

GENEZE PRVKŮ

Jaromír Plešek, Ústav anorganické chemie AV-ČR, 250 68 Řež plesek@iic.cas.cz

ÚVOD

PRVKY, ATOMY, ISOTOPY, NUKLIDY

- DEFINICE
- BOHRŮV MODEL ATOMU
- MENDĚLEJEVOVA TABULKA PRVKŮ

KDY A KDE VZNIKLY PRVKY

- VODÍK A HELIUM, svědkové **Velkého třesku**
- OSTATNÍ PRVKY MIMO Li, Be, B, děti hvězd
- ANOMÁLNÍ TROJICE, vnukové hvězd
- POMĚRNÉ ZASTOUPENÍ HLAVNÍCH PRVKŮ VE VESMÍRU

VZNIK A VÝVOJ VESMÍRU

- STANDARDNÍ MODEL
- PRVNÍ TŘI MINUTY
- VESMÍRNÁ ČASOMÍRA

HVĚZDY JAKO VÝROBCI ZÁŘIVÉ ENERGIE I VĚTŠINY PRVKŮ

- SLUNCE JAKO SROVNÁVACÍ STANDARD

TERMONUKLEÁRNÍ SYNTÉZY POD LUPOU

- VODÍKOVÉ HOŘENÍ
- Proton- protonový a katalytický C-N-O cyklus
- HELIOVÉ HOŘENÍ
- Úzké hrdlo
- UHLÍKOVÉ HOŘENÍ
- Návazné reakce
- *s-proces, p-proces, α -proces*
- VRSTEVNATÁ STRUKTURA JÁDRA HVĚZDY

FINÁLE

- *e-proces, r-proces a výbuch supernovy*

KDE SE TEDY VZALY PRVKY Li, Be, B ?

- *x-proces*

ZÁVĚR

ÚVOD

V této přednášce se budeme zabývat jevy ze světa nesmírných rozměrů v čase i prostoru na straně jedné a světem nepatrných drobečků látky hluboko pod hranicí rozlišovací schopnosti elektronového mikroskopu na druhé straně. Setkáme se s nepředstavitelně vysokými energiemi a extrémními teplotami i tlaky. Bude třeba stručně pojednat o vzniku a vývoji Vesmíru, o astrofyzice i nukleární fyzice, abychom porozuměli vlastnímu tématu – genezi prvků. Je naděje, že přednáška bude zajímavá pro posluchače, a je jisté, že bude dost obtížná pro vypravěče.

PRVKY, ATOMY, ISOTOPY, NUKLIDY

PRVEK: Libovolné množství látky v libovolném skupenství, složené z jediného druhu nejmenších možných stavebních jednotek (atomů). S jinými prvky chemicky reaguje specifickým a charakteristickým způsobem. Je charakterizován *chemickou značkou*, která je jedno- až dvoupísmenová zkratka mezinárodního jména prvku. Příklady: **H** (Hydrogenium), **C** (Carboneum), **Hg** (Hydrargyrum), **Ag** (Argentum), atd.

ATOM: Nejmenší stavební jednotka prvku, sestávající z těžkého kladného jádra obklopeného vzdáleným oblakem záporně nabitých elektronů. V základním stavu je elektricky neutrální. Označuje se chemickou značkou a *atomovým číslem* Z , obecně: ${}_Z\text{E}$. Číslo Z označuje počet protonů v jádře i počet elektronů v atomovém obalu a též pořadí v Mendělejevově *tabulce prvků*.

ISOTOPY: Atomy téhož prvku, které se liší jen svým atomovým číslem A ; to vyjadřuje součet všech nukleonů v jádře. Rozdíl $A-Z$ tedy udává počet neutronů v daném atomu, obecně: ${}^A\text{E}$ nebo též E^A . Např. ${}^{10}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}$, případně U^{235} či U^{238} jsou isotopy boru v prvním a isotopy uranu v druhém případě. Různé zastoupení jednotlivých isotopů v daném prvku je hlavním důvodem časté odchylky „atomových hmotností“ od celých čísel.

NUKLIDY: Souhrnné označení pro jádra isotopů se zdůrazněním jejich hmotového čísla A .
Příklady: ${}^3\text{He}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{90}\text{Sr}$, atd.

Stálých nuklidů je kolem tří set, radioaktivních nejméně tisíc. V „Table of the Isotopes“ v Handbook of Chemistry and Physics zabírají jejich parametry 294 stran hustého tisku.

BOHRŮV MODEL ATOMU:

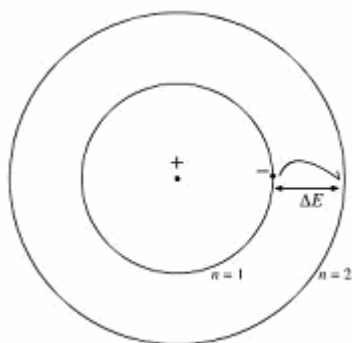
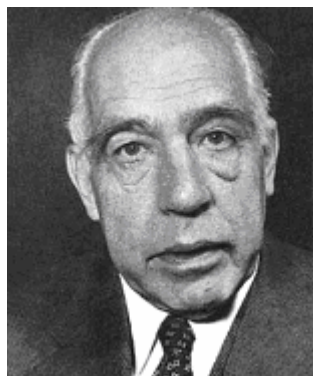
Jádro, průměr $1 - 5 \times 10^{-15}\text{m}$, 99.95 % hmotnosti atomu

Počet kladných nábojů Z (protony) 1 až >100

Počet nukleonů A (součet protonů a neutronů) 1 až asi 260

Atom, průměr $1.5 - 3.5 \times 10^{-10}\text{m}$

Elektronový obal - Elektronů celkem Z (Uspořádány do přesně definovaných *energetických hladin*)



MENDĚLEJEVOVA TABULKA PRVKŮ

Vytvoření slavné periodické soustavy prvků patří mezi největší vědecké činy devatenáctého století. Přestože jde vlastně jen o intuitivně – empirický počín, dalekosáhle ovlivnil i budoucí teorie atomistiky a je základem všech odnoží chemie. Její autor – **D.I.Mendělejev** – měl sice řadu předchůdců i následovníků, ale jeho přínos byl nesporně zásadní. Navíc: V jeho době (kolem roku 1870) bylo známo jen 63 prvků místo 92, které se vyskytují na Zemi. Na základě své tabulky předpověděl existenci a základní vlastnosti asi deseti prvků, z toho velmi

přesně chemické a fyzikální vlastnosti prvků Ga, Sc, Ge a Po. Nebylo ještě známo asi 10 ze 14 lanthanidů a žádný ze šesti tzv. *netečných plynů* (pro které ostatně v původní tabulce vůbec nebylo místo – právě pro jejich chemickou netečnost). Nebylo známo nic o skutečné stavbě atomů a jejich elektronových obalů. Ostatně samotný elektron byl objeven teprve roku 1896 a atomová jádra dokonce teprve kolem roku 1911! Nic se nevědělo o isotopech, radioaktivitě a ani o podstatě chemických vazeb. Tím více vyniká genialita a jasnozřivost autora periodické soustavy.

Původní periodická tabulka se soustavně doplňovala jak přibývalo objevů nových prvků a byla později mnohokrát různými autory modifikována tak, aby obdržela i jemnější nuance chemických i fyzikálních vlastností prvků. Zde uvádíme jednu ze starších verzí, která svou jednoduchostí a názorností nejlépe vyhovuje předmětu této přednášky.

Periodická soustava prvků

Sloupec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0		
Perioda 1	1 H 1,0080										2 He 4,003		
2	3 Li 6,940	4 Be 9,013	5 B 10,82	6 C 12,010	7 N 14,008	8 O 16,0000	9 F 19,00				10 Ne 20,183		
3	11 Na 22,997	12 Mg 24,32	13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,975	16 S 32,066	17 Cl 35,457				18 A 39,944		
4	19 K* 39,100 29 Cu 63,54	20 Ca 40,08 30 Zn 65,38	21 Sc 44,96 31 Ga 69,72	22 Ti 47,90 32 Ge 72,60	23 V 50,95 33 As 74,91	24 Cr 52,01 34 Se 78,96	25 Mn 54,93 35 Br 79,916	26 Fe 55,85	27 Co 58,94	28 Ni 58,69	36 Kr 83,80		
5	37 Rb* 85,48 * 47 Ag 107,880	38 Sr 87,63 48 Cd 112,41	39 Y 88,92 49 In* 114,76	40 Zr 91,22 50 Sn 118,70	41 Nb 92,91 51 Sb 121,76	42 Mo 95,95 52 Te 127,61	43 Tc* (99) 53 I 126,91	44 Ru 101,7	45 Rh 102,91	46 Pd 106,7	54 Xe 131,3		
6	55 Cs 132,91 79 Au 197,2	56 Ba 137,36 80 Hg 200,61	57 La 138,92 81 Tl 204,39	72 Hf 178,6 82 Pb 207,21	73 Ta 180,88 83 Bi 209,00	74 W 183,92 84 Po* (210)	75 Re* 186,31 85 At* (210)	76 Os 190,2	77 Ir 193,1	78 Pt 195,23	86 Rn* 222		
7	87 Fr* (223)	88 Ra* 226,05	89 Ac* (227)	90 Th* 232,12	91 Pa* (231)	92 U* 238,07							
Řada vzácných zemin (náleží mezi prvky 57 a 72):													
58 Ce 140,13	59 Pr 140,92	60 Nd 144,27	61 Pm* (145)	62 Sm* 150,43	63 Eu 152,0	64 Gd 156,9	65 Tb 159,2	66 Dy 162,46	67 Ho 164,94	68 Er 167,2	69 Tm 169,4	70 Yb 173,04	71 Lu* 174,99
Transurany:	93 Np* (237)	94 Pu* (242)	95 Am* (243)	96 Cm* (243)	97 Bk* (245)	98 Cf* (246)							



KDY A KDE VZNIKLY CHEMICKÉ PRVKY ?

Podle doby a místa vzniku můžeme všechny prvky rozřadit do tří skupin:

1. **Vodík a helium** jsou jediné dvě atomové děti *Velkého třesku*. Vodík je prvorozený. Jeho jádra (protony) vlastně zbyly po *Velké anihilaci* přibližně po desetitisícině první sekundy od počátku. Jádra helia (α – částice) se vytvořila teprve asi tři minuty od počátku. Skutečné atomy obou prvků však vznikly až asi za 5×10^5 roků od počátku, kdy teplota klesla asi na 3 000 K a elektrony mohly vytvořit stálé atomové obaly. Tím skončila i *éra záření* a nastala *éra látky* (Vesmír zprůhledněl pro elektromagnetické záření).
2. **Ostatní prvky (kromě Li, Be a B)** můžeme označit za děti hvězd. Začaly vznikat termonukleárními reakcemi v nitrech první generace hvězd – asi 5×10^8 roků od počátku – a vznikají dosud v jejich následnických hvězdných generacích. Na to, že dnešní počet hvězd se odhaduje na řádově 10^{22} (mezi setinou a desetinou Avogadrova čísla!), tato hvězdná nukleogeneze ještě moc nepokročila.
3. **Anomální trojice Li, Be a B** nevznikly ani na počátku Vesmíru ani ve hvězdách. Můžeme je však označit za vnuky hvězd, protože se neustále tvoří v mezihvězdném prostoru interakcí *hvězdného prachu* (prvních těžších prvků, vyvržených do Vesmíru při zániku hvězd první generace) s *kosmickým zářením*. Tento proces stále pokračuje.

Dnešní zastoupení prvků ve Vesmíru se zkoumá už dobrých 150 roků různými metodami, které se stále zlepšují a výsledky se neustále zpřesňují. Současné „nejlepší odhady“ pro devět nejvíce zastoupených prvků, vyjádřené relativním počtem jejich atomů, vypadá takto:

Prvek	${}^1\text{H}$	${}^2\text{He}$	${}^8\text{O}$	${}^{10}\text{Ne}$	${}^7\text{N}$	${}^6\text{C}$	${}^{12}\text{Mg}$	${}^{14}\text{Si}$	${}^{26}\text{Fe}$	atd.
Počet atomů	35000	3900	22	17	16	8	1	1	1	nepatrný
Dohromady	99.8 %		0.2 %							

Nezaměnit s hmotnostními procenty! Potom by na H + He připadlo asi 98 % veškeré hmotnosti baryonové látky Vesmíru. Všechny ostatní prvky (v astrofyzikálním žargonu „kovy“) představují jen 2 % celkové hmotnosti.

Zastoupení prvků na Zemi je zcela odlišné, protože naše planeta je složena téměř výhradně z „kovů“, zatímco téměř veškerý vodík a helium skončily ve Slunci (a v nepatrném množství i na obřích vnějších planetách). Ještě odlišnější je zastoupení prvků v *zemské kůře* – v důsledku diferenciací za pradávného kapalného stavu (většina těžkých prvků v zemském *jádře*, většina lehkých prvků v *plášti*). Podstatně přispěla i trpělivě pracující geochemie v průběhu nejméně 4 miliard let.

Vodík a helium tedy ve Vesmíru naprosto převažují. Na každý atom He připadá asi 9 atomů H. Posuzováno s hlediska hmotnostních % se jedná o asi 25 % He a 75 % H.

VZNIK A VÝVOJ VESMÍRU

Standardní model – základní these: Z nesčetných teorií o zrození a podstatě Vesmíru získala nejvíce důvěryhodnosti teorie „*Velkého třesku*“ (původně posměšný název, který měl vyjádřit její absurditu!). Až na diskutabilní scénář jevů před tzv. „Planckovým časem“ (= 10^{-43} sec od počátku světa a časoprostoru lze *Standardní model* charakterizovat těmito thesemi:

1. Vesmír začal jako superžhavá a suprahustá „bublinka“ daleko subatomárních rozměrů na úkor potenciální energie, uvolněné fázovým přechodem „falešného vakua“ na nynější

„normální fyzikální vakuum“. Nešlo tedy o „stvoření z ničeho“. Tímto okamžikem se zrodil i čas a prostor, jak jej chápe asi většina fyziků.

2. Prvotní vesmír prudce expandoval, dokonce možná tzv. **Inflaci** neboli „nafouknutím“ v poměru asi $1 : 10^{50}$! . *Inflaci* chápeme jako analogii fázového přechodu. Poté dále expandoval už „přirozeným tempem“ $< c = 3 \times 10^8$ m/sec. Původní sjednocená **prasíla** se postupně diferencovala na dnešní základní **silové interakce: gravitaci, silnou interakci, slabou interakci a elektromagnetickou interakci**. Tyto čtyři síly od té doby rozhodují o všem dění ve Vesmíru. Od té doby platí nynější **přírodní zákony**.
3. Od asi 10^{-10} sec byl Vesmír vyplněn směsí **kvarků, leptonů a záření** ve vzájemné dynamické rovnováze podle slavné relace $E = mc^2 = hv$.
4. S pokračující expansí prudce klesala teplota i hustota, takže brzy od počátku se kvarky začaly sdružovat na **nukleony** (protony a neutrony) a jejich antičástice. O málo později poklesla střední energie hmoty/záření pod 1.9 GeV, tvorba nukleonů/antinukleonů ustala a naopak došlo k **velké anihilaci**. Nukleony a antinukleony anihilovaly na záření. V této fázi zřejmě vymizela všechna antihmota. Skutečnost, že zbyla aspoň hmota se vysvětluje tím, že původní **materializace** záření nebyla dokonale symetrická a že nukleony převažovaly nad antinukleony v poměru asi $10^9 + 1 : 10^9$.
5. Další expanse a souběžné ochlazení dovolilo vznik nejstálejšího složeného atomového jádra **^4He (α -částice)** již asi 200 sec od počátku dění. Nepatrné množství nuklidů ^2H a ^7Li vzniklo později. Ostatní neutrony se postupně změnilly ve stejný počet protonů, elektronů a antineutrín (volný neutron je radioaktivní s poločasem asi 12 min., prakticky neomezeně stálý je jen ve formě nukleonu, tj. částice libovolného složeného atomového jádra).
6. Expanse a chladnutí dále pokračovaly, ale teprve po asi 5×10^5 roků poklesla teplota pod 3000 K, takže elektrony z původního plazmatu mohly vytvořit atomové obaly kolem jader ^1H a ^2He . Vznikly **první atomy**, Vesmír se stal průhledným pro elektromagnetické záření, to se odpoutalo od hmoty a vydalo se samostatnou cestou (počátek dnešního **reliktního záření**).

Některé podrobnosti z „**Prvních tří minut**“ jsou uvedeny v následujícím přehledu, celkový vývoj je pak zobrazen stupnicí **Vesmírné časomíry** s komentářem.

První tři minuty

<u>Čas v sekundách</u>	<u>Děje</u>
+ 0	„Singularita“?? (nulový rozměr, a nekonečná teplota a hustota)
10^{-43}	Planckův čas – oddělila se <u>gravitace</u>
10^{-35}	„Inflace“ (expanse v poměru asi $1 : 10^{50}$; ještě neplatí dnešní přírodní zákony)
10^{-33}	oddělila se <u>silná interakce</u>
10^{-10}	rozešly se <u>slabá interakce s elektromagnetickou interakcí</u> (od té doby platí standardní přírodní zákony, Vesmír je naplněn směsí kvarků, leptonů a záření)
10^{-5}	z kvarků vznikly nukleony a antinukleony

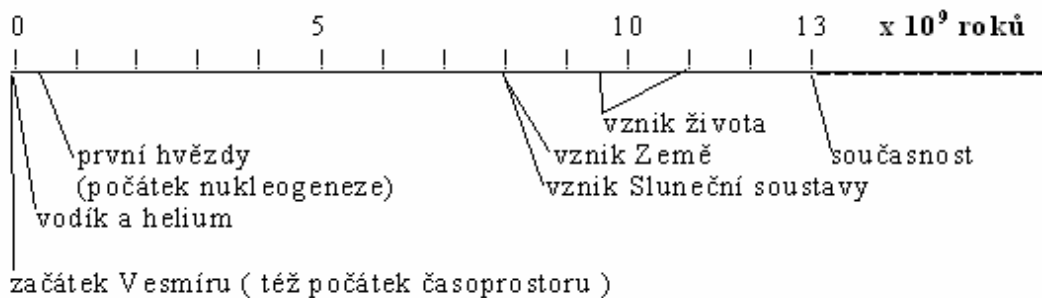
10^{-4} „Velká anihilace“
 2×10^{-2} Směs nukleonů, leptonů a záření.
 ($T = 10^{11} \text{K}$, $\rho = 4 \times 10^9 \text{kg/m}^3$, $d = 4 \times 10^6$)
 .
 .
 2×10^2 Vznikla jádra helia = α -částice, $T = <10^9 \text{K}$
 .
 .
 1.6×10^{13} (5×10^5 roků) **Vznik atomů, oddělení hmoty od záření**
 ($T = 3 \times 10^3 \text{K}$, $\rho = 5 \times 10^{-19} \text{kg/m}^3 = 2-3 \times 10^8$ atomů
 v m^3)
 Dnešní „Kritická hustota“ Vesmíru pro $H = 50 \text{km/Kpc}$, $\rho = 5 \times 10^{-27} \text{kg/m}^3$
 3atomy H/m^3
 Pozorovaná (jen baryonová hmota) $\rho = 5 \times 10^{-28} = < 0.3 \text{atomů H/m}^3$

Vesmírná časomíra

(V absurdních pozemských jednotkách: **1 rok** = nynější trvání jednoho oběhu nedávno vzniklé malé planety kolem průměrné hvězdy)

Vesmírná časomíra

(V absurdních pozemských jednotkách: **1 rok** = nynější trvání jednoho oběhu nedávno vzniklé malé planety kolem průměrné hvězdy)



HVĚZDY JAKO VÝROBCI ZÁŘIVÉ ENERGIE I VĚTŠINY PRVKŮ

Prakticky všechny poznatky o životě a zániku hvězd postupně objasnili astrofyzikové v průběhu necelého posledního století. Byly často popularizovány v řadě skvělých knih, takže se příběh stal součástí základního vzdělání. Proto zde zdůrazníme jen některé významné zajímavosti, které se vztahují ke genezi prvků.

Další půl miliardy let od počátku „éry látky“ se prakticky nic nedělo. Vesmír stále expandoval a průměrná teplota rychle klesala. Byl vyplněn směsí atomů vodíku a helia a zcela temný. Prvními majáky v temnotách se staly hvězdy první generace – ale dávno ještě neexistoval žádný pozorovatel tohoto divu. Poprvé začaly vznikat prvky těžší než helium a dokonce zřejmě úplný sortiment včetně vysokých transuranů, nejméně po $_{98}\text{Cf}$. Bylo to důsledkem toho, že první hvězdy musely mít gigantické počáteční hmotnosti a dožily se

nanejvýš několika tisíc let. Jako ve zrychleném filmu prošly všemi etapami hvězdného vývoje, takže stačily vytvořit všechny prvky, umíraly vesměs jako supernovy, které svůj popel vyvrhly do okolního Vesmíru a na konec z nich zbyly často až **černé díry** – možná počáteční centra budoucích galaxií. Kontaminace původní směsi vodíku a helia „kovy“ změnila vývoj všech hvězd dalších generací. Ty vznikaly mnohem snáze a měly podstatně menší hmotnost než jejich gigantičtí předkové a mnohé se dožijí úctyhodného věku, často delšího, než je dosavadní stáří Vesmíru. Všechny však mají v podstatě stejný počátek, prožívají stejné epizody života, byť i různou rychlostí, ale končí různým způsobem, závislým na počáteční hmotnosti.

Abychom je mohli rozumně utřídit a porovnávat, je nezbytné si zvolit vhodný porovnávací standard. Tím se přirozeně stala nejbližší hvězda, o které víme nejvíce – naše Slunce. Pro srovnání zde uvedeme i některé parametry jedné jeho planet – naší Země. Ta je totiž při nejmenším výjimečná, ne-li jedinečná tím, že je to jediná známá oživená planeta, a že na ní žili a žijí všichni dosud známí pozorovatelé a vykladači Vesmíru.

Slunce jako hvězdný standard



Naše Slunce je s hlediska astronomů hvězda spektrální třídy G 2 a v Hertzsprung-Russelovu diagramu leží asi uprostřed *hlavní posloupnosti*.

Jednotka	Parametr	Slunce (relativně k Zemi)	Země
M_{\odot}	Hmotnost, kg	2×10^{30} (3×10^5)	6.7×10^{24}
R_{\odot}	Poloměr, km	7×10^5 (109)	6.4×10^3
T_{\odot}	Centrální teplota, K	1.5×10^7	$6-7 \times 10^3$
	Povrchová teplota, K	5 800	300
L_{\odot}	Zářivý výkon, W	4×10^{26}	příjemce*
	Dosavadní stáří, roků	5×10^9	4.6×10^9
S_{\odot}	Životnost, roků	$10-11 \times 10^9$	10^9

- Vlastní zářivý výkon Země je zanedbatelný. Od Slunce přijímá asi jen $1/2 \times 10^9$ jeho výkonu, což je však přibližně 7 500 krát více, než lidé vyrobí z jiných zdrojů pro všechny civilizačně-technologické potřeby.

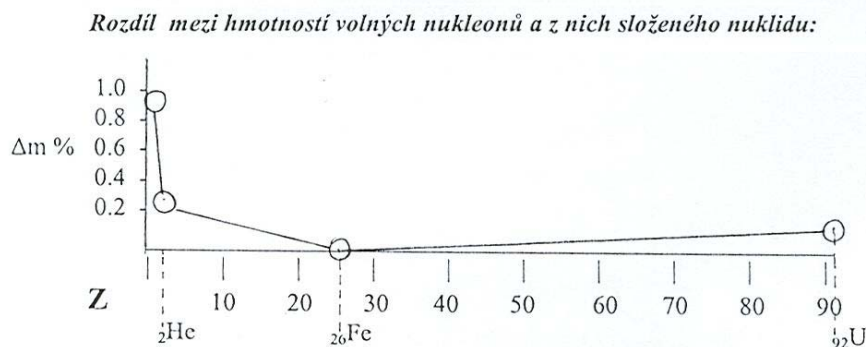
Životnost hvězd (S), rychlost životního běhu a konec jsou rozhodujícím způsobem ovlivněny počáteční hmotností (M). Životnost je dosti přibližně nepřímo úměrná trojmoci hmotnosti.

M (násobek M_{\odot})	0.1	1.0	10	70	150
S, roků	10^{13}	10^{10}	10^7	3×10^4	3×10^3

Podle současné teorie může mít nejmenší hvězda M asi jen 8% M_{\odot} , největší kolem 70 M_{\odot} ; Před čtvrt rokem však byla objevena hvězda o hmotnosti 150 M_{\odot} ! To je ovšem ještě třeba ověřit a poté případně upravit dosavadní teorii.

Hvězdy jsou především producenti zářivé energie, kterou po většinu života získávají **termonukleární syntézou** vyšších prvků z prvorozeného vodíku a na závěr i z helia a dokonce i z popela následujících etap. Podstatou termonukleární syntézy je slučování lehčích atomových jader na jádra těžší a kompaktnější. Úbytek hmotnosti při těchto dějích se projevuje jako záření podle proslulé rovnice $E = mc^2 = hv$. Od ${}^1_1\text{H}$ po ${}^{26}_{26}\text{Fe}$ je tento úbytek pozitivní a příslušné reakce jsou exotermní (uvolní se při nich energie). Syntéza vyšších prvků bude naopak endotermní (energií musíme dodávat).

Rozdíl mezi hmotností volných nukleonů a z nich složeného nuklidu:



Nové prvky jsou v podstatě jen popel, který produkci energie doprovází. Sortiment popela se výrazně liší podle počáteční velikosti hvězd a tím i podle teplot, dosažitelných v jejich středu. U malých hvězd s $M < M_{\odot}$ je to prakticky jen He, pro $M = 0.8 - 1.4 M_{\odot}$ už jde o prvky ${}^2_2\text{He}$ až ${}^{12}_{12}\text{Mg}$, u hvězd s $M = M_{\odot}$ 1.4 – 8 je sortiment ještě pestřejší (při nejmenším od ${}^2_2\text{He}$ po ${}^{26}_{26}\text{Fe}$), až u hvězd nad $8 M_{\odot}$ vznikne úplná paleta prvků od helia až po vysoké transurany, nejméně po ${}^{98}_{98}\text{Cf}$.

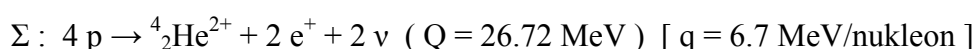
Zatímco zářivou energii hvězdy přímo plýtvají, popel si většinou ponechávají i po skončení života. To platí pro nejmenší hvězdy beze zbytku. U hvězd přibližné velikosti Slunce se menší část popela (lehké prvky od He po asi Mg) rozptýlí do okolí v závěrečné fázi **červeného obra** a u největších hvězd se do Vesmíru vyvrhne téměř kompletní sortiment. Pro ilustraci uvádíme případ **supernovy 1987 A**, která se objevila ve Velkém Magellanově mračnu (asi 170 000 světelných roků od naší soustavy): Počáteční hmotnost asi $18 M_{\odot}$ (životnost asi 1.8×10^6 roků). Během výbuchu a v některých bouřlivých epizodách předtím vyvrhla $16.6 M_{\odot}$ „popela“ = 92.8 % původní hmotnosti. Zbyla **neutronová hvězda** s $M = 1.4 M_{\odot} = 7.2$ % původní hmotnosti.

To je v hrubých rysech odpověď na otázky: Kdy a kde vznikly chemické prvky i jak se dostaly do okolního Vesmíru. Podrobnosti o mechanismu vzniku mnoha z nich a o nejdůležitějších jaderných syntézách najdeme v další kapitole. ___-

TERMONUKLEÁRNÍ SYNTÉZY POD LUPOU

Nukleogeneze ve hvězdách vyžaduje souhru všech čtyř základních sil vesmíru. Gravitace stlačí prachoplynový mrak a zahřeje jeho střed nad „zápalnou teplotu“ **vodíkového hoření**. Protony tak získají dostatečnou energii k překonání coulombovské bariéry (elektromagnetická interakce). Po dostatečném přiblížení se působením silné interakce slíjí na přechodné, extrémně nestálé jádro ${}^2_2\text{He}^{2+}$, které stabilizuje na jádro deuteria slabá interakce vypuzením positronu a neutrína. Jádro deuteria je lehčí než součet dvou protonů, positronu a neutrína a tento *hmotový úbytek* se podle vzorce $E = mc^2$ změní v zářivou energii – v tomto případě 1.44 MeV.

Prvním stupněm hvězdné nukleogeneze je tedy **vodíkové hoření**:



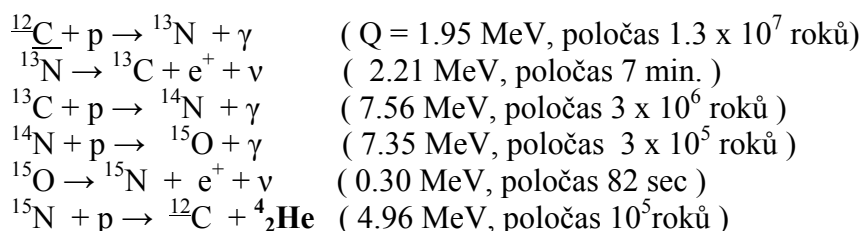
V intervalu teplot $13 - 20 \times 10^6 \text{ K}$ může probíhat dvěma způsoby: proton-protonovým cyklem nebo katalytickým C-N-O cyklem. Při nižších teplotách převládá první, při vyšších druhý cyklus. Např. ve Slunci ($T = 15.5 \times 10^6 \text{ K}$) se proton-protonovým procesem produkuje asi 80 % veškerého zářivého výkonu, zbytek připadá na C-N-O cyklus.

Sled reakcí v proton-protonovém procesu při $15.5 \times 10^6 \text{ K}$:

Reakce	Uvolněná energie Q, MeV	Poločas
$2 p \rightarrow {}^2_1\text{H}^+ + e^+ + \nu$	1.44	5×10^9 roků
${}^2_1\text{H}^+ + p \rightarrow {}^3_2\text{He}^{2+}$	5.49	0.2 sec
$2 {}^3_2\text{He}^{2+} \rightarrow {}^4_2\text{He}^{2+} + 2 p$	12.86	3.5×10^5 roků

Přes enormní pomalost prvního stupně však v 1 g vodíkového plazmatu proběhne 3.8×10^6 sloučení za sekundu!! Celková rychlost proton-protonového cyklu je pochopitelně dána touto nejpomalejší reakcí, protože druhý stupeň proběhne prakticky okamžitě a konečný třetí 14 000 krát rychleji, než první.

Sled reakcí v C-N-O cyklu při stejné teplotě:



Celkový energetický výtěžek je pochopitelně stejný jako u proton-protonového cyklu, avšak C-N-O cyklus nemůže probíhat v nezaprášeném primordiálním „syntézním plynu“, neboť na počátku vyžaduje přítomnost „katalyzátoru“ ${}^{12}_6\text{C}$. Význačnou měrou probíhá teprve nad $16 \times 10^6 \text{ K}$, ale je podstatně rychlejší, než cyklus proton-protonový. Pokud bylo v počátečním prachoplynovém mračnu velké množství ${}^{12}_6\text{C}$, mohou v průběhu reakční kaskády vznikat (a přecházet) stabilní nuklidy ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{15}_7\text{N}$, a ${}^{13}_6\text{C}$.

Ve Slunci se přeměňuje za sekundu 600 milionů tun vodíku na 596 milionů tun helia. Vzhledem k obrovské hmotnosti Slunce je to však téměř zanedbatelné množství. Např. při „spálení“ 10 % původní hmotnosti vodíku by zásoba stačila na deset miliard roků !!

Vodíkové hoření vlastně žádné nové prvky nevytváří. Proti původnímu stavu prostě ubude trochu vodíku a přibude trochu helia. Avšak ve vývoji Vesmíru znamená podstatný přelom. **Poprvé se začaly tvořit nové neutrony, byť i zatím vázané v jádrech helia. Je to nový fenomén.**

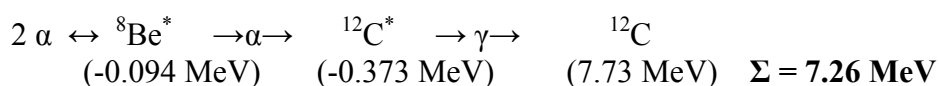
Po vyčerpání asi 10 % původního vodíku v jádře hvězdy se reakce velmi zpomalí, tlak záření už nestačí odolávat gravitačnímu tlaku nadloží, jádro se začne dále stlačovat a jeho teplota prudce roste (v této konečné fázi vodíkového hoření se zbytky vodíku urychleně přemění na helium). Když teplota v jádře hvězdy vzroste na asi 200 milionů K nastane nová etapa:

HELIOVÉ HOŘENÍ

Jádra prvků mezi He a C mají tak nízkou vazebnou energii, že nemohou ani zdaleka přechkat „zápalnou teplotu“ *heliového hoření*. Proto ostatně ve hvězdách nevznikají a pokud byly v původním prachoplynovém mračnu přítomny už na počátku, rozpadnou se dokonce už dávno před započetím *vodíkového hoření*:

Nuklid	${}^2\text{H}$	${}^7\text{Li}$	${}^9\text{Be}$	${}^{10,11}\text{B}$
Rozpadová teplota K	$>0.5 \times 10^6$	$>2 \times 10^6$	$>3.5 \times 10^6$	$>5 \times 10^6$

Aby mohlo *heliové hoření* přeskočit tuto mezeru až na nejbližší vyšší stabilní jádro ${}^{12}\text{C}$, muselo by dojít k nanejvýš nepravděpodobnému současnému setkání tří α -částic. To je právě ono **úzké hrdlo heliového hoření**. Avšak příroda nabízí východisko. Splynutím 2 α -částic vzniká přechodně extrémně nestálé jádro ${}^8\text{Be}$, které se rozpadne zpět už během 2×10^{-16} sec, ale během této doby se může setkat s třetí α -částicí a vytvořit ještě nestálější *metastabilní* jádro ${}^{12}\text{C}^*$, které se však okamžitě stabilizuje na normální stálý nuklid ${}^{12}\text{C}$ vyzářením γ -záření o energii 7.73 MeV. Takže vlastně nejde o tříčásticovou reakci, ale o těsný překryv dvou dvoučásticových reakcí! Poprvé s touto ideou přišel rakouský fyzik Salpeter – odtud Salpeterova reakce:



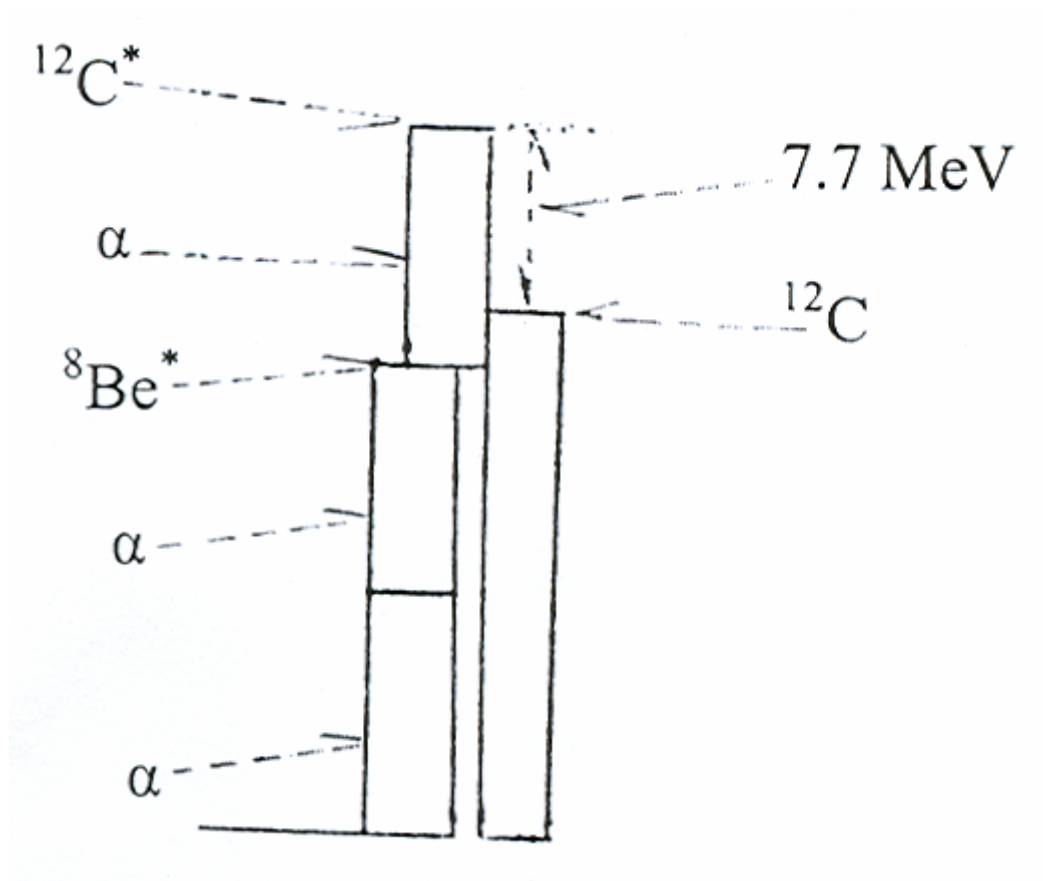
Nezbytnost existence metastabilního ${}^{12}\text{C}^*$ předpověděl F.Hoyle (1954), podstaně dříve, než byla skutečně prokázána.

Delikátnost tohoto problému si znázorníme mechanickým modelem:

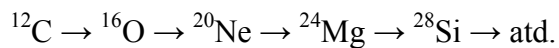
Dvojskok do výšky s pomocí úzké římsy ${}^8\text{Be}^*$

Energetický zisk reakce $3 \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} = 7.26 \text{ MeV}$

(Ve 4 g α -částic bude v každém okamžiku existovat asi 120 milionů ${}^8\text{Be}^*$, takže šance na úspěch dvojskoku není zanedbatelná)



Po překonání tohoto *úzkého hrdla* může dále už bez problémů probíhat serie reakcí (α, γ):

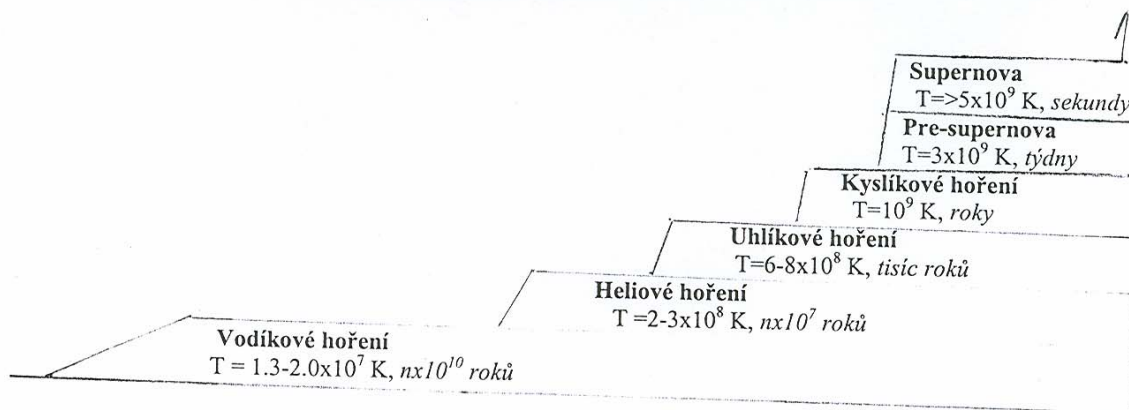


Avšak coulombovská bariéra roste se součinem nábojů obou reagujících jader:

Z	$^6\text{C}^{12}$	8	10	$^{12}\text{Mg}^{24}$	14	16	atd.
Relat. výška bariéry	1	1.33	1.66	2.0	2.33	2.66	atd.

Prostě nad ^{24}Mg už průměrná energie α -částic při teplotě $2 \times 10^8 \text{K}$ nestačí na pokračování a *heliové hoření* skončí. Zbude v podstatě prakticky čisté uhlíkové jádro s malou příměsí O, Ne a Mg, které u hvězd pod $M = 1.4 M_{\odot}$ vytvoří žhavou hmotu **bílého trpaslíka**.

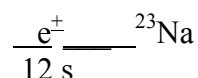
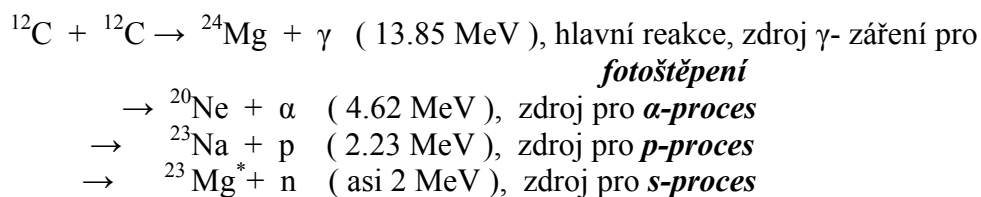
U hvězd s větší počáteční hmotností může kaskáda pokračovat postupně **uhlíkovým, kyslíkovým (a neonovým) hořením** při vyšších a vyšších teplotách, každá další etapa bude mnohem kratší než byla předchozí a u nejtěžších hvězd vše skončí závěrečným výbuchem **supernovy**. Přibližný přehled o charakteristických teplotách a délce trvání jednotlivých etap podává toto schema:



Právě v těchto pozdních fázích vývoje nabírá nukleosyntéza na obrátkách, sortiment nuklidů se rychle rozrůstá, mechanismů jejich výstavby přibývá, začínají se překrývat a obraz ztrácí na přehlednosti.

UHLÍKOVÉ HOŘENÍ

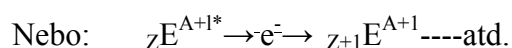
Po obvyklém intermezzu- pokles produkce energie s koncem He-hoření vyvolá gravitační kontrakci a tím další zvýšení teploty až k zápalné teplotě uhlíku:



Návazné reakce:

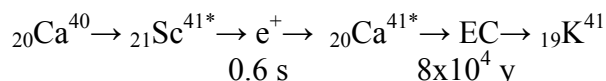
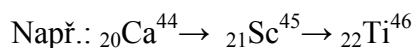
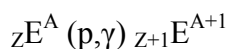
Neutrony se *poprvé začínají uvolňovat* z předchozího svazku s protony. Jejich dalším zdrojem je *fotoštěpení* atomových jader. Fotony z hlavní reakce mají dostatek energie, aby mohly “ohlodávat” již existující vyšší prvky reakcemi (γ, n), (γ, p) a (γ, α). Všechny tyto částice pak mohou reagovat se stále nedotčenými atomovými jádry za postupného vzniku celé řady vyšších prvků.

Nejsnáze to půjde neutronům, protože nemusejí překonávat elektrostatickou bariéru. Jejich postupným připojováním k již existujícím atomovým jádrům budou vznikat stále vyšší a vyšší prvky. Jsou hlavním aktérem tzv. *s-procesu* (slow neutron capture), který může vysvětlit vznik i velmi těžkých nuklidů od ^{63}Cu po ^{109}Bi , podle obecného schématu:



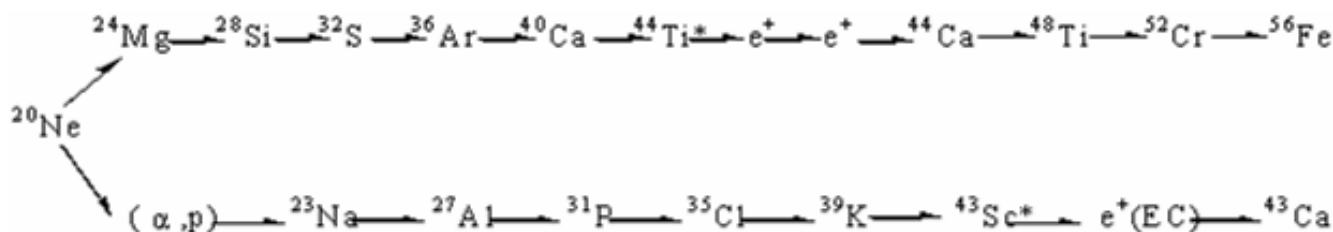
V této fázi je ovšem neutronů málo a mnoho těžkých prvků nevznikne. Situace se dramaticky změní v posledních sekundách vývoje masivních hvězd.

Hůře jsou na tom protony, které musejí překonávat elektrostatické odpuzování cílového jádra. Při teplotách 5×10^8 až 10^9 K však mají dostatek energie, aby mohly vyvolat tzv. *p-proces* (proton capture), obecně:



Je zřejmé, že proces je dosti komplikovaný pro přehledný popis všech možných případů, avšak tímto způsobem vzniká mnoho prvků s *lichým atomovým číslem*, a ku podivu i prvků od ${}_{22}\text{Ti}$ až po ${}_{29}\text{Cu}$ včetně převládajícího ${}_{26}\text{Fe}$. Na významu však tento proces nabude ve stadiu *pre-supernovy*, kdy počet protonů, uvolněných fotoštěpením, lavinovitě narůstá.

Největší coulombovskou bariéru ovšem musejí překonávat α -částice. Avšak při teplotě $> 5 \times 10^8$ K si s ní poradí a nastane kaskádovitá tvorba vyšších prvků tzv. *α -procesem* (α, γ), který vlastně navazuje na předchozí etapu *heliového hoření*:



První serie vede k tzv. *α -jádrům*, jejichž Z i A jsou násobky ${}^4_2\text{He}$, druhá serie s vloženou jednou reakcí (α, p) vede k celé řadě prvků s *lichým Z* . Celkem jsme tedy pomocí *α -procesu* dospěli k sedmácti stálým nuklidům středních prvků.

VRSTEVNATÁ STRUKTURA JÁDRA HVĚZDY

Centrální část hvězdy se začíná postupně diferencovat jakousi sedimentací ve zřetelné slupky, připomínající strukturu cibule. Těžší atomová jádra budou při dané teplotě pomalejší a budou se shromažďovat v těžišti hvězdy. Tak se vytvoří zřetelné vrstvy, i když ne ostře oddělené. Tomuto dalšímu zásahu gravitace vděčíme za to, že většina lehkých prvků od C po Mg přečkala i následující divokou fázi vývoje hvězd s $M = > 4 M_{\odot}$ – několik let až měsíců před závěrečným výbuchem supernovy- v době, kdy syntéze těžkých prvků dominuje tzv. *e-proces* (equilibrium process).

FINÁLE

Při teplotách kolem 10^9 K se vracíme jakoby zpět v čase do doby raného vesmíru, ale za podstatně jiných podmínek. Jádro hvězdy je nyní přeplněno vysoce stlačeným plasmatem z desítek nuklidů a příslušným počtem volných elektronů a energie fotonů bohatě postačí k vytrhávání jednotlivých nukleonů z atomových jader reakcemi typu (γ, p), (γ, n) i (γ, α). Kromě toho vzájemné prudké srážky každého s každým vedou k redistribuci velkých fragmentů jader s tendencí přežití těch nejstálejších. Rychle se ustaví statistická rovnováha

mezi nuklidy, volnými nukleony i zářením – odtud *equilibrium process*. Právě teď vznikají hlavně prvky z oblasti největší stability, tj. mezi ${}_{22}\text{Ti}$ a ${}_{29}\text{Cu}$ s jasným maximem u ${}_{26}\text{Fe}$. Tím však skončí všechny exotermní reakce a tlak záření celkem náhle pomine. Vnitřní část hvězdy se zhroutlí do jejího centra prakticky volným pádem, potenciální energie se změní v kinetickou a teplota v centru vzroste na desítky miliard K!! . Za těchto podmínek se všechny nuklidy v centru hvězdy změní ve směs nukleonů, elektrony jsou vtlačeny do protonů a vznikne prakticky čistě neutronové jádro. Je nesmírně husté, a až na dosti výjimečný případ (*černé díry*) je dále nestlačitelné. Menší část neutronů s okraje této divoké změti vyrazí vstříc dosud nedotčeným středním a vyšším vrstvám, kdy během několika sekund proběhne tak zvaný *r-proces* (rapid neutron capture). Dosud zachovaná jádra ve vyšších slupkách jsou jimi zahlcena, takže např. velmi hojné atomy železa mohou během několika sekund zachytit až 200 neutronů! Vzniklé isotopy železa jsou nyní absurdně bohaté neutrony a musí se vhodným způsobem stabilizovat, nejlépe kaskádou téměř okamžitě za sebou následujících β -rozpadů.

Např.: ${}_{26}\text{Fe}^{238}$ se změní 66 β -rozpady v ${}_{92}\text{U}^{238}$ a obdobně vznikne z ${}_{26}\text{Fe}^{235}$ jeho věhlasný isotop ${}_{92}\text{U}^{235}$. Zcela obdobným způsobem mohou vzniknout i vysoké transurany, např. ${}_{98}\text{Cf}^{254}$ a ovšem i celá plejáda nuklidů mezi $Z = 26 - 92$.

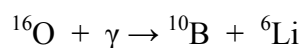
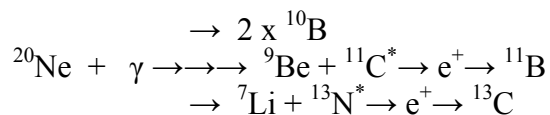
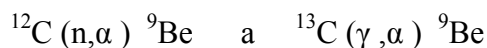
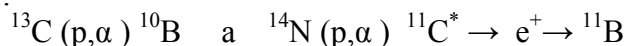
Dosud ignorované vnější obaly hvězdy ztratily rovněž oporu a zřítí se na neutronové jádro v centru hvězdy. Nárazem vznikne nesmírně mohutná rázová vlna, která postupuje zpět proti opožděným zbytkům obalů a rozmetá do vesmíru prakticky všechn materiál, vzniklý během předchozích etap vývoje hvězdy i ten čerstvě vzniklý těsně před výbuchem. Zbude jen nesmírně husté a maličké neutronové jádro.

Je paradoxní že tento závěrečný výron nesmírné energie není projevem mohutných jaderných sil, ale nenápadné gravitace, která definitivně vyhrála zápas mezi ní a tlakem záření.

KDE SE TEDY VZALY PRVKY Li, Be, B ?

Už jsme se zmínili, že tyto prvky nemohly vzniknout s počátkem vesmíru (kromě zanedbatelných stop ${}^7\text{Li}$) a nemohly přežít podmínky, panující ve hvězdách. Jak to, že přesto existují a není jich nijak málo? Jejich vznik v mezihvězdném prostoru se vysvětluje tzv. *x-procesem* (x místo nejasného). Soudí se, že vesměs vznikají fragmentací mezihvězdných atomů jiných prvků srážkami s částicemi a fotony *kosmického záření*.

Např.:



atd.

Je třeba zdůraznit, že předchozí úvahy nejsou jen divoké spekulace jednoduché kombinatoriky. Zpětnou kontrolu dává např. přehled přesných zastoupení jednotlivých nuklidů ve vesmíru. Dále nesčetné vztahy mezi jednotlivými nuklidy a částicemi, přesně změřené v pozemských laboratořích (energetické poměry, *účinné průřezy* jednotlivých reakcí, způsoby a poločasy radioaktivních rozpadů, atd.). Zahnutím všech dostupných

experimentálních fakt do výpočtů pravděpodobnosti vzniku toho či onoho nuklidu ve hvězdném nitru během různých stadií vývoje, můžeme důvěryhodně vysvětlit vznik prakticky všech prvků a jejich isotopů. Je to pracné, ale proveditelné. Takové výpočty byly uskutečněny zatím v mnoha stech případech a doplňování pokračuje.

ZÁVĚR

Nyní tedy už víme, kde, kdy a jak vznikly všechny prvky, ze kterých sestává náš hmotný svět. Víme, že většinou je to nahromaděný popel z pradávno zaniklých supernov a i my jsme jen “.prach a v prach se obrátíme..”. Ale máme aspoň skutečně brilantně jasné předky. Skutečnost, že jsme kořeny svých rodokmenů dokázali vypátrat, svědčí o tom, že aspoň ti nejlepší z nás jsou jejich důstojnými dědici.

Literatura !!!

Knihy, učebnice, encyklopedie, tabulky:

1. S.W. Hawking: **Stručná historie času**, čes. Překl. KOLUMBUS, Mladá fronta, Praha 1991.
2. S.W. Hawking: **Černé díry a budoucnost vesmíru**, čes. překl. KOLUMBUS, Mladá fronta, Praha 1998.
3. S. Weinberg: **První tři minuty**, čes. překl. KOLUMBUS, Mladá fronta, Praha 1998.
4. J. Grygar: **Vesmír, jaký je**, KOLUMBUS, Mladá fronta, Praha 1997.
5. V. Vanýsek: **Základy astronomie a astrofyziky**, ACADEMIA, Praha 1980.
6. N.N. Greenwood, A. Earnshaw: **Chemie prvků**, čes. překl. INFORMATORIUM, Praha 1980.
7. **The Worldbook Encyclopedia**, 22 sv. (150 000 hesel), U.S.A. 1990.
8. J. Trefl: **1 000 + 1 věc, kterou byste měli vědět o vědě**, čes. překl. Nakladatelství LN, Praha 1994.
9. **Handbook of Chemistry and Physics 51st Ed., Table of the Isotopes**, International Rubber Comanz, U.S.A. 1970.

Časopisy:

Nature, Scientific American, National Geographic Magazine, Vesmír

INTERNET Service

F. Běhounek: **Zářící atomy**, ORBIS-Praha 1956

F. Běhounek, A. Bohun, J. Klumpar: **Radiologická fyzika**, ORBIS – Praha 1958