

## Zadanie 22

Mikrofalowe promieniowanie tła, zwane także promieniowaniem reliktowym, jest pozostałością po tzw. erze rekombinacji, czyli okresie w którym energia promieniowania termicznego Wszechświata zmniejszyła się na tyle, by fotony nie były w stanie natychmiastowo jonizować powstających neutralnych atomów wodoru. Stan równowagi częściowo zjonizowanego gazu (złożonego z atomów, jonów oraz elektronów) o temperaturze  $T$  opisuje wzór Sahy, który dla wodoru przyjmuje postać:

$$\frac{n_p n_e}{n_h} = \frac{(2\pi m_e k_B T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$$

W powyższym równaniu przyjęto następujące oznaczenia:

- $n_p, n_e, n_h$  – koncentracje protonów, elektronów oraz atomów wodoru, wyrażone w liczbie cząsteczek na jednostkę objętości,
- $m_e$  - masa elektronu,  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg,
- $k_B$  - stała Boltzmana,  $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ ,
- $h$  - stała Plancka,  $6,6261 \cdot 10^{-34}$  J · s,
- $E_i$  - energia jonizacji atomu wodoru, 13,54 eV.

Na podstawie pomiarów wykonanych przez sondę WMAP ustalono, że aktualna gęstość Wszechświata jest równa tzw. gęstości krytycznej, co odpowiada koncentracji 5,9 protonów na metr sześcienny, jednak materia barionowa (czyli atomy) stanowi zaledwie 4,6% tej masy. Ponadto obecna temperatura mikrofalowego promieniowania tła została wyznaczona na  $T_0 = 2,725$  K. Wykorzystując podane informacje, oszacuj temperaturę Wszechświata w erze rekombinacji. Załóż, że składał się on wtedy jedynie z wodoru, a promieniowanie reliktowe zostało wyemitowane w momencie, gdy połowa atomów była w stanie zjonizowanym.

### Wskazówki.

Temperatura promieniowania termicznego zamkniętego w rozszerzającym się równowmiernie, izolowanym, sześciennym pudełku jest odwrotnie proporcjonalna do liniowego rozmiaru tego pudełka.

Równanie nieliniowe postaci  $x = f(x)$  można próbować rozwiązać metodą iteracji,  $x_{n+1} = f(x_n)$

*Autor: Aleksander Łyczek*

Zadanie należy wysłać do godziny 23:59, dnia 25.02.2024

Każda strona powinna być podpisana numerem zadania, numerem strony rozwiązania oraz imieniem i nazwiskiem

Rozwiązania należy wysyłać na adres [liga@almukantarat.pl](mailto:liga@almukantarat.pl), wpisując w temacie maila imię i nazwisko.