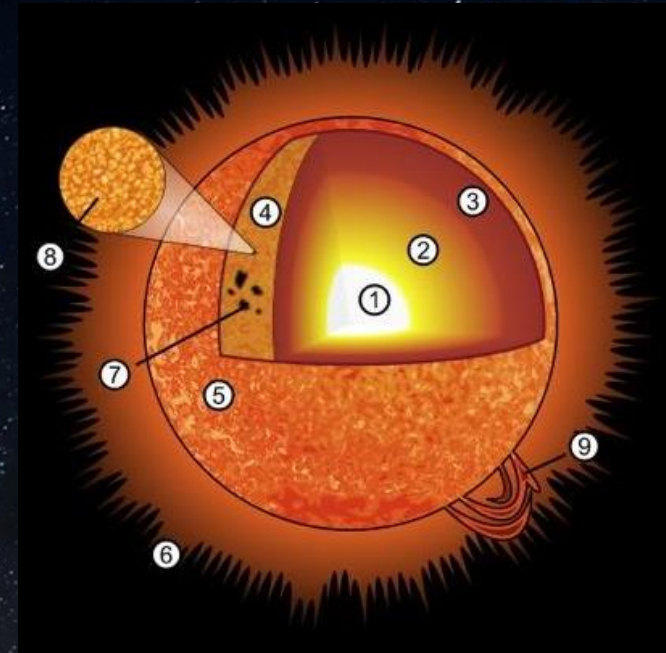
Priebeh svietivosti (vľavo) ukazuje, že všetka energia vzniká v slnečnom jadre (do 0,3 R_☉). Priebeh gradientu svietivosti (vpravo) však ukazuje, že najrýchlejšie sa energia neprodukuje v strede Slnka, ale vo vzdialenosti 0,1 R_☉.



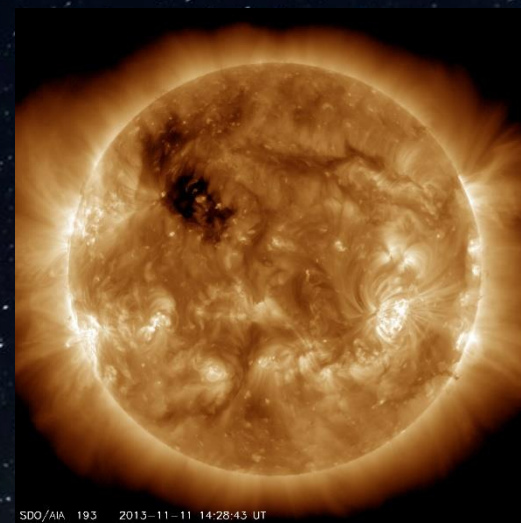
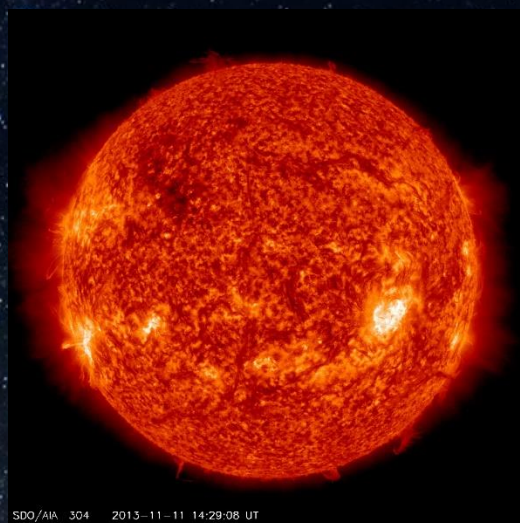
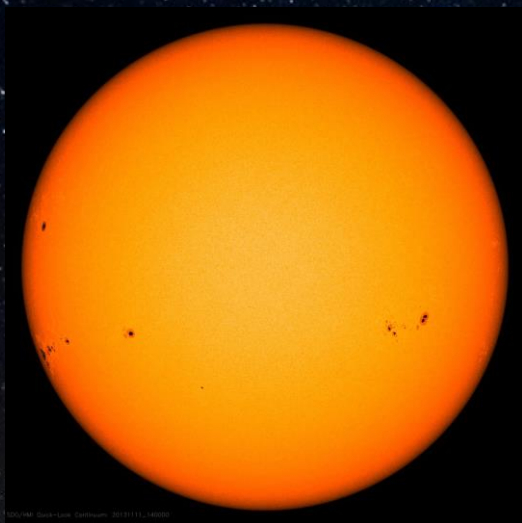
Priebeh relatívnej hmotnosti chemických prvkov ukazuje, že do 0,1 R_☉ prevláda hélium nad vodíkom. V strede Slnka je teda héliové jadro. Keďže za súčasných podmienok nedochádza k termonukleárnej syntéze hélia na ťažšie prvky, energia sa generuje len syntézou vodíka na hélium. Tieto reakcie najrýchlejšie prebiehajú na povrchu héliového jadra (0,1 R_☉), teda tam, kde je najvyššia teplota a zároveň dostatok vodíka.

Štruktúra Slnka

- ☀ 1 - jadro ($< 0,3 R_{\odot}$)
 - obsahuje héliové jadro ($< 0,1 R_{\odot}$),
 - v jadre prebiehajú TN syntézy vodíka na hélium s maximom produkcie vo vrstve, ktorá obklopuje héliové jadro ($\approx 0,1 R_{\odot}$)
- ☀ 2 - oblasť žiarivej rovnováhy ($< 0,7 R_{\odot}$)
 - energia sa prenáša žiarením
- ☀ 3 - konvektívna zóna ($> 0,7 R_{\odot}$)
 - energia sa prenáša konvekciou
- ☀ atmosféra
- ☀ 4 - fotosféra
 - vo fotosfére vzniká pozorované viditeľné žiarenie (viditeľný povrch Slnka), hrúbka 200 – 300 km, teplota 4500 - 6000 K, pozorujeme prejavy slnečnej aktivity (7 - slnečné škvrny), ako aj prejavy konvekcie (8 – granulácia)
- ☀ 5 - chromosféra
 - siaha do výšky 12 000 – 14 000 km nad fotosférou, teplota v chromosfére stúpa s výškou až na ≈ 35000 K, pozorujeme prejavy slnečnej aktivity (9 – protuberancie, spikule, vzplanutia)
- ☀ 6 - koróna
 - siaha ďaleko do kozmického priestoru, teplota stúpa na $1 - 2 \times 10^6$ K, mení svoj tvar, veľkosť a intenzitu počas 11-ročného cyklu slnečnej aktivity, pozorujeme počas úplných zatmení



Slnečná atmosféra



Vľavo hore - fotosféra (kontinuum, 617,3nm, 6000K), v strede hore - horná chromosféra a dolná prechodová oblasť (He II, 30,4 nm, 50 000 K), vpravo hore - koróna a horúca plazma vzplanutí (flares) (Fe XII, 19,3 nm, 1 250 000 K), dole – koróna zaznamenaná počas úplného zatmenia Slnka v roku 2006.

Zdroje energie vo hviezdach - chemické reakcie

- Uvažujme horenie vodíka : $2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- Nech je zastúpenie H a O také, aby sa všetky atómy zmenili na molekuly H_2O .
 $m(\text{H}_2\text{O}) = 3,5 \times 10^{-26} \text{ kg}$
 $n(\text{H}_2\text{O}) = M_{\odot} / m(\text{H}_2\text{O}) = 1,989 \times 10^{30} / 3,5 \times 10^{-26} = 5,68 \times 10^{55}$
pri jednej reakcii sa uvoľní energia $\Delta E \approx 10 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-18} \text{ J}$
celková uvoľnená energia $E = n(\text{H}_2\text{O}) \Delta E = 9,1 \times 10^{36} \text{ J}$
- Ak by Slnko stále žiarilo tak ako v súčasnosti ($L_{\odot} = 3,839 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$), táto energia by stačila na:

$$t_c = E / L_{\odot} = 751 \text{ rokov}$$

Zdroje energie vo hviezdach - gravitačná energia

- Pre gravitačne viazanú sústavu častíc ($E_C < 0$) v rovnováhe platí tzv. viriálová teoréma (Rudolf Clausius, 1870):

$$2 \langle E_K \rangle + \langle E_P \rangle = 0$$

- Pre celkovú energiu E_C takejto sústavy potom platí: $E_C = \langle E_K \rangle + \langle E_P \rangle = \frac{1}{2} \langle E_P \rangle = -\langle E_K \rangle < 0$
- Ak sa zmení (zmenší) potenciálna energia $\langle E_P \rangle$:

$\frac{1}{2}$ sa zmení na kinetickú energiu (viriálová teoréma)

$$\Delta \langle E_K \rangle = -\frac{1}{2} \Delta \langle E_P \rangle$$

$\frac{1}{2}$ sa vyžiari (zákon zachovania energie)

$$L = -\frac{1}{2} \Delta \langle E_P \rangle / \Delta t$$

- Pre celkovú potenciálnu energiu sféricky symetrickej hviezdy s polomerom R a hmotnosťou M platí:

$$E_P = -\frac{3}{2} \frac{GM^2}{R}$$

- Koncom 19. storočia W. T. Kelvin a neskôr H. von Helmholtz ukázali, že kontrakcia môže byť zdrojom energie hviezdy:

$$L = -\frac{1}{2} \frac{\Delta E_P}{\Delta t} = -\frac{3}{4} \frac{GM^2}{R^2} \frac{\Delta R}{\Delta t}$$

- Ak by Slnko stále žiarilo tak ako v súčasnosti ($L_{\odot} = 3,839 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$), táto energia by stačila na:

$$t_K = \frac{3}{4} \frac{GM^2}{RL} = 23,5 \times 10^6 \text{ rokov}$$

Zdroje energie vo hviezdach - nukleárna energia

- ☀ Hmotnosť atómov je o $\approx 1\%$ menšia ako hmotnosť nukleónov, z ktorých sa skladajú (A. S. Eddington, 20. roky 20. storočia).
- ☀ Pre vodík: $m(\text{H}) = 1,008172 \text{ u}$, kde $u = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- ☀ Pre hélium: $m(\text{He}) = 4,00388 \text{ u}$, no $4 \times m(\text{H}) = 4,03269 \text{ u}$, čomu zodpovedá hmotnostný rozdiel: $\Delta m = 4 m(\text{H}) - m(\text{He}) = 0,02881 \text{ u}$ alebo $\Delta m / m(\text{He}) = 0,7 \%$
- ☀ Ak uvážime ekvivalenciu hmotnosti a energie $\Delta E = \Delta m c^2$, $0,7 \%$ hmotnosti hviezdy sa môže premeniť na energiu.
- ☀ Pre železo: $m(\text{Fe}) = 55,95270 \text{ u}$, no $56 \times m(\text{H}) = 56,45763 \text{ u}$, čomu zodpovedá hmotnostný rozdiel: $\Delta m = 56 m(\text{H}) - m(\text{Fe}) = 0,50493 \text{ u}$ alebo $\Delta m / m(\text{Fe}) = 0,9 \%$
- ☀ Ak by sa $0,7 \%$ hmotnosti Slnka premenilo na energiu pri TN syntéze vodíka na hélium, získali by sme energiu: $E = 0,007 M_{\odot} c^2 = 1,25 \times 10^{45} \text{ J}$.
- ☀ Ak by Slnko stále žiarilo tak ako v súčasnosti ($L_{\odot} = 3,839 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$), táto energia by stačila na:

$$t_{\text{T}} = E / L_{\odot} = 103 \times 10^9 \text{ rokov}$$

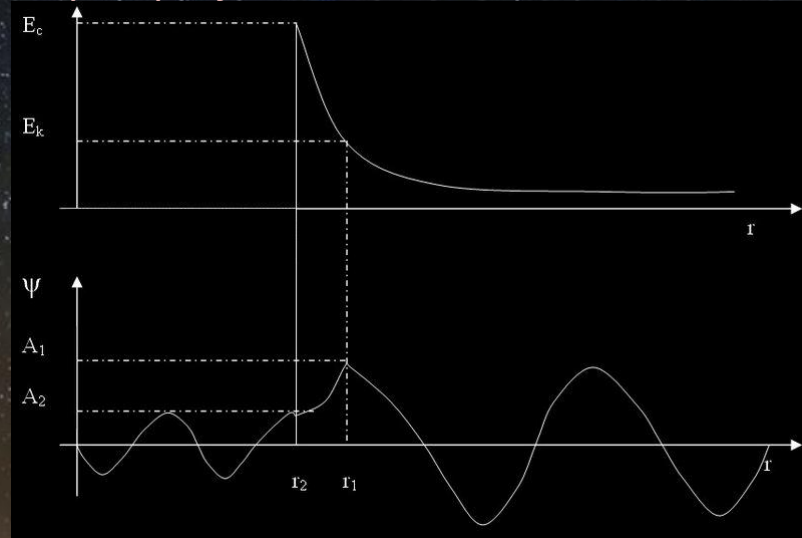
Zdroje energie vo hviezdach - nukleárna energia

- Do reakcie vstupujú jadrá atómov, ktoré majú kladný náboj Z_1e .
- Aby nastala reakcia, je potrebné prekonať elektrostatickú bariéru:

$$E_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1Z_2e^2}{r}$$

- Jadrá sa musia dostať do vzdialenosti $\approx 10^{-15}$ m, čomu zodpovedá energia: $E_C \approx 2 \times 10^{-13}$ J.
- Jadrá majú kinetickú energiu danú teplotou: $E_C = 3/2 kT$, kde k je Boltzmannova konštanta ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ JK⁻¹). Pre teplotu v centre Slnka $T \approx 10^7$ K je kinetická energia jadier $E_C \approx 2 \times 10^{-16}$ J, teda 1000x menšia!
- Riešenie poskytla kvantová mechanika, ktorá ukázala, že existuje malá pravdepodobnosť, že aj častica s menšou energiou je schopná prejsť cez elektrostatickú bariéru – *tunelový jav*.
- Pravdepodobnosť penetrácie:

$$P_P(v) \propto e^{\left(-\frac{\pi Z_1Z_2e^2}{\epsilon_0} \frac{1}{v}\right)}$$

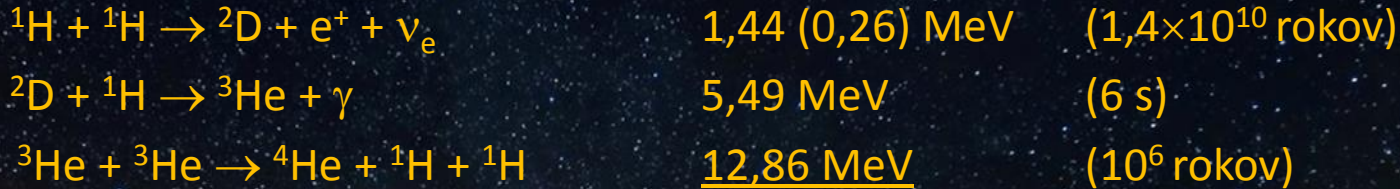


Priebeh elektrostatickej bariéry (hore) a vlnovej funkcie, popisujúcej časticu (dole).

Termonukleárne reakcie – syntéza vodíka

Protón – protónový cyklus

- Prebieha vo hviezdach na dolnej časti hlavnej postupnosti ($T \approx (8 - 18) \times 10^6 \text{ K}$)

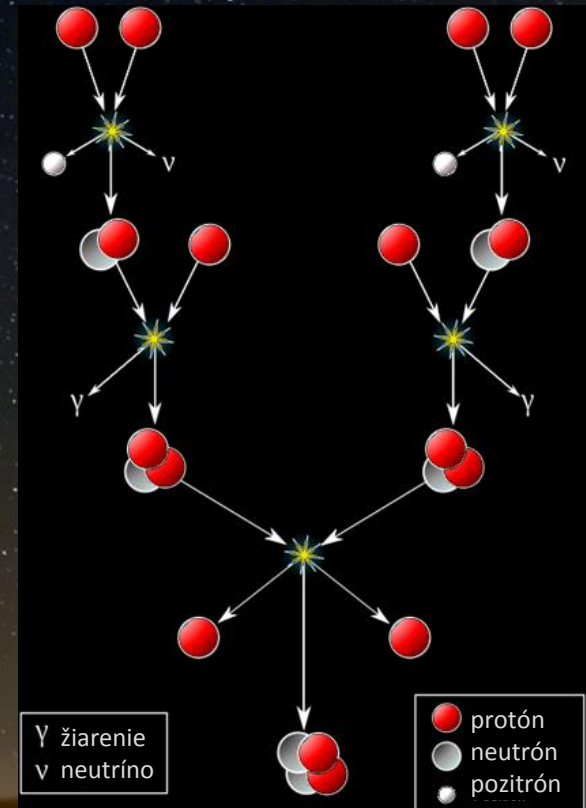


26,2 MeV
(69%)

Ďalšie vetvy:



Pozn. Energiu uvedenú v zátvorke odnášajú neutrína.



Termonukleárne reakcie – syntéza vodíka

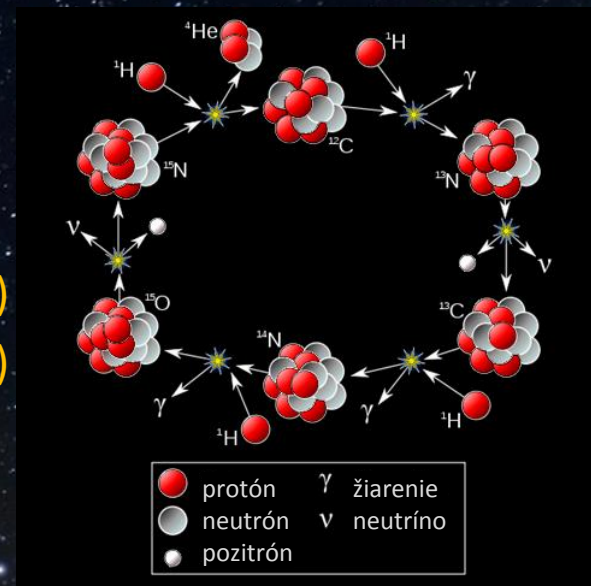
C – N – O cyklus

- Prebieha vo hviezdach na hornej časti hlavnej postupnosti ($T > 18 \times 10^6 \text{ K}$)

$^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$	1,95 MeV	(10^6 rokov)
$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	2,22 MeV	(14 min)
$^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$	7,54 MeV	(3×10^5 rokov)
$^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$	7,35 MeV	(3×10^8 rokov)
$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	2,75 MeV	(82 s)
$^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$	<u>4,96 MeV</u>	(10^4 rokov)
	26,8 MeV	

Ďalšie vetvy:

$^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$	12,13 MeV	$^{17}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{18}\text{F} + \gamma$	5,61 MeV
$^{16}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma$	0,60 MeV	$^{18}\text{F} \rightarrow ^{18}\text{O} + e^+ + \nu_e$	1,66 MeV
$^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e$	2,76 MeV	$^{18}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{19}\text{F} + \gamma$	7,99 MeV
$^{17}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + ^4\text{He}$	1,19 MeV	$^{19}\text{F} + ^1\text{H} \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$	8,11 MeV
$^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$	7,35 MeV	$^{16}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma$	0,60 MeV
$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	<u>2,75 MeV</u>	$^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e$	<u>2,76 MeV</u>
	26,8 MeV		26,8 MeV



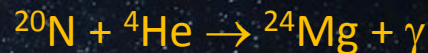
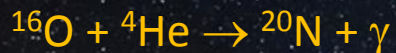
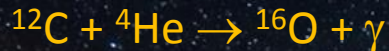
Termonukleárne reakcie – syntéza hélia a ťažších prvkov

3 α proces (Salpeterova reakcia)

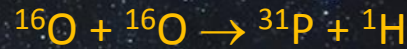
- ☀ Prebieha vo hviezdach po opustení hlavnej postupnosti ($T > 10^8$ K)



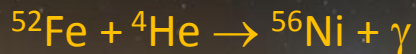
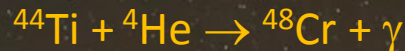
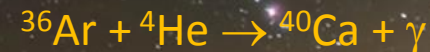
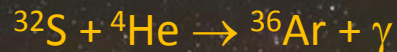
- ☀ Pri dostatočne vysokej teplote prebiehajú aj ďalšie reakcie ($T > 6 \times 10^8$ K) :



- ☀ Po spotrebovaní hélia sa začnú reakcie uhlíka a kyslíka:

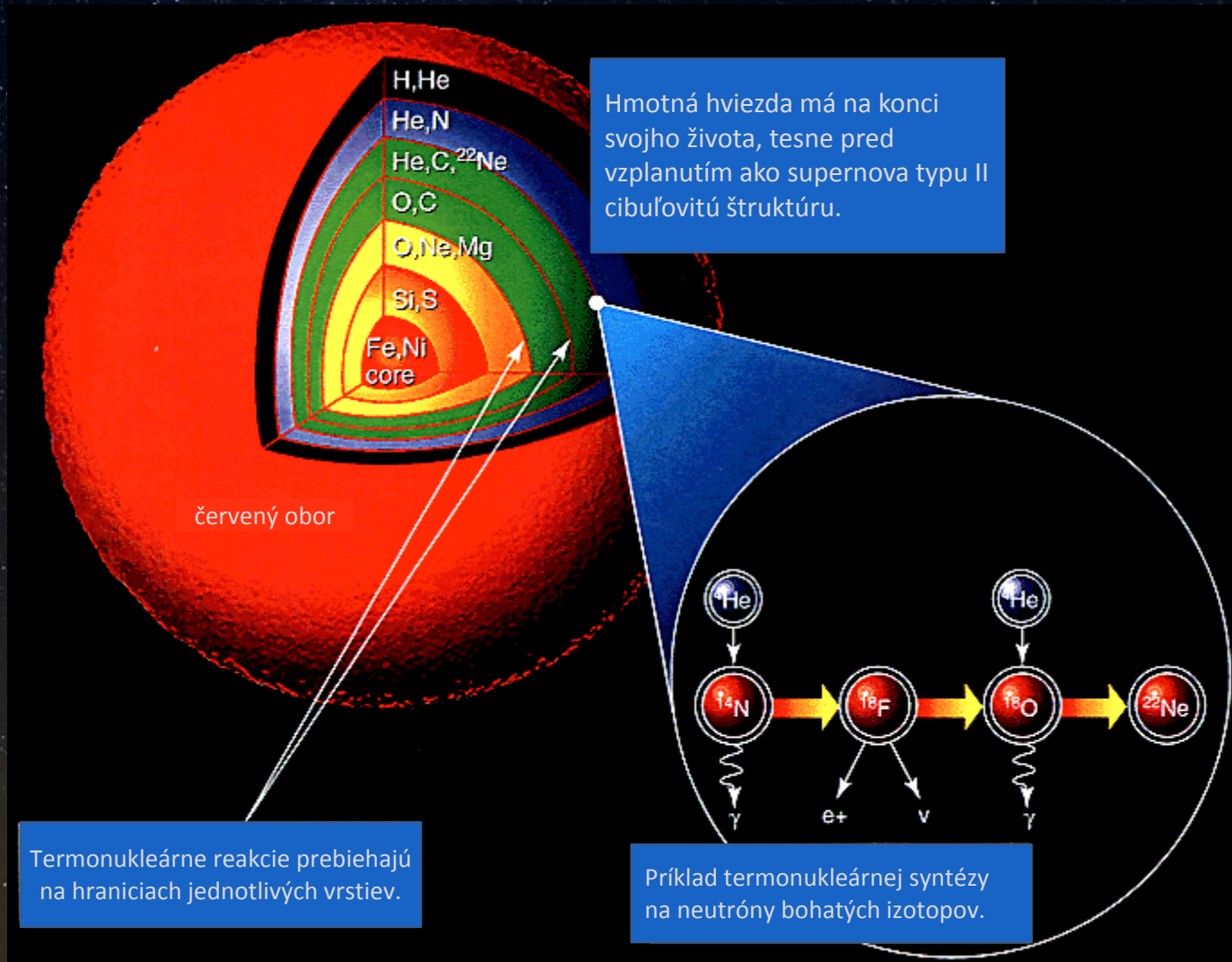


- ☀ Po spotrebovaní uhlíka a kyslíka a pri dostatočne vysokej teplote ($T = 2,7 - 3,5 \times 10^9$ K):



- ☀ Konečným produktom je železo ^{56}Fe .

Termonukleárne reakcie – syntéza hélia a ťažších prvkov



Prierez vyvinutej hviezdy (červeného obra) na konci reťazca termonukleárných syntéz vedúcich až k vzniku železného jadra.

Termonukleárne reakcie – syntéza ťažších prvkov ako železo

- ✦ Ťažšie chemické prvky ako železo ^{56}Fe sa syntetizujú počas vzplanutia supernovy typu II.



Vzplanutie supernovy typu II, ktoré bolo pozorované čínskymi astronómami v roku 1054, a na mieste ktorého dnes pozorujeme Krabiu hmlovinu (Býk).

Evolúcia hviezd

Vznik hviezd

- ☀ Hviezdy vznikajú z medzihviezdnych oblakov plynu a prachu.
- ☀ Oblaky v hydrostatickej rovnováhe \Rightarrow impulz na kolaps (vzplanutie supernovy, slapové pôsobenie galaxie, žiarenie iných hviezd, ...)
- ☀ **Jeansova hmotnosť** – udáva minimálnu hmotnosť plynno-prachového oblaku s koncentráciou n a teplotou T potrebnú na to, aby začal kolabovať:

$$M_J = 1,4 \times 10^4 \frac{T^{3/2}}{n^{1/2}} [M_\odot]$$

- ☀ Pre okolie Slnka: $n = 10^6$ častíc/m³, $T = 50$ K, $M_J = 4 \times 10^3 M_\odot \Rightarrow$ vzniká skupina hviezd.



Veľká hmlovina v Orióne je najbližšia oblasť k Zemi (1500 l.y.), kde sa aj v súčasnosti rodia nové hviezdy.

Vznik hviezd

- Fragmentácia oblaku – ak v oblaku existujú hustejšie oblasti (v dôsledku turbulencie), tieto môžu začať kolabovať samostatne.
- Fragmentačný limit: $M \geq 0,007 M_{\odot}$. Limit na zapálenie TN reakcií $M \geq 0,08 M_{\odot}$.
- Neadiabatický kolaps ($\delta Q \neq 0$) \Rightarrow ochladzovanie oblaku IR žiarením prachu a molekúl.
- Rotácia kolabujúcich oblakov \Rightarrow vznik protostelárnych (protoplanetárnych) diskov.

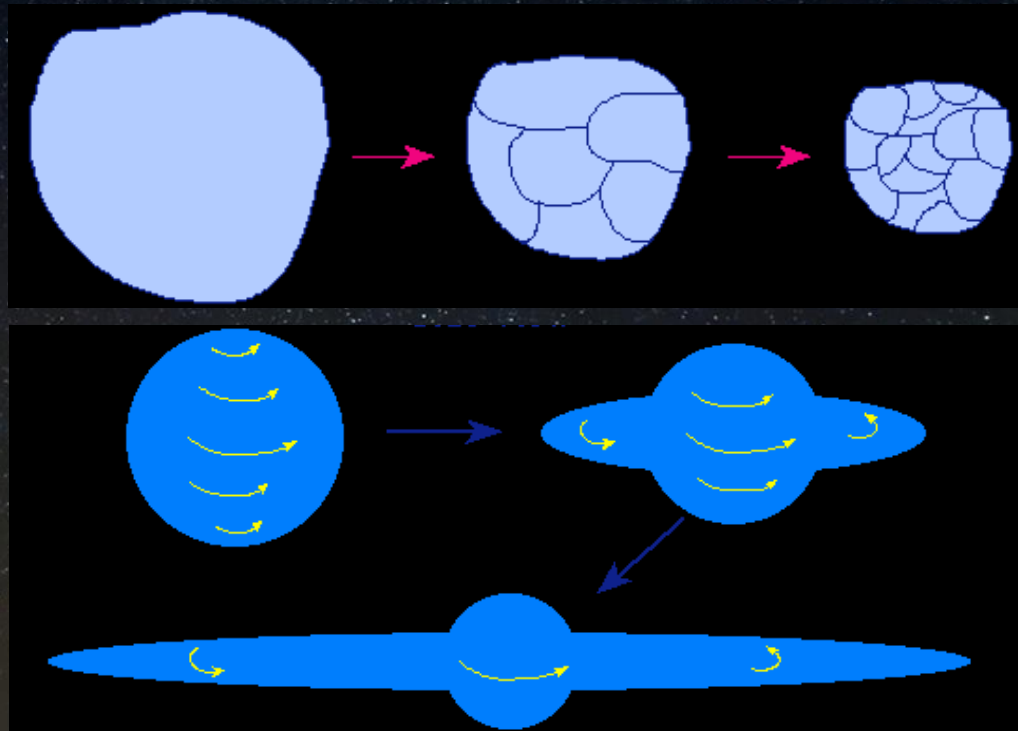
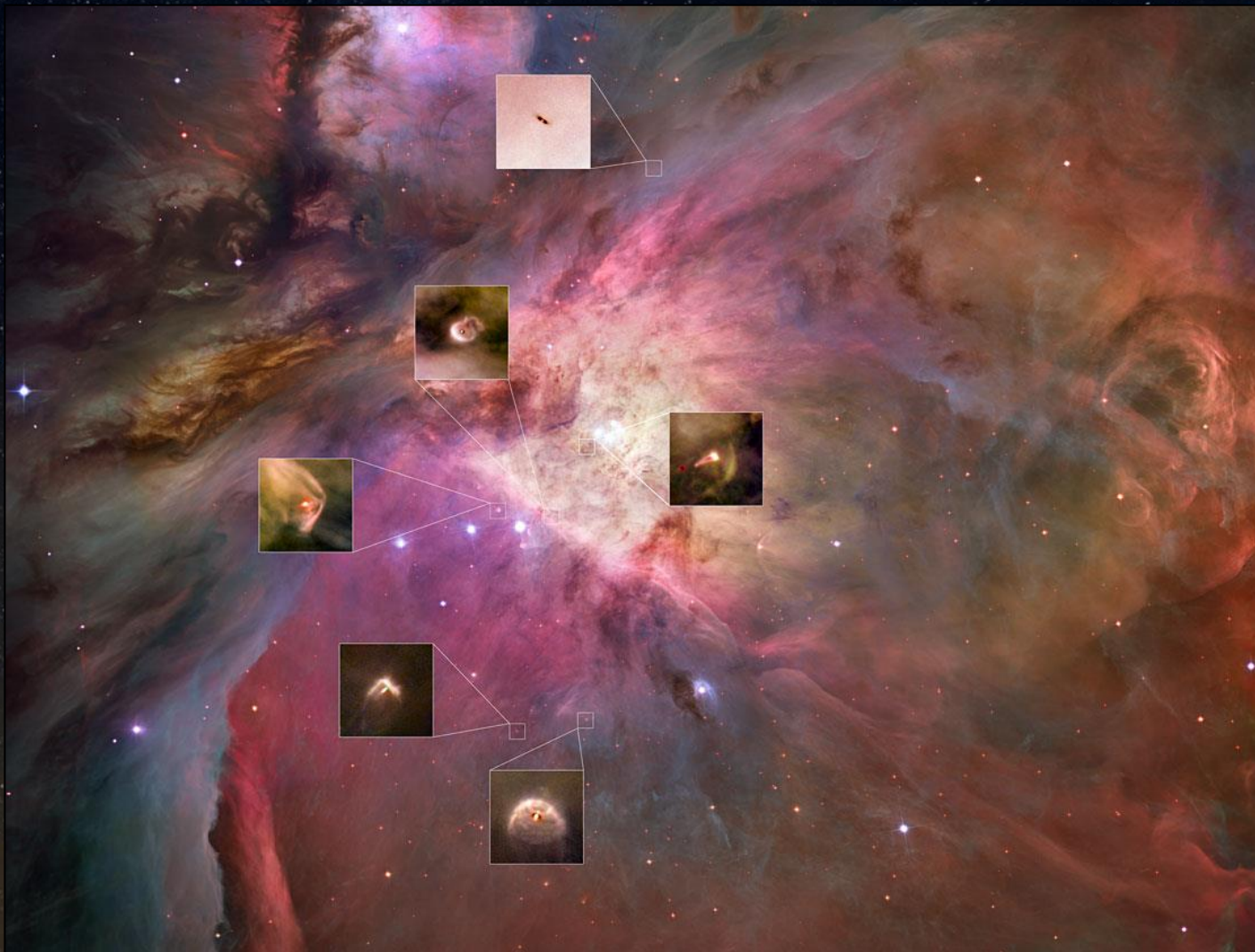


Schéma fragmentácie hmloviny (hore) a vzniku protostelárneho disku (dole) ako dôsledku zákona zachovania momentu hybnosti.

Vznik hviezd



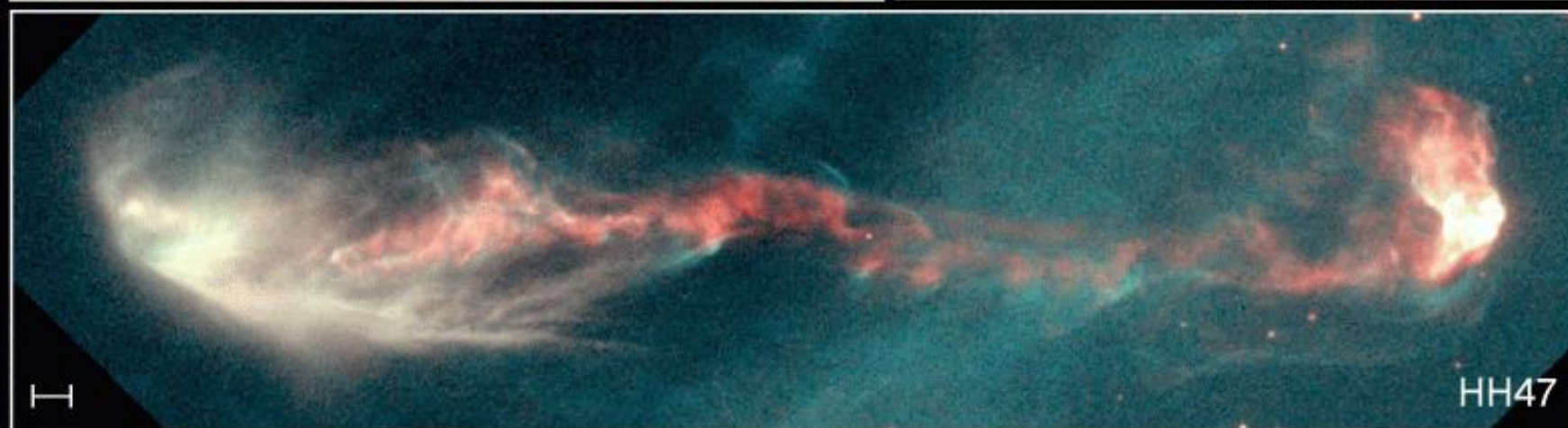
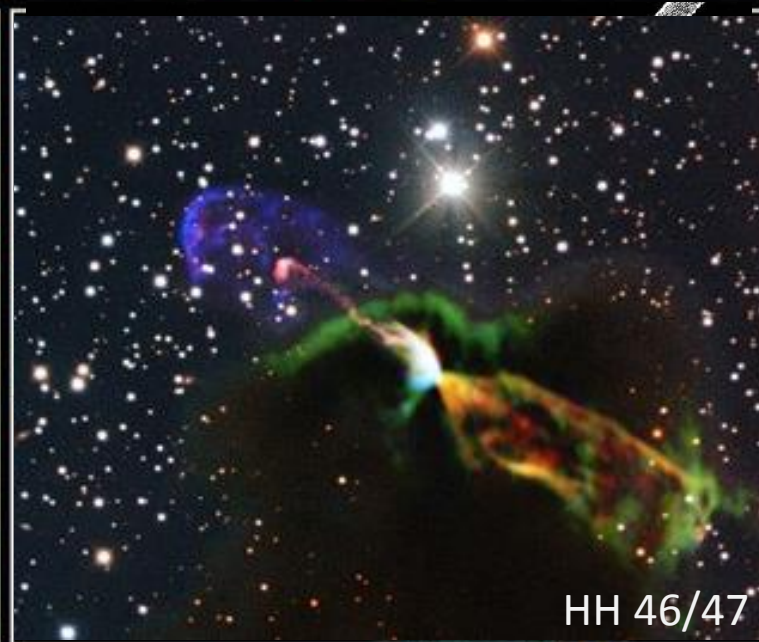
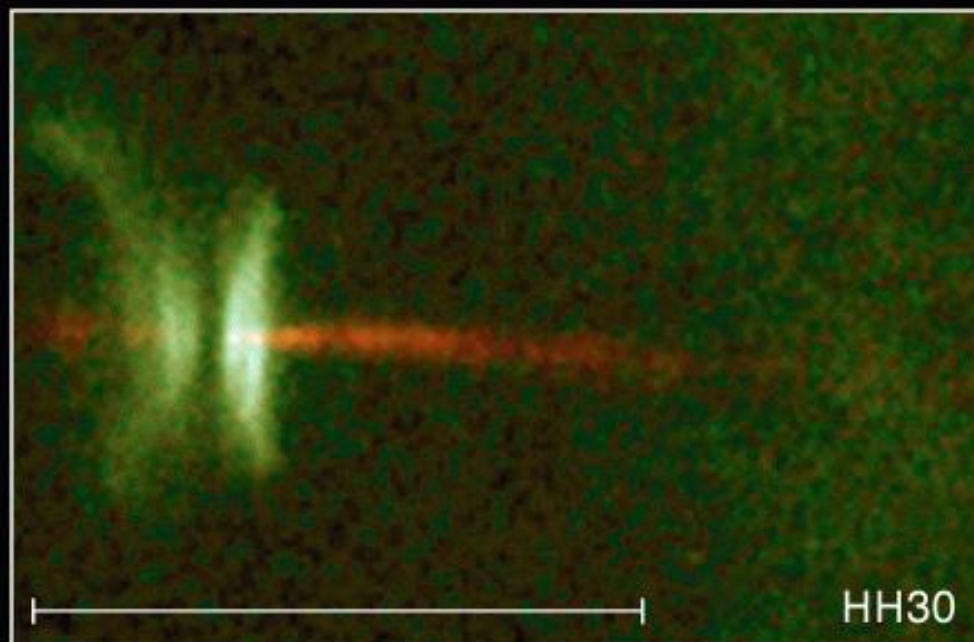
Detailné pozorovanie Veľkej hmloviny v Orióne (M42) pomocou HST odhalilo niekoľko desiatok zárodok nových hviezd obklopených protostelárnymi diskami.

Vznik hviezd



Galéria zárodkov nových hviezd obklopených protostelárnymi diskami vo Veľkej hmlovine v Orióne (M42).

Vznik hviezd



Vznik hviezd je často sprevádzaný výtryskami hmoty (tzv. Herbigove a Harove objekty).

Vznik hviezd

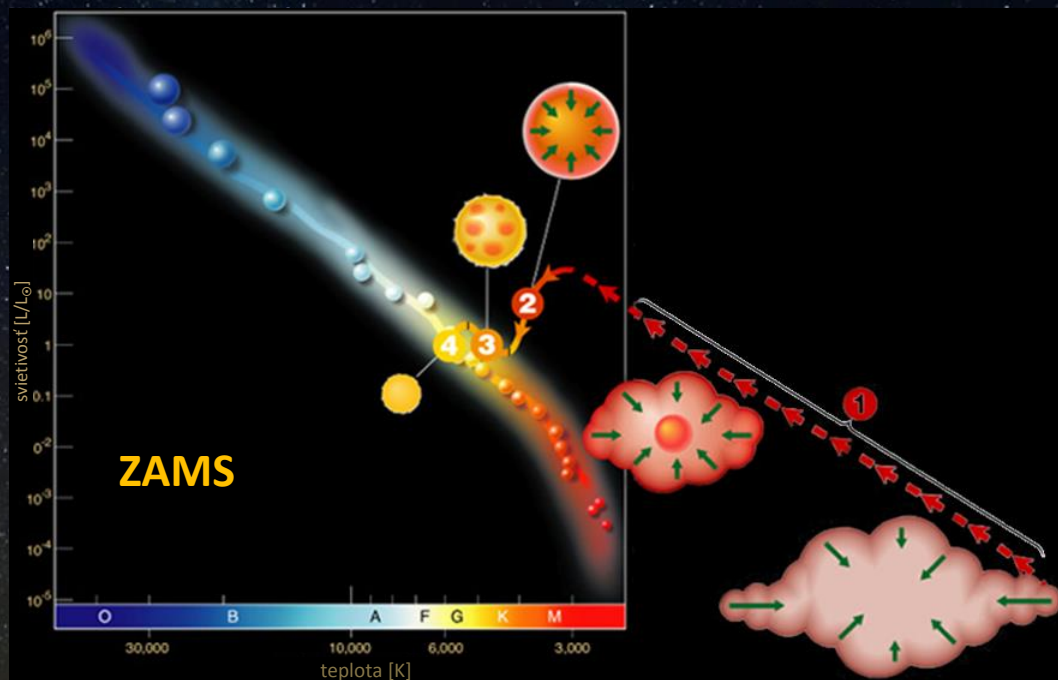
- ☀ Čas kolapsu t_c závisí od počiatkovej hmotnosti M :

$$t_c \propto \frac{1}{M^{3/2} R}$$

- ☀ Pre $M = 1M_\odot$ $t_c = 5 \times 10^7$ rokov, $M = 5M_\odot$ $t_c = 5,8 \times 10^5$ rokov, $M = 15 M_\odot$ $t_c = 6,2 \times 10^4$ rokov, no pre $M = 0,5M_\odot$ $t_c = 1,5 \times 10^8$ rokov.
- ☀ Kolaps neprebíha rovnomerne, najrýchlejšie rastie hustota a teplota v jadre \Rightarrow jadro sa dostane do kvázi-stacionárneho stavu skôr ako obálka. Pád hmoty na jadro spôsobí šokovú vlnu, ktorá sa šíri od centra a zahrieva vonkajšie vrstvy.
- ☀ Nárast teploty spôsobí disociáciu molekúl ($\approx 2 \times 10^3$ K), neskôr ionizáciu atómov ($\approx 2 \times 10^4$ K), na ktoré sa spotrebuje značné množstvo energie \Rightarrow zníženie teploty podporí kolaps.
- ☀ Po istom čase sa kolaps zastaví. Objekt v hydrostatickej rovnováhe nazývame *protohviezda*.
- ☀ Protohviezdy sa objavujú v HR diagrame ako chladné ($< 3 \times 10^3$ K) a svietivé objekty (pre $M = 1M_\odot$ $L \approx 200 L_\odot$)

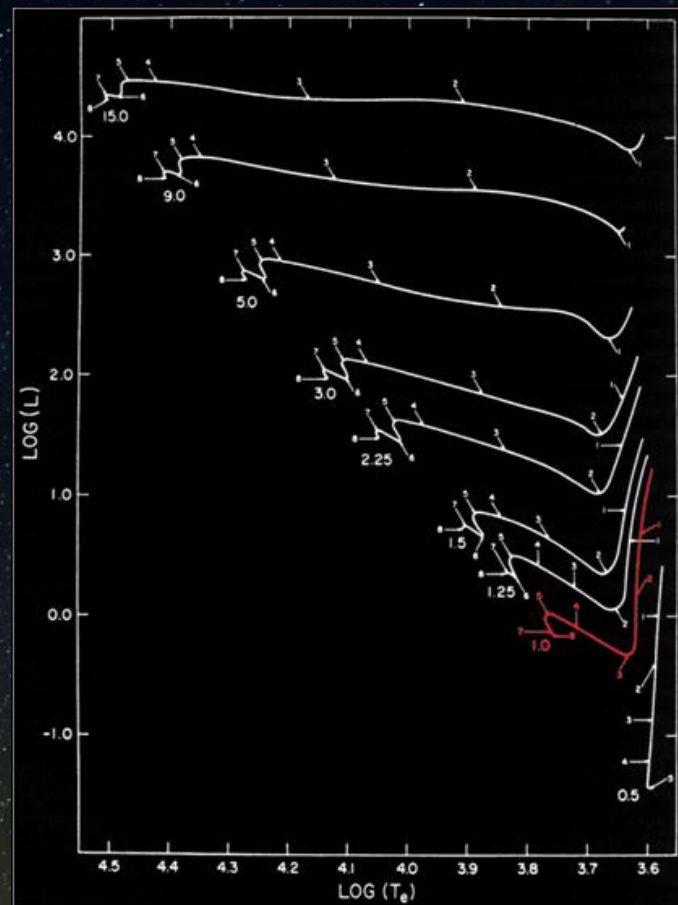
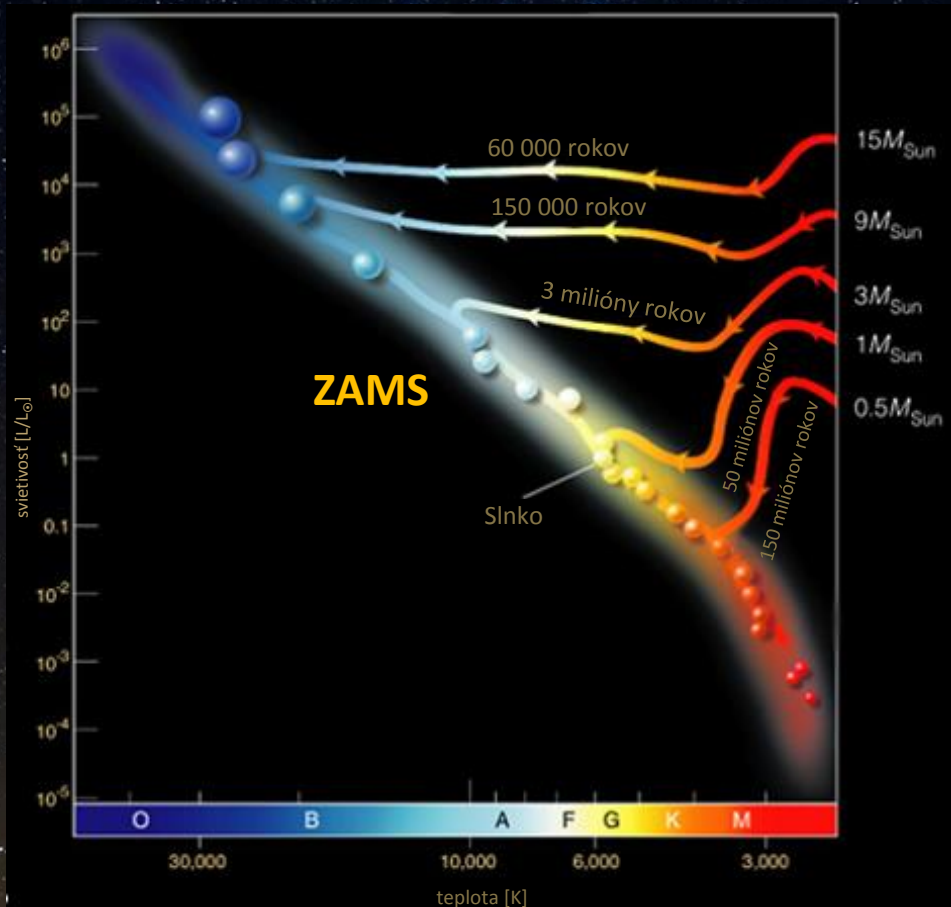
Vznik hviezd

- ☀️ Protohviezda pomaly kontrahuje až kým sa nezbaví gravitačnej energie získanej počas kontrakcie ($\Delta\langle E_K \rangle = -\frac{1}{2} \Delta\langle E_p \rangle$).
- ☀️ Dôležitú úlohu pre pokračovanie procesu kontrakcie zohráva *konvekcia*.



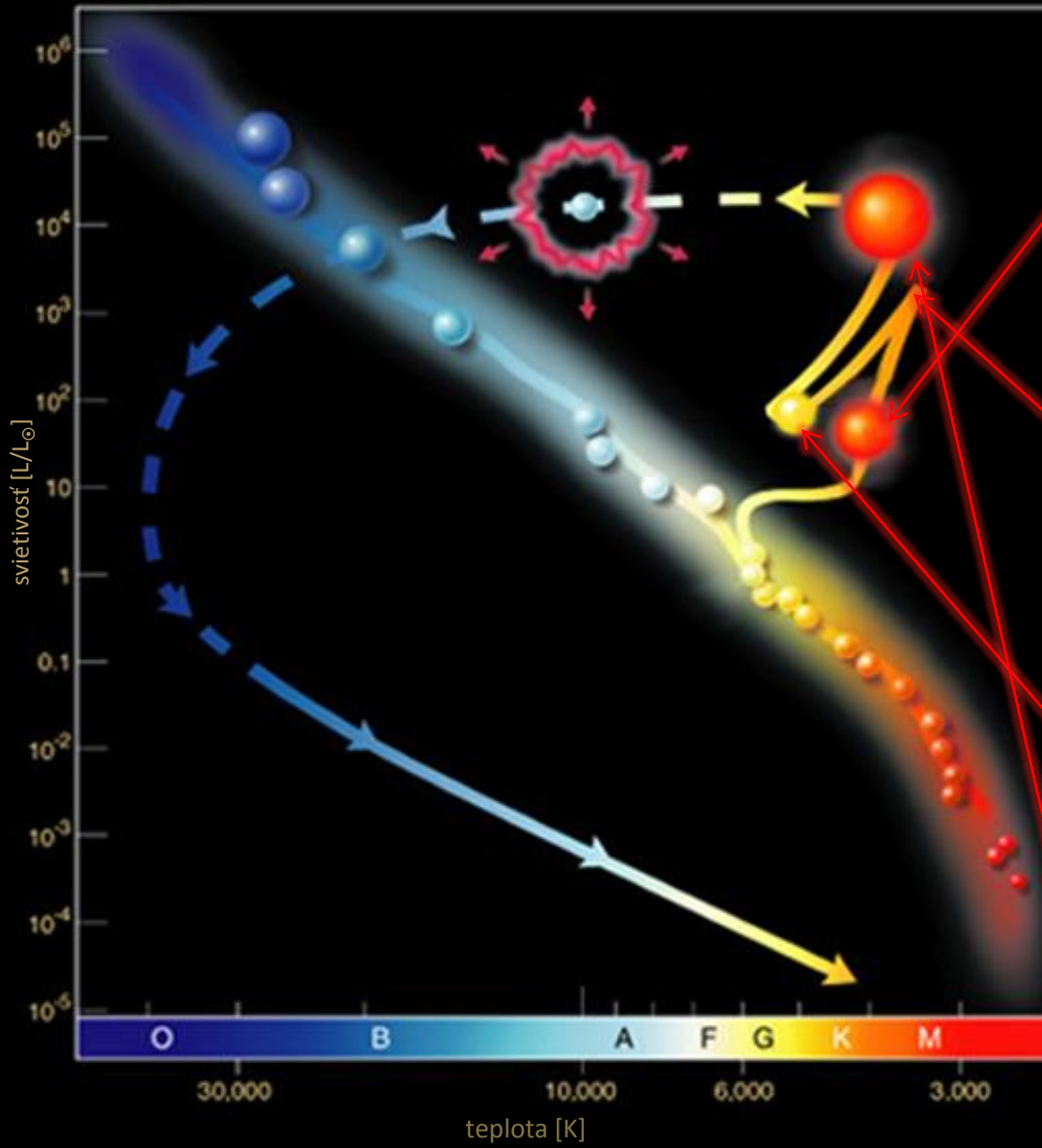
- 1 - Kontrakcia plynno-prachového oblaku sa zastaví, keď sa dosiahne hydrostatická rovnováha – vzniká protohviezda. Protohviezda sa v HR diagrame objavuje ako chladný svietivý objekt.
- 2 - Keďže je protohviezda nepriehľadná pre žiarenie, prenos tepelnej energie, ktorá vzniká premenou gravitačnej energie počas pomalej kontrakcie, zabezpečuje konvekcia. Svetivosť klesá, povrchová teplota sa mení len málo.
- 3 - S rastúcou vnútornou teplotou v centre protohviezdy vzniká a zväčšuje sa oblasť, kde sa energia prenáša žiarením. Povrchová teplota začne rásť a svetivosť tiež mierne rastie.
- 4 - Po dosiahnutí teploty 8×10^6 K sa v centre hviezdy zapália termonukleárne reakcie syntézy vodíka na hélium. Miesto, kde sa hviezda objaví v HR diagrame sa označuje ako hlavná postupnosť nulového veku ZAMS (ang.).

Vznik hviezd



Vývoj hviezd pred dosadnutím na hlavnú postupnosť nulového veku (ZAMS) závisí od ich hmotnosti. Zatiaľ čo málo hmotné hviezdy ($\approx 0,5 M_{\odot}$) sa vyvíjajú pomaly (≈ 150 miliónov rokov) a počas celého vývoja sú úplne konvektívne (v HR diagrame sa pohybujú vertikálne), hmotné hviezdy sa vyvíjajú omnoho rýchlejšie ($3 M_{\odot}$ - 3 milióny rokov, $15 M_{\odot}$ - 60 000 rokov), konvekcia v nich veľmi rýchlo zanikne (v HR diagrame sa pohybujú horizontálne) a v ich vnútri sa energia prenáša žiarením (vľavo). Detailné numerické výpočty štruktúry hviezd v jednotlivých časových okamihoch umožňuje sledovať zmenu polohy hviezd (tzv. evolučnú stopu) v HR diagrame (vpravo).

Evolúcia hviezd slnečnej hmotnosti



Vývoj hviezd slnečnej hmotnosti v HR diagrame.

Presun do vetvy obrov

- prehĺbovanie konvekcie
- prudký nárast svietivosti
- mierny pokles teploty
- $1,0 \times 10^9$ rokov

Červený obor

- zapálenie TN He
- pokles svietivosti
- mierny nárast teploty
- 6×10^8 rokov

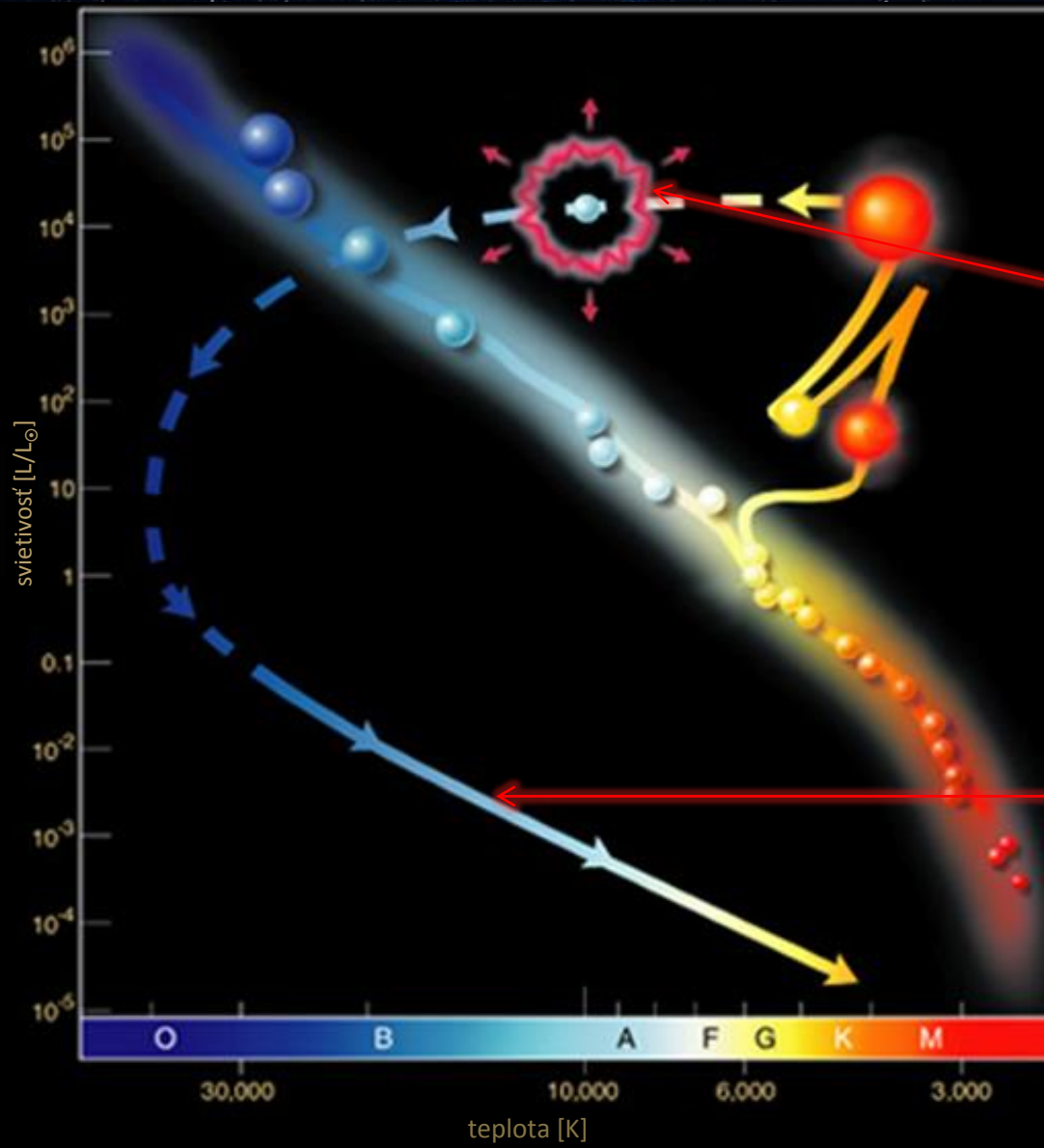
Červený obor

- horenie He v jadre
- horenie H vo vrstve
- nárast svietivosti, mierny pokles teploty, $1,5 \times 10^7$ rokov

Červený obor

- horenie He, H v jadre
- vznik C, O jadra
- maximálna svietivosť

Evolúcia hviezd slnečnej hmotnosti



- po spotrebovaní zásob H, He kolaps jadra
- odhodenie obálky
- kolaps jadra zastaví až tlak degenerovaných elektrónov
- vzniká *biely trpaslík*
- vysoká teplota bielenho trpaslíka spôsobí emisiu žiarenia obálky – pozorujeme *planetárnu hmlovinu*
- rozpínajúca sa planetárna hmlovina prestane byť časom pozorovateľná
- zostane iba biely trpaslík, ktorý bude postupne chladnúť až sa z neho stane čierny trpaslík

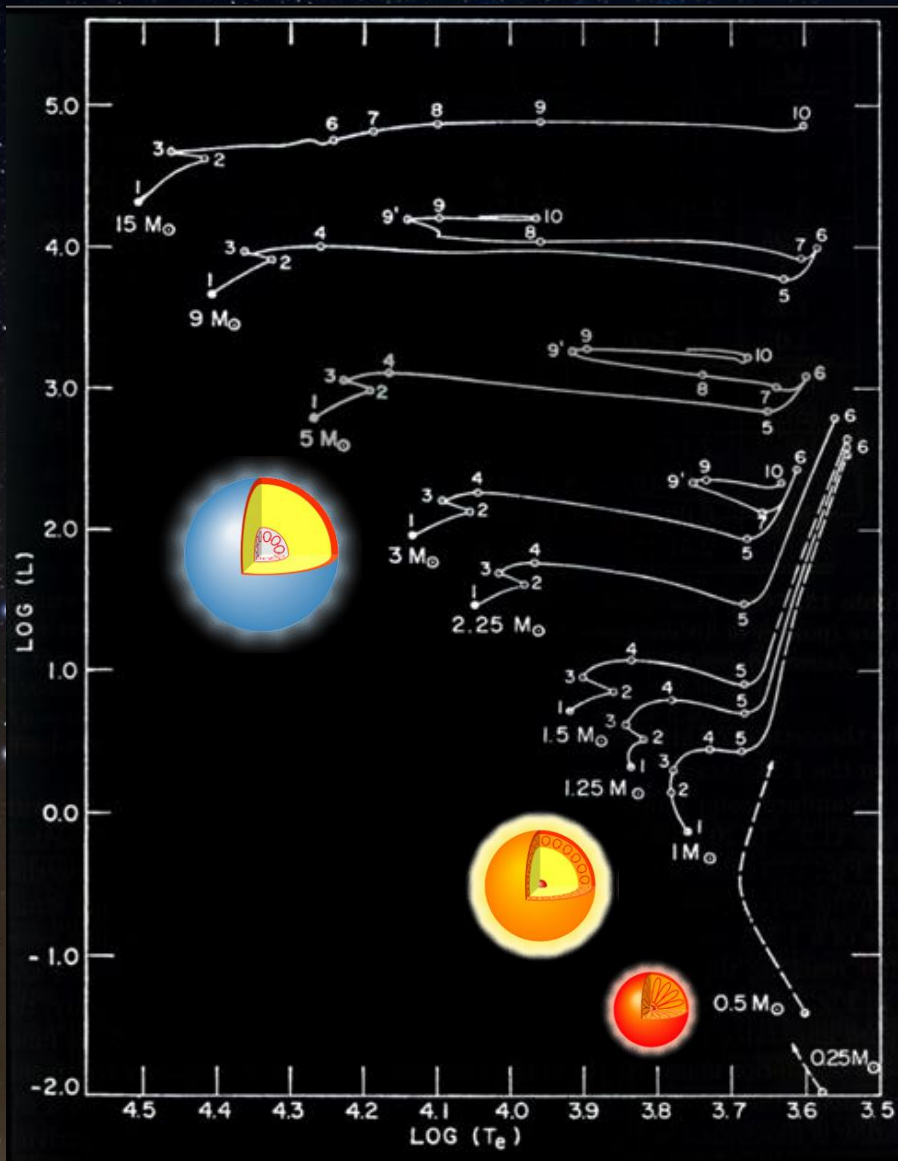
Vývoj hviezd slnečnej hmotnosti v HR diagrame.

Planetárne hmloviny



Príklady planetárnych hmlovín: NGC 7293 – Slimák (vľavo hore), NGC 6543 - Mačacie oko (vpravo hore), NGC 2392 – Eskimák (vľavo dole) a IC 418 – Spirograf (vpravo dole).

Evolúcia hviezd



- V jadrách hmotnejších hviezd pokračuje reťazec TN reakcií syntézou stále ťažších a ťažších prvkov a v tých najťažších vzniká železné jadro.
- Po spotrebovaní dostupného jadrového paliva reakcie ustanú, čo spôsobí kolaps.
- Kolaps jadra sa buď zastaví tlakom degenerovaných neutrónov – vzniká **neutrónová hviezda** alebo pokračuje donekonečna – vzniká **čierna diera**.
- Kolaps je sprevádzaný mohutnou explóziou – vzplanutím **supernovy typu II**.

- V menej hmotných hviezdach nikdy nedôjde k TN syntéze hélia.
- Po spotrebovaní dostupného jadrového paliva reakcie ustanú, nastane kolaps.
- Z jadra sa kolapsom stane **biely trpaslík**, obálka bude rozptýlená do priestoru.

Zatiaľ čo vo hviezdach slnečnej hmotnosti konvektívna zóna vytvára vonkajšiu obálku hviezd, menej hmotné hviezd sú počas celého života plne konvektívne. Hmotnejšie hviezd majú konvektívne iba jadrá.

Závěrečné štádia vývoja hviezd

- ✿ Po vyčerpaní všetkých dostupných zásob vnútornej energie hviezda prechádza do *záverečného neaktívneho štádia*.
- ✿ Podľa toho, či je výsledný objekt v hydrostatickej rovnováhe alebo nie rozlišujeme 2 typy záverečných štádií: *nerovnovážne* (supernovy typu Ia, *čierne diery*),
rovnovážne (*čierni trpaslíci* a *neutrónové hviezdy*).
- ✿ *Čierni trpaslíci* vznikajú z:
 - ✿ *Hnedých trpaslíkov* – objektov s $M < 0,075 M_{\odot}$, v ktorých teplota nikdy neprekročila hodnotu 8×10^6 K potrebnú na zapálenie TN syntéz vodíka na hélium.
 - ✿ Vychladnutých héliových *bielych trpaslíkov*, ktoré vznikajú z hviezd s $M < 0,5 M_{\odot}$, v ktorých teplota nikdy neprekročila hodnotu 10^8 K potrebnú na zapálenie TN syntéz hélia na ťažšie prvky.
 - ✿ Vychladnutých uhlíkovo-kyslíkových *bielych trpaslíkov*, ktoré vznikajú z hviezd s $M < 11 M_{\odot}$, v ktorých teplota nikdy neprekročila hodnotu 10^8 K potrebnú na zapálenie TN syntéz kyslíka a uhlíka na ťažšie prvky.
- ✿ *Neutrónové hviezdy* a *čierne diery* vznikajú z hviezd s hmotnosťou $M > 11 M_{\odot}$ počas vzplanutia supernovy typu II.
- ✿ Počas evolúcie hviezd dochádza k významnej strate hmotnosti (premenou na žiarenie, stratou hviezdnyim vetrom, odhodením vonkajších obálok), preto hmotnosti záverečných štádií hviezdneho vývoja môžu byť podstatne menšie ako počiatkové hmotnosti hviezd, z ktorých vznikli.

Závěrečné štádiá vývoja hviezd

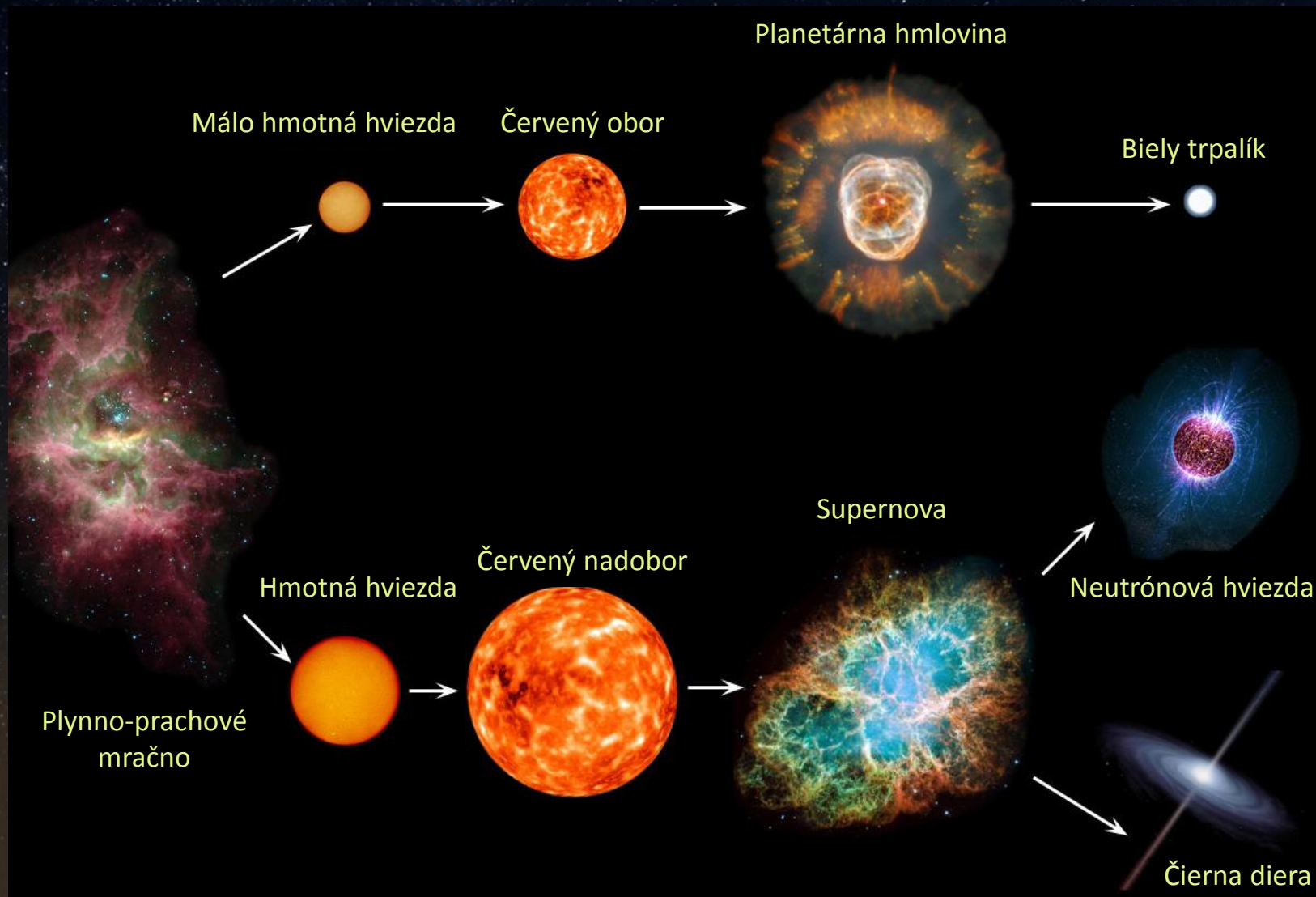


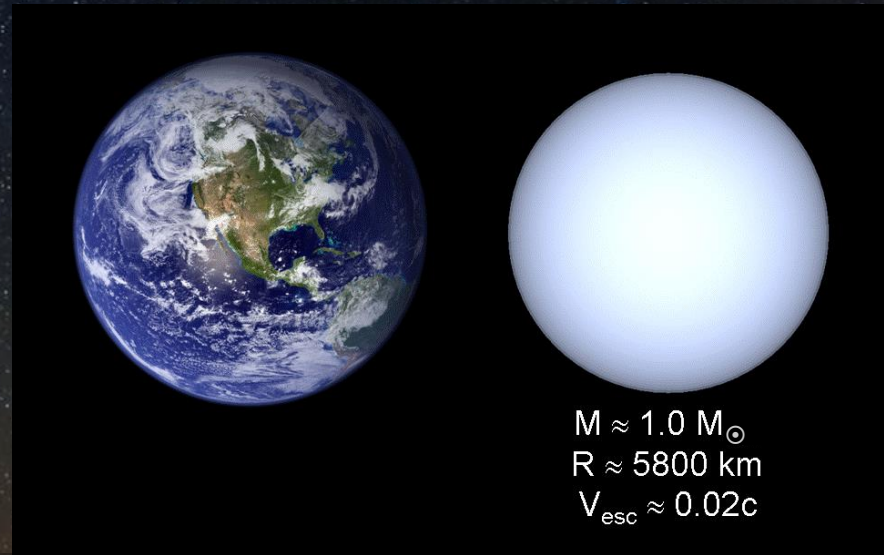
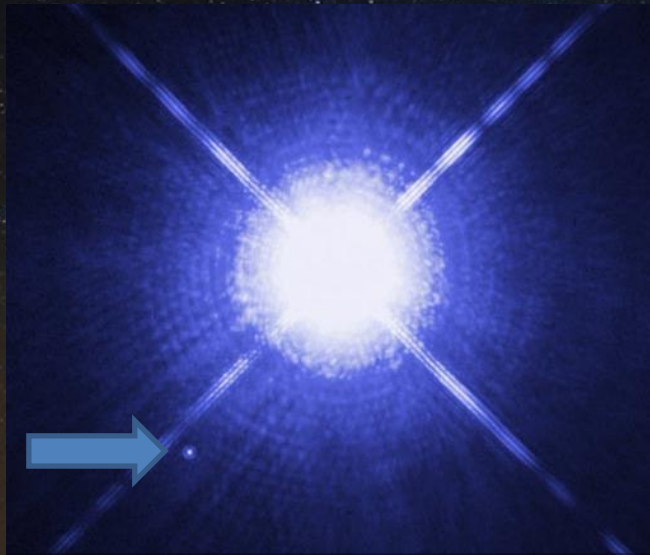
Schéma vzniku jednotlivých typov záverečných neaktívnych štádií vývoja hviezd.

Závěrečné štádia evolúcie hviezd

- ✱ V *čiernych trpaslíkoch* a *neutrónových hviezdach* je hydrostatická rovnováha udržiavaná tlakom *degenerovaného plynu*.
- ✱ Pri veľmi vysokých hustotách sa v látke začnú uplatňovať kvantovo-mechanické efekty.
- ✱ V látke zloženej z fermiónov (častice s polo-číselným spinom - napr. protóny, neutróny, elektróny, ...), uplatnením sa *Pauliho vylučovacieho princípu* (v danom stave sa môže nachádzať iba jeden fermión) je pri vysokých hustotách možné, aby tzv. *Fermiho energia* (udáva energiu fermiónu v najvyššom energetickom stave) bola väčšia ako tepelná energia tejto látky. Hovoríme, že látka je *degenerovaná*.
- ✱ Stavová rovnica *degenerovaného plynu* sa podstatne odlišuje od stavovej rovnice ideálneho plynu – takmer nezávisí od teploty a tlak rastie s hustotou: $P \sim \rho^{5/3}$ pre $v \ll c$ a $P \sim \rho^{4/3}$ pre $v \approx c$.
- ✱ Keďže tepelná energia závisí od teploty, degenerovaný stav látky nastáva pri danej hustote len pre teploty nižšie ako *teplota degenerácie* T_{de} ($T < T_{de}$).
- ✱ Teplota degenerácie je nepriamo úmerná hmotnosti fermiónov. Z tohto dôvodu sa napr. v bielych trpaslíkoch elektróny správajú ako degenerovaný plyn (teplota bieleho trpaslíka je menšia ako teplota degenerácie pre elektróny), no ostatné častice sa správajú ako ideálny plyn (teplota bieleho trpaslíka je vyššia ako teplota degenerácie napr. pre protóny alebo neutróny).

Čierni trpaslíci

- Čierni trpaslíci sú kompaktné ($R \approx R_Z$) hmotné ($M \approx M_\odot$) objekty, v ktorých je hydrostatická rovnováha udržiavaná gradientom tlaku degenerovaných elektrónov.
- Vznikajú ako výsledok evolúcie málo hmotných hviezd ($M < 11 M_\odot$). Keďže týchto je až 85%, väčšina hviezd vo vesmíre skončí ako čierni trpaslíci.
- Po svojom vzniku môžu byť veľmi horúci ($\approx 10^5$ K), preto ich označujeme ako *bieli trpaslíci*. Vzhľadom na veľkú vnútornú tepelnú energiu a malý povrch len veľmi pomaly chladnú – doteraz ešte žiadni bieli trpaslíci nedospeli do štádia čierneho trpaslíka.



Sírius B (vľavo, označený šípkou) bol objavený *Alvanom G. Clarkom* v roku 1862, no prítomnosť málo jasného sprievodcu Síria A predpovedal už v roku 1844 *Friedrich Bessel*.
Porovnanie typického bieleho trpaslíka so Zemou (vpravo).

Čierni trpaslíci

- ☀ Zatiaľ čo elektróny sa v WD správajú ako degenerovaný plyn, ostatná látka (kladne nabitú zbytky atómov) sa správa ako ideálny plyn. Ako WB žiari, postupne chladne. Pri teplote $T_{\text{wd}} \approx 6000 \text{ K}$ táto látka začne kryštalizovať.
- ☀ Spektrá WD sú charakterizované silným rozšírením spektrálnych čiar v dôsledku mohutného tlaku v tenkých atmosférach WD a veľmi silným gravitačným červeným posunom $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-4}$.
- ☀ Tiež sa pozoruje veľmi výrazná polarizácia svetla, ktoré je dôsledkom prítomnosti silného magnetického poľa ($10^2 - 10^4 \text{ T}$, pre porovnanie magnetické pole Zeme má $25 - 65 \mu\text{T}$).

Čierni trpaslíci

- Prvý model odvodil *R. H. Fowler* v roku 1926. Ukázal, že polomer bieleho trpaslíka klesá s hmotnosťou ($R \sim M^{-1/3}$).
- V roku 1928 *S. Chandrasekhar* ukázal, že pri vyšších hustotách sa plyn bude správať ako relativistický a pre $M > M_{\text{Ch}} = 1,4 M_{\odot}$ neexistuje stabilné riešenie a biely trpaslík kolabuje na neutrónovú hviezdu alebo čiernu dieru.

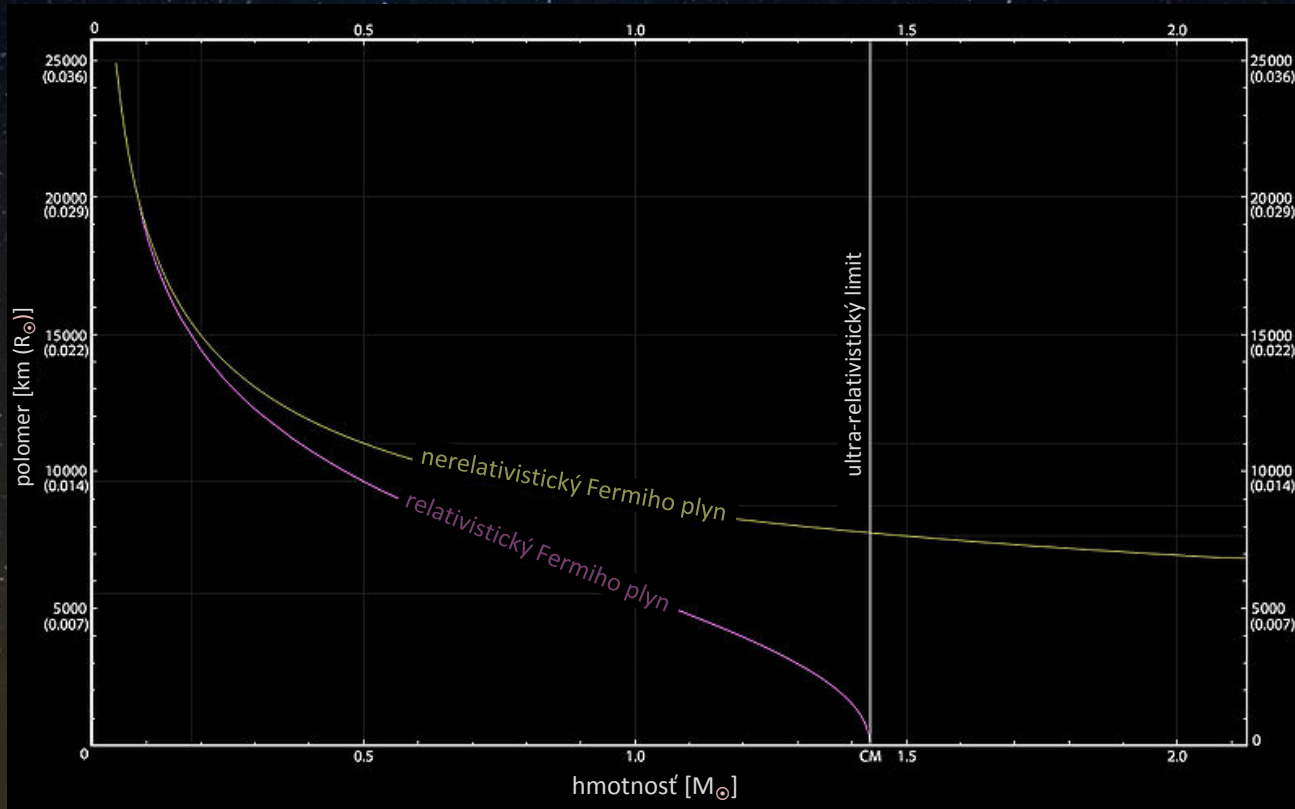


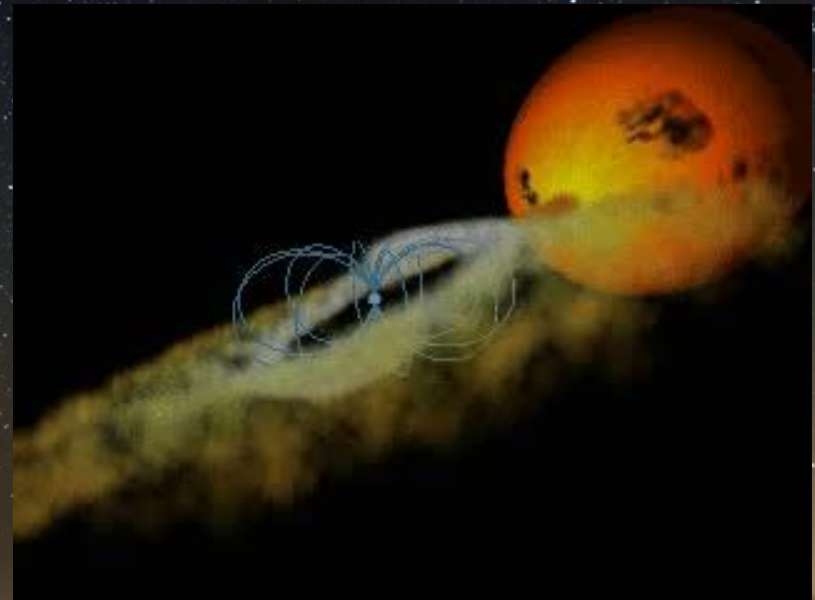
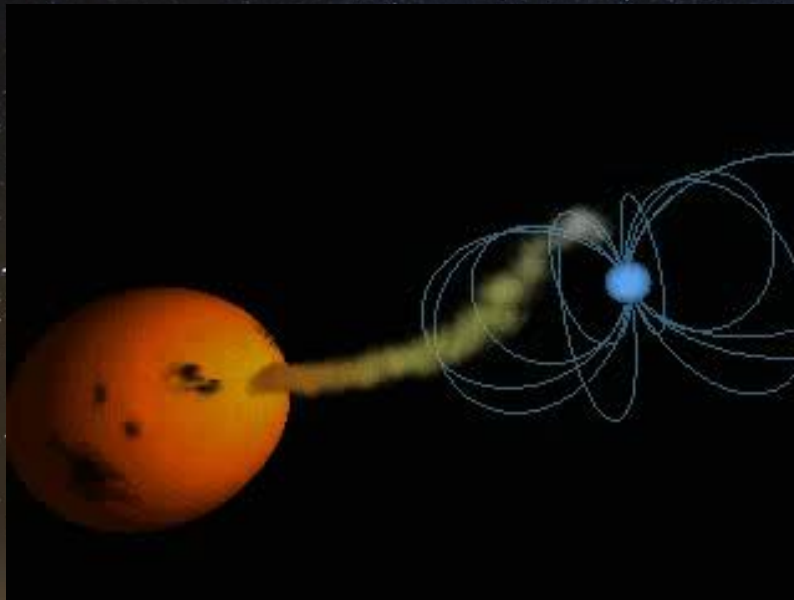
Diagram závislosti polomeru objektu zloženého z Fermiho plynu od hmotnosti. Pre relativistický Fermiho plyn existuje limitná hmotnosť, po prekročení ktorej neexistuje stabilné riešenie.

Čierni trpaslíci

- ✱ V bielych trpaslíkoch (WD) sú veľmi „bezpečne“ uložené produkty TN syntéz (nukleárny odpad, väčšinou C, O) - na dezintegráciu WD by sme potrebovali energiu $-E_{\text{pot}} \approx 8 \times 10^{43} \text{ J}$, čo je energia ktorú vyžiari Slnko za $6,5 \times 10^9$ rokov.
- ✱ Napriek tomu existuje pomerne dobrá šanca na rozmetanie WD (pomer väzbovej a celkovej energie nie je veľký: $-E_{\text{pot}} / M_{\text{WD}} c^2 \approx 4,4 \times 10^{-4}$). Stačí zapáliť TN syntézy C a O a uvoľnená energia je dostatočná na prekonanie gravitačnej väzby. Práve toto sa deje pri vzplanutí *supernov typu Ia*.
- ✱ Progenitormi týchto vzplanutí sú interagujúce dvojhviezdy zložené z (kyslíkovo - uhlíkového) WD, na ktorého je prenášaná látka z blízkeho hviezdneho sprievodcu, zvyčajne červeného obra.
- ✱ Keď sa hmotnosť WD priblíži k *Chandrasekharovej limitnej hodnote* ($1,4 M_{\odot}$), tlak degenerovaných elektrónov už nie je schopný zabrániť kolapsu. Teplota i hustota stúpnu a zapália sa TN reakcie uhlíka. Behom niekoľkých sekúnd sa reakcia rozhorí v značnej časti WD (uhlíková detonácia), pričom uvoľnená energia ($1 - 2 \times 10^{44} \text{ J}$) je schopná rozmetať WD.
- ✱ WD sú súčasťou aj ďalších typov dvojhviezd, v ktorých interakcia zložiek (prenos hmoty) vedie k zaujímavým prejavom aktivity (vzplanutia nov).

Kataklyzmatické premenné hviezdy (CVs)

- ☀ CVs sú tesné sústavy zložené z bieleho trpaslíka (WD) a červenej hviezdy hlavnej postupnosti (spektrálny typ M alebo K), ktorá vyplňa objem svojho vnútorného Rocheho laloka a prenáša látku do okolia WD.
- ☀ Na základe veľkosti magnetického poľa WD táto látka buď vytvára akrečný disk alebo sleduje magnetické siločiaru a dopadá na povrch WD (mCVs - polary a intermediálne polary (IPs)).
- ☀ V IPs magnetické pole WD ($10^2 - 10^3$ T) nie je dostatočne silné na to, aby úplne zabránilo vzniku akrečného disku, iba naruší jeho vnútornú časť a akrečný prúd je následne vedený smerom k magnetickým pólom a k povrchu WD.



Model polaru (vľavo) a intermediálneho polaru (vpravo).

Neutrónové hviezdy

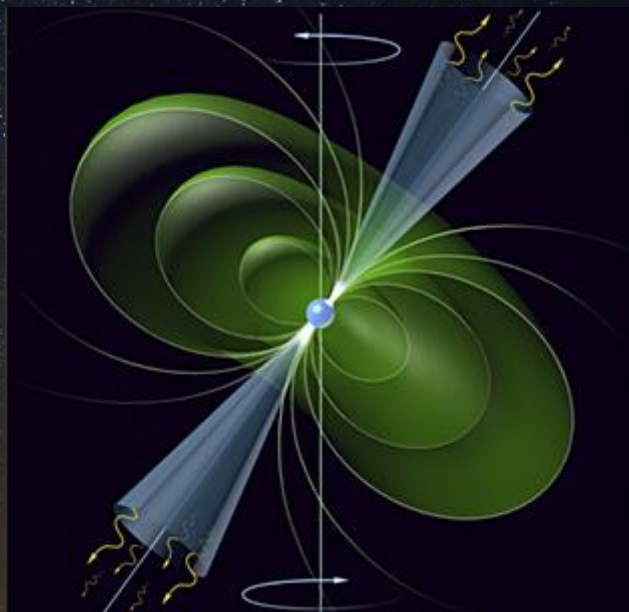
- ☀ Neutrónové hviezdy (NS) sú objekty v hydrostatickej rovnováhe, ktoré sú zložené prevažne z neutrónov.
- ☀ Ak kolabuje jadro hmotnej hviezdy ($M > 11 M_{\odot}$), gradient tlaku degenerovaných elektrónov nedokáže kolaps zastaviť. Pri hustotách $10^{10} - 10^{14} \text{ kg m}^{-3}$ je energeticky výhodnejšie „upratať“ elektróny do protónov, dochádza k neutronizácii látky (inverzným β rozpadom):



- ☀ Ako klesá koncentrácia elektrónov, klesá tlak a látka je pomerne dobre stlačiteľná. Kolaps zastaví až gradient tlaku degenerovaných neutrónov.
- ☀ Typická NS je objekt s hmotnosťou $M_{NS} \approx 1,4 - 3,2 M_{\odot}$ a polomerom $R_{NS} \approx 10 - 18 \text{ km}$. Stredná hustota dosahuje hodnoty $3,7 - 5,9 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$ (hustota v atómových jadrách), no v jadrách NS môže dosahovať hodnoty aj $10^{18} \text{ kg m}^{-3}$.
- ☀ Väzbová energia NS je $1,8 - 2,5 \times 10^{46} \text{ J}$, čo je energia ktorú vyžiari Slnko za 3 bilióny rokov.
- ☀ Gravitačný červený posun NS je $\Delta\lambda / \lambda \approx 0,13 - 0,30$.
- ☀ V dôsledku zákona zachovania momentu hybnosti počas kolapsu sa NS roztáčajú na veľmi vysoké rotačné rýchlosti, často až k medze stability, ktorá zodpovedá rotačnej perióde $P_{rot} \approx 3 - 8 \times 10^{-4} \text{ s}$. Postupom času sa však rotácia spomaľuje.
- ☀ Počas kolapsu sa tiež zvyšuje indukcia magnetického poľa až na hodnotu 10^8 T (pri tzv. *magnetaroch* až na 10^{10} T).

Neutrónové hviezdy

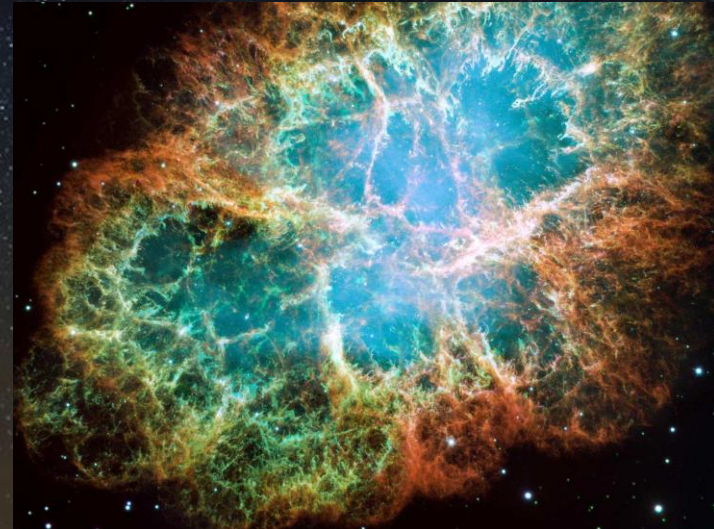
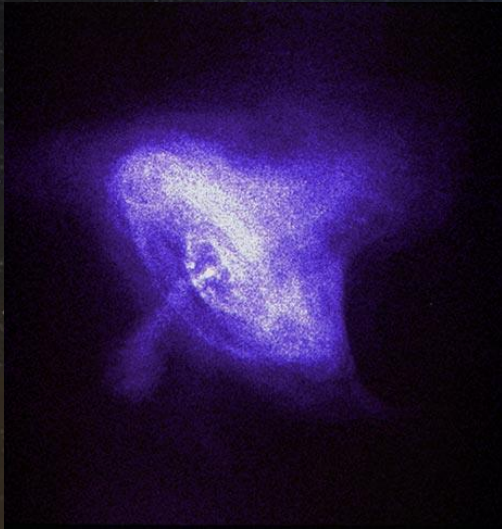
- ✦ Aj keď teoreticky NS predpovedal už v 30. rokoch 20. storočia *L. D. Landau*, dlho nebolo jasné, ako by sa dali pozorovať. Po svojom vzniku by síce mali byť veľmi horúce ($\approx 10^6$ K), no vzhľadom na malý povrch je ich celková svietivosť porovnateľná so Slnkom. Navyše je väčšina energie vyžiarená v mäkkej röntgenovej oblasti.
- ✦ Mladá NS sa však môže prejavíť interakciou svojho silného magnetického poľa (skloneného k rotačnej osi) s okolitou látkou emisiou tzv. *synchrotrónového žiarenia* (prevažne v rádiovkej oblasti). Toto žiarenie je silne kolimované. Ak sa pozorovateľ nachádza v osi vyžarovacích kužeľov, bude pozorovať krátke *impulzy* žiarenia.



Majákový model vyžarovania rýchlo rotujúcej NS.

Neutrónové hviezdy

- ✿ Prvé 4 pulzujúce rádiové zdroje objavili v roku 1968 *J. Bellová* a *A. Hewish*. Ešte v tom istom roku *T. Gold* správne vysvetlil povahu týchto objektov, ako rýchlo rotujúcich NS so silným dipólovým magnetickým poľom, ktorého os zvierá s rotačnou osou nenulový uhol.
- ✿ Dnes poznáme vyše 1000 pulzarov s pulzačnými (rotačnými) periódami od 1,56 ms do 4,3 s. Rotačné periódy sa časom predlžujú ako dôsledok straty momentu hybnosti NS interakciou magnetického poľa NS s elektricky nabitými časticami v jej okolí.
- ✿ Pozorujeme aj sústavy zložené z dvoch NS. Napr. relativistický binárny pulzar PSR 1913+16, ktorý v roku 1974 objavili a popísali *A. Hulse* a *Joseph H. Taylor* (Nobelova cena za fyziku v roku 1993 za dôkaz emisie gravitačných vln).



Blízke okolie pulzaru Krab (jasný bod na fotografii vľavo zachytenej pomocou röntgenového ďalekohľadu Chandra) a Krabia hmlovina (vpravo), v ktorej sa tento pulzar nachádza. Vznik pulzaru bol pozorovaný ako vzplanutie supernovy v roku 1054.

Neutrónové hviezdy

- Model štandardnej NS:
 - Atmosféra ($h \approx 10$ mm).
 - Vonkajšia kôra (prevažujú degenerované elektróny, $h \approx 100$ m).
 - Rozhranie (ukotvenie supertekutých kvantových vírov).
 - Vnútoraná kôra (neutrónová supertekutina, $h \approx 1$ km).
 - Jadro (supertekuté neutróny, zvyšky jadier, protóny ultra-relativistické degenerované elektróny, $r \approx 10$ km, $\rho \approx 10^{17}$ kg m⁻³). Pre veľmi hmotné NS, v ktorých centre hustota prekračuje 10^{18} kg m⁻³ v jadre nachádzame *hypotetické jadierko* (priemer pár kilometrov) z tzv. kvark-gluónovej plazmy.
- Pri výpočte modelov NS narážame na viacero problémov: nepoznáme priebeh stavovej rovnice (priebeh jadrových síl, vznik nových častíc) pri vysokých hustotách a tiež je potrebné zobrať do úvahy efekty VTR - všeobecnej teórie relativity (zakrivenie časopriestoru, gravitačné účinky tlaku, ...).
- Efekty VTR spôsobujú, že nemôže existovať NS s ľubovoľnou hmotnosťou. Pre $M > M_{\text{LOV}}$, kde M_{LOV} je *Landauova-Oppenheimerova-Volkoffovova medzná hmotnosť*, neexistuje stabilné riešenie a NS kolabuje za vzniku *čiernej diery*. Väčšina odhadov limitnej hmotnosti NS sa nachádza v intervale $1,4 - 2,7 M_{\odot}$.

Čierne diery

- ✱ Pri danej hmotnosti sú to najsilnejšie gravitačne viazané telesá.
- ✱ Vznikajú z hviezd s veľmi vysokou počiatočnou hmotnosťou ($30-50 M_{\odot}$). Po spotrebovaní všetkých dostupných zásob TN paliva sa jadro takýchto hviezd zrúti. Ak hmotnosť kolabujúceho jadra prevýši M_{LOV} , kolaps už nedokáže nič zastaviť. Stabilné riešenie neexistuje, vzniká *čierna diera* (BH).
- ✱ Prvý, kto študoval otázku existencie objektov, z ktorých je úniková rýchlosť vyššia ako rýchlosť svetla vo vákuu (v rámci Newtonovej teórie gravitácie) bol *J. Mitchel* (1784).
- ✱ Realistický výpočet v rámci VTR uverejnil v roku 1916 *K. Schwarzschild* (nerotujúca nenabitá BH). Model rotujúcej BH vytvoril *R. Kerr* (1963). Ďalšie významné práce o vlastnostiach BH publikovali najmä *S. Chandrasekhar*, *J. A. Wheeler* (zaviedol pojem čierna diera), *J. B. Zeldovič*, *R. Penrose* a *S. W. Hawking* (vyparovanie BH).
- ✱ Nerotujúcu nenabitú BH popisuje Schwarzschildovo riešenie, v ktorom rozhodujúcim pojmom je *Schwarzschildov (gravitačný) polomer* telesa:
$$R_S = 2GM/c^2 = 2,7 (M/M_{\odot}) \text{ [km]}$$
- ✱ Sférická plocha s polomerom R_S sa nazýva *horizont udalostí* (úniková rýchlosť $v_u = c$).
- ✱ Pre telesá s $R < R_S$ neexistuje stabilné riešenie, telesá sa nutne zrúti a vytvorí BH.

Čierne diery

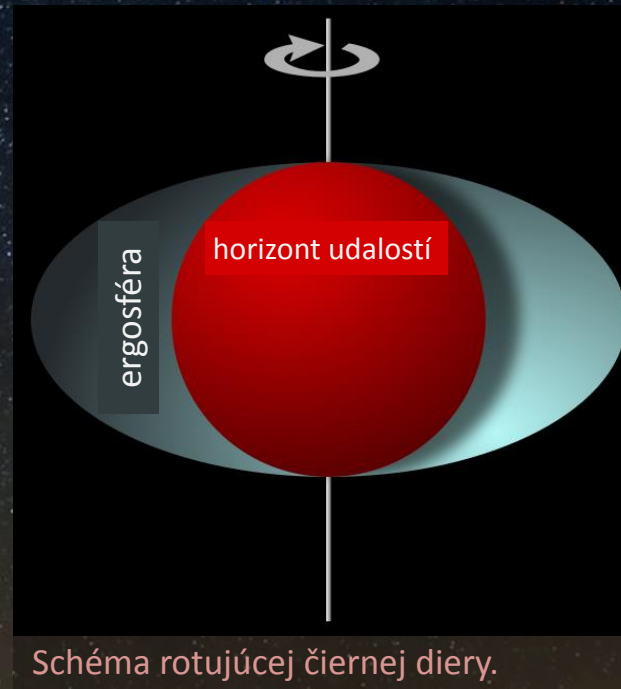
- Gravitačné pole zakrivuje časopriestor a čím bližšie sa nachádzame k horizontu udalostí, tým sú efekty VTR výraznejšie. Vzdialený pozorovateľ uvidí, že čím bližšie sa nachádzame k horizontu udalostí, tým napr. pomalšie plynie čas alebo sa predlžuje vlnová dĺžka, resp. spomaľuje frekvencia vysielaného žiarenia:

$$\nu' / \nu = (1 - R_S / r)^{1/2}$$

- Pre $r \rightarrow R_S$, čas sa zastaví, $\nu \rightarrow 0$ a nastáva nekonečný červený posun.
- Ak pozorujeme kolaps telesa z veľkej diaľky, kolaps sa pre nás neustále spomaľuje a pre $r \rightarrow R_S$ sa úplne zastaví, „zmrzne“ na horizonte udalostí. Súčasne červený posun narastie nad všetky medze a teleso prestane byť pozorovateľné.
- Vo vlastnom čase sa však teleso zrúti a vytvorí BH za konečný čas (typicky 10^{-5} s). Za konečný čas tiež dosiahne nulový polomer, zrúti sa do bodu, tzv. *singularity*.
- Vlastnosti BH popisujú teorémy:
 - Teoréma kozmickej cenzúry*: Neexistujú nahé singularity (všetky sú skryté pod horizontom udalostí).
 - Teoréma čierna diera nemá vlasy*: BH popisujú len tri parametre: hmotnosť, moment hybnosti a celkový náboj.

Čierne diery

- Rotujúca BH má zložitejšiu štruktúru. Jej horizont udalostí je menší a je obklopený tzv. plochou *nekonečného červeného posunu*. Pod touto plochou je strhávanie časopriestoru rotujúcou BH tak veľké, že pre teleso je nemožné zotrvať v pokoji.
- Priestor medzi týmito plochami sa nazýva *ergosféra*, odkiaľ možno tzv. *Penrosovým mechanizmom* čerpať energiu (zodpovedá až 29% pôvodnej hmotnosti rotujúcej BH).



Čierne diery

- ✱ V súčasnom vesmíre sa do fázy BH dostávajú telesá s hviezdou hmotnosťou alebo podstatne hmotnejšie objekty ($10^6 - 10^8 M_{\odot}$), ktoré vznikajú kolapsom hmoty v centrách guľových hviezdokôp alebo galaxií (tzv. *supermasívne čierne diery*).
- ✱ Keďže BH sa priamo pozorovať nedá, jej prítomnosť vieme dokázať iba nepriamo, na základe jej gravitačných účinkov na hmotu nachádzajúcu sa v jej okolí (hviezdny sprievodca v binárnych sústavách, akréčne disky, výtrysky hmoty, ...).

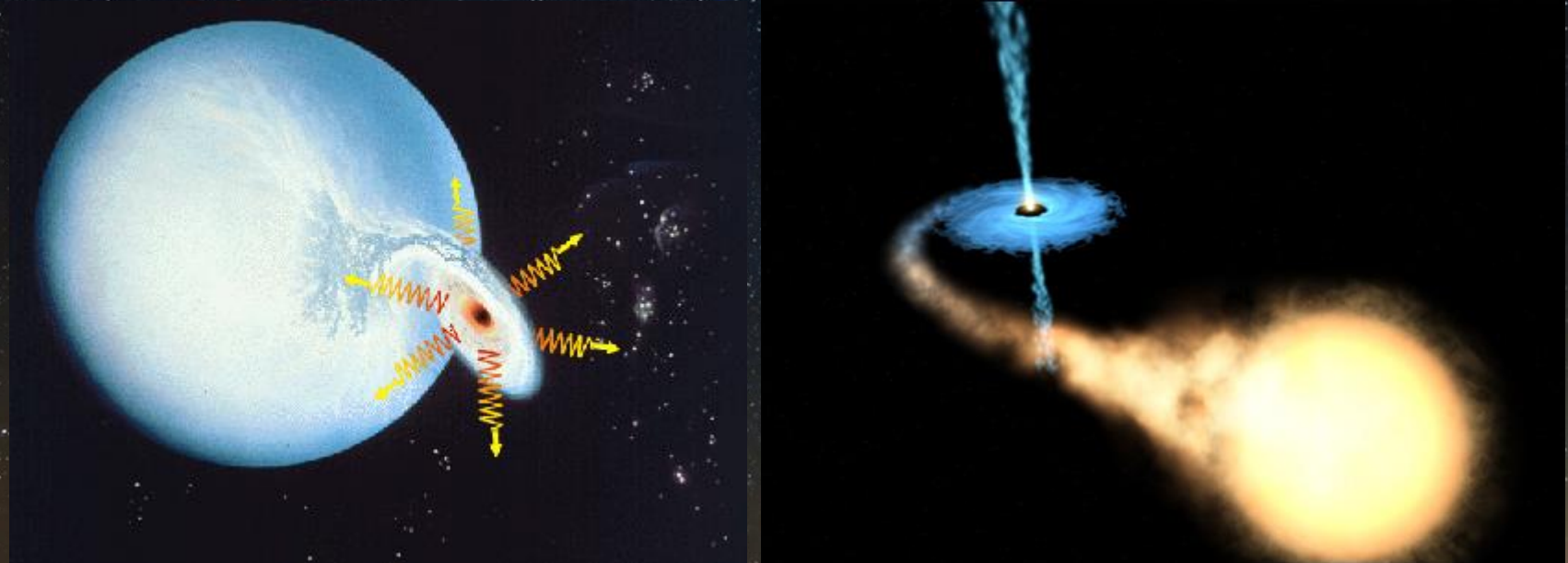


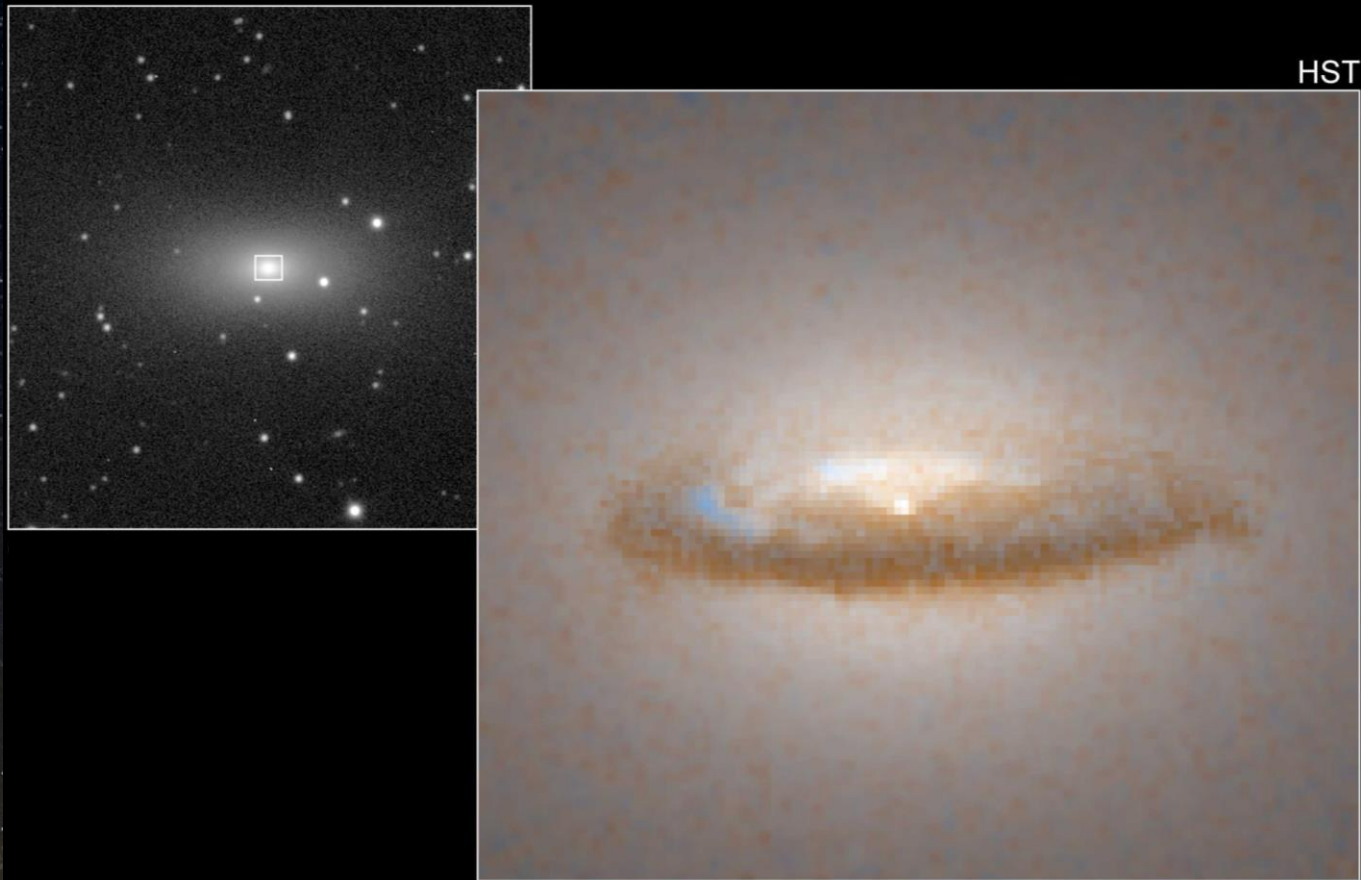
Schéma röntgenovej dvojhviezdy Cyg X-1 (vľavo). Okolo normálnej zložky v podobe modrého nadobra obieha neviditeľný sprievodca s obežnou dobou 5,6 dňa. Prenosom látky vzniká okolo tohto kompaktného sprievodcu akréčný disk, ktorého vnútorná oblasť je v dôsledku vysokej teploty zdrojom röntgenového žiarenia. Magnetické pole akréčného disku v okolí BH môže spôsobiť vznik výtryskov hmoty (vpravo).

Čierne diery



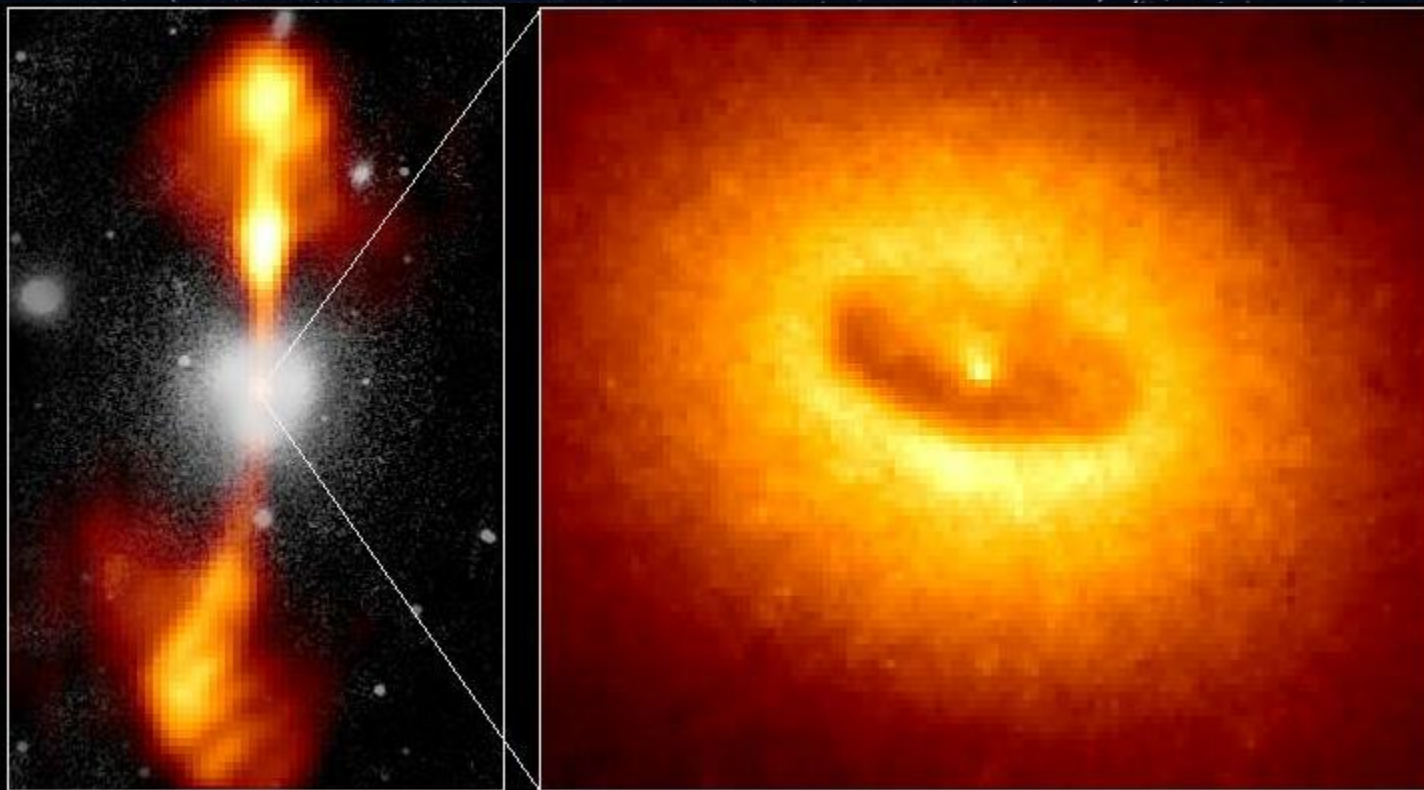
Ak sa hviezda dostane príliš blízko BH, slapové sily ju roztrhajú a jej hmota vytvorí v okolí BH akréčný disk. V dôsledku viskozity v disku sa hmota postupne dostáva čoraz bližšie k horizontu udalostí. Zároveň sa zahrieva na veľmi vysoké teploty a žiari v röntgenovej oblasti spektra. Nakoniec hmota nenávratne skončí pod horizontom udalostí.

Čierne diery



Supermasívnu čiernu dieru v centre galaxie NGC 7052 „prezradil“ akréčný disk hmoty, ktorá okolo nej krúži. Na základe pozorovaní rýchlosti hmoty v tomto disku vieme určiť hmotnosť telesa, ktoré jej pohyb spôsobilo.

Čierne diery



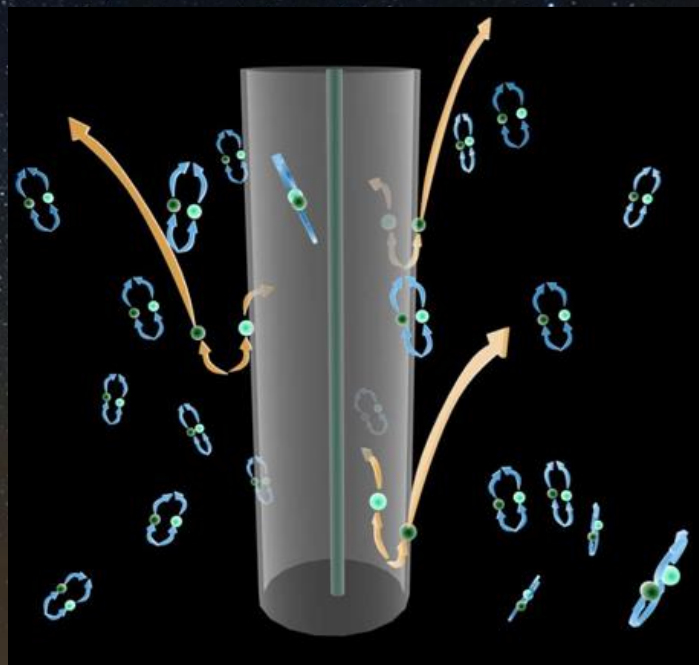
Supermasívna čierna diera v centre galaxie NGC 4261 sa prejavuje nielen prítomnosťou akréčneho disku hmoty (vpravo), ale aj výtryskami hmoty, ktoré sú viditeľné hlavne v infračervenej oblasti spektra (na fotografii galaxie vľavo).

Čierne diery

- ☀ *S. W. Hawking* prišiel s myšlienkou, že aj BH môžu „žiarit“. Je založená na predstave fyzikálneho vákua ako oceánu virtuálnych párov častíc a antičastíc, ktoré neustále vznikajú a zanikajú, pričom porušenie zákona zachovania energie sa deje len v rámci *Heisenbergovho princípu neurčitosti*.
- ☀ Ak ku vzniku páru dôjde tesne nad horizontom udalostí BH, jeden člen virtuálneho páru môže skončiť pod horizontom udalostí, pričom do BH vnesie negatívnu energiu. Hmotnosť BH sa zníži, dochádza k tzv. *kvantovému vyparovaniu* BH. Druhý člen páru môže uniknúť a stane sa z neho reálna častica.
- ☀ Vyparovanie je veľmi pomalý proces a čas úplného vyparenia BH závisí od jej hmotnosti:

$$t_{ev} = \frac{5120\pi G^2 M^3}{\hbar c^4}$$

Pre $M=1M_{\odot}$, $t_{ev}=2,1 \times 10^{67}$ rokov.



Virtuálne páry častíc a antičastíc nad horizontom udalostí (šedá plocha) čiernej diery.

A night sky filled with stars, with a dark horizon at the bottom. The stars are of various colors and sizes, creating a dense field of light points against the dark background. The horizon is a dark, flat line at the bottom of the frame, suggesting a landscape or a body of water under a clear night sky.

Štruktúra a evolúcia vesmíru

Štruktúra hmoty vo vesmíre

- ☀ Hmota má tendenciu zoskupovať sa do väčších štruktúr \Rightarrow hierarchické usporiadanie.
- ☀ Hviezdy, dvojhviezdy, viacnásobné hviezdne sústavy ($M \approx 0,1 - 10^2 M_{\odot}$).
- ☀ Hviezdne asociácie, otvorené hviezdokopy ($M \approx 10 - 10^4 M_{\odot}$, $\phi \approx 1 - 10$ pc, $N \approx 10^4 - 10^5$).
- ☀ Guľové hviezdokopy ($M \approx 10^5 - 10^6 M_{\odot}$, $\phi \approx 10 - 10^2$ pc, $n \approx 10^2 - 10^3$ hviezd/pc³, $N \approx 10^2$).



Otvorená hviezdokopa M45 Plejády (vľavo) a guľová hviezdokopa M13 (vpravo):

Galaxie

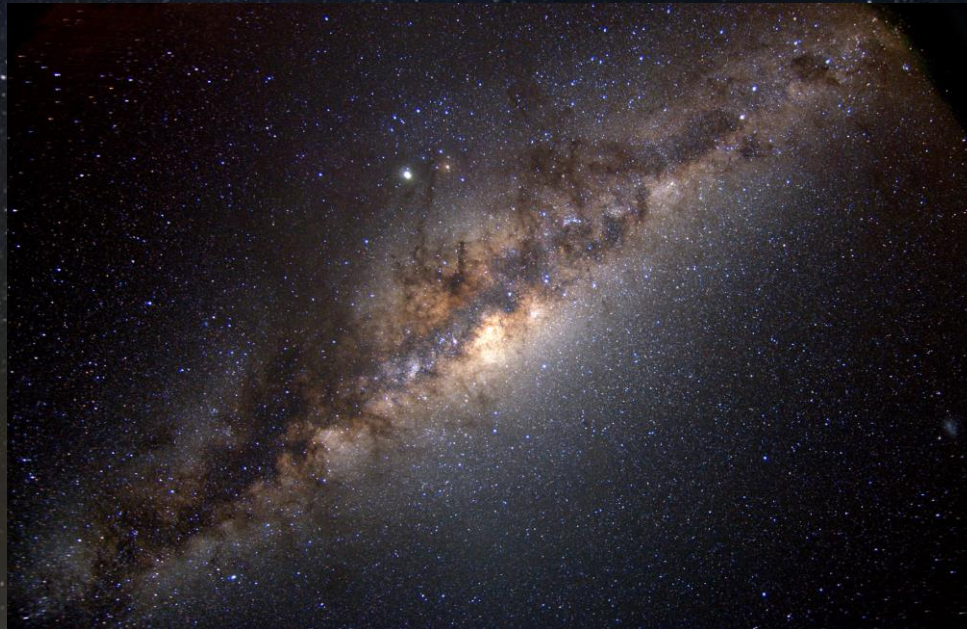
- ☀ Hmota má tendenciu zoskupovať sa do väčších štruktúr \Rightarrow hierarchické usporiadanie.
- ☀ Hviezdy, dvojhviezdy, viacnásobné hviezdne sústavy ($M \approx 1 - 10^2 M_{\odot}$).
- ☀ Hviezdne asociácie, otvorené hviezdokopy ($M \approx 10 - 10^4 M_{\odot}$, $\phi \approx 1 - 10 \text{ pc}$, $N \approx 10^4 - 10^5$).
- ☀ Guľové hviezdokopy ($M \approx 10^5 - 10^6 M_{\odot}$, $\phi \approx 10 - 10^2 \text{ pc}$, $n \approx 10^2 - 10^3 \text{ hviezd/pc}^3$, $N \approx 10^2$).
- ☀ Galaxie ($M \approx 10^7 - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^3 - 10^5 \text{ pc}$, $N \approx 10^{11}$).



Veľká galaxia v Androméde (M31).

Galaxia

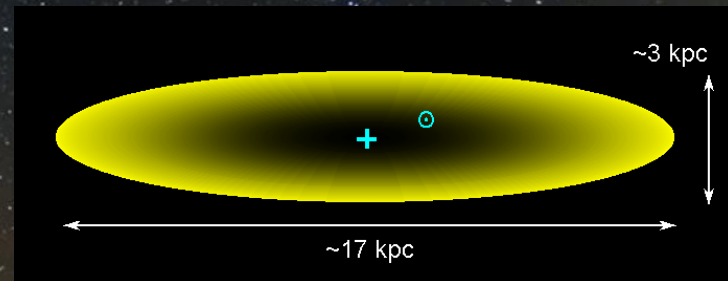
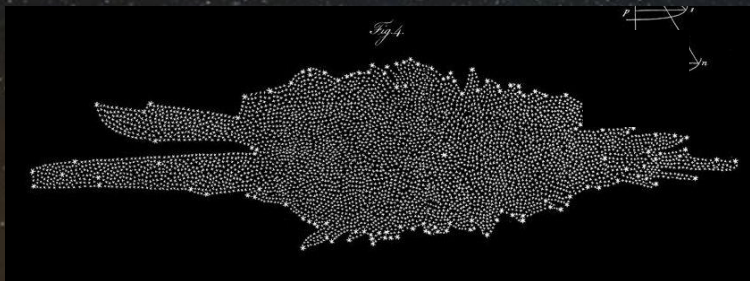
- ☀ Pomenovanie Galaxia pochádza z gréckeho **γαλαξίας** – *mliečny* a odkazuje na svetlý pás, ktorý sa ťahá hviezdnu oblohou - Mliečnu cestu.
- ☀ Prvý, kto sa pokúšal vysvetliť povahu Galaxie bol **Galileo Galilei** (1564 - 1642). Pomocou ďalekohľadu v Mliečnej ceste odhalil tisíce hviezd.
- ☀ **William Herschel** (1738 - 1822) v roku 1780 odvodil tvar Galaxie, pričom predpokladal, že Slnko sa nachádza v jej strede.
- ☀ **Immanuel Kant** (1724 - 1804) vo svojom filozofickom diele uvažuje, že takýchto vesmírnych ostrovov je vo vesmíre nekonečne veľa.



Všetky hviezdy na oblohe viditeľné voľným okom patria do Galaxie. Mliečna cesta je priemetom disku Galaxie na oblohu.

Galaxia

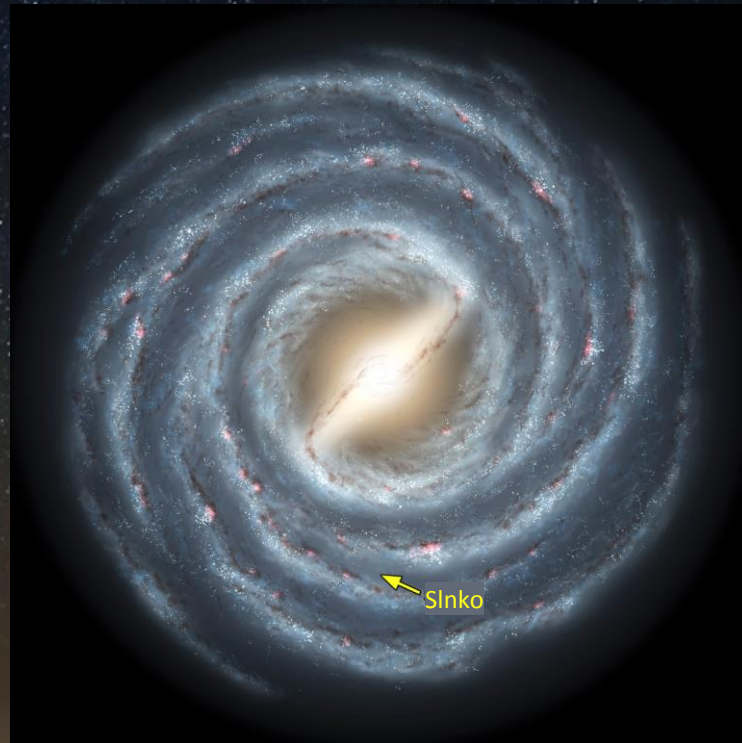
- Na základe hviezdnej štatistiky *Jacobus Kapteyn* (1851 -1922) odvodil začiatkom 20. storočia tvar Galaxie (plochý elipsoidný útvar s priemerom 17 kpc, hrúbkou 3 kpc, pričom Slnko sa nenachádza v strede Galaxie).
- V roku 1920 sa odohrala *Veľká debata* (26.4. 1920, Smithsonian Museum of Natural History) o povahe špirálových hmlovín a veľkosti vesmíru medzi *Harlowom Shapleym* (1885 – 1972) a *Heberom Curtisom* (1872 – 1942).
- Až keď *Henrieta Swan Leavittová* (1868 - 1921) odvodila vzťah perióda - svietivosť pre Cefeidy, získali astronómovia silný nástroj na meranie vzdialeností extragalaktických objektov.
- Edwin P. Hubble* (1889 - 1953) meraním vzdialeností pomocou Cefeid definitívne ukázal, že niektoré špirálové „hmloviny“ (M31, M33) sú v skutočnosti vzdialené galaxie.



Tvar Galaxie podľa Williama Herschela (vľavo) a podľa Jacobusa Kapteyna s vyznačenou polohou Slnka (vpravo).

Galaxia

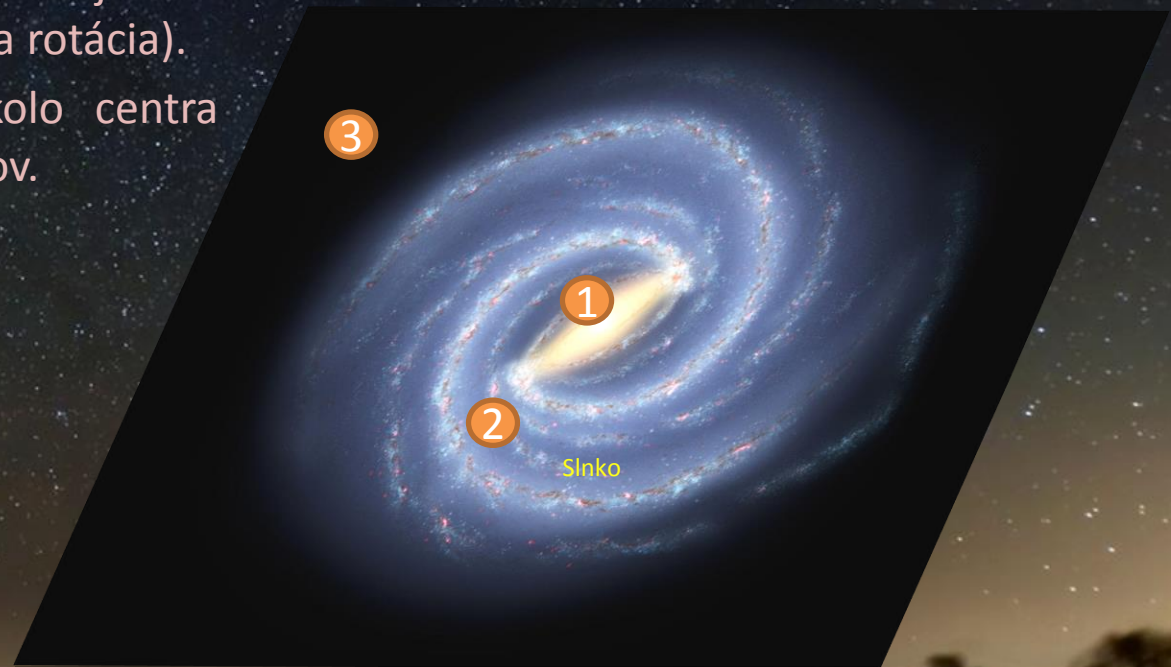
- Galaxia je gravitačne viazaný systém pozostávajúci z planét, hviezd (vo všetkých evolučných fázach, od protohviezd po záverečné evolučné štádiá), medzihviezdneho plynu a prachu (rozptýleného alebo viazaného v hmlovinách), ako aj tmavej hmoty (viď ďalej). Celková hmotnosť sa odhaduje na $M \approx 10^{12} M_{\odot}$.
- Galaxia obsahuje asi 400 miliárd hviezd. Hviezdy v rámci Galaxie môžu vytvárať menšie gravitačne viazané sústavy (dvojhviezdy, asociácie, hviezdokopy) a môžu mať vlastné planetárne systémy (počet planét sa odhaduje rovnaký ako počet hviezd).
- Galaxia je plochý, diskovitý útvar s priemerom 31 – 37 kpc a hrúbkou len okolo 0,3 kpc. Slnko sa nachádza 8,3 kpc od stredu Galaxie.



Ilustrácia Galaxie pri pohľade zhora s vyznačenou polohou Slnka.

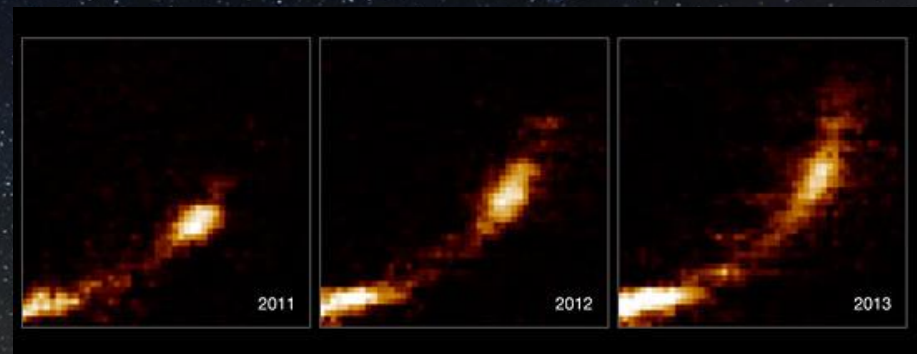
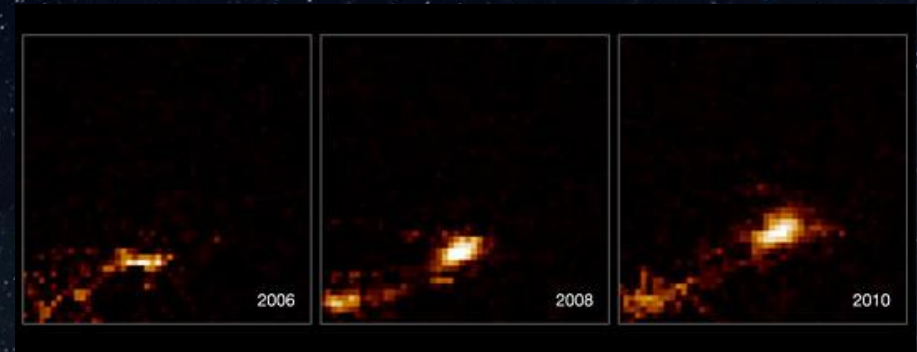
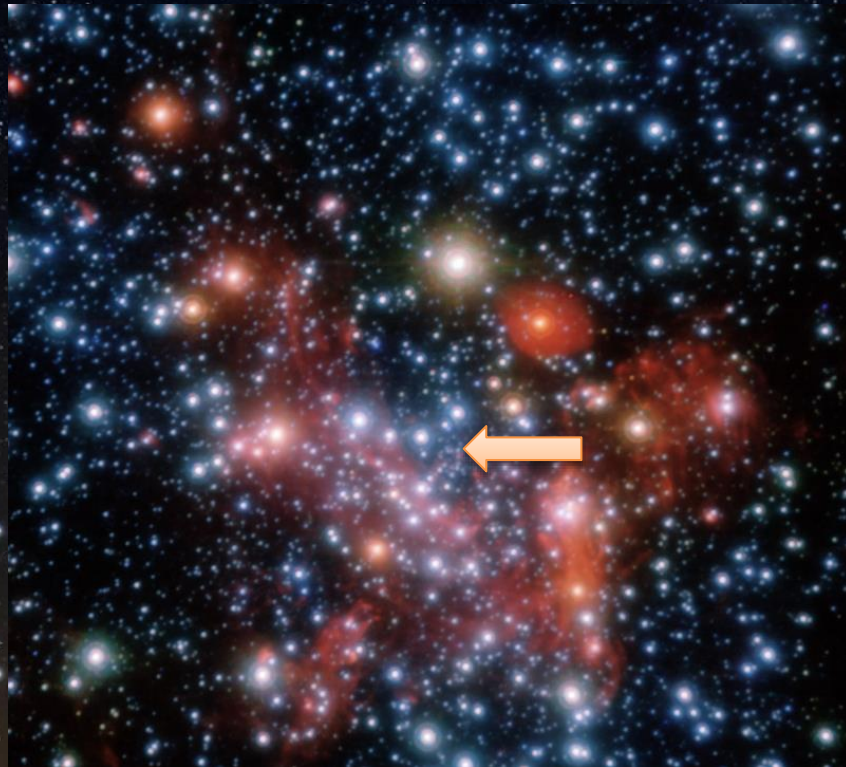
Galaxia

- Galaxia pozostáva z **centrálnej vydutiny** (1) v tvare podlhovastej priečky, v ktorej sa nachádza jadro Galaxie so supermasívnou čiernou dierou s hmotnosťou $\approx 4 \times 10^6 M_{\odot}$.
- Na centrálnu vydutinu nadväzuje **galaktický disk** (2), plochý útvar so **špirálovými ramenami**, v ktorých sa nachádzajú hlavne mladé hviezdy a oblaky plynu a prachu.
- Galaktický disk je ponorený do takmer sférického **galaktického hala** (3), ktoré obsahuje hlavne staré hviezdy a guľové hviezdokopy.
- Celá Galaxia je ešte ponorená do **hala tmavej hmoty**, ktoré obsahuje väčšinu jej hmoty.
- Galaxia (okrem vydutiny) nerotuje ako tuhé teleso (tzv. diferenciálna rotácia).
- Slnku trvá jeden obeh okolo centra Galaxie asi 240 miliónov rokov.



Ilustrácia Galaxie s vyznačenou polohou Slnka.

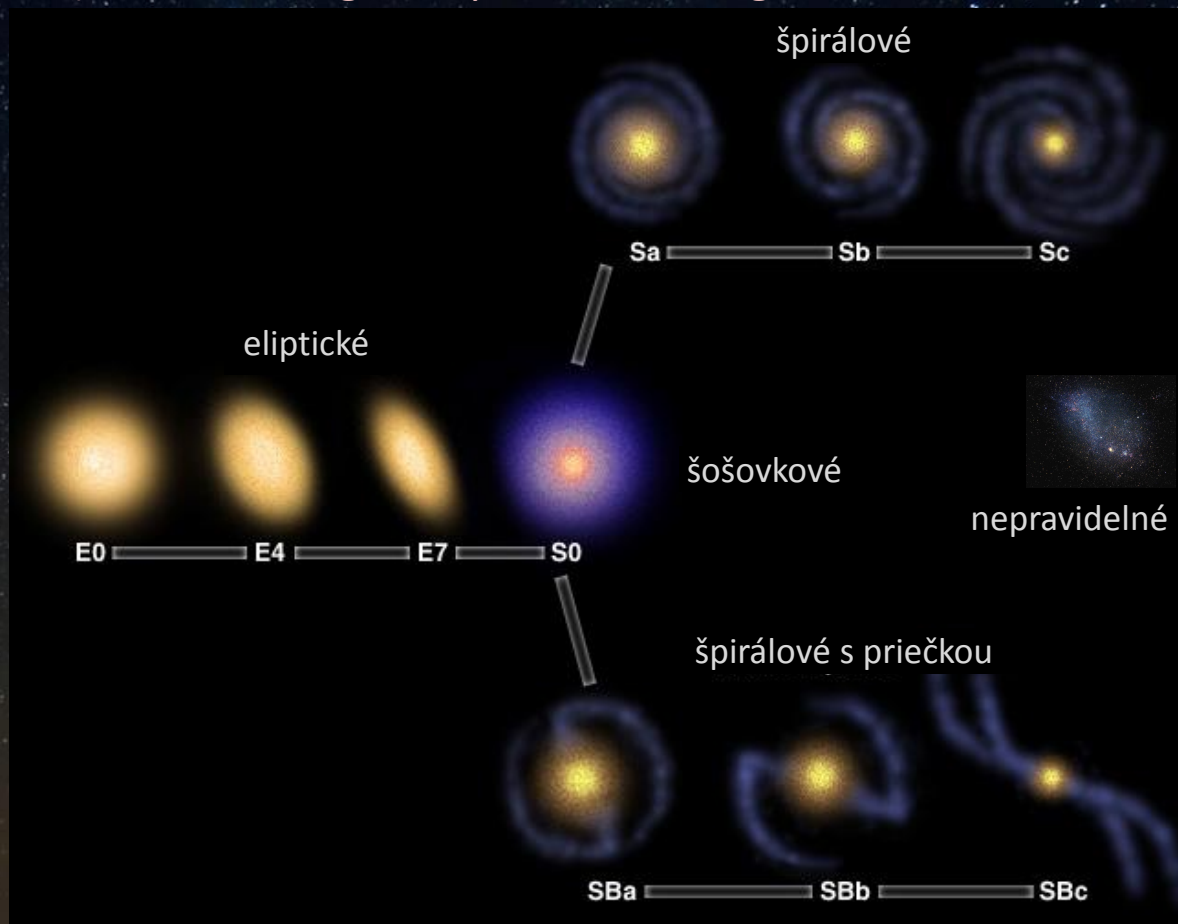
Galaxia



Pohľad na centrálnu oblasť Galaxie s vyznačenou polohou supermasívnej čiernej diery (vľavo). Sériu snímok, ktoré zachytávajú „v priamom prenose“ slapové pôsobenie supermasívnej čiernej diery na plynno-prachový mrak, ktorý sa dostal do jej blízkosti (vpravo).

Galaxie

- Galaxie sa líšia svojou veľkosťou a hmotnosťou (od trpasličích $M \approx 10^7 M_{\odot}$ až po obrie $M \approx 10^{13} M_{\odot}$), ako aj svojím tvarom (eliptické, špirálové, špirálové s priečkou, *šošovkové* a *nepravidelné*). Klasifikáciu galaxií podľa morfológie zaviedol *E. P. Hubble*.



Klasifikácia galaxií. Eliptické galaxie sa ďalej delia podľa miery sploštenosti (E0 – E7). Špirálové a špirálové s priečkou sa ďalej delia podľa veľkosti centrálnej oblasti a uzavretosti špirál (Sa – Sb – Sc, SBa – SBb – SBc). Šošovkové galaxie predstavujú prechodový typ medzi eliptickými a špirálovými.

Galaxie



Galaxie rôznych typov: špirálová galaxia M31 (vľavo hore), špirálová galaxia M104 – Sombrero (vpravo hore), eliptická galaxia NGC 1132 (vľavo dole) a špirálová galaxia s priečkou NGC 1300 (vpravo dole).

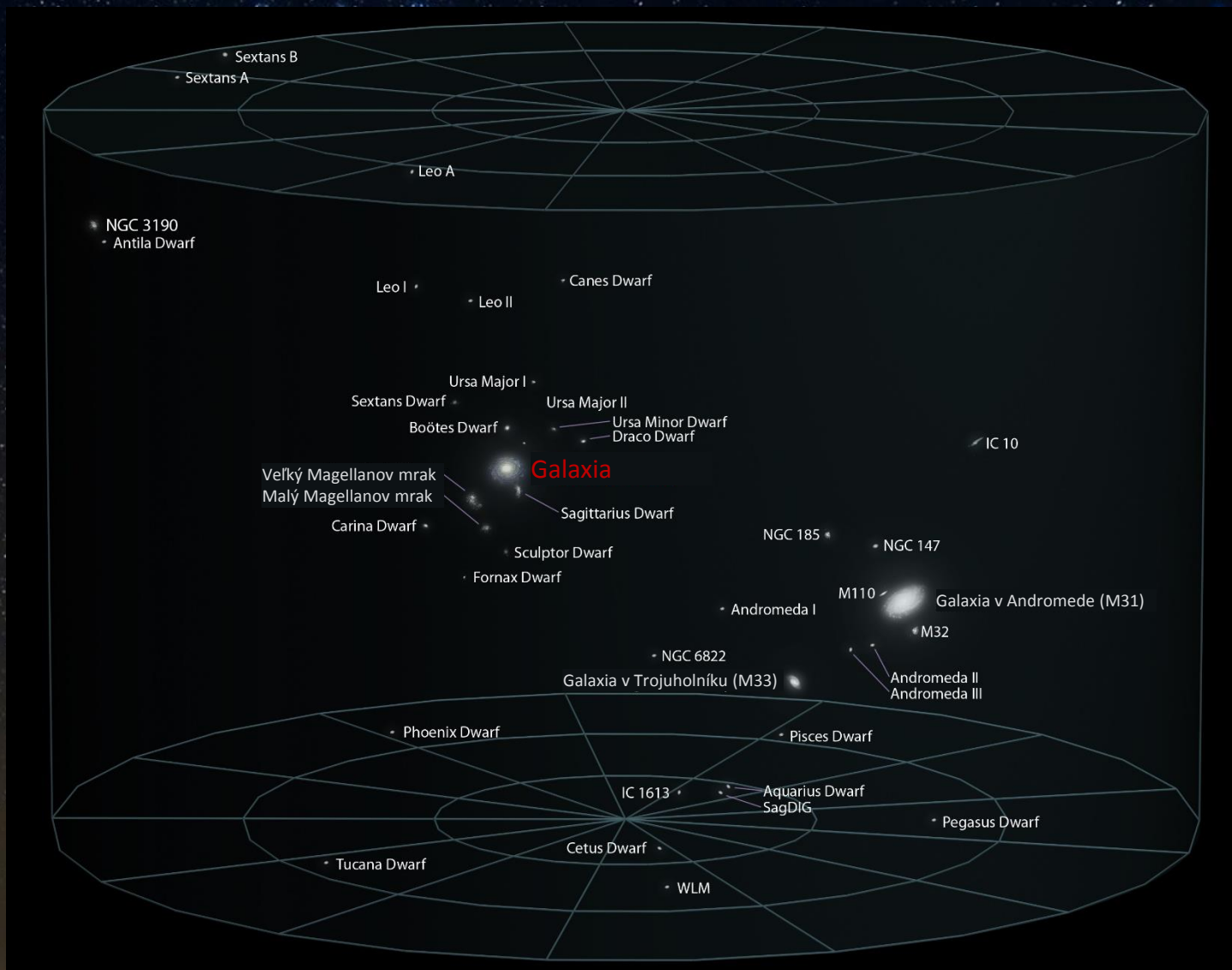
Skupiny galaxií

- ☀ Hmota má tendenciu zoskupovať sa do väčších štruktúr \Rightarrow hierarchické usporiadanie.
- ☀ Hviezdy, dvojhviezdy, viachásobné hviezdne sústavy ($M \approx 1 - 10^2 M_{\odot}$).
- ☀ Hviezdne asociácie, otvorené hviezdokopy ($M \approx 10 - 10^4 M_{\odot}$, $\phi \approx 1 - 10$ pc, $N \approx 10^4 - 10^5$).
- ☀ Guľové hviezdokopy ($M \approx 10^5 - 10^6 M_{\odot}$, $\phi \approx 10 - 10^2$ pc, $n \approx 10^2 - 10^3$ hviezd/pc³, $N \approx 10^2$).
- ☀ Galaxie ($M \approx 10^6 - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^3 - 10^5$ pc, $N \approx 10^{11}$).
- ☀ Skupiny galaxií ($M \approx 10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^6$ pc, $N \approx 10$ galaxií).
 - ☀ Miestna skupina galaxií: ($M \approx 5 \times 10^{12} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^6$ pc, $N \approx 54$, Galaxia, M31, LMC, SMC, ...).



Veľký Magellanov mrak (vľavo) a Malý Magellanov mrak (vpravo) sú nepravidelné galaxie, ktoré patria do Miestnej skupiny galaxií.

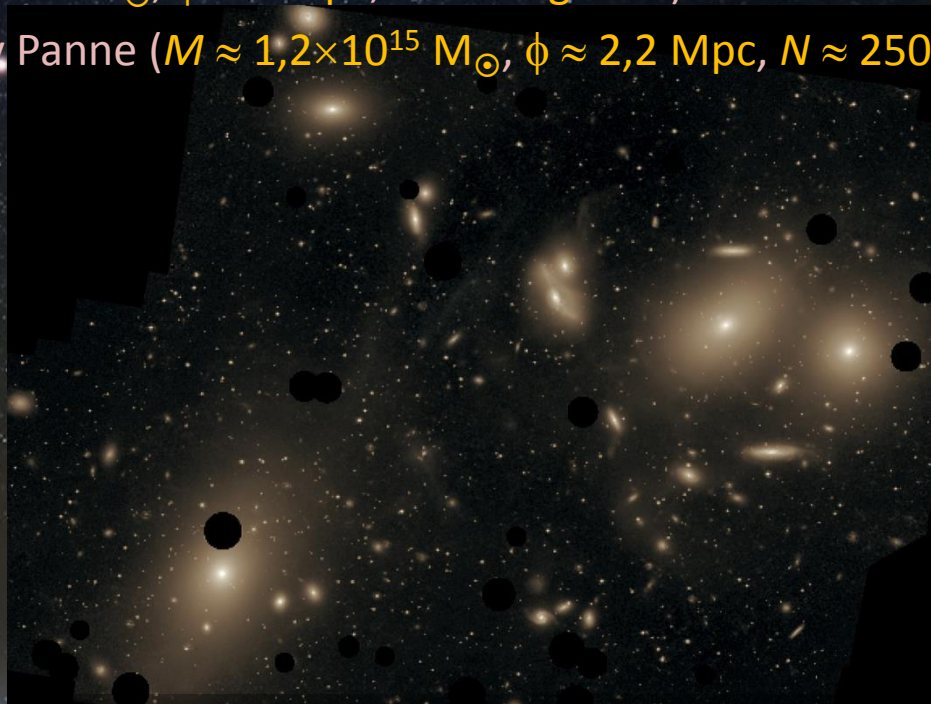
Miestna skupina galaxií



Miestna skupina galaxií.

Kopy galaxií

- ☀ Hmota má tendenciu zoskupovať sa do väčších štruktúr \Rightarrow hierarchické usporiadanie.
- ☀ Hviezdy, dvojhviezdy, viachásobné hviezdne sústavy ($M \approx 1 - 10^2 M_{\odot}$).
- ☀ Hviezdne asociácie, otvorené hviezdokopy ($M \approx 10 - 10^4 M_{\odot}$, $\phi \approx 1 - 10$ pc, $N \approx 10^4 - 10^5$).
- ☀ Guľové hviezdokopy ($M \approx 10^5 - 10^6 M_{\odot}$, $\phi \approx 10 - 10^2$ pc, $n \approx 10^2 - 10^3$ hviezd/pc³, $N \approx 10^2$).
- ☀ Galaxie ($M \approx 10^6 - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^3 - 10^5$ pc, $N \approx 10^{11}$).
- ☀ Skupiny galaxií ($M \approx 10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^6$ pc, $N \approx 10$ galaxií).
- ☀ Kopy galaxií ($M \approx 10^{15} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^7$ pc, $N \approx 10^3$ galaxií).
 - ☀ Kopa galaxií v Panne ($M \approx 1,2 \times 10^{15} M_{\odot}$, $\phi \approx 2,2$ Mpc, $N \approx 2500$)



Kopa galaxií v Panne. Všetky objekty na snímke sú galaxie. Hviezdy našej Galaxie sú prekryté čiernymi kotúčikmi.

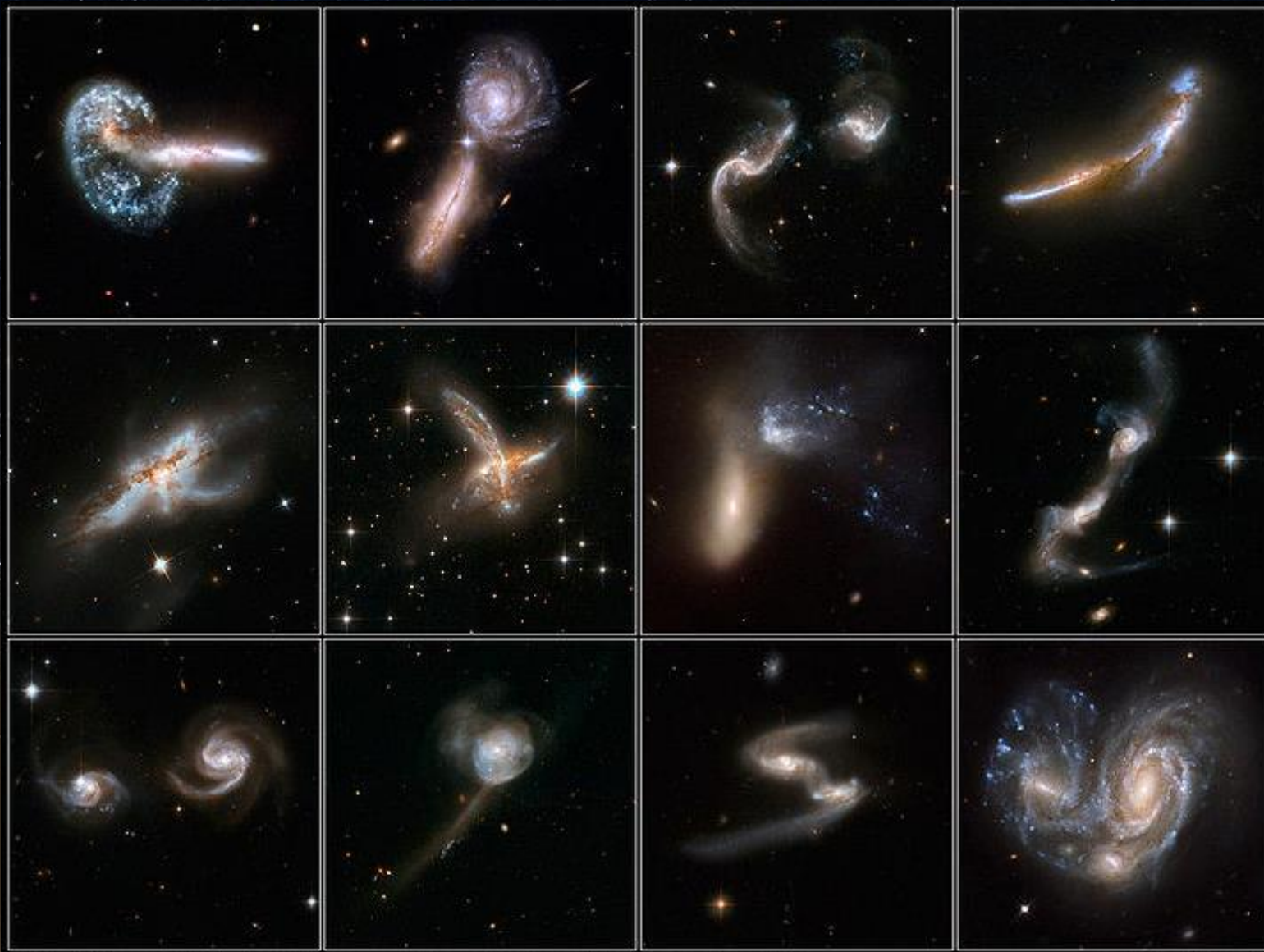
Kopy galaxií

- ☀ Hmota má tendenciu zoskupovať sa do väčších štruktúr \Rightarrow hierarchické usporiadanie.
- ☀ Hviezdy, dvojhviezdy, viacnásobné hviezdne sústavy ($M \approx 1 - 10^2 M_{\odot}$).
- ☀ Hviezdne asociácie, otvorené hviezdokopy ($M \approx 10 - 10^4 M_{\odot}$, $\phi \approx 1 - 10 \text{ pc}$, $N \approx 10^4 - 10^5$).
- ☀ Guľové hviezdokopy ($M \approx 10^5 - 10^6 M_{\odot}$, $\phi \approx 10 - 10^2 \text{ pc}$, $n \approx 10^2 - 10^3 \text{ hviezd/pc}^3$, $N \approx 10^2$).
- ☀ Galaxie ($M \approx 10^6 - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^3 - 10^5 \text{ pc}$, $N \approx 10^{11}$).
- ☀ Skupiny galaxií ($M \approx 10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^6 \text{ pc}$, $N \approx 10 \text{ galaxií}$).
- ☀ Kopy galaxií ($M \approx 10^{15} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^7 \text{ pc}$, $N \approx 10^3 \text{ galaxií}$).
 - ☀ Kopa galaxií v Panne ($M \approx 1,2 \times 10^{15} M_{\odot}$, $\phi \approx 2,2 \text{ Mpc}$, $N \approx 2500$)
 - ☀ Zrážky galaxií, galaktický kanibalizmus, intergalaktická hmota, tmavá hmota.



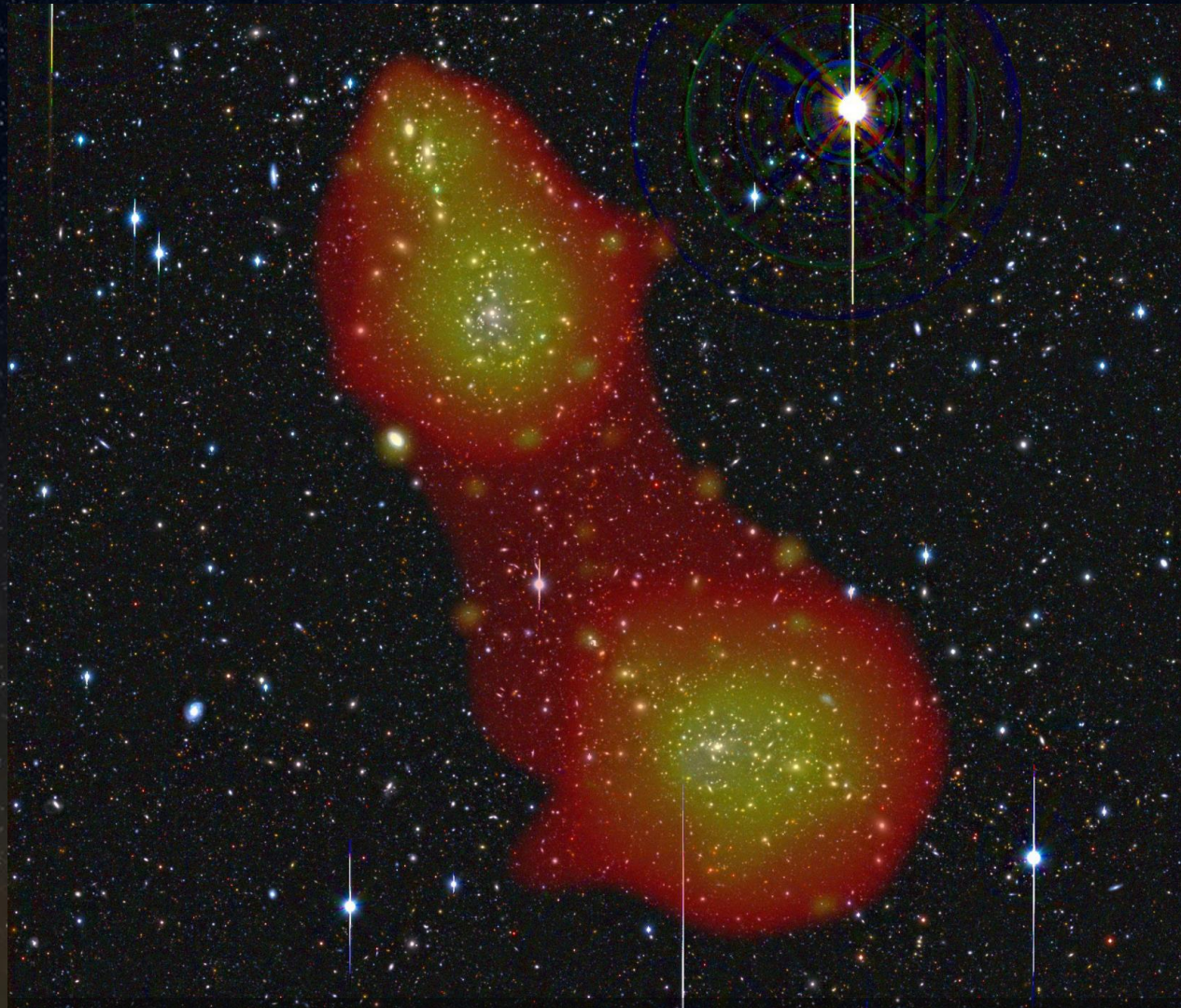
Vírová galaxia (M51) je príkladom interakcie (zrážky) dvoch galaxií, ktorá viedla k masívnej hviezdotvorbe.

Zrážky galaxií



Pestrá paleta príkladov interakcií (zrážok) galaxií v bohatých kopách galaxií.

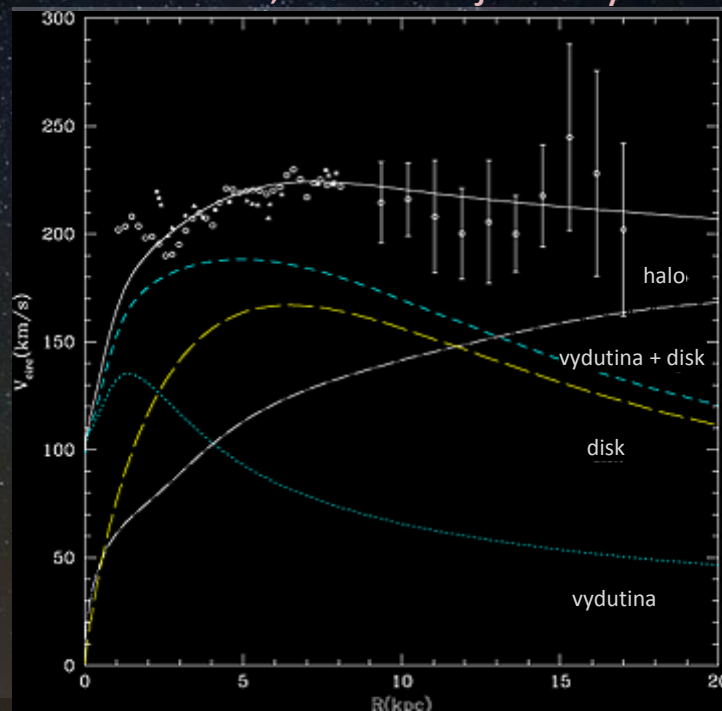
Intergalaktická hmota



Značná časť hmoty kôp galaxií je rozptýlená v podobe extrémne riedkeho a horúceho plynu. Mozaika snímky kôp galaxií Abell 222 a Abell 223 vo viditeľnej oblasti a snímky intergalaktickej hmoty, do ktorej sú tieto dve kopy galaxií ponorené, získanej pomocou röntgenového ďalekohľadu XMM-Newton.

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.
- Podľa zistení **sondy Planck** tvorí až 84,5% všetkej hmoty alebo 26,8% všetkej hmoty-energie vo vesmíre.

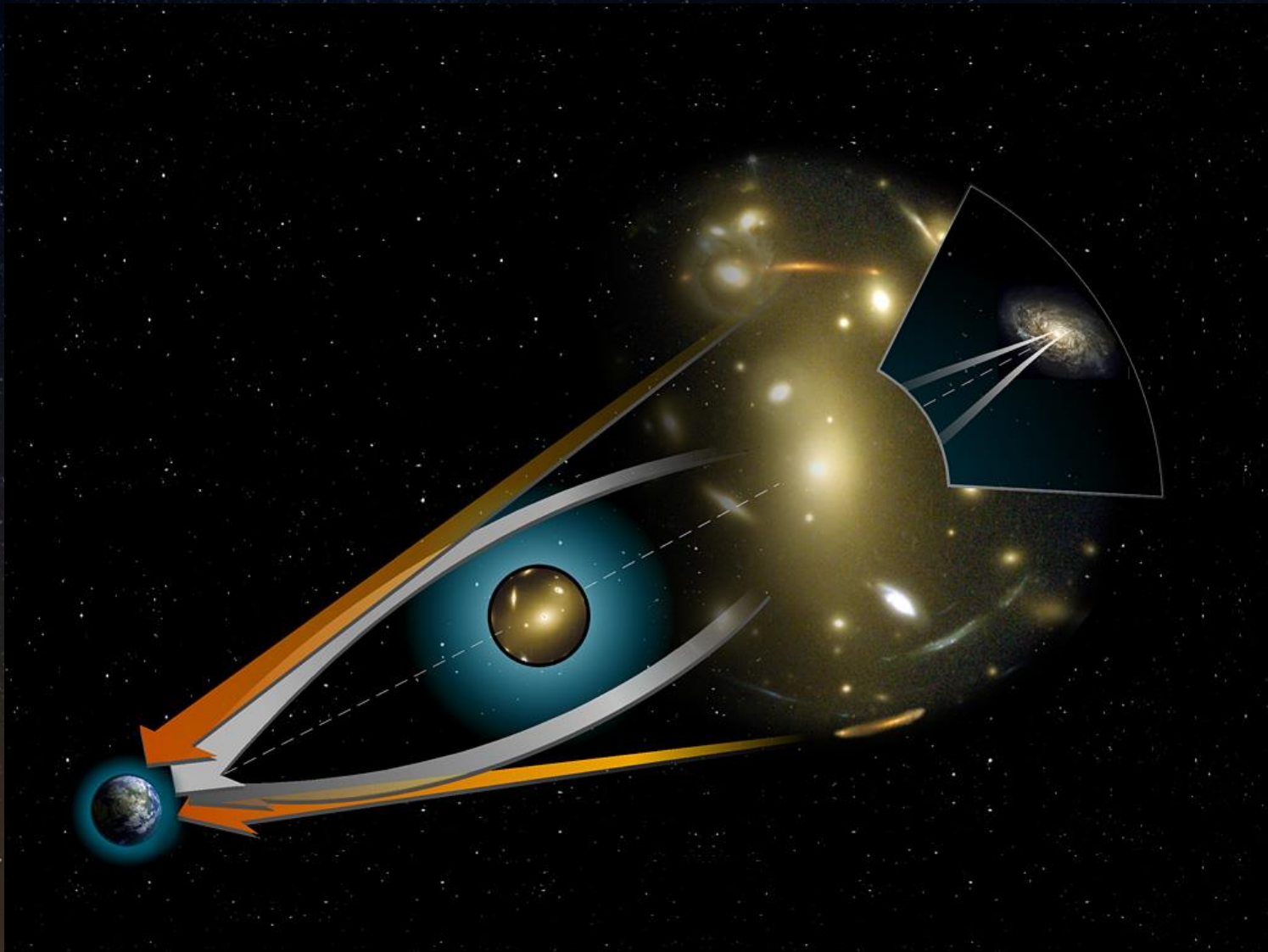


Krivku rotačných rýchlostí hviezd v galaxii nedokáže popísať model, ktorý zahŕňa len viditeľnú hmotu disku a vydutiny galaxie. Realistický popis pozorovaní dostaneme až doplnením modelu o rozsiahle halo tmavej hmoty, do ktorej je galaxia ponorená.

Tmavá hmota - modely

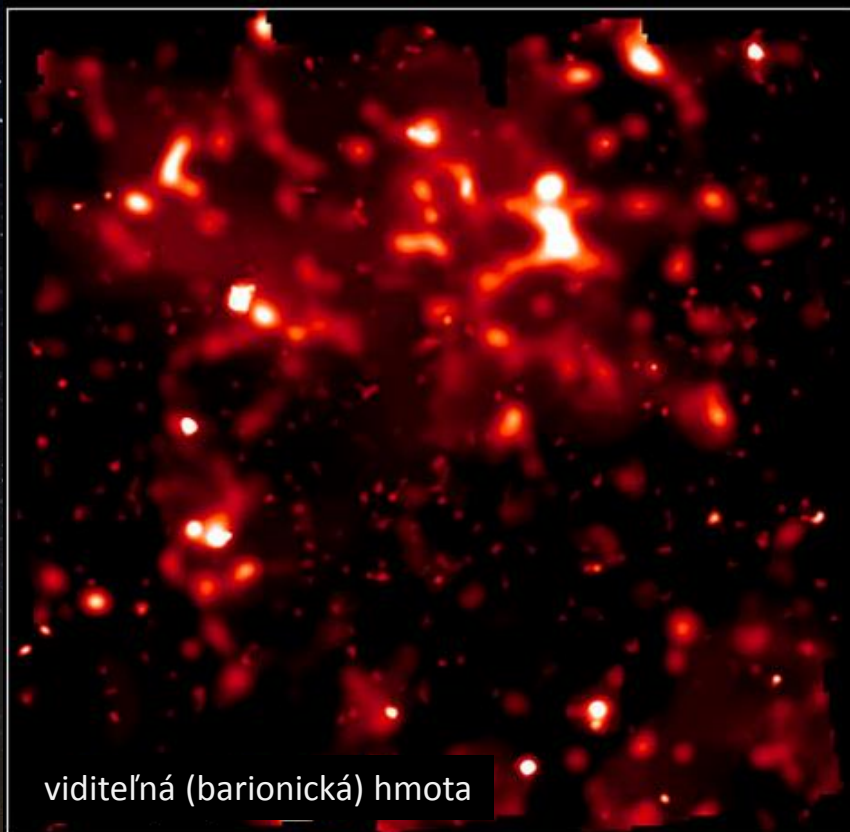
- ☀ **Horúca tmavá hmota** ($v \approx c$) – napr. neutrína, ..., vznik štruktúr „zhora-dole“
- ☀ **Teplá tmavá hmota** ($v \leq c$) – napr. axiony, ...
 - pohybujú sa príliš rýchlo na to, aby dokázali vysvetliť pozorovania („neviažu“ sa na hmotu, nedokážu vysvetliť rotačné krivky galaxií, resp. distribúciu rýchlostí v kopách galaxií, nedokážu sa spájať na malých škálach).
- ☀ **Chladná tmavá hmota** ($v \ll c$) – vznik štruktúr „zdola-hore“
 - ☀ **Baryonická** – (protóny, neutróny, elektróny) viazané v slabo svietivých objektoch (napr. planéty, hnedí trpaslíci, neutrónové hviezdy). Viacero projektov na hľadanie (napr. MACHO - Massive Astrophysical Compact Halo Object), no podľa nukleogenézy tvorí iba malú časť (4,9 %) všetkej hmoty-energie vo vesmíre.
 - ☀ **Nebaryonická** – (WIMP - Weakly Interacting Massive Particles, napr. neutralína (z teórie supersymetrie), hmotnosti $10 - 10\,000 \text{ GeV}/c^2$ (pre porovnanie: protón $938.2 \text{ MeV}/c^2$ a neutríno $0,3 \text{ eV}/c^2$).

Tmavá hmota

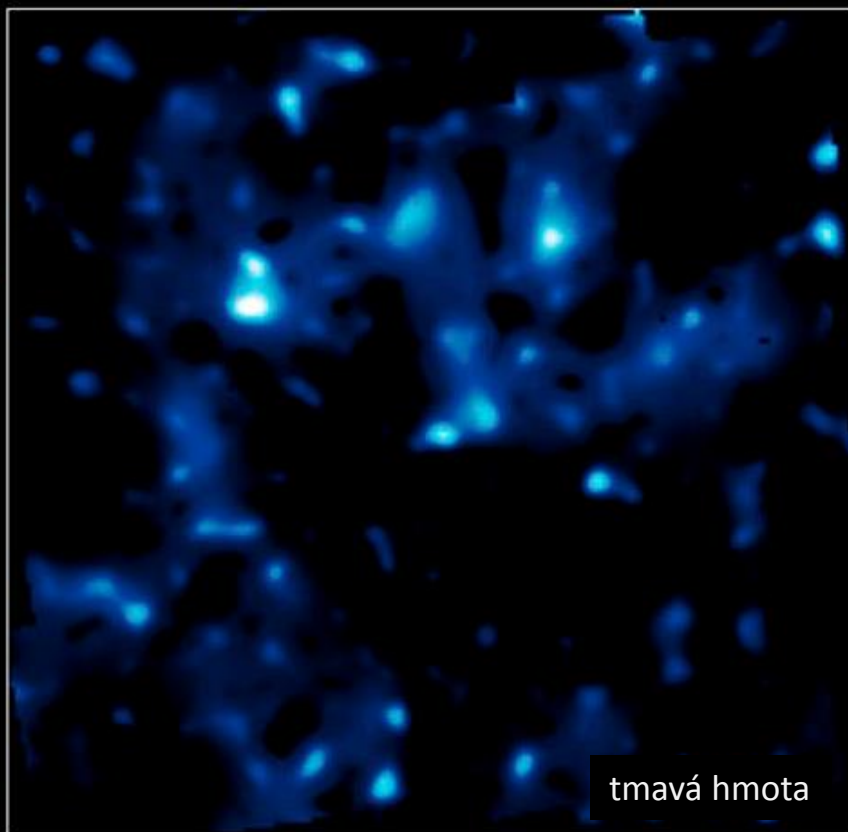


Účinným nástrojom na výskum rozloženia tmavej hmoty je efekt gravitačnej šošovky. Dráha svetla sa v blízkosti hmotných objektov zakrivuje (podľa VTR sa pohybuje v zakrivenom časopriestore), čo vedie k podobnému efektu ako po prechode svetla objektívom.

Tmavá hmota



viditeľná (barionická) hmota



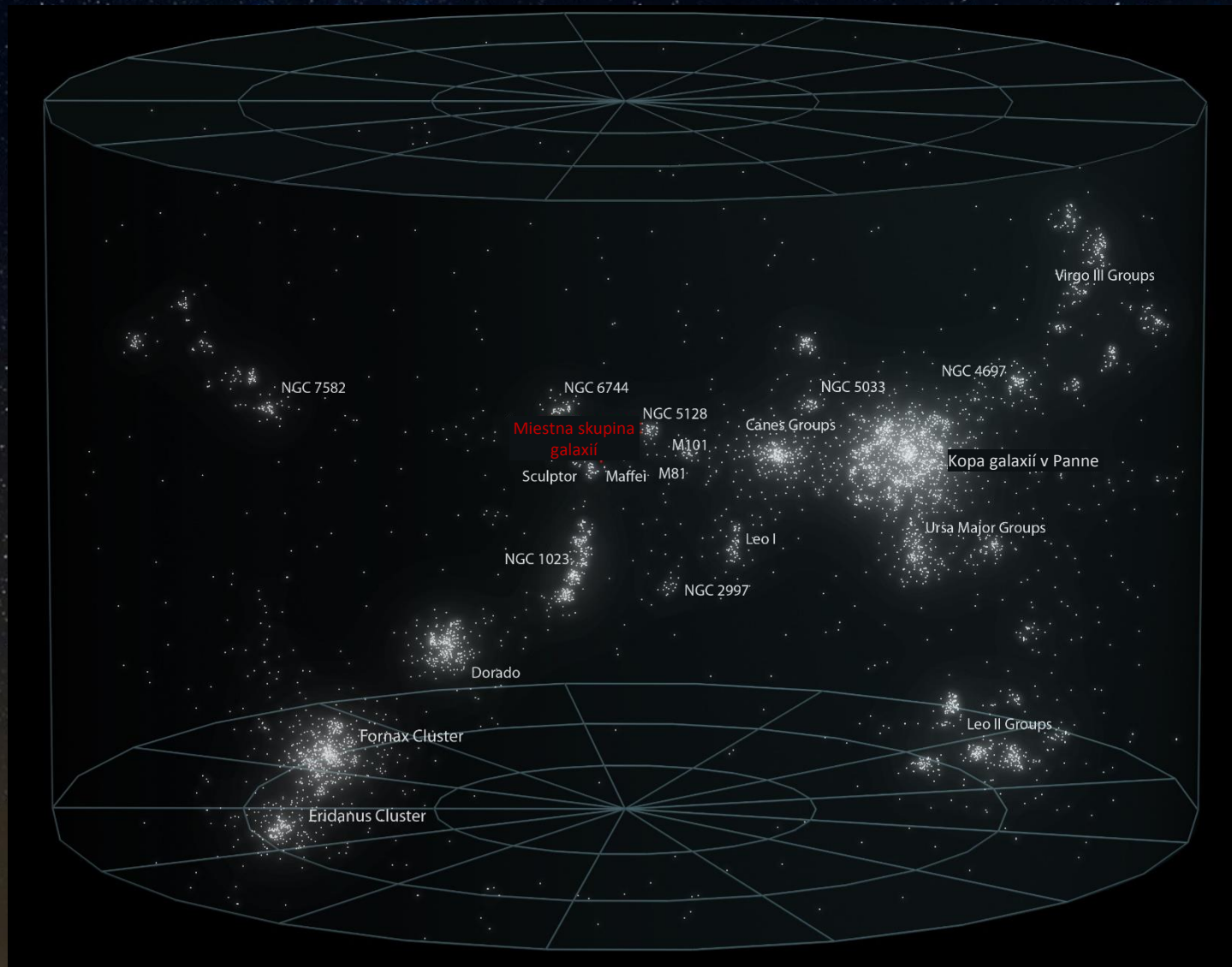
tmavá hmota

Rozloženie viditeľnej (priame pozorovanie) a tmavej hmoty (rekonštrukcia na základe efektu gravitačnej šošovky) vo vesmíre je podobné – viditeľná hmota sa zoskupuje tam, kde sa nachádza tmavá hmota. Situácia s hmotou vo vesmíre pripomína ľadovec plávajúci na mori – len malá časť hmoty je pozorovateľná, väčšina je pred priamym pozorovaním skrytá.

Nadkopy galaxií

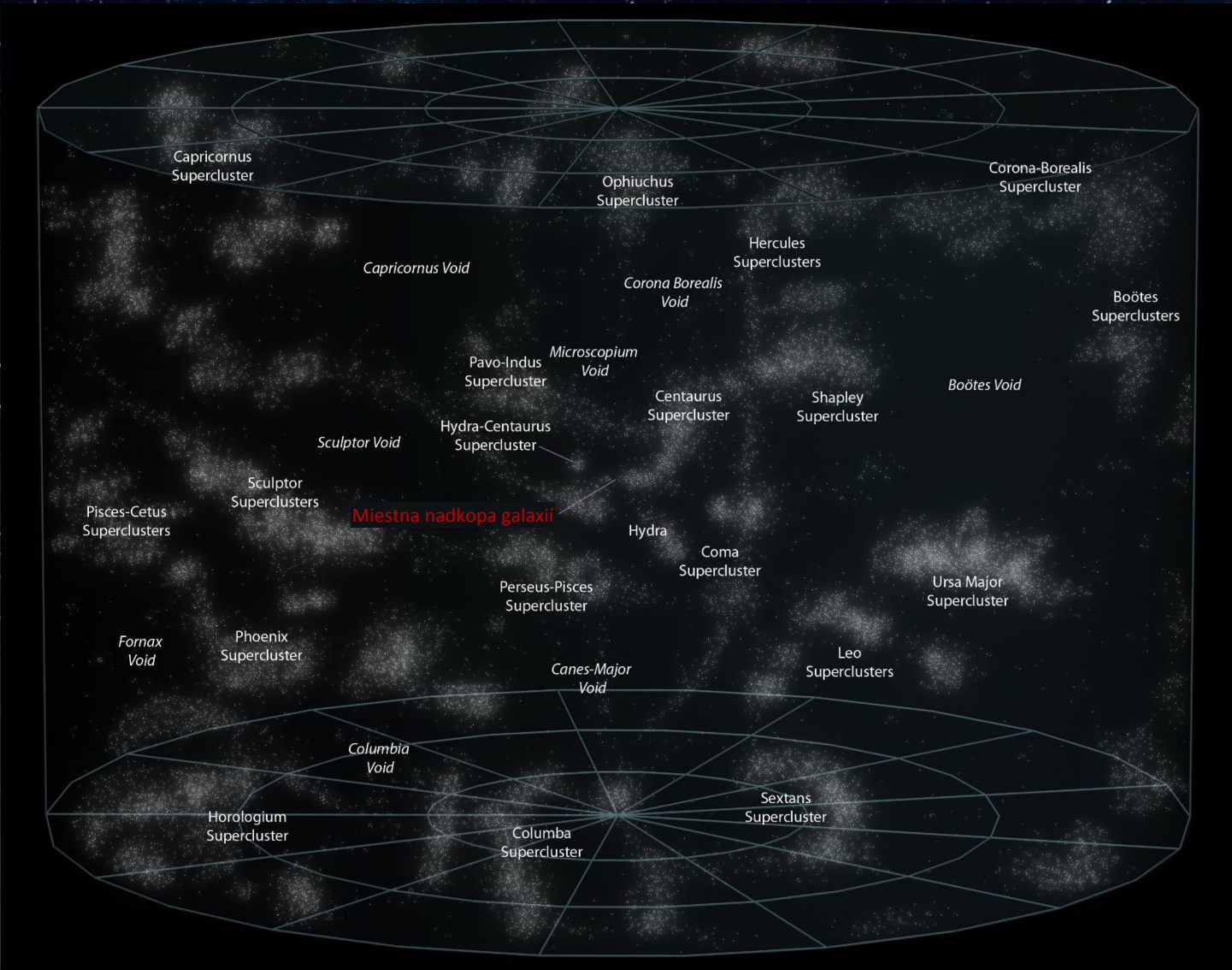
- ☀ Hmota má tendenciu zoskupovať sa do väčších štruktúr \Rightarrow hierarchické usporiadanie.
- ☀ Hviezdy, dvojhviezdy, viacnásobné hviezdne sústavy ($M \approx 1 - 10^2 M_{\odot}$).
- ☀ Hviezdne asociácie, otvorené hviezdokopy ($M \approx 10 - 10^4 M_{\odot}$, $\phi \approx 1 - 10$ pc, $N \approx 10^4 - 10^5$).
- ☀ Guľové hviezdokopy ($M \approx 10^5 - 10^6 M_{\odot}$, $\phi \approx 10 - 10^2$ pc, $n \approx 10^2 - 10^3$ hviezd/pc³, $N \approx 10^2$).
- ☀ Galaxie ($M \approx 10^6 - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^3 - 10^5$ pc, $N \approx 10^{11}$).
- ☀ Skupiny galaxií ($M \approx 10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^6$ pc, $N \approx 10$ galaxií).
- ☀ Kopy galaxií ($M \approx 10^{15} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^7$ pc, $N \approx 10^3$ galaxií).
- ☀ Nadkopy galaxií ($M \approx 10^{15} - 10^{17} M_{\odot}$, $\phi \approx 10^8$ pc, $N \approx 10^2$ kôp galaxií, $N \approx 10^5$ galaxií)
 - ☀ 2. rád klastrovania, 90% galaxií patrí do kôp alebo nadkôp galaxií.
 - ☀ Ploché alebo natiahnuté útvary s prázdnyimi priestormi medzi nimi.
 - ☀ Miestna nadkopa galaxií – plochý elipsoidálny útvar ($\phi \approx 15$ Mpc, $h \approx 1$ Mpc, $M \approx 10^{16} M_{\odot}$, 50 000 galaxií).
 - ☀ Vytvárajú veľkoškálovú štruktúru vesmíru.

Miestna nadkopa galaxií



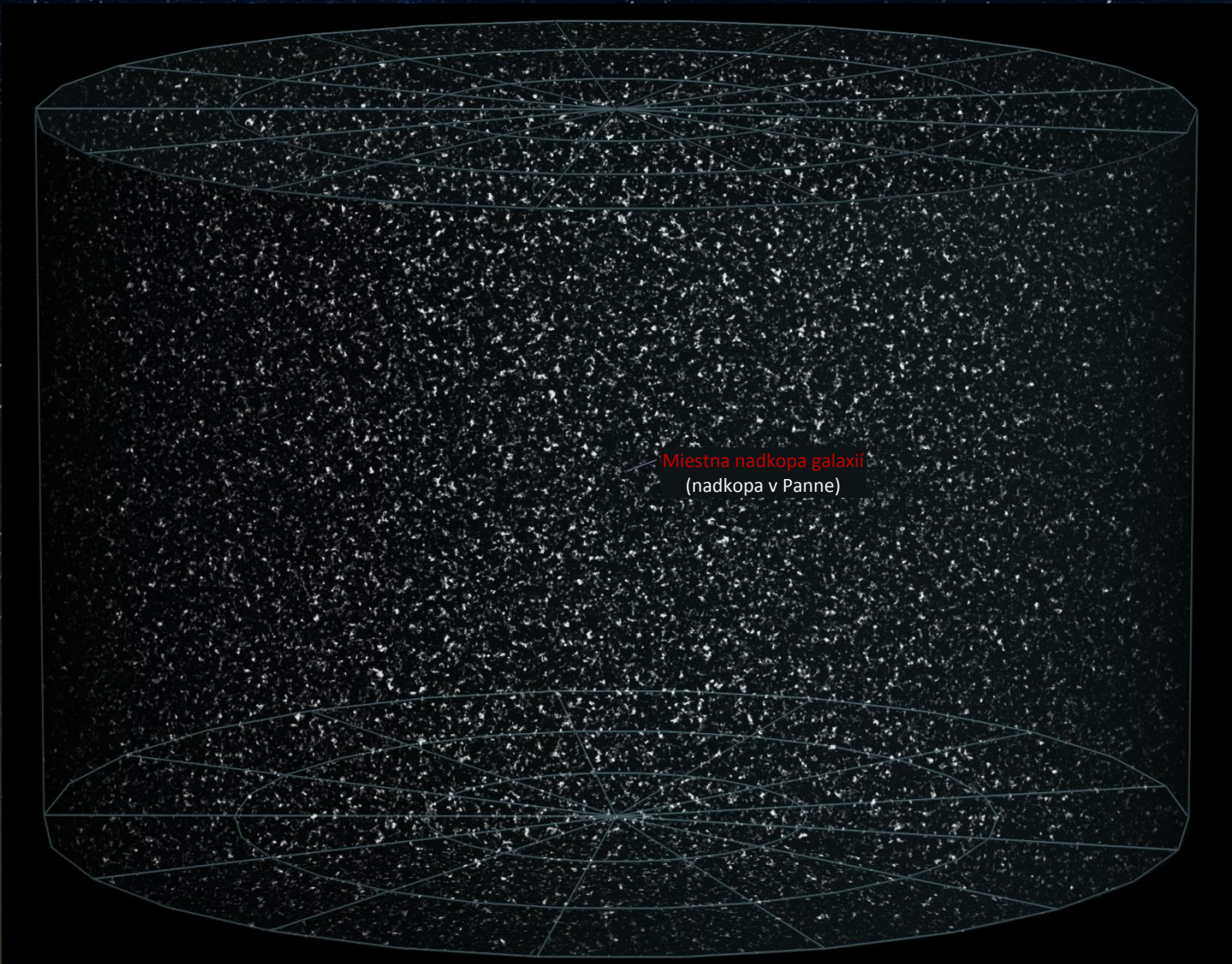
Miestna nadkopa galaxií (alebo nadkopa galaxií v Panne), do ktorej patrí Miestna skupina galaxií, kopa galaxií v Panne a ďalšie skupiny (groups) a kopy (clusters) galaxií.

Miestna nadkopa galaxií



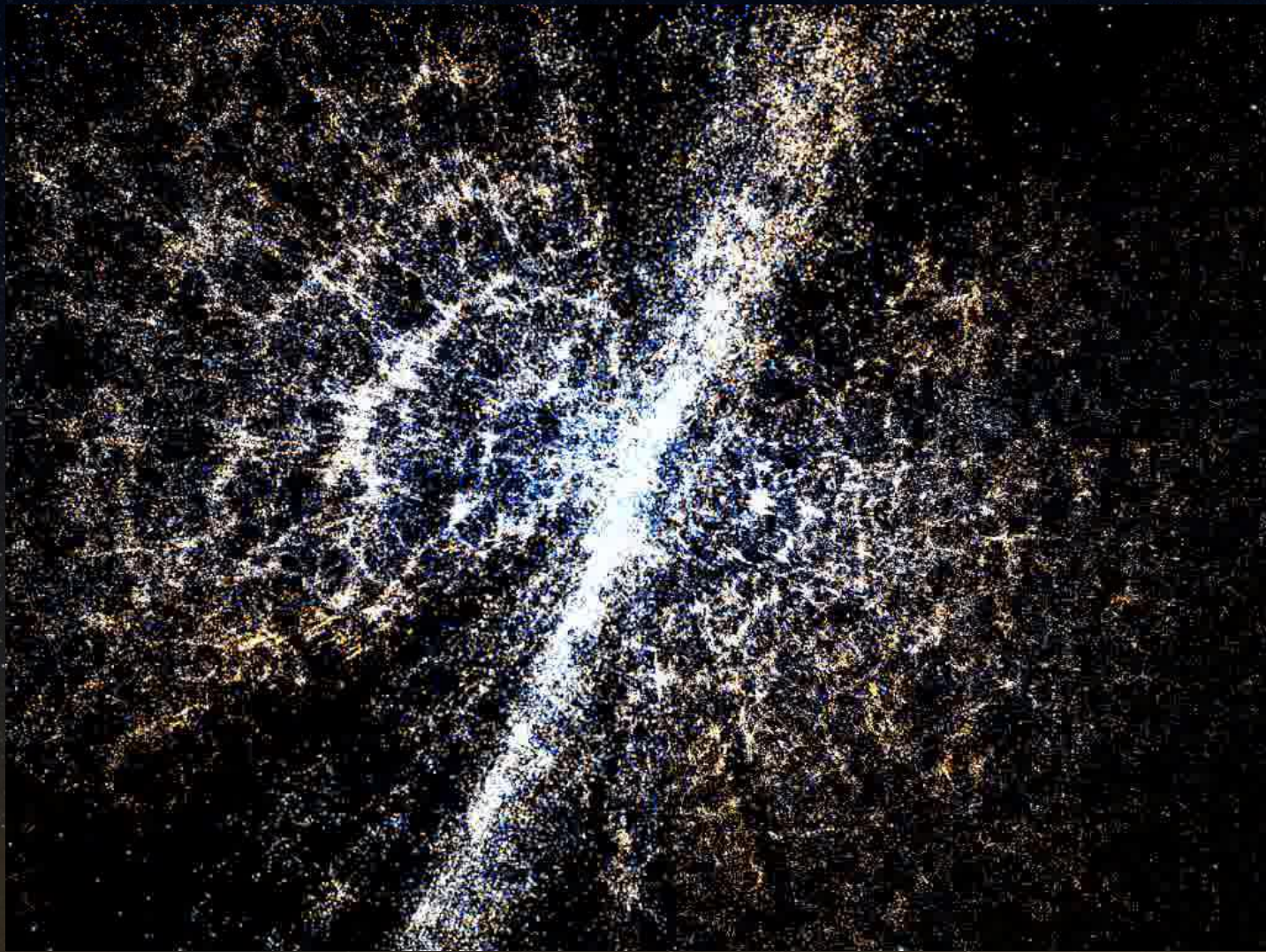
Miestna nadkopa galaxií spolu s ďalšími nadkopami galaxií (superclusters) vytvárajú hubovitú štruktúru, v ktorej sa kopy a nadkopy galaxií organizujú do stien jednotlivých buniek, pričom samotné bunky sú prázdne (voids).

Pozorovateľný vesmír



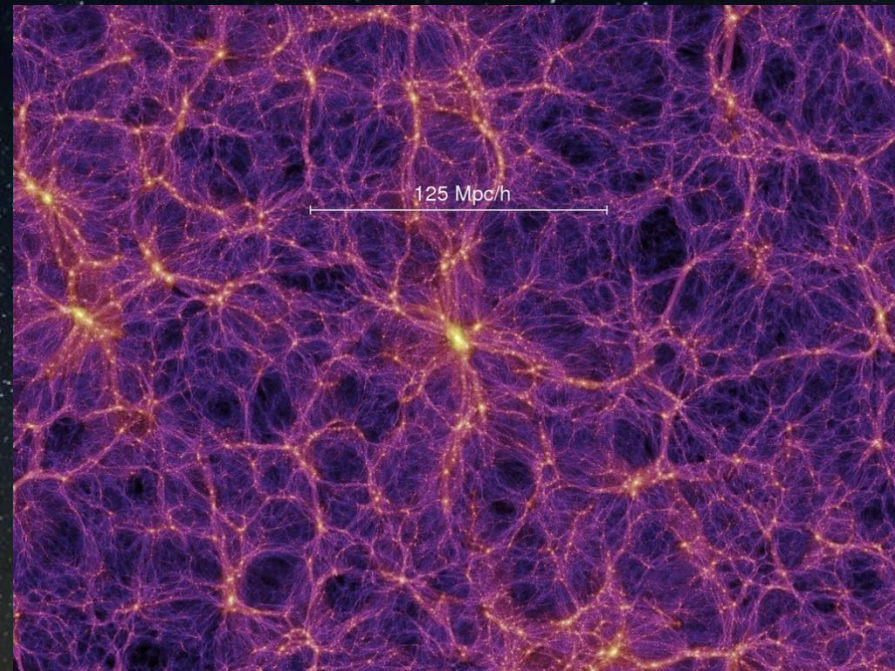
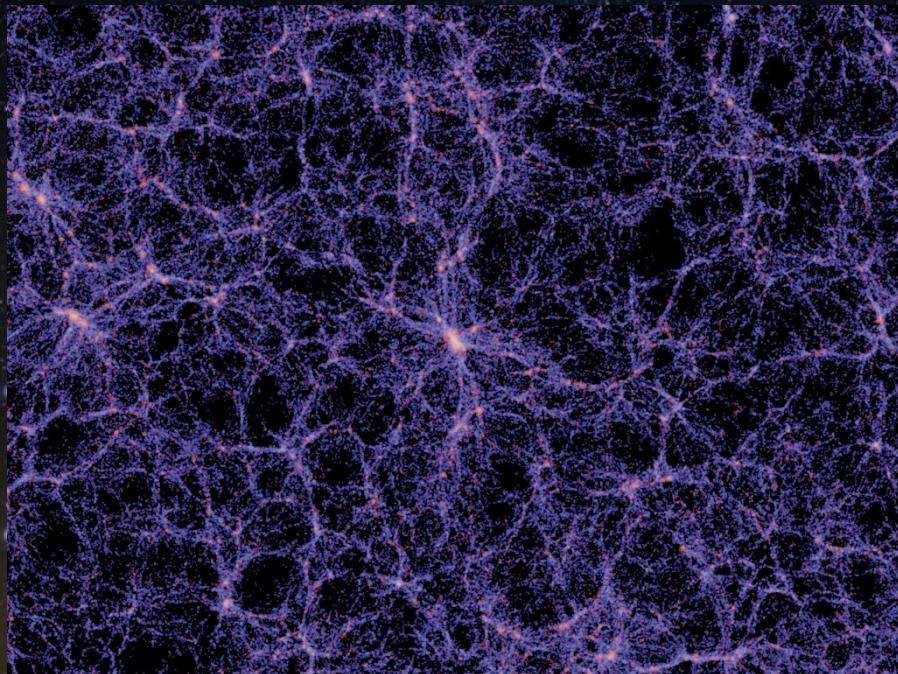
Miestna nadkopa galaxií (nadkopa galaxií v Panne) v rámci pozorovateľného vesmíru.

Veľkoškálová štruktúra vesmíru



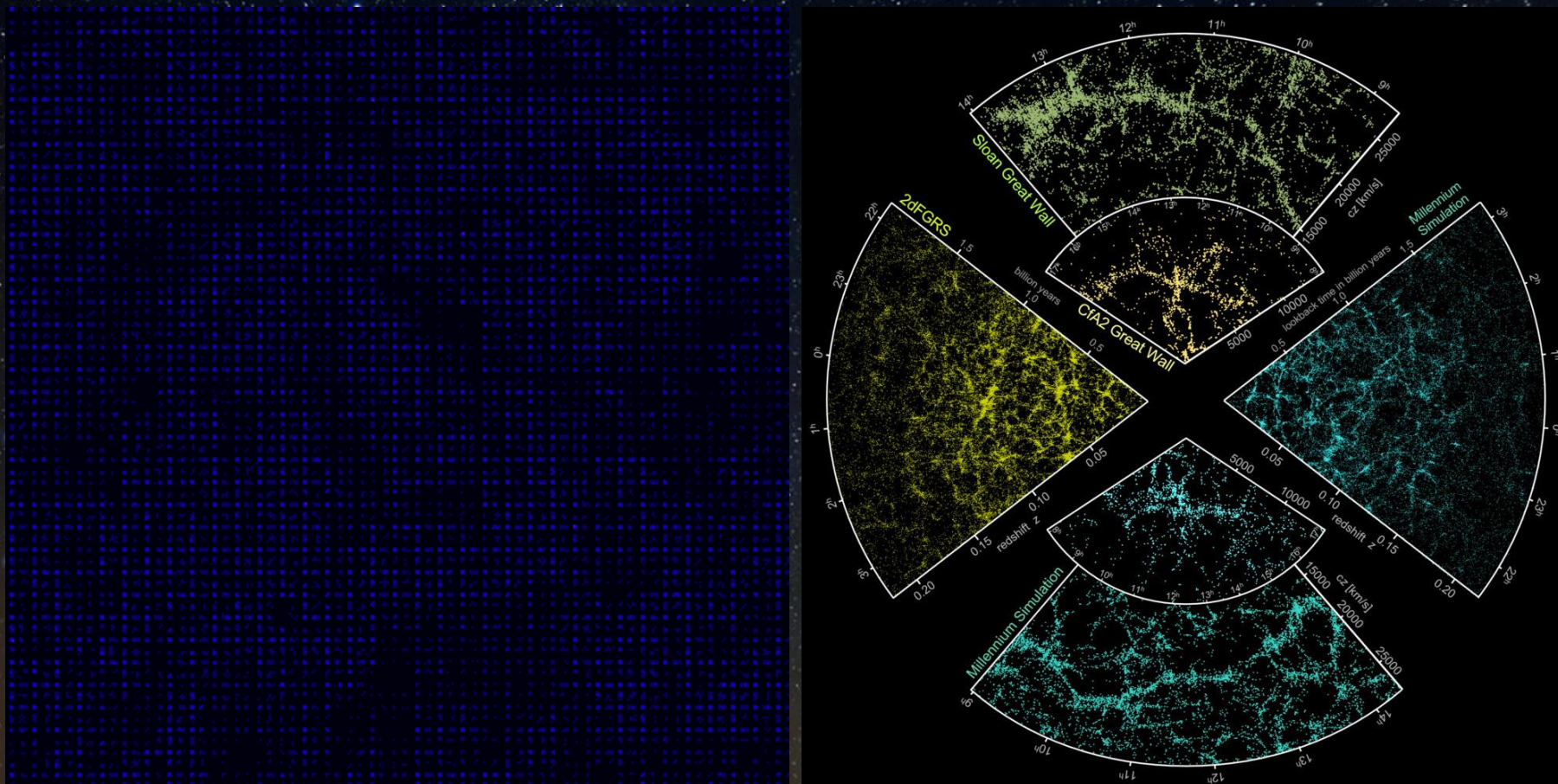
Rozloženie hmoty vo vesmíre pripomína hubovitú štruktúru. Video zachytáva polohu 250 000 galaxií do vzdialenosti asi 2 miliardy svetelných rokov získaných v rámci projektu Sloan Digital Sky Survey.

Veľkoškálová štruktúra vesmíru



Millennium simulation. Výsledky počítačovej simulácie, v ktorej bolo použitých viac ako 20 miliárd hmotných častíc v priestore v tvare kocky so stranou 2 miliardy svetelných rokov. Pomocou superpočítačov bolo možné sledovať vznik hubovitej štruktúry zloženej z asi 20 miliónov galaxií (vľavo), ako aj z tmavej hmoty (vpravo).

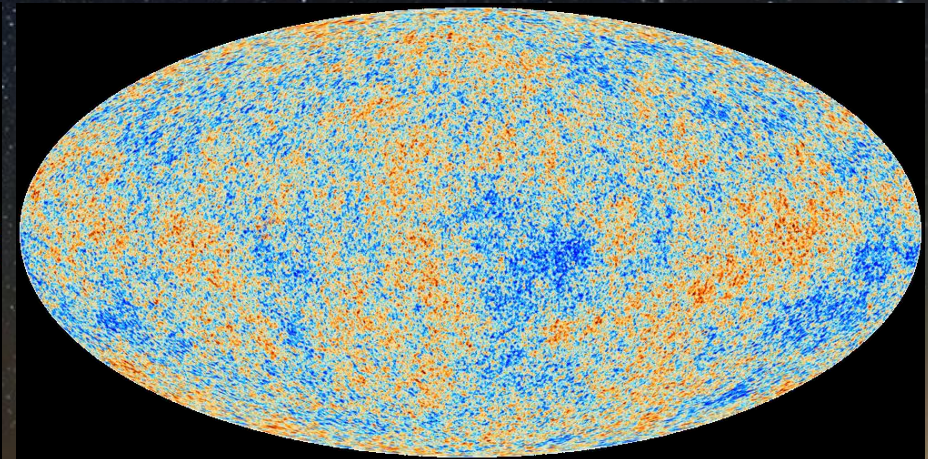
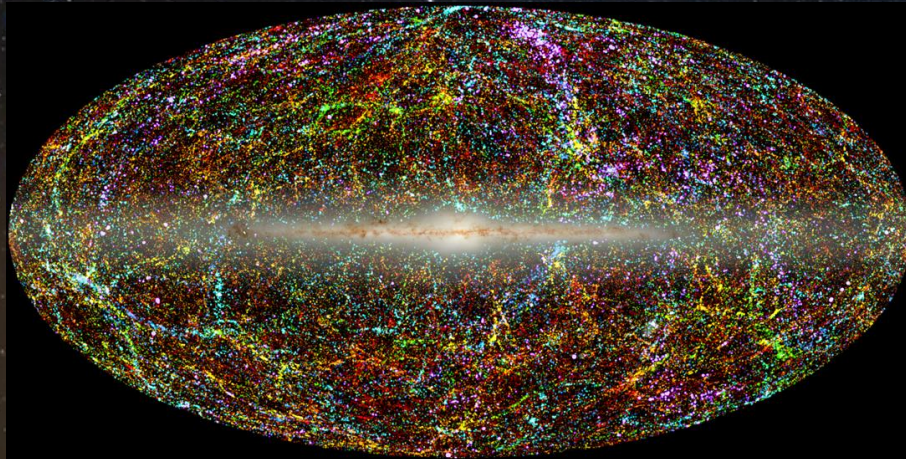
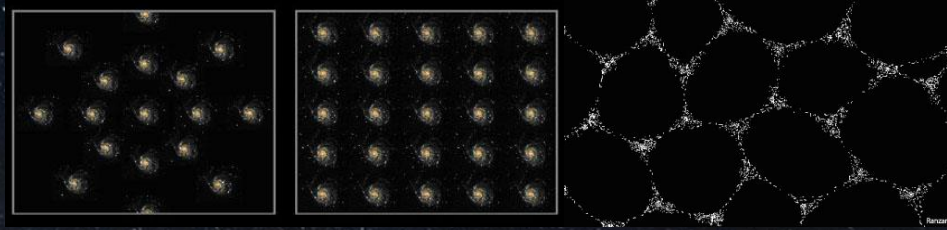
Veľkoškálová štruktúra vesmíru



Simulácia vzniku hubovitej štruktúry z takmer homogénneho rozloženia hmoty (vľavo) a porovnanie veľkoškálovej štruktúry vesmíru zistenej na základe pozorovaní v rámci projektov *Sloan Digital Sky Survey* a *2dF Galaxy Redshift Survey* a výsledku simulácie *Millennium Simulation* (vpravo).

Izotrópnosť a homogenita vesmíru

- ✦ Aj keď má hmota vo vesmíre tendenciu organizovať sa do štruktúr (galaxie, kopy galaxií, nadkopy galaxií), na dostatočne veľkých škálach (≈ 100 Mpc) možno považovať vesmír za homogénny a izotropný.
- ✦ Takáto štruktúra je konzistentná s *kozmozologickým princípom*, teda s myšlienkou, že všetky miesta a všetky smery sú dokonale rovnocenné a neexistuje žiaden významný „stred“ alebo počiatok (*M. Kopernik*).

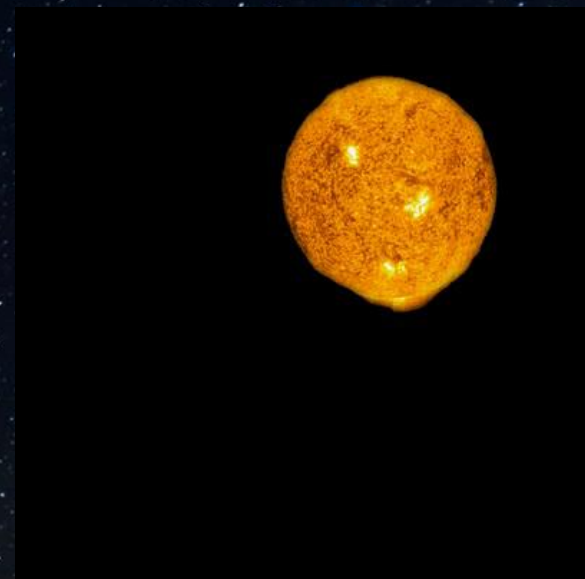


Porovnanie izotropnej (vľavo hore), homogénnej (v strede hore) a izotropnej a súčasne homogénnej štruktúry (vpravo hore). Distribúcia galaxií vo vesmíre odvodená na základe pozorovaní projektu *Two-micron all-sky survey* (2MASS) potvrdzuje, že koncentrácia galaxií je na veľkých škálach všade rovnaká, vesmír je homogénny (vľavo dole). Pozorovania reliktového žiarenia pomocou sondy *Planck* potvrdzujú, že vesmír je s veľkou presnosťou izotropný (vpravo dole). 137

Olbersov paradox

- ✱ Prečo je obloha prevažne tmavá?
- ✱ Pre statický, homogénny, nekonečný (večný) vesmír:
$$F \sim N/r^2 \sim \rho V/r^2 \sim r^3/r^2 \sim r$$

Pre $r \rightarrow \infty$, $F \rightarrow \infty$
- ✱ Výsledok kvalitatívne nezmení ani započítanie absorpcie žiarenia medziľahlými hviezdami: $F = \varepsilon$
- ✱ **T. Digges** (1546 – 1595) – prepis Kopernikovho diela do AJ; v súlade s **kozmozologickým princípom** nahradil predstavu sféry stálic, nekonečným množstvom hviezd v nekonečnom vesmíre; prvý upozorňuje na problém tmavej oblohy.
- ✱ **J. Kepler** (1571 – 1630) – vysvetľuje paradox neplatnosťou kozmozologického princípu (hviezdy sú iba v určitej časti vesmíru, ostatný priestor je prázdny; 1610).
- ✱ **E. Halley** (1656 – 1742) – navrhol vysvetlenie, že svetlo vzdialených hviezd k nám nedospeje, lebo je príliš slabé (1720); nesprávne, tok žiarenia síce $F \sim 1/r^2$, no nikdy neklesne na nulu.
- ✱ **H. Olbers** (1758 – 1840) – navrhol vysvetlenie, že svetlo vzdialených hviezd je pohltené medziľahlou medzihviezdnou hmotou (1823). Toto vysvetlenie vyvrátil **J. Herschel** (1848) argumentom, že žiarením nekonečného počtu hviezd by sa medzihviezdna hmota po čase zohrialala a žiarila by tiež ako hviezdy.



Olbersov paradox

- ✿ *W. T. Kelvin* (1824 – 1907) – vysvetlenie na základe konečnej veľkosti pozorovateľného vesmíru (platí pre konečný vek vesmíru a konečnú rýchlosť svetla).
- ✿ Správne vysvetlenie je založené na princípe „medze dohľadnosti“ (*E. R. Harisson* 1964).
- ✿ *Medza dohľadnosti l* je daná stredným rozmerom hviezd a strednou vzdialenosťou medzi hviezdami (koncentráciou hviezd):

$$l = 1 / \pi R^2 \rho$$

- ✿ Pre $R = 1 R_{\odot} = 7 \times 10^8 \text{ m}$, $\rho = 1 \text{ hv} / 10^9 \text{ ly}^3$

$$l = 6 \times 10^{22} \text{ ly.}$$

čo je mnohonásobne viac ako vzdialenosť, ktorú prejde žiarenie za dobu života hviezdy (10^{10} ly.). Tiež je to mnohonásobne viac ako polomer pozorovateľného vesmíru (75×10^9).

- ✿ Pozn. Súčasné pozorovania dávajú ešte nižšiu koncentráciu hviezd (1,4 hviezdy na 10^{11} ly.^3 , čo dáva strednú vzdialenosť medzi hviezdami 4150 ly.).
- ✿ *Fotometrický paradox* sa uplatňoval vo veľmi mladom vesmíre (do 380 000 rokov).

Gravitačný paradox

- ✿ *Isaac Newton* (1643 - 1727) odvodil všeobecný zákon gravitácie, podľa ktorého príťažlivá sila F medzi hmotnými telesami závisí od súčinu ich hmotností m_1 , m_2 a klesá so štvorcom ich vzdialenosti r :

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2 \vec{r}}{r^2 r}$$

- ✿ Príťažlivosť gravitačnej sily však narušuje silne vžitú predstavu *statického vesmíru*.
- ✿ Newton argumentuje, že v nekonečnom vesmíre naplnenom zruba rovnomerne rozloženou hmotou neexistuje „stred“, kam by telesá mali „padať“. Vesmír je statický.
- ✿ Ak však zoberieme telesá v istej konečnej sférickej oblasti, tieto pod vplyvom gravitácie kolabujú. Nezáleží na tom, koľko telies sa bude nachádzať mimo tejto oblasti, ich výsledné silové pôsobenie na telesá vo vybranej oblasti bude nulové, a teda nezmenia ich pohybový stav – kolaps v oblasti bude pokračovať. Minimálne v danej oblasti vesmír statický nie je.
- ✿ Rozpor predpovedí Newtonovej teórie gravitácie pre správanie sa nekonečného množstva látky je známy ako *gravitačný paradox*.

Relativistická kozmológia

- ✱ V roku 1905 *Albert Einstein* (1879 – 1955) vypracoval *špeciálnu teóriu relativity*, ktorá však platí iba v inerciálnych vzťažných sústavách. V roku 1916 rozširuje platnosť teórie relativity na všetky vzťažné sústavy, vzniká *všeobecná teória relativity* (VTR).
- ✱ Teória relativity definuje, že rýchlosť svetla vo vákuu je vo všetkých vzťažných sústavách rovnaká, čo spôsobuje zaujímavé javy (dilatácia času, kontrakcia dĺžky, ...).
- ✱ VTR prichádza s modelom *časopriestoru* (čas a priestor už nie sú oddelené, ale vytvárajú jednotné súcno), ktorý je pružný a *zakrivuje sa* v prítomnosti hmoty (energie). *Geodetiky* (najkratšie spojnice dvoch bodov, dráhy svetla) v zakrivených časopriestoroch už nie sú priamky, ale obecné krivky.
- ✱ Zakrivenie časopriestoru v dôsledku prítomnosti a pohybu hmoty (energie) popisujú *Einstenove rovnice (poľa)*:

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

kde $G_{\mu\nu}$ je *Einsteinov tenzor*, $R_{\mu\nu}$ *Ricciho tenzor*, R *skalárna krivosť*, $g_{\mu\nu}$ *metrický tenzor* a $T_{\mu\nu}$ *tenzor energie-hybnosti*. Tenzor energie-hybnosti $T_{\mu\nu}$ popisuje rozloženie a pohyb hmoty (energie), ktorá spôsobí zakrivenie časopriestoru a hmota sa potom pohybuje v zakrivenom časopriestore popísanom metrickým tenzorom $g_{\mu\nu}$.

- ✱ VTR nahradzuje koncepciu pohybu telies v dôsledku gravitačného silového pôsobenia koncepciou pohybu telies v zakrivenom časopriestore.

Einsteinov kozmologický model

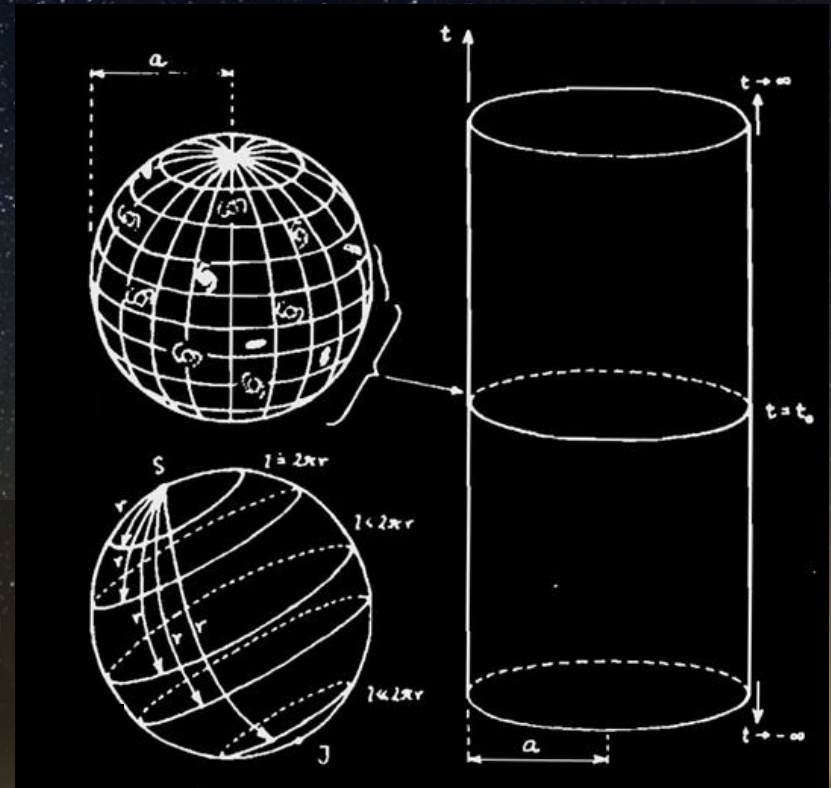
- ☀ *A. Einstein* sa pokúsil aplikovať svoje rovnice na *homogénny, izotropný* a *statický vesmír*, no dostal riešenie iba pre úplne prázdny vesmír, čo je v rozpore z pozorovaním.
- ☀ *A. Einstein* preto doplnil svoje rovnice o tzv. *kozmozologický člen*:

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

Kde Λ je *kozmozologická konštanta* (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.



FLRW kozmologické modely

- ✱ V roku 1922 *Alexander Fridman* odvodil (z Einsteinových rovníc poľa) rovnice pre popis homogénneho a izotropného vesmíru (bez predpokladu o dynamickom stave vesmíru).

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

kde H má význam *Hubbleovej konštanty*, $a = a(t)$ je škálovací faktor, ρ a p hustota a tlak hmoty (energie) a k charakterizuje krivosť priestoru. Rovnice boli odvodené pre tzv. *Fridmanovu-Lemaîtreovu-Robertsonovu-Walkerovu metriku* (skrátene FLRW metriku), a preto sa aj odvodené modely označujú ako tzv. *FLRW modely*.

- ✱ Aj pre $\Lambda = 0$ dostávame 3 modely v závislosti od hustoty hmoty-energie vo vesmíre v porovnaní s jej kritickou hodnotou ρ_c :

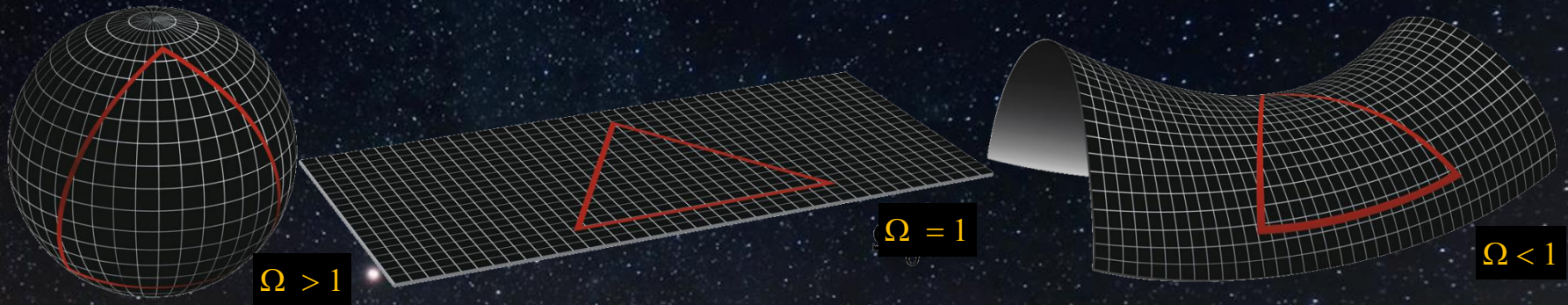
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

- ✱ Pomer hustoty ρ a jej kritickej hodnoty ρ_c sa označuje ako *hustotný parameter*

$$\Omega = \rho/\rho_c.$$

FLRW kozmologické modely

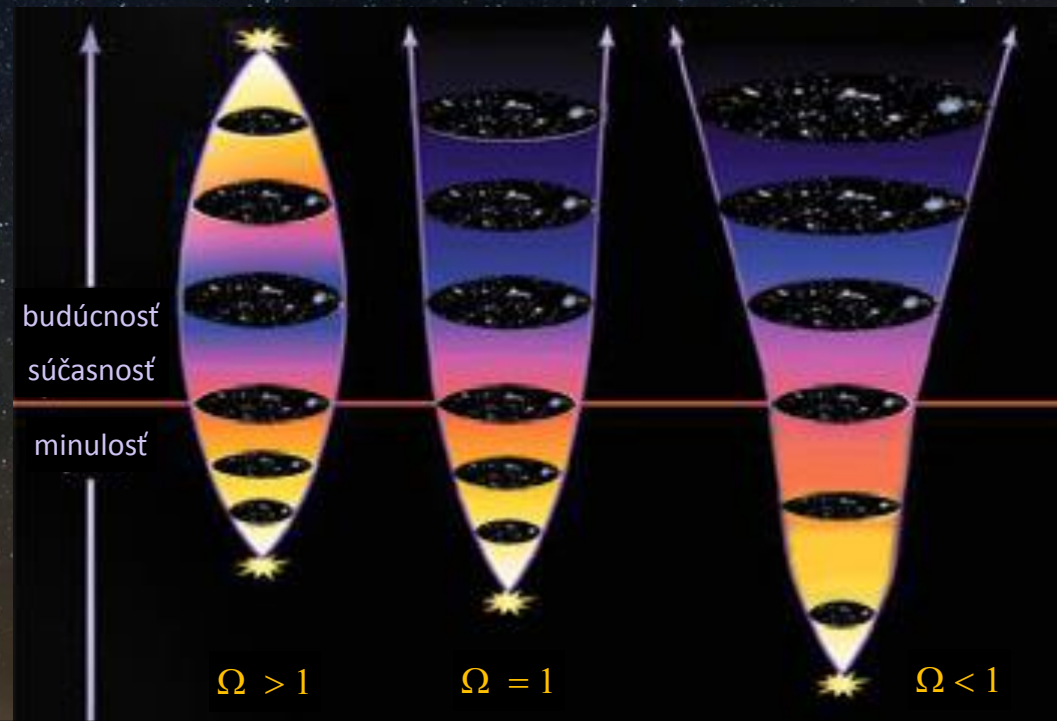
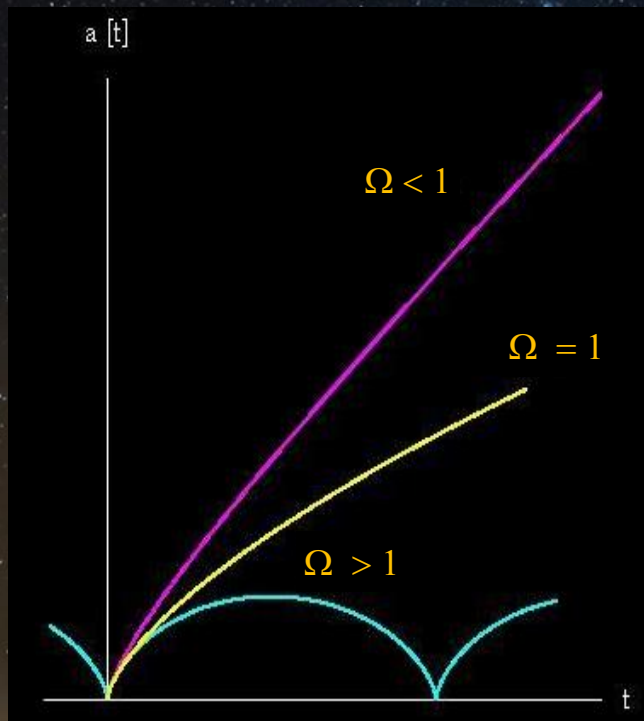
- ✱ Ak $\Omega > 1$, $k = +1$ - priestor má *sférickú* geometriu (je konečný, no neohraničený).
- ✱ Ak $\Omega = 1$, $k = 0$ - priestor má *plochú* (Euklidovu) geometriu (je nekonečný, neohraničený).
- ✱ Ak $\Omega < 1$, $k = -1$ - priestor má *hyperbolickú* geometriu (je nekonečný, neohraničený).



- ✱ Vo všetkých modeloch sa faktor $a(t)$ mení s časom, čo reprezentuje fakt, že vesmír nie je statický, ale sa rozpína alebo zmrštuje.
- ✱ Spoločnou vlastnosťou všetkých modelov je, že v čase $t = 0$, $a(t=0) = 0$. Všetky modely teda začínajú teoreticky v *singularite*. V okamihu $t = 0$ začína existovať vesmír aj čas a priestor. Súborne sa takéto modely označujú ako *štandardný kozmologický model* alebo model *Veľkého tresku*.

FLRW kozmologické modely

- ✱ Ak $\Omega > 1$, $k = +1$, vesmír začína svoju existenciu v singularite. Rozpínanie sa postupne spomaľuje. Keď vesmír dosiahne maximálnu veľkosť $a(t_{\max}) = a_{\max}$, rozpínanie sa zastaví a bude nasledované kontrakciou. Vesmír opäť končí v singularite.
- ✱ Ak $\Omega = 1$, $k = 0$, vesmír začína svoju existenciu v singularite. Rozpínanie sa postupne spomaľuje, no zastaví sa až po uplynutí nekonečne dlhého času.
- ✱ Ak $\Omega < 1$, $k = -1$, vesmír začína svoju existenciu v singularite. Rozpínanie sa postupne spomaľuje, no nikdy sa zastaví.



Graf závislosti škálovacieho faktora od času (vľavo) a schematické znázornenie priebehu evolúcie vesmíru pre rôzne modely v závislosti od hodnoty hustotného parametra (vpravo).

FLRW kozmologické modely

- Pre $\Lambda = 0$ dostávame ešte pestrejšiu „záhradu“ modelov.
- Ak presunieme *kozmozologický člen* na pravú stranu Einsteinových rovníc poľa, dostaneme:

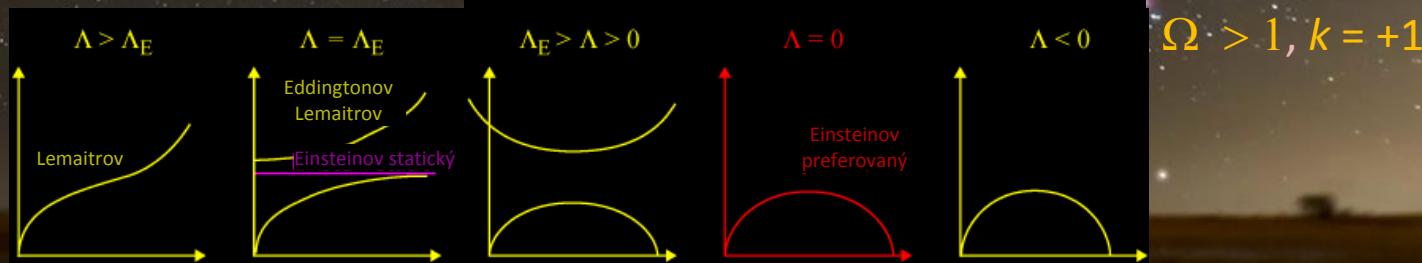
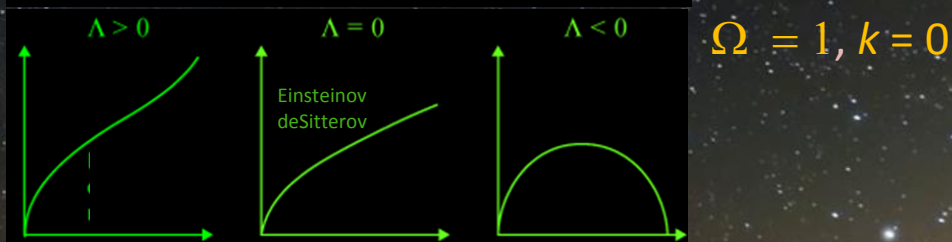
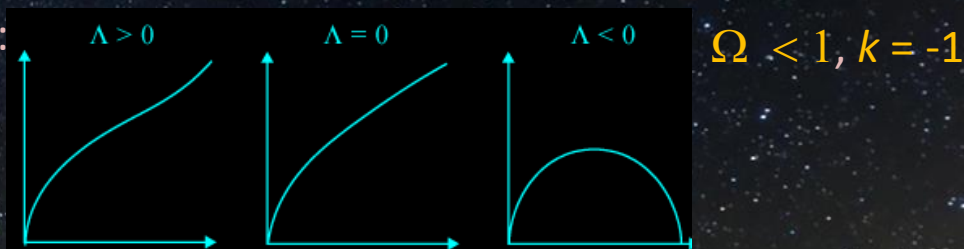
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

- Aj úplne prázdny časopriestor ($T_{\mu\nu} = 0$) bude zakrivený v dôsledku energie fyzikálneho vákua, čo možno interpretovať dodatočným silovým pôsobením, ktoré rastie so vzdialenosťou a je príťažlivé pre $\Lambda < 0$ a odpudivé pre $\Lambda > 0$.

Záhrada kozmologických modelov:

- Pre $\Lambda > 0$ a $\Omega \geq 1$ dostávame vesmír, ktorého rýchlosť expanzie sa najskôr spomaľuje, no po istom čase sa začne *zrýchľovať*.

- O tom, ktorý model najlepšie popisuje náš vesmír musia rozhodnúť pozorovania!

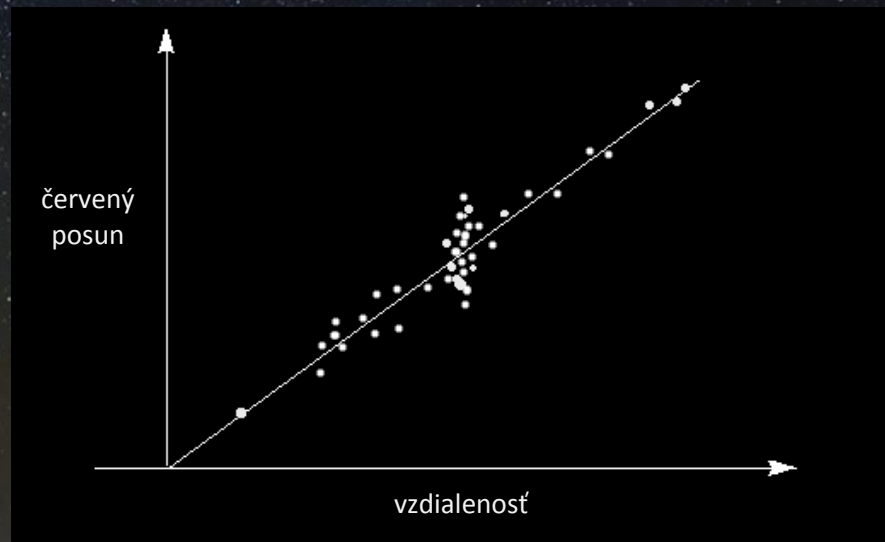


Rozpínanie vesmíru

- ☀ *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 vzdiaľovania 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** :

$$c z = H r$$

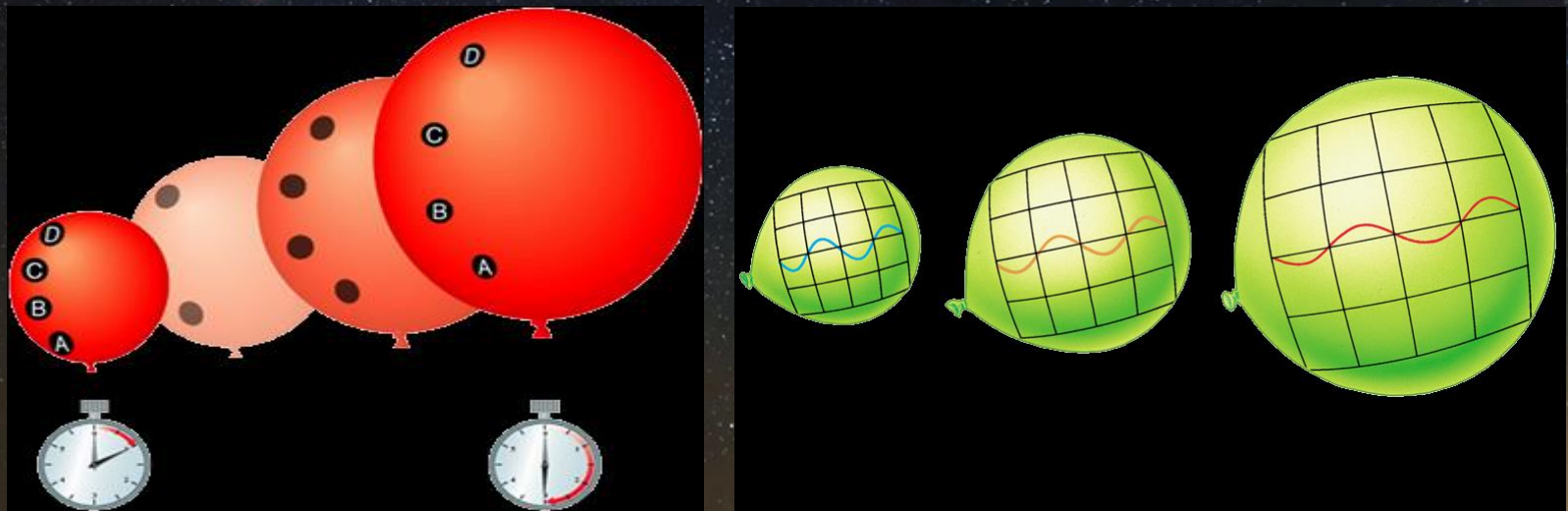
kde **c** je rýchlosť svetla vo vákuu a **H** je **Hubblova konštanta**. Tento vzťah sa označuje ako **Hubbluv zákon**.



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 naráža na problémy s platnosťou *kozmoľogického 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 vzdďalenejšie galaxie pohybujú rýchlejšie ako tie bližšie.
- ☀ Ďaleko prirodzenejším vysvetlením *Hubblevho 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 predĺžuje.

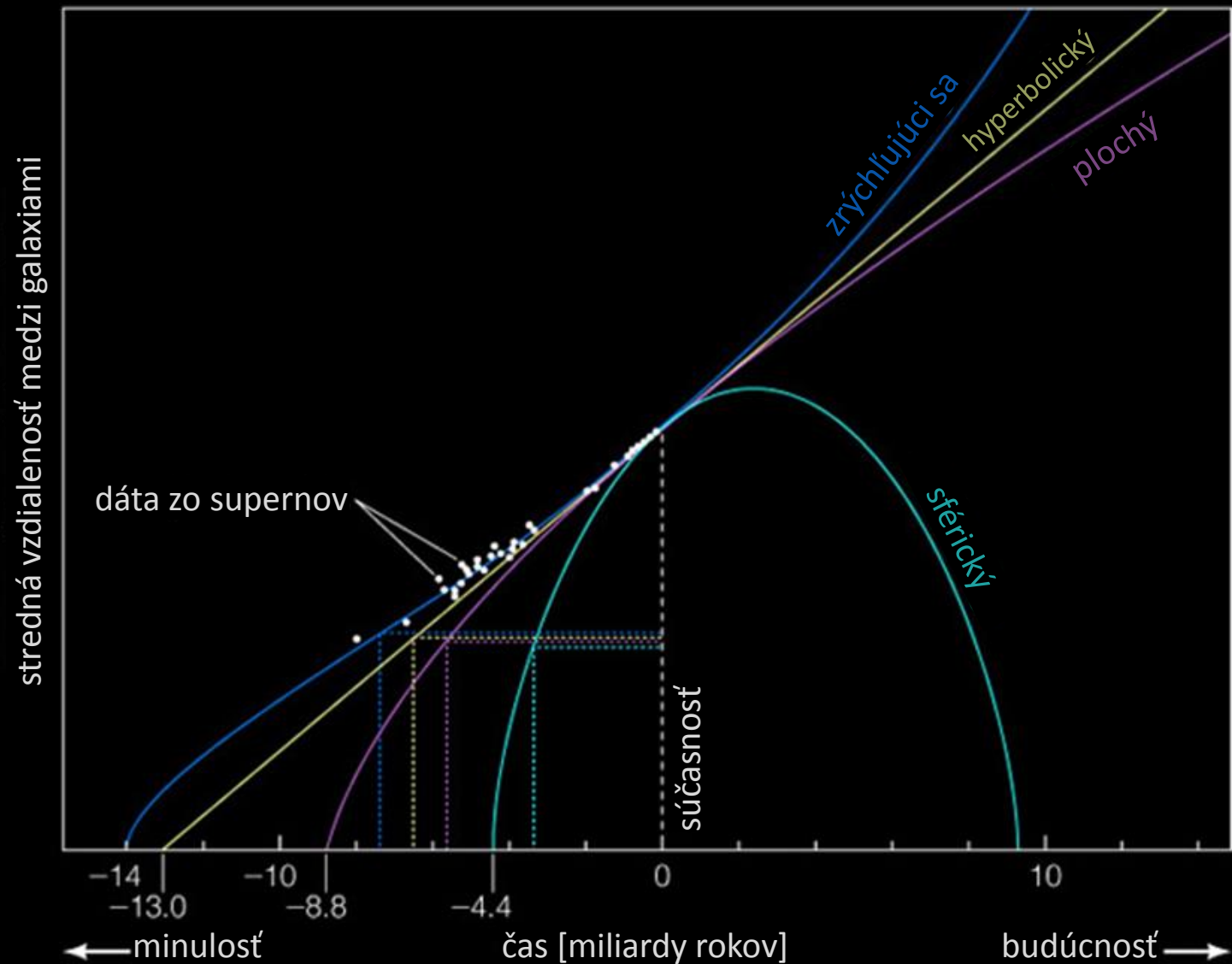
Rozpínanie vesmíru

- ☀ Rozpínanie vesmíru však znamená, že objekty boli v minulosti k sebe bližšie a existuje okamih, kedy sa teoreticky všetky (a tiež celý časopriestor) nachádzali v jednom bode (*singularite*). Z toho vyplýva, že vesmír má svoj *počiatok v čase*.
- ☀ Rýchlosť rozpínania sa vesmíru udáva *Hubbleova konštanta*, ktorá má podľa meraní zo *sondy Planck* (2013) hodnotu $H = 67,8 \pm 0,8 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$.
- ☀ Ak by sa rýchlosť rozpínania vesmíru nemenila, prevrátená hodnota Hubbleovej konštanty má rozmer času a udáva tzv. *Hubbleov vek vesmíru*:

$$t_H = 1 / H$$

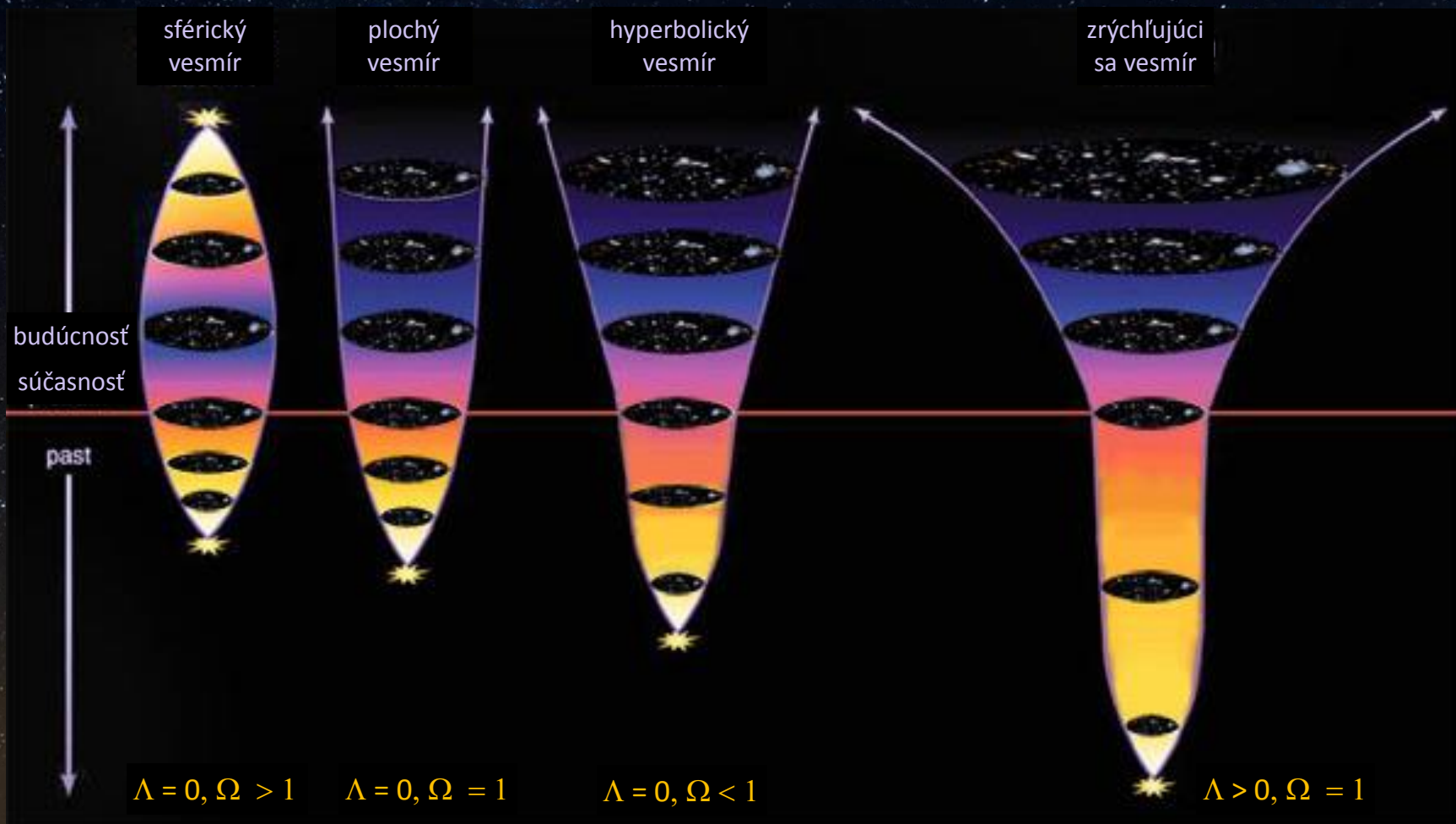
- ☀ Pozorovania vzdialených supernov však ukazujú, že rýchlosť rozpínania sa počas evolúcie vesmíru menila: spočiatku sa síce (pod vplyvom gravitačného pôsobenia hmoty) *spomaľovala*, no asi pred 5 miliardami rokov sa začala rýchlosť expanzie vesmíru *zrýchľovať*.
- ☀ Za objav zrýchľujúceho sa rozpínania vesmíru (1998) dostali v roku 2011 *Saul Perlmutter*, *Brian P. Schmidt* a *Adam G. Riess* Nobelovu cenu za fyziku.
- ☀ Zrýchľujúce sa rozpínanie vesmíru spôsobuje prítomnosť *tmavej energie*, ktorá tvorí až 70% celkového zloženia vesmíru.
- ☀ Tmavá energia sa najčastejšie dáva do súvislosti s *kozmozologickou konštantou* Λ a energiou fyzikálneho vákuu.

Rozpínanie vesmíru



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

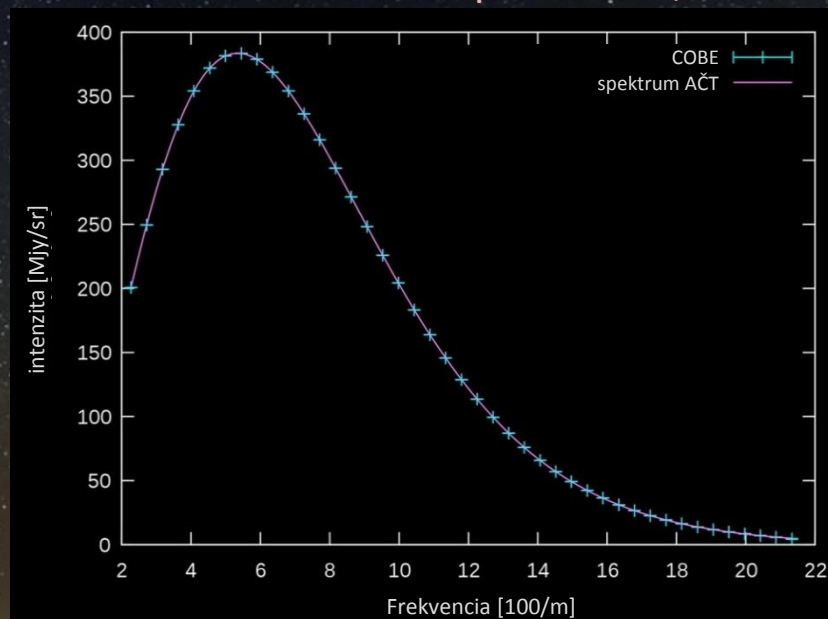
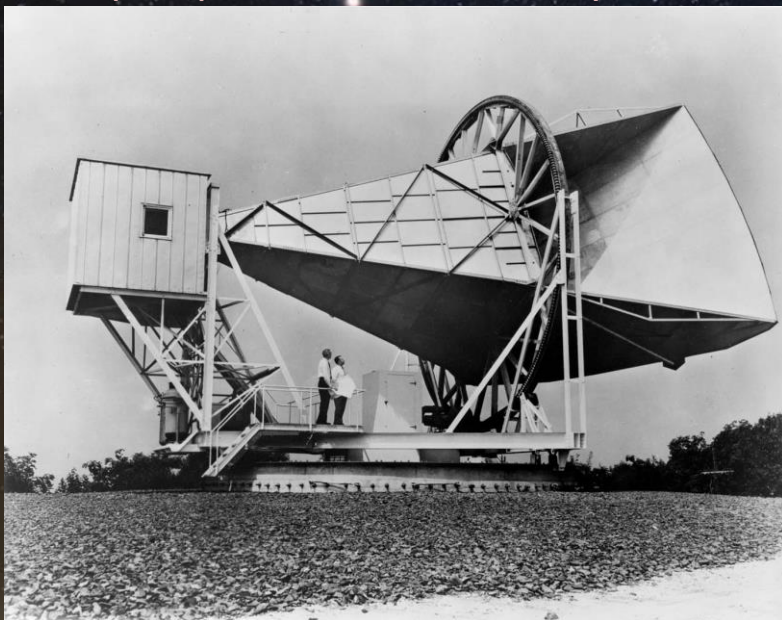
Evolúcia vesmíru



Schematické znázornenie priebehu evolúcie vesmíru pre rôzne modely v závislosti od hodnoty hustôtného parametra a hodnoty kozmologickej konštanty. Súčasný vesmír najlepšie popisuje model s plochou geometriou a so zrýchľujúcou sa expanziou (vpravo).

Reliktové žiarenie

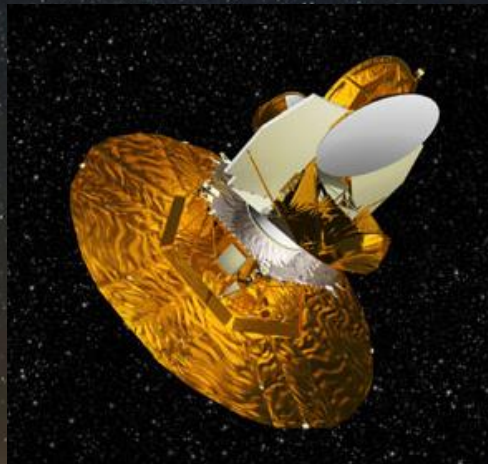
- ☀ V štandardnom modeli vesmír prešiel veľmi horúcou a hustou fázou, kedy bola ionizovaná hmota v termodynamickej rovnováhe so žiarením. Ako vesmír expandoval, zároveň chladol. Keď teplota klesla pod ≈ 3000 K, začala rekonbinácia, opacita vesmíru poklesla a rovnováha sa narušila. Došlo k oddeleniu žiarenia, ktoré je vo vesmíre prítomné dodnes a označuje sa ako *reliktové žiarenie*.
- ☀ Reliktové žiarenie objavili *Arno A. Penzias* (1933) a *Robert W. Wilson* (1936). K objavu došlo náhodou. Počas hľadania optimálneho rádiového pásma pre spojenie s pasívnymi rádiatelekomunikačnými družicami Echo v rokoch 1965 - 1964 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

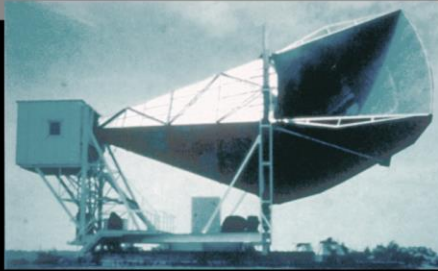
- ✦ V tom čase *Robert Dicke* (1916-1997) a *Phillip J. E. Peebles* (1935) rozpracovali myšlienku *Ralph Alpher* (1921-2007), *Robert Herman* (1914 - 1997) a *Georga Gamowa* (1904 - 1968) o prítomnosti žiarenia s teplotou ≈ 5 K ako pozostatku po horúcej fáze evolúcie vesmíru a *P. G. Roll* a *D. T. Wilkinson* (1935 – 2002) stavali anténu na nájdenie tohto žiarenia. Keď sa R. Dicke dozvedel o objave A. A. Penziasa a R. W. Wilsona, správne interpretoval toto žiarenie ako pozorovací dôkaz Veľkého tresku.
- ✦ Objav reliktového žiarenia sa považuje za doposiaľ najdôležitejší kozmologický objav (A. A. Penzias a R. W. Wilson , Nobelova cena za fyziku 1974).
- ✦ Výskumu reliktového žiarenia sa venuje intenzívna pozornosť, bolo vypustených niekoľko vesmírnych sond zameraných na jeho pozorovanie (*COBE Cosmic Background Explorer*, 1989; *WMAP – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, 2001; *Planck*, 2009).



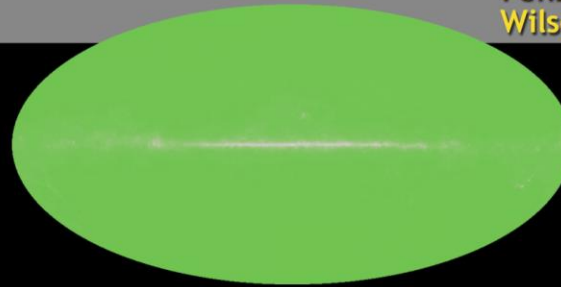
Vesmírne sondy *COBE* (vľavo), *WMAP* (v strede) a *Planck* (vpravo) zamerané na výskum reliktového žiarenia.

Reliktové žiarenie

1965



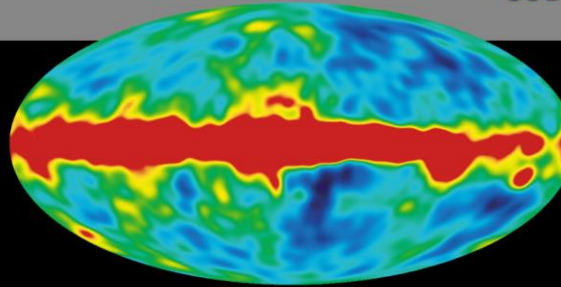
Penzias and
Wilson



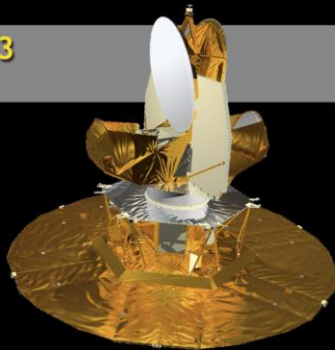
1992



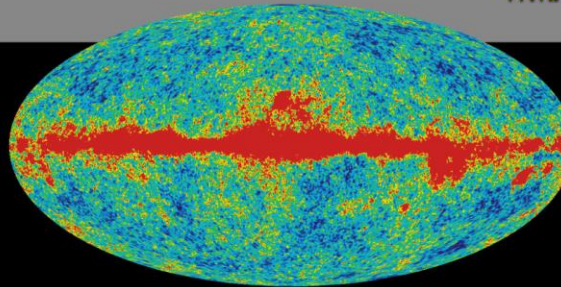
COBE



2003



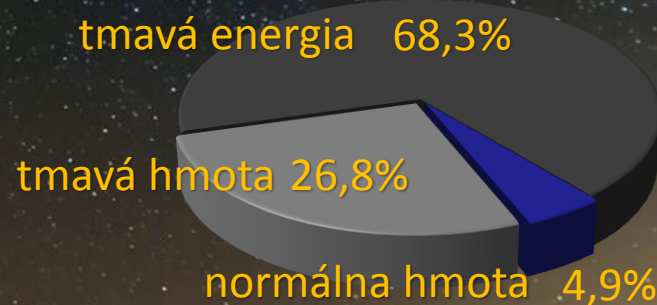
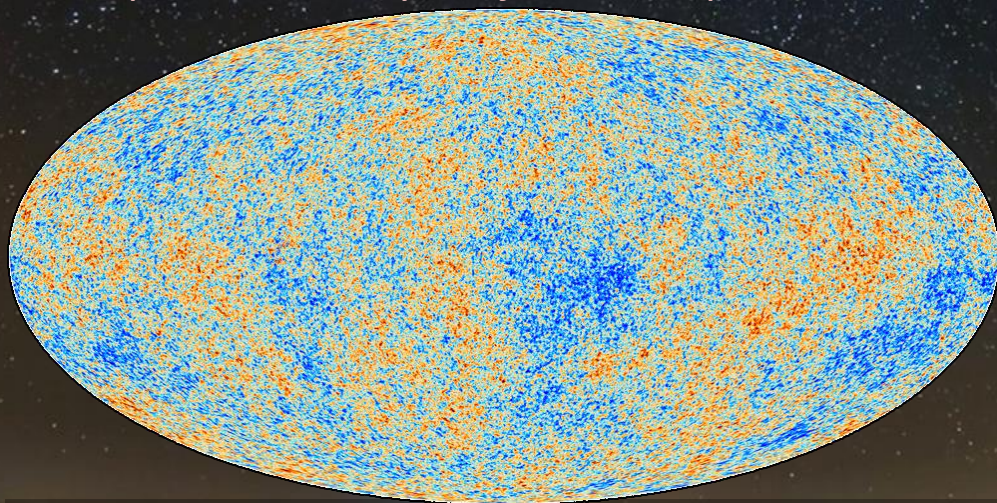
WMAP



Prvé pozorovania ukázali, že reliktové žiarenie je veľmi presne izotropné, čo podporuje platnosť kozmologického princípu. Výskum pomocou vesmírnych sond (*COBE*, *WMAP*) však ukázal, že v reliktovom žiarení sú veľmi malé odchýlky (zvýraznené nepravými farbami) na úrovni $\approx 10^{-5}$, ktorých výskum je cenným zdrojom informácií o veľmi mladom vesmíre.

Reliktové žiarenie

- ✦ Výskum pomocou sondy *Planck* ukázal, že reliktové žiarenie vzniklo asi **380 000 rokov** po **Veľkom tresku**, keď mal vesmír teplotu **2970 K**. Rozpínaním vesmíru žiarenie „vychladlo“ na teplotu **2,725 K**. Červený posun reliktového žiarenia je asi **1090**, čo z neho robí najvzdialenejšie žiarenia, aké pozorujeme (červený posun najvzdialenejších objektov ≈ 10).
- ✦ Vesmír má **13,8 miliardy rokov** a jeho globálna geometria je **plochá**.
- ✦ Výsledky analýzy fluktuácií reliktového žiarenia podporili myšlienku, že vesmír prešiel fázou **inflačného rozpínania**. V súčasnosti má rýchlosť rozpínania vesmíru hodnotu danú Hubblovou konštantou $H = 67,8 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$.
- ✦ Dáta zo sondy *Planck* sú vo veľmi dobrej zhode s tzv. **Λ CDM modelom**, teda, že väčšina hmoty má podobu tzv. **chladnej tmavej hmoty (CDM)** a prítomnosť **tmavej energie (Λ)** je zodpovedná za zrýchľujúce sa rozpínanie vesmíru.



Vznik a vývoj vesmíru

☀ $t = 0$

- kvantové efekty geometrie časopriestoru znemožňujú sledovať evolúciu vesmíru

☀ 10^{-43} s ($T = 10^{32}$ K, $\rho = 10^{93}$ kg.m⁻³)

- vznik vesmíru z „ničoho“ = fázovým prechodom falošného fyzikálneho vákua
- oddelenie gravitácie od dokonalej jedinej supersily
- rozpínanie vesmíru ($\sim t^{1/2}$, $\sim t^{2/3}$), inflácia,
- vznik baryónov a antibaryónov, častice a antičastice X

☀ 10^{-35} s ($T = 10^{27}$ K, $\rho = 10^{80}$ kg.m⁻³)

- oddelenie silnej jadrovej sily (GUT) od elektroslabej sily,
- narušenie CP symetrie, pomer baryónov a fotónov 1:10⁹
- vesmír zložený z voľných kvarkov, e⁻, e⁺, neutrín, antineutrín, fotónov, gluónov a gravitónov

☀ 10^{-10} s ($T = 10^{15}$ K, $\rho = 10^{30}$ kg.m⁻³)

- oddelenie elektromagnetickej a slabej jadrovej sily;
- vznik hadrónov

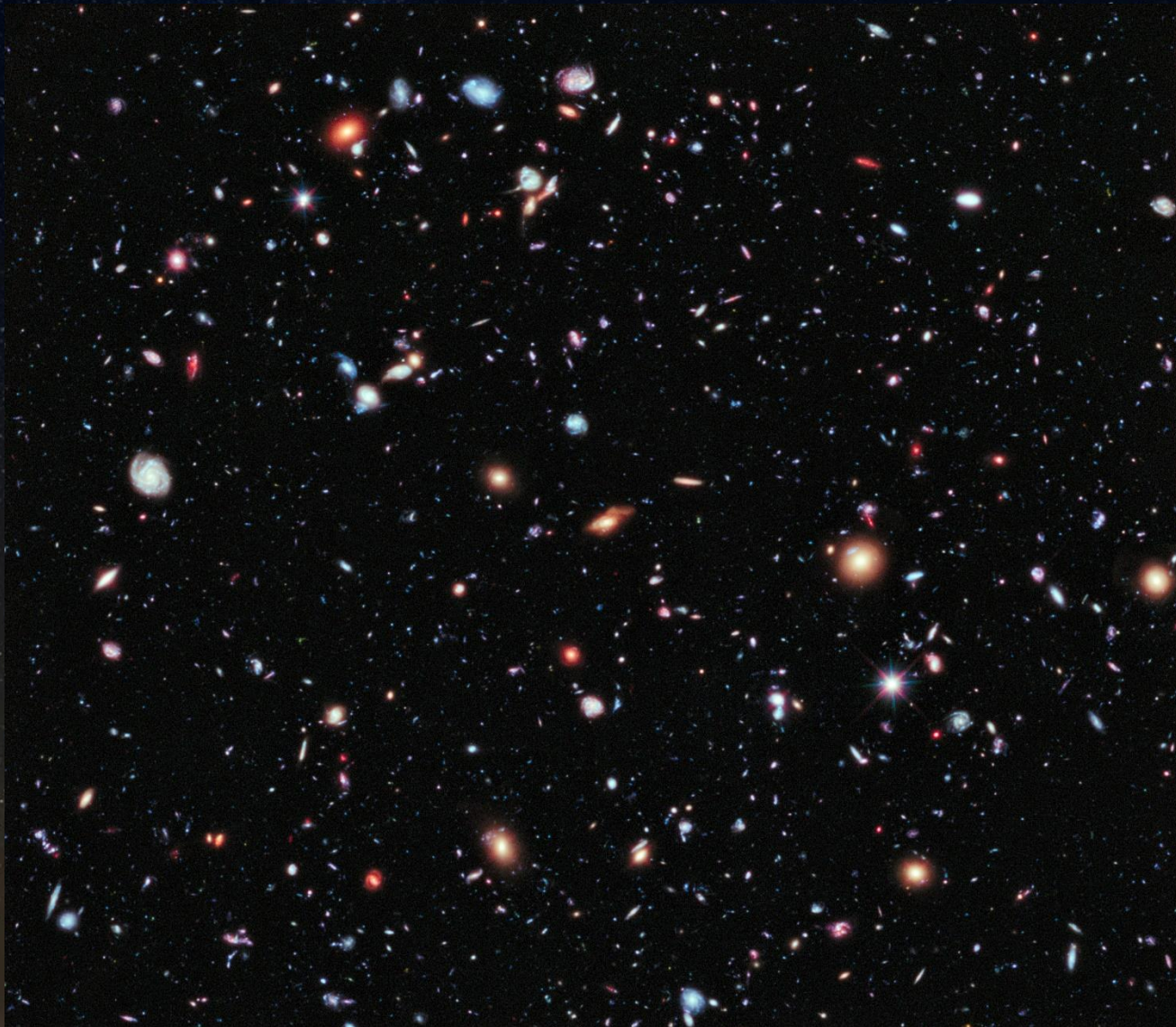
☀ 10^{-4} s ($T = 10^{12}$ K, $\rho = 10^{17}$ kg.m⁻³)

- vznik protónov a neutrónov

Vznik a vývoj vesmíru

- ☀ **0,1 s** ($T = 10^{11}$ K, $\rho = 10^7$ kg.m⁻³)
 - oddelenie neutrín, vznik neutrínového pozadia
 - anihilácia e⁻, e⁺, celkový náboj vesmíru = 0
- ☀ **10 s** ($T = 5 \times 10^9$ K, $\rho = 10^4$ kg.m⁻³)
 - začiatok nukleogenézy (deutérium, hélium, lítium)
- ☀ **200 s** ($T = 10^9$ K, $\rho = 10^3$ kg.m⁻³)
 - ukončenie nukleogenézy, konečné zastúpenie jadier ľahkých prvkov (všetky ostatné prvky vznikli nukleosyntézami v jadrách hviezd a počas vzplanutí supernov)
- ☀ **380 000 rokov**
 - rekombinácia, vznik neutrálnych atómov, koniec fotometrického paradoxu
 - vznik reliktového žiarenia
 - temné časy
- ☀ **200 miliónov rokov**
 - vznik prvých hviezd
- ☀ **300 miliónov rokov**
 - vznik prvých galaxií
- ☀ **13,8 miliardy rokov**
 - súčasný vesmír

Vznik a vývoj vesmíru



Snímka získaná pomocou HST (*eXtreme Deep Field*) zachytáva pohľad na vesmír, keď mal iba 500 - 600 miliónov rokov.

Namiesto záveru ...

Vývoj vesmíru možno porovnať s ohňostrojom,
ktorý sme zastihli v okamihu keď už končí.
Niekoľko žeravých uhlíkov, popol a dym.
Stojíme na chladnúcom popole, vidíme vyhasínajúce Slnko
a snažíme sa oživiť minulé veľkolepé počiatky svetov.
(George Lemaitre)

**Referencie:*

Vánýsek, V.: 1980, *Základy astronomie a astrofyziky*, Academia, Praha.

Grygar, J., Horský, Z., Mayer, P., 1979, *Vesmír*, Mladá fronta, Praha

Pittich, E., Kalmančok, D., 1981, *Obloha na dlani*, Obzor, Bratislava

Kleczek, J., 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia, Praha

Čeman, R., Pittich, E., 2002, *Vesmír 1 - Slničná sústava*, MAPA Slovakia, Bratislava

Čeman, R., Pittich, E., 2003, *Vesmír 2 - Hviezdy - Galaxie*, MAPA Slovakia, Bratislava

Pasachoff, J. M., Filippenko, A., 2006, *The Cosmos: Astronomy in the New Millennium*, Cengage Learning

Carroll, B. W. , Ostlie, D. A., 2006, *An Introduction to Modern Astrophysics*, Addison-Wesley

Böhm-Vittense, E., 1989, *Introduction to Stellar Astrophysics, I, II, III*, Cambridge University Press

Kippenhahn, R., Weigert, A., 1990, *Stellar Structure and evolution*, Springer-Verlag, Berlin

Contopoulos, D. Kotsakis, 1984, *Cosmology, the structure and evolution of the Universe*, Springer,

Ullman, V., 1986, *Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu*, ČAS ČSAV, Ostrava,

Horský, J., Novotný, J., Štefánik, M., 2004, *Úvod do fyzikální kosmologie*, Academia, Praha

Narlikar, J.V., 2002, *An Introduction to Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge

Pittich, E.: 2012, *Astronomická ročenka 2013*, Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo

www.eso.org, www.esa.int, www.nasa.gov, www.spacetelescope.org, www.stsci.edu, astro.unl.edu,

www.astronomiaonline.org, www.skyandtelescope.com, www.astronomy.com/news,

www.astronomynotes.com, www.solarsystemscope.com, www.ta3.sk, www.astro.cz, astro.sci.muni.cz

Použité obrázky a fotografie boli získané z uvedených internetových zdrojov alebo archívu autora.

** Zoznam použitej literatúry a internetových zdrojov môže slúžiť aj ako zoznam doporučenej literatúry.*