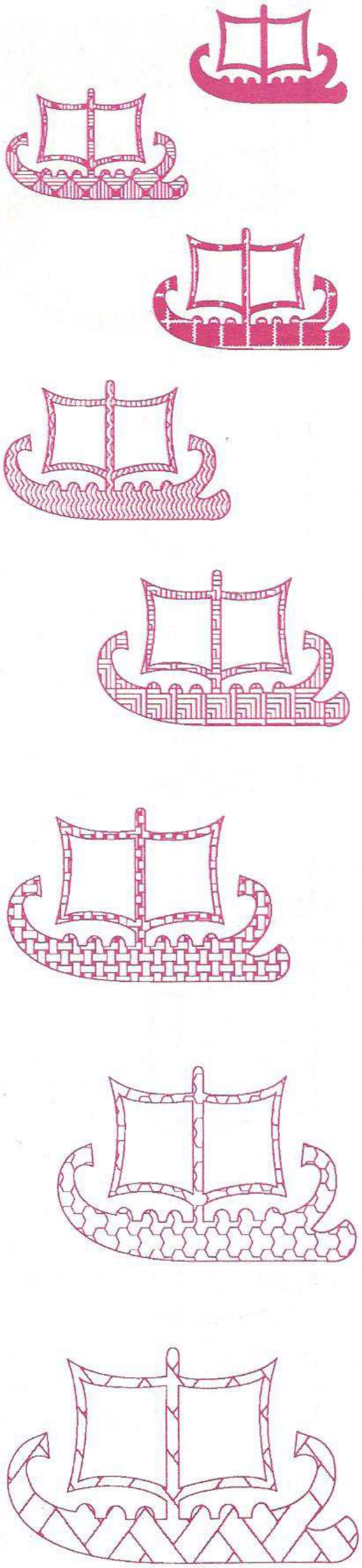

Jak jest w środku Słońca?

Tomasz KWAST

Energia Słońca (i innych gwiazd zresztą też) produkowana jest w wyniku reakcji termojądrowych toczących się w jego wnętrzu. Spodziewamy się zatem, że jego wnętrze musi być „dość" gorące, ma to być powoli, lecz nieprzerwanie działająca bomba wodorowa. Czy możemy domyśleć się, jakie warunki panują we wnętrzu takiej przeciętnej – jak Słońce – gwiazdy? Spróbujmy. Potrzebne będą przy tym dane: dla Słońca – jego masa $M = 1,989 \times 10^{30}$ kg i promień $R = 6,960 \times 10^{8}$ m, oraz stałe fizyczne – stała grawitacji $\mathrm{G} = 6,672 \times 10^{-11}\ \mathrm{Nm^2/kg^2}$, stała Boltzmanna $\mathrm{k} = 1,381 \times 10^{-23}$ J/K i jednostka masy atomowej $\mathrm{H} = 1,661 \times 10^{-27}$ kg.

Na początek spróbujmy oszacować ciśnienie w środku Słońca. Masa słupa słonecznej materii o podstawie s, sięgającego od powierzchni do środka gwiazdy, wynosi $m = \overline{\varrho} s R$, gdzie $\overline{\varrho} = M/\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)$ jest średnią gęstością Słońca. Ciężar słupa będzie w przybliżeniu taki, jak masy m skupionej w jednym punkcie i położonej – powiedzmy – w odległości $\frac{R}{2}$ od środka Słońca, wyniesie więc $\mathrm{G}Mm/\left(\frac{R}{2}\right)^2$. W stabilnej gwieździe ciężar tego słupa równoważony jest przez parcie gazu u jego podstawy równe $P_c s = \mathrm{G}M\overline{\varrho} s R/\left(\frac{R}{2}\right)^2$, gdzie P_c jest szukanym przez nas ciśnieniem centralnym. Stąd

$$P_c \approx \frac{4\mathrm{G}M\overline{\varrho}}{R} \approx \frac{\mathrm{G}M^2}{R^4} \approx 10^{15}\ \mathrm{Pa}.$$

Nietrudno zgadnąć, że temperaturę centralną T_c Słońca można teraz znaleźć z równania stanu gazu doskonałego, czyli z prawa Clapeyrona

$$P_c = \frac{\mathrm{k}}{\mu \mathrm{H}} \varrho_c T_c\,,$$

gdzie μ jest średnią masą atomową cząstki gazu. Nie znamy wprawdzie centralnej gęstości ϱ_c Słońca, ale dość rozsądnie wydaje się brzmieć następujące rozumowanie. Wiadomo, że centralna gęstość Ziemi jest ponad trzykrotnie większa od średniej. Gaz jest bardziej ściśliwy od budulca Ziemi i Słońce jest znacznie od niej masywniejsze, przyjmijmy więc, że gęstość centralna Słońca jest – na oko – sto razy większa od średniej, która wynosi $\overline{\varrho} = 1,4 \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$. Pozostaje problem średniej masy atomowej. Jeżeli materią słoneczną jest wodór, to można przypuszczać, że w wysokiej temperaturze wnętrza Słońca jest całkowicie zjonizowany. Jednostkowa masa atomowa H rozkłada się wtedy między dwie cząstki, proton i elektron. Na jedną cząstkę wypada więc średnia masa H/2, czyli $\mu = \frac{1}{2}$. Podstawiwszy znane i wydedukowane wartości liczbowe do prawa Clapeyrona dostajemy

$$T_c \approx \frac{\mathrm{GH}M}{50\mathrm{k}R} \approx 0,5 \times 10^6\ \mathrm{K}\,.$$

Dokładne obliczenia modelowe dają wynik wyższy o co najmniej rząd wielkości. Nie ma się czemu dziwić, nasze rozważania były doprawdy bardzo uproszczone. Mimo wszystko możemy do pewnego stopnia uzasadnić, dlaczego nasz wynik nie jest całkiem poprawny. Po pierwsze, skoro gęstość centralna Słońca tak bardzo przewyższa średnią, to i masę m słupa materii słonecznej powinno się umieścić bliżej środka gwiazdy. Dostalibyśmy wtedy wyższe ciśnienie centralne. Po drugie, średnia masa atomowa gazu w centrum Słońca jest z pewnością większa od 1/2, gdyż w znacznej ilości występuje tam produkt reakcji termojądrowych, czyli hel. Uwzględniwszy oba te czynniki dostalibyśmy temperaturę centralną bardziej zbliżoną do rzeczywistej. Tak czy inaczej, we wnętrzu Słońca mamy miliony stopni, co wraz z oszacowanym tu ciśnieniem i gęstością stanowi zespół warunków zapewniających wydajność reakcji termojądrowych zgodną z obserwacjami.