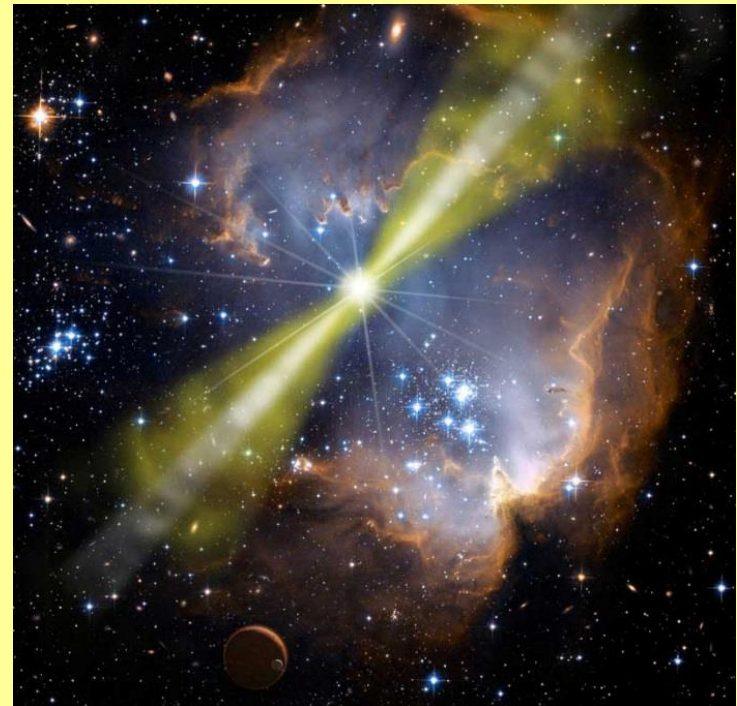
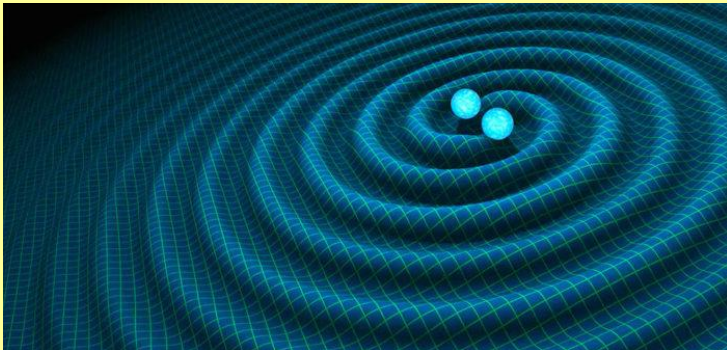


Jak a kde vznikly chemické prvky?

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AVČR, 250 68 Řež, E_mail: WAGNER@UJF.CAS.CZ, WWW: ojs.ujf.cas.cz/~wagner/

- 1) Úvod
- 2) Jak se dojde k lehkým prvkům?
 - a) Helium z Velkého třesku
 - b) Jak získat helium ve hvězdách
 - c) Jak se dostat k těžším prvkům
 - d) Krátké záblesky gama
- 3) Původ těžkých prvků a záblesků gama
 - a) Těžké hvězdy dělají těžké prvky
 - b) Výbuch supernovy a hypernovy
 - c) Splynutí neutronových hvězd
- 4) Produkce těžkých prvků v neutronovém poli
 - a) r-proces
 - b) Vznik jader s vysokým přebytkem neutronů
- 5) Závěr

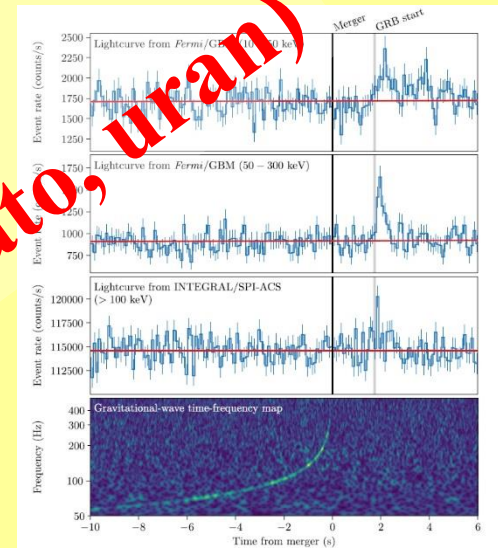
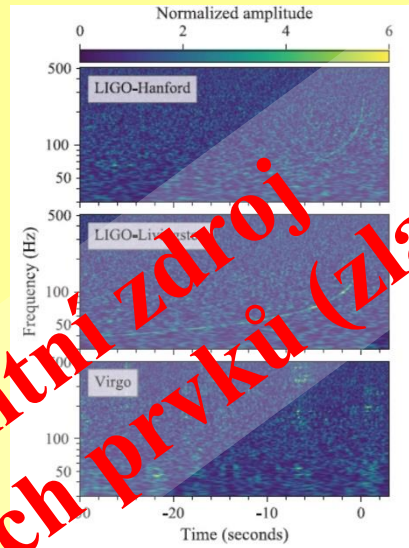
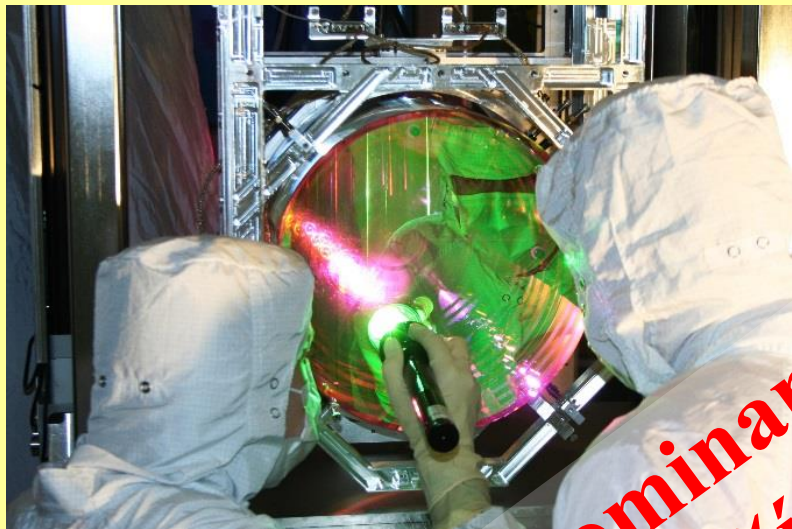


Úvod – gravitační vlny ze splynutí neutronových hvězd

První jasně identifikované splynutí dvou neutronových hvězd – 17. srpna 2017

První detekce gravitačních vln vzniklých při tomto splynutí neutronových hvězd

!!! Potvrzení spojení krátkých záblesků gama se splynutím dvou neutronových hvězd !!!

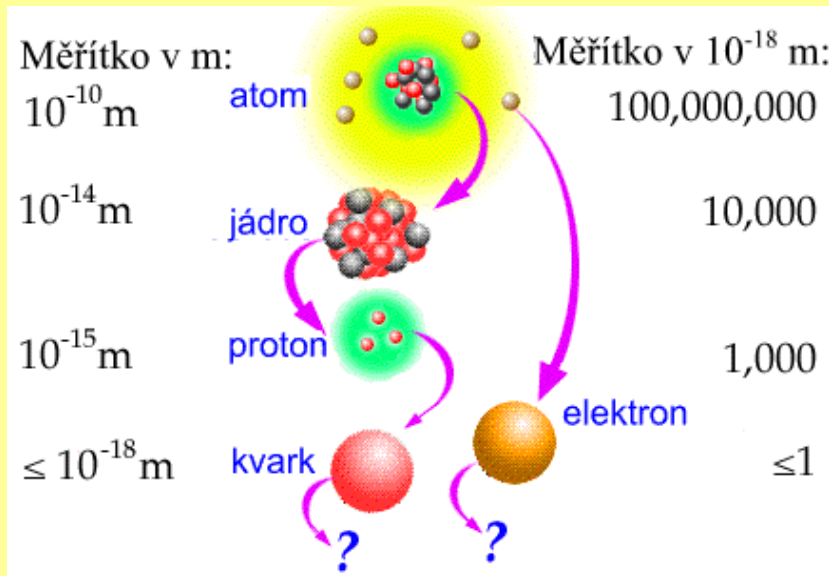


Dominantní zdroj
těžkých i nejtěžších prvků (zlato, uran)

**Ale napřed potřebujeme
lehké prvky**

Složení hmoty

Hmota je složena z částic - mezi nimi působí interakce



Atomová fyzika, fyzikální chemie

Jaderná fyzika

Fyzika elementárních částic

Superstrunové teorie? (rozměr 10^{-35} m)?

Hustota vody 10^3 kg/m³ $\xleftarrow{R_{\text{ATOM}}/R_{\text{JÁDRO}} \sim 10^5 \rightarrow V_{\text{ATOM}}/V_{\text{JÁDRO}} \sim 10^{15}}$ Hustota jádra $\sim 10^{18}$ kg/m³

Důležité nástroje pro popis mikrosvěta:

- 1) **Speciální teorie relativity** - rychlosti blízké rychlosti světla, kinetická energie srovnatelná s klidovou
- 2) **Kvantová fyzika** - velmi malé hodnoty veličin \rightarrow kvantový a pravděpodobnostní charakter, Heisenbergův princip neurčitosti

Zkoumání kvark-gluonového plazmatu

Zkoumání hmoty na počátku Velkého třesku a v supernovách pomocí urychlovačů

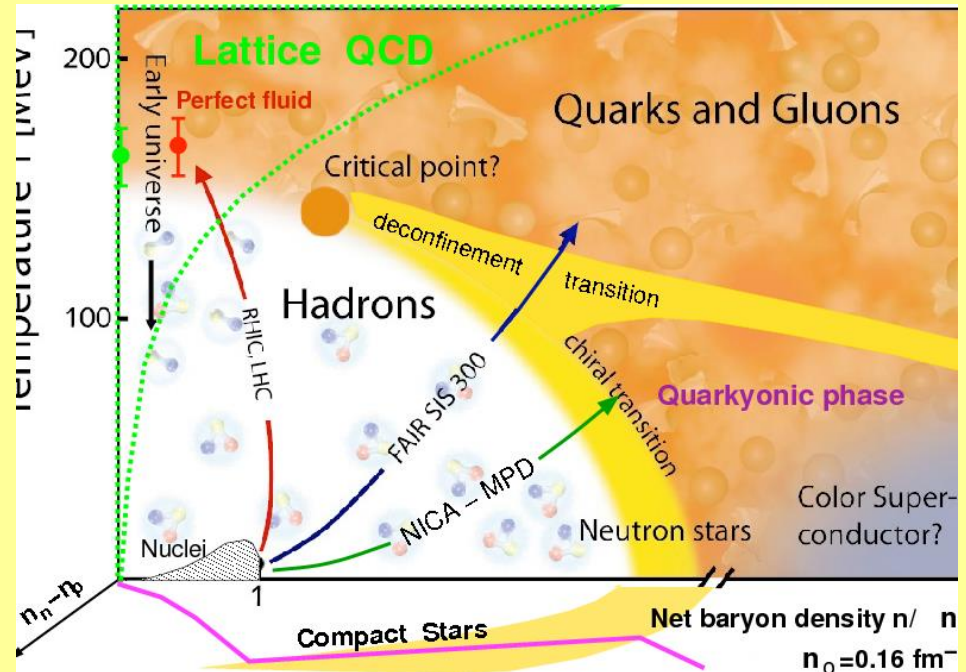
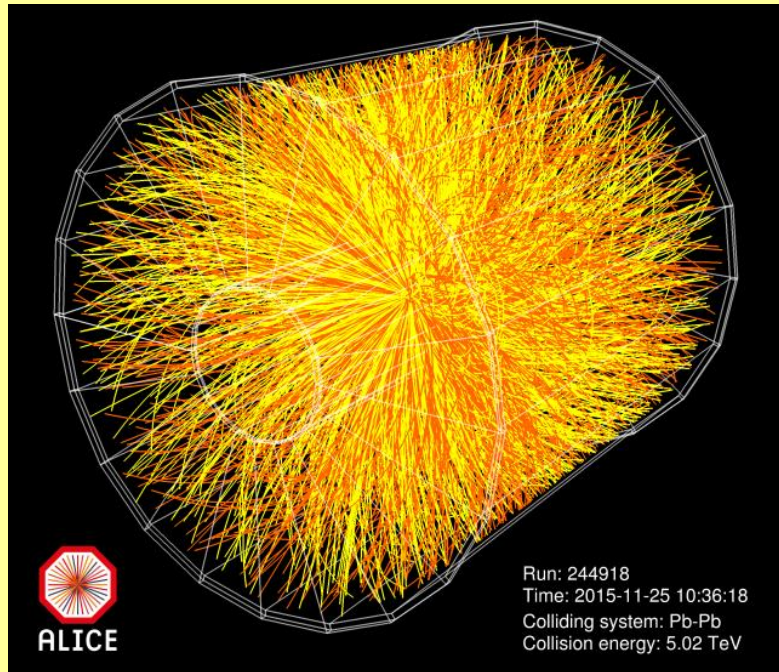
Při srážce vzniká na dobu okolo 10^{-22} s extrémně horká a hustá hmota ($T = 10^{12}$ K)

Kvark- gluonové plazma – silně interagující hmota s extrémně nízkou viskozitou

Při Velkém třesku přechod od kvark-gluonového plazmatu v době 10 mikrosekund

Přechod pro vysoké teploty (hustoty energie) a nízké baryonové hustoty – spojitý

Termodynamická rovnováha nastolena ještě v kvark-gluonovém plazmatu



Velmi horká jaderná hmota – počátek našeho vesmíru

Kam se kouká LHC?

Dosažená teplota:

$\sim 3 \times 10^{12} \text{ K}$

(100 000krát více než v
nitru Slunce)

Dosažená hustota:

$\sim 10^{18} \text{ kg/m}^3$

$1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$

Kvark-gluonové plazma

$10 \mu\text{s} = 10^{-5} \text{ s}$

Hadronová hmota

V pozdější fázi jen nejlehčí
baryony – proton a neutron

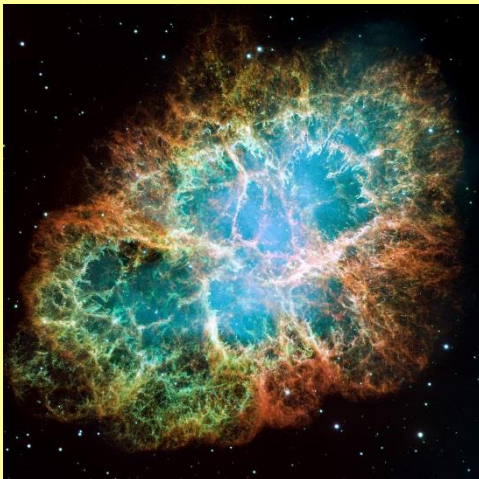
$3 \text{ min} = 1,8 \cdot 10^2 \text{ s}$

Atomová jádra – vodík, helium
a trochu těžších jader

$400\,000 \text{ let} \sim 10^{13} \text{ s}$

Reliktní záření

Takové hustoty má i
hmota v nitru
supernovy a
neutronové hvězdy



Vesmír chladne

Jak vznikl vesmírný vodík?

$t \sim 10^{-4} \text{ s}$ $T \sim 2 \cdot 10^{12} \text{ K}$ chladnutí \rightarrow kvarky z velmi horké a husté hmoty (kvark-gluonového plazmatu) se po trojicích spojí do částic podobných protonům a neutronům

Protony a neutrony jsou nejlehčí

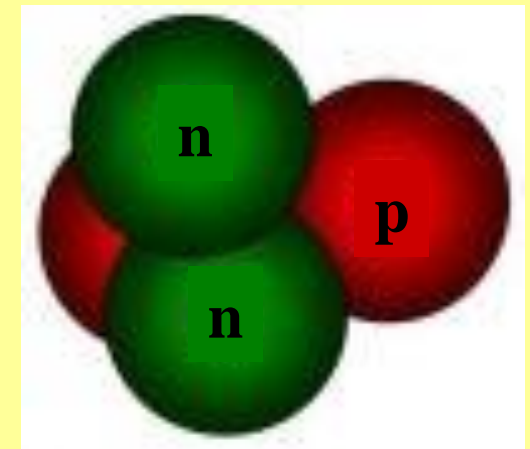
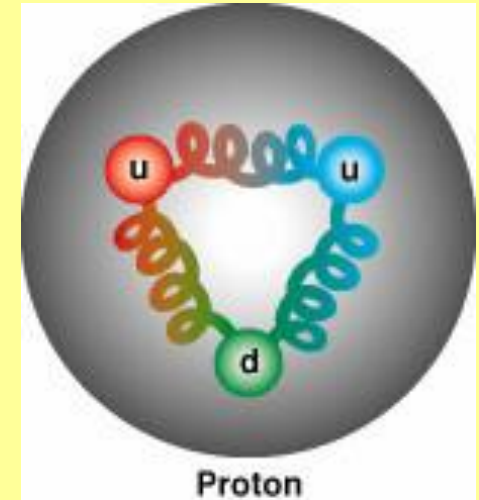
Dostatek tepla – přeměna neutronů na protony a naopak

A jak vzniklo helium

$t \sim 1 \text{ s}$ $T \sim 10^{10} \text{ K}$ jsou možné vázané stavy nukleonů \rightarrow vznikají lehká jádra

$t \sim 100 \text{ s}$ $T \sim 10^9 \text{ K}$ energie nestačí na reakci $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$:
(rozpad neutronů nevázaných v jádrech $T_{1/2} = 10,4 \text{ min}$)

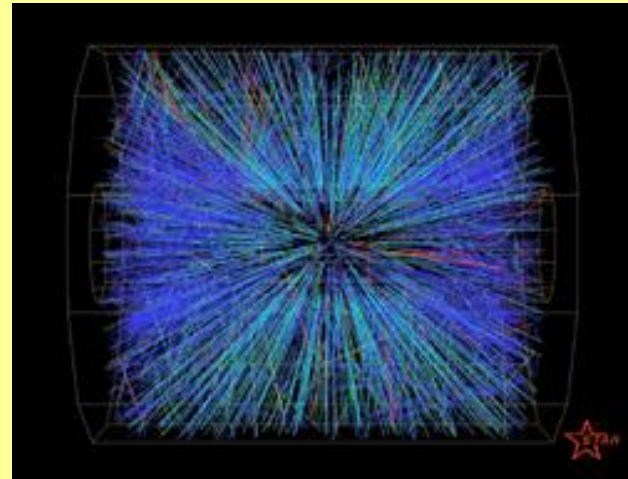
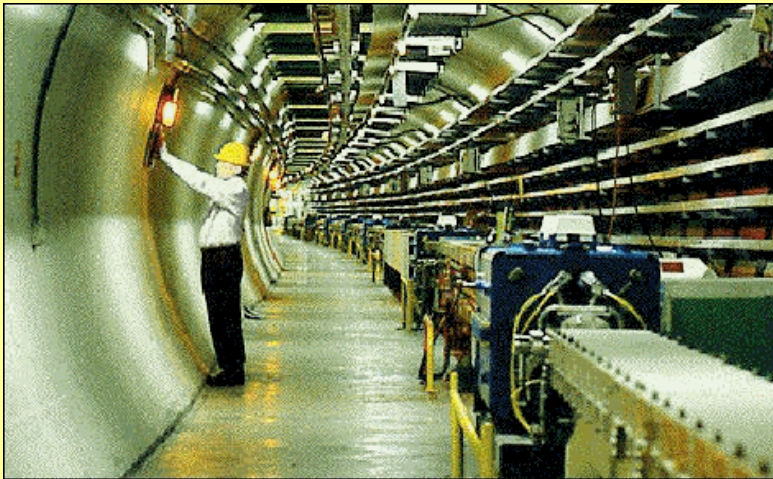
zůstávají pouze protony (vodík) a určité množství lehkých prvků (hlavně ^4He - má velmi vysokou vazbovou energii)



I trochu těžších prvků

Ve velmi malém množství vznikají i další lehké izotopy prvků D , ${}^6\text{Li}$..., velmi citlivý indikátor vlastností vesmíru v jeho počátečních stavech

Nutné fluktuace v hustotě - mohou vznikat při přechodu od kvark-gluonového plazmatu k protonům a neutronům



A jak to víme? - možno testovat na největších urychlovačích

$t \sim 400\,000$ let $T \sim 4000$ K - zachycení elektronů jádru \rightarrow vznik atomů \rightarrow počátek chemie

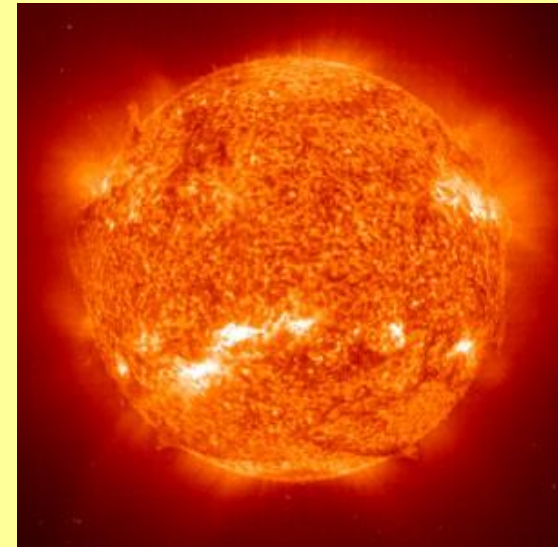
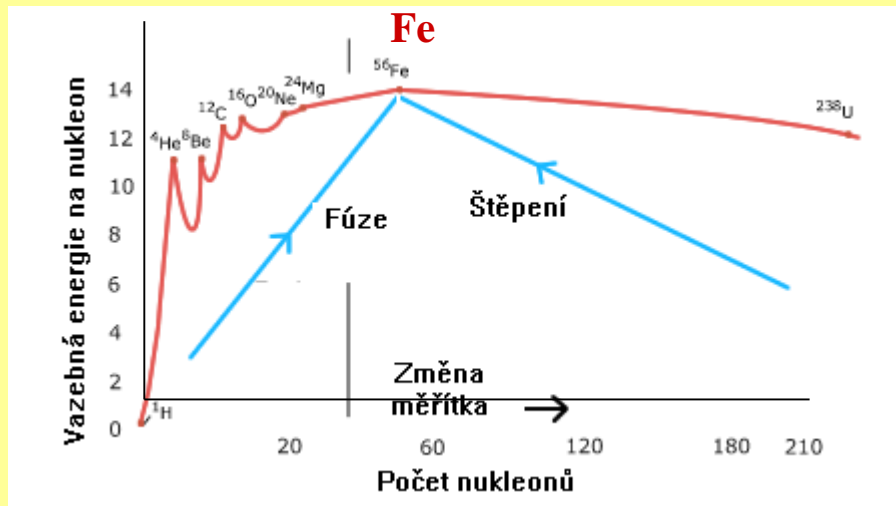
$t \sim$ stovky milionů let - formování hvězd a galaxií - vznik prvků ve hvězdách

H, He a Li určitě nestačí !!!!

A jak dále? – pomohou nám hvězdy



Zdrojem všeho jsou jaderné reakce ve hvězdách (Chemických prvků i energie)



Závislost vazebné energie na nukleon na počtu nukleonů

Možnosti získání energie spalováním vodíku případně těžších jader - zdroje energie → ohřev hvězdy → zabránění gravitačnímu kolapsu hvězdy & zdroj různých chemických prvků

Základní reakce $\text{H} \rightarrow \text{He}$ – reakce jader vodíku (proton – protonová reakce) nebo reakce jader vodíku s těžšími prvky – působí jako katalyzátory (CNO cyklus):

A) p-p řetězec

B) CNO cyklus

C) 3α -proces (Salpeterův)

Velmi silná závislost na teplotě

Ještě vyšší teploty → vznik ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg ... dalším spalováním helia, spalování ^{12}C
až po železo

Jaderné reakce vysvětlily zdroj energie ve Slunci a hvězdách a tvorbu prvků

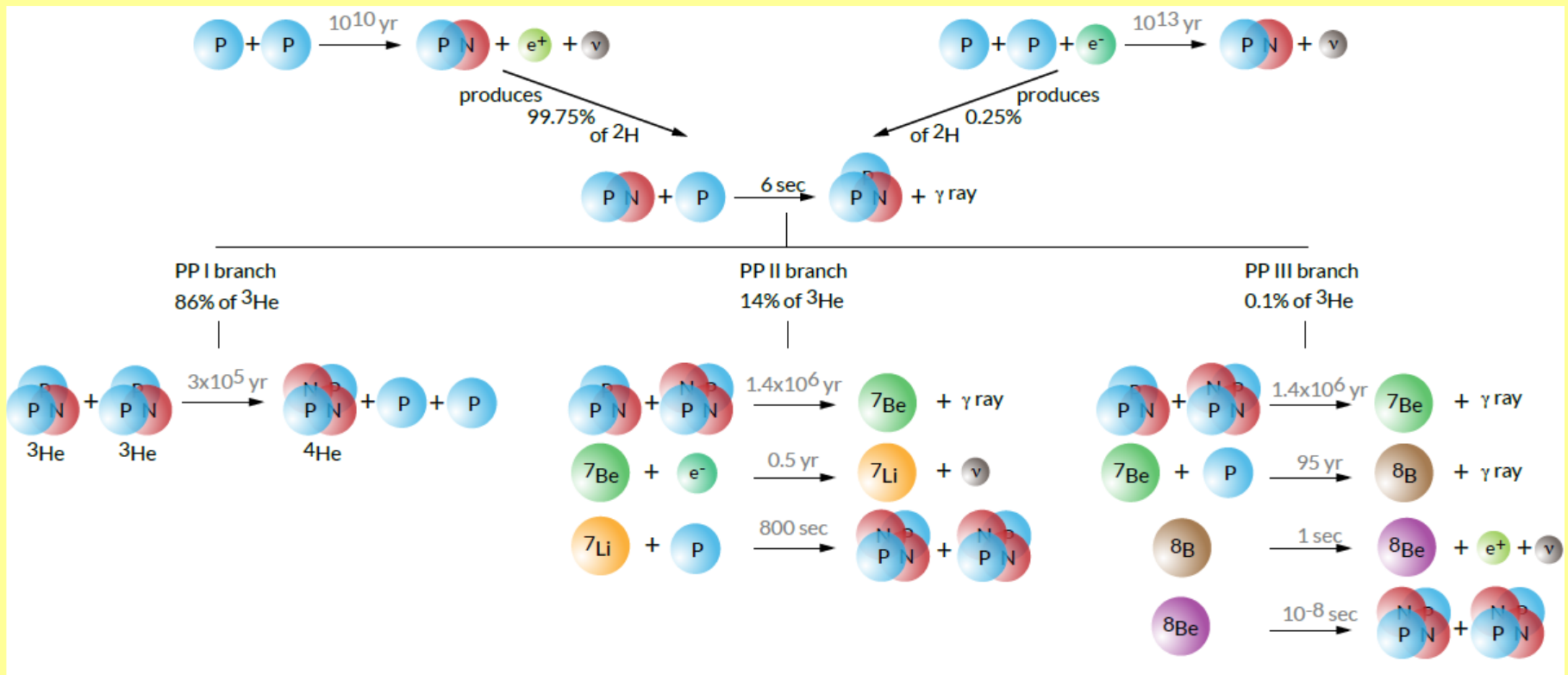


Jaderné reakce (tentokrát rozpad těžkých prvků) vysvětlily teplo v zemském nitru

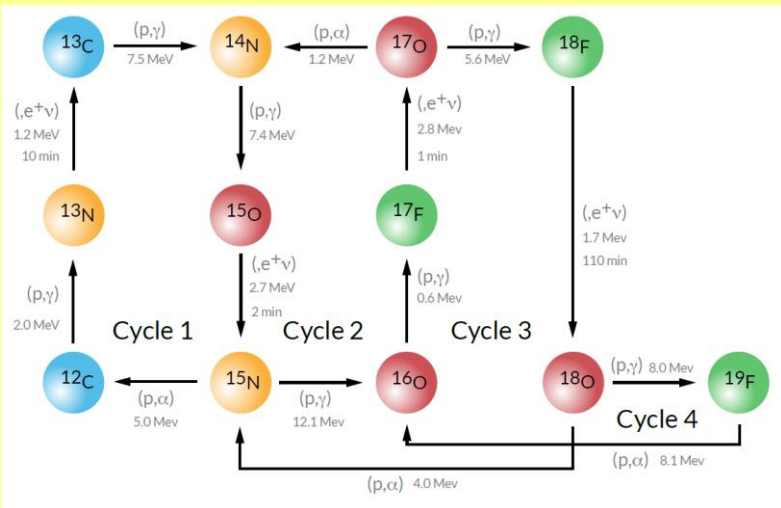
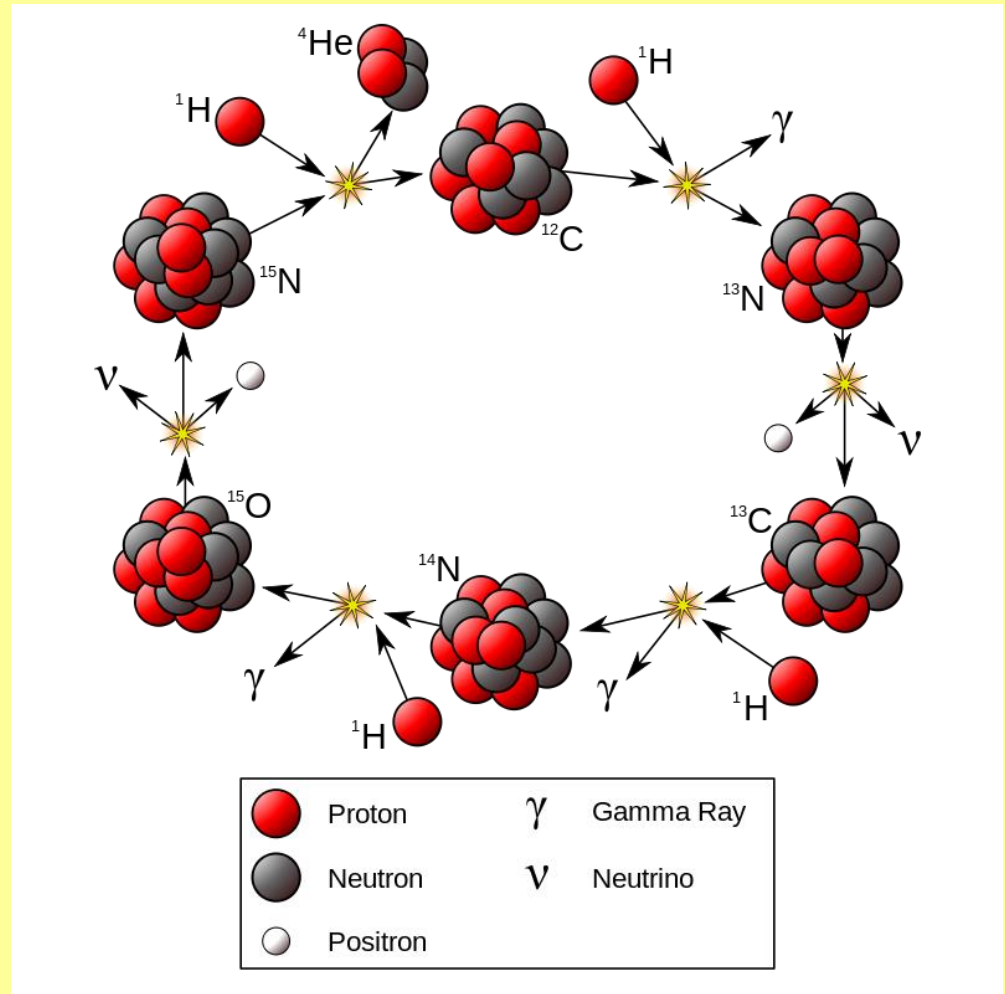
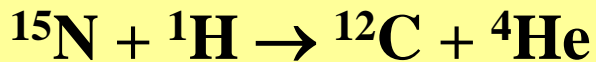
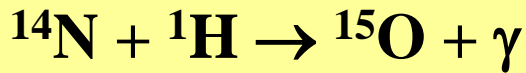
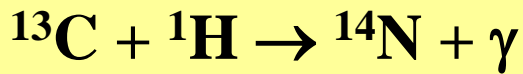
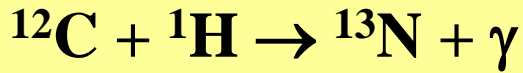


Proton-protonový cyklus

- 1) ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e$
- 2) ${}^2\text{D} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
- 3) ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$



CNO cyklus



Uhlík je katalyzátor
Neprobíhá v raném vesmíru

Spalování helia – jak se dostat k těžším prvkům

Hvězdy s hmotností Slunce a více

při ještě vyšších teplotách ($T = 10^8\text{K}$)

Problém – nejsou stabilní jádra s počtem nukleonů 5 a 8

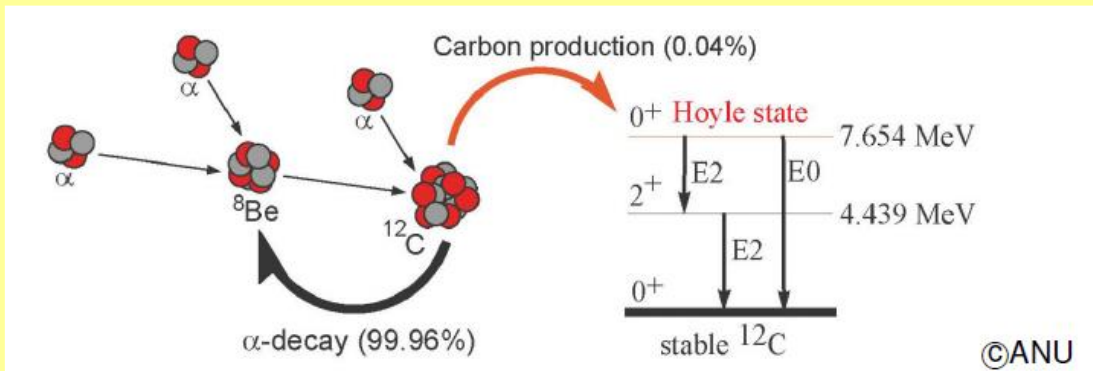
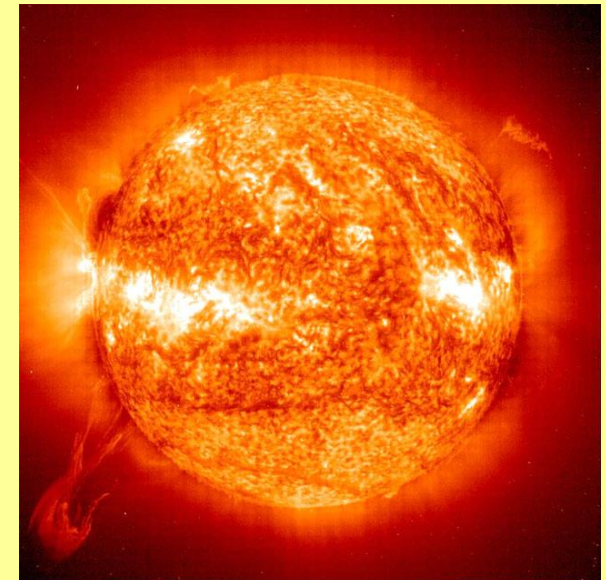
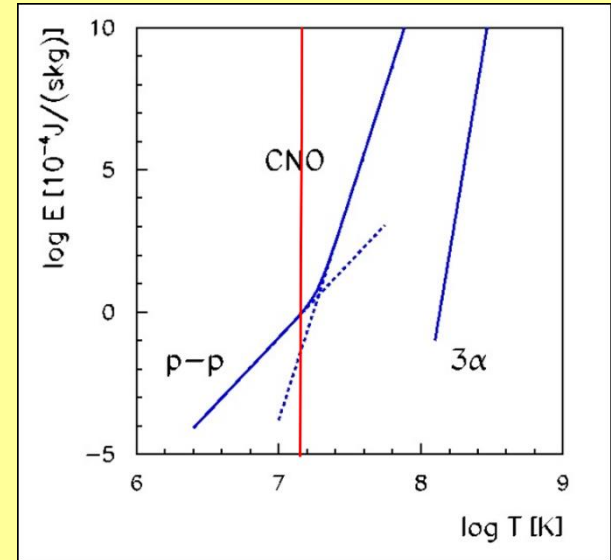
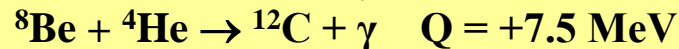
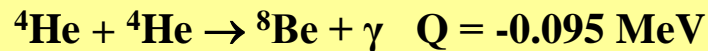
Vznik ${}^8\text{Be}$ s $T_{1/2} = 6,7 \cdot 10^{-17}\text{ s}$

Pro hustotu 10^8 kg/m^3 - 1 ${}^8\text{Be}$ na 10^9 ${}^4\text{He}$

Vznik ${}^{12}\text{C}$ umožněn záchytem dalšího ${}^4\text{He}$ a přechodem do druhého vzbuzeného stavu ${}^{12}\text{C}$ ($0^+ - 7,654\text{ MeV}$) – rezonance – rozpad s pravděpodobností $4 \cdot 10^{-4}$ do základního stavu

Je třeba dodat energii 287 keV → **chvost Maxwellova rozdělení**

3α -proces (Salpeterův):



Všechny prvky těžší než bór vznikají pomocí Salpeterova cyklu Slunce – i v něm probíhá spalování helia

Jak to víme?

1) Jaderné modely vysvětlují zářivý výkon i „sluncotřesení“

2) Posel z nitra Slunce - neutrino

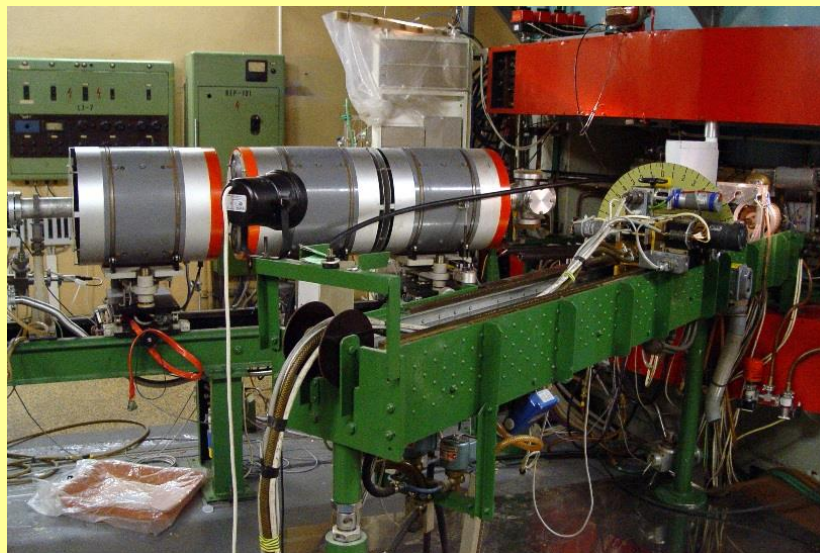
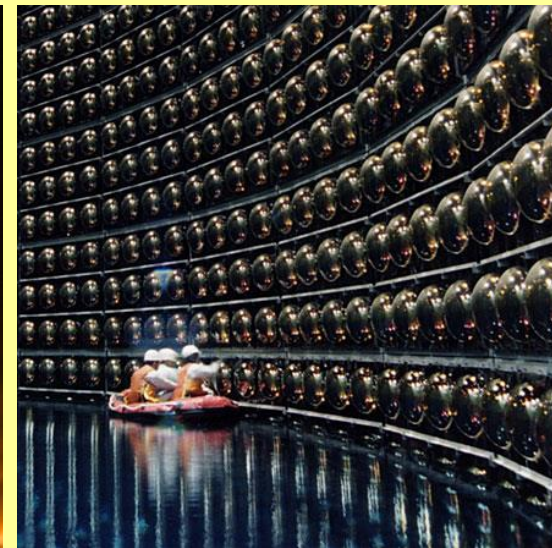
3) Testování reakcí na urychlovačích:

a) Radioaktivní svazky

b) Malé urychlovače iontů

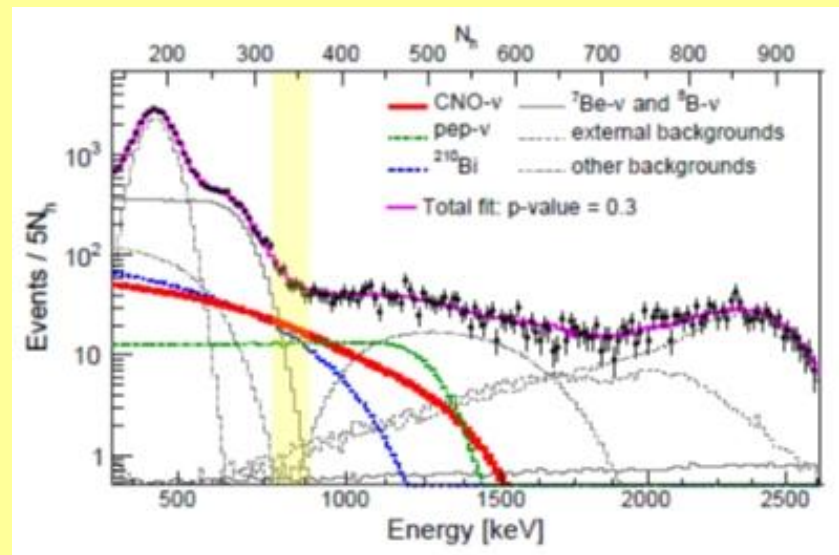
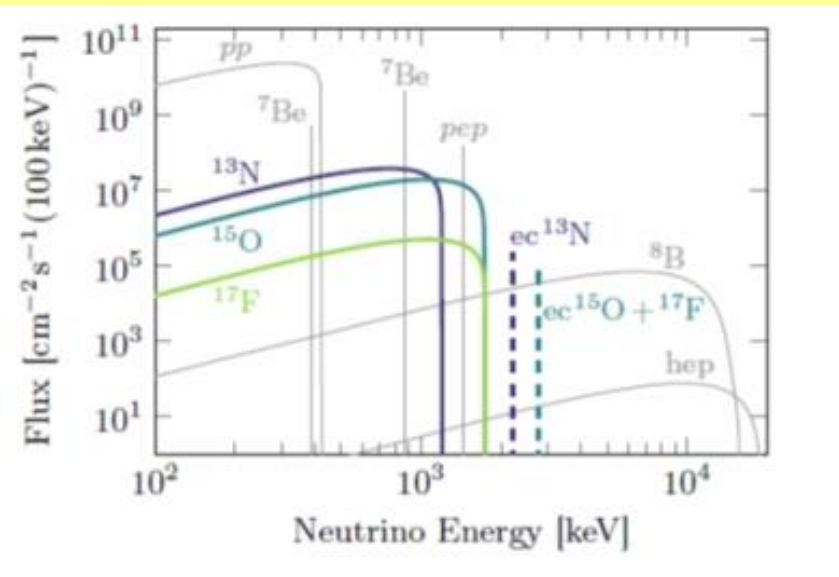
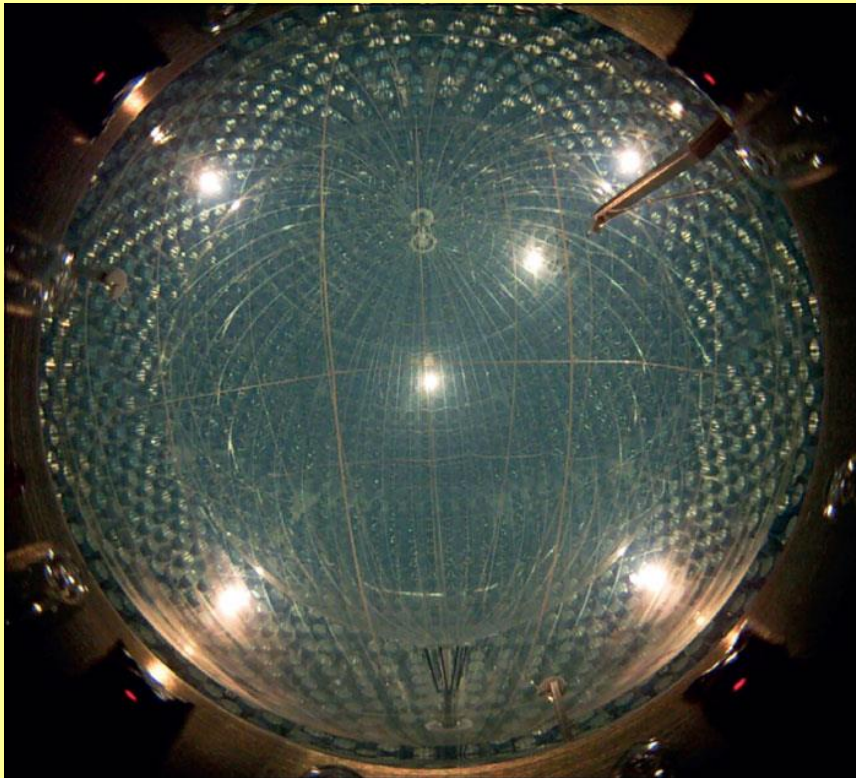
c) Podzemní laboratoře

d) Specifické metody – Trojský kůň



Pozorování neutrin z jaderných reakcí ve Slunci

Neutrinovému detektoru Borexino v podzemní laboratoři Gran Sasso se podařilo určit příspěvky neutrin z pp-cyklu a CNO-cyklu
Přímá a okamžitá informace o reakcích v nitru Slunce



Přímé měření astrofyzikálních reakcí nabitých částic

Velmi malé energie, velmi nízká pravděpodobnost, nutnost odstínění od pozadí → podzemní laboratoře

Příklad: Experiment LUNA v podzemní laboratoři Gran Sasso, zatím urychlovač s napětím 400 kV, nově se instaluje urychlovač 3 500 kV

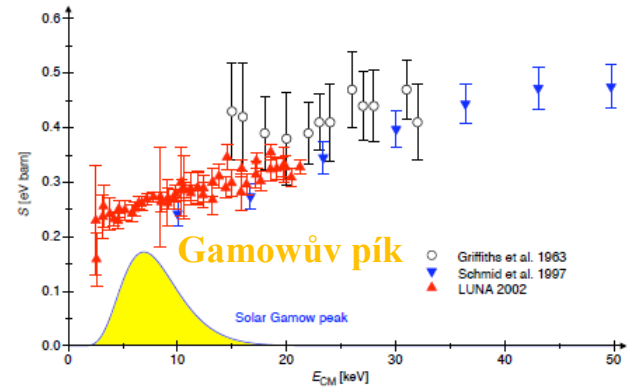


Figure 5: The ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$ astrophysical factor $S(E)$ with the total error.

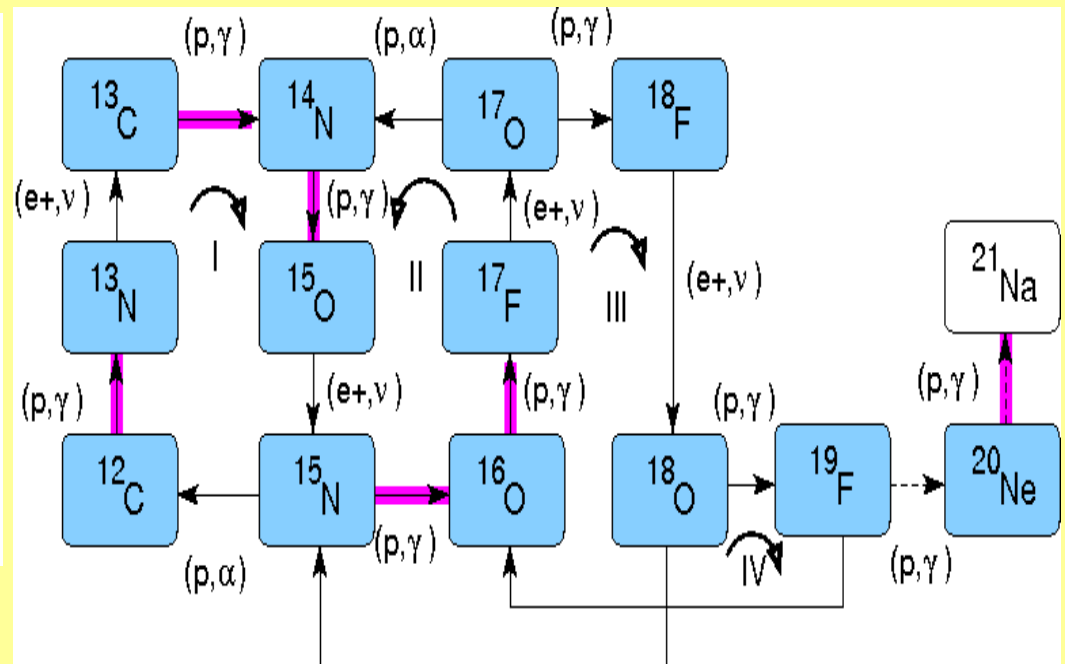
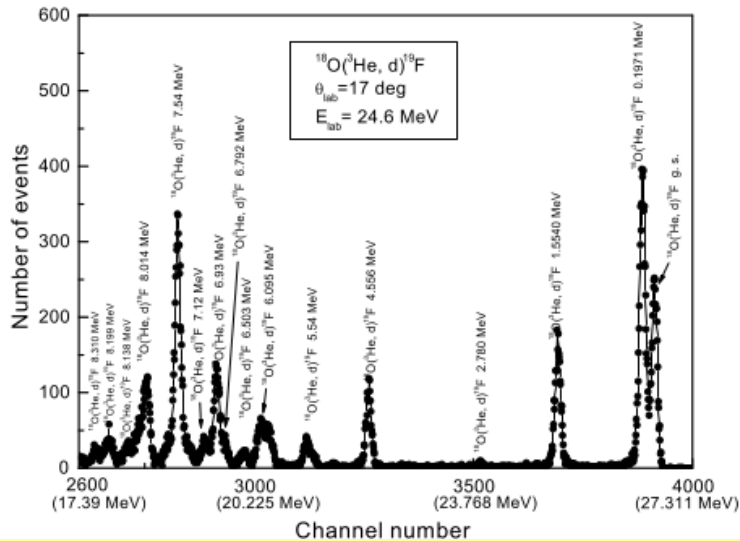
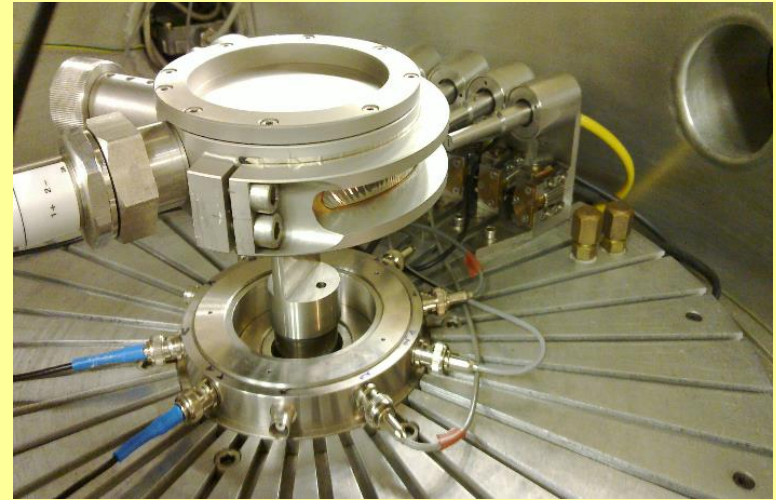


Elektrostatický lineární urychlovač s napětím 400 kV

Studium reakce $^{18}\text{O}(p,\gamma)^{19}\text{F}$

Pomocí cyklotronu U120M v ÚJF AVČR měřili kolegové z OJR na plyném terči ^{18}O reakci $^{18}\text{O}(^3\text{He},d)^{19}\text{F}$

Použili metodu ANC. Výsledky porovnali se dvěma vzájemně si protirečícími měřeními, měření není kompatibilní s měřením Wiesnera 1980, potvrzuje měření Bucknera 2012



Spektrum deuterónů z daného experimentu

Hvězdy se zahlcují produkty svého spalování

V nitru hvězdy přibývají těžší prvky → ubývá vodík a lehčí prvky → smrštění hvězdy → ohřev → zapálení dalších reakcí spalování těžších prvků v nitru a zapálení reakce lehčích prvků v další vnější slupce

Vznik slupek různého složení ve hvězdě:

- 1) vnitřní vysoké obohacení těžšími prvky
- 2) vnější s větším obsahem lehčích elementů

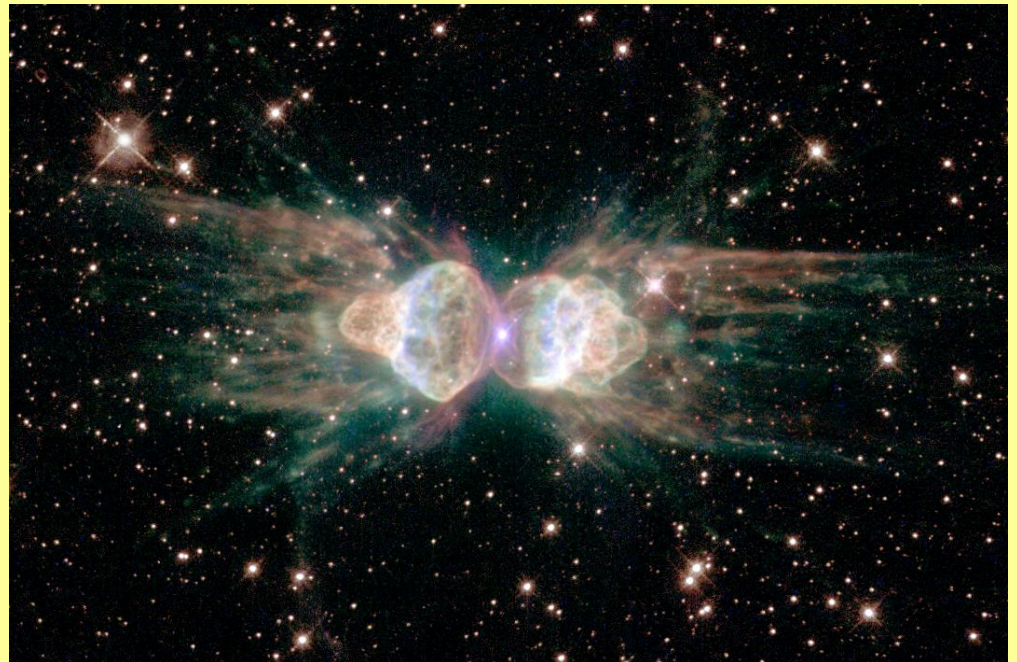
Úbytek „paliva“ (lehčích prvků) & přírůstek „popela“

Přesun hmoty z hvězdy do mezihvězdného prostředí:

Hvězdný vítr - stálý úbytek hmoty hvězdy. Explosivní procesy - např. výbuchy nov

Později vznikající hvězdy jsou obohaceny těžšími prvky vzniklými v předchozí generaci hvězd

Planetární mlhovina Mravenec, materiál vyvrhovaný z hvězdy v posledních stádiích evoluce (snímek Hubblova teleskopu)



Čím těžší hvězda tím těžší prvky

Větší hmotnost hvězdy → větší teplota v nitru → rychlejší průběh reakcí → rychlejší vydělování energie → **vývoj hvězdy je rychlejší** → její život je kratší

Větší teplota → snadnější překonání bariery vytvořené elektrickým polem jádra i pro těžší jádra (s větším nábojem)

Velmi intenzivní vyvrhování materiálu - velmi masivní Wolf-Rayetova hvězda může vyvrhovat a $4 M_Z$ za rok

Velmi silné obohacování mezihvězdného prostředí

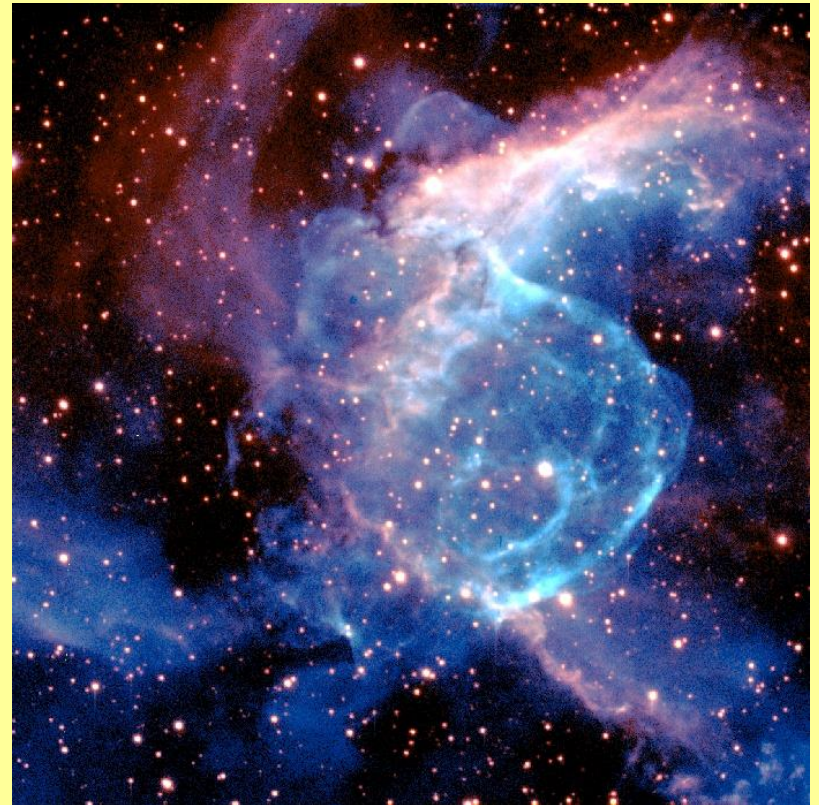
Doby života různě hmotných hvězd:

(převzato z knihy V. Vanýska: Základy astronomie a astrofyziky)

Hmotnost	Doba života	Hmotnost	Doba života
39 M_S	$0.5 \cdot 10^6$ let	2.2 M_S	$1160 \cdot 10^6$ let
20 M_S	$4.6 \cdot 10^6$ let	1.7 M_S	$2700 \cdot 10^6$ let
6.7 M_S	$46 \cdot 10^6$ let	1.26 M_S	$3800 \cdot 10^6$ let
3.5 M_S	$319 \cdot 10^6$ let	1.1 M_S	$7000 \cdot 10^6$ let

Existence Země založena na existenci velmi hmotných hvězd v předchozí etapě vývoje vesmíru

Masivní Wolf-Rayetova hvězda ($M \geq 50 M_S$) vyvrhuje plyn, který vytváří mlhovinu NGC2359 (snímek 1.2 m teleskopu v Observatoři Freda Lawrence Whippleho v Arizoně)



Reakce ve hvězdách těžších než Slunce

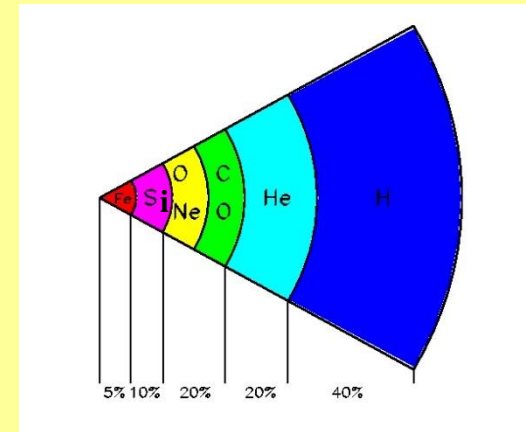
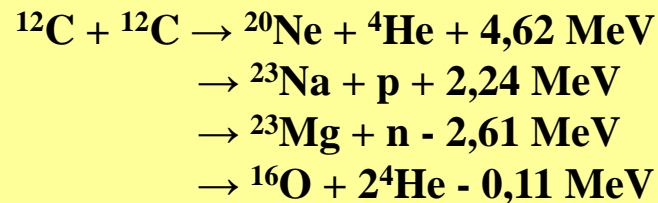
Reakce produkující hélium:
(i v lehkých hvězdách)

- 1) Proton-protonový cyklus
- 2) CNO – cyklus

Vznik uhlíku - 3α (Salpeterův) proces

Ještě vyšší teploty \rightarrow vznik ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg ... dalším spalováním helia,

dále pak spalování ^{12}C :



Větší hmotnost hvězdy \rightarrow větší teplota v nitru \rightarrow rychlejší průběh reakcí \rightarrow rychlejší vydělování energie \rightarrow **vývoj hvězdy je rychlejší – spalování O a Ne - prvky až po železo**

Na vzniku těžších prvků se podílejí (závislost na vazebné energii):

α -proces: syntéza prvků pomocí ^4He procesem (α, γ), vznikají jádra až po ^{40}Ca ($T = 10^9\text{K}$)

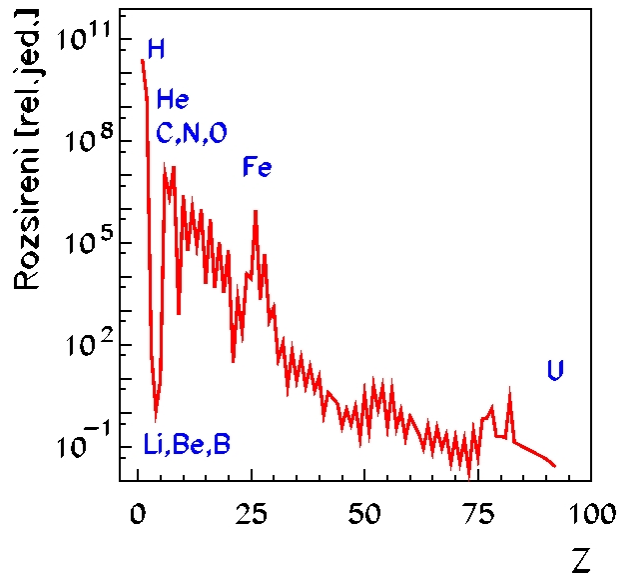
e-proces: $T = 4 \cdot 10^9\text{K}$ a $N_p/N_n = 300$ \rightarrow vznik prvků skupiny železa: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni

p-proces: prostředí plné vodíku \rightarrow vznik vzácnějších lehkých prvků ($T = 2,5 \cdot 10^9\text{K}$)

Jaderné reakce – vysvětlení zdrojů energie a původu prvků

Klíčový úspěch jaderné astrofyziky

"Teorie o vzniku chemických prvků musí vysvětlit rozšíření jednotlivých prvků ve vesmíru"



Pozorované rozšíření prvků ve vesmíru
(C.A. Barnes et al: Jaderná astrofyzika,
Camb. University Press 1983)

Pochopení přesného průběhu vzniku prvků ve hvězdách

Nutno znát přesné hodnoty pravděpodobností reakcí

Zkoumání pomocí přímých i nepřímých metod

Využití cyklotronu ÚJF AV ČR

**Počáteční podmínky - chemické prvky vzniklé
ve Velkém třesku**

Chemické prvky vzniklé v průběhu života hvězd

Nejlehčí (vodík, helium) – Velký třesk

Lehčí – hvězdy slunečního typu

Těžší až po železo – velmi hmotné hvězdy

**Nejtěžší (zlato, uran) – výbuch supernovy, splynutí
neutronových hvězd**

**Silně závisí na pravděpodobnostech různých
jaderných reakcí**

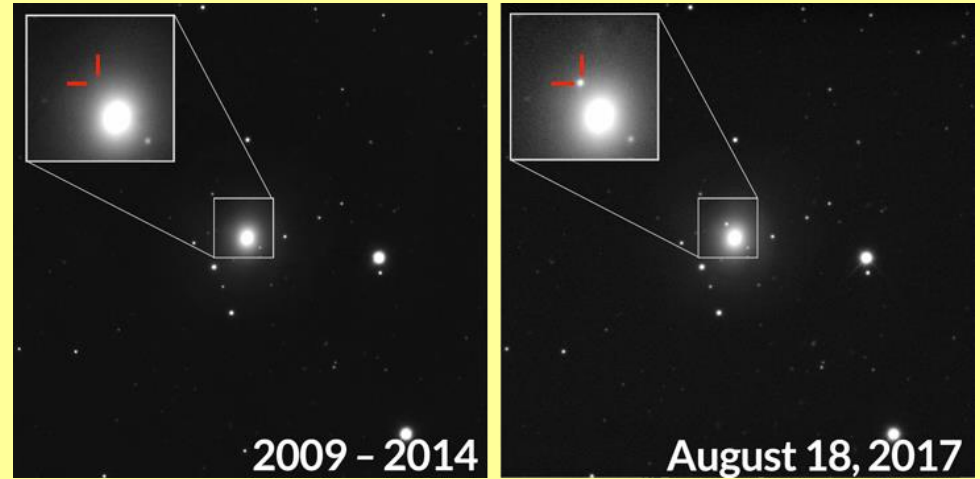


**A teď zpátky k těm
těžkým i nejtěžším**

a tedy k zábleskům gama

Pozorování ve velkém rozsahu spektra

- 1) Záblesk gama – gama (GRB 170817A) a rentgenovské záření
- 2) Ultrafialové záření
- 3) Viditelné světlo
- 4) Infračervené záření
- 5) Radiové vlny (SSS17a/AT 2017gfo)
- 6) Gravitační vlny (GW170817)



Galaxie NGC4993 v souhvězdí Hydry
vzdálenost 130 milionů sv. l.



Kilonova byla pozorována v infračervené oblasti (Hubbla) rentgenovské (Chandra)



Některé specifické vlastnosti

Nejbližší krátký záblesk gama – jen 130 milionů sv. l.

Doba trvání gravitačního záblesku 100 s

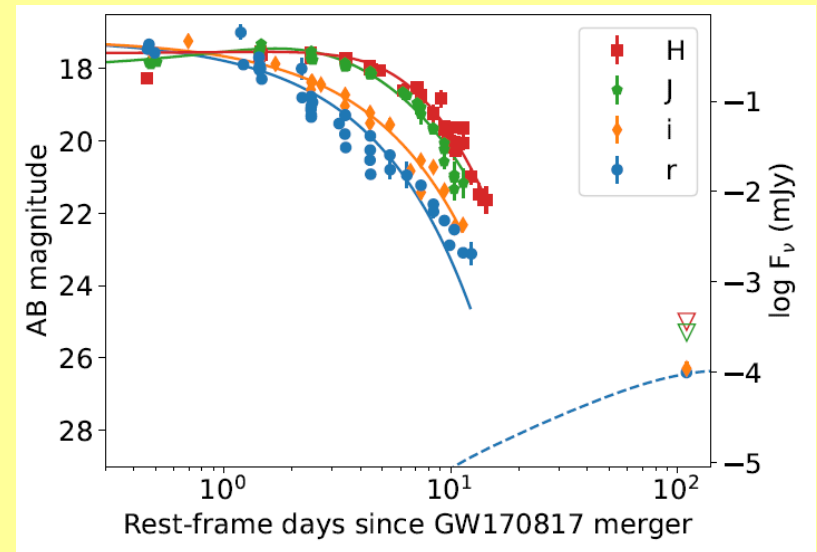
Doba trvání záblesku gama 2 s (začal 1,5 s po konci gravitačního)

Rentgenovský dosvit byl zachycen 9 dní po splynutí

Optický, infračervený a radiový signál (dosvit) začal 11 hodin po splynutí

Celková hmotnost systému 2,8 hmotností Slunce

Na výtrysk se díváme asi trochu z boku, proto ten zpožděný rentgenový signál a dosvit

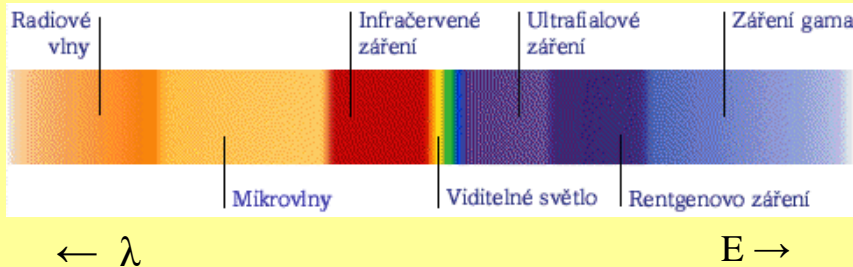


Gravitační detektor LIGO

Jasnost kilonovy, napřed pokles a pak nárůst z dosvitu

Záblesky gama

Záření gama – elektromagnetické záření s velmi vysokou energií

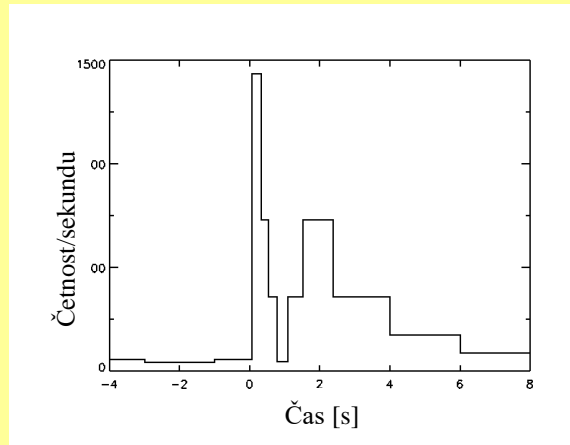


Vlnová délka: $\lambda \leq 10^{-10}$ m
Frekvence : $f \geq 10^{18}$ Hz
Energie : $E \geq 10$ keV

Záblesky gama objeveny na začátku 70. let vojenskými družicemi Vela – hledaly záblesky záření gama z jaderných explozí



Družice Vela 5b



Jeden z prvních zaznamenaných záblesků



Ruský pokusný jaderný výbuch

**Zaznamenaly záblesky přicházející
Z vesmíru a ne ze Země**

↓
Nový typ vesmírných jevů

Jak na ně?

Družice s detektory záření gama

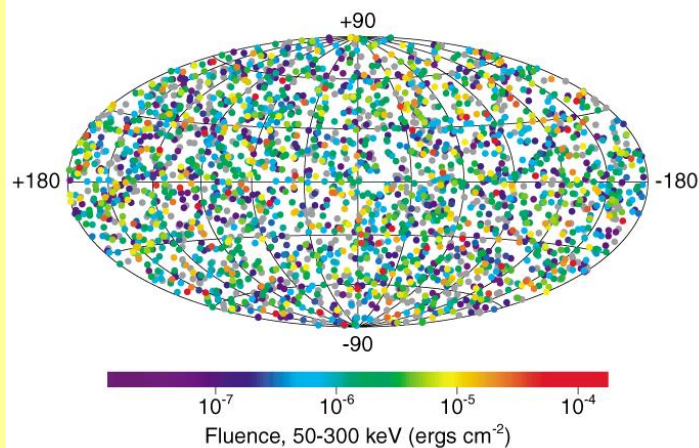
- 1) **Nové sondy umožňující přesnou pozici záblesku gama**
- 2) **Internetová síť – umožňuje rychlou komunikaci a rychlé hledání optických a rentgenových protějšků**
- 3) **Sondy s komplexem přístrojů pro celé spektrum**
- 4) **Robotické optické dalekohledy na Zemi**



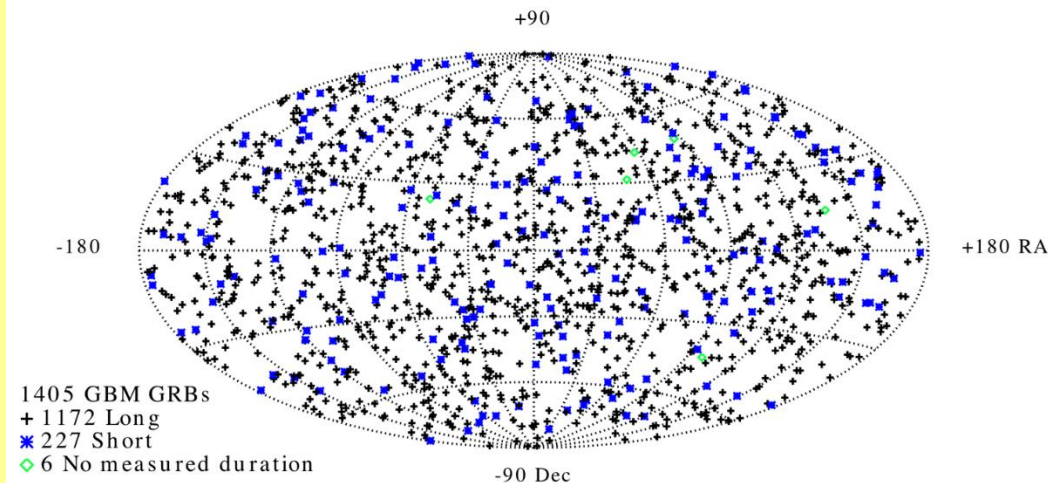
Družice Compton

V minulých letech obrovský pokrok sledování –
vysvětlení jejich původu

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Fermi GBM GRBs in first six years of operation



Katalog zdrojů pozorovaných družicí Compton

Katalog prvních šesti let družice Fermi

Záblesky gama – základní vlastnosti

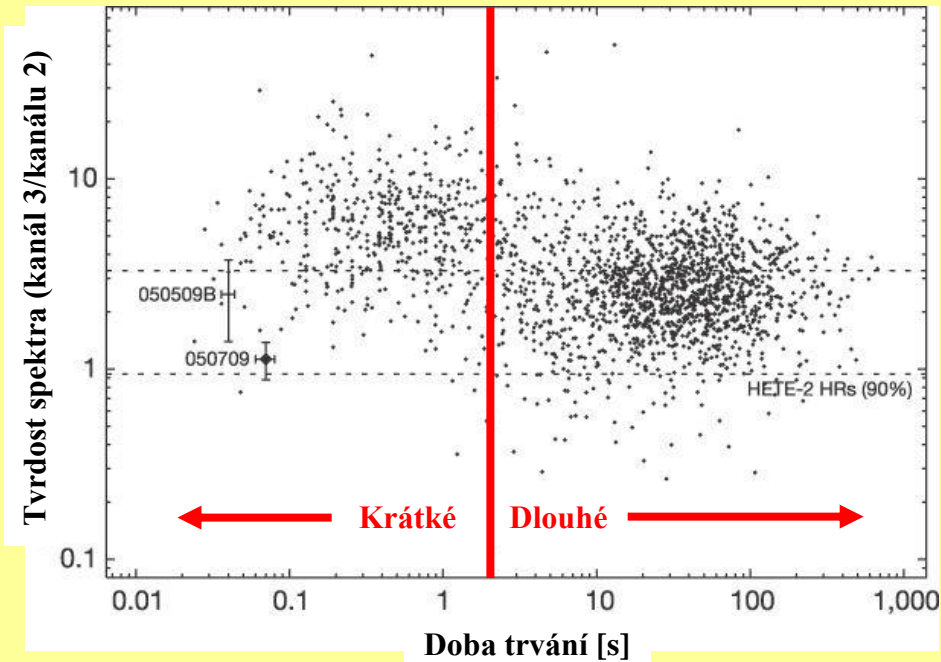
Nejenergetičtější emise elektromagnetického záření ve vesmíru

Četnost záblesků je ~ 3 denně $\rightarrow \sim 1000$ ročně

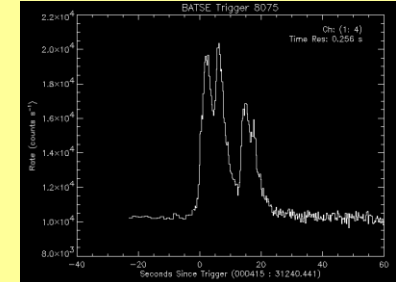
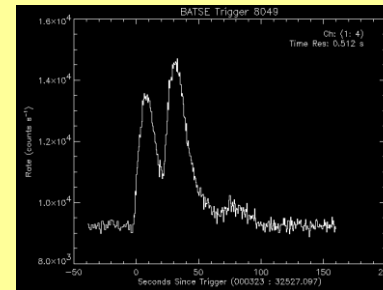
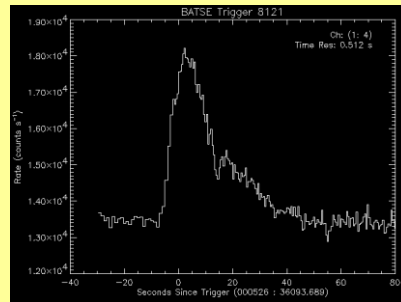
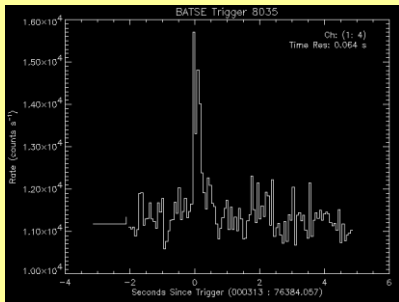
Dva různé typy záblesků gama:

- 1) Dlouhé (70 %)- delší než 2 s (až hodiny)
- 2) Krátké (30 %)- kratší než 2 s (až ms)

Pozorování dosvitu ve světle, radiových vlnách – Dopplerův posuv – kosmologické vzdálenosti



Extrémně energetický proces – dlouhé – supernovy, krátké – splynutí neutronových hvězd



Příklady časových spekter záření gama záblesků (archív sondy BATSE) GRB000313 - krátkodobý, GRB000526 - dlouhodobý, GRB000323 a GRB000415 – dlouhodobé se strukturou

Dlouhé záblesky gama

Délka záblesku 2 s až 1000 s

Spojeny s výbuchy **supernov**, vznik intenzivních výtrysků hmoty -

Velmi intenzivní emise gama a dalšího záření - **hypernova**

S největší pravděpodobností **asymetrický výbuch**

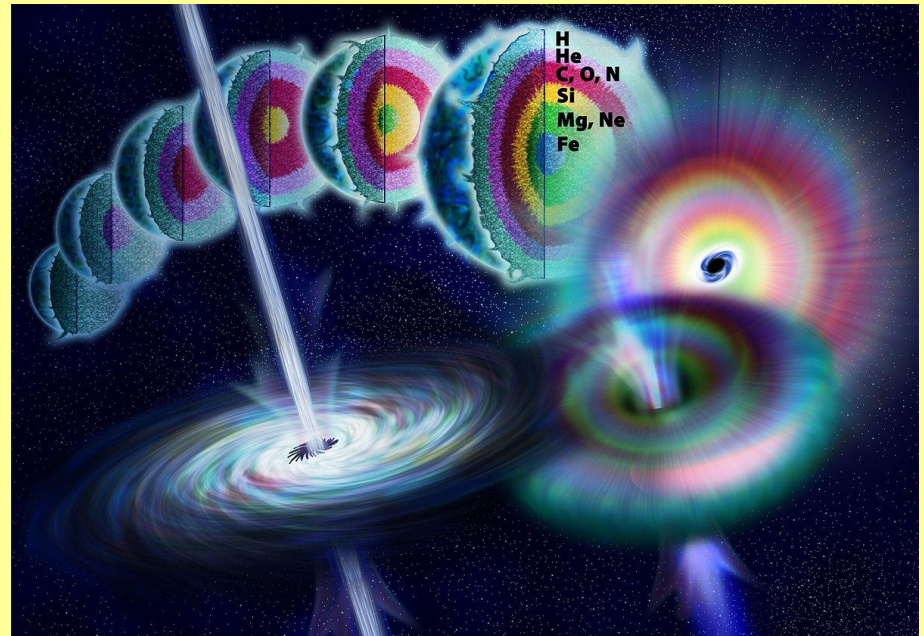
Nejvzdálenější a nejenergetičtější objekty pozorované ve vesmíru

Jsou v galaxiích (místech), kde se tvoří hvězdy, mladé systémy, krátký život

V řadě dosvitů se objevují zjasnění v pozdějších dnech, za které by mohla být zodpovědná supernova

Celková intenzita = dosvit záblesku + svit supernovy + svit mateřské galaxie

- 1) Na počátku vše přezařuje záře dosvitu (hodiny, dny)
- 2) Po jejím poklesu je vidět supernova, jejíž záře klesá pomaleji (dny)
- 3) Nakonec zůstává jen konstantní záře mateřské galaxie



Intenzity záblesků gama

Označování záblesků:

Gamma Ray Burst rok měsíc den

Záblesk gama pozorovaný 23. ledna 1999 má označení **GRB990123a** ← Pořadí v daném dni

Intenzity:

GRB990123 (energie 40 keV – 2 MeV) detekovaný družicí BATSE: $i = 26,8 \cdot 10^{-12} \text{ J/cm}^2$

Vzdálenost z rudého posuvu ($z = 1,6$) →

$$\rightarrow r = 1,27 \text{ Gpc} = 4,1 \cdot 10^9 \text{ sv.l} = 3,9 \cdot 10^{25} \text{ m} = 3,9 \cdot 10^{27} \text{ cm}$$

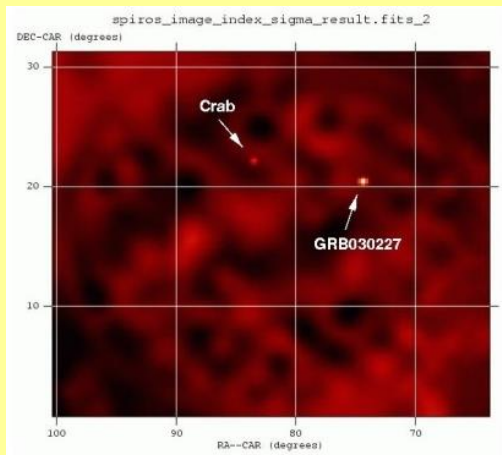
Za předpokladu symetrická produkce je intenzita:

$$I = 4 \cdot \pi r^2 i = 4 \cdot 3,14 \cdot (3,9 \cdot 10^{27})^2 \cdot 26,8 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 5 \cdot 10^{45} \text{ J}$$

Slunce za dobu svého života (10 miliard let) vyzáří $\sim 10^{44} \text{ J}$

V případě symetrického zdroje záblesku gama se v sekundách vyzáří o tři řády více energie než Slunce během své existence. Asymetrický zdroj → zmenšení celkové intenzity

Srovnání stálého zdroje záření gama (pozůstatek supernovy – Krabí mlhovina) a záblesku gama



Zajímavé případy dlouhých záblesků gama

Supernova SN1998bw a záblesk GRB980425

($z = 0,0085 \leftrightarrow 30 \text{ Mpc} = 0,1 \cdot 10^9 \text{ sv.l.}$)

Supernova SN2003dh a záblesk GRB030329

($z = 0,169 \leftrightarrow 800 \text{ Mpc} = 2,6 \cdot 10^9 \text{ sv.l.}$)

Záblesk GRB 080913 ($z = 6,7 \leftrightarrow 12,8 \text{ miliard sv.l.}$)

GRB 090423 nejvzdálenější spektroskopicky měřený

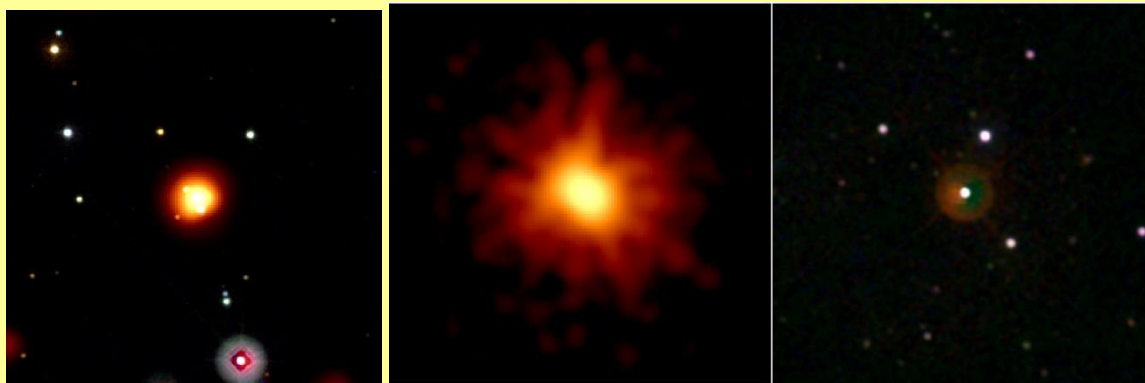
$z = 8,2 \leftrightarrow 700 \text{ milionů let po velkém třesku}$

Záblesk GRB 090429B – nejvzdálenější,

($z = 9,06 \text{ se značnou nejistotou} \leftrightarrow 550 \text{ milionů}$)

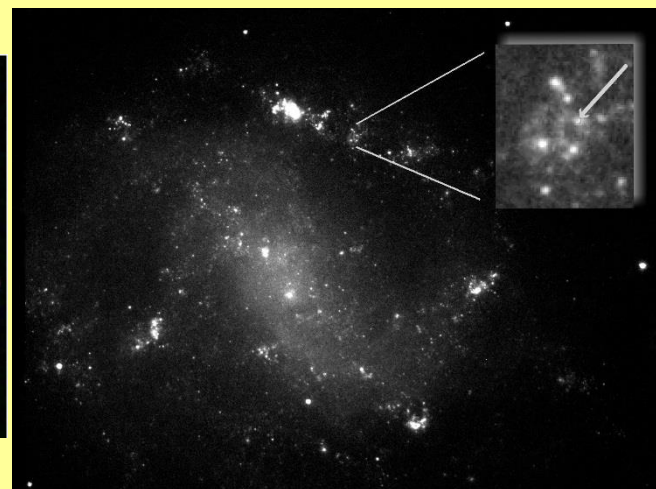


Družice Swift zaměřena na detekci gama



GRB 080913 – střed -
rentgen a infračervený

GRB 080319B – viditelný okem
vlevo rentgen – vpravo infračervené



Velmi blízká supernova SN1998bw
fotografovaná observatoří ESO

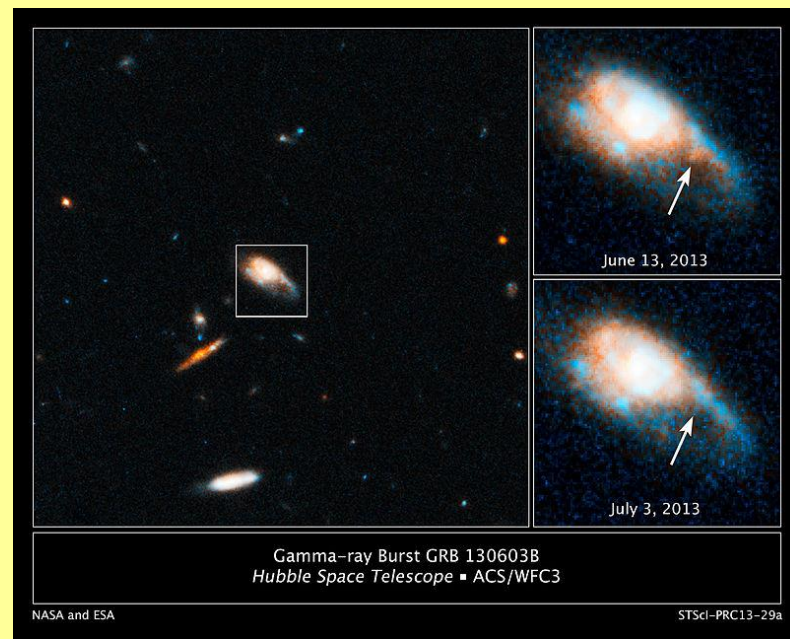
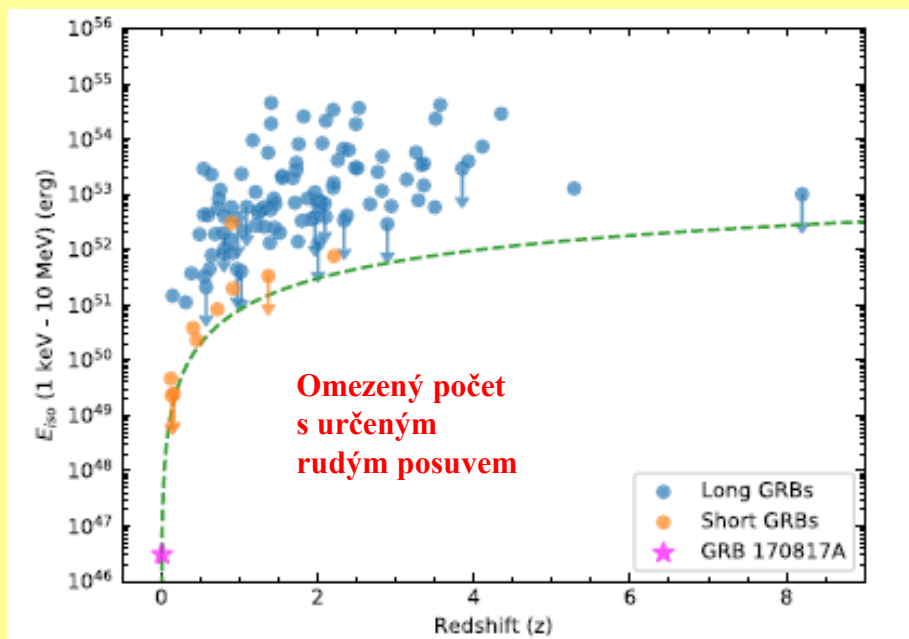
Krátké záblesky gama

Délka záblesku ms až 2 s

Spojeny s dosvity, které odpovídají jevům označovaným jako kilonova – intenzita něco mezi novou a supernovou (1000krát nova, 0,01krát supernova)

GRB 130603B pozorovány dosvity v optické, infračervené i rentgenovské oblasti, odpovídají představě splynutí dvou neutronových hvězd a vytvoření výtrysků
První pozorovaná kilonova (červen 2013)

U krátkých záblesků gama by mohlo jít i o splynutí černé díry a neutronové hvězdy

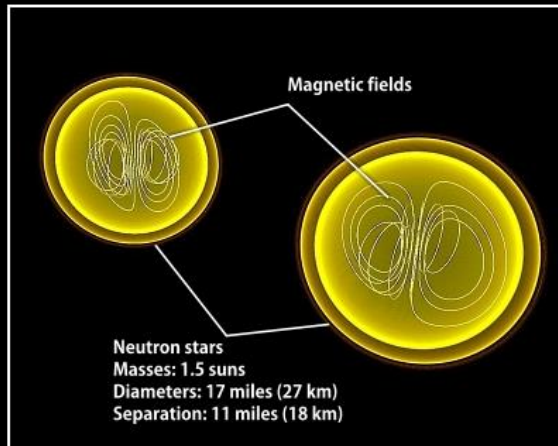


Rudý posuv a emitovaná energie záblesků gama
zelená čára – limita na pozorovanou intenzitu

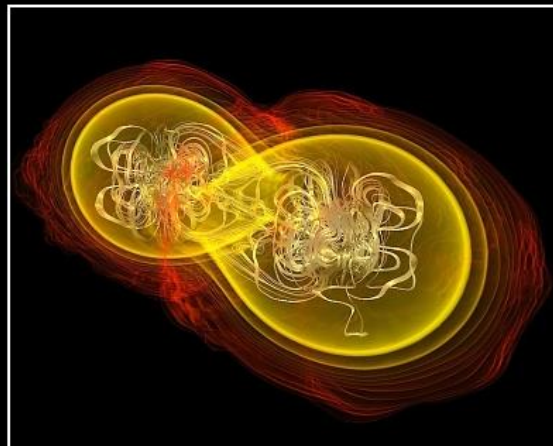
První pozorovaná kilonova
(Hubble v infračervené)

Splynutí dvou neutronových hvězd vytvoří krátký záblesk gama

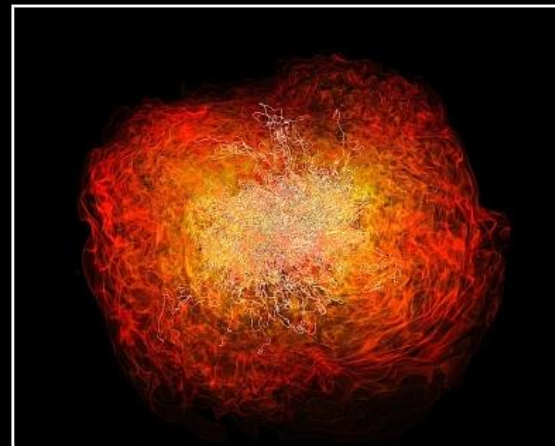
Splynutím vzniká černá díra a intenzivní magnetické pole, které vytváří krátký intenzivní výtrysk vysokoenergetických částic a gama záblesk (simulace NASA)



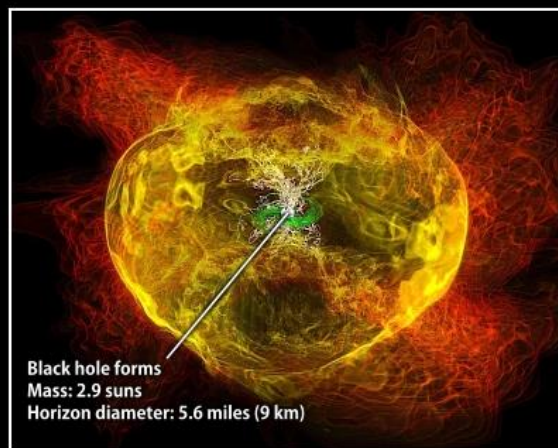
Simulation begins



7.4 milliseconds



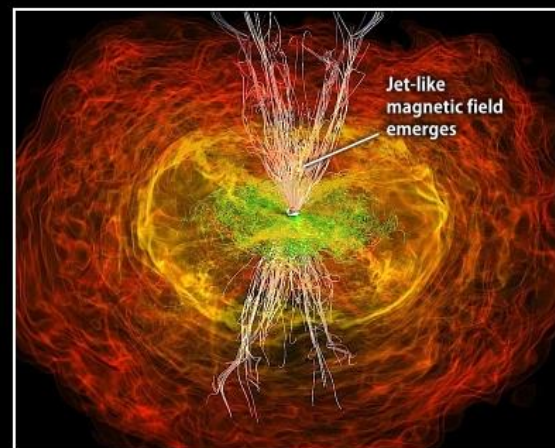
13.8 milliseconds



15.3 milliseconds



21.2 milliseconds

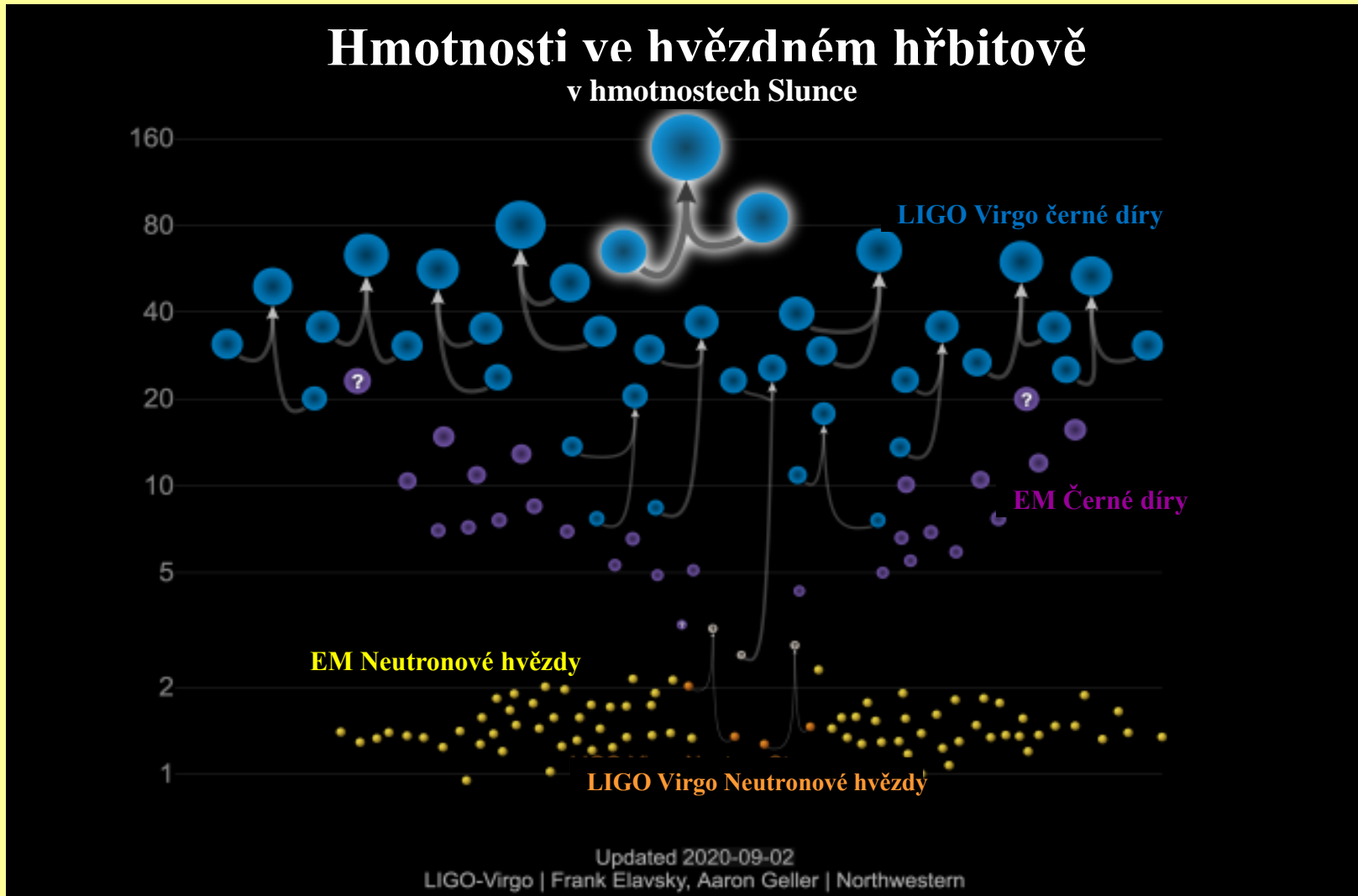


26.5 milliseconds

Rok 2019/20 - nový běh (třetí) měření gravitačních detektorů

Zahájení na začátku dubna 2019 – probíhal do začátku roku 2020

Bylo pozorováno téměř 50 případů, z toho 4 splynutí neutronových hvězd a 4 splynutí neutronové hvězdy a černé díry

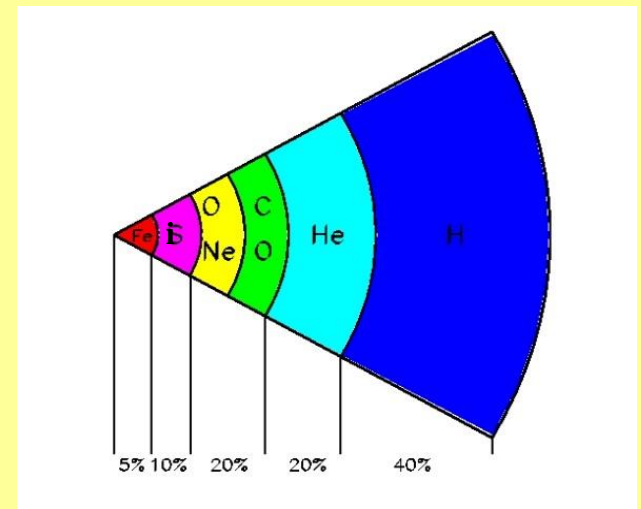
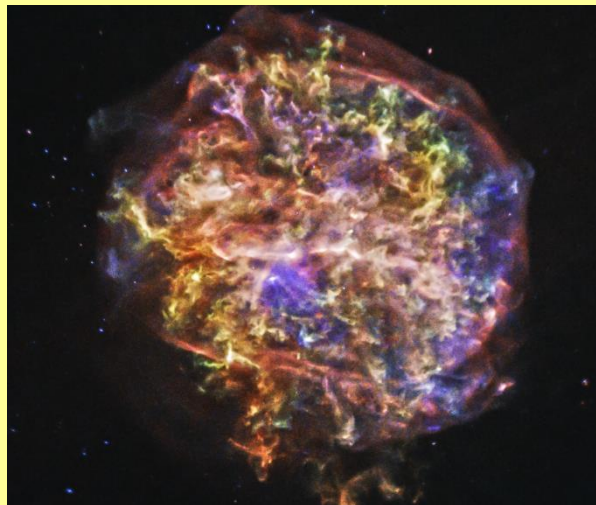
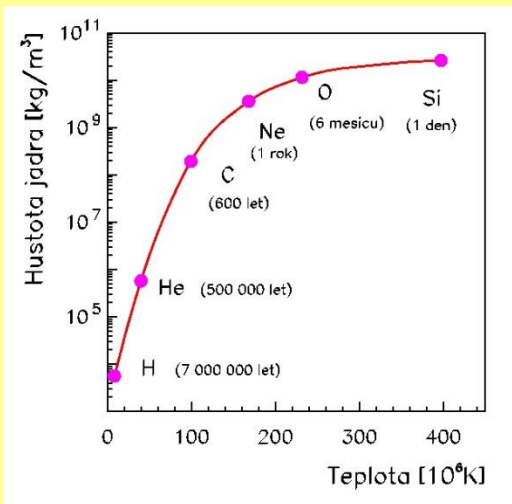


Supernovy

Supernova Ia typu – dvojhvězda masivní hvězdy (rudý obr) a bílého trpaslíka, přetok hmoty z rudého obra na bílého trpaslíka → překročení Chandrasekharovy meze → kolaps a zapálení fúzních reakcí → výbuch supernovy s přesně danou absolutní intenzitou

Gravitační kolaps masivní hvězdy ($M \sim 8 - 100 M_{\odot}$). Po spálení H → smrštění → zvýšení teploty → zapálení He. Dále C, Ne, O, Si. Zároveň roste neutrinová emise. Spotřeba paliva → jádro je pod silným gravitačním tlakem (odolává díky tlaku degenerovaného elektronového plynu). Zvětšování jádra → překročení Chandrasekharovy meze → hroucení. Zapálení dalších fúzních reakcí. Stlačení centrálního jádra. Vzniká **rázová vlna**, která za pár sekund projde niklovým jádrem a vyvrhne velké množství materiálu.

Přitom dochází k řadě etap nukleosyntézy.



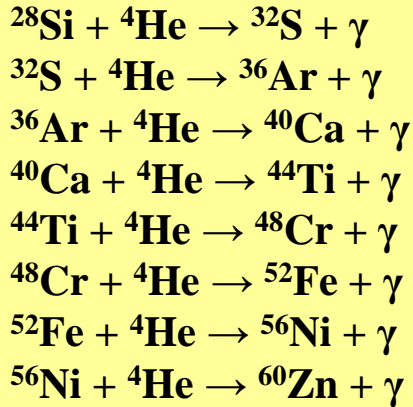
Průběh spalování u hvězdy s $20M_{\odot}$

Pozůstatek po supernově G292.0+1.8

Konečná struktura hvězdy s $20 M_{\odot}$

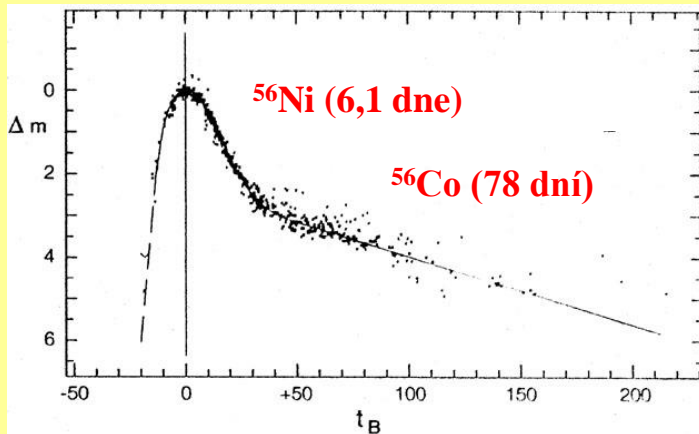
Nukleosyntéza v supernově

Hvězda těsně před stádiem supernovy (spalování křemíku):

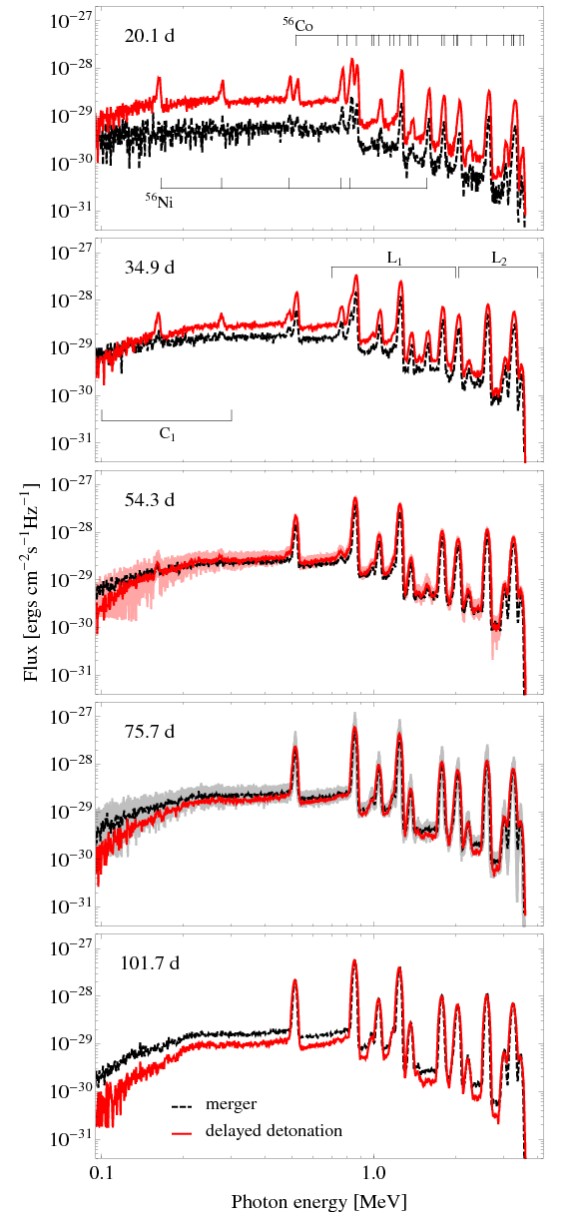


Od ^{44}Ti jde o radioaktivní prvky, které se postupně rozpadají po vyvržení při výbuchu supernovy
Právě ty mohou za velkou část intenzity supernovy

Těžší prvky vznikají v neutronovém poli při r-procesu (rapid – rychlý) v reakcích vznikajících v rázové vlně.
Ve velmi intenzivním neutronovém poli vznikají izotopy těžkých prvků s velkým přebytkem neutronů



Spektra gama měřená v různé době od výbuchu supernovy. Linky ^{56}Ni slábnou a linky ^{56}Co zůstávají



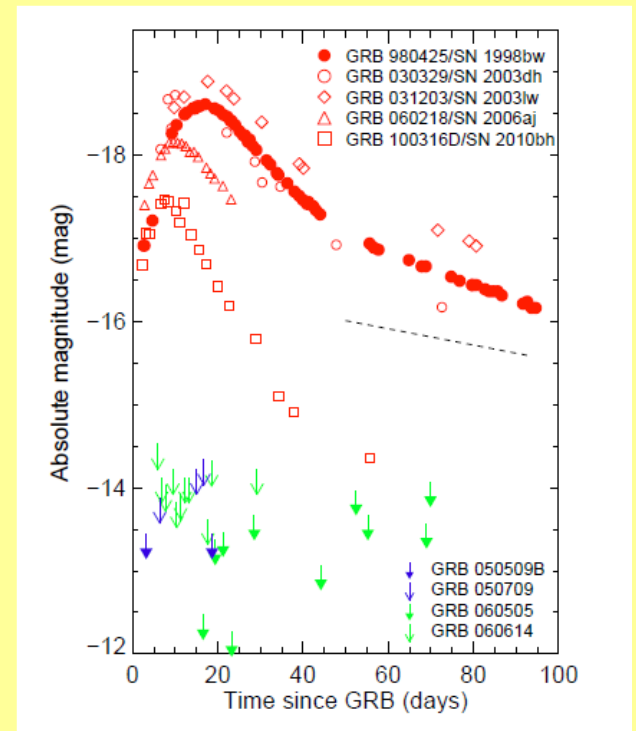
Typická křivka změn jasnosti supernovy

Supernovy, hypernovy, výtrysky

Výbuch může být značně asymetrický, vznik výtrysků, hypernovy a záblesků gama
Asymetrie se projevuje i v tom, že neutronové hvězdy mají značné relativní rychlosti
Přesné množství těžkých prvků produkovaných v r-procesu je stále otazníkem



Umělecká představa výbuchu hypernovy s výtrysky (NASA)



Průběh intenzity ve viditelném spektru u dosvitů GRB záblesků

Splynutí neutronových hvězd (případně neutronové hvězdy a černé díry)

V některých případech méně hmotných neutronových hvězd vzniká **neutronová hvězda**

Ve většině případů je výsledkem splynutí **černá díra**

Zhruba 90 – 95 % hmoty neutronových hvězd vytvoří černou díru, zbývající část je vyvržena a velké množství těžkých prvků je navíc vystaveno velmi intenzivnímu toku neutronů → **r-proces**



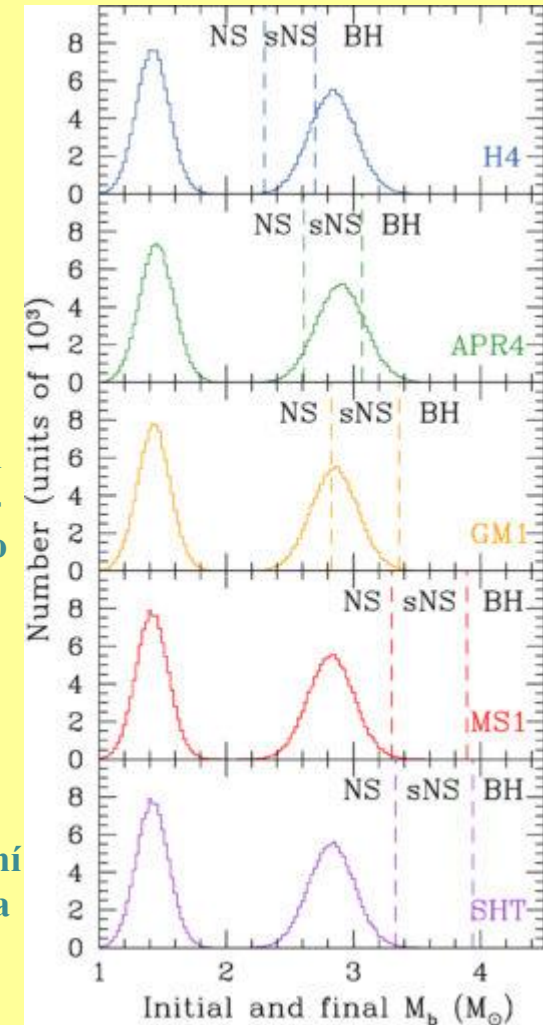
Simulace výsledku splynutí neutronových hvězd, nalevo hmotnost původních, napravo výsledná.

Výsledek:

NS – neutronová hvězda

sNS – supermasivní neutronová hvězda

BH – černá díra



Během splynutí dvou neutronových hvězd se uvolňuje obrovské množství energie a vznikají výtrysky

Reakce neutronů s jádry

Těžší prvky mohou vznikat záchytem neutronů a následným rozpadem beta

s-proces: záchyt neutronů jádry lehkých prvků nebo prvků skupiny železa. (pomalý „slow“ vůči rozpadu beta) – hoření těsně před vznikem supernovy (produkce neutronů):



Vznikající jádra (izotopy prvků) jsou blízko linie stability (tok 10^5 až $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Probíhá v červených AGB obrech – produkuje pouze prvky po olovo

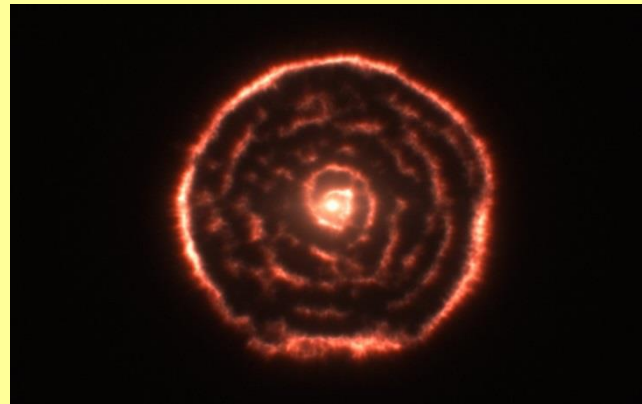
Těžké prvky mezi železem a olovem jsou produkovány pomalu a po dlouhé období

r-proces: hodně neutronů → záchyt neutronů probíhající rychle („rapid“) vzhledem k rozpadu beta → vznik těžkých prvků – **exploze supernovy** (tok 10^{22} až $10^{24} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Intenzivní vznik ještě těžších prvků – za železem i olovem - výbuchy supernov



Okolí červeného trpaslíka



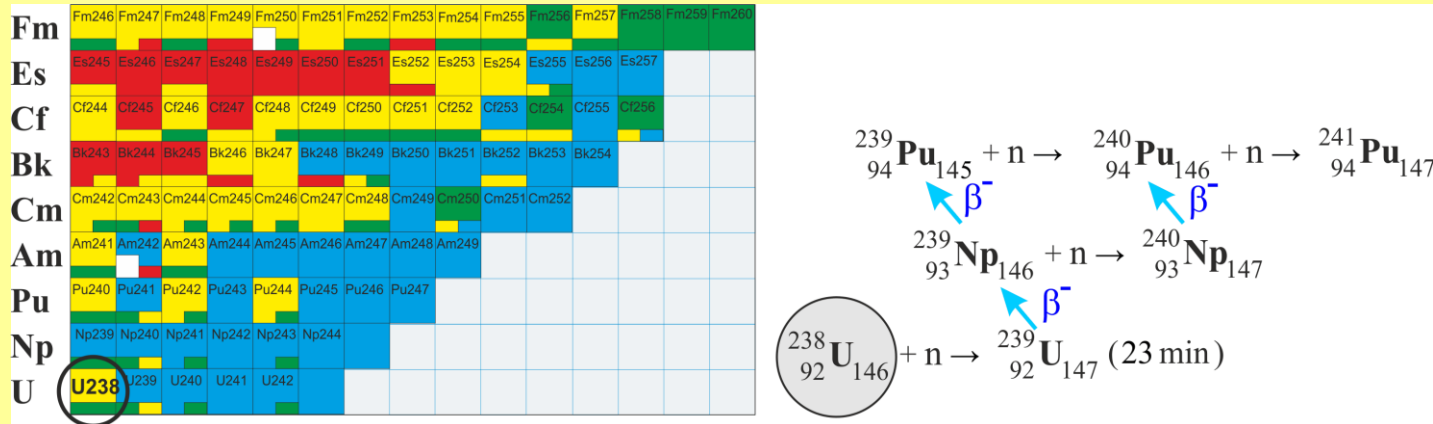
Hmota vyvrhovaná do okolí
R Sculptoris (zdroj ALMA/ESO)



Pozůstatek po supernově Medúza
R (zdroj NASA/JAXA/Suzaku)

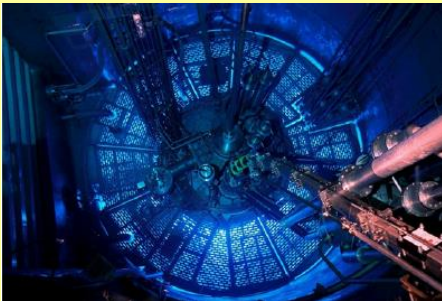
r-proces

V intenzivním neutronovém poli (tok 10^{22} až $10^{24} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) dochází k záchytům neutronů mnohem rychleji, než se stačí v jádře přeměňovat na protony rozpadem beta. Vznikají tak těžké prvky s velkým přebytkem neutronů

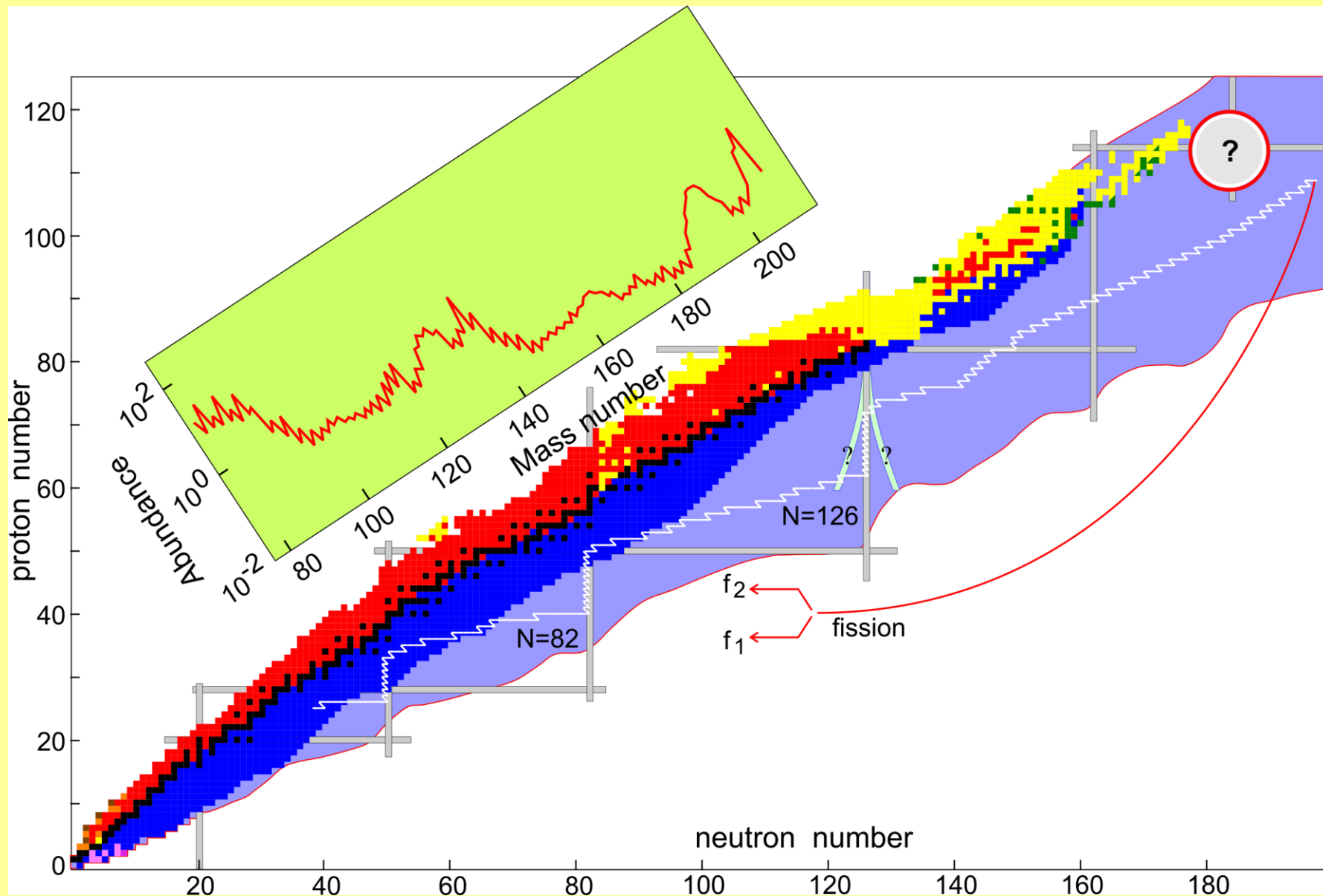


Produkovaly se tak některé z prvních transuranů (v reaktoru nebo při výbuchu jaderné bomby) (tok v reaktorů $10^{13} - 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, speciální systémy až $10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ u jaderné bomby i více než $10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Nedostatečně velké toky neutronů (nedostatečně rychlý záchyt) pro to, aby se mohlo dostat do oblasti opravdu supertěžkých prvků



r-proces – zdroj jader s velkým přebytkem neutronů



Produkce těžkých i supertěžkých prvků při výbuchu supernov a splynutí neutronových hvězd

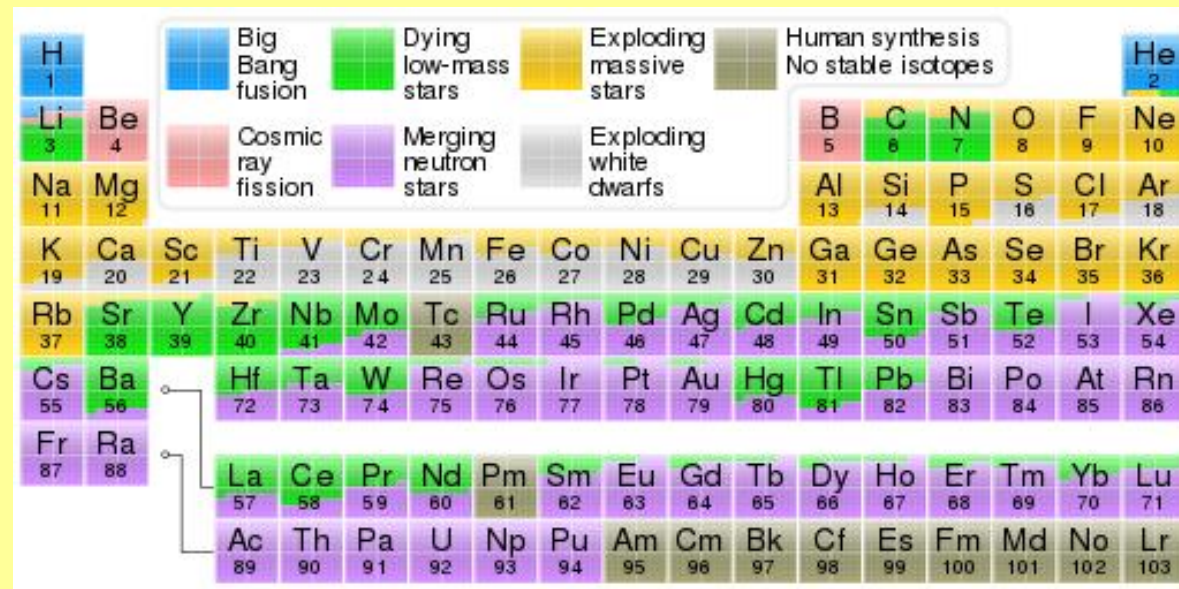
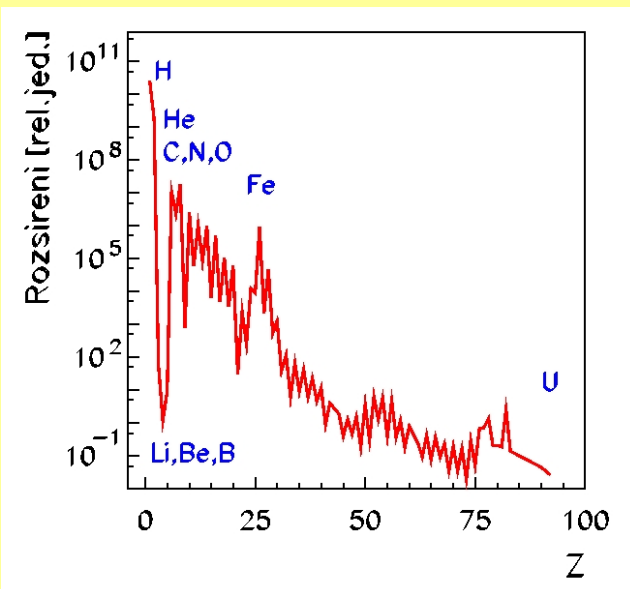
Dominantním zdrojem prvků s využitím r-procesu by mělo být splynutí neutronových hvězd před supernovami – poměr je zatím otázka diskuze

Za prvky železa (Fe, Ni, Zn) vyprodukovaných hořením křemíku je hluboký propad v zastoupení prvků ve vesmíru

Pomocí s- a r- procesu se toho vyprodukuje mnohem méně

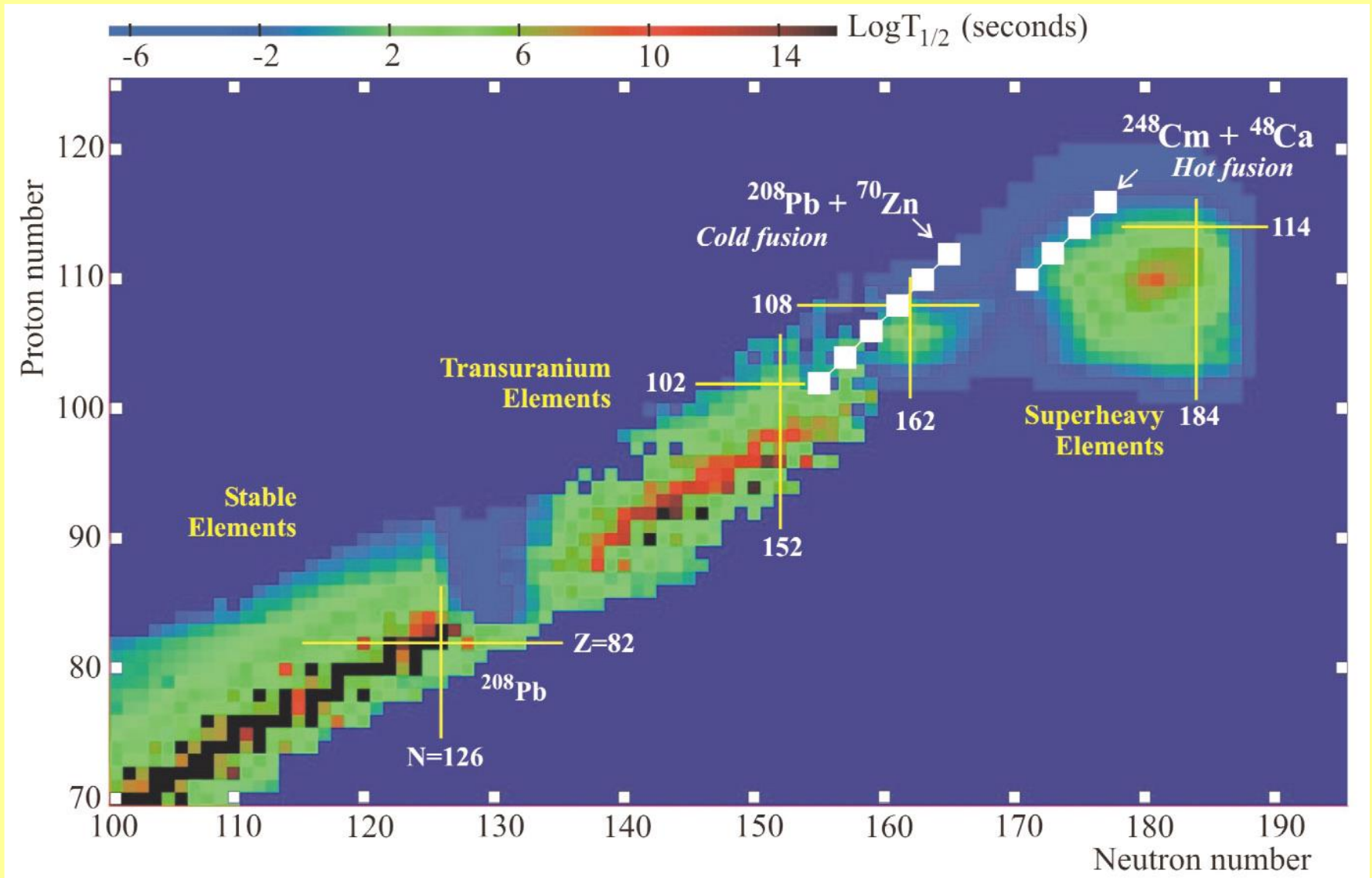
Většina zlata, olova i uranu či thoria se vyprodukuje při splynutí neutronových hvězd

GW170817 vyprodukoval zhruba 6 % M_{\odot} těžkých prvků nad železem, 200 M_Z zlata a 500 M_Z platiny – potvrzeno zčervenáním dosvitu způsobeným působením těžkých prvků

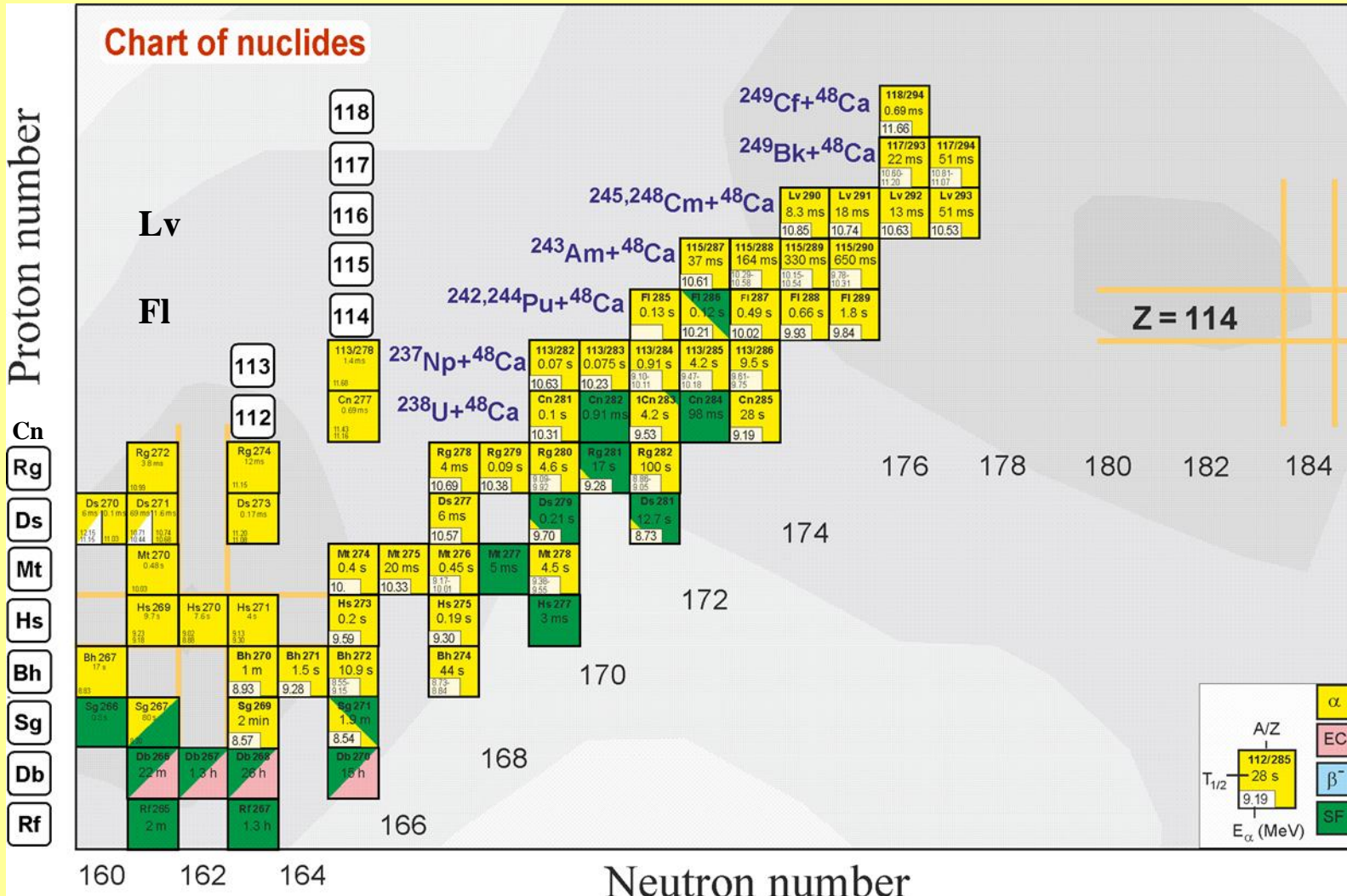


Supertěžké prvky produkované na Zemi

Studenou a horkou fúzí se produkují izotopy s jiným poměrem protonů a neutronů



Známé supertěžké prvky



Jádra se sudým Z: 6 reakcí, 3 prvky, 25 izotopů, 121 rozpadových řad
Jádra s lichým-Z: 3 reakce, 3 prvky, 29 izotopy, 104 rozpadové řady

Mendělejevova periodická tabulka prvků (2017)

Z = 112 **Kopernicium**

Z = 113 **Nihonium**

Z = 114 **Flerovium**

Z = 115 **Moscovium**

Z = 116 **Livermorium**

Z = 117 **Tennessine**

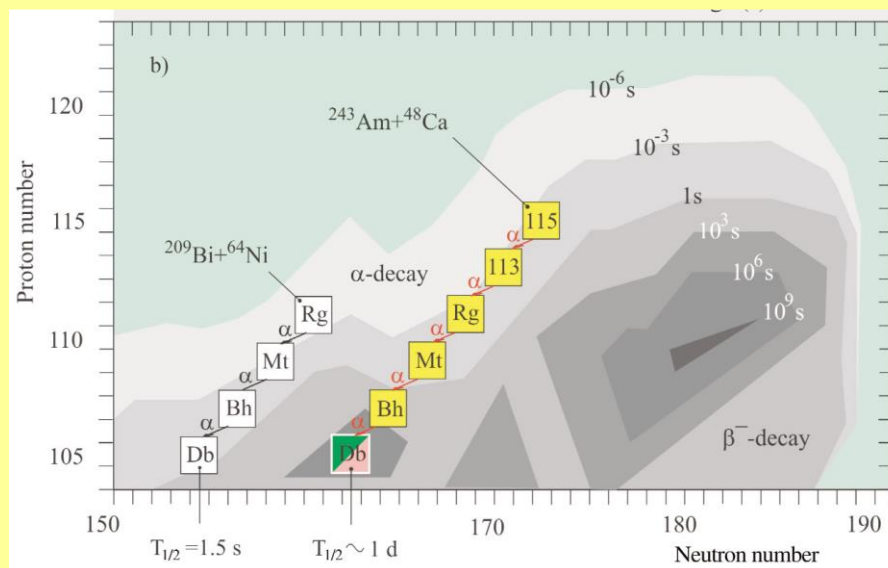
Z = 118 **Oganesson**

Group→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											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	*	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	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
		*	57 La	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	
		**	89 Ac	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	

Existuje ostrov stability?

N Z	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177
117										0,014	0,05
116								0,015	0,013	0,018	0,053
115						0,03	0,17	0,22	0,24		
114				0,003	0,15	0,16	0,51	0,80	2,7	21	
113			0,07	0,10	0,48	5,5	20				
112			0,13	0,0005	4,0	0,10	34				
111	0,004	0,17	3,6	26	59						

Se zvyšujícím se počtem neutronů roste doba života izotopu



Návrh pro grantovou Grantovou agenturu České republiky

Zkoumání supertěžkých prvků v průběhu výbuchu supernovy nebo splynutí neutronových hvězd

Základní potřeby: 1) hvězdolet pro dopravu do blízkosti hvězdy těsně před výbuchem jako supernova
2) laboratoř, která vydrží po dobu výbuchu a bude rychle analyzovat vzniklá jádra



Závěr

- 1) Potvrzení původu krátkých záblesků gama na základě pozorování emitovaných gravitačních vln – jde o splynutí dvou neutronových hvězd
- 2) Astrofyzika vysvětlila zdroje energie hvězd a tvorbu prvků ve vesmíru, umožňuje také vysvětlit zdroje a složení i nejenergetičtějšího kosmického záření
- 3) Supernovy typu Ib a II. jsou konečná stádia velmi hmotných hvězd, které spálí vodík postupně až na železo. Poslední fáze spalování křemíku trvá den.
- 4) Ve fázi červeného obra těsně před koncem jako supernov vznikají neutrony a produkuje prvky až po olovo pomocí s-procesu.
- 5) Těžké i nejtěžší prvky vznikají při výbuchu supernov a hlavně splynutí neutronových hvězd pomocí r – procesu.
- 6) Supertěžké prvky se v laboratoři produkují při slučování těžkých jader s nedostatkem neutronů a daleko od ostrova stability.

