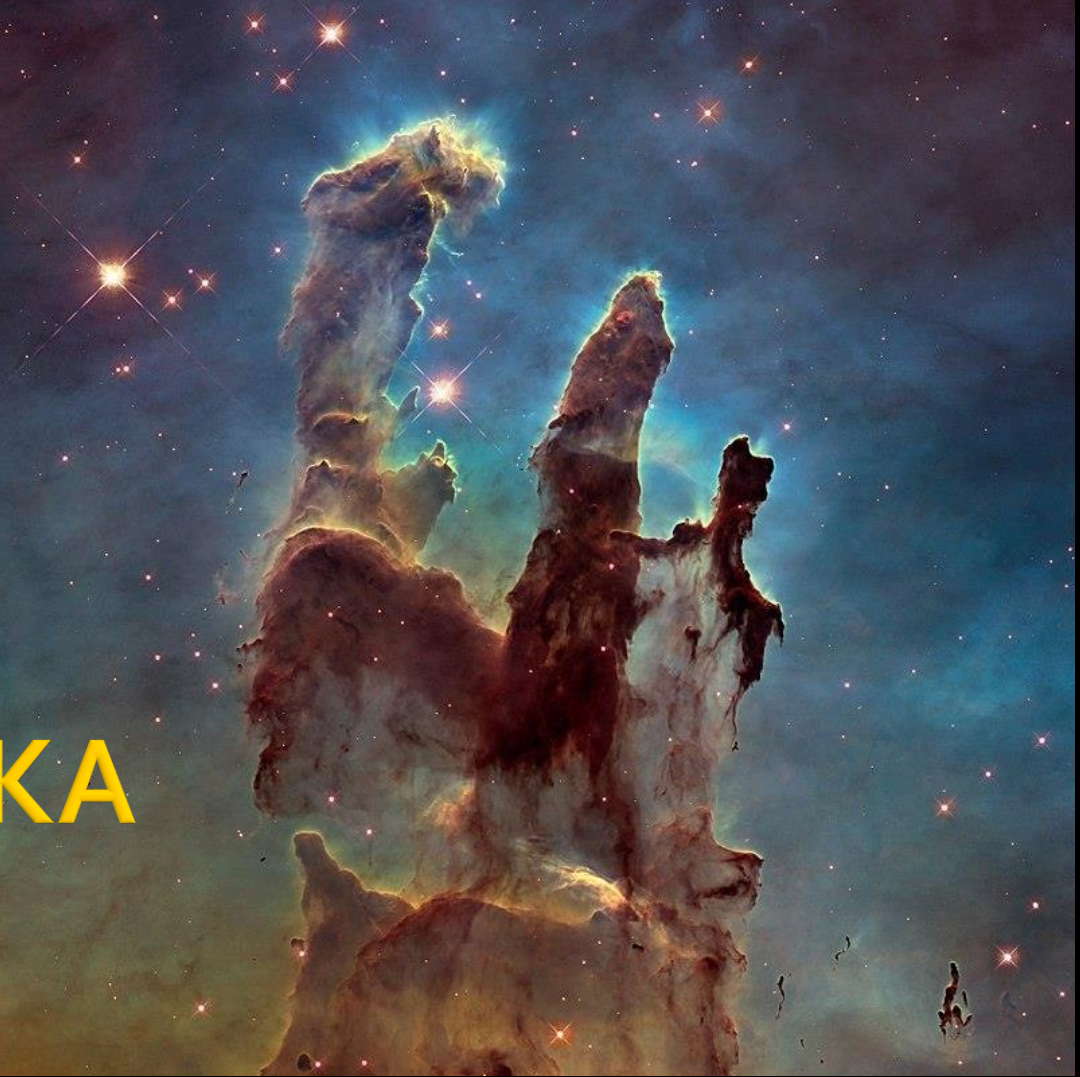
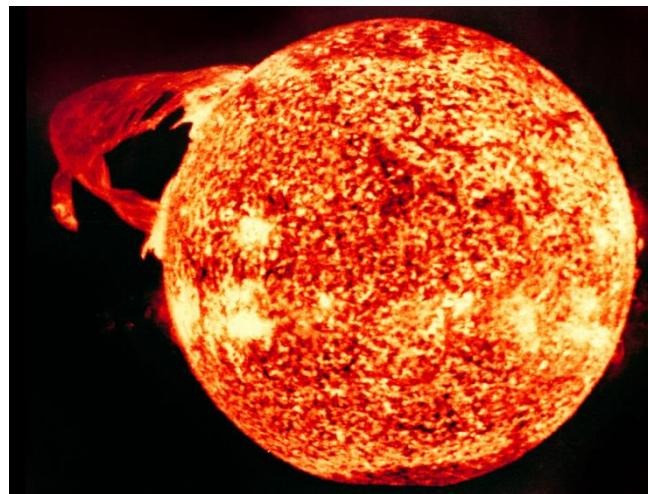
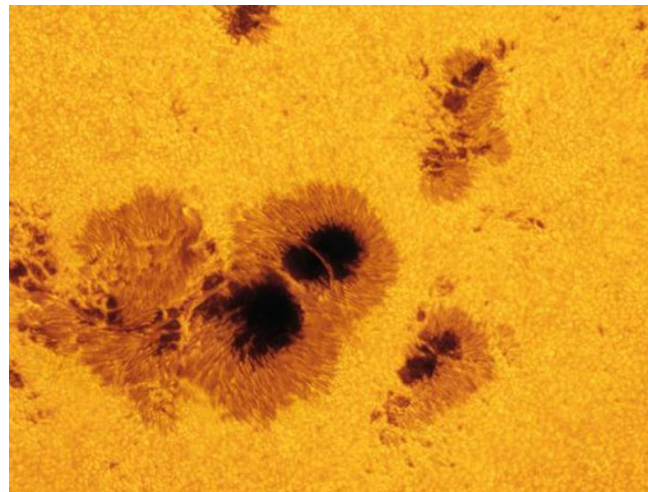




ASTROFYZIKA

Sluneční soustava

- **Slunce**: hvězda střední velikosti; představuje 99,9 % hmotnosti sluneční soustavy
- **Sluneční skvrny**: chladnější místa na povrchu představující poruchu magnetického pole; první pozorování: Galileo, Kepler, Fabricius
- **Sluneční protuberance**: výtrysk chladného plazmatu do vzdálenosti několika desítek tisíc km
- **Sluneční vítr**: proud p^+ , e^- , jader He s rychlostí cca 500 km/s způsobuje polární záře, magnetické bouře, poruchy energetických sítí (blackout)



Sluneční soustava

- **Planety zemského typu:** Merkur, Venuše, Země, Mars;
průměrná hustota: 5000 kg/m^3 ; poloměr $< R_Z$
kromě Země mají velmi slabé nebo žádné magn. pole
přítomnost vody: polární čepičky (Měsíc, Mars)
- **Merkur** (první tisíciletí př.n.l., posel bohů, řecký Hermes): stáčení perihélia o $43''$ za 100 let vysvětleno až OTR (Einstein); žádný měsíc;
sondy Mariner 10 (NASA 1973-1975), Messenger (2008-2011)
- **Venuše** (pravěk, Jitřenka, Večernice, římská bohyně lásky, řecká Afrodita):
nejjasnější objekt na noční obloze; nejhustší atmosféra z CO_2 ; sondy Věněra (SSSR 1970), Magellan (USA 1989-1994)
- **Mars** (3.-4. tis. př.n.l., bůh války, řecký Arés); měsíce Phobos (Strach) a Deimos (Hrůza); sondy Mariner 4 (USA 1964), Mars 2 a Mars 3 (SSSR 1971), Viking (USA 1976-1982), Mars Odyssey (NASA 2001), Curiosity (NASA 2011), Perseverance (NASA 2021)

Sluneční soustava

- **Obří planety (plynní obři):**
průměrná hustota: 700 – 1300 kg/m³
složení atmosféry: metan, čpavek
voda: Europa
- **Jupiter** (od pravěku, 3. nejjasnější objekt, nejvyšší římský bůh nebes a hromu, řecký Zeus): Velká rudá skvrna = bouře; 79 měsíců – 1610 Galileo objevil největší: Io, Europa, Ganymedes, Kalisto; sondy Pioneer (USA 1958-1978), Voyager (USA 1977-dodnes), Galileo (USA 1989-2003), New Horizons (2007), Juice (2022-2030; rozsáhlá a silná magnetosféra)
- **Saturn** (starověk, římský bůh zemědělství, sklizně a času, řecký Kronos): 2. největší planeta; prstence; 83 měsíců (největší Titan); mag.pole jako Země; sondy Pioneer, Voyager, Cassini (NASA 2004)
- **Uran** (starověk: hvězda, planeta 1781, řecký bůh nebes, římský Caelus): osa rotace v oběžné rovině planety ; 13 prstenců (1977); složena z ledu, kamení; excentrické mag.pole; 27 měsíců (Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Oberon)
- **Neptun** (1846 vypočtena, pak pozorována, římský bůh vody a moře, řecký Poseidón): namodralá barva díky metanu; 5 prstenců; 14 měsíců (Triton)

Sluneční soustava

- **Planetky**: tělesa větší než 100 m;
1801 Ceres
- **planetky mezi Marsem a Jupiterem**
- **Meteoroid**: tělesa menší než 100 m
Meteor – optický úkaz po vstupu meteoroidu do atmosféry
Meteorit – objekt dopadlý na zem
- **Trpasličí planety**: od 2006 Ceres, Eris, Pluto

Pluto (objeven 1930, od 2006 planetka) – 5 měsíců (Cháron 1978, Nyx a Hydra 2005, Kerberos 2011, Styx 2012);



Sluneční soustava

- **Komety**: tělesa obíhající kolem Slunce po velmi protáhlých eliptických trajektoriích
složení: led a prach
koma – plynný obal kolem jádra komety
chvost – směr od Slunce
- Trajektorie ovlivněná hlavně Jupiterem
- **Hale-Boppova kometa** (1995-7, návrat 4380)
nejjasnější kometa posledních století
- **Halleyova kometa** (perioda 75-76 let)
Čína 240 př.n.l.
1986, 2061, 2134
J.Seifert – sbírka básní
J. Nohavica



Základní údaje o hvězdách

■ Vzdálenosti hvězd

1 parsek – vzdálenost, ze které je vidět 1 AU pod úhlem $1''$

roční paralaxa – π

úhel, pod kterým vidíme z hvězdy úsečku 1 AU
paralaxy všech hvězd jsou menší než $1''$

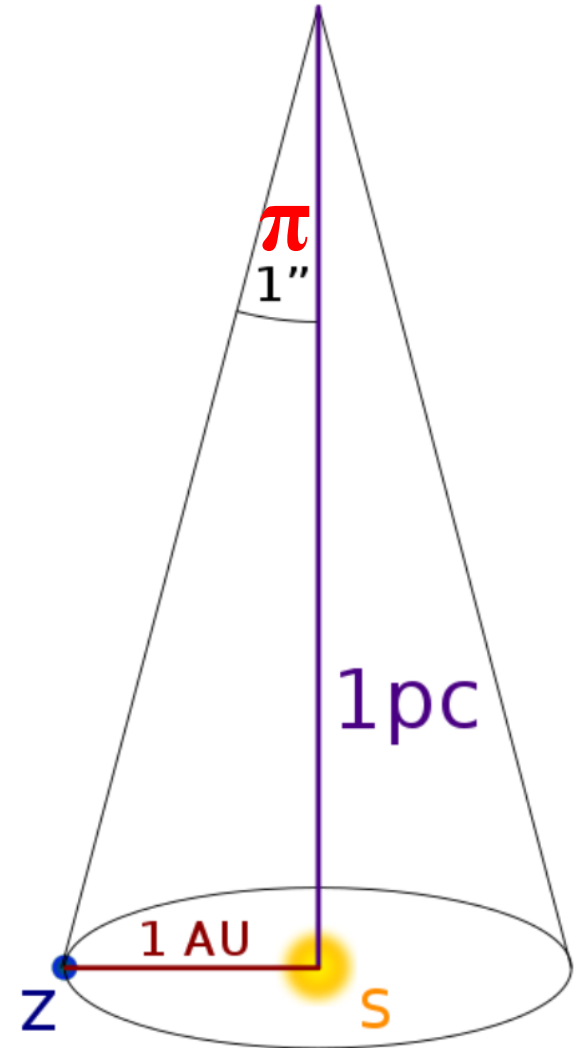
Př. Nejbližší * Proxima Centauri $\pi = 0,763''$

$$1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

Světelný rok – ly

$$1 \text{ ly} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly}$$



Základní údaje o hvězdách

- **Hmotnosti hvězd – $0,01M_S$ – $100 M_S$**

dvojhvězdy – obíhající kolem společného hmotného středu ve vzájemné vzdálenosti r s oběžnou dobou T

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{\kappa} \cdot \frac{r^3}{T^2}$$

- **Střední hustota**

Slunce:

$$M_S = 1,99 \cdot 10^{30} kg$$

$$R_S = 6,96 \cdot 10^8 m$$

$$\rho_S = 1410 kg \cdot m^{-3}$$

$$T_{povrch} = 5770 K$$

$$T_{nitro} = 20\,000\,000 K$$

$$p_S = 10^{14} Pa \text{ (nitro)}$$

Základní údaje o hvězdách

- Hvězdná magnituda – svítivost hvězdy
- Spektra hvězd

spektrální třídy – O (20 000 K), B, A, F, G, K, M (2000 K)

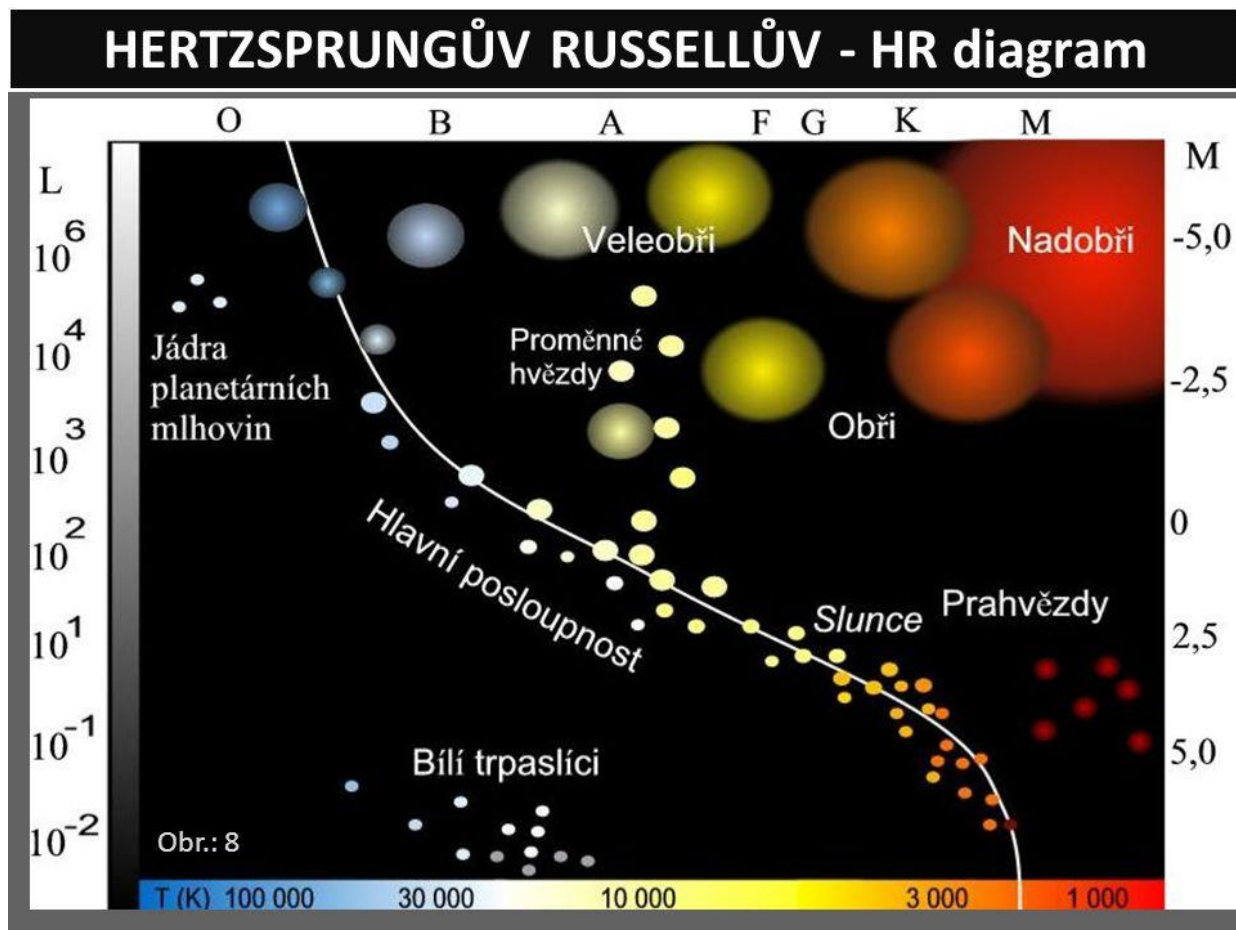
ze spektra lze určit: povrchovou teplotu *, chemické složení, relativní zastoupení jednotlivých prvků, magnetické pole

z Dopplerova posunu: rychlost vzdalování/přibližování *

Třída	Povrchová teplota [K]	Barva	Hmotnost [Ms]
O	50000 - 30000	modrá	20 - 50
B	30000 - 11000	modrobílá	3,2 - 17
A	11000 - 7500	bílomodrá	1,8 - 3,2
F	7500 - 6000	žlutobílá	1,2 - 1,7
G	6000 - 5000	žlutá	0,8 - 1,1
K	5000 - 3500	oranžová	0,6 - 0,8
M	3500 - 3000	červená	0,008 - 0,5

Základní údaje o hvězdách

- **Zdroj energie hvězd – jaderné reakce**
většina *: 75 % H₂, 20 % He, 5% těžší prvky
- **Proton-protonový řetězec**: slučování protonů na jádra hélia
- **CNO cyklus** – hmotnější hvězdy
- **Stavový diagram hvězd** – Hertzsprungův-Russelův diagram



Vývoj hvězd

■ Protohvězda

vzniká gravitačním smrštěním mezihvězdného plynu (H a He) a prachu; v centru narůstá teplota a tlak; začnou probíhat jaderné reakce

■ Sloupy stvoření – Orlí mlhovina M16

- 3 útvary z hustého plynu a prachu ležící na JV okraji mlhoviny
- vysoké 1 ly, vzdálené 7000 ly
- obsahuje mladou otevřenou hvězdokupu s hvězdami na počátku svého vývoje
- Spitzerův dalekohled v roce 2007 odhalil zničení sloupů rázovou vlnou z výbuchu supernovy před 6000 lety
- nová podoba M16 bude na Zemi vidět až za 1000 let



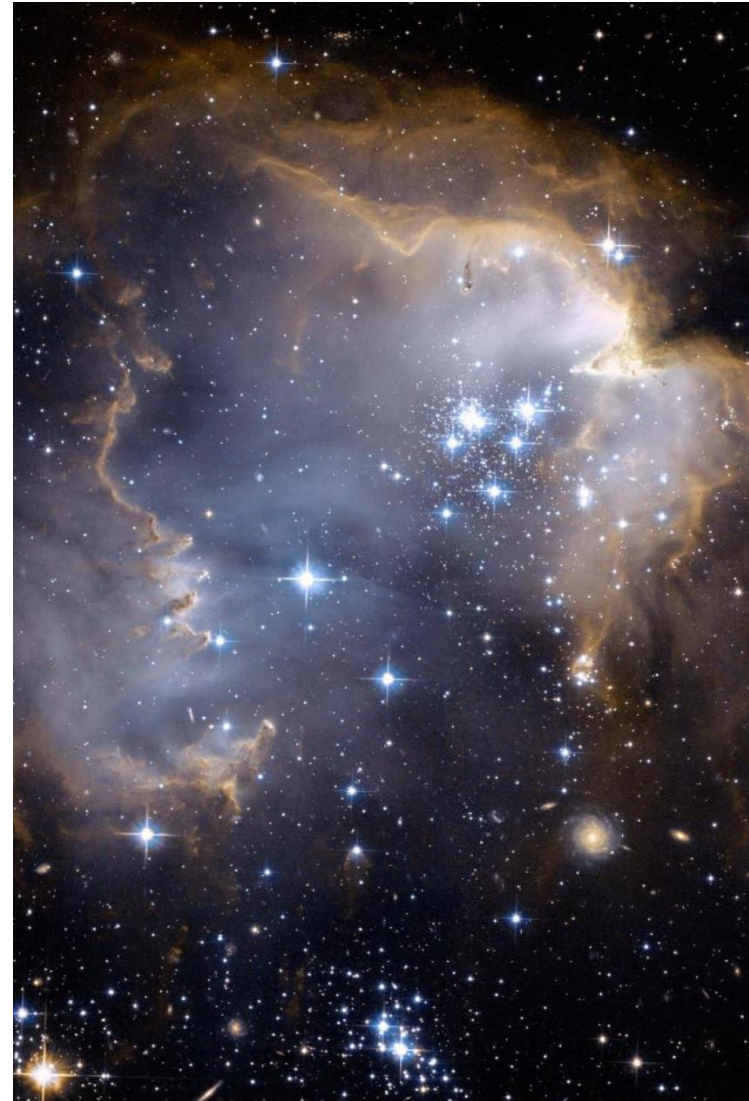
Vývoj hvězd

- **Hvězda hlavní posloupnosti**

čím větší hmotnost *, tím rychlejší vývoj i poloha na hlavní p-ti

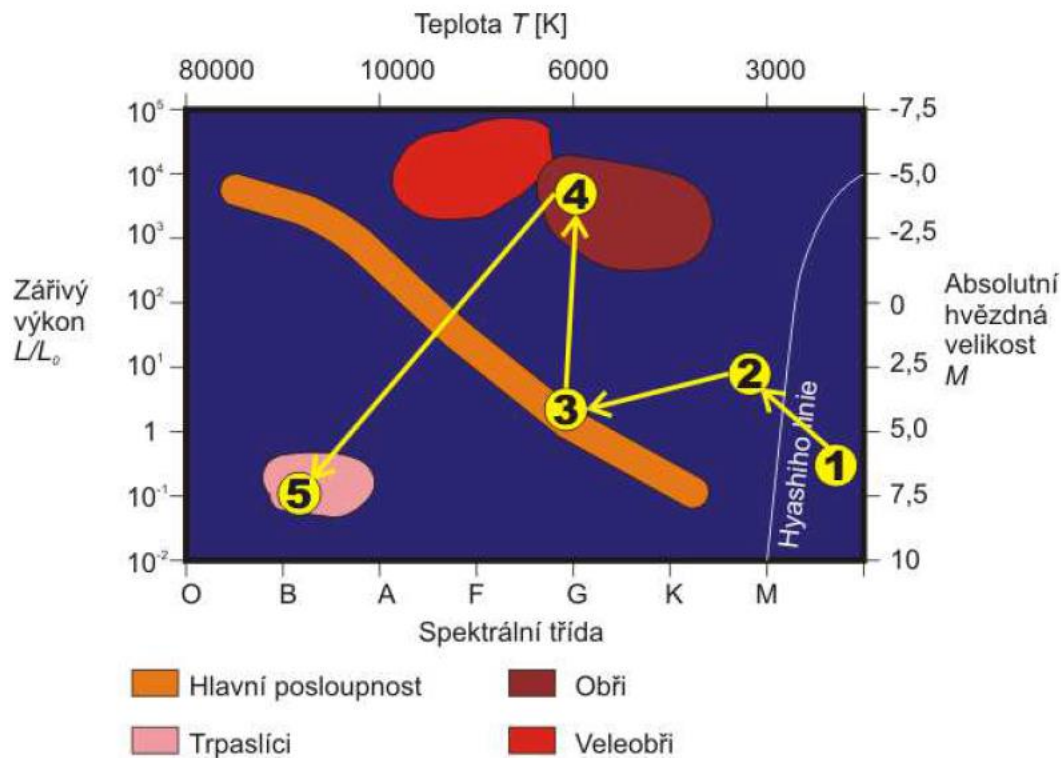
spotřeba 10 % vodíku za 10^{10} let (Slunce) až 10^6 let (těžké *)

největší *: $500 M_{\odot}$ ve Spitzerově temné mlhovině 11000 ly



Vývoj hvězd

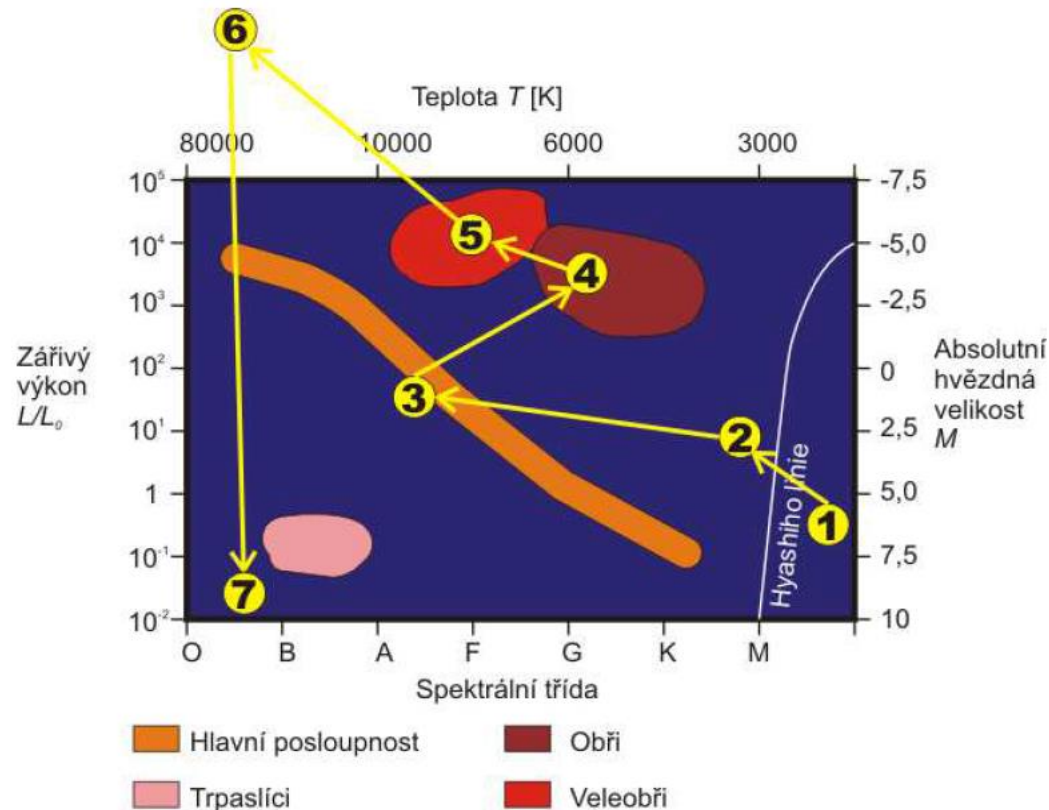
- Vývoj hvězd s malými hmotnostmi $\sim 1,4 M_{\odot}$



- Pobyť na hlavní posloupnosti $\sim 10^{10}$ let $\rightarrow$ spalování helia $\rightarrow$ červený obr $\rightarrow$ bílý trpaslík $\rightarrow$ černý trpaslík

Vývoj hvězd

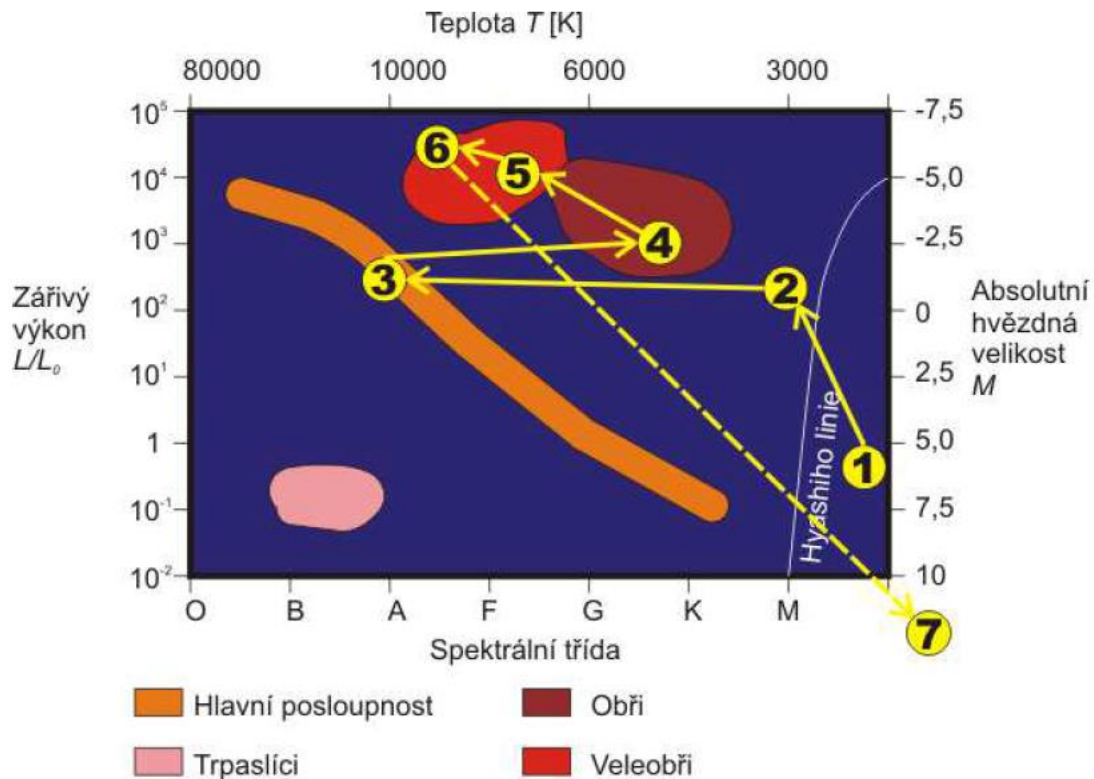
- Vývoj hvězd středních hmotností $1,4 - 8 M_{\odot}$



- Pobyť na hlavní posloupnosti $\sim 10^7$ let $\rightarrow$ spalování uhlíku $\rightarrow$ oblast obrů $\rightarrow$ destrukce hvězdy $\rightarrow$ supernova $\rightarrow$ neutronová hvězda

Vývoj hvězd

- Vývoj hvězd s velkými hmotnostmi 8 a více $M_{\odot}$



- Pobyt na hlavní posloupnosti $\sim 10^6$ $\rightarrow$ vytvoření železného jádra $\rightarrow$ další gravitační hroucení $\rightarrow$ gravitační kolaps $\rightarrow$ černá díra

Konečná stadia vývoje hvězd

- Po určité době (setrvání hvězdy na hlavní posloupnosti) dojde v nitru hvězdy k přeměně lehkých prvků v těžší – jaderné reakce ustávají, hvězda se ochlazuje a přestane existovat jako zářící těleso
- Forma konečného stadia vývoje hvězdy závisí na její hmotnosti a tedy na rychlosti jaderných reakcí probíhajících v jejím nitru. Hvězdy pak mohou končit jako
 - bílí trpaslíci
 - neutronové hvězdy
 - černé dírynebo jako nestabilní (explozivní útvary)
 - novy
 - supernovy

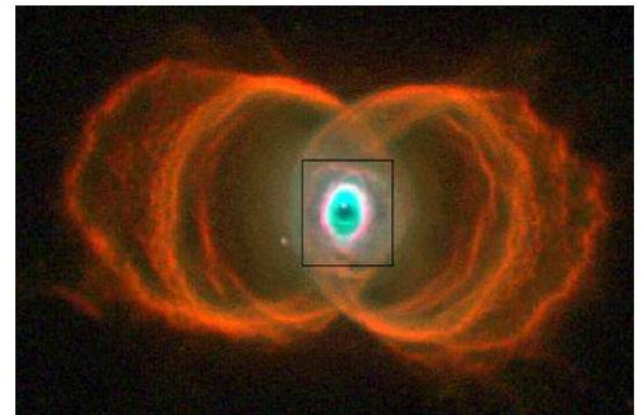
Bílí trpaslící

- Závěrečné stadium hvězdy podobné našemu Slunci. Obecně lze říci, že tímto způsobem končí hvězdy do hmotnosti $1,44 M_{\odot}$ – tzv. Chandrasekharova mez – v roce 1930 ji teoreticky spočítal S. Chandrasekhar (1910 – 1995)
- Jedná se o zhroucenou hvězdu kde gravitaci odolává tlak degenerovaného elektronového plynu
- V této hvězdě již neprobíhají žádné jaderné reakce a hvězda postupně vyhasíná, až se dostane do fáze černého trpaslíka (takový objekt by neměl ale být pozorován neboť doba potřebná k ochlazení je delší než doba existence Vesmíru)



Bílí trpaslíci

- Poloměr bílých trpaslíků je 1000 – 10000 km, hustota 10^9 kg.m^{-3} , hmotnost maximálně $1,44 M_{\odot}$
- Jako bílý trpaslík skončí tedy i naše Slunce, předtím se však hvězdy Slunci podobného typu vytváří tzv. planetární mlhoviny, v jejichž centru se vždy nachází jádro původní hvězdy (viz vývoj hvězd)



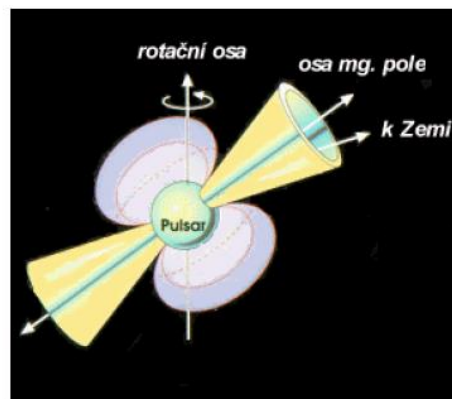
Neutronové hvězdy

- Závěrečné stadium hvězdy s hmotností $1,44 - 3 M_{\odot}$. Gravitaci odolává tlak degenerovaného neutronového plynu
- Poloměr je $10 - 100 \text{ km}$, hustota je $10^{16} - 10^{18} \text{ kg.m}^{-3}$, mají silné magnetické pole a rychlou rotaci
- Nesouhlasí-li směr rotační a magnetické osy, vytvářejí nabitých částic ve směru magnetické osy efekt tzv. pulsaru – rychle rotující neutronová hvězda
- První pulsar byl objeven v roce 1967 astronomkou J. B. Bellovou (1943 –)



Neutronové hvězdy

- Periody dosud objevených pulsarů leží v mezích 1,3 ms – 8 s. Typické pulsary mají periodu kolem 1 s.



- Poměrně známý a zkoumaný je podvojný pulsar PSR 1913+16, objevený v roce 1974

- V roce 1993 dostali A. Hulse a J. H. Taylor Nobelovu cenu za fyziku – zkoumání gravitačních vln



- *Magnetary* – atypické neutronové hvězdy s extrémně silným magnetickým polem – fáze výzkumu

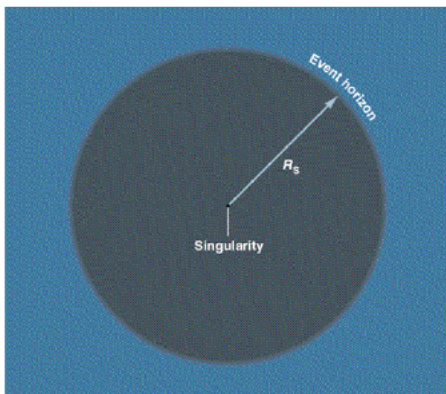
Černé díry

- Gravitačně zhroucené objekty – zachovávají si hmotnost, moment hybnosti a elektromagnetický náboj. Silně deformují geometrii prostoročasu ve svém okolí
- Urychlované částice v okolí černé díry velmi intenzivně září a opouštějí černou díru ve směru osy rotace a interagují s mezihvězdným prostředím
- Paradoxně tak bývají černé díry zdroji s extrémně velkou zářivostí – kvazary (v další přednášce)
- Z hlediska hmotnosti lze černé díry rozdělit do několika kategorií
 - hvězdné – hmotnost $3 - 100 M_{\odot}$
 - galaktické – supermasivní černé díry v centrech galaxií $10^5 - 10^{10} M_{\odot}$
 - prvotní (primordiální) – miniaturní černé díry, které vznikaly v raných fázích vývoje vesmíru – zatím nepozorovány

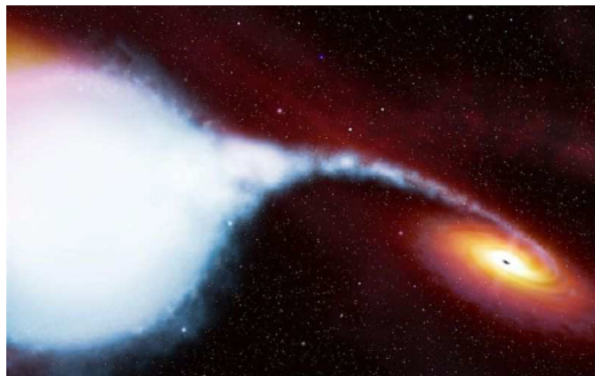
Černé díry

- Z gravitačního pole černé díry nemůže uniknout ani světlo
- Hranice, jež dělí prostor kolem černé díry na oblast, z níž světlo uniknout může a oblast, z níž těleso uniknout nemůže, se nazývá *horizont událostí*, jehož velikost je dána Schwarzschildovým poloměrem – K. Schwarzschild (1873 – 1916)

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$



© 1997 Macmillan Publishing Company/ITP



Černé díry

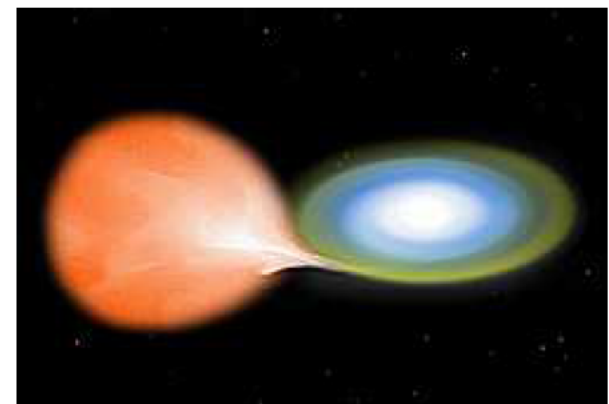
10.4.2019 první snímek černé díry



Černá díra Holm 15A o hmotnosti 40 miliard Sluncí

Novy

- Hvězda malé svítivosti prudce zvýší svoji jasnost (až o 13^m) vlivem překotné termonukleární reakce na povrchu hvězdy – ztratí svoji hvězdnou atmosféru (odhazuje obálku rychlostí 10^4 km.s^{-1})
- Poté svítivost hvězdy klesá během několika měsíců na původní hodnotu – zbytky odhozené obálky můžeme opět pozorovat jako mlhoviny
- Tento efekt nastává u dvojhvězd, kdy přetéká materiál z jedné hvězdy na druhou složku. Může se opakovat i několikrát za sebou, tzv. *rekurentní nova*
- *Trpasličí novy* – hvězdy u kterých je změna v jasnosti kolem $3 - 4^m$, mechanismus vzniku není přesně znám

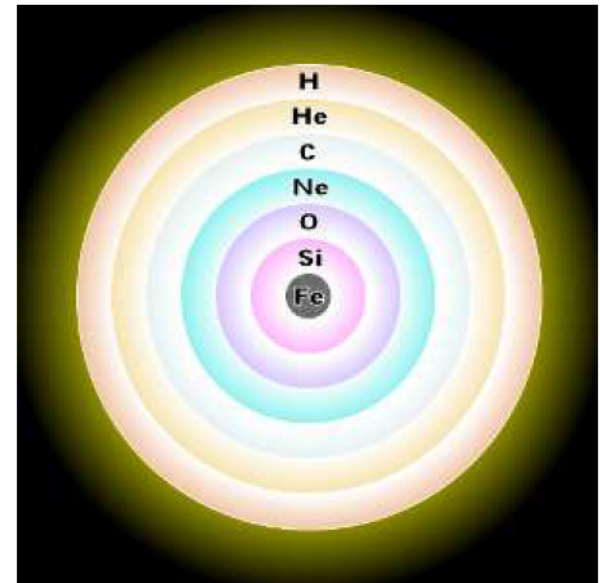


Supernovy

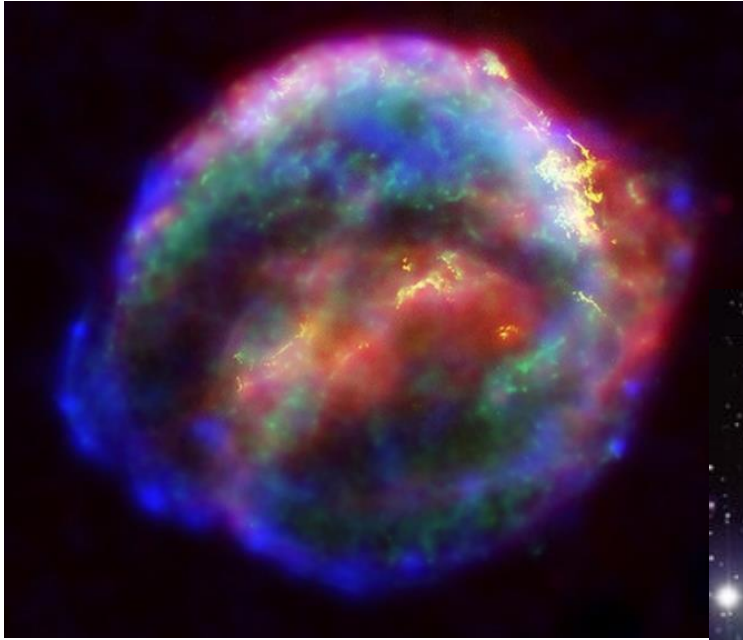
- Jedná se o závěrečnou fázi vývoje hvězdy, která je destruktivní a při níž dochází k rozmetání hvězdy v důsledku explozivní objemové termojaderné reakce
- Supernovy, podobně jako novy zvýší při explozi svou jasnost, ale jsou ještě zhruba tisíckrát jasnější
- Supernovy je možno rozdělit na dva základní druhy
 - Supernovy typu I. (SN I. a, b, c) – vznikají z hvězd o malé hmotnosti – přetékání hmoty z jedné hvězdy na bílého trpaslíka (jako v případě novy)
 - Supernovy typu II. (SN II.) – závěrečná fáze hmotných hvězd – hroucení hvězdy po období termonukleární syntézy, pozůstatkem je neutronová hvězda, černá díra, zbytek se rozmetá po okolí a je možno ho opět pozorovat jako mlhovinu

Supernovy

- U supernov typu II. dochází při postupném smršťování ke zvýšení teploty tak, že i po vyčerpání helia dochází k jaderným reakcím, při kterých z těžších prvků vznikají opět lehčí
- Dochází k expanzi vnějších vrstev, ale ke snížení tlaku v jádře a tím k dalšímu hroucení a smršťování – dochází k tvorbě neutronů (vtlačení elektronu do protonu a vytvoření páru neutron, neutrino) – zárodek neutronové hvězdy
- To se děje tak dlouho, až dojde k překročení Chandrasekharovy meze a dojde k explozi supernovy
- Přesný mechanismus od kolapsu k explozi ovšem není dosud uspokojivě vysvětlen

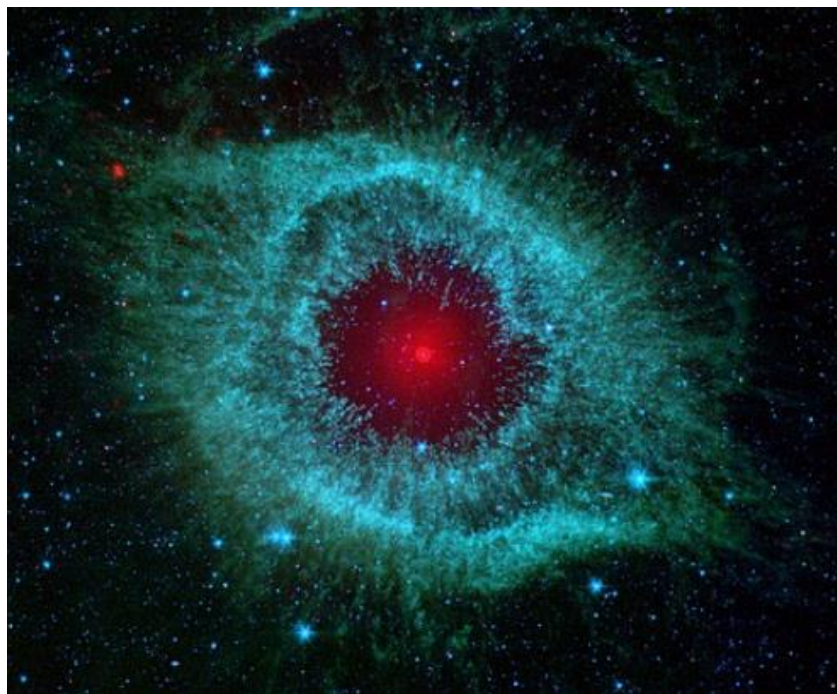


Supernovy



Planetární mlhovina Helix – Boží oko

- Objevena 1824 v souhvězdí Vodnáře
- V centru bílý trpaslík
- Vznikla po výbuchu supernovy

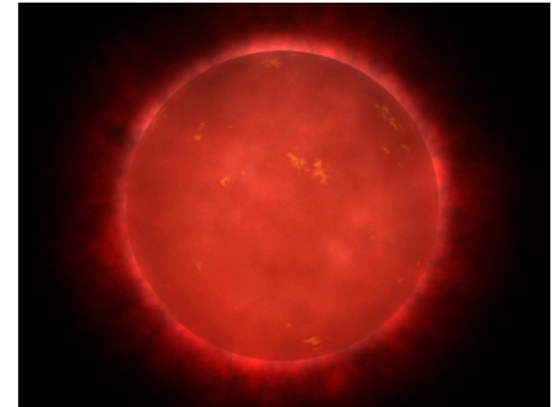


HST 2004

Infra oblast Spitzerův dalekohled

Červení trpaslíci

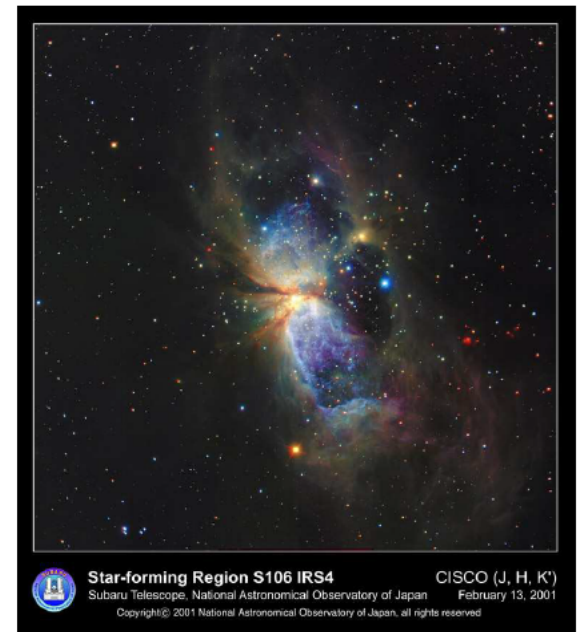
- Červení trpaslíci jsou hvězdy s poměrně malou hmotností $\sim 0,08 M_{\odot}$, které dlouhou dobu pobývají na hlavní posloupnosti HR diagramu
- Jejich teplota je kolem 3500 K a díky pomalému spalování vodíku je jejich odhadovaná životnost na $10^9 - 10^{12}$ let a jsou nejpočetnější skupinou hvězd v Galaxii (kolem 75% všech hvězd)



- U některých červených trpaslíků byly objeveny dokonce i tzv. extrasolární planety, tj. planety mimo sluneční soustavu (hvězda Gliese 581, planeta objevena v roce 2005)

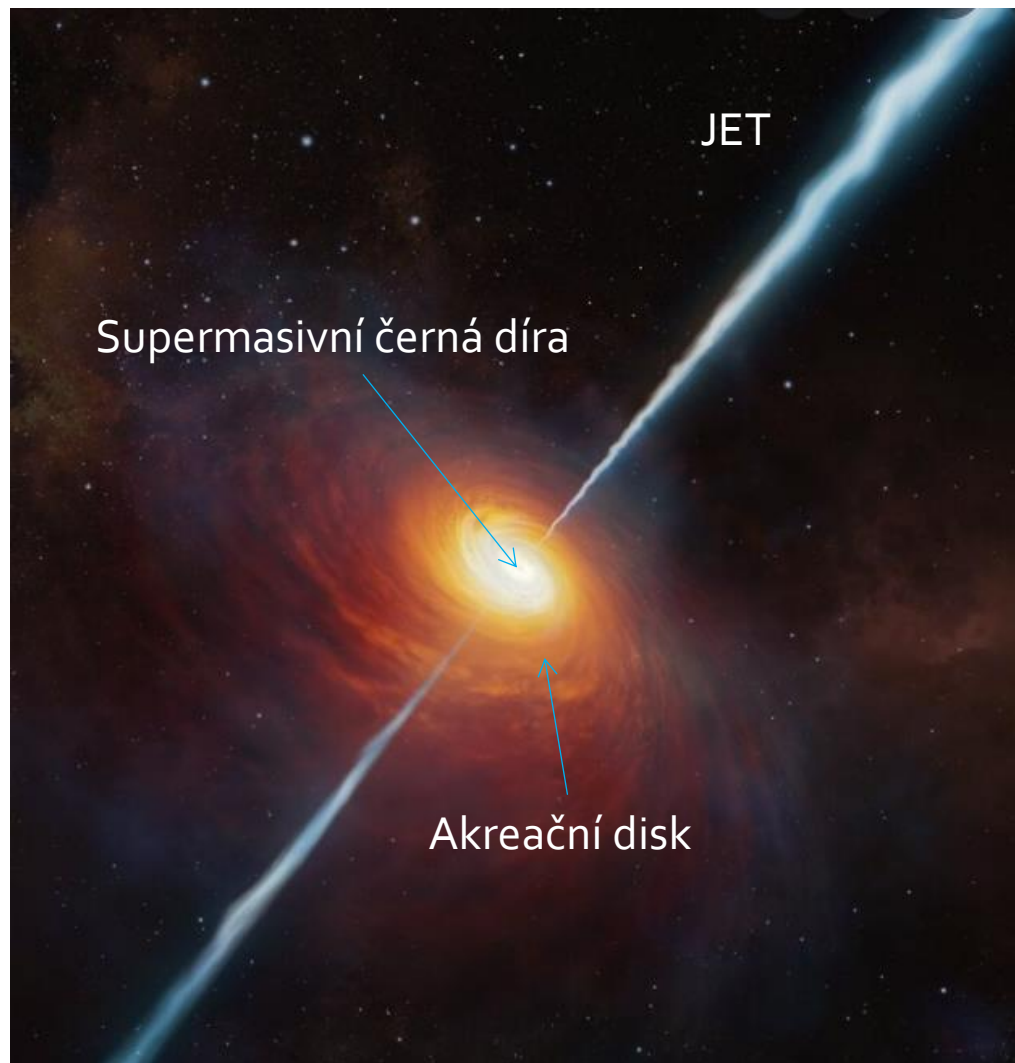
Hnědí trpaslíci

- Jsou to objekty, které byly hypoteticky předpokládány již v dřívějších dobách, první byl objeven v roce 1995
- Hnědého trpaslíka není možné považovat za hvězdu neboť teplota v jeho centru nikdy nemůže vzrůst na potřebnou teplotu $\sim 10^7$ K
- Jedná se tedy o jakýsi přechodový stav mezi planetou a hvězdou. Jejich hmotnosti bývají mezi 13 – 80 M_J
- Vývoj hnědého trpaslíka závisí, stejně jako u dalších vesmírných objektů na jeho hmotnosti – pro malé hmotnosti hnědý trpaslík postupně chladne až do fáze černého trpaslíka, pro hmotnosti větší dochází k pomalé reakci spalování vodíku a deuteria na helium



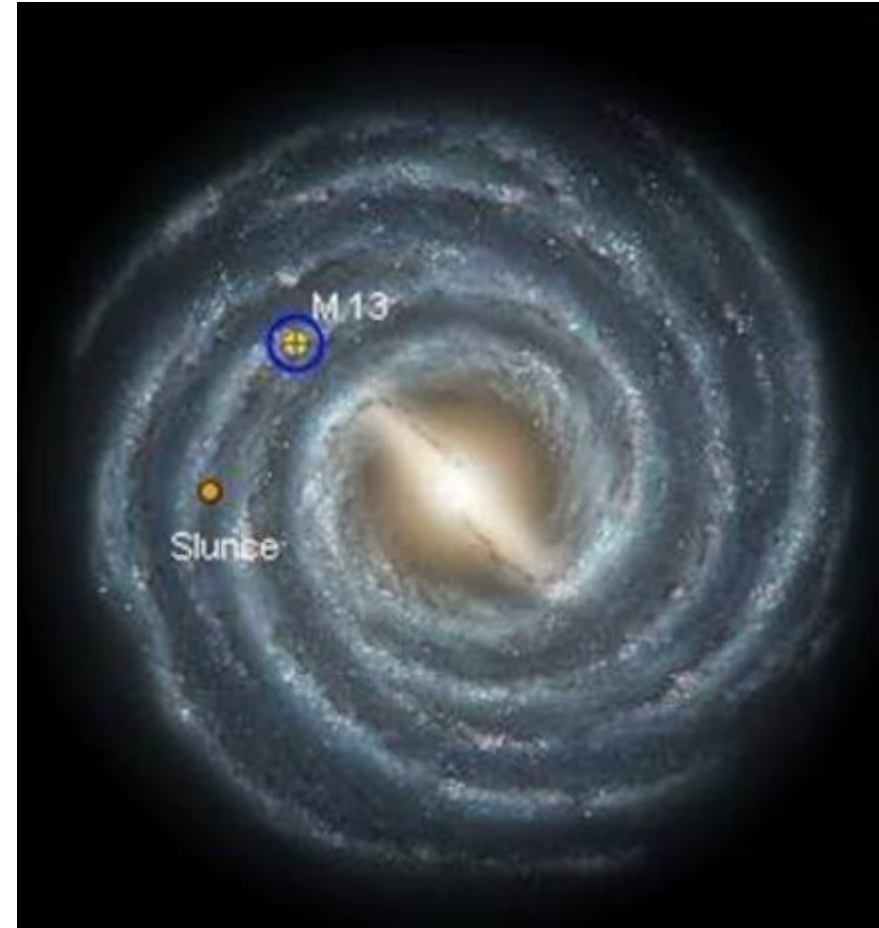
Kvasary

- *QUASi-stellar radio sources*
- *Výrazný rudý posuv spektra*
- *Aktivní jádra starých galaxií v jejichž středu je super masivní černá díra*
- *Objekty z rané fáze vesmíru*
- *Zářivý výkon: desítky biliónů sluncí = 50 nejjasnější galaxie*
- *Jet – výtrysk hmoty rychlostí 10 000 km/s s délkou několik Mpc*
- *Nejbližší: 240 Mpc*
- *Nejvzdálenější: 5500 Mpc*
- *Dnes pozorujeme neexist.obj.*

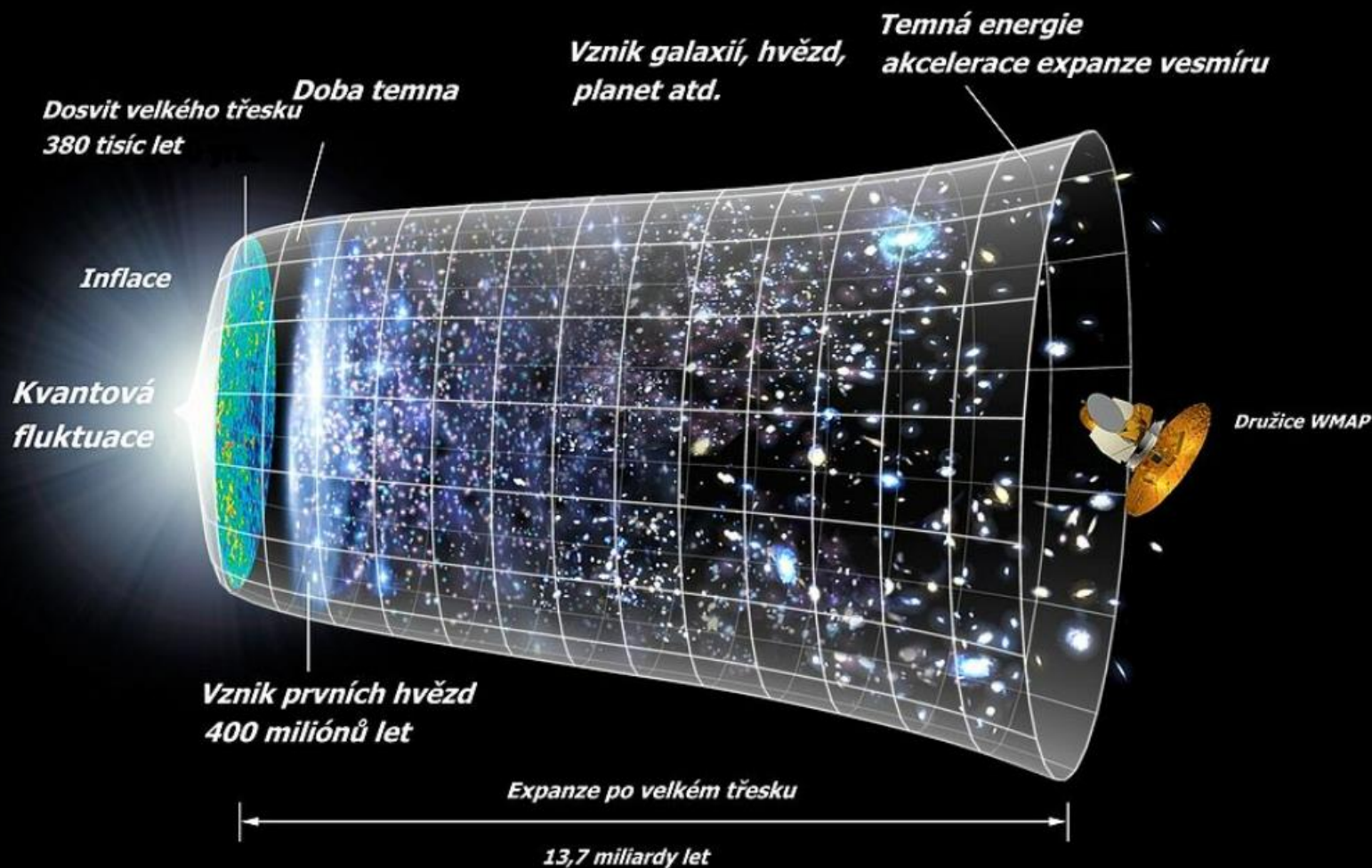


Struktura a vývoj vesmíru

- **Kosmologie**
vědní disciplína zabývající se fyzikálními vlastnostmi vesmíru jako celku a vývojem vesmíru
- **Galaxie**
 - soustava hvězd včetně Mléčné dráhy
 - obsahuje asi 100-400 miliard *
 - spirální galaxie s příčkou
 - průměr: 150-200 tisíc ly
 - v centru G supermasivní černá díra Sagittarius A*
- **Sluneční soustava** – 26000 ly od centra, na vnitřním okraji spirálního ramene Orionu



Struktura a vývoj vesmíru



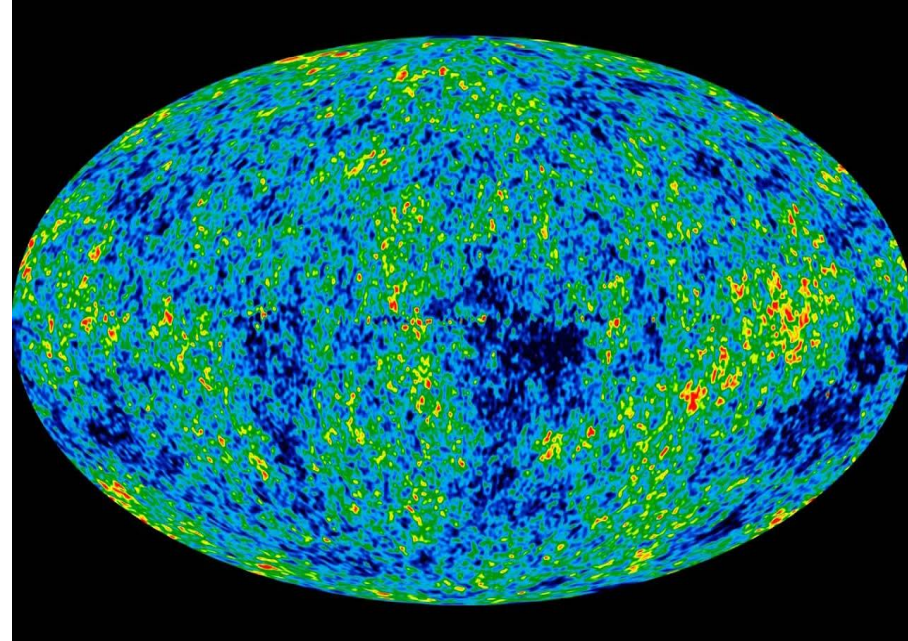
Struktura a vývoj vesmíru

■ Reliktní záření

- rádiové záření z raných dob vesmíru
- dokládá homogennost a izotropii vesmíru
- teplota 2,7 K
- objev v roce 1965 Arno A. Penzias a Robert W. Wilson

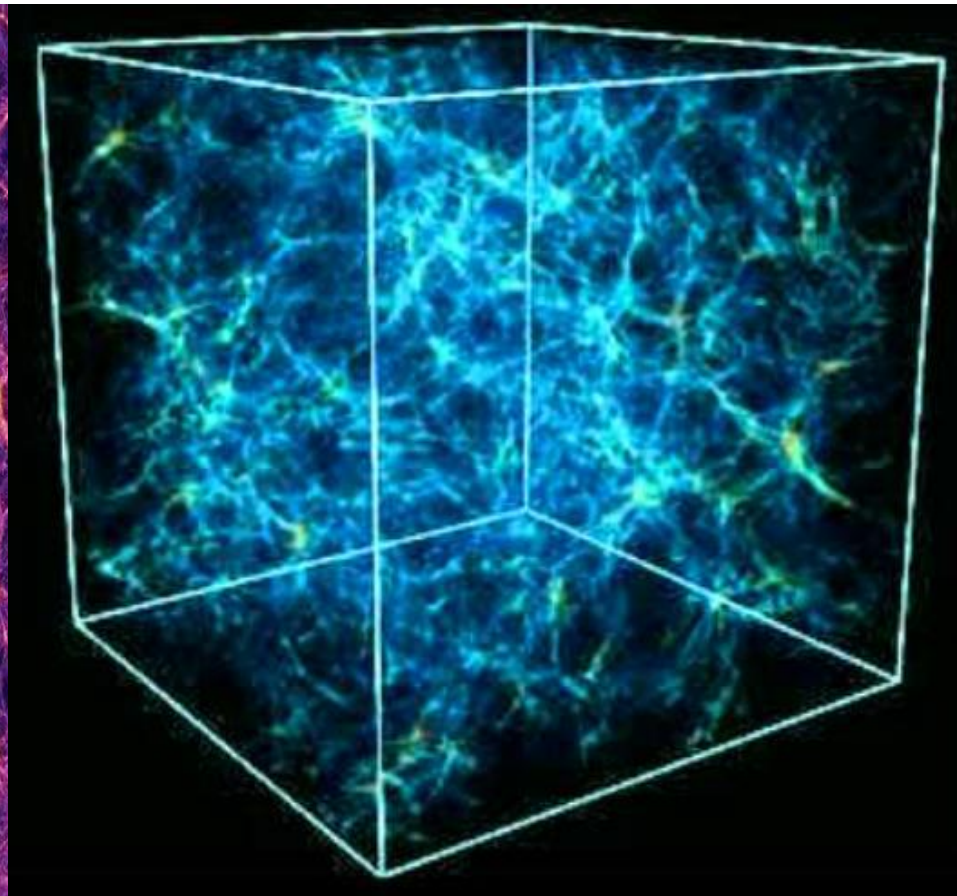
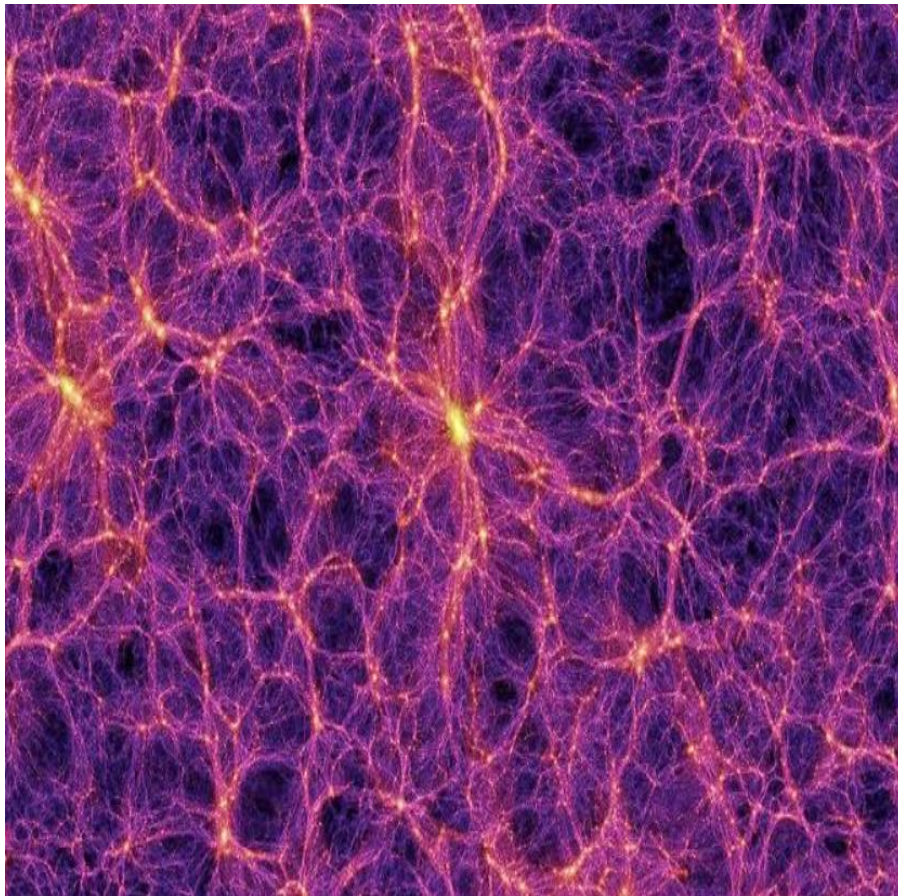
■ Kosmologický princip

vesmír je homogenní a izotropní
krychle o straně 100-500 Mpc
obsahuje cca stejný počet galaxií



Struktura a vývoj vesmíru

Large-scale structure of the Universe



Rozpínání vesmíru

- **Hubbleův vztah (od 2018 Hubbleův-Lemaîtreův zákon)**
rychlost vzdalování galaxií je přímo úměrná jejich vzdálenosti

$$v = Hr$$

- **Hubbleova konstanta: $H = (74,0 \pm 1,4)$ km/s/Mpc**
1929
na základě měření rychlosti vzdalování spirálních galaxií pomocí
měření rudého posuvu spektrálních čar
- **Stáří vesmíru**
dané převrácenou hodnotou Hubbleovy konstanty
 $13,799 \pm 0,021$ miliardy let

Vlastnosti vesmíru

- **Standardní kosmologický model**
rozpínání vesmíru ze singularity nazvané „Big Bang“
- **Planckovy jednotky**

Veličina	Jednotka	Hodnota v SI ^[1]
Planckova délka	$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1,616\,255(18) \times 10^{-35} \text{ m}$
Planckův čas	$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5,391\,247(60) \times 10^{-44} \text{ s}$
Planckova hmotnost	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2,176\,434(24) \times 10^{-8} \text{ kg}$
Planckův náboj	$q_P = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$	$1,875\,546\,037\,78(14) \times 10^{-18} \text{ C}$
Planckova teplota	$T_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}}$	$1,416\,784(16) \times 10^{32} \text{ K}$

Vlastnosti vesmíru

■ Období inflace po BB

nastala 10^{-36} s až 10^{-32} po BB, vesmír se exponenciálně rozpínal
důsledkem je dnešní velká homogenita vesmíru

■ Temná energie

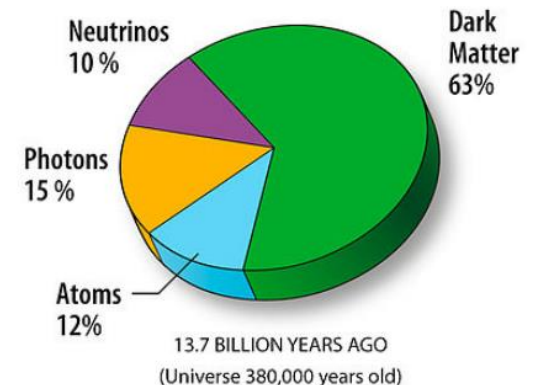
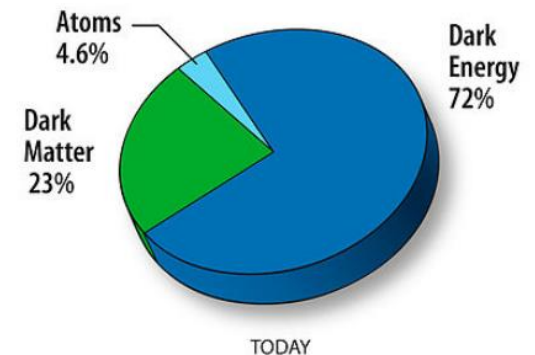
- způsobuje současné zrychlení rozpínání
- objeveno při měření rudého posuvu ve spektrech vzdálených supernov
- podstata neznámá

■ Temná hmota

skrytá hmota působící gravitačně na ostatní objekty
možný vliv na polarizaci reliktního záření
zpomaluje expanzi vesmíru

■ Průměr vesmíru: $8,80 \times 10^{26}$ m

■ Hustota: $9,9 \times 10^{-30}$ g/cm³ – ve 4 m³ 1 atom H₂



Vlastnosti vesmíru

- **Hmota vs. antihmota**
více hmoty než antihmoty –
- **Nulový elektrický náboj** – gravitace má dominantní postavení
- Nemá souhrnnou hybnost či moment hybnosti
- **Časoprostorové kontinuum** – 3 prostorové rozměry, 1 časový prostor se zdá být plochý – Euklidovská geometrie platí s velkou přesností v celém vesmíru
- **4 základní interakce** – gravitační (převládá), elektromagnetická, silná a slabá jaderná (zanedbatelné)
- **Teorie multivesmírů**
oddělená časoprostorová kontinua, která mají odlišné fyzikální zákony, fyzikální konstanty, a možná dokonce i jiný počet dimenzí nebo i odlišnou topologii
- **Topologie** – tvar vesmíru není zatím znám

Antropický princip

■ Antropický princip

hodnoty základních fyzikálních konstant se nacházejí v takových mezích, které umožňují vznik inteligentního života

- hustota hmoty ve vesmíru blízká rovnovážné a omezená hodnota **kosmologické konstanty** (aby se vesmír příliš rychle nerozepjal a neumožnil tak vznik kondenzovaných objektů či naopak nesmrštil v čase, který by nepostačoval ke vzniku života)
- 3 rozvinuté prostorové **dimenze** ve vztahu k úbytku **gravitačních** a **elektrostatických** sil se čtvercem vzdálenosti od zdroje (aby hmota byla schopna tvořit vázané soustavy)
- vyladěný poměr elektromagnetického a gravitačního působení a **Pauliho vylučovací princip** pro fermiony (pro zaručení rozprostraněnosti kondenzovaného stavu hmoty)
- vyladěný poměr hmotností **protonu** a **elektronu** (ve vztahu k velikosti elektromagnetické interakce) a rovnost absolutní hodnoty jejich **nábojů** (pro zajištění stability atomů)
- vyladěný poměr hmotností protonu, **neutronu** a elektronu a poměru silné a elektrostatické interakce (pro zajištění stability nevodíkových jader)
- vyladěný vztah **účinných průřezů jaderných reakcí** pro zachyt protonu a **deuteronu** a **vazebných** a **excitačních** energií lehkých jader (pro vznik **biogenních prvků** po **velkém třesku**) a mnoho dalšího.