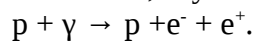


1. W odległości odpowiadającej przesunięciu ku czerwieni  $z = 0,1$  zaobserwowana galaktykę o średnicy kątowej  $\alpha = 12''$ . Udało się również zmierzyć przesunięcie ku czerwieni zewnętrznych fragmentów tej galaktyki. Różniło się ono od średniego o  $\Delta z = 7 \cdot 10^{-3}$ . Przyjmując, że różnica ta jest spowodowana ruchem wokół centrum, a oś obrotu galaktyki jest prostopadła do linii widzenia, oblicz masę obserwowanej galaktyki. Zakładamy dodatkowo, że rozkład materii w tej galaktyce jest sferycznie symetryczny, a ruch gwiazd jest kołowy z prędkościami nierelatywistycznymi.

2. Od pewnego czasu mierzy się promieniowanie kosmiczne o ekstremalnie wysokich energiach pojedynczych cząstek. Panuje jednak dość powszechne przekonanie, że istnieje granica tej energii. Granica ta wynika stąd, że naładowana cząstka (a cząstki tego promieniowania są naładowane) o odpowiednio dużej energii będzie ją szybko tracić na generację par  $e^-/e^+$  w wyniku zderzeń z fotonami promieniowania tła, czyli w wyniku reakcji



Oszacuj wartość tej granicznej energii zakładając, że cząstką promieniowania kosmicznego jest proton.

Uwagi i wskazówki:

- Zderzenia najwygodniej rozpatruje się w układzie współrzędnych, w którym całkowity pęd układu jest równy zero (układ środka masy). Dodatkowo w tym układzie i w tym przypadku, zderzenie fotonu z protonem generujące parę  $e^-/e^+$  można rozpatrywać nierelatywistycznie.
- Temperatura promieniowania tła wynosi ok. 3 K i do oszacowania należy przyjąć foton o własnościach typowych dla tej temperatury.
- Układ środka masy i układ, w którym temperatura wynosi 3 K są drastycznie różne i przejście między nimi jest skrajnie relatywistyczne.
- Kalkulator nie poradzi sobie ze skrajnie nietypowymi liczbami jakie występują w tym zadaniu. Część rachunków trzeba zrobić „na piechotę”. Może przydać się następujący wzór, działający dla małych  $x$ :

$$\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x$$

Przydatne dane i wzory:

Prawo Wiena  $\lambda_{\max} \cdot T = b, \quad b = 2,898 \cdot 10^{-8} \text{ mK}$

masa protonu  $m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

masa elektronu  $m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Relatywistyczny wzór na przesunięcie dopplerowskie

prędkość światła  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$\lambda = \frac{\lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}{\left(1 - \frac{u}{c}\right)}$$

Przesunięcie ku czerwieni

dla ruchu radialnego

dla ruchu prostopadłego do promienia

$$z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1$$

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

$$1 + z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$