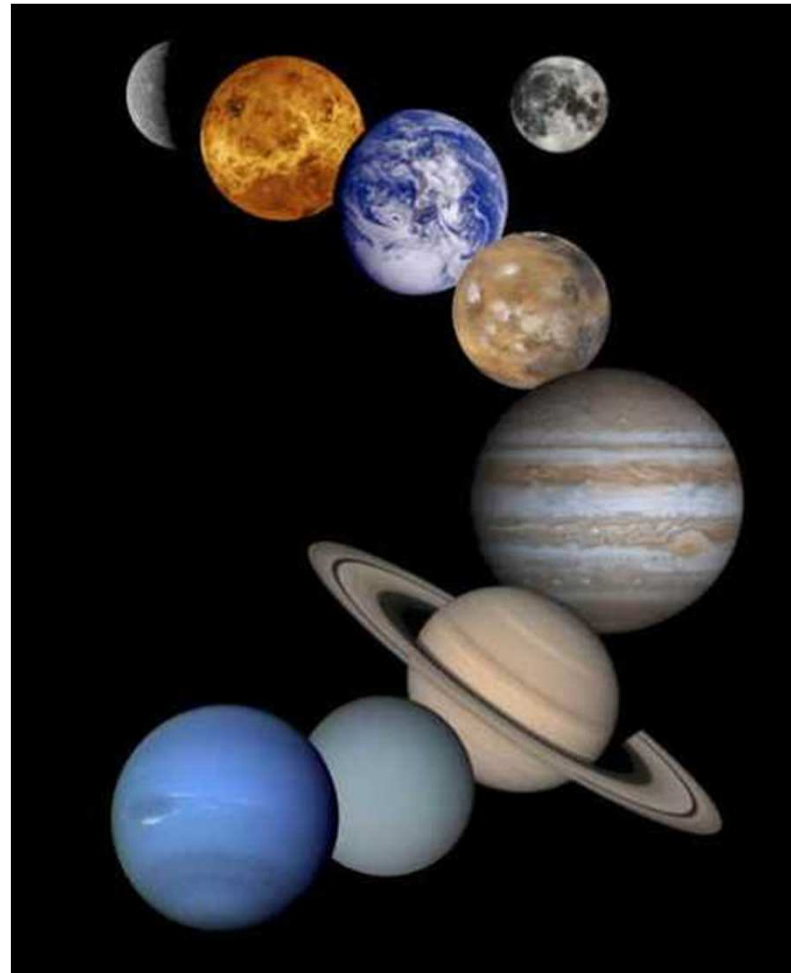


Geochemie endogenních procesů – 2. část

# Kosmochemie 1

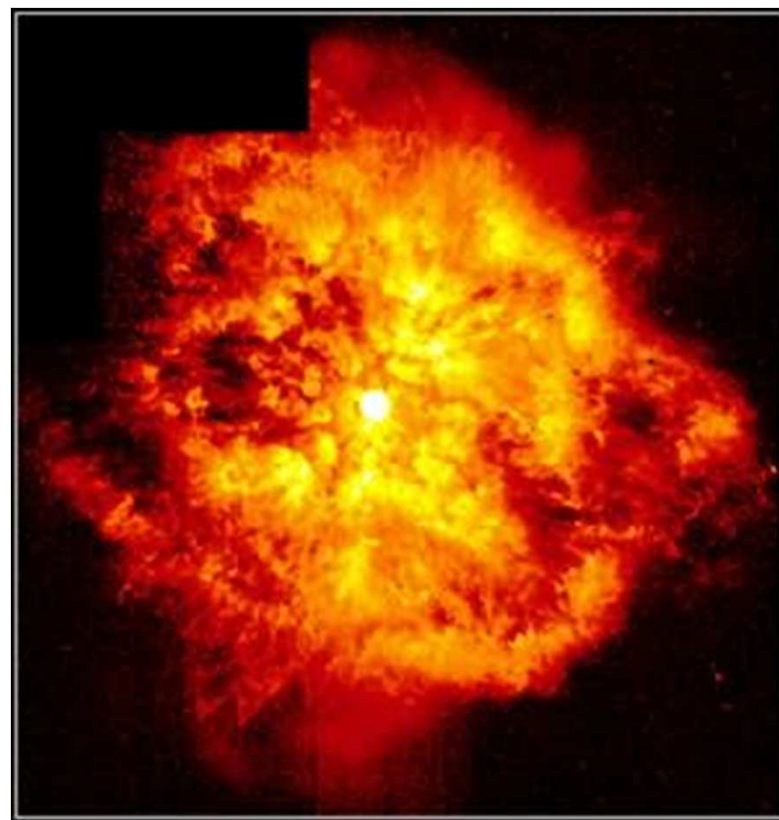
# Kosmochemie

- proč má Země složení takové jaké má ? → studium distribuce a zastoupení prvků ve Sluneční soustavě = kosmochemie
- přes svou jedinečnost má Země podobné složení jako Mars, Venuše, Merkur a Měsíc



# Vytvoření Vesmíru

- 14 Ga zrození Vesmíru ve velmi žhavém, hustém stavu, ale smrštěném stavu - „Velký třesk“
- následně dochází k expanzi, ochlazení a vývoji (studium červeného posuvu, reliktního záření a četnost lehkých prvků)
- následné fáze vývoje vesmíru po "velkém třesku" můžeme rozdělit na 4 význačné etapy



# 1. Hadronová éra

- trvání jen tisícinu vteřiny, hmota byla tvořena především směsicí neustále vznikajících těžkých částic (elementární částice HADRONY - proton, neutron, pion, hyperon) hustota hmoty ve vesmíru –  $10^9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- teplota – 1000 kvintilionů K
- částice x antičástice 1:1 kdyby tento poměr zůstal zachovaný, byla by hmota ve vesmíru jen ve formě zářivé energie → **ale převládly částice**
- postupně rozpad hyperonů na protony a neutrony i lehčí částice (hustota -  $10^{17} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a teplota biliony K)
- konec hadronové éry: anihilace převážné většiny protonů a neutronů s antiprotony a antineutrony a rozpad nestabilních pionů na leptony

ve vesmíru se objevily → fotony a lehké elementární částice

## 2. Leptonová éra

- trvání asi 10 vteřin
- úbytek neutronů v důsledku tvorby protonů, pokles teploty, neutrony se slučují na stabilní jádra hélia
- lehčí elementární částice (elektron x pozitron, mion, neutrino)
- hustota hmoty ve vesmíru –  $10^{-7}$  kg.m<sup>-3</sup>
- teplota – 10 mld. K
- kromě leptonů poletovaly tehdy vesmírem vysoce energetické fotony (paprsky gama)
- pozůstatky z leptonové éry → neutrina

# 3. Éra záření

- trvání ~ 300 000 let, anihilací většiny pozitronů s elektrony vzniká vysokoenergetické elektromagnetické záření, které zpočátku neumožňuje vznik atomů → elektrony jsou okamžitě zářením vyráženy
- rozpínání vesmíru → snižování  $T$  a hustoty zářivé hmoty
- na počátku éry [ **hustota záření > hustota látky** ]
- konec éry záření → hustota záření, tj. množství zářivé energie v  $\text{m}^3$ , byla nižší než hustota látky (protonů, elektronů a neutronů)

# 4. Éra látky

- při poklesu teploty pod asi 3000 K → energie fotonů již není schopna ionizovat atomy H a He → vazba elektronů s protony a  $\alpha$ -částicemi → vzniká plynný H a He → oddělení záření od látky
- **hustota zářivé energie < hustota látky**
- v době, kdy byl vesmír ještě velmi hustý, **neutrino** zabránila reakci elektronů a protonů na neutrony → nedostatek neutronů → zabránění vzniku jader těžších prvků → převážná část hmoty vesmíru je tvořena nejjednoduššími prvky – H (~70%) a He (~30%)
- **kde tedy vznikly těžké prvky ??????**

# Hvězdy I

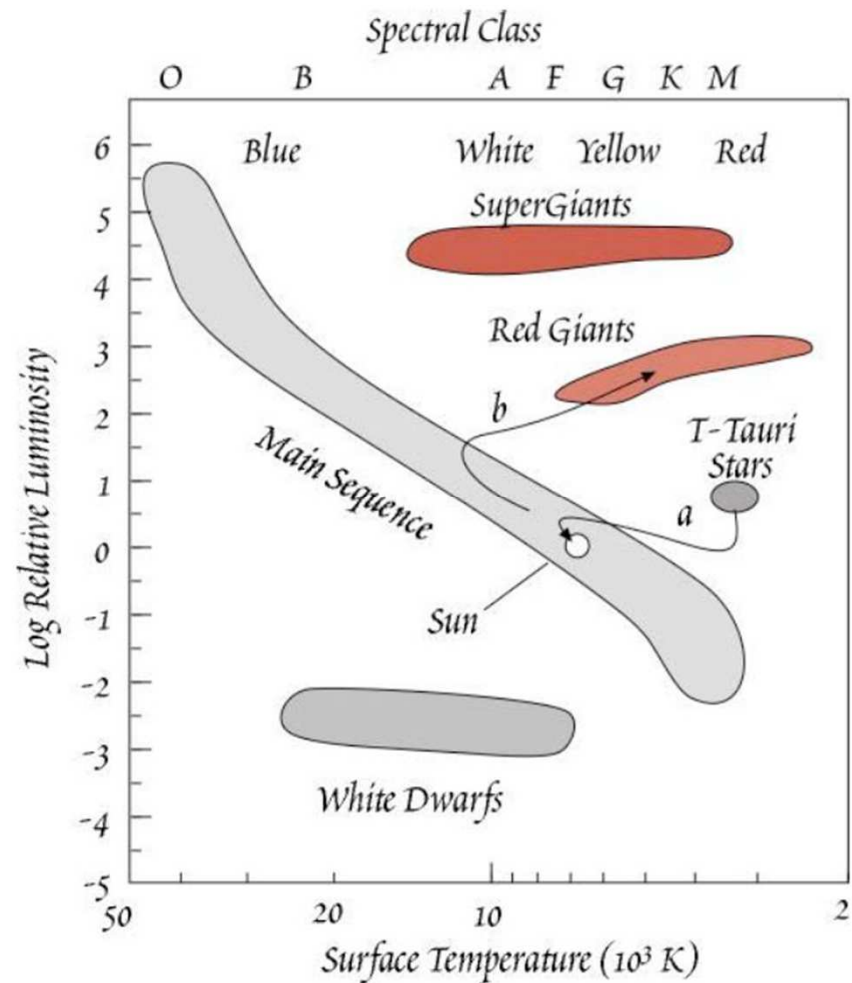
- termonukleární reakce v jádru  
→ vytvořená energie  
vyrovnává gravitační síly →  
zabránění kolapsu
- obrovský rozdíl mezi T v jádru  
(např. 14 000 000 K) a na  
povrchu (5000 K)
- základní klasifikace na  
základě barvy (T, spektrální  
absorpční čáry) → **O, B, F, G**  
**(Slunce), K, M** (↑T)
- 2 skupiny
  - **Skupina I** - mladší, více  
těžkých prvků, na hlavním  
prstenci galaxie
  - **Skupina II** - starší, na okraji  
galaxií





# Hvězdy II

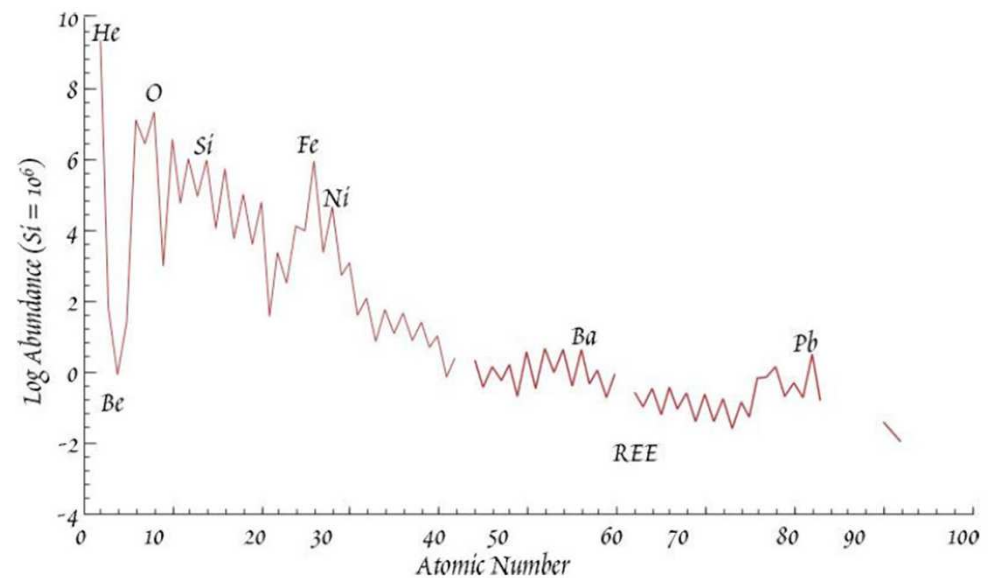
- 90 % hvězd v poli hlavní posloupnosti (horké hvězdy mají vysokou energii), energie procesem  $H \rightarrow He$
- **red giant** – oddělené H vrstvy (znovuzapalování hvězdy v důsledku postupného kolapsu)
- **white dwarf** – fáze po „red giant“ pokud je hvězda malá, pokud je velká → exploze supernovy



White (2001)

# Nukleosyntéza


- nukleosyntéza = proces vytváření chemických prvků
- poznatky ze studia složení meteoritů a hvězd, jaderné experimenty
- prvky se vytvořily při „Velkém třesku“ nebo při následných procesech?




White (2001)

# Nukleosyntéza II

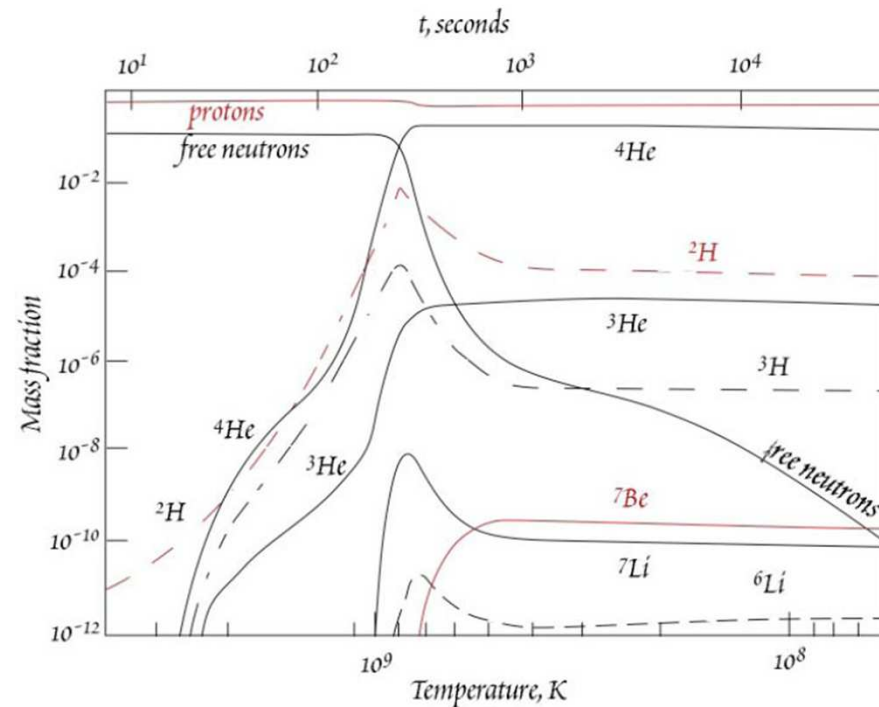
- hvězdy **skupiny II** jsou mnohem chudší těžkými prvky → většina těžkých prvků vznikla během posledních 10 Ga
- velké rozdíly v obsazích prvků (např. Fe, C, N, O) mezi jednotlivými galaxiemi

 **H a He (H/He poměr) se vytvořily při „Velké třesku“**

 **prvky těžší než Li vznikly pozdějšími procesy**

# Kosmologická nukleosyntéza

- prvotní nukleosyntéza těsně po „Velkém třesku“ → vytváření protonů a neutronů → při dalším ochlazování začínaly převládat protony
- při ochlazení na  $10^9$  K →  $^1\text{H} + ^1\text{n} \rightarrow ^2\text{He} + \gamma$
- následné reakce na  $^3\text{H}$ ,  $^3,4\text{He}$  a  $^7\text{Li}$  (reakcí  $^7\text{Be} + e^-$ )
- po 20 min byl již Vesmír tak studený ( $3 \cdot 10^8$  K) → konec termonukleárních reakcí



White (2001)

# Nukleosyntéza (CNO cyklus)

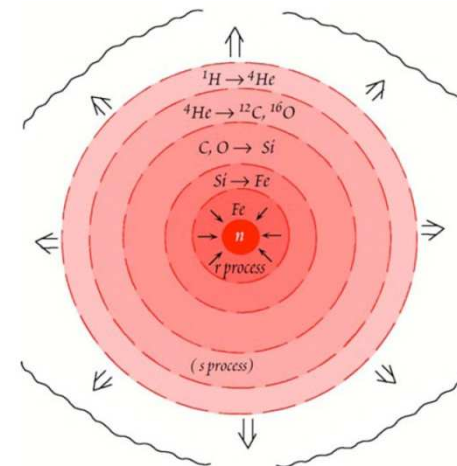
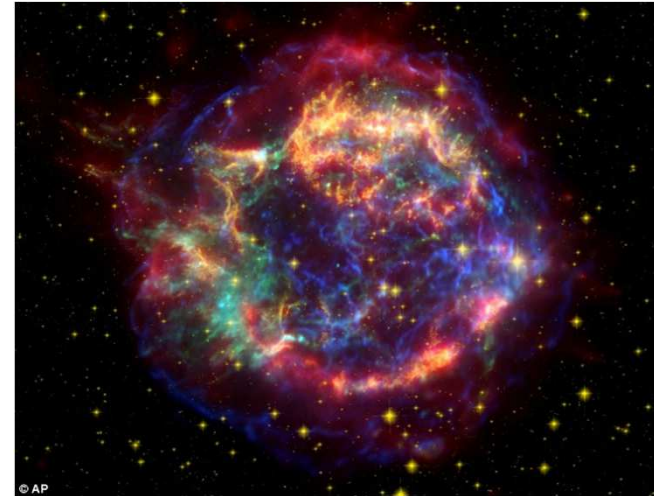
- vytvoření protogalaxií 0.5 Ga po „Velkém třesku“
- spalování H na He uvnitř hvězd, pokud je přítomen  $^{12,13}\text{C}$  → vytvoření  $^{13,14,15}\text{N}$  a  $^{15}\text{O}$
- po spálení H začíná reakce  $^4\text{He}+^4\text{He} \rightarrow ^8\text{Be}$  a  $^8\text{Be}+^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$  (pouze u velkých hvězd)
- následně vznikají prvky Ne, Si, Mg, Na, Al, P, S a K

# Nukleosyntéza – e-proces

- proces spalování  $^{28}\text{Si}$ 
  - $^{28}\text{Si} + \gamma \rightleftharpoons ^{24}\text{Ne} + ^4\text{He}$
  - $^{28}\text{Si} + ^4\text{He} \rightleftharpoons ^{32}\text{S} + \gamma$
  - $^{32}\text{S} + ^4\text{He} \rightleftharpoons ^{36}\text{Ar} + \gamma$
- rovněž vytvoření hmot 40, 44, 48, 52 a 56
- prvky skupiny Fe (Fe-Co-Ni) vznikají rovněž e-procesem při explozi Supernovy Typu I
- konec posloupnosti termonukleárních reakcí  
→ proto je  $^{56}\text{Fe}$  velmi častý izotop

# Exploze Supernovy

- při postupu exotermických reakcí na úroveň kdy je většina jadra hvězdy přeměněna na Fe → porušení rovnováhy mezi expanzí a gravitací → exploze
- obrovské množství volných neutronů



# Nukleosyntéza – s-proces

- pomalý neutronový záchyt
- možný pouze v prostředí bohatém na neutrony → kolaps velkých hvězd (fáze „red giant“)
- prvky s hmotovým číslem od 60 do 210 → max.  $n + p = 209$  ( $^{209}\text{Bi}$ )
- vytvoření nuklidů chudých na neutrony



# Nukleosyntéza – r-proces

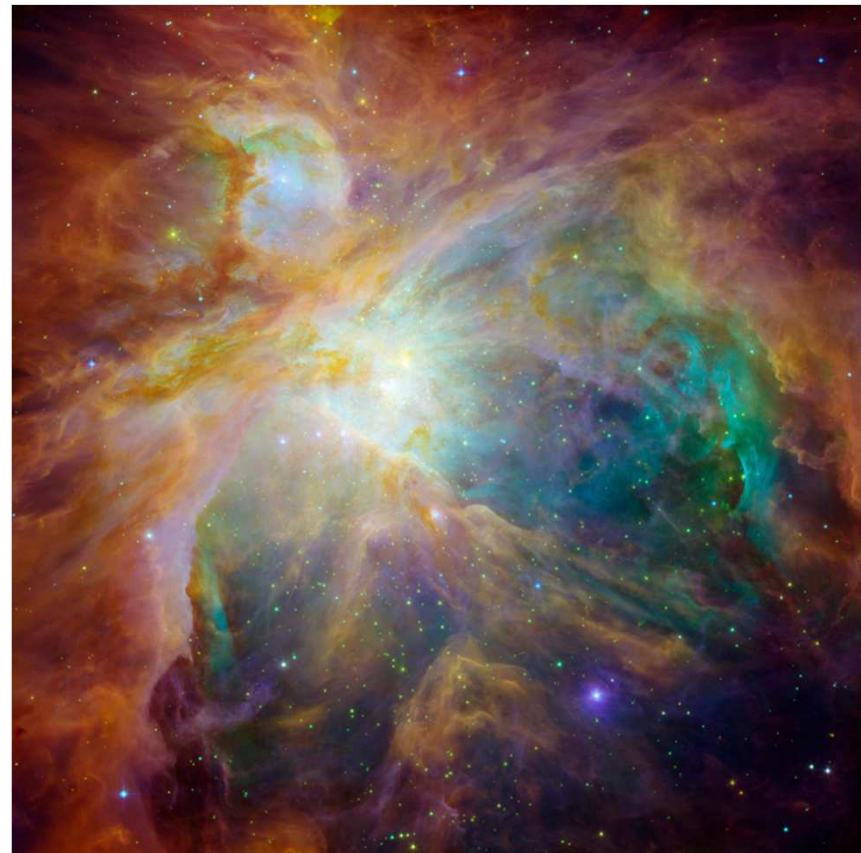
- rychlý záchyt neutronů v prostředí bohatém na neutrony (po explozi Supernovy) → vznikají nuklidy bohaté na neutrony
- záchyt je tak rychlý, že mohou vzniknout i velmi nestabilní nuklidy!!!
- vznik prvků jako např. Sr, Zr, Ba nebo Pb
- proces vzniku nuklidů s vyšším číslem než 209!!

# Nukleosyntéza – p-proces

- záchyt protonu
- při výbuchu Supernovy → vytvoření nejlehčích izotopů daných prvků
- velmi nízká pravděpodobnost vzniku tohoto procesu → nejlehčí izotopy jsou nejméně časté

# Vytváření hvězd I

- hvězdy se vytvářejí při kolapsu velkých molekulárních mraků (převážně H-He) → gravitace převáží ostatní síly (expanze atd.)
- na vytváření mraků se velmi významně podílí magnetická pole
- kolaps může být díky lokálním nestabilitám nebo díky externímu vlivu (např. exploze **supernovy**)



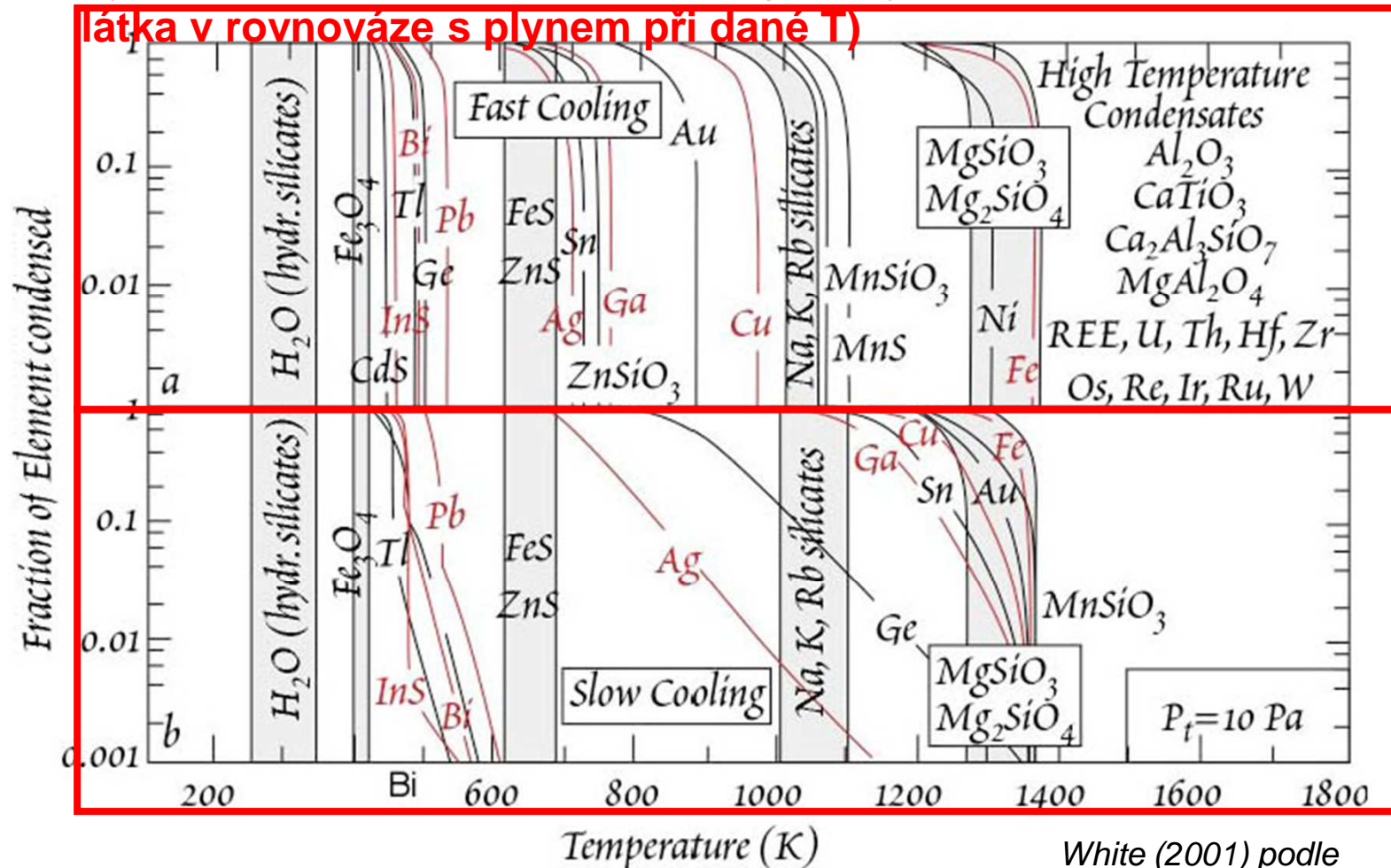
*Mlhovina Orionu, Hubbleův teleskop*

# Vytváření hvězd II

- kolaps → adiabatické zahřátí → zesílení magnetického pole
- 5 fází vzniku hvězd
  - 1 fáze – kolaps mraku → vytvoření jádra a prstence
  - 2-3 fáze – pokračující akrece, vytváření proudů plynů unikajících z hvězdy (3. fáze)
  - 4 fáze – začínající viditelnost hvězd
  - 5 fáze – dokončení vývoje, zapálení H-He reakce v jádru → hvězda se dostává do vývoje hlavní posloupnosti

# Kondenzační sekvence

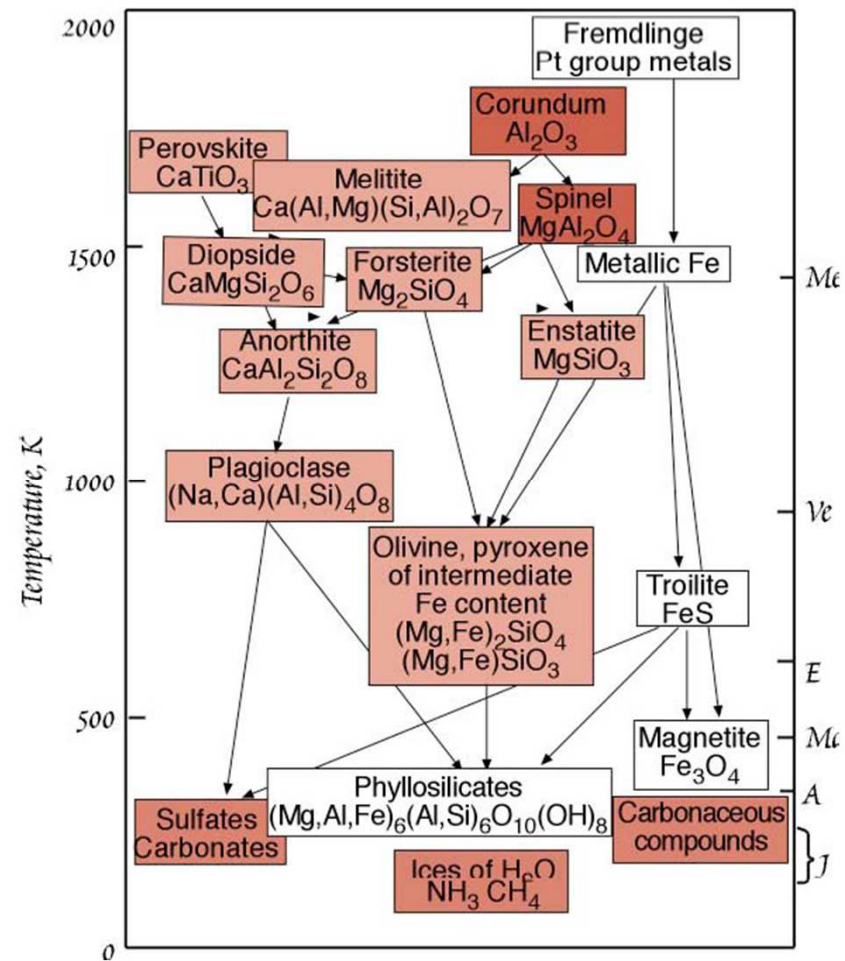
pochází o chlazení absorpce mezi plyny a pevnou látkou (pouze látka v rovnováze s plynem při dané T)



White (2001) podle  
Grossman (1972)

# Kondenzační sekvence

1. PGE (Re-Os systém)
2. silikáty a oxidy Ca-Al-Ti  
(U,Th,Zr,Ba,REE)
3. Fe-Ni, Mg-Si silikáty  
(olivín, pyroxeny),  
plagioklasu  
(separace)
4. sulfidy → magnetit,  
OH-silikáty, org.  
sloučeniny, sulfáty



White (2001)

# Meteority – klíč k počátkům Země

- nejstarší horniny na Zemi (zirkony) cca. 4.4 Ga → klíčové poznatky o vytvoření Země a Sluneční soustavy → **meteority**
- „kameny“ vs „železa“
- chondrity, achondrity
- primitivní vs. diferenciované

# Meteority



*C-meteorit Murchison*

**Meteorit** – přírodní objekt, který „přežil“ pád na Zemi z Vesmíru



*Fe-meteorit*



# Meteority

- Mikrometeority (< 2 mm) → z hlubokomořských sedimentů, ledu a stratosféry
- Meteority (> 10 mm) → jednotlivé kusy nebo více kusů z jednoho pádu
- Databáze - <http://www.lpi.usra.edu/meteor/>

# Mikrometeority

- „sférické“ částice v hlubokomořských jílech ale i řasách
- roztavení 100 m<sup>3</sup> ledu z Antarktidy = 20 000 mikrometeoritů
- menší kusy jsou méně postižené přetavením
- problémy s kontaminací zemským prachem → sběr mikrometeoritů ve stratosféře → IDP (Interplanetary Dust Particles) → některé (porézní, bezvodé) představují materiál komet

# Meteority

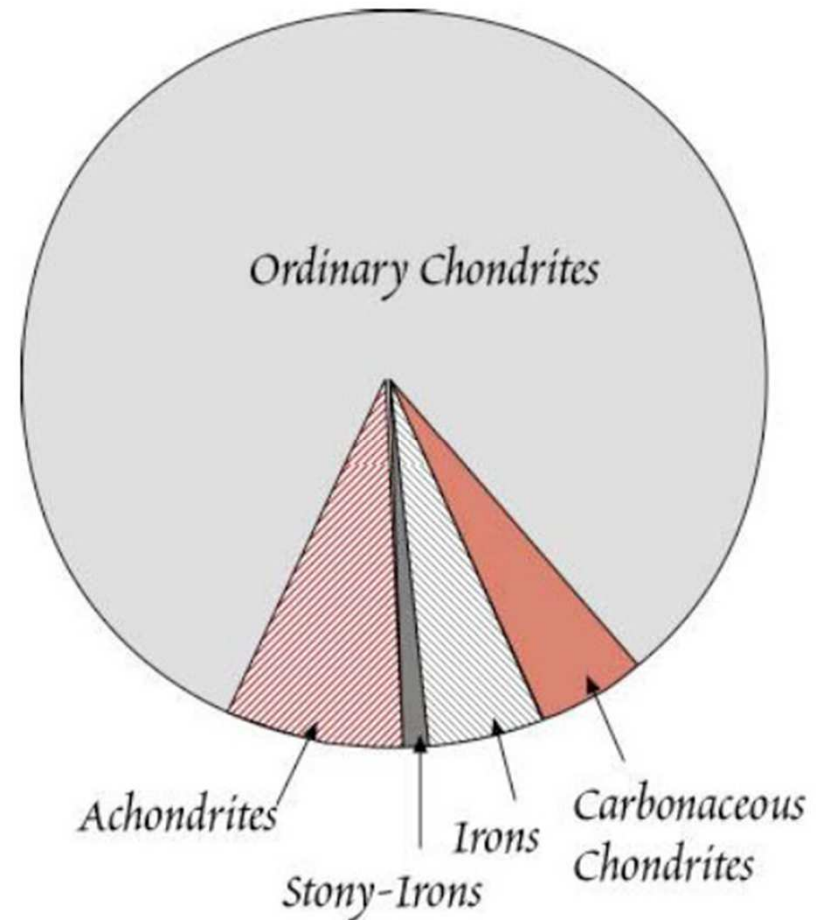
- „kameny“ → z převážné většiny tvořené silikáty ± Fe-Ni slitiny
- „železa“ → Fe-Ni slitiny ± silikáty a specifické minerály
- „kamenoželeza“ → cca 50 % silikátů a 50 % Fe-Ni slitina

Table 1.2 *Abundances of major meteorite types*

<b>Stones</b>	Falls	(%)	Finds	(%)	Total	(%)
Chondrites	821	85.8	2603	67.5	3424	71.7
Primitive achondrites	16	1.7	122	3.2	138	2.9
<sup>1</sup> Differentiated achondrites	60	6.3	241	6.3	301	6.3
<b>Total stones</b>	<b>897</b>	<b>93.8</b>	<b>2966</b>	<b>77.0</b>	<b>3863</b>	<b>80.9</b>
<b>Stony irons</b>						
Pallasites	5	0.5	43	1.1	48	1.0
Mesosiderites	7	0.7	43	1.1	50	1.0
<b>Total stony irons</b>	<b>12</b>	<b>1.2</b>	<b>86</b>	<b>2.2</b>	<b>98</b>	<b>2.0</b>
<b>Irons</b>						
Magmatic	31	3.2	525	13.6	556	11.6
Non-magmatic	9	0.9	174	4.5	183	3.8
<sup>2</sup> <b>Total irons</b>	<b>48</b>	<b>5.0</b>	<b>802</b>	<b>20.8</b>	<b>850</b>	<b>17.7</b>
Total meteorites	957		3854		4811	

# Meteority

- **Chondrity** → obsahují X mm velké sferické části = chondruly
- **Achondrity** → neobsahují chondruly, většinou magmatické horniny nebo jejich brekcie
- **Železa, Kamenoželeza**



White (2001)