

**Zadanie 1a.**

Obliczyć tempo reakcji (zderzeń na sekundę w jednostce objętości) nienaładowanych kul o promieniach  $r_1, r_2$  i równych masach, zakładając, że ich gęstości liczbowe wynoszą  $n_1$  i  $n_2$  a rozkład prawdopodobieństwa prędkości zadany jest rozkładem Maxwella-Boltzmann w temperaturze  $T$ .

**Zadanie 1b.**

Wyznaczyć prawdopodobieństwo tunelowania cząstki o energii  $E$  i ładunku  $+Z_b q_e$  w polu elektrostatycznym jądra o ładunku  $+Z_a q_e$ , gdzie  $q_e$  to ładunek elementarny, natomiast  $Z_a, Z_b$  liczby protonów w jądrze (całkowity ładunek jądra).

**Zadanie 1c.**

Obliczyć tempo reakcji termojądrowych w plaźmie o zadanej temperaturze i gęstości jeżeli przekrój czynny  $\sigma(E)$  na reakcję jest znany, łącząc wyniki Zad. 1a i 1 b. Oszacować wynik korzystając z własności piku Gamowa.

*Wskazówka do Zad. 1:* zob. np: R. Kippenhahn, **Stellar Structure and Evolution** Rozdz. 18.3 Thermonuclear reaction rates lub D. Arnett, **Supernovae and nucleosynthesis**, Rozdz. 3.3 Coulomb barrier

**Zadanie 2.**

Obliczyć tempo produkcji energii i neutronów w cyklu pp. Sprawdzić tempo reakcji  $\lambda_{pp}$  z podanym w zadaniu niżej.

*Wskazówka:* zob. Bahcall, Neutrino astrophysics, §3.2 Reaction rates, Table 3.2 Uwaga na jednostki!

**Zadanie 3.**

Wyprowadzić i rozwiązać układ równań spalania wodoru w cyklu  $pp$ . Dla uproszczenia można założyć, że początkowo materia składa się tylko z wodoru lub pochodzi wprost z Wielkiego Wybuchu (nukleosyntezy kosmologicznej).

Przyjmując następujące przybliżenie zależności temperaturowej tempa reakcji  $\lambda$ :

$$\lambda(T_9) = e^{a_1 + \frac{a_2}{T_9} + \frac{a_3}{\sqrt{T_9}} + a_4 \sqrt[3]{T_9} + a_5 T_9 + a_6 T_9^{5/3} + a_7 \ln(T_9)}$$

gdzie  $T_9 = T/(10^9 K)$ .

Poniżej zaprezentowano wyciąg ze standardowej tabeli reakcji jądrowych, oryginał można pobrać pod adresem <http://download.nucastro.org/astro/reaclib/old/2000/reaclib.nosmo.gz> Tabela zawiera tempa reakcji  $\lambda_{pp}, \lambda_{pd}, \lambda_{33}$ .

					Q	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
p	p	d		bet+	1.44206E+00	-0.347863E+02	0.141438E-03	-0.351193E+01	0.310086E+01	-0.198314E+00	0.126251E-01	-0.102517E+01
p	d	he3		cf88n	5.49400e+00	0.789331e+01	-0.295519e-02	-0.323527e+01	0.142088e+01	-0.126344e+00	0.974799e-02	-0.178045e+00
he3	he3	p	p	he4	cf88n	1.28600e+01	0.254460e+02	0.685749e-02	-0.130056e+02	-0.985324e+00	0.119691e+01	-0.139031e+00

Jednostką  $\langle \sigma v \rangle$  powinien być [ $\text{cm}^3 \text{s}^{-1} \text{mol}$ ].

**Zadanie 4.**

Wyznaczyć przebieg widma energetycznego (liczby cząstek emitowanych w przedziale energii neutrina  $\mathcal{E}_{\nu_e}$ ) dla neutronów  $pp$  przyjmując warunki w centrum Słońca.