

EXTENSÕES DO PARADOXO DE OLBERS



V.P. Freitas (vpacheco@ifi.unicamp.br)
Orientador: O.L.G. Peres (orlando@ifi.unicamp.br)
Instituto de Física Gleb Wataghin
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Serviço de Apoio ao Estudante (SAE/UNICAMP)
Palavras-Chave: Paradoxo de Olbers - Neutrinos - CMB



Resumo

Apresentação de análises do comportamento da radiação cósmica de fundo (CMB) e, através desse estudo, obter um período em que o céu não era escuro à noite, além de determinar o momento, no futuro do universo, em que este se torna escuro em CMB. Também verifica-se se podemos aplicar o Paradoxo de Olbers para radiação em neutrinos.

Introdução

O paradoxo de Olbers diz respeito à luminosidade de objetos astrofísicos na faixa do espectro eletromagnético visível ao olho humano e para a luz visível o céu noturno é escuro. O propósito desse trabalho é observar se podemos aplicar esse paradoxo para neutrinos e para a radiação cósmica de fundo.

1 - Paradoxo de Olbers em Neutrinos

1.1 - Redshift

Como o universo está expandindo, a energia de um neutrino recebido por um observador não é a mesma com a qual ele foi emitido, ou seja, o comprimento de onda observado é maior que o emitido (*redshift*, z). Dessa forma temos a relação:

$$\nu dt = \nu_0 dt_0, \quad (1)$$

com ν e ν_0 sendo as frequências emitidas e observadas, respectivamente, dt_0 é referente ao instante de observação dos neutrinos e dt o tempo próprio.

Definimos o *redshift* em função dos comprimentos de onda emitidos ($\lambda = \lambda_{emit}$) e observados ($\lambda_0 = \lambda_{obs}$) como:

$$1 + z \equiv \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{emit}} = \frac{1}{a}, \quad (2)$$

onde

$$a = a(t) = \frac{R(t)}{R(t_0)} \quad (3)$$

é o fator de escala adimensional e $R(t)$ o fator de escala com dimensão de comprimento. O valor atual de a é $a(t_0) = 1$.

1.2 - Fluxo Total

O fluxo total de neutrinos pode ser escrito como:

$$\Phi(t_0) = \frac{cn}{R_0^3}(t_0 - t_1), \quad (4)$$

onde n é o número de neutrinos emitidos por unidade de volume por segundo.

O universo atravessou um período dominado por radiação, subsequentemente, matéria não-relativística tornou-se a maior contribuição da densidade de energia do universo. Acredita-se que atualmente uma nova forma de energia domina e, neste novo cenário, o universo passa a ter uma expansão acelerada. Para cada um desses períodos, o fator de escala se comporta em relação ao tempo como:

$$a(t) \propto \begin{cases} t^{1/2}, & \text{universo dominado por radiação} \\ t^{2/3}, & \text{universo dominado por matéria} \\ e^{H_0 t}, & \text{universo dominado por energia escura} \end{cases} \quad (5)$$

onde H_0 é o valor atual do parâmetro de Hubble e

$$H_0 = \frac{h}{0,98 \times 10^{10} \text{anos}} = \frac{2,133 \times 10^{-33} \text{h eV}}{\hbar} \text{com } h = 0,72 \pm 0,08. \quad (6)$$

Dessa forma, com $a(t_0) \propto R(t_0) \propto \exp[(t_0 - t_1)H_0]$, a equação (4) fica:

$$\Phi(t_0) = nc(t_0 - t_1) \exp[-3H_0(t_0 - t_1)]. \quad (7)$$

Se $t_0 \rightarrow t_1$, ou seja, se nos aproximamos do período em que $n(t_1) = 0$ temos que a exponencial tende a 1 e

$$\Phi(t_0 \rightarrow t_1) \rightarrow 0. \quad (8)$$

Com isso é possível ver que à medida que observamos regiões muito antigas o fluxo de neutrinos tende a zero, indicando que não há possibilidade de ter o céu brilhante em neutrinos, uma vez que a emissão de neutrinos também não é infinita.

2 - Radiação Cósmica de Fundo (CMB)

A CMB representa o último espalhamento entre fótons e elétrons. As colisões antes do último espalhamento asseguraram que os fótons estavam em equilíbrio, e com isso a radiação teria espectro de corpo negro. Hoje a CMB possui uma temperatura de $T_0 = 2,725 \pm 0,002\text{K}$ e ao estudar a radiação cósmica de fundo, observamos o correspondente a um *redshift* de $z = 1100$ (período do desacoplamento).

A distribuição da CMB possui máximo de intensidade na faixa de microondas (comprimento de onda aproximadamente entre 1mm e 10cm) e para esse comprimento de onda o céu é "brilhante", ou seja, em qualquer direção que olharmos é possível interceptar fótons provenientes dessa radiação de fundo.

2.1 - Frequência de Plasma

A frequência de plasma é o movimento de oscilador harmônico devido ao deslocamento de uma partícula ionizada do equilíbrio no plasma e é dada por:

$$\nu_p = \left(\frac{n_e e^2}{\pi m_e} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

onde n_e e m_e são, respectivamente, o número de densidade e a massa do elétron.

Para frequências menores que a de plasma, a radiação CMB passa a ser absorvida ou refletida e logo não é mais possível observá-la, o que corresponde à $\nu_p = 1\text{kHz}$ ($\lambda_p \simeq 3 \times 10^5\text{m}$).

2.2 - Céu Visível em CMB

Queremos determinar, uma vez que a radiação CMB já perdeu intensidade com a expansão do universo, se no período de seu surgimento seria possível que fosse brilhante em comprimentos de onda visíveis ao olho humano.

Considerando a região do espectro em microondas, que conforme dito anteriormente é a faixa de maior intensidade da CMB hoje, e com o uso da equação (2) podemos determinar o intervalo com maior emissão de fótons para *redshift* $z = 1100$:

$$9 \times 10^{-7}\text{m} \lesssim \lambda_{emit} \lesssim 9 \times 10^{-5}\text{m}. \quad (10)$$

Note que os comprimentos de onda menores correspondem ao vermelho, logo o céu noturno quando o universo tinha apenas 300.000 anos era brilhante no visível (vermelho).

2.3 - Céu Escuro em CMB

Como o nosso universo está em expansão, essa radiação, que hoje possui pico de intensidade na faixa de microondas, perderá intensidade e possivelmente não será mais vista em um futuro distante. Queremos determinar nessa seção quando isso ocorrerá, ou seja, quando teremos céu escuro em CMB.

Utilizando o valor da frequência de plasma, temos que o fator de escala observado quando o céu não for mais brilhante em CMB é da ordem de 10^{18} vezes o valor atual, ou seja,

$$t \sim 3 \times 10^{11} \text{anos}. \quad (11)$$

Conclusão

Como a emissão de neutrinos teve início em um tempo finito e, como o fluxo tende a zero ao observar regiões mais antigas, temos a indicação de que não é possível um céu brilhante em neutrinos. Já para a CMB, que atualmente fornece um céu brilhante na faixa de microondas, determinamos que quando o universo tiver cerca de 25 vezes sua idade atual ela não será mais observada e que na sua formação possuía intensidade maior nas faixas de infravermelho e vermelho, logo, o céu era brilhante no visível (vermelho).

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Serviço de Apoio ao Estudante (SAE/UNICAMP) pelo financiamento e à todos que contribuíram para a realização desse projeto.