

Rješenje 3: Neutrinske mase

I. Picek, Fizikalna kozmologija

Opažanja neutrinskih oscilacija između neutrinskih okusa postavlja slijedeće uvjete na mase elektronskih, mionskih i tau neutrina ($m(\nu_e)$, $m(\nu_\mu)$ te $m(\nu_\tau)$)

$$m(\nu_\mu)^2 - m(\nu_e)^2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad (1)$$

$$m(\nu_\tau)^2 - m(\nu_\mu)^2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (2)$$

Jednadžbe (1) i (2) očigledno vode na zaključak da je u normalnom poretku masa elektronskog neutrina najmanja, budući da mase moraju biti pozitivne. S ovim uvjetima, suma tri mase može biti zapisana preko jedne od masa, recimo $m(\nu_e)$. Prvo izrazimo mase $m(\nu_\mu)$ i $m(\nu_\tau)$ preko $m(\nu_e)$:

$$\begin{aligned} m(\nu_\mu) &= \sqrt{m(\nu_e)^2 + 5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2} \\ m(\nu_\tau) &= \sqrt{m(\nu_\mu)^2 + 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2} = \sqrt{m(\nu_e)^2 + 3.05 \times 10^{-3} \text{ eV}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Tada je suma triju masa

$$m(\nu_e) + m(\nu_\mu) + m(\nu_\tau) = m(\nu_e) + \sqrt{m(\nu_e)^2 + 5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2} + \sqrt{m(\nu_e)^2 + 3.05 \times 10^{-3} \text{ eV}^2} \quad (4)$$

Dana sumom tri člana se jednoliko smanjuju sa $m(\nu_e)$ sve dok je $m(\nu_e)$ pozitivan, tako da je suma minimizirana za $m(\nu_e) = 0$. Do istog zaključka dolazi se nešto formalnije, rješavanjem jednadžbe

$$\frac{\partial \left(\sum_{i=e,\mu,\tau} m(\nu_i) \right)}{\partial m(\nu_e)} = 0 \quad (5)$$

Rješenje daje negativnu vrijednost za $m(\nu_e)$, što je nefizikalno. Dakle, neutrinske mase koje minimiziraju njihovu sumu su

$$\begin{aligned} m(\nu_e) &= 0 \text{ eV} \\ m(\nu_\mu) &= 7.1 \times 10^{-3} \text{ eV} \quad (1.3 \times 10^{-38} \text{ kg}) \\ m(\nu_\tau) &= 5.5 \times 10^{-2} \text{ eV} \quad (9.8 \times 10^{-38} \text{ kg}) \end{aligned} \quad (6)$$

čime one premašuju energiju CMB fotona koja je danas $6.3 \times 10^{-4} \text{ eV}$. Budući da se smatra da svemir sadrži usporedivi broj fotona i broj neutrina svake generacije, energijska gustoća sadržana u neutrinima je veća negoli u fotonima.