

## Vesmír

### Velký třesk (Big Bang)

Spolu s hmotou explodoval také prostor (vesmír měl nulový objem).

Akademik V.L.Ginzburg: „Kdyby bylo možné hovořit o čase před počátkem vesmíru a vesmír by přitom ještě neexistoval, museli bychom připustit stvoření světa. Prostor a čas jsou neoddělitelné od hmoty; proto je nemožnost zavést a používat pojem času před počátkem.“

$\rho \rightarrow \infty$  : fyzikální singularita

[Čas se skládá z hypotetických elementárních intervalů(chromonů) dále nedělitelných.]

Teorie velkého třesku podepřena experimenty (Nob. cena 1978, 1980)

Podle teorie velkého třesku lze vývoj vesmíru rozdělit do následujících etap:

### Hadronová éra

doba trvání - desetitisícina sekundy

(její začátek v čase  $10^{-43}$  s po velkém třesku, její konec  $10^{-4}$  s; vznik hadronů (protony, neutrony,  $\pi$  mezony, hyperonym)

na začátku hadronové éry:

$$\rho_{\text{vesmíru}} = 10^{97} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (miliarda Mléčných drah v jádře H)}$$

$$T_{\text{vesmíru}} = 10^{33} \text{ K}$$

na konci :

$$\rho = 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (hmota Země, krychle } a = 400 \text{ m)}$$

$$T = 10^{12} \text{ K}$$

Částic bylo o něco málo víc než antičástic (přebytek na objekty), částice a antičástice spolu anihilují a ze zbytku později vznikají hvězdy, planety...

### Leptonová éra

její začátek v čase  $10^{-4}$  s

na konci:  $t = 10$  s

$$T = 10^{10} \text{ K}, \rho = 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ [metrák v krabici od zápalek]}$$

převládají leptony (elektrony, pozitrony, miony, neutrina, antineutrina) + fotony ( $\gamma$ )

$$E (\gamma \text{ záření}) > 10^6 \cdot E \text{ (viditelné světlo)}$$

Z leptonové éry zůstala neutrina:

- rychlá, pronikavá, nezachytitelná (něco jako drobný hmyz nezachytitelný žádnou

moskytiérou)

## Éra záření

doba trvání  $10\text{s} - 10^6\text{ let}$

vzájemnou anihilací částic a antičástic vznikají fotony s vysokou energií

Tabulka srovnání energie různých zdrojů elmg. záření:

foton	energie
Vysílač Praha	1
Radar Ondřejov	55
Televize 2. program	$10^3$
Červené světlo	$7 \cdot 10^8$
Fialové světlo	$1,3 \cdot 10^9$
Ultrafialové světlo	$1,6 \cdot 10^9$
Rentgenové záření	$10^{11}$
$\gamma$	Více než $10^{14}$

- vesmír byl ale pro záření neprůhledný – fotony neustále narážejí na příliš nahuštěné částice a energie záření nedovoluje elektronům navázat se na protony a vytvořit atomy vodíku

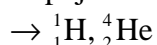
Tabulka srovnání hustoty vesmíru v různém čase:

Čas	Teplota	Hustota
3 min.		$20\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (platina)
18 min.		$1\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (voda)
1 rok		$10^{-3}\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Na konci	3 000 K (žárovka)	$10^{-18}\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

## Éra látky (doba trvání $10^6\text{ let} - 7\text{ miliard let}$ )

hustota látky vesmíru > hustota zářivé energie na počátku z částic atomy

V době, kdy byl vesmír ještě velmi hustý, neutrina zabránila slévání el. a prot. v neutrony. Jejich nedostatek způsobil, že když hustota vesmíru poklesla a prot. a el. měly „dost místa a času“ spojovat se v atomy.



V čase  $10^9\text{ let}$  začínají vznikat galaxie.

Vesmír: na  $1\text{ m}^3 - 10\text{ atomů H}$  (miliardu fotonů a neutrin v  $1\text{ m}^3$  můžeme zanedbat;

$$m_{1\text{ at. H}} = \text{trilión fotonů vid. světla}$$

Neutrino splnila svůj úkol hned na počátku a od té doby nemají co na práci. (lidským tělem projde za 1 s 10 000 bilionů neutrin)

Existence látky je důsledkem asymetrie vesmíru, na poč. připadlo na  $10^6$  antičástic ( $10^6 + 1$ )

částic.

## Důkazy velkého třesku

### - objev reliktního záření

Objev (spíše náhodný) inženýrů Bellových laboratoří v USA: Hledali pásmo, kde šum pozadí nejméně ruší radiové spojení, teoreticky by se pásmo mělo nacházet na centimetrových vlnách (existuje jen málo zdrojů na Zemi, které tyto vlny vysílají), ale v reálu naměřili nečekaně velký šum. Hledala se chyba v konstrukci zařízení – nenašla se  $\Rightarrow$  šum přichází z vesmíru, ze všech stran stejně. Několik kilometrů od Bell. Labor. (v New Jersey) skupina profesora Dickeho toto záření také hledala.

### Reliktové (pozůstatkové) záření:

(Kdyby obě skupiny četly literaturu (odbornou), věděly by, že slavný fyzik G.Gamow r. 1948 počítal minulost vesmíru a dospěl k závěru, že vesmír musí být vyplněn spojitým a velmi chladným rádiovým zářením (reliktovým), které je pozůstatkem po velkém třesku - přesněji po éře záření.)

### - četnost původních prvků

Použitím modelu velkého třesku je možné vypočítat koncentraci helia-4, helia-3, deuteria a lithia-7 ve vesmíru. Předpovězená poměrná množství jsou přibližně 0,25 pro  ${}^4\text{He}$  ku H,  $10^{-3}$  pro  ${}^2\text{H}$  ku H,  $10^{-4}$  pro  ${}^3\text{He}$  ku H a  $10^{-9}$   ${}^7\text{Li}$  ku H. Měření původní četnosti všech čtyřech izotopů se shodují s těmito předpovězenými hodnotami. Tato shoda je silným důkazem pro teorii velkého třesku, protože je to jediné nám známé vysvětlení pro tyto koncentrace.

### - vývoj a rozložení galaxií

Podrobná pozorování stavby a rozložení galaxií a kvasarů také poskytují silný důkaz pro teorii velkého třesku. Kombinace pozorování a teorie napovídají, že první kvasary a galaxie se vytvořily asi miliardu let po velkém třesku a od té doby se vyvinuly i větší struktury jako kupy a nadkupy galaxií. Hvězdné populace stárly a vyvíjely se, takže vzdálené galaxie, které pozorujeme takové, jaké byly v raném vesmíru, vypadají značně odlišně než galaxie blízké. Navíc galaxie, které se vytvořily relativně nedávno, se zřetelně liší od galaxií v podobných vzdálenostech, které se ale vytvořily krátce po velkém třesku. Velké struktury dobře souhlasí se simulacemi velkého třesku a tvoření struktur ve vesmíru a pomáhají doplnit detaily teorie.

## Lidová analogie fotonů a cukru:

### - kvantová energie

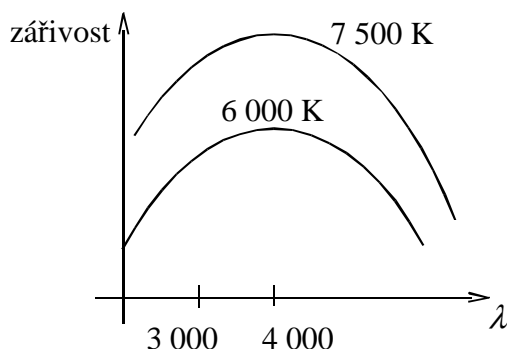
dlouhovlnné rádiové záření	- práškový cukr (sype se spojitě)
optické záření	- krystalový cukr (nedělitelné)
rtg. záření	- kostkový cukr (nedělitelný)

- Stef. - Boltzanův zákon: celk. záření energie  $\sim T^4$

- Detektory poznají druh energie kvant (analogie cukru-sítka).

- Tvar křivky záleží na teplotě:

„Každé nebeské těleso má přidělen pytel cukru na jednotku svého povrchu. Čím je těleso teplejší, tím je pytel větší a těžší (jeho  $G \sim T^4$ ), V pytli je smíchán práškový, krystalový a kostkový cukr podle Planckova zákona. Teplá tělesa mají pytle naplněné převážně kostkami, chladnější mají málo kostek, ale hodně krystalu a nejchladnější mají práškový cukr. Podle sypajícího se cukru určíme  $T$ . Velká tělesa - víc pytlů. Z blízkých těles jde k nám více cukru.“



„Ať je objekt blízko nebo daleko, podle křivky určíme vždy  $T$ .“

Neexistuje detektor, jenž by dokázal přijímat záření všech  $\lambda$ , detektory musíme vynášet do velkých výšek nad zemský povrch – pozemská atmosféra zčásti nebo úplně pohlcuje záření většiny  $\lambda$ . Zemská atmosféra průhledná pro rádiové vlny 1 mm – 10 m, pro blízké infračervené a optické záření od 300 nm – 20  $\mu$ m.

Za vše, co dnes víme o vesmíru, vdčíme neúnavným poslům - fotonům, jež se mezní rychlostí  $c$  řítí kosmickým prostorem.

Detektory záření:

oko	$d = 8$ mm	
dalekohled + oko	čočk. $d = 1,02$ m	16 000× více fotonů než oko
	reflektor. $d = 6$ m	$0,5 \cdot 10^6$ × více
fotografie	střádá fotony pro delší dobu (stále však 999 fotonů z tisíce se pohltí v emulsi bez prozrazení)	
moderní fotonásobiče	zachytí 50 – 300 fotonů z tisíce	
snímací elektronky	zachytí 900 fotonů z tisíce	

Jednotky vzdálenosti ve vesmíru:

1AU – střední vzdálenost Země od Slunce ( $1,49597892 \times 10^{11}$  m)

parsek (pc) – 31 bilionů km ( $31 \cdot 10^{12}$  km)

( $\doteq 3\frac{1}{4}$  světelného roku)

# FYZIKA – 4. ROČNÍK

Jeden parsek je vzdálenost, z níž má 1 astronomická jednotka (1 AU) úhlový rozměr jedné vteřiny.

Světelný rok – vzdálenost, kterou urazí světlo za 1 rok ( $9,5 \cdot 10^{12}$  km)

## Rádiová mapa oblohy

- průzkum rádiové oblohy v pásmu centimetrových až metrových vln (radioteleskopy a princip aperturní syntézy: Martin Ryle-Cambridge – Nob. cena 1974)
- sestavení katalogu radiových zdrojů a konfrontace s optickými obrazy nebeských těles

## Spektrum - kosmický průkaz totožnosti

- = „barevně“ rozložený úsek optického záření
- hnanolové, mřížkové, absorpční, emisní spektrum

Dopplerův jev – spektrum vyzařujícího objektu se mění v závislosti na rychlosti objektu

- objekt se přibližuje → posun spektra ke kratším  $\lambda$  (tzv. modrý posun)
- objekt se vzdaluje → posun spektra k delším  $\lambda$  (tzv. rudý posun)

Ze spektra můžeme určit teplotu, rychlost objektu.

## **Kvasary**

- vesmírná tělesa s výrazným rudým posuvem spektra a mimořádně velkým zářivým výkonem emitující záření všech vlnových délek

[Jelikož se prosadily rádiovým zářením, začalo se jim říkat kvazistelární (jakoby hvězdné) rádiové zdroje – kvasary]

## Objev kvasarů

kvasar 3C-48: Ve spektru byly emisní čáry, které neodpovídaly žádným známým prvkům.

R. 1962 objev kvasaru 3C-273

I ve spektru kvasaru 3C-273 se vyskytovaly pouze jasné emisní čáry, a jejich polohy zase nesouhlasily s polohami čar chem. prvků ani s polohami čar ve spektru 3C-48 (r. 1963-Maarten Schmidt-holand'an)

Vysvětlení: spektrum vodíku posunuté o 60-80 nm (do té doby maximálně 0,5 nm)

Vypočítané rychlosti vzdalování kvasarů:

$$\begin{aligned} 3C-273 & \dots 47\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \left( \frac{1}{6} c \right) \\ 3C-48 & \dots 100\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \left( \frac{1}{3} c \right) \end{aligned}$$

Jasnost 3C-273 dovolila pátrat v archívech  $\Rightarrow$  3C-273 mění nepravidelně svou jasnost, a to během měsíců  $\Rightarrow$  rozměry  $\sim 0,1$  pc

Takhle velké  $v$  mohou mít jen objekty ve vzdálených částech vesmíru - rozpínání

E.Hubble-1929, Hubbleovo pravidlo: vzdálenost tělesa je přímo úměrná rychlosti vzdalování  
3C-273 ... 500 milionů Parseků  
1,6 miliardy světelných let  
3C-48 ...  $1\,200 \cdot 10^6$  pc  
 $3,8 \cdot 10^9$  světelných let

Jasnost kvasaru ~ 100 bilionů sluncí

Nejvzdálenější kvasary  $12 - 16 \cdot 10^9$  světelných let  
 $v = 270\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$   
Jen reliktové záření je starší než kvasary.

Rudý posuv kvasarů – všechny se od nás vzdalují

## Energie kvasarů

velké množství energie v malém objektu (~ 0,1 pc)

Možnosti původu energie kvasarů:

- termonukleární reakce  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{He}$   
nesmysl
- anihilace částic s antičásticemi  
vyloučeno (ve vesmíru nedostatek antičástic + nepozorováno  $\gamma$  záření)
- podstatou kvasaru by mohla být supermasivní černá díra v centru vzdálené galaxie, přičemž září do ní padající hmota. Není zatím znám žádný jiný mechanismus, který by měl tak velký zářivý výkon s tak rychlými změnami, jako mají kvasary.

Kvasary – velmi vzdálené objekty  $\Rightarrow$  přinášejí informace o dávné minulosti vesmíru

## **Galaxie**

Kvasary samy vznikají v kolébce vystlané plynem a prachem. Když se pak dále vyvinou, počnou do okolního prostoru vracet hmotu, kterou si předtím z kosmického okolí díky vlastní gravitaci „vypůjčily“. Rozpínající se látka se sráží se zbytky v okolí kvasaru a to vede k rázovým vlnám. Kosmické rázové vlny mají impozantní důsledky. Nadzvukové srážky rozsáhlých plynných oblaků vedou k novým kondenzacím velice hustých těles. Hypotetické zárodky budoucích hvězdných soustav (galaxií) nazýváme někdy protogalaxie (prvotní galaxie).

## Radiogalaxie

Ještě předtím než radioastronomové objevili kvasary, detekovali celou řadu podvojných radiových zdrojů, o nichž se brzo dokázalo, že to jsou vzdálené galaxie. Radiové záření, které mají jaksí navíc, ukazuje, že soustavy jsou dosud ve stadiu bouřlivého vývoje. Celková vyzářená energie je nižší než u kvasarů. Opticky je radiogalaxie nenápadný svítící útvar, vůči němu se souměrně nalézají dvě oblaka elektricky nabitých urychlených částic-zdroje rádiového záření. (oblaka se vzdalují  $v \rightarrow c$ )

## Vznik galaxií

S hypotézou, že z malých kompaktních jader vznikají celé hvězdné soustavy-galaxie, přišel roku 1961 sov. Astrofyzik V.A. Ambarcumjan. Tehdy to byla velmi odvážná domněnka, neboť až do té doby se soudilo, že galaxie vznikají postupným smršťováním obrovských mezihvězdných mračen prachu a plynu. [Jádro galaxie zabírá jednu desetitisícinu průměru-biliontinu objemu]

Galaxií je nespočetně mnoho.

Mezi galaxiemi jsou takové rozdíly ve velikostech, tvarech i svítivosti, že je skoro nemožné přisoudit jim všem stejný způsob vzniku a vývoje. Víme však dnes bezpečně, že galaxie se soustřeďují do galaktických kup (hnízd). Ty se skládají až z několika tisíců galaxií.

Nejnámější jsou kupy v souhvězdí Panny (vzdál. 15 Mpc) a v souhvězdí Vlasu Bereniky (vzdál. 130 Mpc). Předpokládá se, že kupy tvoří soustavy ještě vyššího řádu (supergalaxie).

## Vzdálenosti galaxií

Víme-li, že stejně svítivé hvězdy se jeví zdánlivě v poměru jasností 1 : 100, pak to značí, že slabší hvězda je 10× dále.

Ze spektra zjistíme svítivost a porovnáme s objekty stejné svítivosti a známé vzdálenosti.

## Typy galaxií

$d \doteq 30 - 40$  kpc

uvnitř jádro  $d_j \doteq 10$  pc

Tuctová galaxie je podobná silně zploštělému disku, v rovině souměrnosti disku je plyn a prach.

Spirální galaxie *S* (Mléčná dráha)

(označení *Sa*, *Sb*, *Sc* podle bohatosti spirální struktury)

Spirální galaxie s příčkou *Sb*

(spojnice mezi rameny má tvar úsečky)

Eliptické galaxie *E*

(podle stupně zploštění 0 – 7 → více)

Nepravidelné (iregulární) galaxie *Irr*

I spektra galaxií vykazují rudý posuv.

Platí Hubbleův vztah:

$$v = c \cdot z \quad z \dots \text{rudý posuv, } v - \text{ rychlost galaxie}$$

$$D = \frac{v}{H_0} \quad D \dots \text{vzdálenost galaxie}$$

$H_0 \dots$  Hubbleova konst.

$$t = \frac{1}{H_0} \quad \text{vznik vesmíru}$$

Dnes  $H_0 = 78 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

$t \doteq 13$  mld. let

Nejbližší galaxie: Malé a Velké Magellanovo mračno (~ 65 kpc)

Hmotnosti:

Mléčná dráha	220 mld. Sluncí (nové údaje: $4,4 \cdot 10^{11}$ Sluncí)
Malé Magell. mračno	300 milionů Sluncí
Velké Magell. mračno	2 mld. Sluncí

## Mléčná dráha

Jeden z hlavních členů místní soustavy galaxií (asi 25 členů v kouli  $r = 3$  Mpc =  $10^7$  světelných let)

Domníváme se, že se Ml. dráha začala utvářet asi před 12 mld. let a podílelo se na tom především aktivní jádro, připomínající kvasar.

Dnešní průměr: 30 kpc (100 000 sv. let)

Představa: rozkrojená žemle namazaná máslem

- kde je houska-hvězdy a průhledný prostor

- kde je máslo-jsou hvězdy, ale i hustá mezihvězdná mračna

Ve vrstvě másla je Slunce-od jádra 10 kpc

Všemi dostupnými astronomickými metodami „vidíme“ pouhé 1 % množství hmoty v pozorované části vesmíru.

Souhvězdí - vlastně neexistují, jen pojmenovávací význam

Jádro galaxie

Slunce obíhá kolem centra galaxie  $v = 290 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

1 galakt. oběh-210 milionů let

stáří Galaxie 10-16 mld. let

Jádro – hustá pecka  $m = 3 \cdot 10^6 M_{\text{Sl.}}$

$d = 3 \text{ pc}$

největší hustota v Galaxii

Celá oblast jádra galaxie má  $d = 1,2 \text{ kpc}$  a hmotnost  $20 \cdot 10^9 M_{\text{Sl.}}$ . Odtud stále proudí H plyn do jakéhosi prstence. Jádro tak ročně ztrácí asi jednu sluneční hmotu. To znamená, že za několik mil. let by se pecka i její okolí měly rozplynout. Pecka i jádro však trvají po dobu existence galaxie. Odněkud musí tedy hmota přitékat, nikdo neví jak.

Speciální struktura Mléčné dráhy

Dokázána zkoumáním rozložení nejhojnějšího prvku vesmíru H-na vlně 21 cm.

Průběh rotace komplikovaný - v okolí jádra jako gramofonové LP, vzdálenější hvězdy jako planety kolem Slunce

$v_{\text{Sl.}} = 290 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

Mezihvězdná látka

nejvýznamnější H, není rozložen rovnoměrně-vodíková mračna



Temná mračna obsahují ještě grafitová nebo křemičitá zrníčka-nesnadný výzkum-nezáří

Zářící difúzní mlhoviny-ozařovány UV zářením a samy (druhotně) září ve viditelné oblasti.

Mezihvězdná látka v galaxii se skládá jednak z původního materiálu, z něhož se g. vytvořila, a jednak z látky, která prošla složitými přeměnami uvnitř hvězd, které ji pak znovu vrátily do mezihvězdného prostoru. (1. – H, He / 2. chemicky složitější látka).

R. 1963 na vlně 18 cm se našly čáry příslušné mezihvězdnému hydroxyly OH-měly mnohem větší intenzitu než se čekalo-vznikly na principu maseru (masery se liší od laserů délkou vlny)

[Astronomové vážali, zda existence hydroxylových maserů nemají přičíst činnosti vyspělých kosmických civilizací, zeleným mužíčkům]

Další objevy:

r. 1968-molekuly čpavku, vodní páry ( $\lambda = 13, 14$  mm)

r. 1969-první org. molekula, formaldehyd

r. 1970-metylalkohol (10 a 3 mm)

kyselina mravenčí (18 cm)

r. 1974-metylamin na vlně 3,5 a 4,1 mm(metylamin a kyselina mravenčí mohou vytvářet aminokyselinu glycin-aminokyseliny, zákl. kameny bílkovin)

## Osudy hvězd

Vznik hvězd je spjat s existencí mezihvězdného prachu a plynu. Prachoplynné mračno se postupně smršťuje, houstne a tak vytváří hvězdný zárodek - protohvězdu.

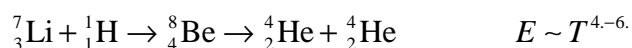
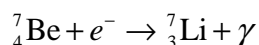
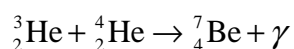
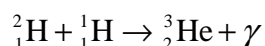
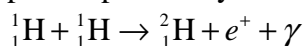
### Protohvězdy

Smršťující se protohvězda přeměňuje svou značnou gravitační energii zvolna na záření, pozorovatelné v infračerveném oboru. Vývoj protohvězdy určuje skoro výlučně gravitace. Během několika set tisíc (nanejvýš milion let) gravitační smršťování končí a vzniká hvězda. Zvyšující se tlak a teplota způsobí, že v jádru začnou probíhat termonukleární reakce.

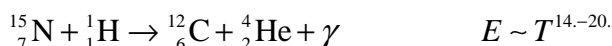
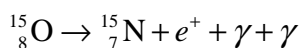
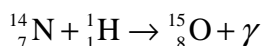
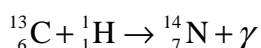
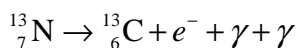
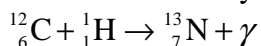
### Termonukleární reakce

K zapálení zapotřebí  $T > 10^6$  K ( $\sim 10^7$  K)

1) proton-protonový řetězec



2) uhlíko – dusíko - kyslíkový cyklus



Záření, jež hvězda vysílá, je po astronomicky dlouhou dobu poměrně konstantní, ve hvězdě, se vytvoří ustálená rovnováha, při níž se sice vnější vrstvy plynné hvězdy snaží gravitačně smršťovat, ale proti této snaze působí tlak plynu a tlak záření.

Jakmile se hvězda rozzáří termonukleární reakcí, vypaří se a zčásti i „odfoukne“ tlakem záření prachový závoj, který obklopoval protohvězdu (odhalení).

Etapy: Zákl. etapa-spalování H na He trvá

déle pro méně hmotné hvězdy

$m = 1 \text{ Sl.}$       9 mld. let

$m = 2 \text{ Sl.}$       1 mld. let

$m = 5 \text{ Sl.}$       65 mil. let

$m = 15 \text{ Sl.}$      10 mil. let

1) spalování H  $\rightarrow$  He v jádře - přenos prouděním

horké plazmy (konvekci-promícháváním)

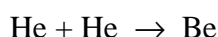
2) celkové smršťování-hvězda H nešetří,

čím více ubývá, tím rychleji ho spaluje

3) později spalování také H ve slupce - část energie na rozpínání, klesá svítivost

4) červený obr – vodík přeměněn v jádře na helium a H se spaluje jen ve slupce – rozpínání hvězdy

6) zapálení a hoření He



smršťování obalu-roste svítivost

7) reakce při níž vznikají těžší prvky a uvolňuje se E

Hvězdy na odpočinku

a) Hvězdy o počáteční  $m = 8 \text{ Sl.}$

- gravitace převáží nad ostatními druhy sil, hvězda se rychle hroutí, povrch padá

volným pádem do středu a gravitace roste nade všechny meze

- podle OTR dojde k zakřivení prostoru v okolí kroučící se hvězdy

- prostor se uzavře ve vzdálenosti poloměru (tzv. Schwarzschildův poloměr)

$\sim 10 \text{ km}$

$\rightarrow$  černá díra

(objekt blíže středu než hodnota Schwarzschildova poloměru – objekt je pohlcen)

černou dírou)  
- černá díra nepropustí ani záření  
„Takto důmyslně uklízí příroda staré železo.“

b) Hvězdy o  $m_{\text{poč.}} = 3 - 8 \text{ Sl.}$

- prudké hroucení vede k rázové vlně, a tím k opětné explozi hvězdného nitra-výbuch supernovy (hvězda září jako celá galaxie)  $\Rightarrow$  neutronová hvězda ( $r = 10 - 50 \text{ km}$ ,  
 $\rho = \text{trilión kg/m}^3$ )

c) Hvězda  $m < 3 \text{ Sl.}$

- krystalická mříž – degenerovaný elektronový plyn-jeho tlak zastaví gravitační kolaps ( $\rho_{\text{plynu}} = 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
- bílý trpaslík povrchová  $T = 10\,000 \text{ K}$   
postupem doby vychladne  
- nejčastější konec hvězdy

## Vývoj hvězdy slunečního typu

Ze zkušenosti v prachoplynné mlhovině vzniká hvězdný zárodek-rozměrný kulový útvar o poměrně nízké teplotě, svítící převážně v IČ oblasti spektra. Protohvězda se rychle smršťuje a záhy z ní vzniká hvězda

- kulové těleso o  $r \sim 1\,000\,000 \text{ km}$  a  $T_{\text{povrch}} = 5\,000 \text{ K}$ .

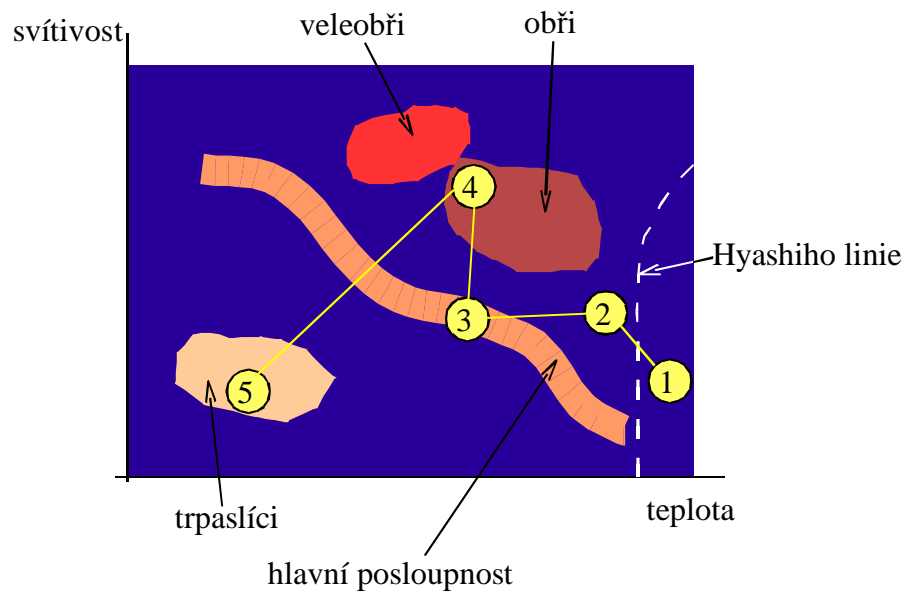
Po 10 mld. let se neděje nic zvláštního. Po té se začne zvětšovat a  $T_{\text{povrch}}$  klesá (celková svítivost však prudce roste)  $\rightarrow$  červený obr ( $\sim 100 \cdot 10^6 \text{ let}$ ). Rozsáhlá atmosféra červ. obra se oddělí od jádra a rozplyne se. Jádro ( $r \sim 10 \cdot 10^3 \text{ km}$ ,  $\rho = 10^6 \cdot \rho \text{ vody}$ )  $\rightarrow$  bílý trpaslík  $\rightarrow$  černý trpaslík

## Zkoumání hvězd

- vlastně jen okamžitý snímek, kdy jsme prostě přistihli jednotlivé hvězdy v různě pokročilých vývojových stádiích
  - nejvíce hvězd zachytíme ve fázích, jež trvají nejdéle (průzkum dopravního podniku: zaměstnanci, důchodci, studenti, děti a výběrová pravidla  $4^{30}$ ,  $7^{40}$ ,  $10^{00}$ ,  $15^{30}$ )
- pozorujeme jen povrch, hvězdnou atmosféru

## Hertzsprungův - Russellův diagram

- ukazuje závislost svítivosti na teplotě



Toto je nejslavnější diagram astronomie ↑ .