

AKO VYTVORIŤ OBÝVATEĽNÚ PLANÉTU

Jozef MASARIK

**Katedra Jadrovej fyziky a biofyziky
FMFI UK**

masarik@fmph.uniba.sk

SNUS 13. 5. 2025

**Ťažko,
trvá to dlho
a je to precízna práca**

**Čo o vzniku Zeme
vieme?**

**Napriek ohromnému rozvoju
spoločnosti a myslenia odpovede na
základné otázky sú len veľmi málo
uspokojivejšie ako odpovede našich
vzdialených predkov.**

Prečo?

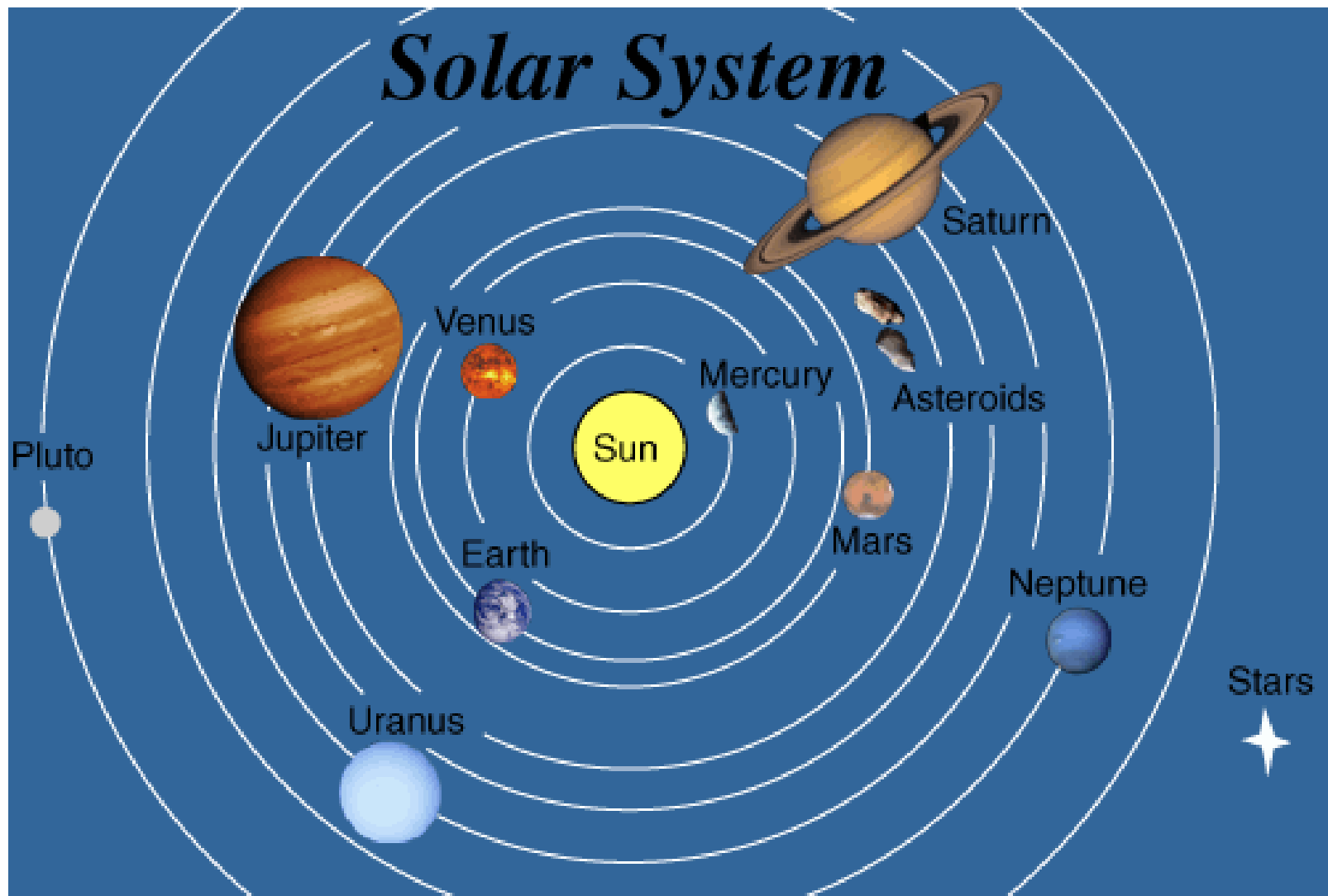
**Nové objevy,
nové pohľady
boli vyvážené novými záhadami.**

Niečo ale predsa len vieme.

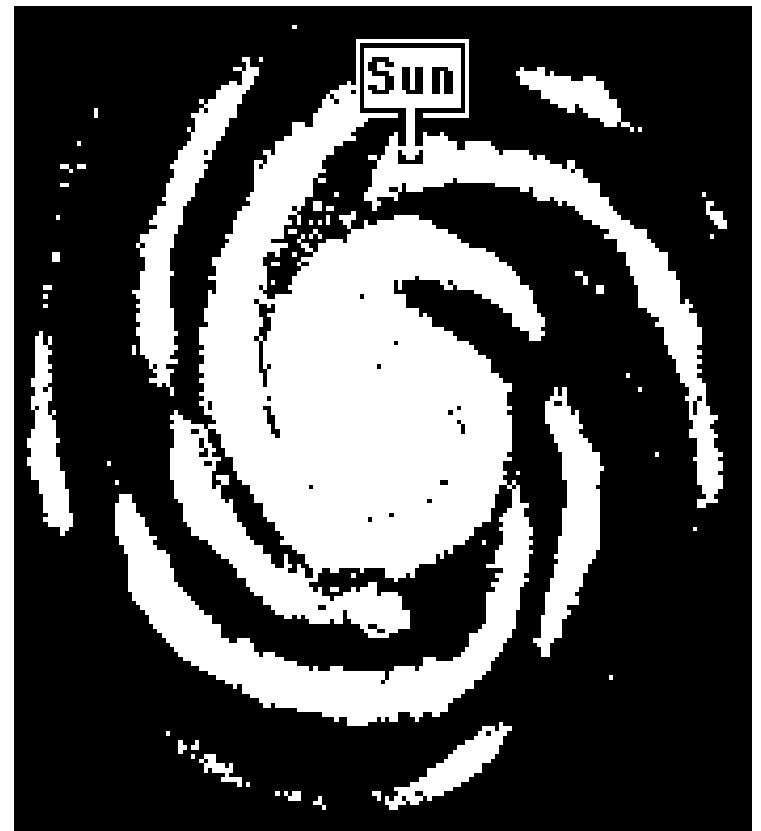
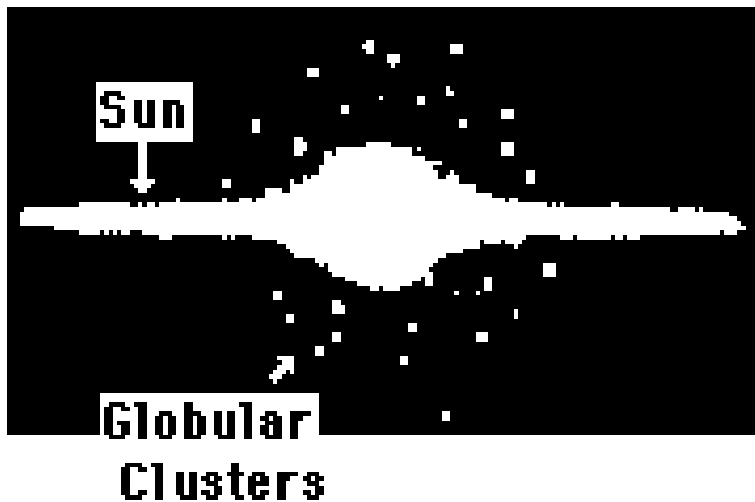
Zem - súčasť Slnecnej sústavy



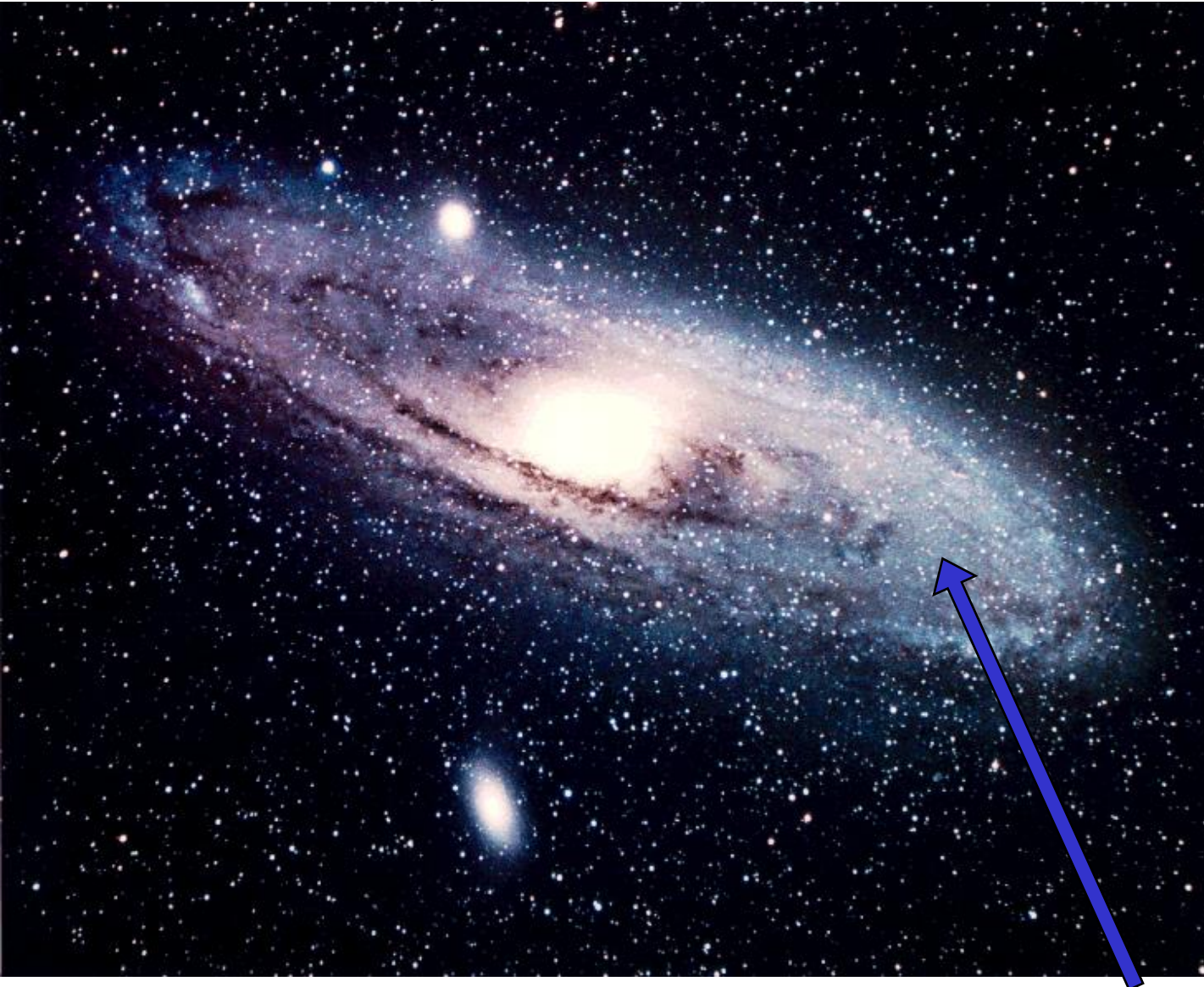
Slnečná sústava



Slnko - jedna zo 100 miliard hviezd v mliečnej ceste



M31, the Andromeda Galaxy



**Naša slnečná
sústava leží
v Mliečnej
Ceste, galaxii,
ktorá sa veľmi
podobá Na M31,
Svetlu
emitovanému
v centre našej
galaxie trvá
25,000rokov
kým sa dostane
k nám,.**

Ak by toto bol obrázok mliečnej cesty, naša Slnečná sústava by ležala tu.

**100 miliard hviezd v mliečnej ceste
má planetárne sústavy**

Má Zem špeciálne postavenie?

Prečo sme tu?

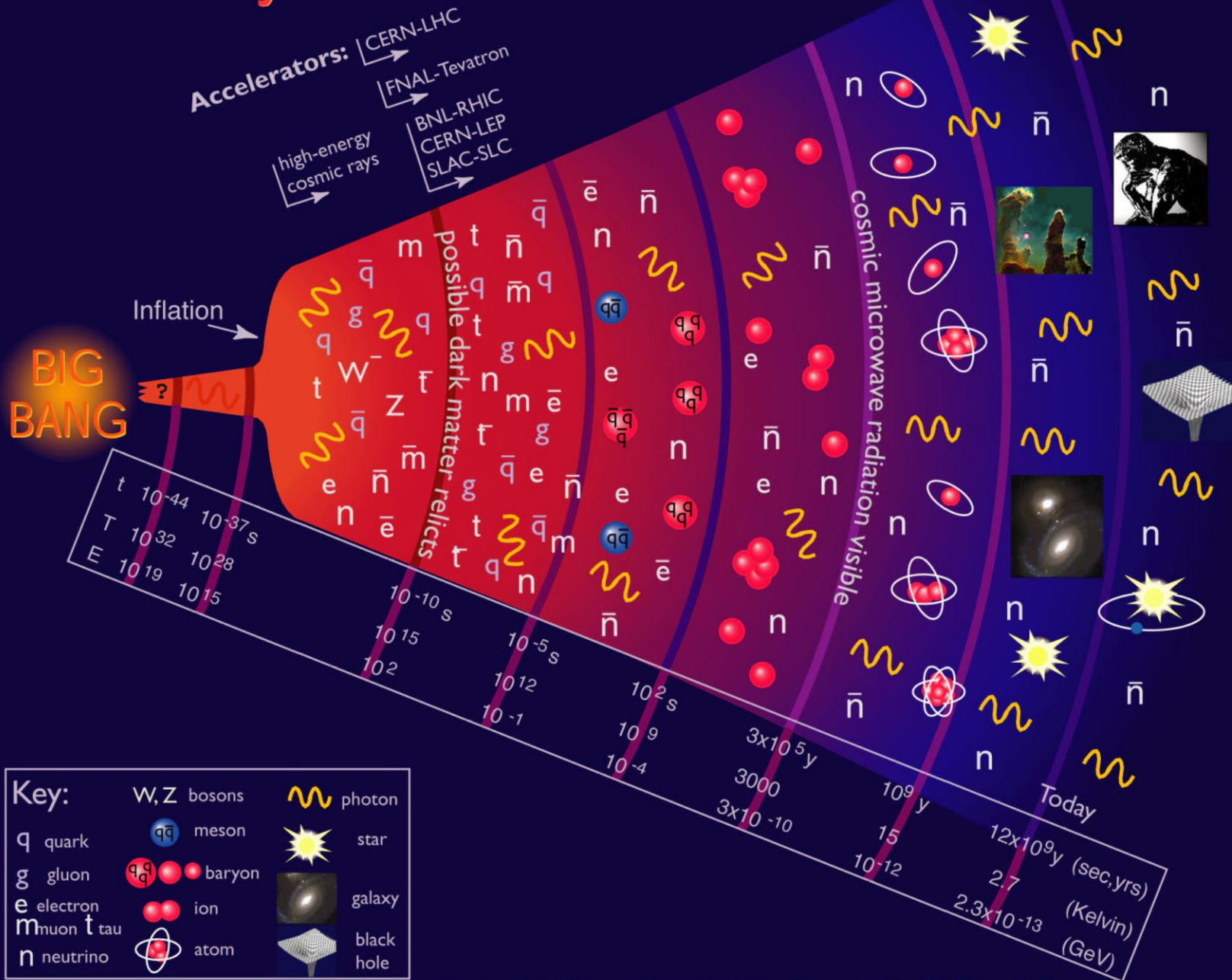
Existujú podobné bytosti niekde inde?

**Hoci odpovede na základné otázky
sú stále nejednoznačné, veda nám
neustále zmenšuje priestor na špekulácie.**

Vesmír, miliardy galaxií



History of the Universe



Big Bang - štandardný model

- **rozpínanie sa vesmíru**
- **žiarenie kozmického pozadia (2.7 K)**
- **koncentrácia vodíka a hélia v kozme**

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
C charm	1.3	2/3
S strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

BOSONS

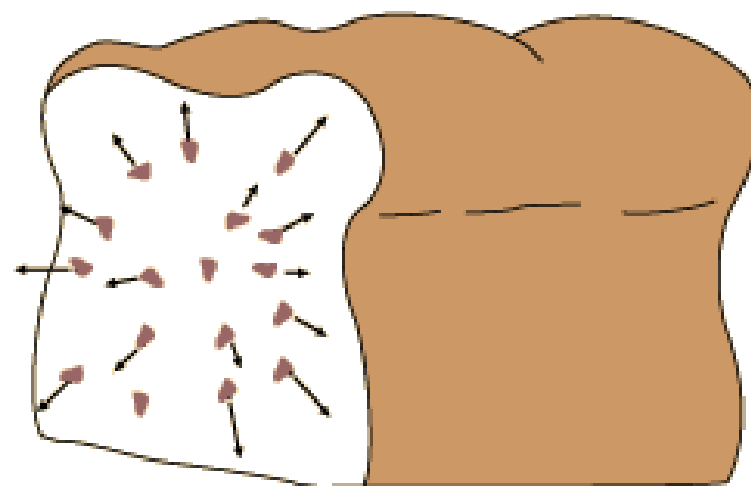
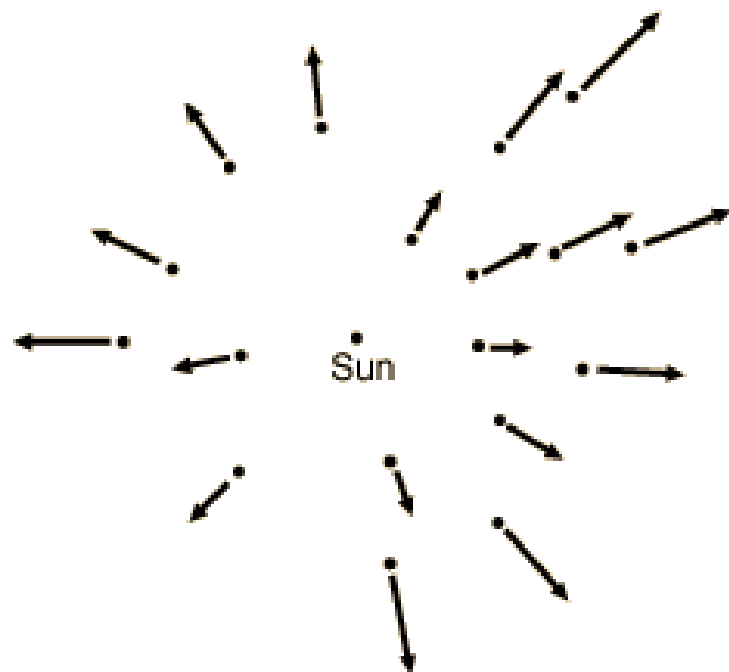
force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

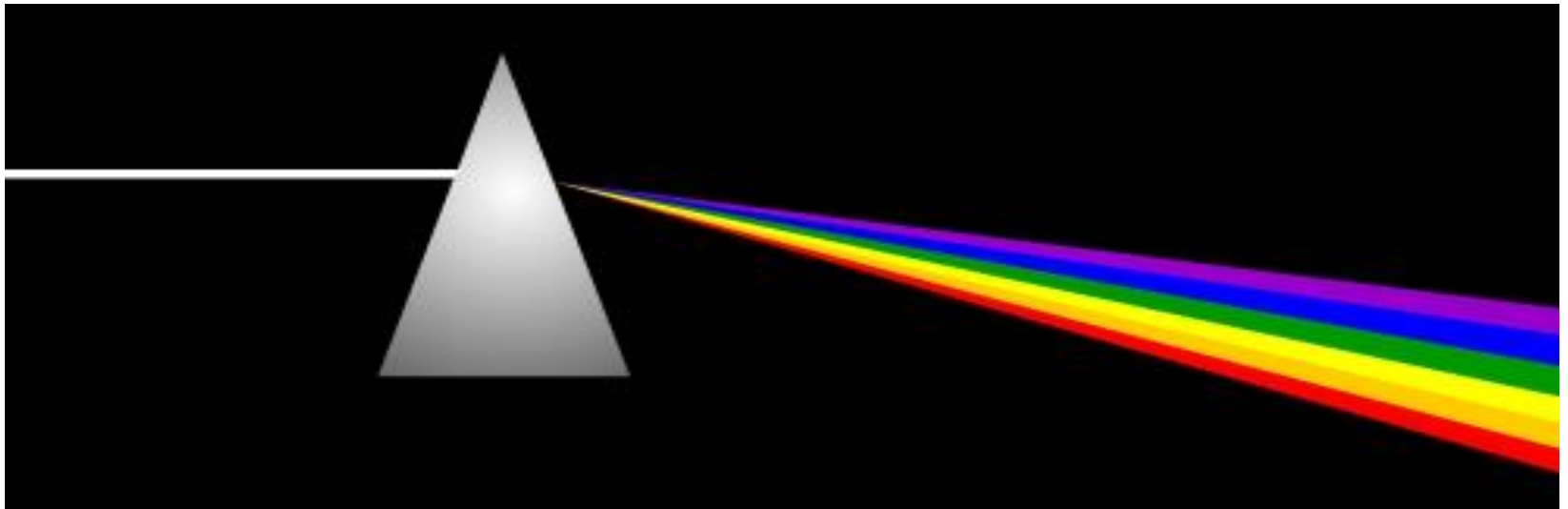
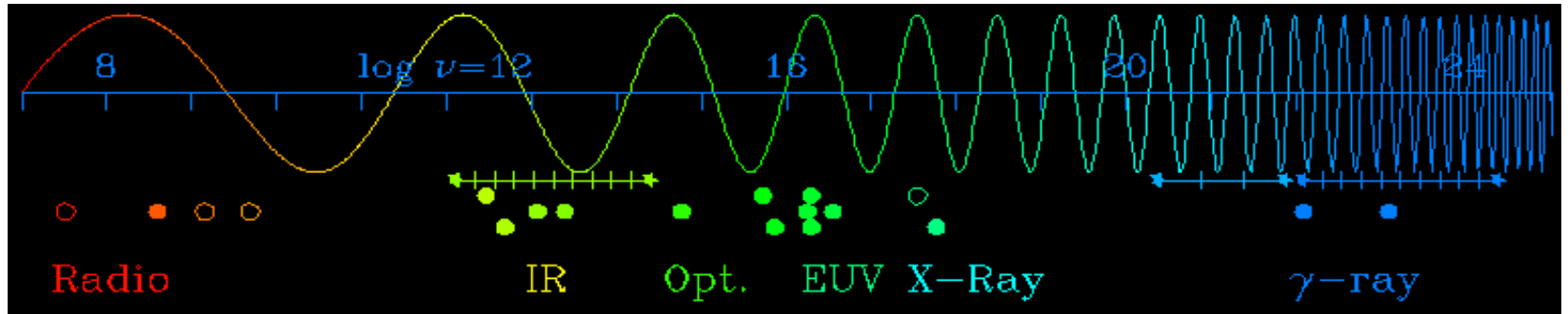
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0



Svetlo má vlnovú povahu



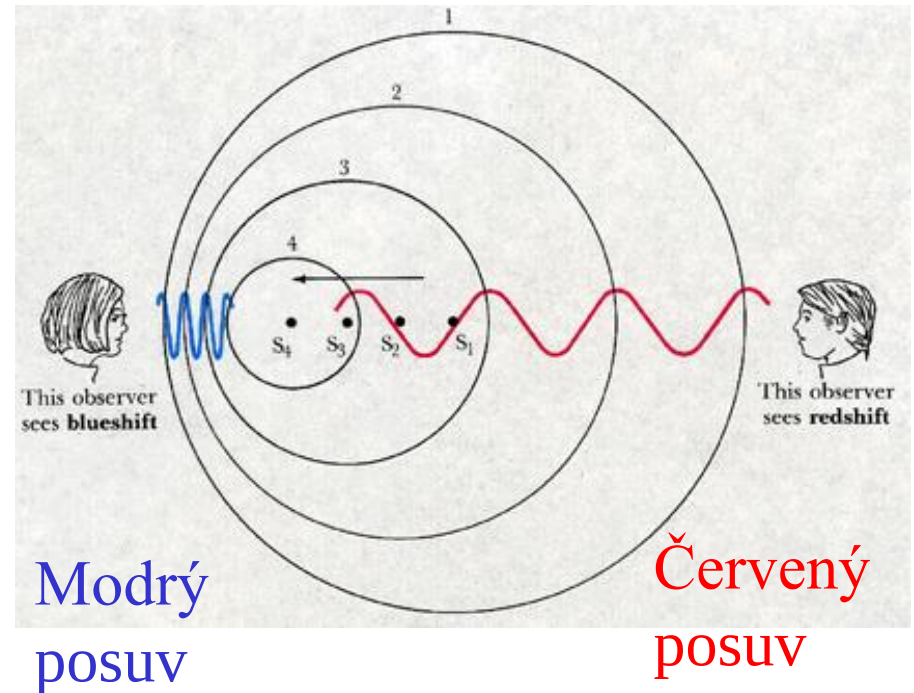
Dopplerov jav, červený posuv

$$(\lambda_o - \lambda_v) / \lambda_o = v/c$$

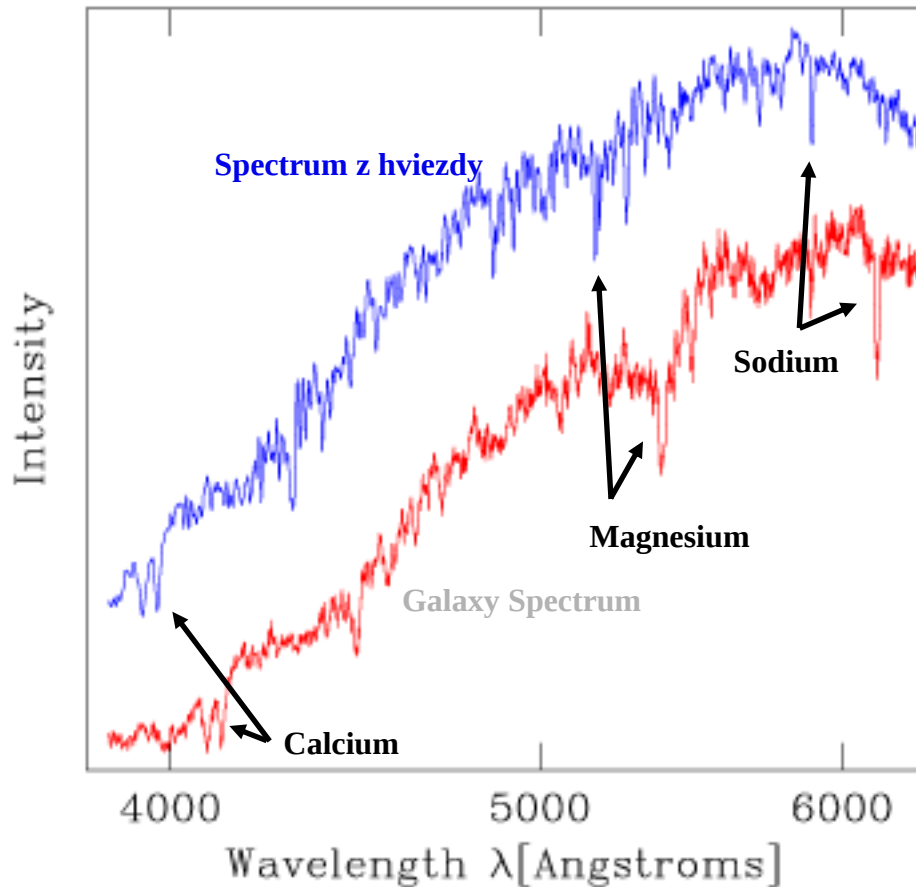
Kde

λ_o vlnová dĺžka žiarenia
vyžiareného z
nepohybujúceho sa
objektu

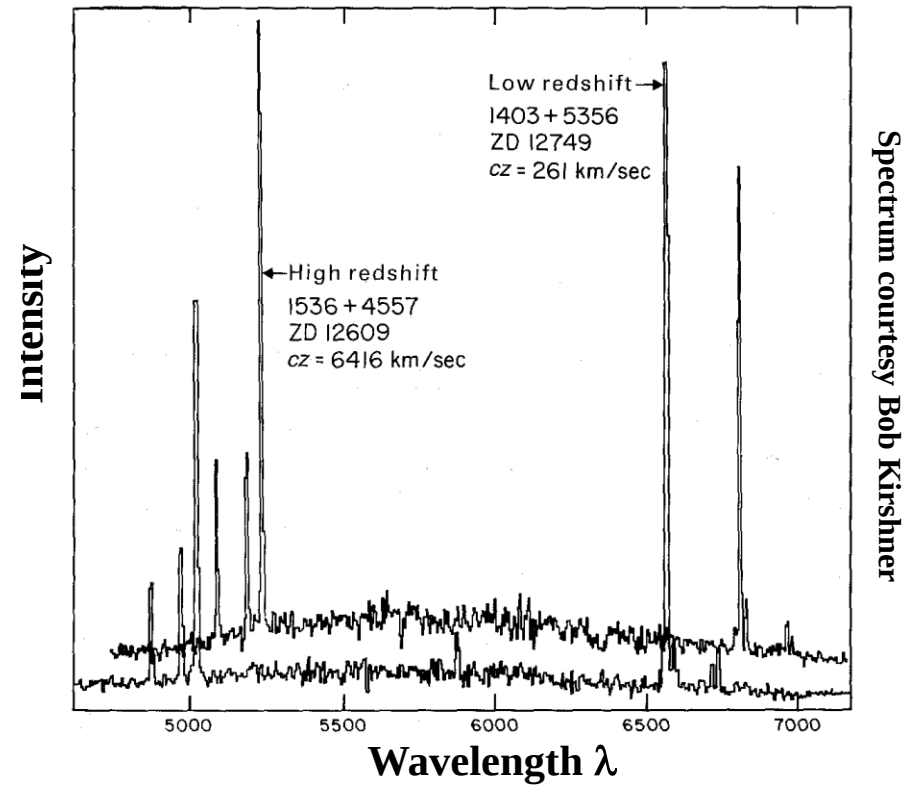
λ_v vlnová dĺžka žiarenia
vyžiareného z objektu
pohybujúceho sa
rýchlosťou v
 c rýchlosť svetla



Spektroskopia galaktického žiarenia



- Spektrá blízkej hviezdy a galaxie
 - Hviezda je približne v klúde
 - Vzdialená galaxia sa vzdáľuje rýchlosťou 12,000 km/s



- Spektrá blízkyh a vzdialených galaxií
 - Blízke sa vzdáľujú rýchlosťou 261 km/s
 - Ďaleké sa vzdáľujú rýchlosťou 6,400 km/s

Určovanie vzdialeností

Parallax

Cepheid Variables

Planetary Nebulae

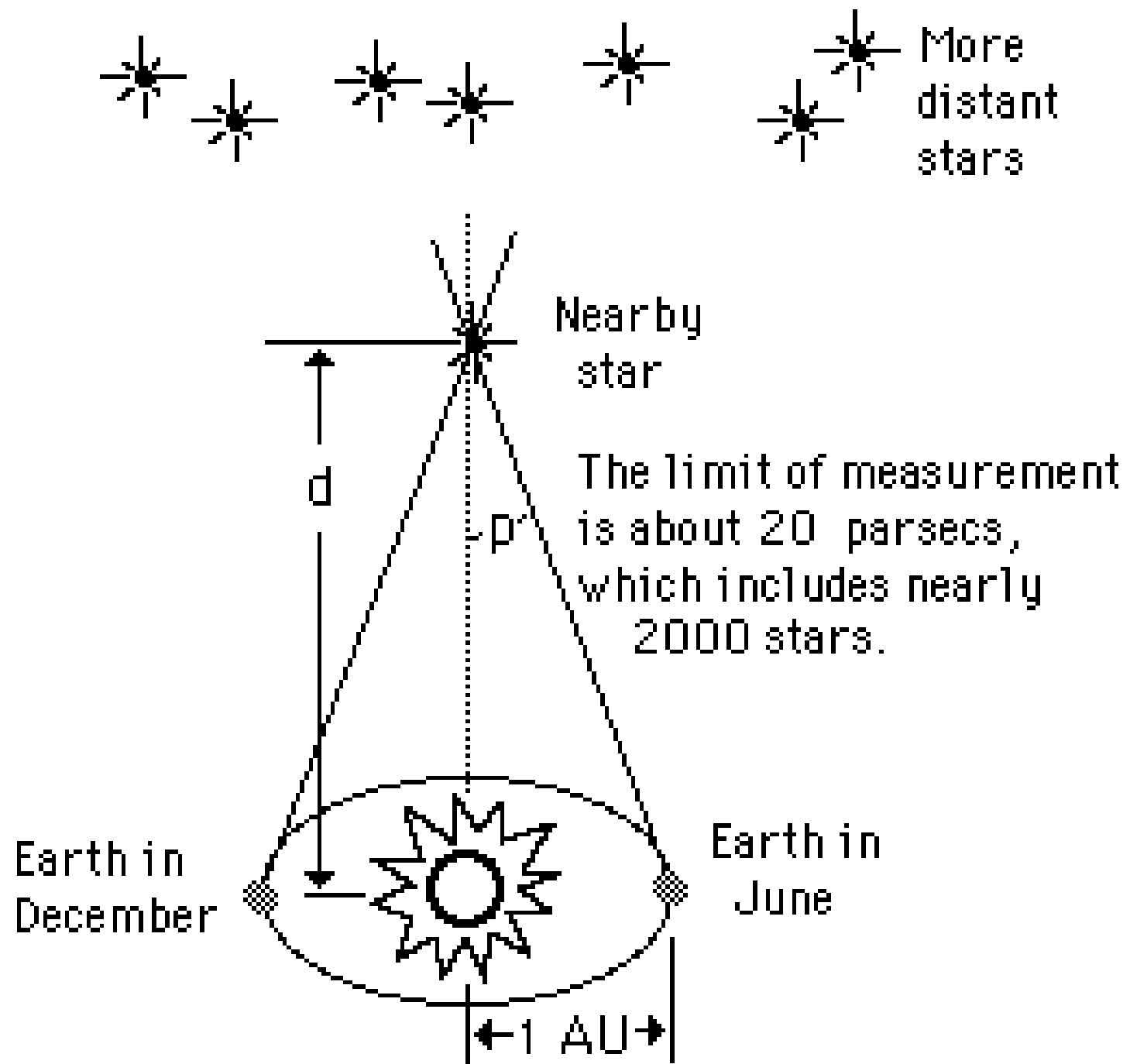
Most luminous supergiants

Most luminous globular clusters

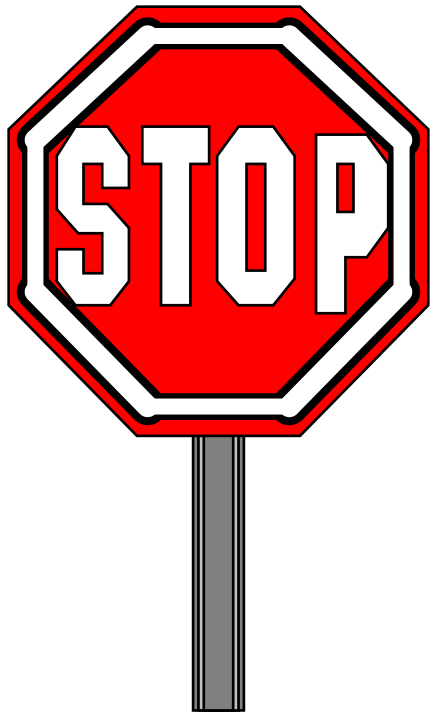
Most luminous H II regions

Supernovae

Hubble constant and red shifts

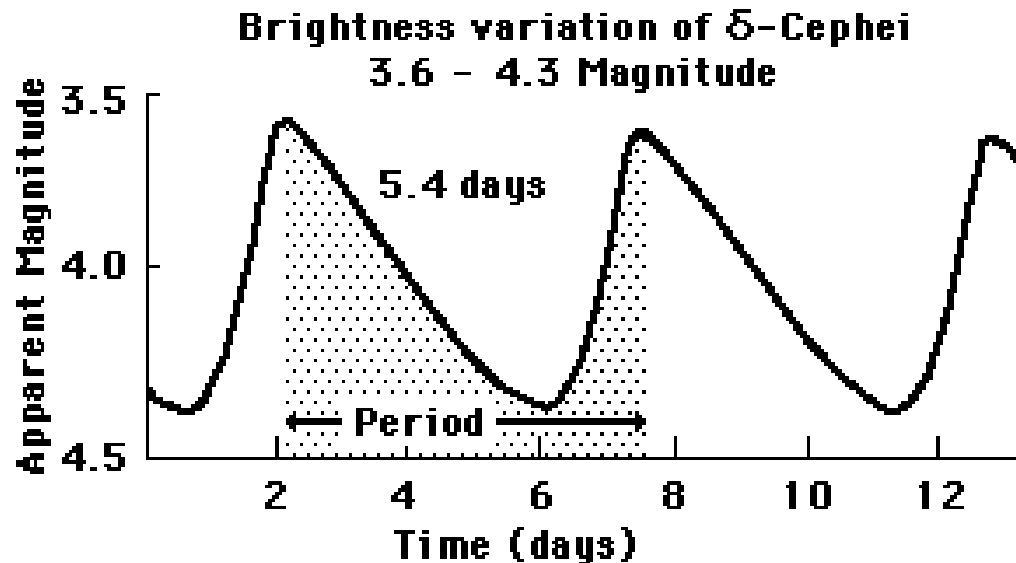


Štandardné mierky v každodennom živote

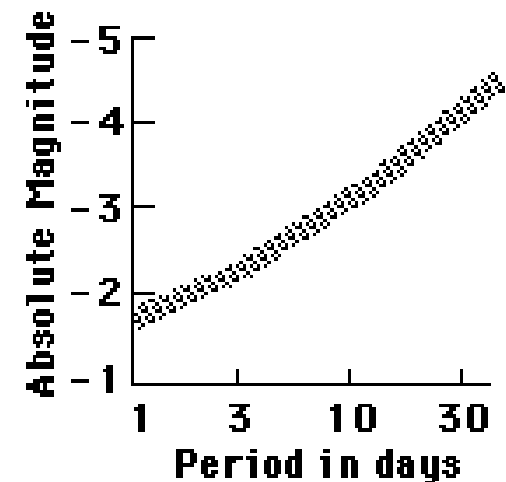


**Značka STOP slúži ako meradlo.
Keďže vieme, že všetky STOP značky
sú rovnakej veľkosti, relatívna veľkosť
značky poskytuje informáciu o
jej vzdialenosti.**

Určovanie vzdialeností



The period-luminosity relation for Cepheid variables.



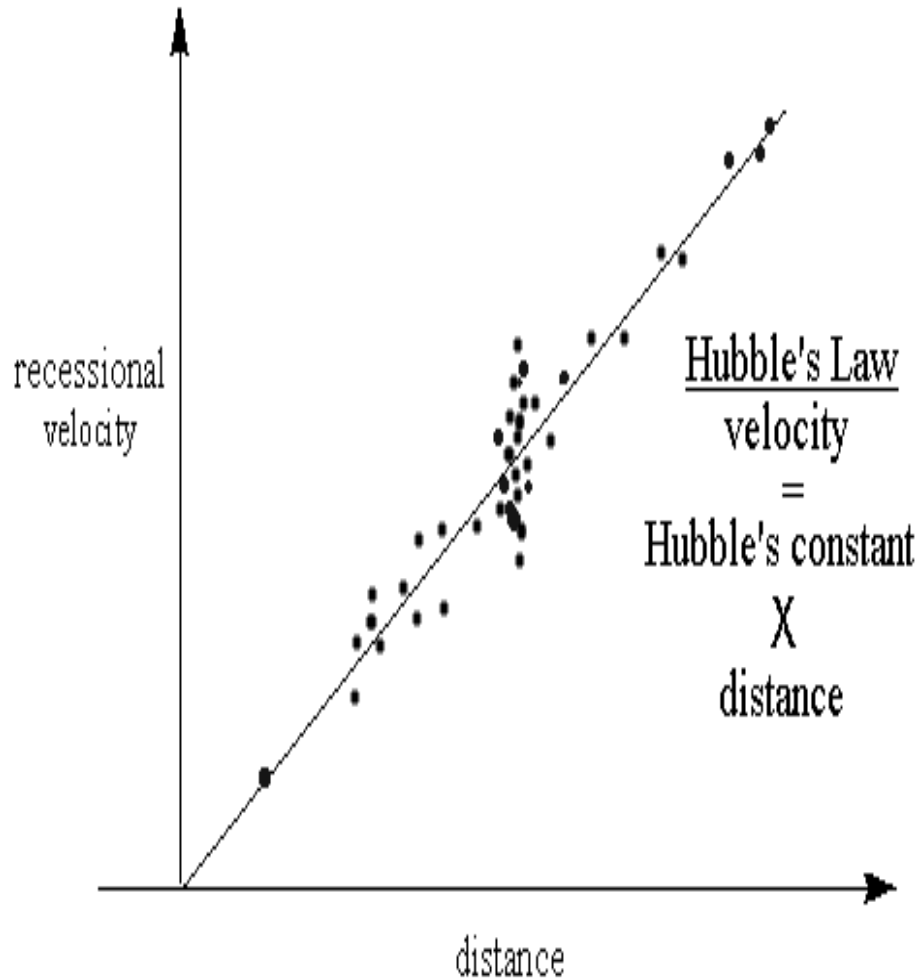
Určovanie vzdialeností



Najasnejší superobri v rovnakej galaxii budú mať absolútne magnitúdy, -8 červené
-9 modré

. Sú viditeľné na vzdialenosť 50 Mly a 80 Mly resp., pričom cefeidy sú viditeľné na vzdialenosť 20 Mly

Hubblov zákon



$$V = H \times D$$

V rýchlosť, ktorou sa
vzd'ahuje galaxia,
obyčajne v km/sec

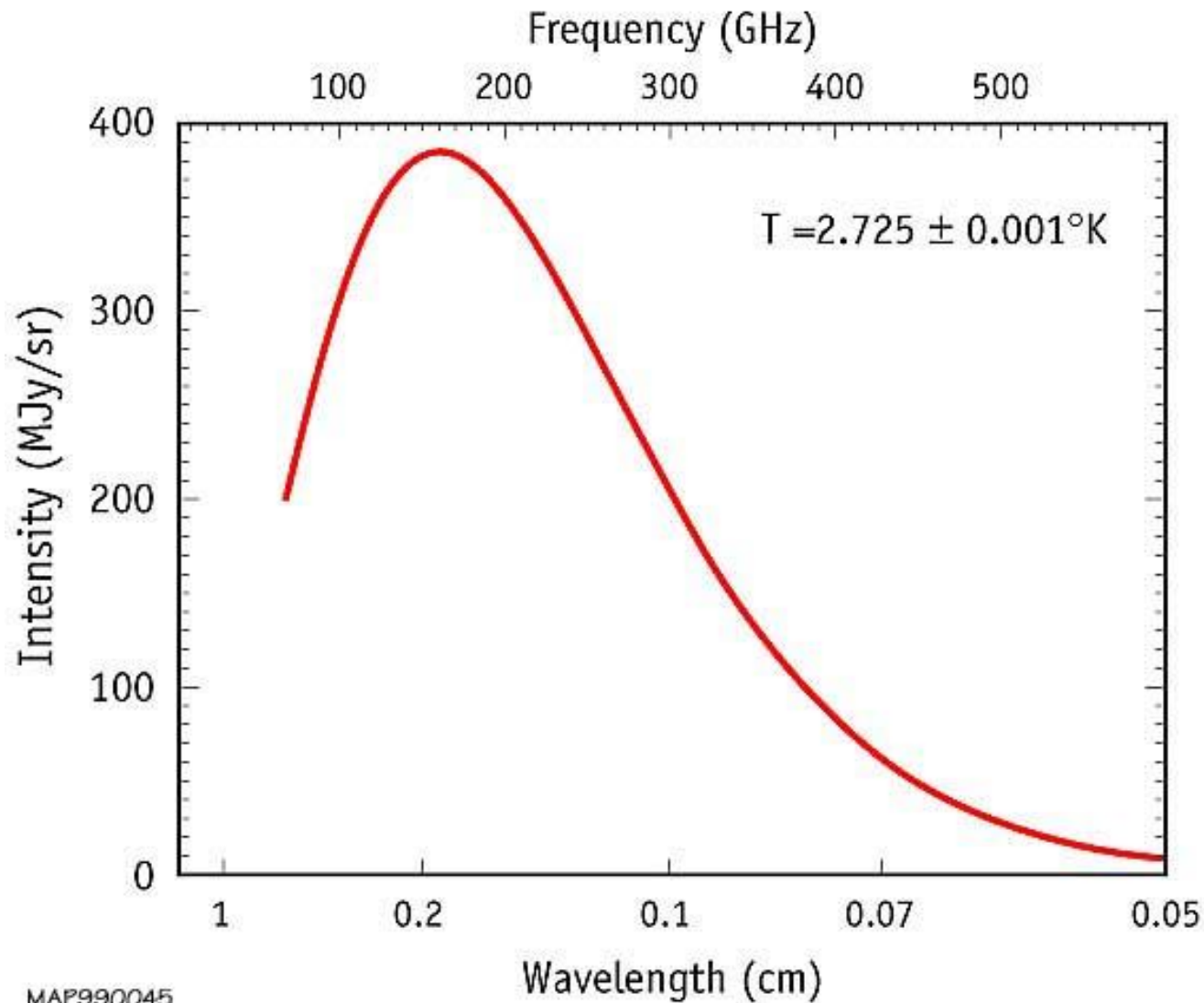
H Hubblova
konštanta v
km/sec/Mpc

D vzdialenosť
galaxie v Mpc

$$H_0 = 20 \text{ km/s/MLy}$$

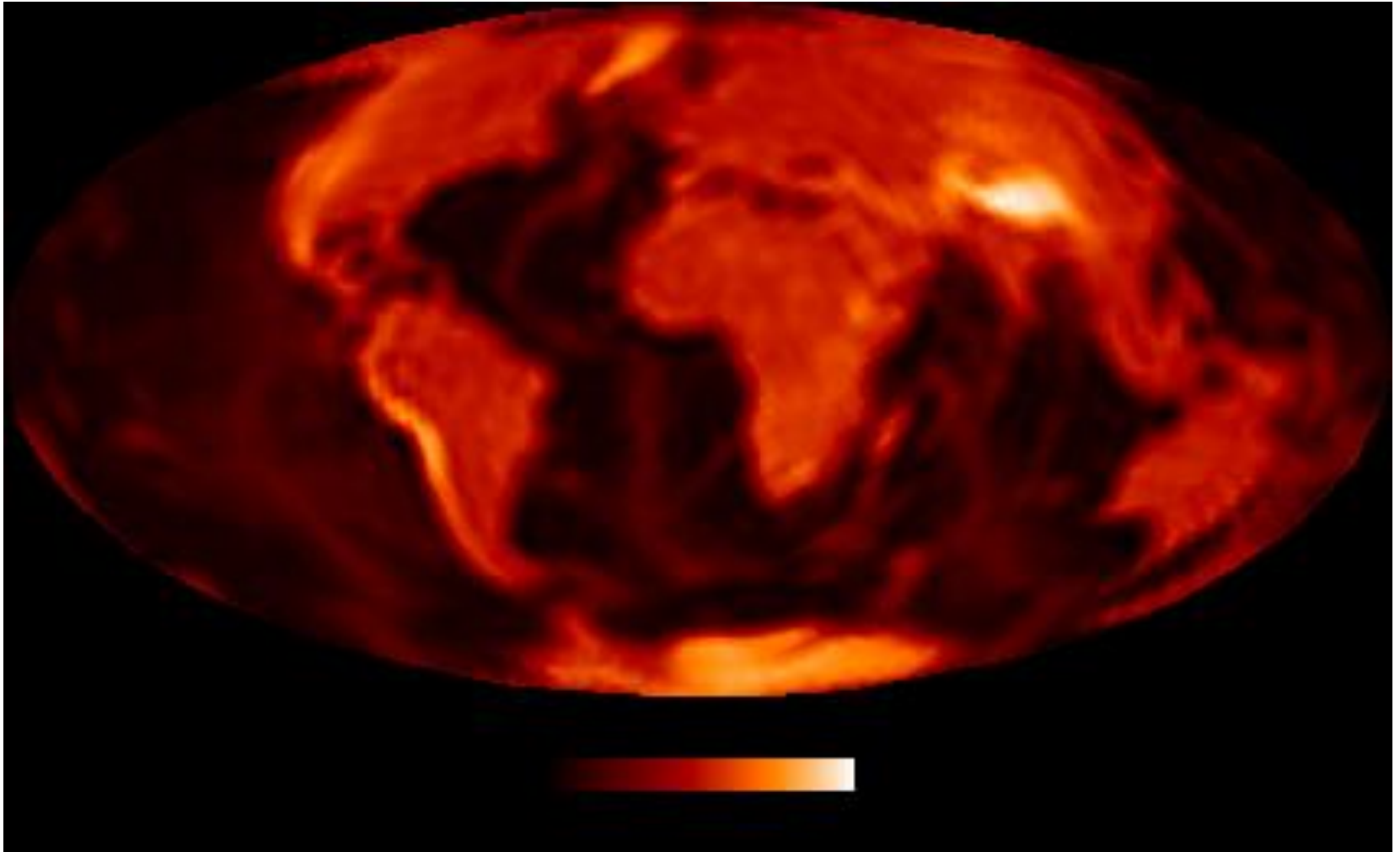
$$t_{age} = \frac{1}{H_0} = 15 \text{ Gyr}$$

SPECTRUM OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND



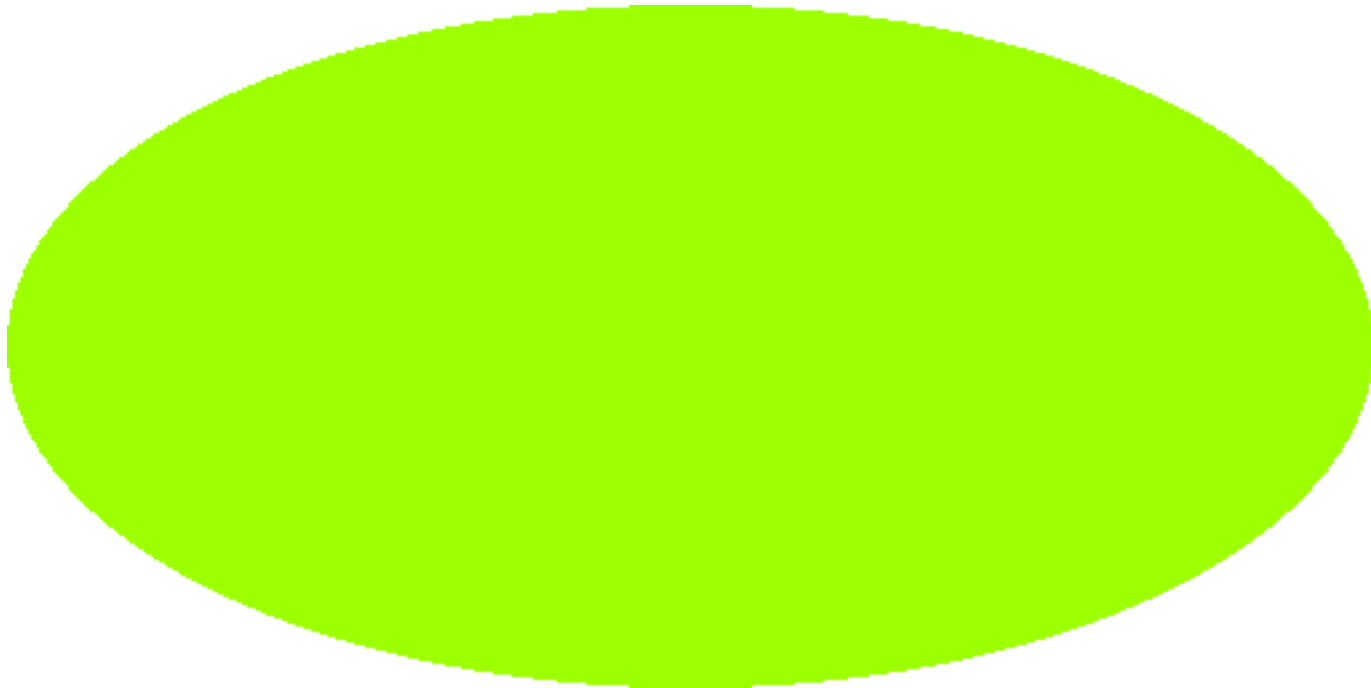
MAP990045

Obrázok Zeme z COBE DMR



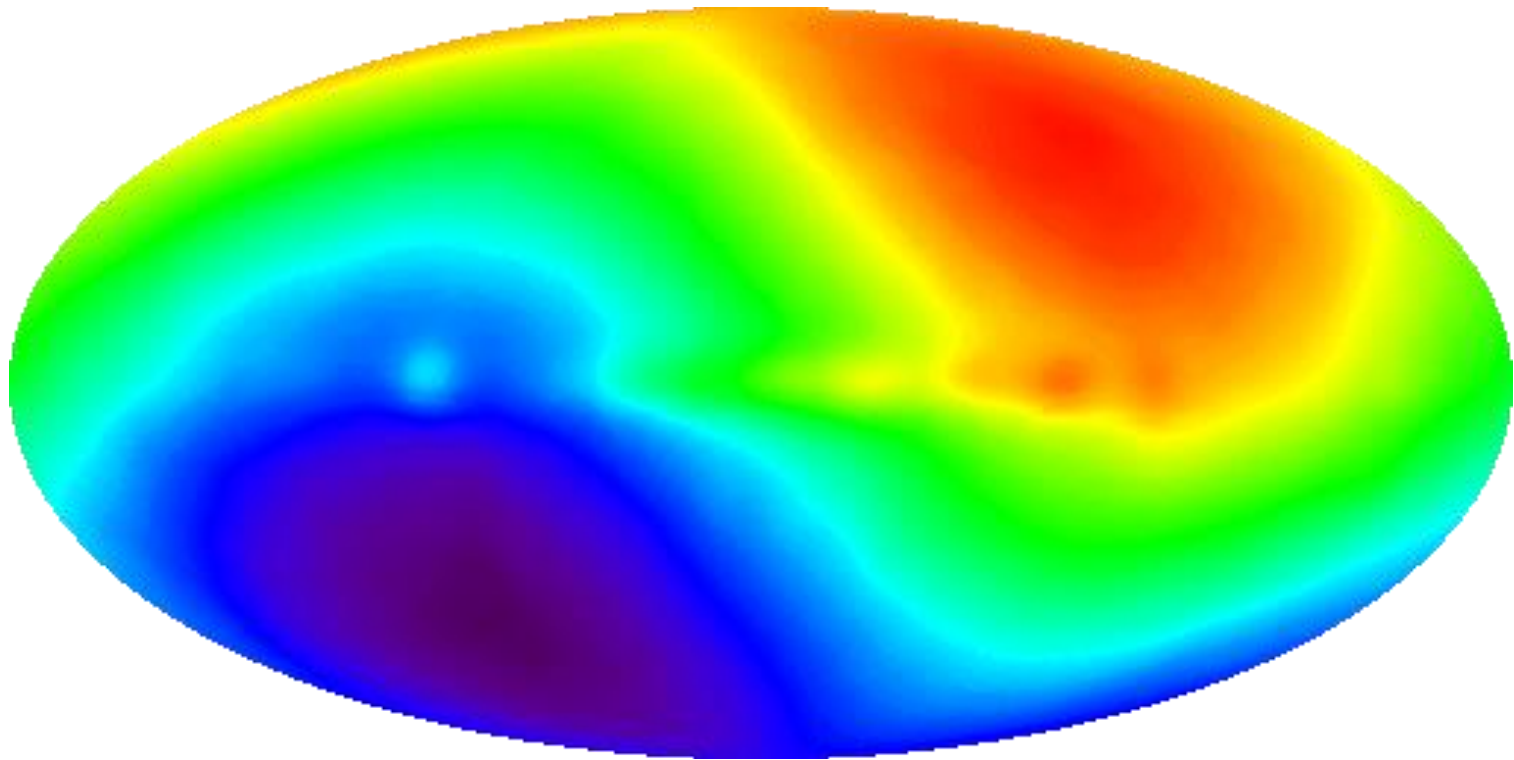
COBE DMR Image

- Teplota oblohy v oblasti 0-4 Kelvin
- Mikrovlnné pozadie je veľmi homogénne pri teplote ~ 3 Kelvin



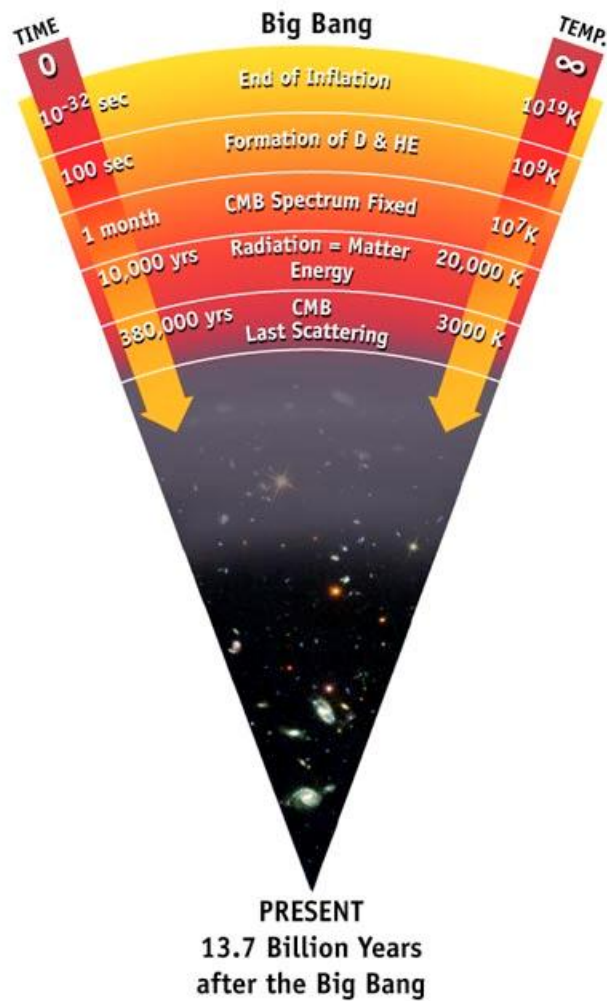
COBE DMR - Zoom

- Teplota oblohy v intervale 2.724-2.732 Kelvin
 - modrá je 2.724 K a červená je 2.732 K

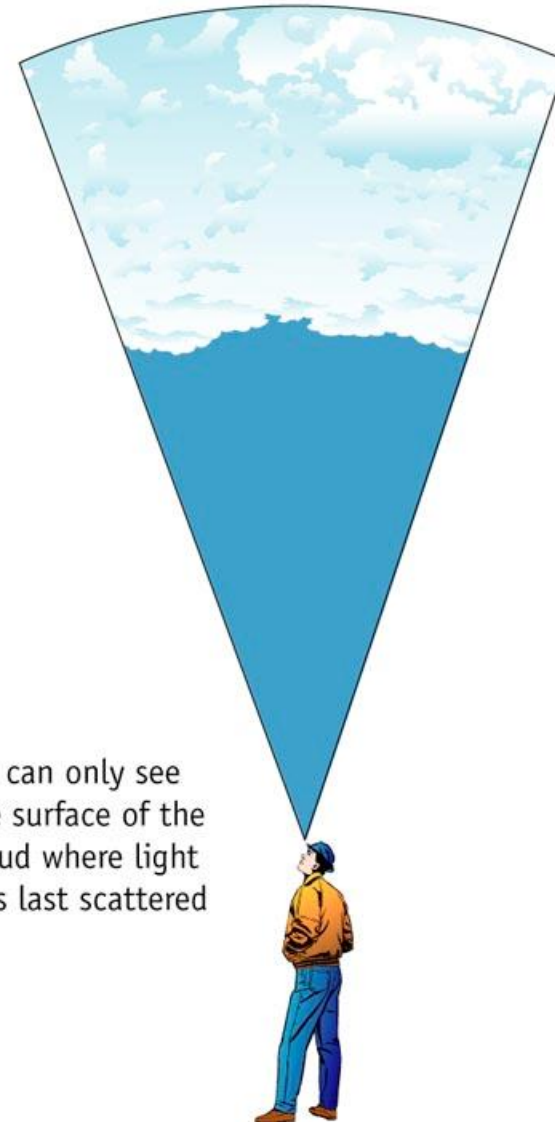


A Pictorial History of the CMB





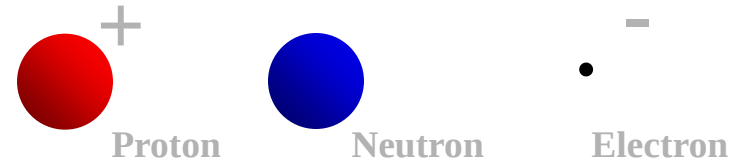
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

Atómy, prvky izotopy

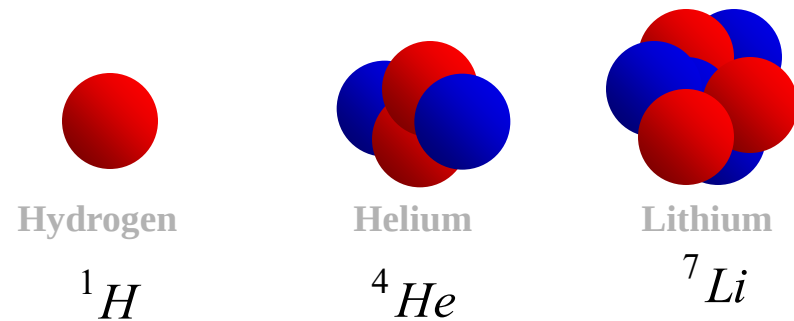
- Atóm pozostáva z jadra a elektrónov. Jadro pozostáva z kladne nabitých protónov a neutrálnych neutrónov. Okolo neho krúžia po orbitoch elektróny



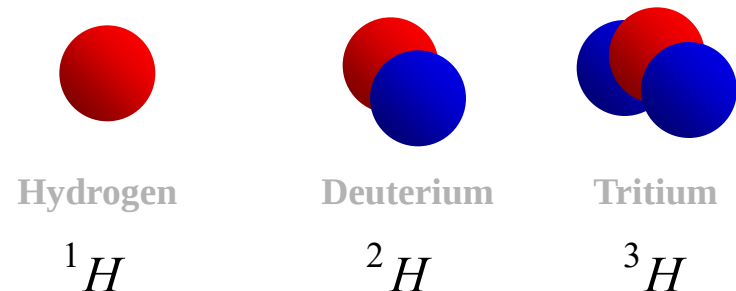
Relatívna hmotnosť 1 : 1 : 0.0006

Relatívny náboj +1 : 0 : -1

- Prvky sa líšia chemickými vlastnosťami, ktoré sú dané počtom protónov v jadre.

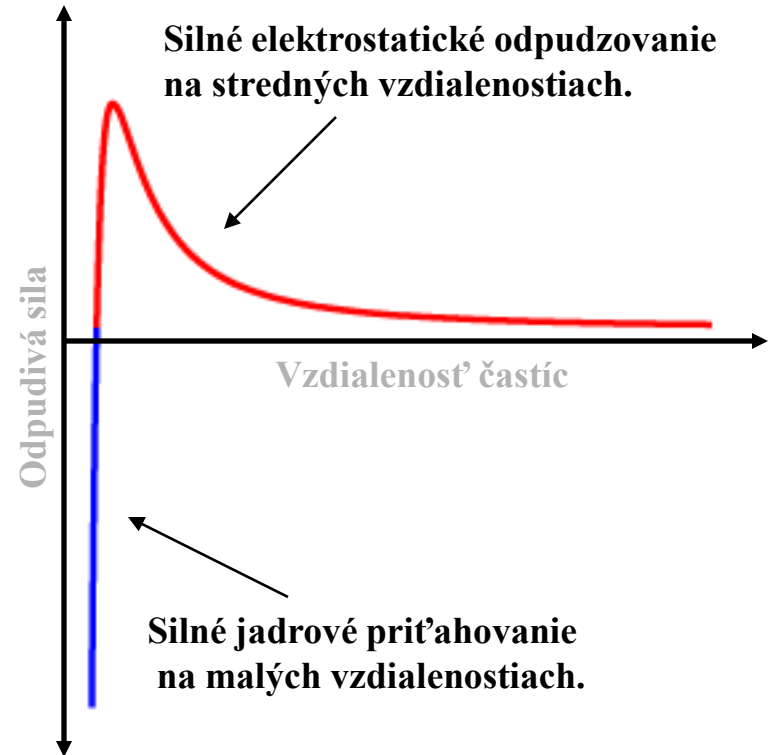


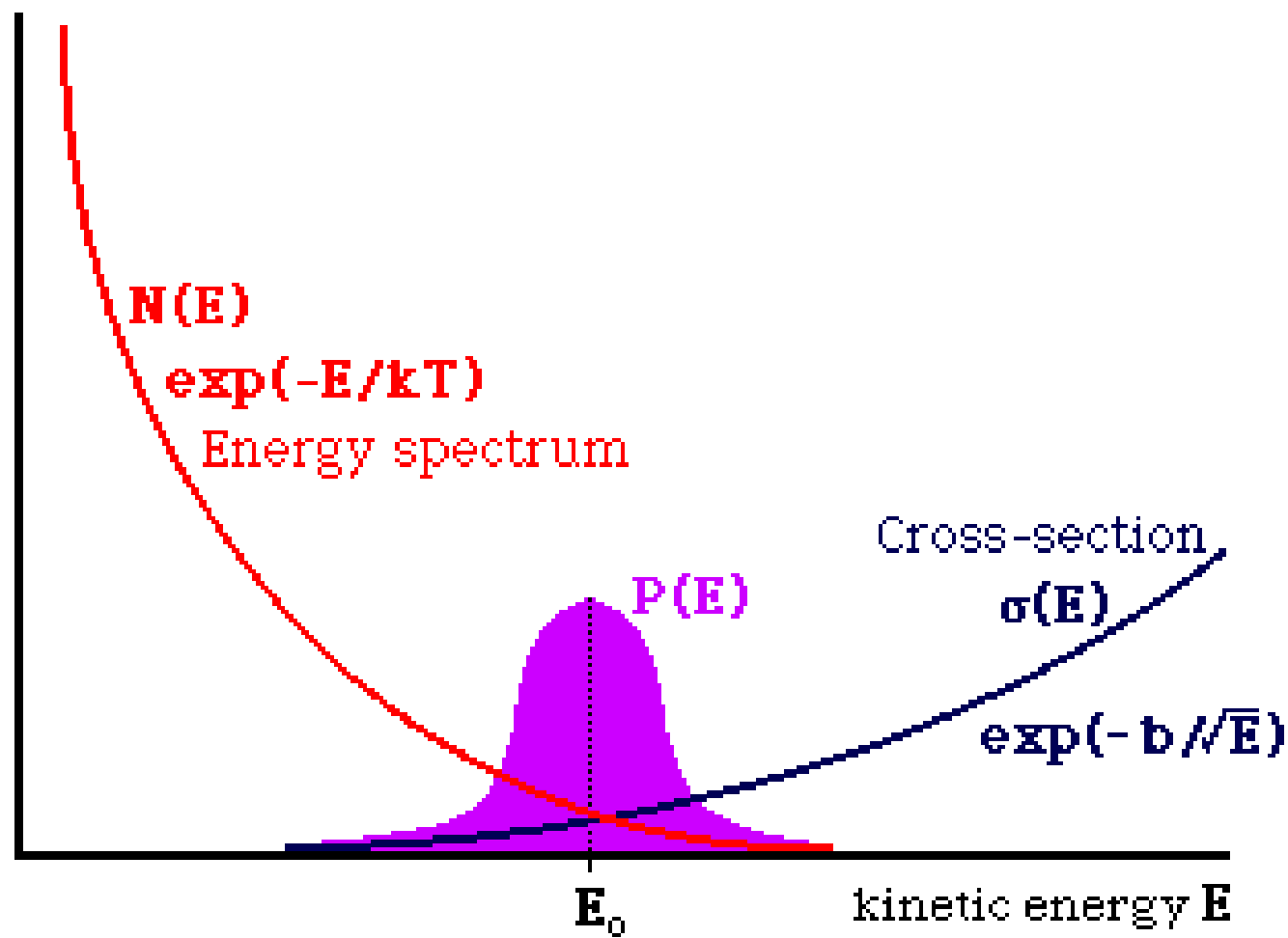
- Izotopy prvku sa líšia počtom neutrónov v jadre.



Fúzia - extrémne podmienky

- K fúzii dochádza počas zrážok
 - ďalekodosahové elektrostatické sily odpudzujú jadrá
 - Ak sa jadrá dostanú dostatočne blízko k sebe, krátkodosahové jadrové sily ich priťahujú
- Fúzia vyžaduje teplotu ~ 10 miliónov K
 - častice majú dostatok energie na prekonanie repulzie.
 - čím viac protónov je v jadre, tým ťažšie je vyvolať fúziu.
- Fúzia vyžaduje vysoké hustoty
 - zrážky sú časté



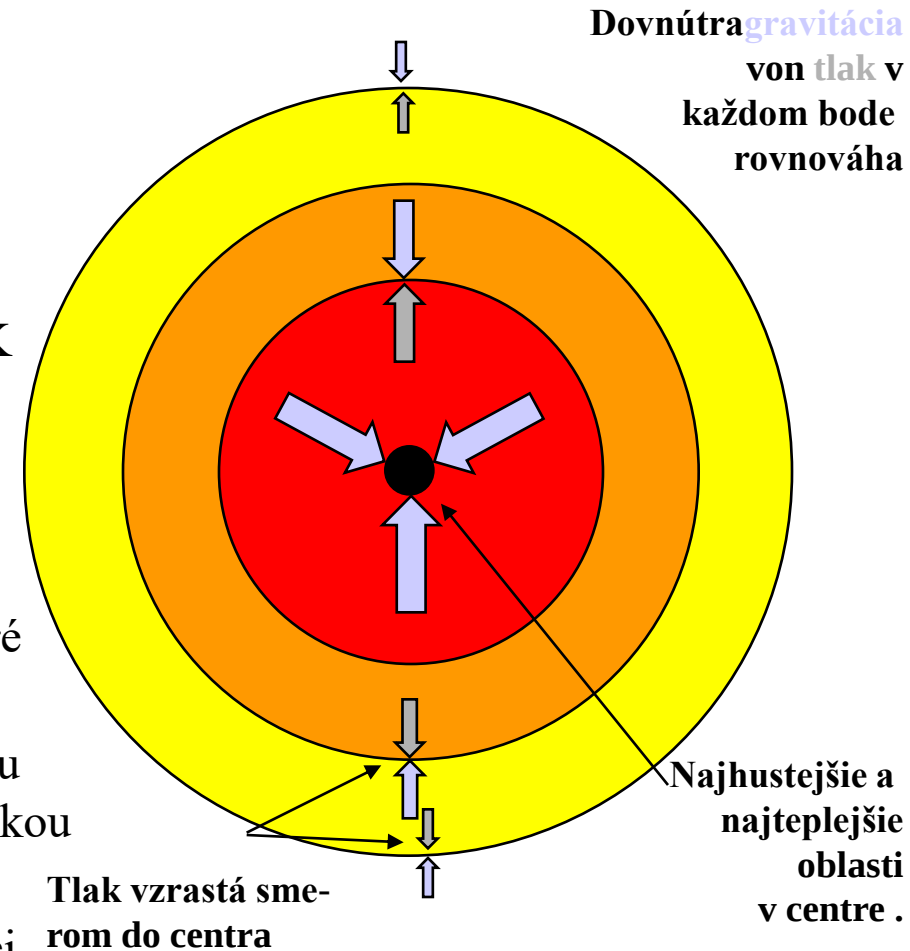


Fúzia vo hviezdach

Fúzia je zdrojom energie pre hviezdy a tie sú zdrojom všetkých prvkov vo vesmíre ťažších ako vodík, t.j. hélium, lítium... železo

Štruktúra hviezd

- Slnko je guľa horúceho plynu
 - zložené z 75% H, 25% He + stopové množstvá ťažších prvkov
 - emituje žiarenie ČT (s absorbčnými čiarami) s efektívnou teplotou $\sim 5,500$ K
- Stabilný systém-hydrostatická rovnováha
 - rovnováha medzi gravitačnými silami, ktoré stláčajú hviezdu a tlakom síl, ktoré ju chcú roztrhnúť
 - každá vrstva musí vykompenzovať váhu vrstiev nad ňou, takže tlak vzrastá s hĺbkou pod povrchom
 - vyšší tlak vedie k vyššej teplote a vyššej hustote
 - teplota v centre je ~ 15 miliónov Kelvinov a hustota v centre je vyššia ako u olova



Fúzia vzniká v jadrách hviezd

- Ak sa plyn vo hviezde dostatočne stlačí, v centre hviezdy začne horieť vodík, vzniká “popol” - hélium, koncentrácia vodíka klesá
- postupne je vodíka nedostatok, fúzia sa spomalí, hviezda chladne, tlak klesá a hviezda sa začne zmršťovať a centrálna teplota začne znova narastať
- Nakoniec teplota dosiahne ~100 million Kelvin, čo zapáli horenie hélia, z ktorého vzniká uhlík

Spaľovanie vodíka na hélium protón-protónový cyklus

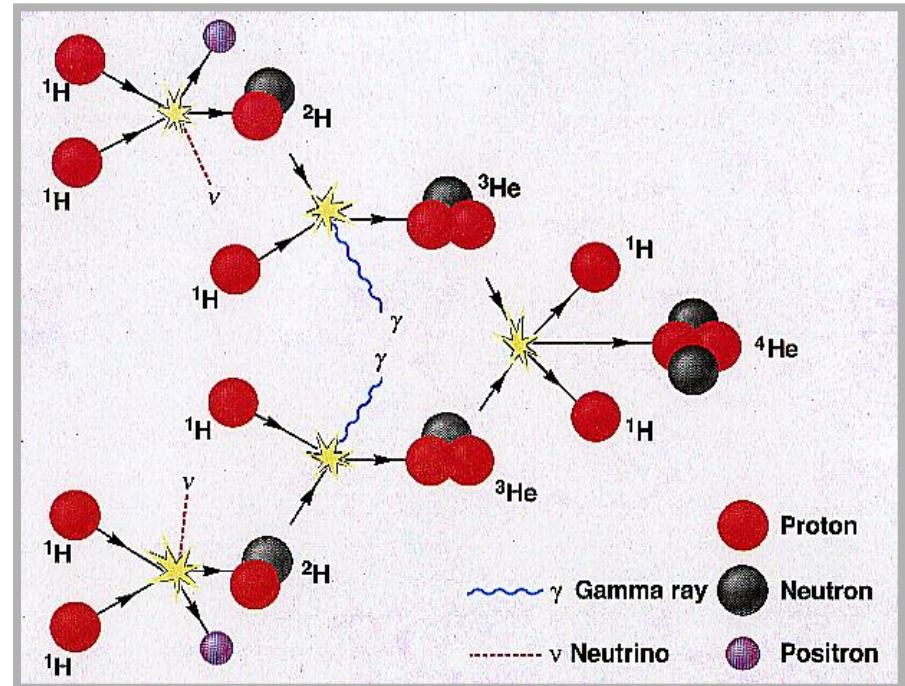


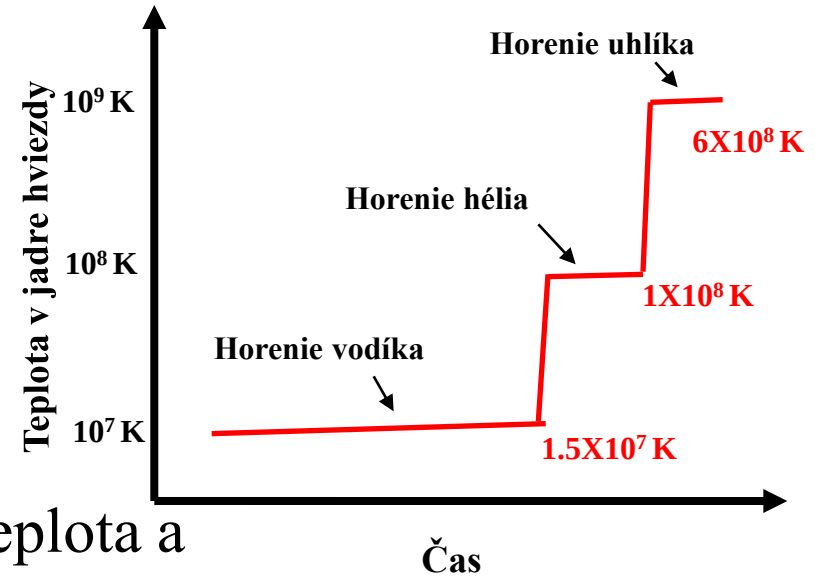
Figure from *Foundations of Astronomy* by M. Seeds

Energetické fotóny môžu rozštiepiť jadrá.

Vývoj hviezd a produkcia prvkov

- Postup fúzie

- vodík zhorí na hélium
- hélium zhorí na uhlík a kyslík
- uhlík a kyslík zhoria na kremík
- kremík zhorí na železo
- fúzia nepokračuje!



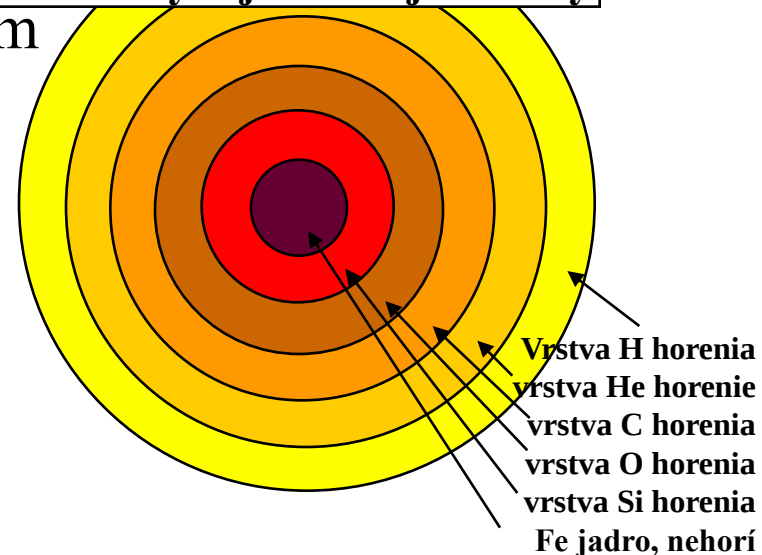
- Po zhorení paliva v každom štádiu teplota a hustota vzrastie a fúzia pokračuje

- V každom štádiu sa “popol” stane palivom pre nasledujúce štádium

- Dostatočne ťažka hviezda - končí ako supernova

- produkty fúzie sú vymrštené do okolia
- Vznikajú nové hviezdy recyklujúce úlomky

Fúzia v pokročilom štádiu vývoja veľkej hviezdy





Problém hélia

- Pozorované koncentrácie prvkov
 - Vodík 75%
 - Hélium 24%
 - všetko ostatné ~1%
- Nukleosyntéza v hviezdach
 - hélium zhorí na ťažšie prvky ako napr. uhlík
 - Očakávame preto približne rovnaké koncentrácie hélia ako ťažších prvkov
 - Pomer 75% H, 13% He, 12% ostatné
 - Nukleosyntéza však začala nie len z vodíka, ale aj hélia
- Ranný vesmír
 - Vhodné podmienky pre nukleosyntézu?

Primordiálna Nukleosyntéza

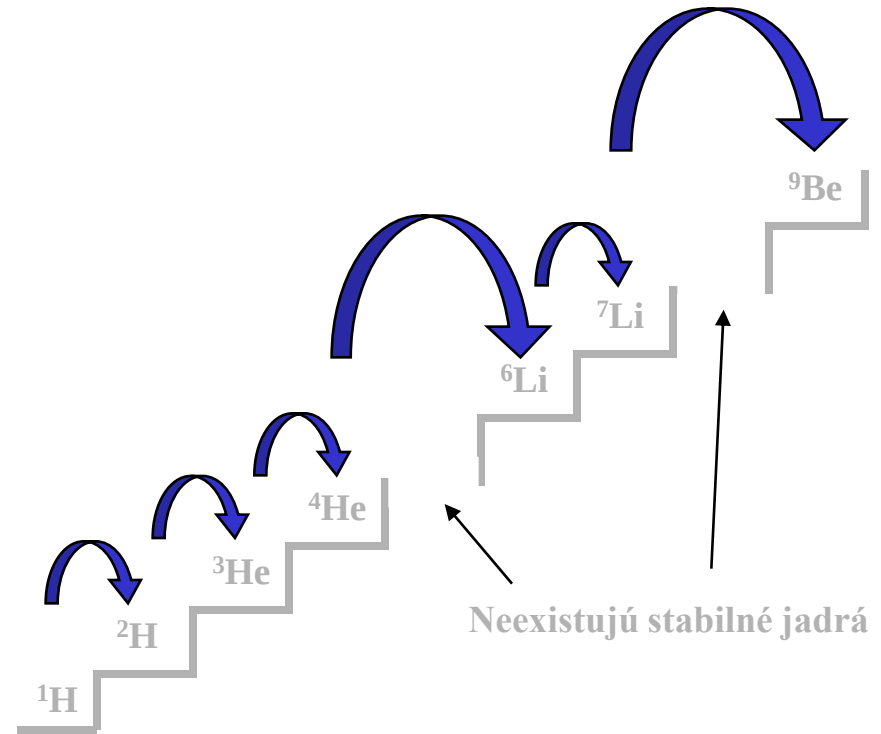
- čas < 15s, Teplota > 3 miliardy Kelvinov
 - vesmír je zmesou protónov, elektrónov a exotických častíc
 - teplota je taká veľká, že jadrá sa rozpadajú krátko po vzniku po zrážke s vysokoenergetickými fotónmi
- čas = 15s, Teplota = 3 miliardy Kelvinov
 - Stále príliš teplo, aby prežilo deutérium
 - Dost' chladno na prežitie hélia, ale príliš málo D jadier
- čas = 3min, Teplota = 1 miliarda Kelvinov
 - Deuterium prežije po svojom vytvorení
 - po vzniku deuterium rýchlo fúzuje na He, ale proces je spomaľovaný nedostatkom deutéria
 - neexistujú stabilné častice s 5 alebo 8 nukleónmi, čo obmedzuje formovanie prvkov ťažších ako hélium
 - stopové (merateľné) množstvá lítia sa syntetizujú
- čas = 35min, Teplota = 300 miliónov Kelvinov
 - nukleosyntéza v podstate skončená
 - dost' teplo pre fúziu hélia, ale jeho hustota je nepostačujúca

**Model dáva veľmi presné
predpovede pre koncentrácie
ľahkých prvkov
 ^2H , ^3He , ^4He a ^7Li .**

Čo pozorovania?

Primodiálna nukleosyntéza versus Nukleosyntéza vo Hviezdach

- Timescale
 - Nukleosyntéza vo hviezdach (SN):
miliardy rokov
 - Primordiálne nukleosyntéza (PN):
minuty
- Vývoj teploty
 - SN: slabý vzostup s časom
 - PN: rýchle chladnutie
- Hustota
 - SN: 100 g/cm^3
 - PN: 10^{-5} g/cm^3 (ako vzduch v tu)
- Pomer fotónov k baryónom
 - SN: menej ako 1
 - PN: viac ako miliarda

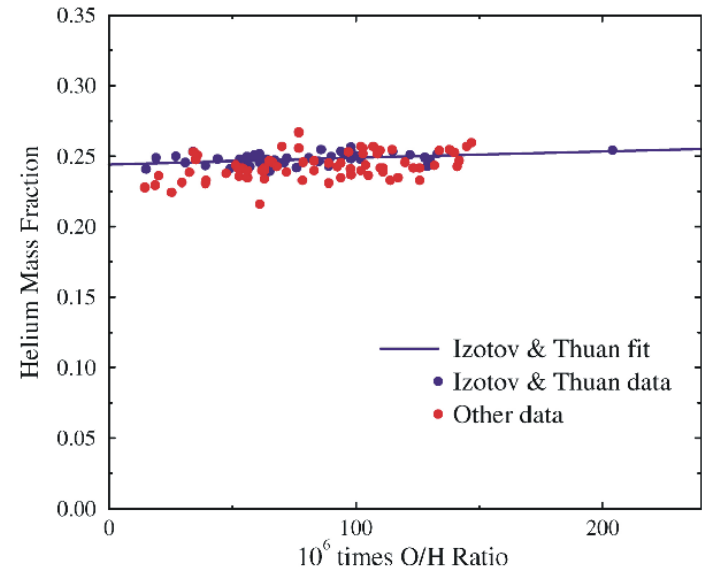


Nedostatok stabilných jadier s hmotnostným číslom 5 a 8 znemožňuje pokračovať primordiálnej nukleosyntéze za prvky Lítium a dokonca Hélium

Pozorovania ľahkých prvkov He a Li

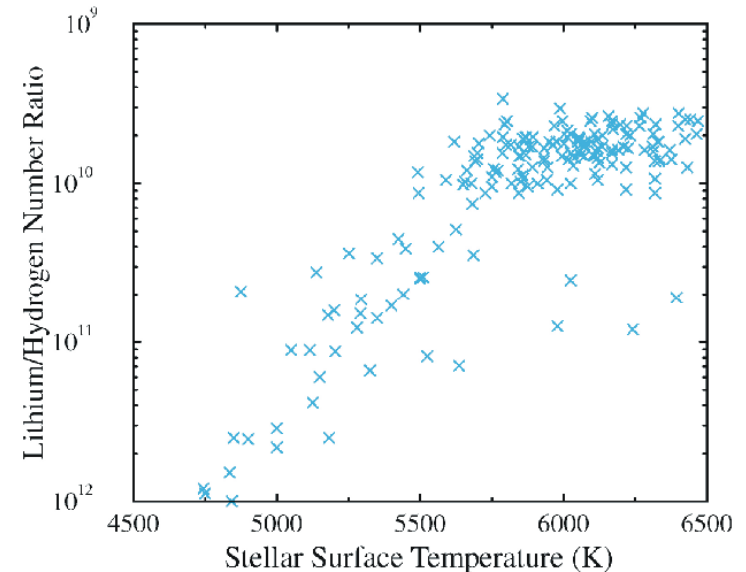
- Koncentrácia hélia

- meraná v starých hviezdach s najnižšou pozorovanou koncentráciou ťažších prvkov ako kyslík
- pokus nájsť hviezdu s najnižšou kontamináciou z nukleosyntézy vo hviezde



- Koncentrácia lítia

- meraná vo hviezdach
- lítium je ľahko zničiteľné vo hviezdach
- focus na ľahké hviezdy (nižšia teplota povrchu) s dobre premixovaným materiálom v jadre



Periodic Table of the Elements

Periodic Table of the Elements

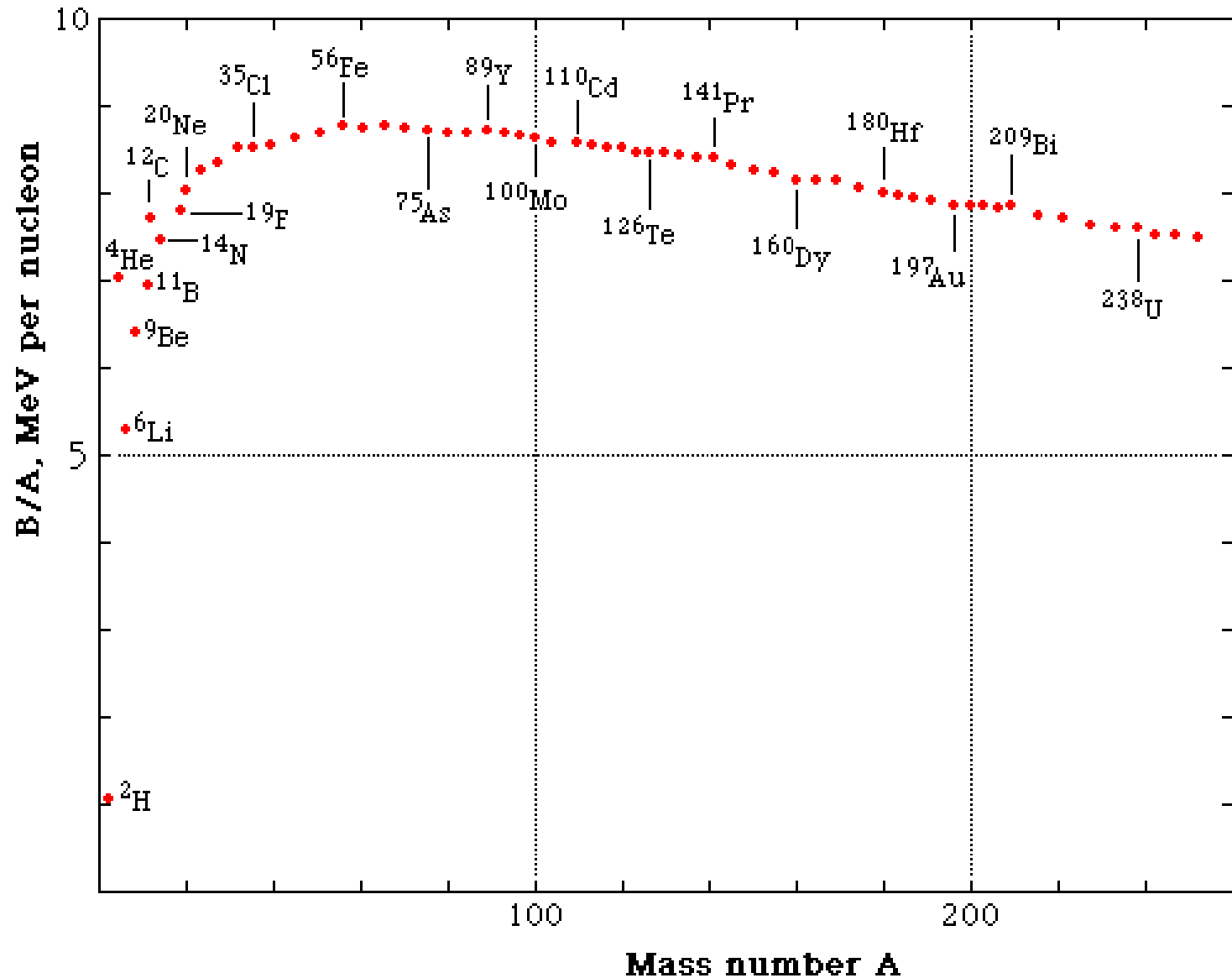
	IA																	0
1	1 H	IIA																2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	—— VII ——	IB	IB			13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 *La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 +Ac	104 Rf	105 Ha	106 106	107 107	108 108	109 109	110 110								

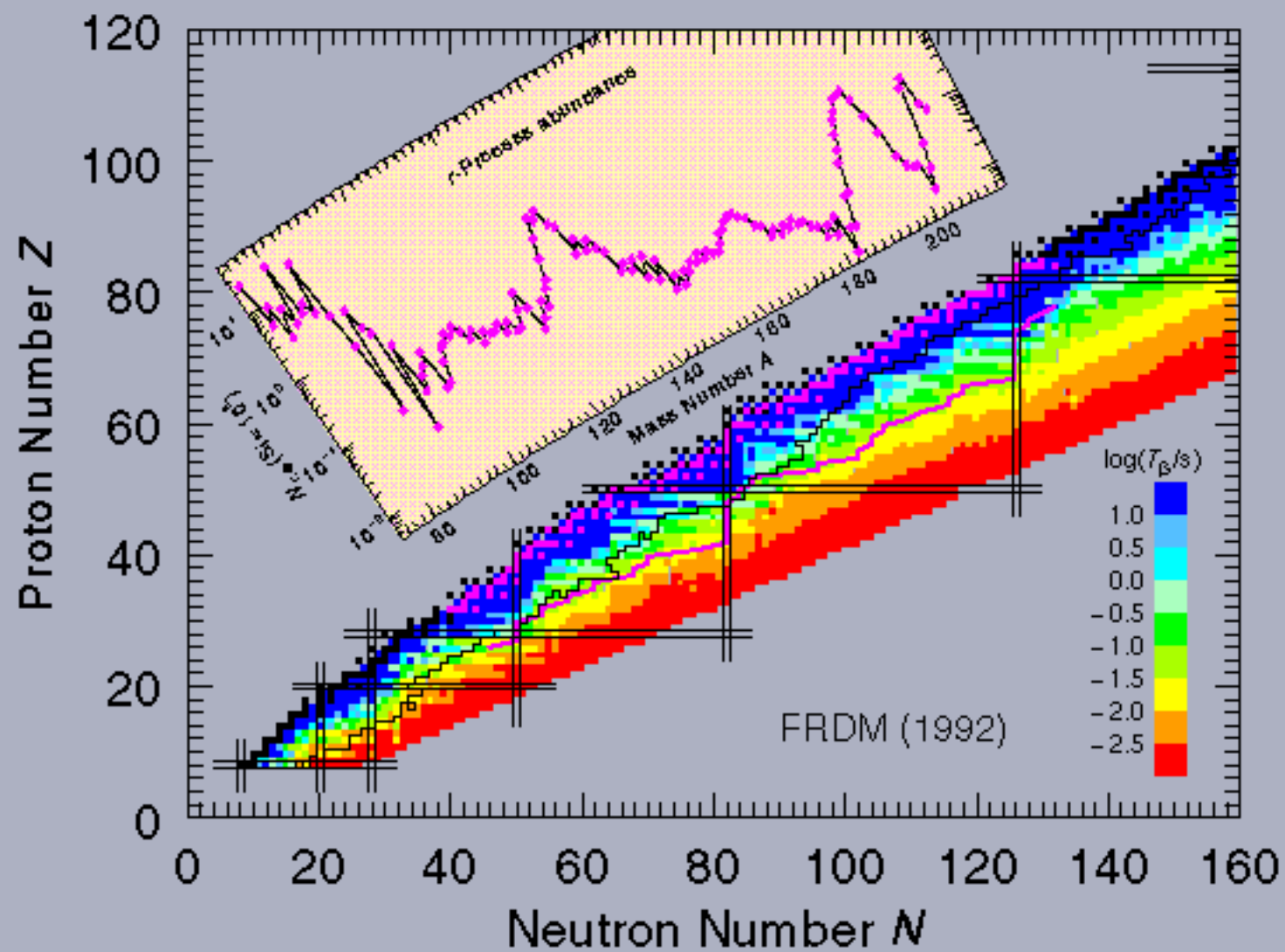
* Lanthanide
Series

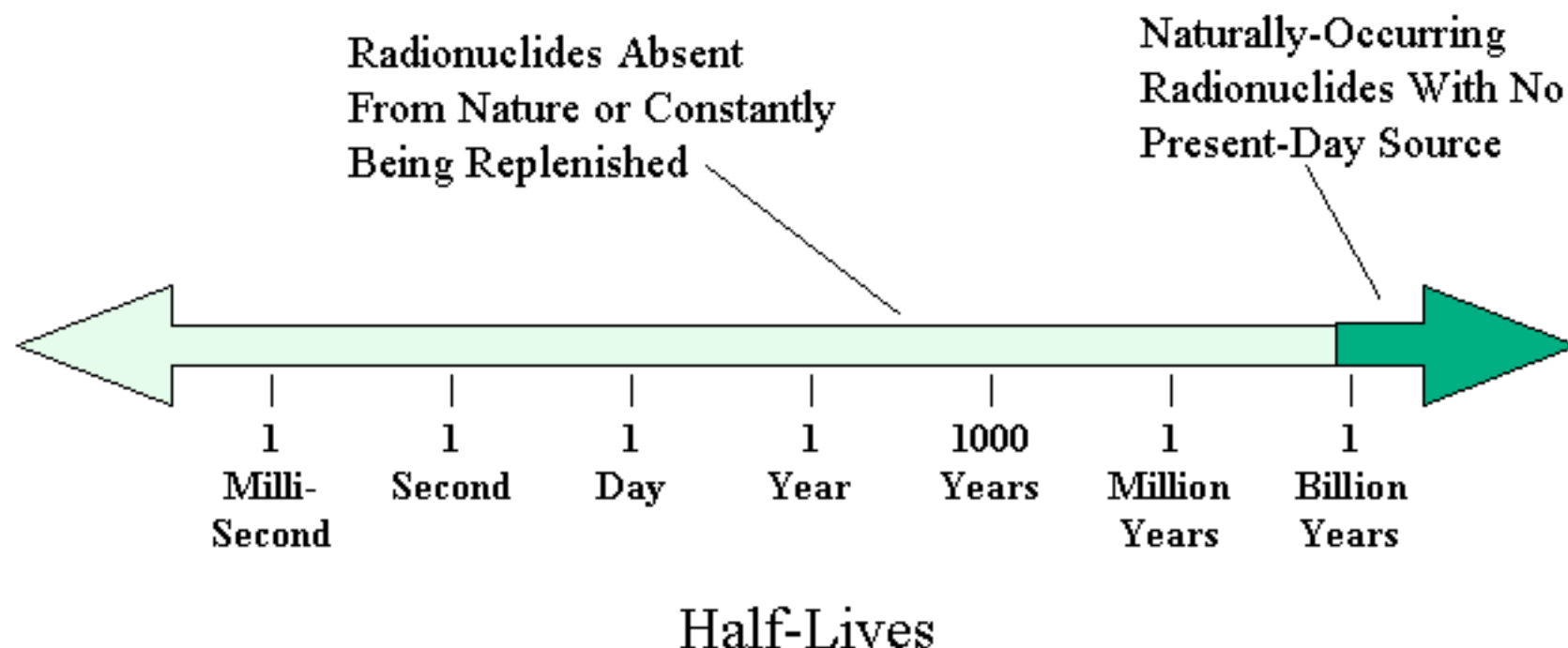
+ Actinide
Series

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Väzbová energia na nukleón

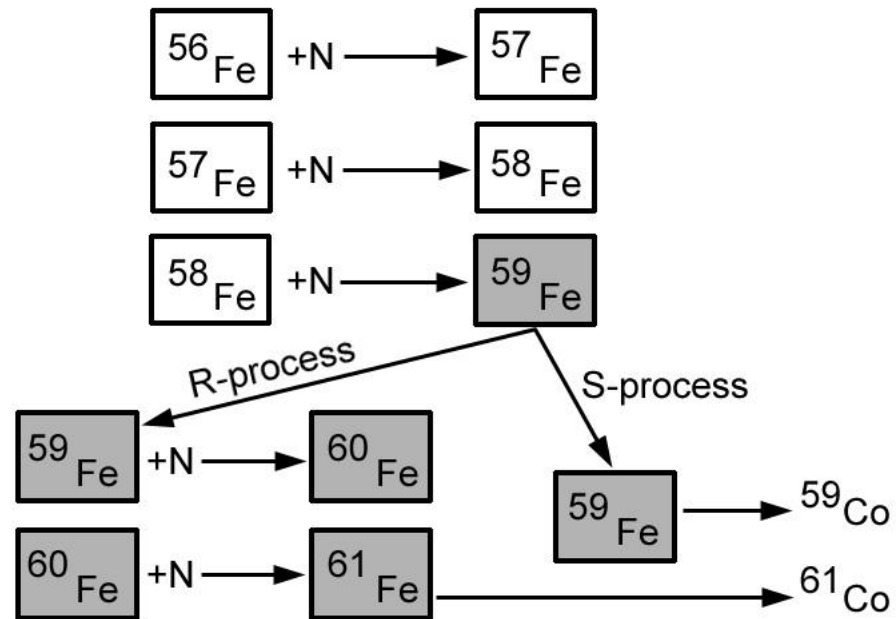


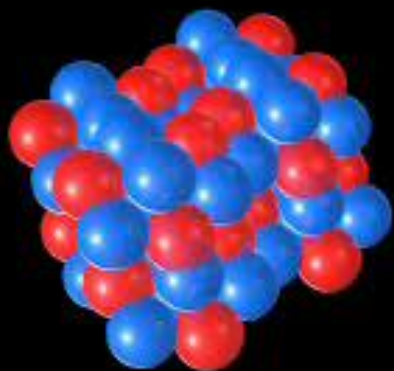




Formation of Cobalt from Neutron Capture

= stable isotope = unstable isotope





SLOW



PROTONS:

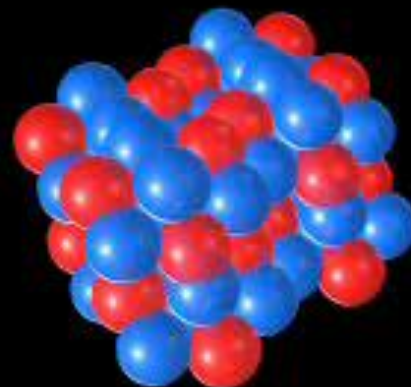
28

NEUTRONS:

28

ELEMENT:

IRON 56



RAPID

PROTONS:

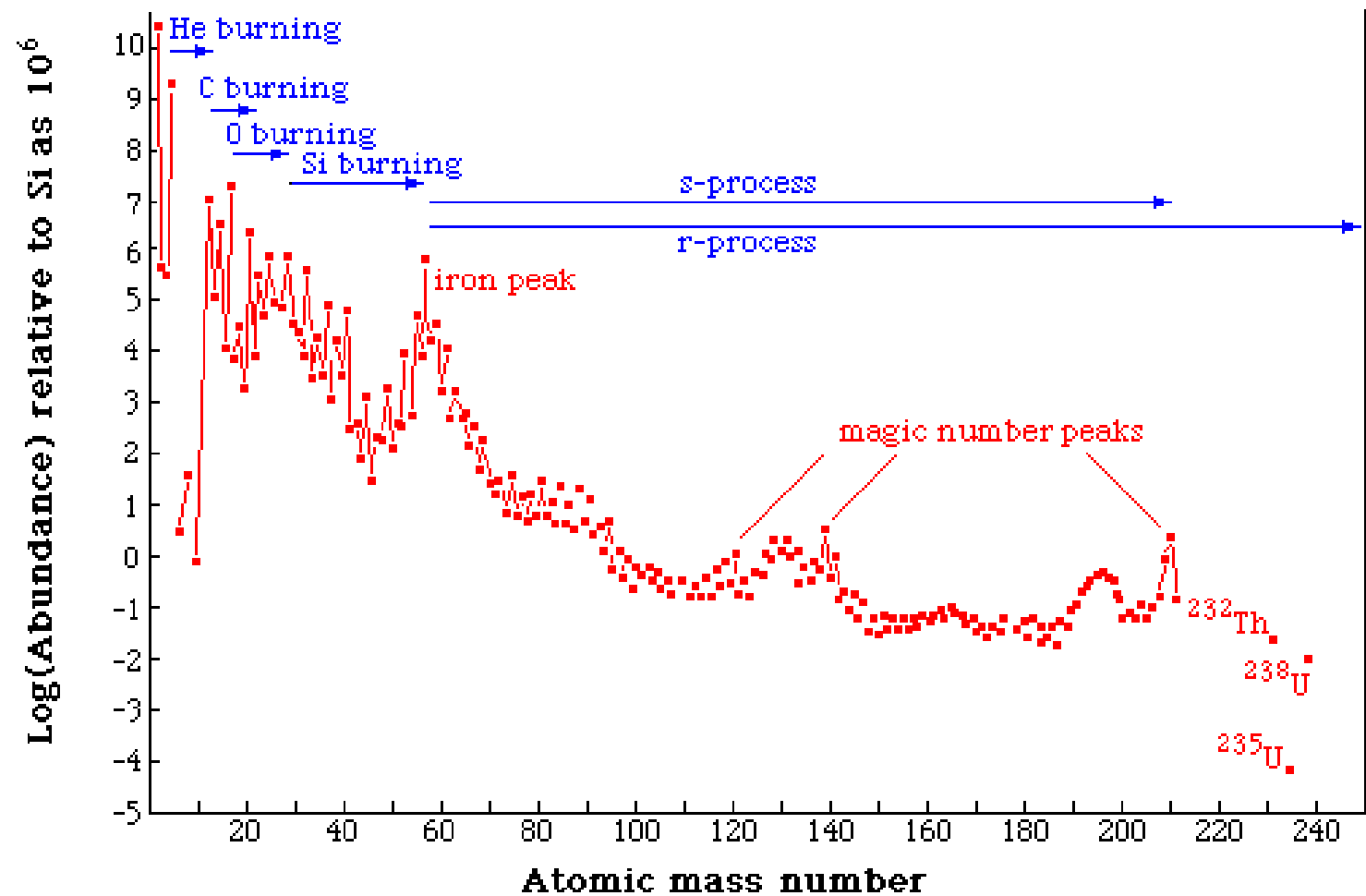
28

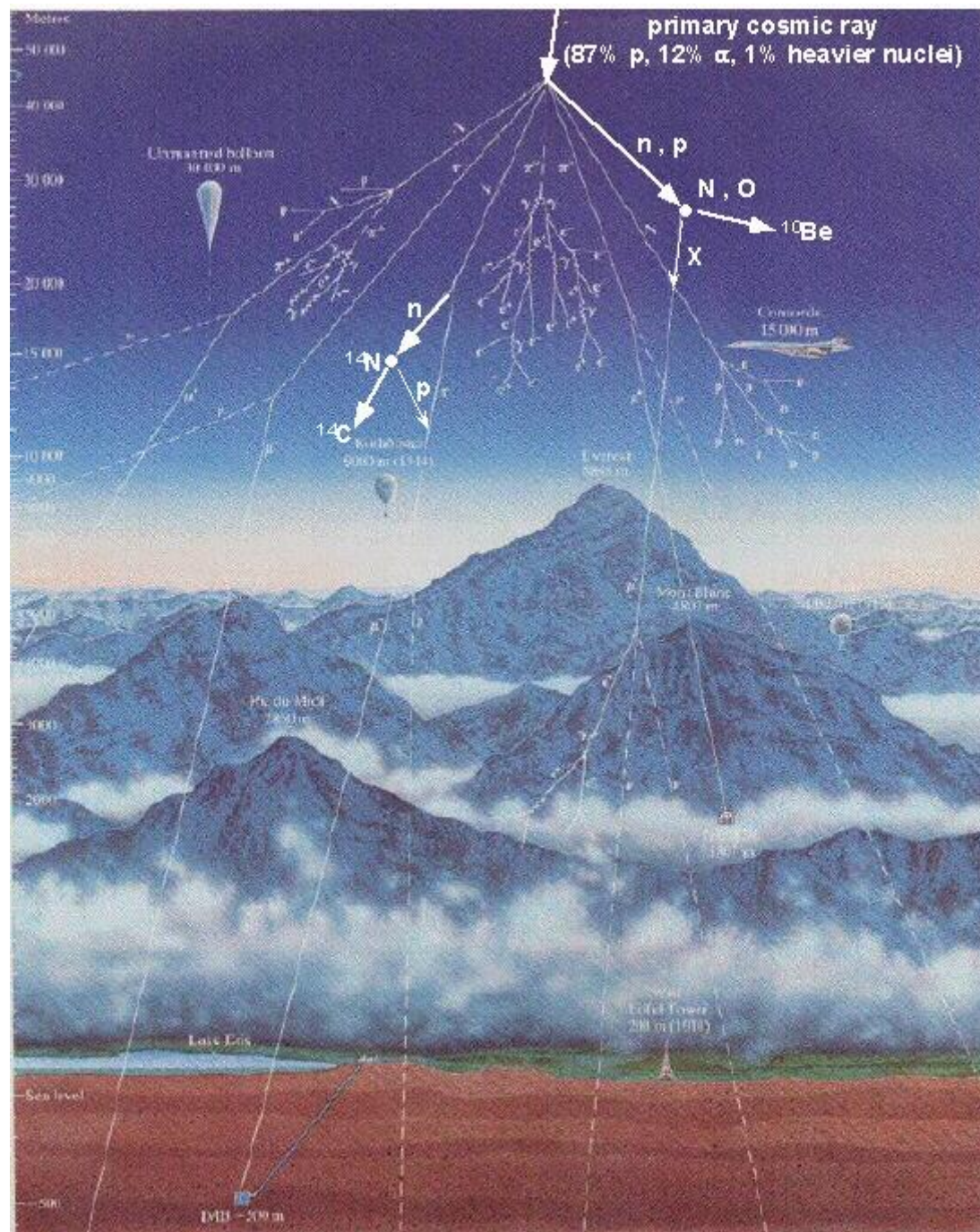
NEUTRONS:

28

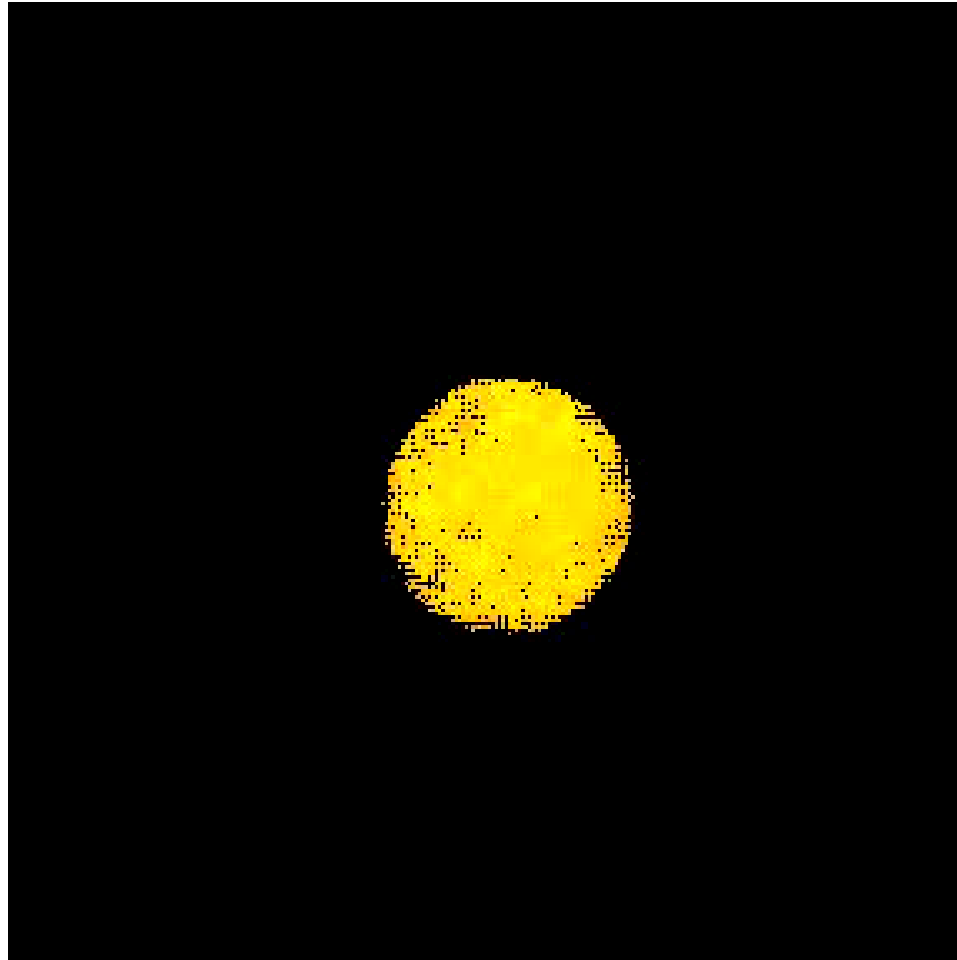
ELEMENT:

IRON 56

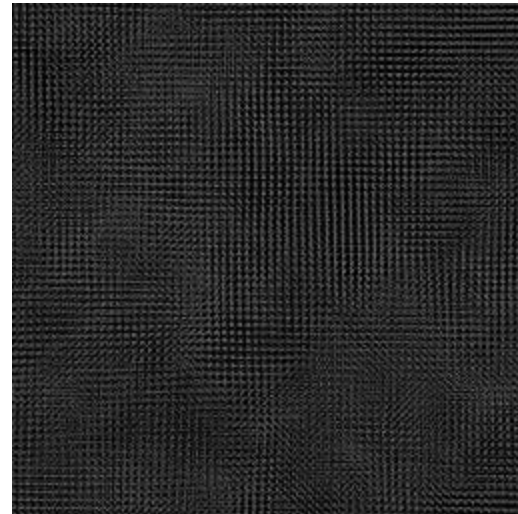
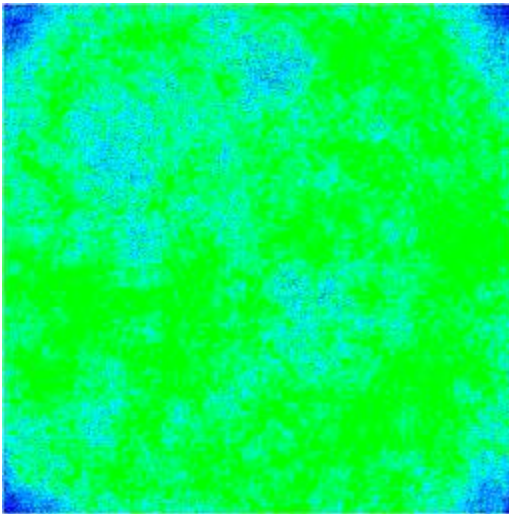




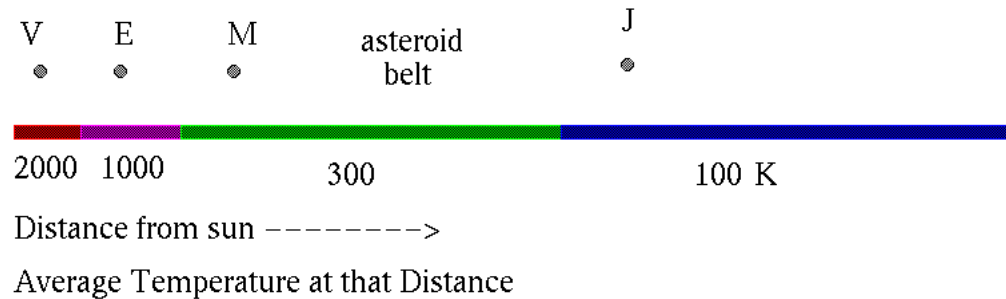
Po rekombinácii existovali nehomogenity
v koncentrácii hmoty, okolo ktorých sa
hromadil materiál



Z nich postupne rástla megaštruktúra vesmíru

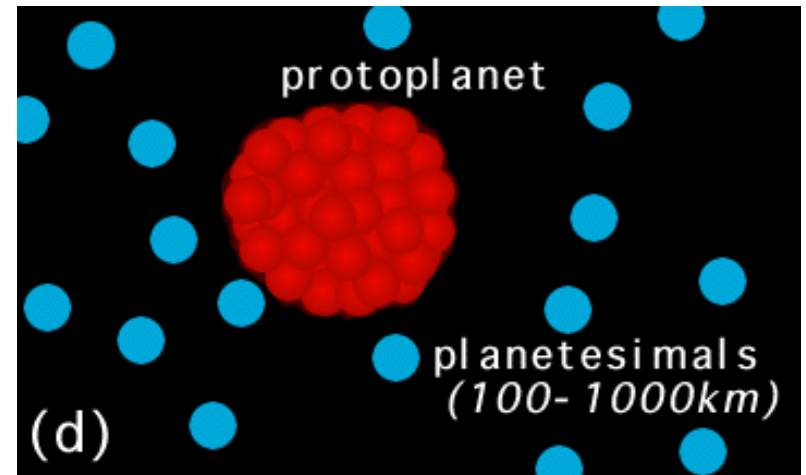
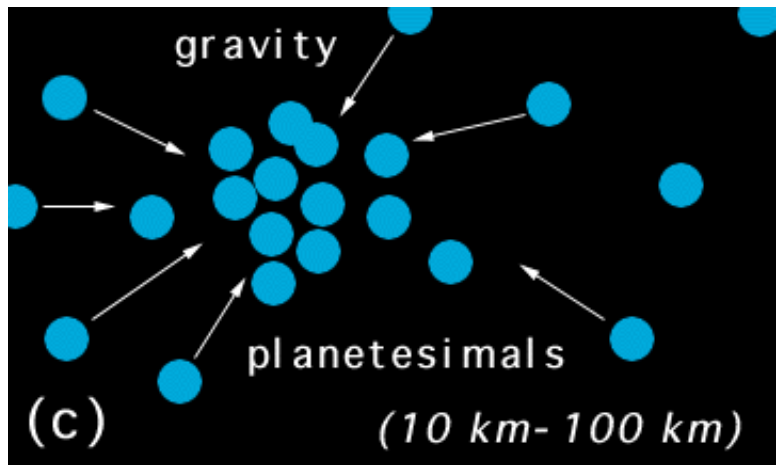
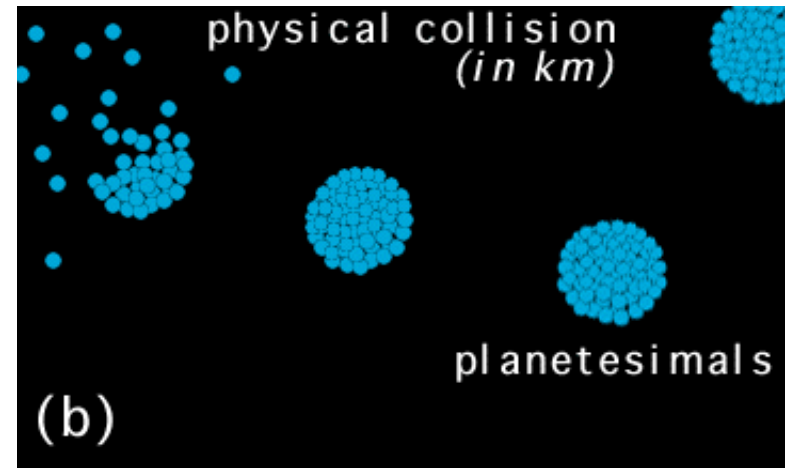
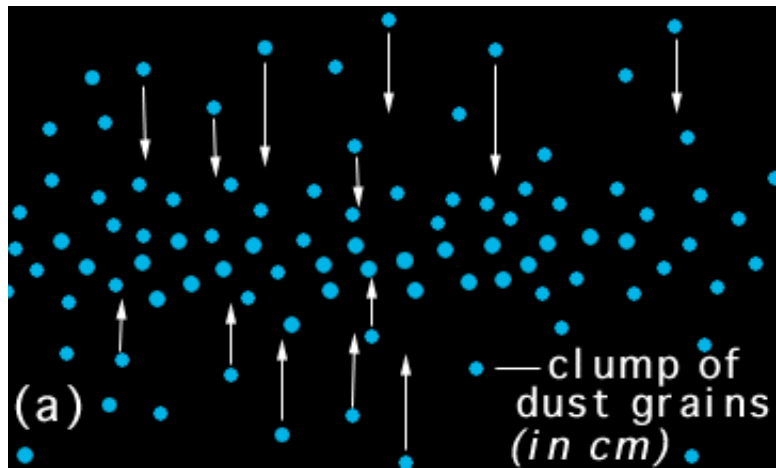


Solárna hmlovina 90% ľad a 10% zrná



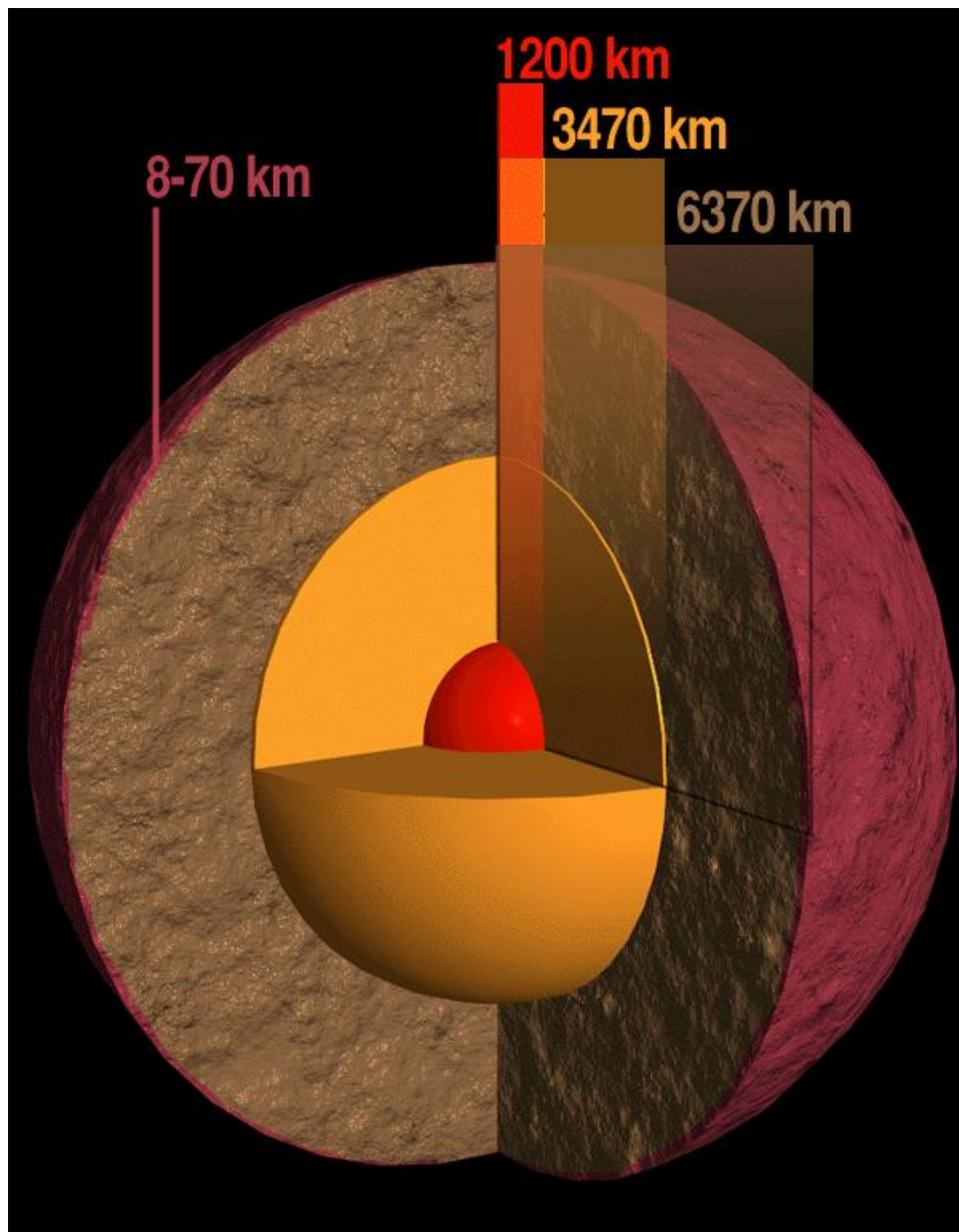
- Vo vnútornej slnečnej sústave len kamenisté planéty (Čo voda?)
- Vonkajšie planéty plynné

Postupný rast objektov v Slnovej sústave



Hlavné medzníky pri formovaní Zeme

- pôvodná protozem bola neskôr roztavená
- materiál s veľkou hustotou (Ni a Fe) sa skoncentroval v centre
- ľahší materiál, roztavené kremičitany zostali na povrchu
- Zem chladla a tuhla, pričom sa vytvorilo základné jadro, plášť a kôra
- priemerná hustota Zeme je $5,5 \text{ g/cm}^3$
- Zem má mnoho zachytených plynov vo vnútri



Dôležité faktory ovplyvňujúce vznik života na Zemi

- rozmer Zeme**
- vzdialenosť Slnko-Zem**
- rýchlosť otáčania sa okolo vlastnej osi**
- zachytenie prchavých prvkov z nebulárnej hmloviny**

S týmito faktormi súvisí najmä:

- existencia vody v kvapalnom stave**
- existencia atmosféry obsahujúcej kyslík**
- kontrola teploty**

Zloženie vulkanických plynov

Vodné pary 60%

Oxid uhličitý 24%

Síra 13%

Dusík 5.7%

Argón 0.3%

Chlór 0.1%

**Vulkanická činnosť samotná nebola
zdrojom vody**

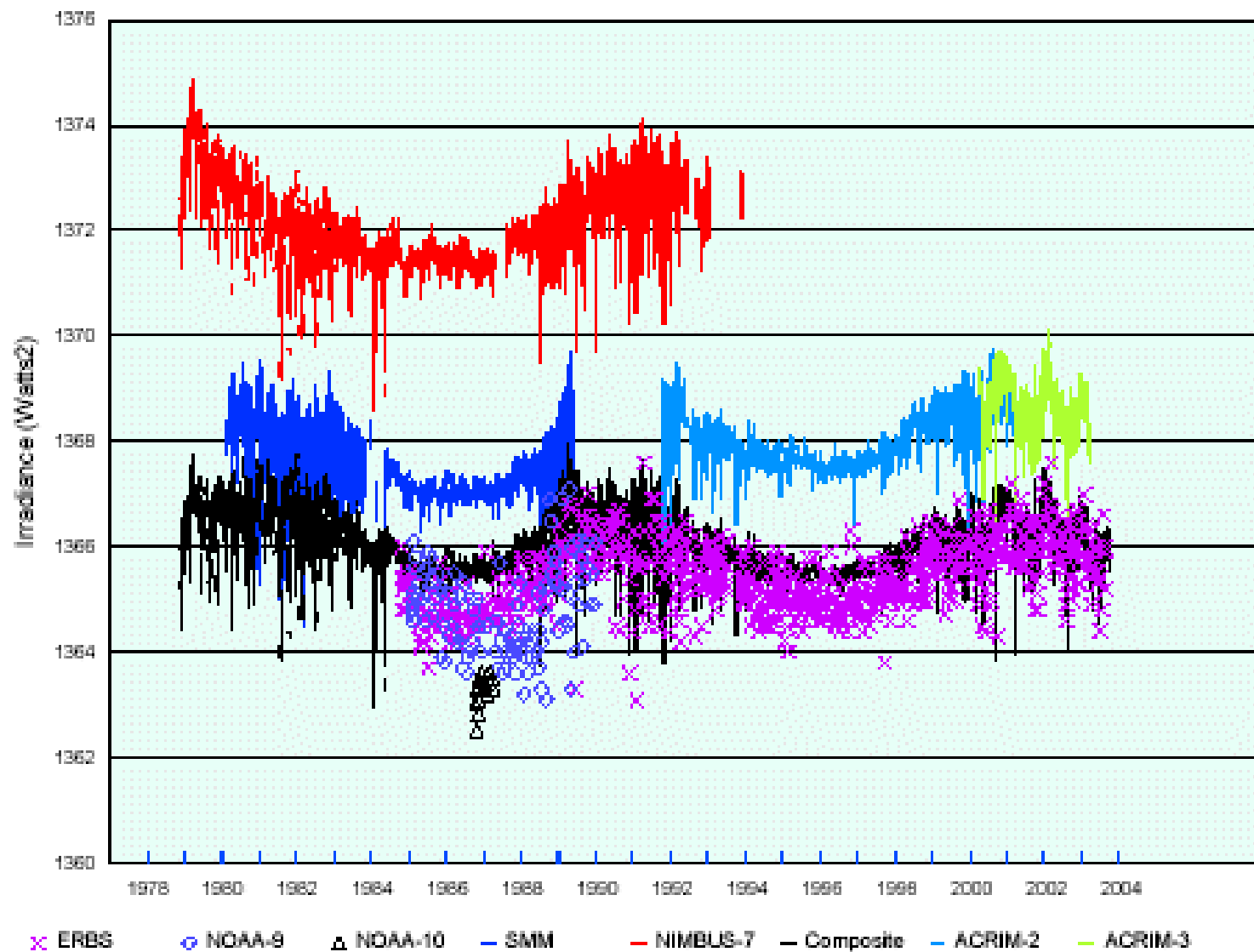
Základné požiadavky na dostatok vody na planéte (1%)

- planéta musela zachytiť dostatok vody pri formovaní
- voda sa z vnútra planéty musela dostať na povrch
- Vulkány
- z povrchu sa nestratila do okolia
(gravitácia, hmotnosť molekuly $2m$ niekoľko P_e niekoľko rádov
He milión rokov, Ne miliardy rokov, každá stotisícna molekula vody
je v atmosfére, troposfére)
- musí byť väčšinou v tekutom stave

Teplota

- príkon od Slnka
(absolútne čierne teleso -5 st. Celzia)
- reflexia povrchu planéty (33% -20 st. Celzia)
- skleníkový efekt atmosféry
 - Voda, kyslíčnik uľičitý, metán, kyslíčnik dusičný 10 st. Celzia
 - (gravitácia, hmotnosť molekuly 2m niekoľko P_e niekoľko rádov
 - CO_2 viazané v $CaCO_3$ a voľné v atmosfére - cyklus
 - Ak CO_2 v atmosfére narastá
 1. planéta sa ohreje
 2. viac zrážok
 3. Zvýši sa obsah CO_2 v pôde
- precesia Zeme

Total Solar Irradiance

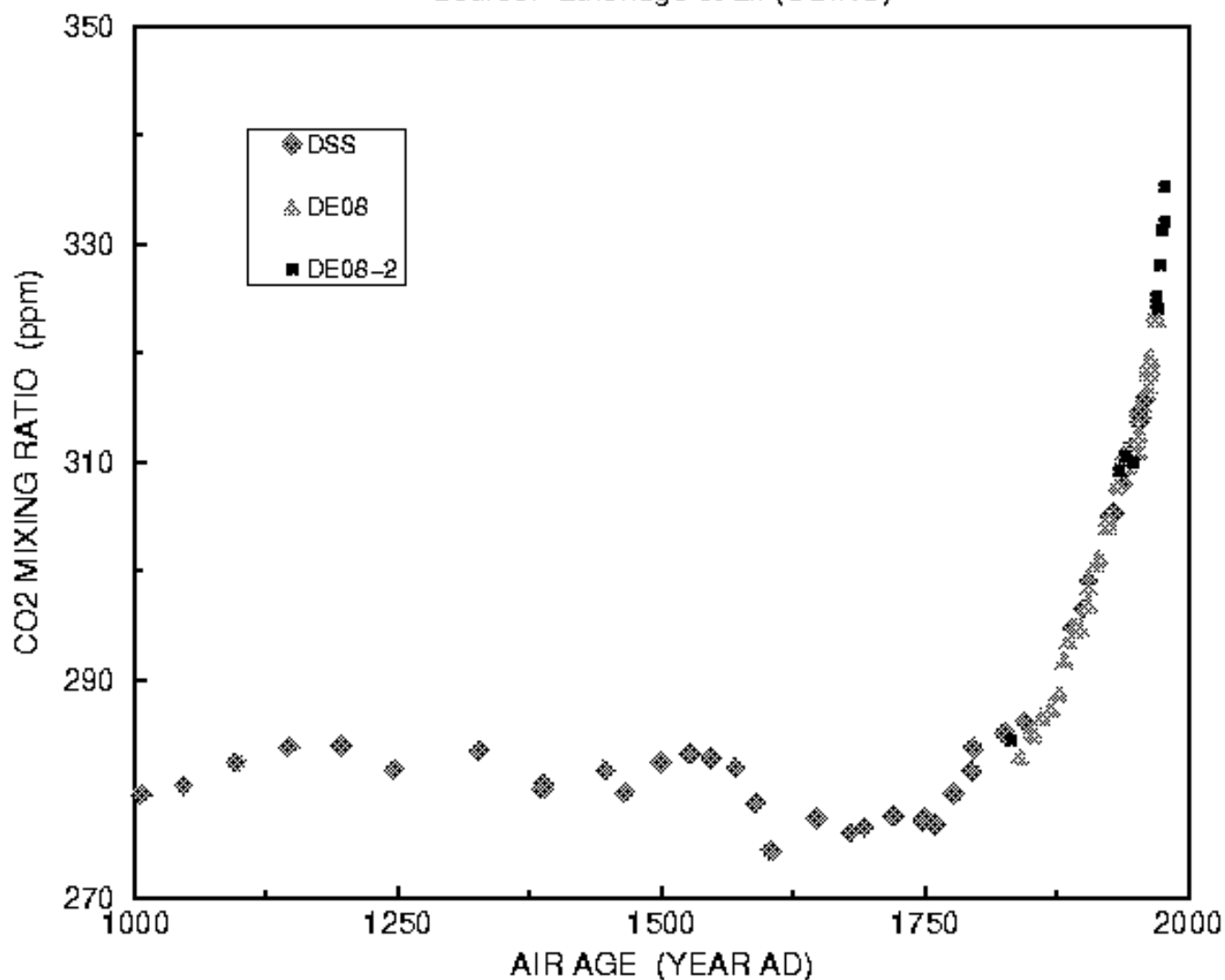


Kyslík

- z vody rozloženej vo vrchných vrstvách atmosféry
 - algae jedna z prvých foriem
- fosílie 700 miliónov rokov staré

LAW DOME, ANTARCTICA ICE CORES

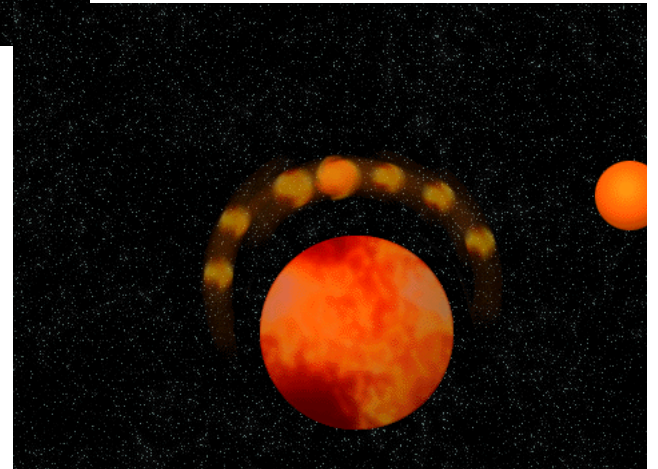
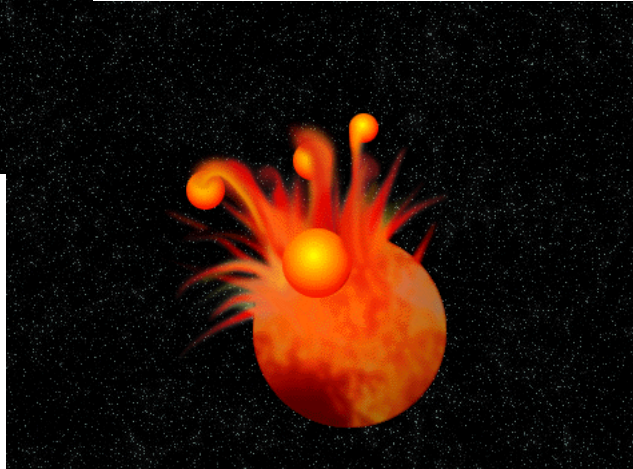
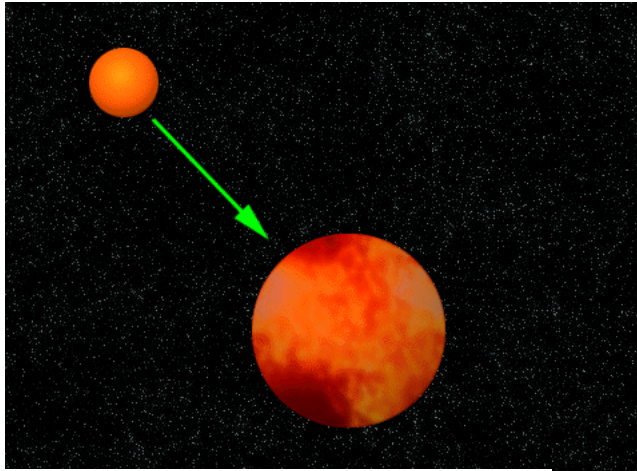
Source: Etheridge et al. (CSIRO)

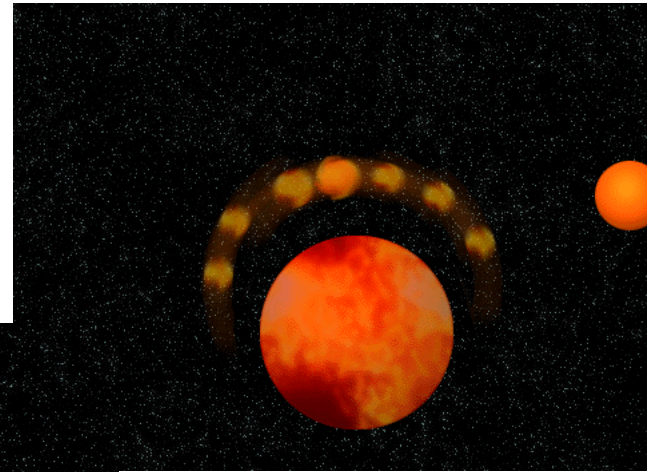
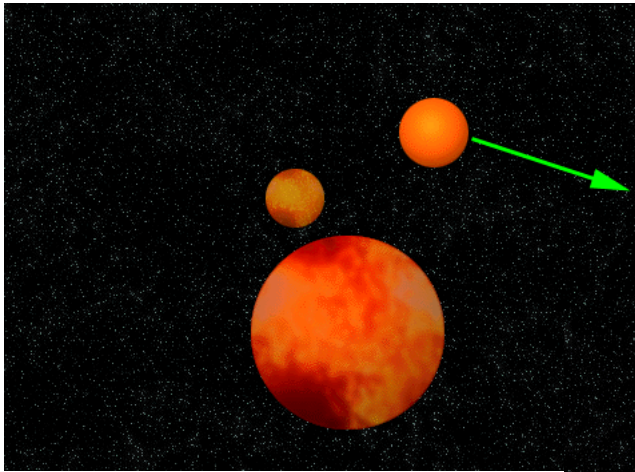
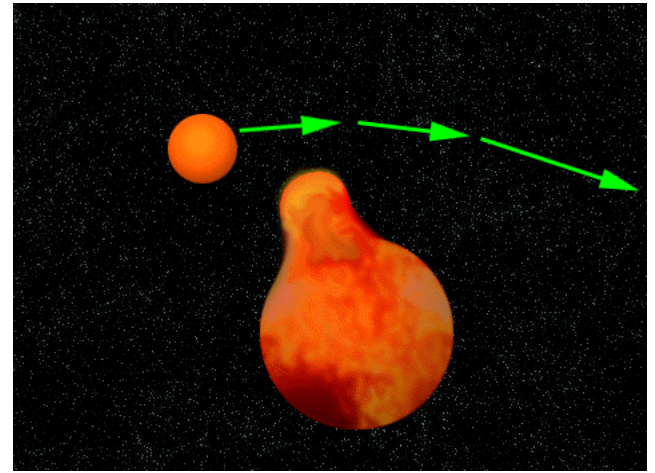
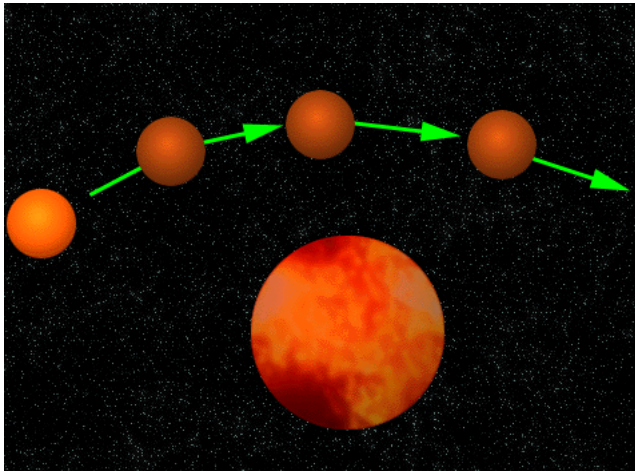


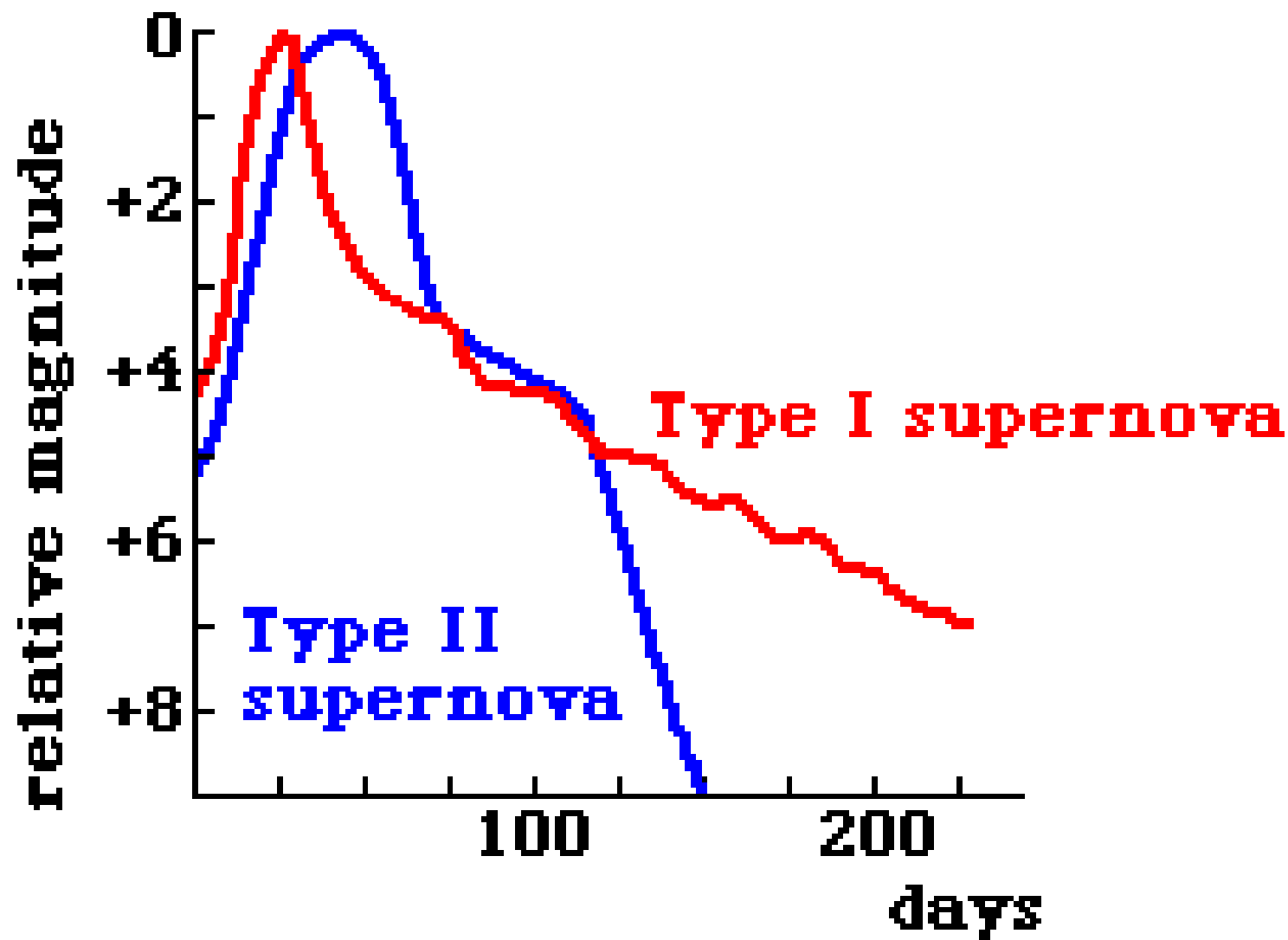
**Ťažké je “predpovedat’ ” aj minulosť,
nie to ešte budúcnosť. Ale aj tak...**

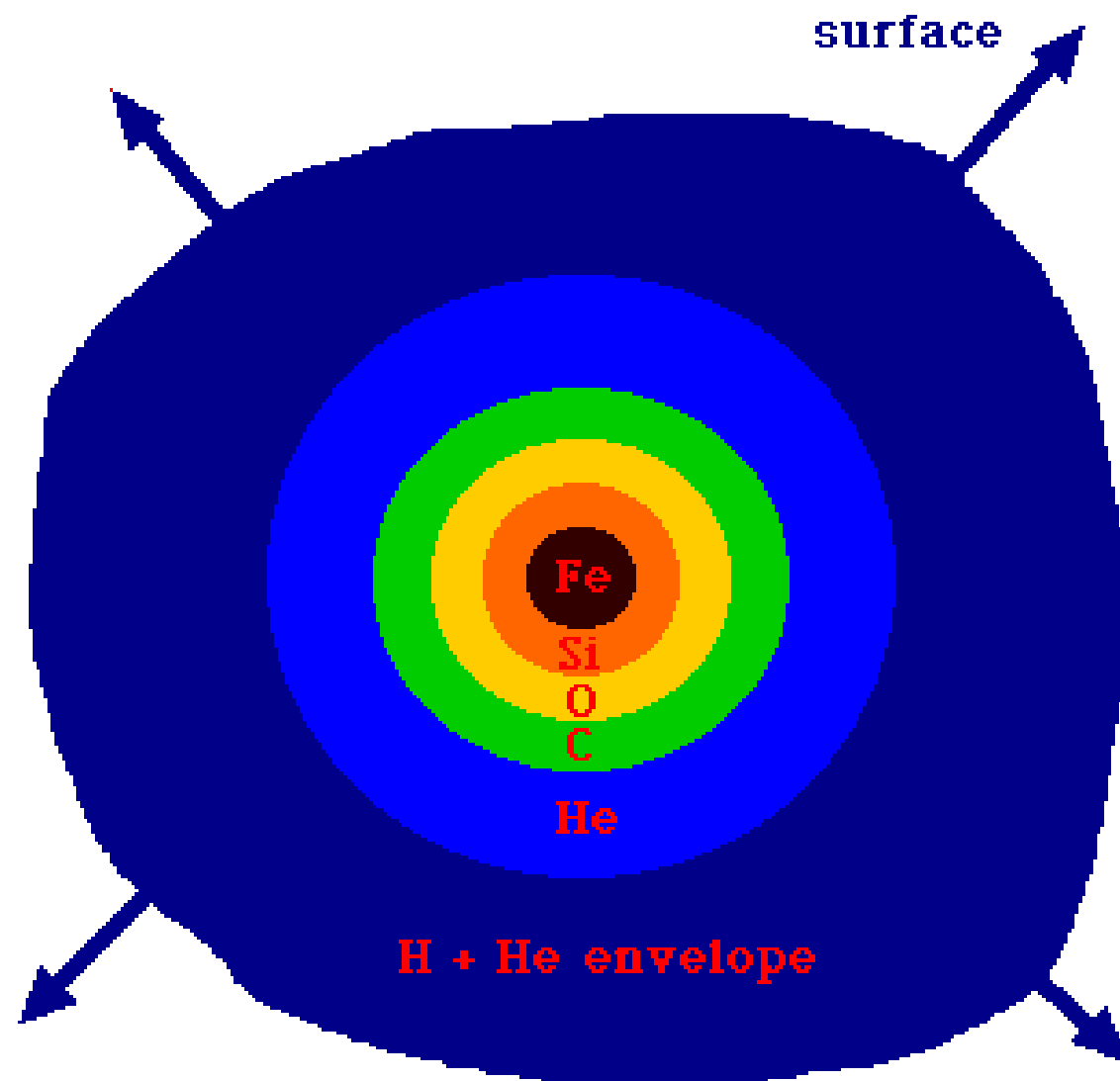
- * Budúcnosť- energie**
- * Budúcnosť- ľudstva**
- * Budúcnosť- klímy**
- * Budúcnosť- počítačov**
- * Budúcnosť- Zeme**
- * Budúcnosť- Slnka**
- * Budúcnosť- galaxie**
- * Budúcnosť- vesmíru**

Ďakujem za pozornosť



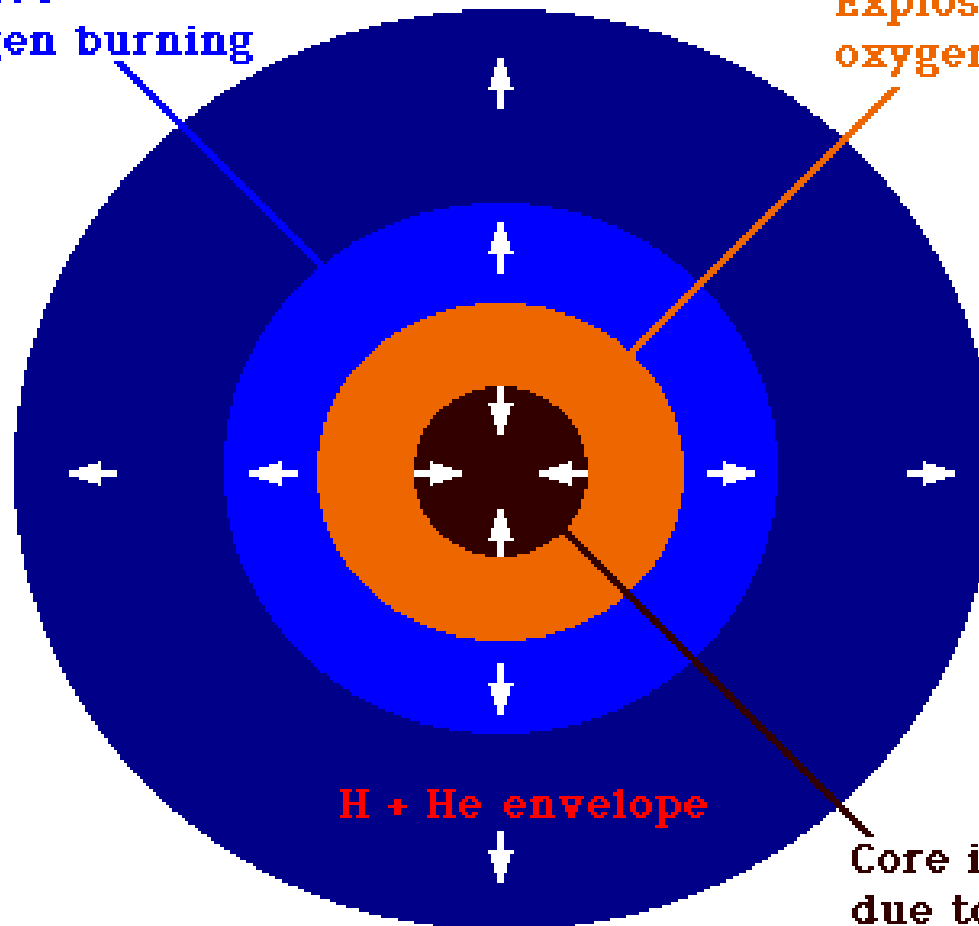






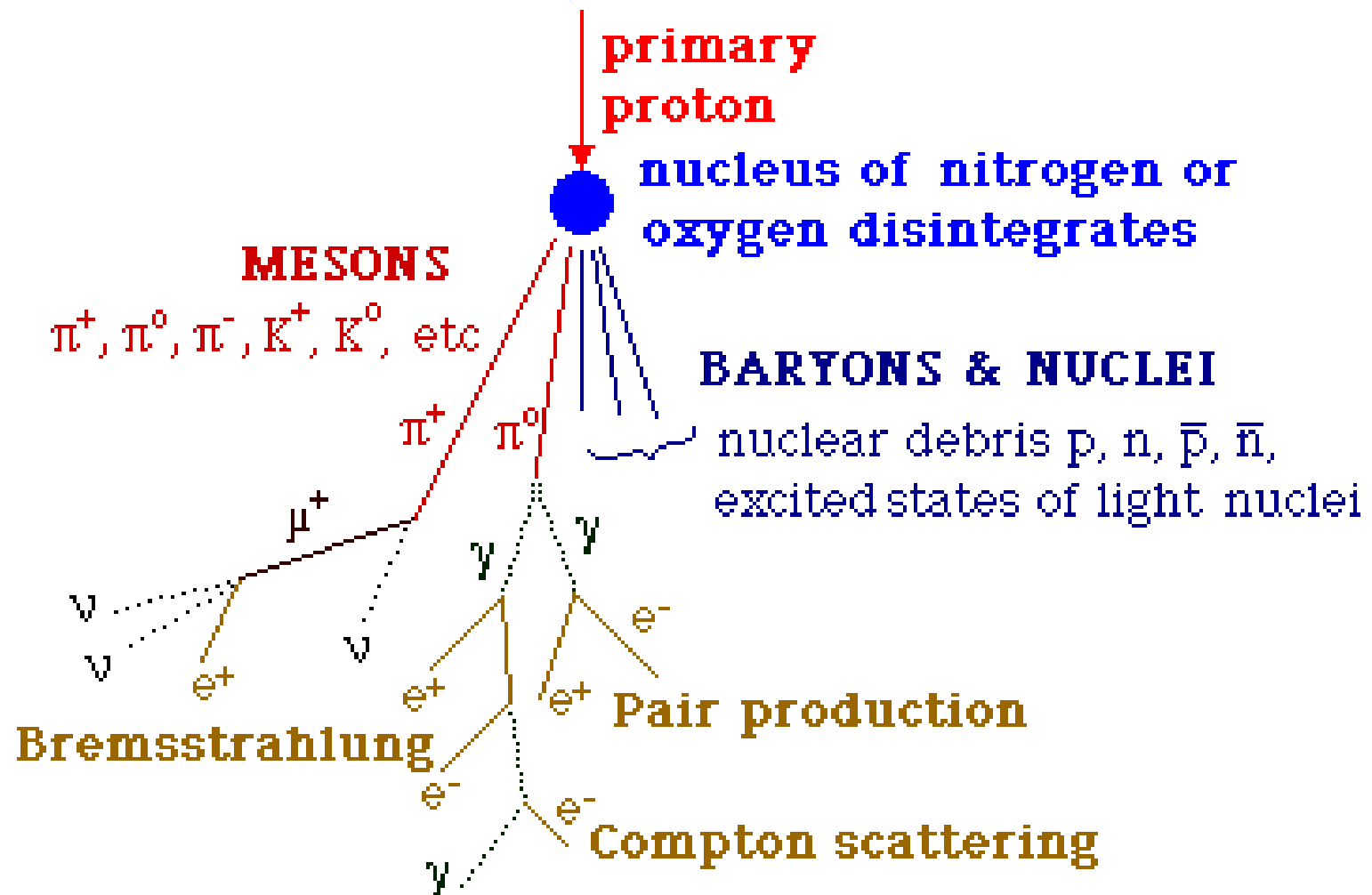
explosive
hydrogen burning

Explosive
oxygen burning



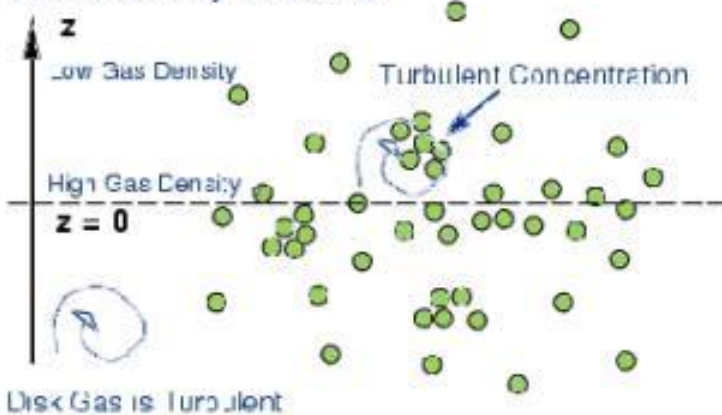
H + He envelope

Core implosion
due to Fe-He
phase change



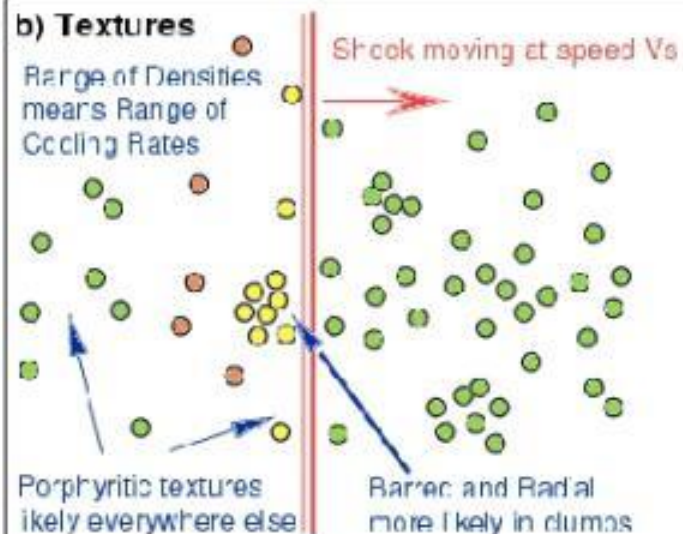
a) Before Shock

Chondrules Mixed with Gas and Concentrated by Turbulence



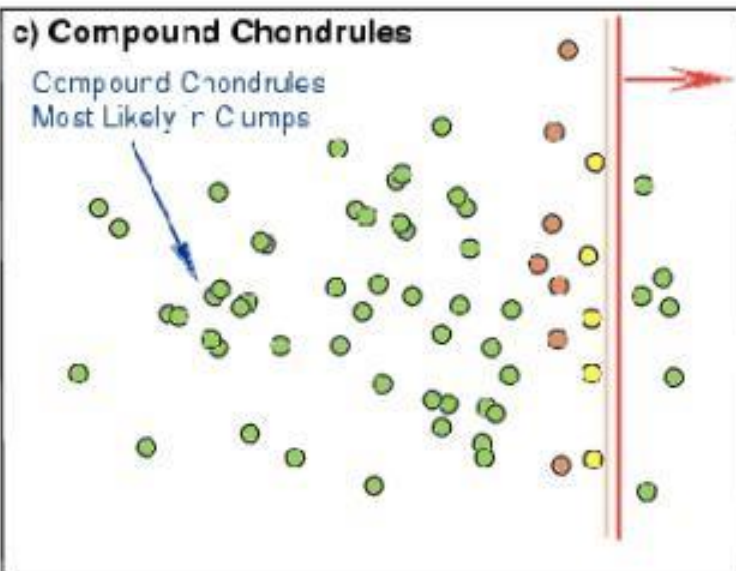
b) Textures

Range of Densities means Range of Cooling Rates



c) Compound Chondrules

Compound Chondrules Most Likely in Clumps



d) Long After Shock

Chondrules Sorted into Chondrites

