

中微子在介质中的共振振荡

裴永祥

(新疆师范大学物理系, 乌鲁木齐 830053)

根据强、弱和电磁相互作用的大统一模型, 如果中微子的质量不为零, 就可能混合——在弱相互作用中产生的中微子的态 ν_e, ν_μ, ν_τ 是质量分别为 m_1, m_2, m_3 的中微子 ν_1, ν_2, ν_3 的正交组合, 混合的结果是中微子的振荡——一种中微子周期性地转变为另一种中微子的过程. Mikheyev 和 Smirnov 指出, 中微子在介质中振荡时, 其混合角由于受物质的影响而“共振放大”, 出现更强的振荡现象, 称为“共振振荡”, 为消除太阳中微子实验和中微子振荡实验的矛盾提供了新的理论.

一、两种中微子在真空中的振荡

中微子 ν_e, ν_μ 在真空中的混合形式为

$$\nu_e = \cos\theta\nu_1 + \sin\theta\nu_2, \nu_\mu = -\sin\theta\nu_1 + \cos\theta\nu_2$$

θ 为真空混合角, ν_e 转变为 ν_μ 的几率为

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos \frac{\Delta m^2 r}{2E} \right)$$

$\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$, E 为中微子能量, r 为中微子源到观测处的距离. 由此可见, 转变几率大体上是一个周期函数, 且与中微子 ν_1, ν_2 的质量平方差和混合角 θ 有关.

在量子力学中, 粒子被描写为有一定相速度和群速度的波包. 混合中微子 ν_1, ν_2 就是两个这样的波包, 由于二者质量不同, 因此有不同的相速度, 在传播过程中二者之间的相位差 $\Delta\varphi$ 单调地变化, $\Delta\varphi$ 变为 2π 的长度叫中微子的振荡长度, 在真空中的振荡长度 $l_0 = 4\pi E / \Delta m^2$, 于是转变几率

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos 2\pi \frac{r}{l_0} \right),$$

当 $l_0 \gg r$ 时, $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} \approx 0$, 观测到中微子振荡的条件显然是 $l_0 \lesssim r$.

二、中微子在介质中的共振振荡

当中微子穿越介质时, 就要与它路径上的物质发生相互作用——向前弹性散射. 这些散射的相干迭加的结果就象波在介质中的折射一样. 由于介质中有 e 电子而没有 μ 子, 电子对 ν_e 和 ν_μ 的散射幅度不同, 在

穿过 $l \sim \frac{1}{n_e}$ (n_e —电子浓度) 路程时, ν_e 和 ν_μ 会产生 2π 的相位差而发生振荡. 这一长度 l 与中微子能量无关, 它确定了物质对中微子影响的线度. l 远远小于吸收中微子的长度, 特别是在低能情况下更是如此, 所讨论的物质效应对中微子来说是透明的.

Wolfenstein 得到了描写介质中混合中微子的演化方程. 他求解得出, 在介质密度为常数时, 均匀介质中的振荡特征与真空中振荡特征一样, 改变的只是参数——振荡长度和强度; 物质中的混合角 θ_m 与真空混合角 θ 不同, 它与介质的密度 ρ 有关. 1985 年, Mikheyev 和 Smirnov 研究了密度 ρ 是变量的情形, 发现 $\sin^2 2\theta_m$ 与 ρ 的关系有“共振”的特征.

1. 中微子在介质中的混合

中微子 ν_e 和 ν_μ 在介质中是本征态 ν_{1m} 和 ν_{2m} 的混合. ν_{im} ($i = 1, 2$) 是包括物质中所有相互作用的总哈密顿的本征态, 因而 $\nu_{im} \approx \nu_i$. ν_{im} 的质量平方 $M_i^2 \approx m_i^2$, 介质中的混合角 θ_m 满足

$$\sin^2 2\theta_m = \sin^2 2\theta \cdot R(l, l_0^{-1}, \theta)$$

其中 $R = [(\cos 2\theta - l_0 l_0^{-1})^2 + \sin^2 2\theta]^{-1}$, θ 是真空混合角, $l_0 l_0^{-1} \sim \rho E$.

2. 共振振荡

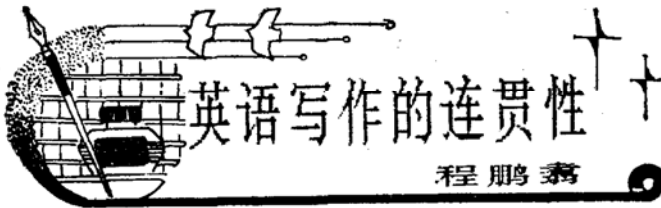
当 $l_0 l_0^{-1} = \cos 2\theta$ 时, R 有极大值 $R_{max} = \sin^{-2} 2\theta$, 于是 $\sin^2 2\theta_m = 1$. 可见无论真空混合角多小, 物质的影响使混合角变为最大: $\theta = 45^\circ$. 与真空相比, 几率 $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$ 会增大很多, 称为强振荡转变或“共振振荡”, 这个角也叫“共振混合角”.

发生共振振荡的物质密度 $\rho_R \propto \cos 2\theta \cdot \Delta m^2 / E$, 与它对应的是中微子在介质中的振荡长度 l . 我们知道, ν_e 和 ν_μ 是有“味”的, 通过逆变换, ν_{im} 是 ν_e 和 ν_μ 的正交组合, 这表明 θ_m 确定“味”——即介质中质量本征态 ν_{im} 中的 ν_e 和 ν_μ 分量. θ_m 与密度 ρ 有关, 因而 ν_{im} 的味也就与密度 ρ 有关. 若 $\rho \ll \rho_R$, $\theta_m \approx \theta$; ρ 增大时 θ_m 随之增大, ρ 增到 ρ_R 时, $\theta_m = 45^\circ$, $\cos \theta_m = \sin \theta_m = 1/\sqrt{2}$, 说明共振时 ν_{im} 的两种

忆.

我们从九寨沟归来, 你对我说, 你想去湖北的神农架, 想去天山, 还想爬高黎贡山, 想去儿子插过队的茨顶. 还有祖国的许多名山大川, 你都想去看看.

但生命不是无限的. 不过, 你不要遗憾. 我会陪你一起去的. 待到春天到来时, 大地洒满阳光. 我们一起乘着幻想的翅膀. 飞向你所向往的壮丽河山. 飞向长满野花的原野, 飞向你心灵所系的地方.



(中国科学院物理研究所)

所谓英语写作的连贯性 (Coherence) 是指句子、段落或整篇文章是连贯的, 它的各个部分被安排得非常妥贴, 以致它们的关系非常明晰。就一整篇文章来说, 段落之间的意思要连贯。以段落来说, 它的句子应被安排成清楚、合乎逻辑和易懂的顺序。这样的段落是一连续整体而不是一些句子的堆积, 使读者能容易地由一句到另一句地读下去。一个句子内也有连贯性, 它的各个组分的关系也应是合乎逻辑而清楚的。由于句子的连贯性是整篇文章连贯性的基础, 故本文主要介绍句子的连贯性。现将应注意的问题分七个重大项目阐述于下。

(一) 写内容单一的句子, 不要将关系松散, 意思不紧密相关的东西硬凑在一个句子内, 例如

The ancient name for Paris, a city which has an annual rainfall of over twenty inches, was Lutetia.

应改为两个句子:

味是相等的。当 $\rho \gg \rho_R$ 时, θ_m 趋于 $\frac{\pi}{2}$ 。因此, 小混合角的中微子从 $\rho \ll \rho_R$ 向 $\rho \gg \rho_R$ 穿越时, 如果 ν_{im} 在 $\rho \approx 0$ 时主要成分是 ν_e 的味, 穿入 $\rho \gg \rho_R$ 后主要成分变为 ν_μ 的味——一般称为 MSW 效应 (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein 效应)。

在均匀介质中, 混合就象在真空中一样是一常数, 每个本征态各自独立的演化, ν_{im} 之间的转变是没有的。在非均匀介质中问题变得很复杂了, 混合量不再为常数, 如果密度变化慢得足以使 $\nu_{im} \leftrightarrow \nu_{2m}$ 的相互转变可以忽略, 所有中微子的味象 ν_{im} 一样, 只是密度 ρ 的单值函数, 它们的改变仅由密度引起, 称之为绝热振荡转变。

3. 中微子共振转变的三种方式

无振荡转变——如果中微子 (ν_e) 产生处的 (初始) 密度 $\rho \gg \rho_R$, 初始混合角 $\theta_m \sim \frac{\pi}{2}$, 即 $\nu_e \approx \nu_{2m}$ 。

在绝热条件演化中, 中微子 (ν_e) 的味与 ν_{2m} 的味同时演变; 如果最终密度 $\rho \sim 0$, 中微子在穿过共振层后味发生了改变。如果真空混合角 θ 越小和初始密度 ρ_0 越大, 就越能使初始中微子 (ν_e) 流衰减。

Paris has an annual rainfall of over twenty inches. The ancient name of the city was Lutetia.

(二) 不要用过多的叙述 (包括过多的从句) 去混淆句子的中心思想, 应去掉不相干的意思。

In 1788, when Andrew Jackson, then a young man of twenty-one years who had been living in the Carolinas, still a virgin country, came into Tennessee, a turbulent place, to enforce the law as the new prosecuting attorney, he had the qualifications that would make him equal to the task. 应改为

In 1788, when Andrew Jackson came into Tennessee as the new prosecuting attorney, he had the necessary qualification for the task.

(三) 应注意句子中词的顺序。英语句子的意思很大程度地依赖词的顺序, 例如下面两个句子的意思是不同的:

All the loans were not paid. Not all the loans were paid.

(1) 不要将句子中有关部分作不必要的分离。

(A) 主语一动词分离。

The detective, after a painstaking examination of the evidence, announced his conclusion.

绝热振荡转变——初始密度 $\rho_0 \geq \rho_R$, 密度的变化, 随距离的变化足够慢: $\frac{d\rho}{dr} \propto \frac{d\theta_m}{dt} \ll 2\pi l_m^{-1}$ (l_m —物质中的振荡长度), 中微子混合成分 ν_{im} 的大小一开始被确定后就在以后的演化中保持不变, 即 $\nu_{1m} \leftrightarrow \nu_{2m}$ 的相互转变可被忽略, ν_{1m} 和 ν_{2m} 各自独立地演化, 当中微子穿越共振区后味发生了改变。

绝热条件被破坏时——即在介质密度急剧变化的条件下, 本征态中混合量 ν_{im} 不再保持不变, 此时将存在 $\nu_{1m} \leftrightarrow \nu_{2m}$ 的相互转变, 如果初始时刻中微子是 ν_{1m} 中之一, 在以后会明显地出现另一种成分, 绝热条件破坏得越厉害, 中微子转变的几率就减小。

1988 年 Limom 等人研究了中微子味和螺旋度同时发生的共振转变 (如 ν_{eL} 变为 $\bar{\nu}_{\mu R}$) 是由于中微子磁矩与磁场相互作用发生混合而引起的振荡。

Mikheyev 和 Smirnov 的理论提出了解决太阳中微子失踪问题的机制, 认为太阳的电子型中微子 ν_e , 由于与太阳物质相互作用有可能转化为 μ 型中微子 ν_μ , 从而使得实验观测到的中微子减小了。但到目前为止, 这一学说仍是一种假说, 有待于系统的精密的实验工作来证实。