

探索发现 · 交大智慧

上海交大李政道研究所葛韶锋团队提出宇宙遗迹中微子的手征振荡及其与宇称不守恒的重要关联

2020年11月30日 责任编辑：靳小芊



中微子振荡是超出粒子物理标准模型的第一个新物理现象，已经得到大量实验的明确验证。在标准模型中，中微子只有左手分量，无法拥有可重整的质量项；而中微子振荡的存在，说明了中微子具有质量，而且三个中微子的质量非简并。这意味着必然存在超出标准模型的新物理，以解释中微子振荡，这为粒子物理的研究指明了进一步探索的方向。

中微子振荡通常是指发生在中微子三个味道本征态之间的振荡现象：比如电子味道的中微子 ν_e 在传播过程中变成缪子中微子 ν_μ 或陶子中微子 ν_τ ，三种味道的中微子循环往复地相互转化、交替振荡。但这不是唯一可能的振荡模式！李政道学者葛韶锋副教授和博士后 Pedro Pasquini 在最近的文章（Physics Letters B 811 (2020) 135961 (<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135961>) [arXiv: 2009.01684 (<https://arxiv.org/abs/2009.01684>) [hep-ph]]）中研究了一种新的振荡模式：中微子手征振荡（Chiral Oscillation）。

根据标准模型，中微子在最初被产生的时候应该都是左手分量，在传播过程中，通过质量项转变为右手分量，两者循环往复地相互转化、交替振荡。这个新的中微子振荡模式之所以能够发生，是因为李政道先生和杨振宁先生1956年提出的宇称不守恒

(Parity Violation)：弱相互作用中费米子的左手和右手分量可以具有不同的相互作用强度。具体到中微子，宇称不守恒体现为只有左手中微子参与弱相互作用：不论是产生过程还是探测过程，只有左手的中微子才能参与。尤其是产生中微子的过程，只有左手中微子才能出现，这将作为中微子振荡的初始条件。

但在通常的中微子振荡理论中，这个重要的事实被忽略了，并不区分中微子的左手和右手分量，而是将中微子这一具有多个分量的费米子作为一个整体来考虑：每个质量本征态的中微子用一个整体相因子 $e^{-ip \cdot x}$ 来描述其演化行为。这就导致振荡只发生在不同的味道本征态之间。如果中微子的左右手分量可以独立演化，并加上中微子振荡的初始条件：在时间零点只有左手中微子分量，将得到全新的中微子手征振荡模式，演化概率随时间 t 简谐振荡：

$$P_{\nu_L \rightarrow \nu_L} = |c_L|^2 = \cos^2(Et) + \frac{|\mathbf{p}|^2}{E^2} \sin^2(Et),$$

$$P_{\nu_L \rightarrow \nu_R} = |c_R|^2 = \frac{m^2}{E^2} \sin^2(Et).$$

振荡频率由中微子的能量 E 决定，振荡幅度则由其质量 m 和能量 E 的比值 m^2/E^2 决定。和通常的味道本征态之间的振荡需要三个质量本征态不同，手征振荡只需要一个中微子质量本征态即可实现。如果能看到中微子的手征振荡，将是首次通过中微子振荡对宇称不守恒进行检验，从而突破通常量子力学框架下的中微子振荡理论，将之推广到场论形式。

由于中微子的质量很小，对于常见的中微子源（比如太阳中微子、反应堆中微子、加速器中微子、大气中微子、超新星中微子等），中微子的能量 E 远大于其质量 m ，手征振荡的效应并不突出， $m^2/E^2 \ll 1$ ，实验上很难检验。葛韶锋副教授和博士后Pedro Pasquini创造性地提出用宇宙遗迹中微子（Cosmological Relic Neutrinos）来检验中微子的手征振荡。宇宙早期温度很高，有大量中微子存在；随着宇宙膨胀，温度降低，中微子的动量也逐渐降低，目前达到只有2开尔文左右，这么低的温度下，中微子的动量远远小于其质量（ $m \ll |p|$, $m \approx E$ ）。在此演化过程中，中微子从只有左手分量，逐渐变成左右手分量具有差不多相同的份量、相互之间不断振荡： $P_{\nu_L \rightarrow \nu_L} \rightarrow \cos^2(Et)$, $P_{\nu_L \rightarrow \nu_R} \rightarrow \sin^2(Et)$ 。由于只有左手中微子参与弱相互作用，探测过程在通常的反应截面之外，还有一个额外的时间平均因子 $1/2$ ，这是之前的理论计算没有考虑到的。这个 $1/2$ 因子是非常显著的差别，可以由未来的宇宙遗迹中微子实验——比如托勒密（PTOLEMY）实验——进行检验。

宇称不守恒是李政道研究所名誉所长李政道先生的成名之作，基于此发展而来的中微子手征振荡是对宇称不守恒理论的进一步继承和发展，扩展了中微子振荡理论和现象。在李政道研究所进行这一研究，具有非常重要的意义。尤其宇宙遗迹中微子，处于宇宙学和粒子物理研究的交叉前沿，是由宇宙学标准模型和粒子物理标准模型预言必然存在的宇宙早期遗迹，对其的探索将了解更多早期宇宙的信息。

作者： 葛韶锋
供稿单位： 李政道研究所

沪ICP备05052060 (<http://www.beian.miit.gov.cn/>) 沪举报中心 版权所有© 上海交通大学 新闻网编辑部维护

地址：上海市东川路800号 邮编：200240 查号：86-21-54740000