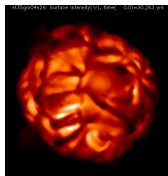
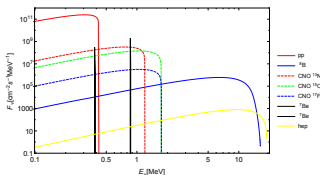
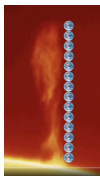


# Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki Teoretycznej UJ

4 kwietnia 2023



# Gwiazdy: reakcje termojądrowe

Współczesny model gwiazdy domyka obliczenie tempa produkcji energii w reakcjach syntezy termojądrowej i powiązanej z nimi produkcji neutrin.

- co do zasady wzór  $E = mc^2$  dobrze wyjaśnia źródło energii
- cztery atomy wodoru przekształcają się w atom helu
- masa atomu helu/cząstki  $\alpha$  jest mniejsza niż masa 4 atomów wodoru/protonów
- różnica masy  $(4m_{\text{H}} - m_{\text{He}})c^2$  przekształcana jest na fotony  $\gamma$  i neutrina elektronowe  $\nu_e$
- neutrina z prędkością światła uciekają od razu, dlatego odejmuje się je od tempa produkcji energii (dla Słońca jest to 2%, ale dla presupernowej praktycznie 100%)

# Powtórka z chemii jądrowej

| Liczba protonów | Nazwa  | Symbol | Name      | Izotopy                         |
|-----------------|--------|--------|-----------|---------------------------------|
| Z=1             | Wodór  | H      | Hydrogen  | $^2\text{H}$ , $^3\text{H}$     |
| Z=2             | Hel    | He     | Helium    | $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ , |
| Z=3             | Lit    | Li     | Lithium   |                                 |
| Z=4             | Beryl  | Be     | Beryllium |                                 |
| Z=5             | Bor    | B      | Boron     |                                 |
| Z=6             | Węgiel | C      | Carbon    |                                 |
| Z=7             | Azot   | N      | Nitrogen  |                                 |
| Z=8             | Tlen   | O      | Oxygen    |                                 |
| ...             | ...    | ...    | ...       |                                 |

- Z – liczba protonów = ładunek elektryczny jądra
- N – liczba neutronów
- A = N+Z – liczba masowa
- symbol:  $^AZ$

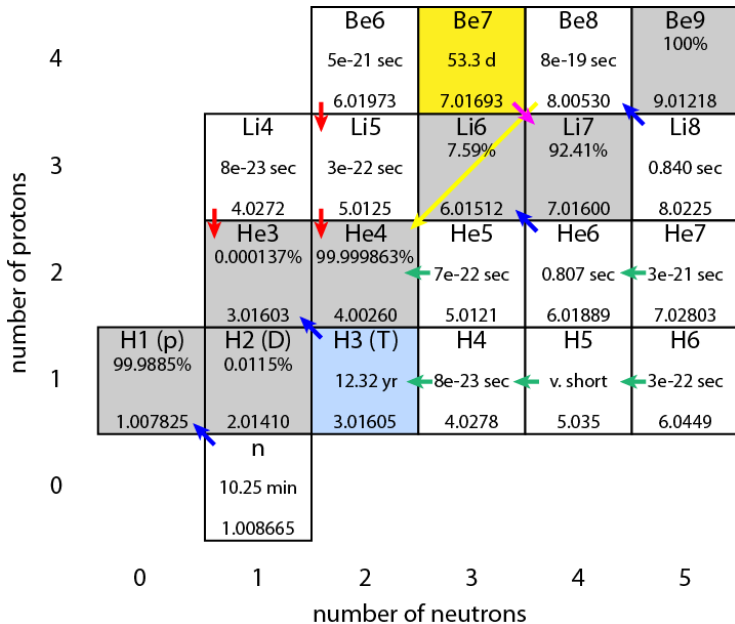


TABLE 4.1  
Energy Release for Burning Stages

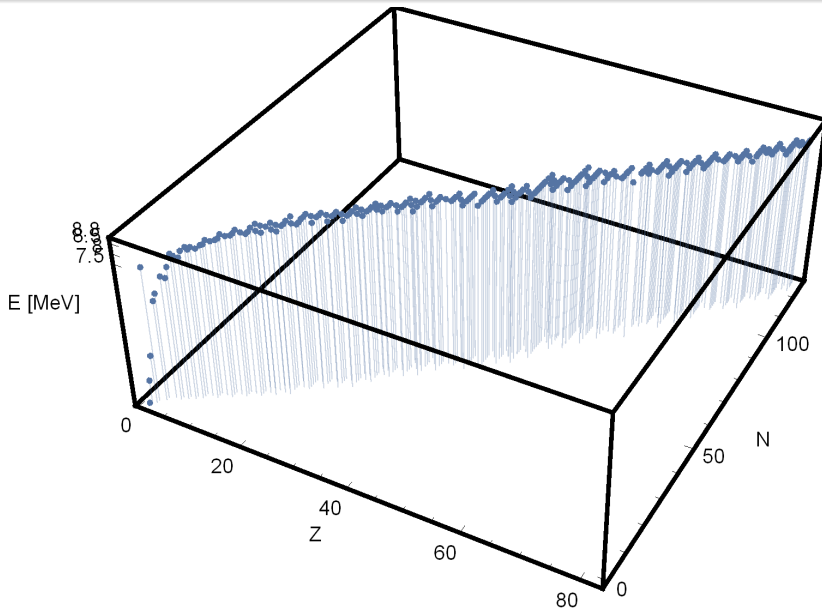
| <i>Process</i>  | $q(10^{18} \text{ erg/g})$ | $q(\text{MeV/nucleon})$ |
|---|----------------------------|-------------------------|
| $\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$                                | 5 to 7                     | 5 to 7                  |
| $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$                               | 0.585                      | 0.606                   |
| $4\alpha \rightarrow {}^{16}\text{O}$                               | 0.870                      | 0.902                   |
| $2 {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{24}\text{Mg}$                    | 0.5                        | 0.52                    |
| $2 {}^{20}\text{Ne} \rightarrow {}^{16}\text{O} + {}^{24}\text{Mg}$ | 0.11                       | 0.11                    |
| $2 {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{32}\text{S}$                     | 0.5                        | 0.52                    |
| ${}^{28}\text{Si} \rightarrow {}^{56}\text{Ni}$                     | 0 to 0.3                   | 0 to 0.31               |

Note:  $1 \text{ MeV/Nucleon} = 0.964844 \times 10^{18} \text{ erg/g}$

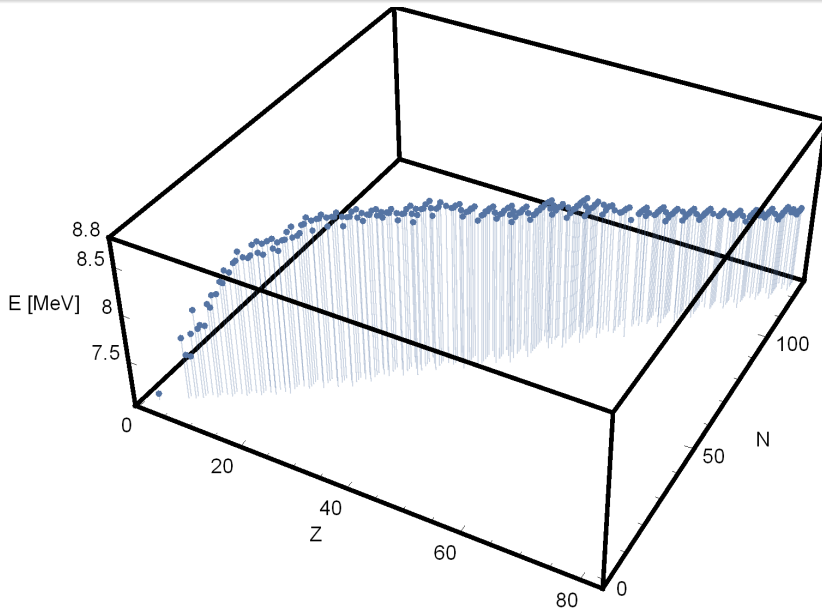
D. Arnett, *Supernovae and Nucleosynthesis*, Princeton U. Press, 1996

Źródło: D. Arnett, *Supernovae & nucleosynthesis*, str. 112.

# Energia wiązania jąder

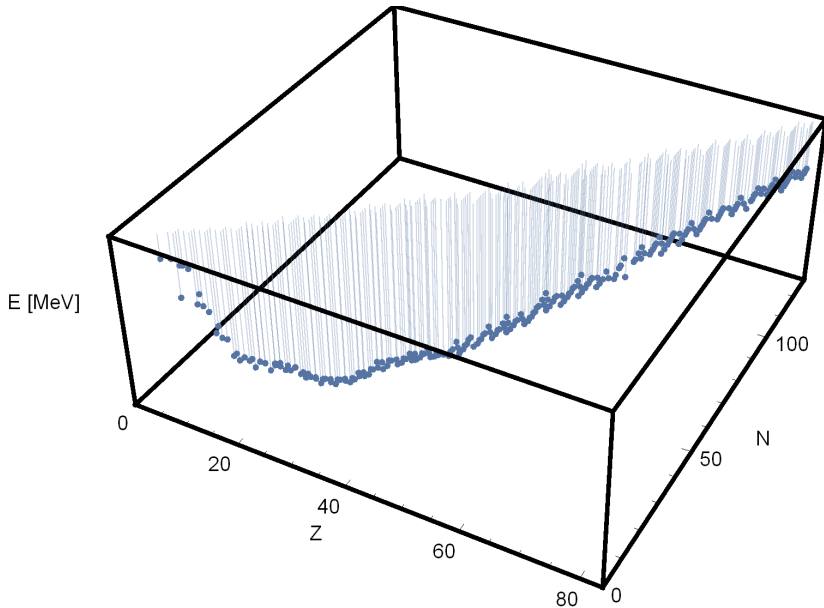


# Energia wiązania jąder





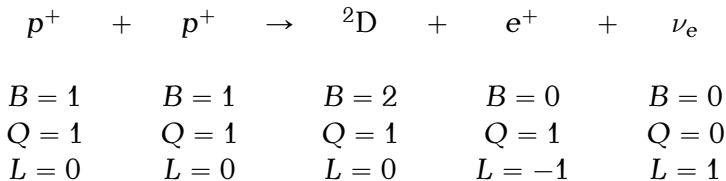
# Energia wiązania jąder



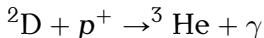
Kluczowe dla zrozumienia procesu syntezy jądrowej z wodoru w gwiazdach są następujące fakty:

- jądro wodoru to proton
- nie istnieją stabilne jądra atomowe, które nie posiadają neutronów
- oddziaływania silne nie zamieniają protonów w neutrony
- proces zamiany protonu w neutron zachodzi przez oddziaływania słabe i jest związany z emisją neutrina  $\nu_e$
- zachowanie ładunku elektrycznego  $Q$  jest oczywiste
- zachowana musi być liczba barionowa  $B$  i leptonowa  $L_e$
- zachowana jest energia, pęd i moment pędu (wliczając spin) oraz parzystość (oprócz o. słabych)
- „reguła kciuka”: reakcja zachodzi najszybciej przez oddziaływania silne, chyba że jest zabroniona przez prawa zachowania – drugie w kolejności są oddziaływania elektromagnetyczne, na końcu słabe

Rozważmy podstawową (pierwszą) reakcję cyklu  $pp$ , w której produkowany jest deuter ( ${}^2\text{H}$ , czasem oznaczany jako  $d$  lub  $\text{D}$ ):



Kolejna reakcja zachodzi przez oddziaływania elektromagnetyczne:



Hel  ${}^3\text{He}$  wchodzi w różne reakcje, co powoduje rozgałęzienie się cyklu, np:

- ① cykl  $ppI$ :  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p^+$
- ② cykl  $ppII$ ,  $ppIII$ :  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$

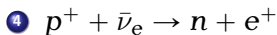
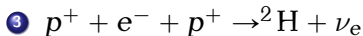
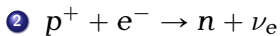
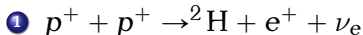
Formalnie mogą występować wszystkie możliwe reakcje dozwolone przez prawa zachowania. W praktyce tempo większości z nich jest pomijalnie małe, co uzasadnia użycie tempa reakcji równego zero, czyli całkowite pominięcie danej reakcji w dalszych rozważaniach.

Przykład: przyjmujemy, że w Słońcu **nie zachodzą** możliwe w innych warunkach reakcje:

- ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3.27 \text{ MeV}$
- ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + p + 4.03 \text{ MeV}$
- ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma (= 23.85 \text{ MeV})$

Sieć reakcji tego typu określamy jako **hardwired network**.

Wypiszmy możliwe do pomyślenia reakcje jądrowe w czystym wodorze, zgodne z zasadami zachowania:



**Reakcja 1** wymaga pokonania bariery potencjału elektrostatycznego, co jest możliwe poprzez tunelowanie kwantowe.

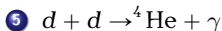
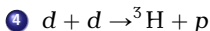
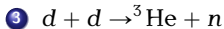
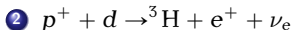
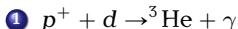
**Reakcja 2** jest endotermiczna, czyli wymaga dostarczenia energii około 0.8 MeV w postaci temperatury lub/i potencjału chemicznego.

**Reakcja 3** jest bardzo mało prawdopodobna, gdyż wymaga spotkania 3 cząstek.

**Reakcja 4** nie może zachodzić z braku źródła antyneutrin; przekrój czynny jest przynajmniej 20 rzędów wielkości mniejszy niż dla pozostałych reakcji.

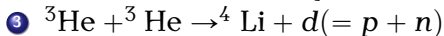
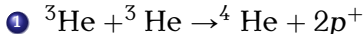
# „Wyprowadzenie” cyklu $pp$

Wypiszmy możliwe do pomyślenia reakcje jądrowe z udziałem deuteru i wodoru:



- ① reakcja zachodzi szybko, przez oddziaływania elektromagnetyczne
- ② reakcja zachodzi wolno, przez oddziaływania słabe
- ③ reakcja mało prawdopodobna, z powodu małego stężenia deuteru
- ④ jak wyżej
- ⑤ proces elektromagnetyczny wolniejszy  $\alpha \simeq 1/137$  razy od procesów „silnych” podanych wyżej

Wypiszmy niektóre możliwe do pomyślenia reakcje jądrowe z udziałem deuteru, wodoru i  ${}^3\text{He}$ :



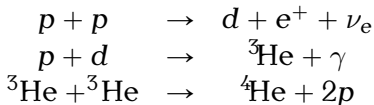
① reakcja zachodzi bardzo szybko, przez oddziaływania silne

② reakcja zachodzi bardzo wolno, przez oddziaływania słabe

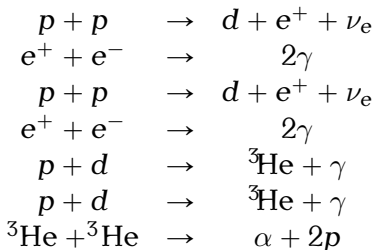
③ reakcja endotermiczna

④ proces elektromagnetyczny; produkt czyli  ${}^6\text{Be}$  natychmiast ( $0.5 \times 10^{-20}$  sekundy) rozpada się na  ${}^5\text{Li}$  wyrzucając proton, po czym  ${}^5\text{Li}$  w taki sam sposób rozpada się do  ${}^4\text{He}$  — reakcja okazuje się równoważna pierwszej

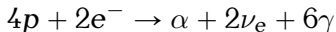
Wynik powyższych rozważań daje cykl  $ppI$ :



lub raczej:



W skrócie:





# Rola fotonów, neutrin, neutronów i pozytonów

W procesie syntezy termojądrowej, oprócz jąder, biorą udział inne cząstki:

- fotony  $\gamma$  ulegają termalizacji i uwzględniamy je pośrednio poprzez właściwości termodynamiczne materii
- neutrina natychmiastowo opuszczają wnętrze gwiazdy i można po prostu odjąć ich energię od sumarycznego ciepła reakcji; dla Słońca ich strumienie i rozkład energetyczny są starannie liczone, gdyż stale je obserwujemy na Ziemi – zwykle **nie są** uwzględniane w sieci reakcji, za wyjątkiem supernowych typu „II”
- swobodne neutrony w Słońcu praktycznie nie są produkowane i nie wchodzi w skład sieci reakcji; w innych gwiazdach bywają stale obecne i muszą być uwzględniane
- pozytony zaraz po wytworzeniu anihilują z elektronami:  
 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ ; dla  $kT \sim m_e$  są stale obecne

Na masę atomu składa się:

- 1 masa jądra atomowego – dominująca część
- 2 masa **elektronów** – mała, ale istotna część
- 3 energia wiązania powłok elektronowych – pomijalnie mała

Masę jąder/atomów można podać na kilka równoważnych sposobów:

- w atomowych jednostkach masy, *amu* lub *u*, równych  $\frac{1}{12}m_{12\text{C}}$
- poprzez energię wiązania *Q*:

$$m_{AZ} = Nm_n + Zm_H - Q/c^2$$

Energia wiązania często podawana jest na nukleon, i we wzorze powyżej musimy ją przemnożyć przez  $A = N + Z$

- jako deficyt masy  $\Delta m = \Delta E/c^2$ , poniżej mierzony względem  $^{12}\text{C}$ :

$$(Z\Delta m_H + N\Delta m_n - \Delta m_{AZ}) = A \frac{Q}{A}$$

Bilans masy cyklu *ppI* można zapisać w skrócie jako:

$$4m_p + 2m_e - m_\alpha = Q$$

gdzie  $m_p$  – masa protonu,  $m_e$  – masa elektronu,  $m_\alpha$  – masa cząstki alfa, natomiast  $Q$  to energia w postaci promieniowania: fotonów i neutrin.

Pamiętając, że masy atomów to:

$$m_H = m_p + m_e, \quad m_{^4\text{He}} = m_\alpha + 2m_e$$

otrzymujemy po prostu:

$$4m_H - m_{^4\text{He}} = Q \simeq 26.73 \text{ MeV}$$

Odjęcie energii neutrin jest możliwe tylko w sensie uśrednionym, gdyż w każdym pojedynczym zdarzeniu jest ona inna. Jest to około 0.5 MeV, przypadkowo wartość bliska masy elektronu, relatywnie 2% całej produkowanej energii.

Chcesz wiedzieć więcej?



Seminarium Astrofizyczne, każda środa 12:30, A-1-08 +  
streaming przez Microsoft Teams