

大爆炸核合成与宇宙背景中微子

曹云¹ 邢志忠^{2,†}

(1 清华大学工程物理系 北京 100084)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2012-10-04 收到

† email: xingzz@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/w120130704

Big bang nucleosynthesis and the cosmic neutrino background

CAO Yun¹ XING Zhi-Zhong^{2,†}

(1 Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 文章基于大爆炸宇宙学描述了发生于宇宙早期的中微子退耦与轻核素合成事件。退耦后的中微子形成宇宙的背景之一。文章介绍了几种探测宇宙背景中微子的方法，侧重于利用 β 衰变核俘获超低动能的中微子。

关键词 宇宙背景中微子，大爆炸核合成， β 衰变

Abstract We present a brief overview of the neutrino decoupling and big bang nucleosynthesis in the early universe. The big bang relic neutrinos formed one of the backgrounds of the universe. A few possible ways to directly detect the cosmic neutrino background are briefly introduced, and particular attention is paid to the relic neutrino capture on β -decaying nuclei.

Keywords cosmic neutrino background, big bang nucleosynthesis, β decay

1 引言

迄今为止，在解释宇宙的诞生、演化及未来命运的所有理论中，最精彩的、得到最多观测数据支持的是大爆炸宇宙论。根据这一理论，宇宙起源于一百多亿年前的一次大爆炸。之后宇宙不断地膨胀、冷却，一直到我们现在所处的状态。该学说对于现代宇宙学的重要意义如同当年达尔文提出的进化论，给人类的理性思维提供了一个相当可靠的支点，对于破除神学迷信、宗教桎梏都可谓居功至伟。下面先简要介绍一下大爆炸宇宙学的发展历史。

哈勃(Hubble)通过天文观测在1929年发现了一个奇特现象：星系之间彼此渐行渐远，而且退行速度和星系之间的距离成正比。反推回去，人们自然会想到在很早以前，物质也许紧紧挤压在一起，处于一个高密高温的状态。哈勃的观测结果和勒梅特(Lemaitre)当时提出的宇宙起源于一个“原生原子”的假说相符合。基于上述事实，伽莫夫(Gamow)等人在20世纪40年代初提出了较为完整的大爆炸理论，正确地预言了宇宙微波背景辐射的存在。贝尔实验室的彭齐亚斯(Penzias)和威尔逊(Wilson)在1965年很偶然地发现了宇宙微波背景辐射的存在，他们最终获得了

诺贝尔奖。大爆炸宇宙学也因此获得了最强有力的支持。经过一代又一代科学家的不懈努力，人们对于宇宙的演化过程已经有了比较清晰的描述。根据现有的知识，宇宙在大爆炸发生 10^{-43}s 之后的演化历史是比较清楚的。但是在 10^{-43}s 之前，宇宙究竟发生了什么？对于这一点，依然无人能做出准确的描述，因为现有的物理规律对此无能为力。

既然宇宙在不断膨胀，我们自然要关心宇宙的终极命运。宇宙究竟会一直膨胀下去，还是最终会收缩成一个点？根据目前的宇宙学，有三种可能的结果。一种是紧闭宇宙，对应曲率常数 $k=1$ 。在这种情况下，宇宙扩张到一个最大半径之后会再次发生坍缩。另一种是开放宇宙，对应曲率常数 $k=-1$ 。与紧闭宇宙相反，开放宇宙会无限地扩张下去。还有一种是平坦宇宙，对应曲率常数 $k=0$ 。平坦宇宙会一直膨胀下去，但是膨胀的速度最终会趋于零。现有的天文学观测表明，宇宙的结构在大尺度上很接近平坦宇宙模型，但目前却处在加速膨胀的状态。

宇宙的能量密度包含三种成分，分别来自物质、辐射和真空。追溯宇宙的演化历史，它分别经历了这三种能量成分占主导地位的时期。在宇宙的现阶段，辐射在总能量密度中所占的比例已经非常之小，

可以忽略不计。宇宙目前的演化行为主要是由物质(其中主要是暗物质)和真空能(暗能量)决定的。

中微子在宇宙的早期演化过程中扮演了不可或缺的参与者和见证人的角色。本文将简要描述中微子退耦与大爆炸核合成的基本物理图像,并简单介绍宇宙背景中微子的性质及其可能的探测途径。

2 中微子退耦^[1]

宇宙背景中微子是大爆炸宇宙模型的另一个预言,其数密度仅比宇宙背景光子的数密度低一点。创世之初,就像中国古代神话里描述的那样,一切都处于混沌状态。各种粒子好似组成了一锅热汤,中微子和其他粒子反复地进行弱相互作用,彼此处于热平衡状态。进行弱相互作用的粒子,其反应率与温度 T 成 5 次方的正比关系,而宇宙膨胀的速率随温度 T 成 2 次方的正比关系。随着宇宙不断地膨胀和冷却,温度逐渐下降。在大爆炸发生后大约 1s 左右,对应的温度约为 1 MeV 时,宇宙膨胀的速率赶上和超过了弱相互作用的反应率。这时正反中微子的热平衡状态无法再维持,它们停止了与其他粒子的相互作用,即中微子开始退耦合。从此以后,宇宙空间对于中微子来说几乎彻底透明,中微子可以自在地穿行其中而毫无阻碍。当宇宙的温度低于电子的静止质量 (0.511 MeV) 时,正负电子对开始发生湮没,以光子的形式释放能量,并使得宇宙空间中的光子被加热。退耦之后的中微子与光子不发生相互作用,因而宇宙背景中微子的温度比光子的温度略微低一些。在理想的退耦情况下,即中微子在一瞬间就与其他物质彻底脱离关系,则光子和中微子的温度之比为

$$T_\nu/T_\gamma = (11/4)^{1/3} \approx 1.4012.$$

我们也可以算出中微子与光子的数密度之间的关系:

$$n_\nu = \frac{9}{11} n_\gamma.$$

根据今天对宇宙微波背景辐射的测量结果,可得到 $T_\gamma = 2.725$ K 和 $n_\gamma = 336 \text{ cm}^{-3}$ 。则宇宙中微子背景的温度 $T_\nu \approx 1.945$ K,数密度为 $n_\nu \approx 336 \text{ cm}^{-3}$ 。中微子及其反粒子的平均动量非常小,仅为 $5 \times 10^{-4} \text{ eV}$ 。考虑到中微子振荡实验所得到的三种中微子的质量平方差,我们可以推断:目前至少有二种中微子的静止质量大于其平均动量。换句话说,在宇宙中微子背景中,至少有二种中微子处在非相对论性的运动状态。如此低的动能使得大爆炸遗留下来的中微子无力触发与其他物质的带电流相互作用,所以人们无法通过现有的实验手段去探测和证实宇宙背景中微子的真实存在。

3 大爆炸核合成

大爆炸核合成的观测证据是支持标准大爆炸宇宙学的三大实验证据之一,另外两个分别是关于宇宙膨胀和微波背景辐射的观测证据。大爆炸核合成理论对宇宙中轻核素丰度的解释和观测数据非常吻合。根据这一理论,在大爆炸发生数百秒内,质子和中子合成了大量的轻元素,主要是 ^2H , ^3He , ^4He 和 ^7Li 。不过它们的丰度彼此不同,而且差异很大(见图 1)。

3.1 中子与质子的数密度之比

轻元素的合成在辐射主导宇宙能量密度的时期出现,在此阶段,宇宙温度的分布跨度大致从 1 MeV 到 0.1 MeV。当宇宙的温度处于 200 MeV 左右时,胶子、夸克和反夸克等被束缚在一起,形成核子和反核子,即质子、中子及其反粒子。随着

宇宙继续膨胀和冷却，核子与反核子的数密度随温度呈指数减小。待到温度低于 20 MeV 时，大多数核子和反核子已经相互湮灭掉了，因而残留下来的核子与反核子对宇宙能量密度的贡献并不是很大，此时辐射占据主导地位。在电子型中微子和电子型反中微子发生退耦之前，弱相互作用使得质子和中子不断地相互转化。根据目前的观测数据，如果我们取中微子退耦时的温度为 $T \approx 0.72$ MeV，则当时中子与质子的数密度之比约为 $n_n/n_p \approx 1/6$ 。这一切不过是在大爆炸发生后的大约 1.4s 就完成了，之后中子开始衰变成质子、电子和电子型反中微子。该 β 衰变的阶段持续的时间较长，大约几分钟。随着这一衰变过程的进行，中子和质子数密度的比值逐渐减小。在大爆炸发生约 160s 之后，中子与质子之比降低到 $n_n/n_p \approx 0.14$ ，此时此刻核合成的大幕才正式拉开。

3.2 轻核素的合成

大爆炸核合成过程中的第一个核反应就是中子和质子合成氘核的反应，其束缚能约等于 2.22 MeV。因为该反应的截面较大，它处在热平衡状态的时间较长。换言之，如果核子所处的环境中存在很多光子，而且光子的能量比氘核的束缚能高的话，氘核一经合成就会迅速分解。这样的光解过程延缓了氘核的稳定合成。但是随着温度不断降低，终归会出现光子的能量小于氘核束缚能的那一刻。这样一来，逆向的光解反应就不会再发生了，使得氘核的产量迅速增加。在接下来的几分钟里，几乎所有幸存下来的中子都开始参与合成稳定轻核 ^4He 的过程。很重的核素不会大量生成，这一方面在于没有质量数等于 5, 6 或 8 的稳定核，另一方面在于相关反应有着极大的库仑势垒。这一点是伽莫夫

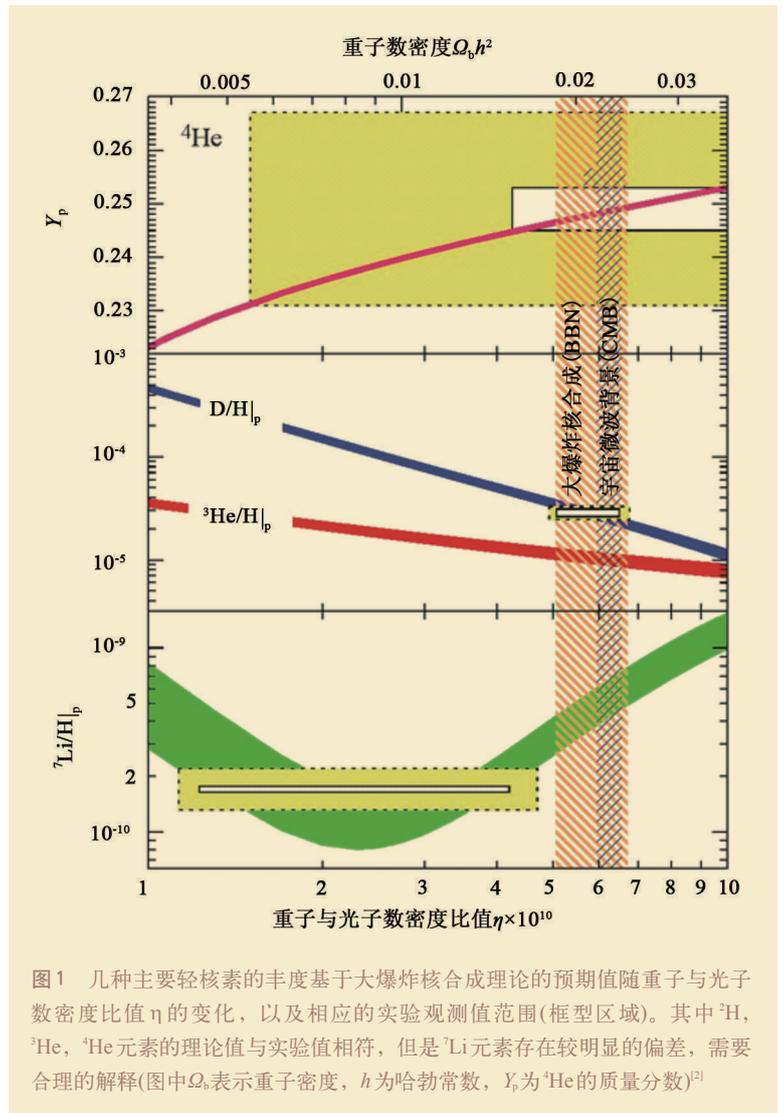
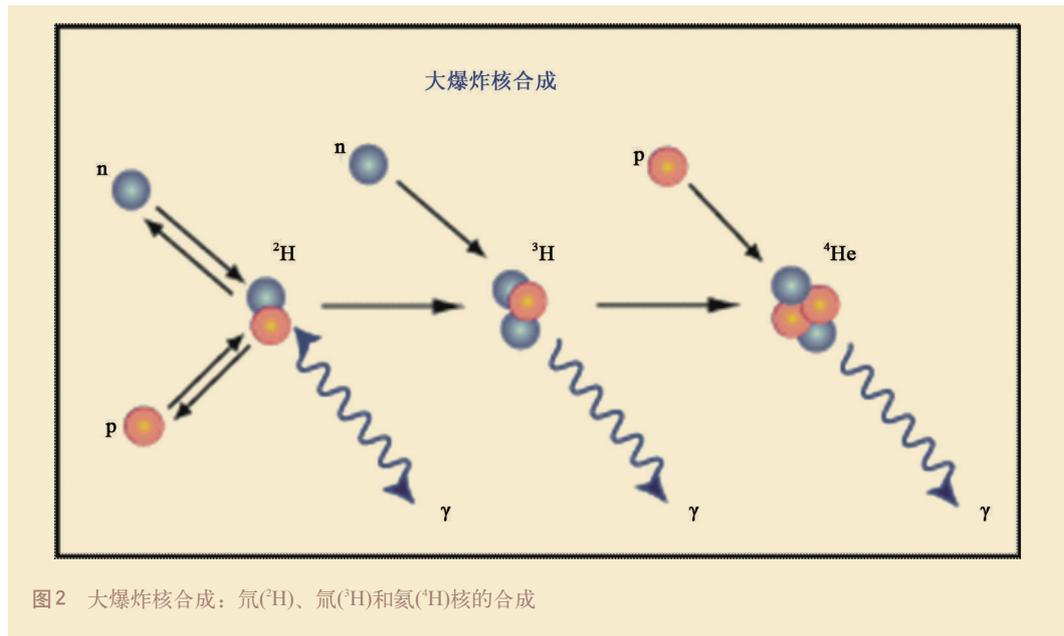


图1 几种主要轻核素的丰度基于大爆炸核合成理论的预期值随重子与光子数密度比值 η 的变化，以及相应的实验观测值范围(框型区域)。其中 ^3H , ^3He , ^4He 元素的理论值与实验值相符，但是 ^7Li 元素存在较明显的偏差，需要合理的解释(图中 Ω_b 表示重子密度， h 为哈勃常数， Y_p 为 ^4He 的质量分数)^[2]

等人当初未曾预料到的，他们本以为所有的核素都可以按照上述类似的反应模式合成出来。氘、氦和氦核的合成过程如图 2 所示。

合成 ^4He 反应的束缚能最大(一切反应总是向释放能量最多的方向进行，恰如水往低处流)，也就是说， ^4He 的核子结合得最为紧密。有部分的氘核以及 ^3He 由于没有足够的质子或中子，不能参与 ^4He 的合成而得以幸运地存留下来。不过比起宇宙中的 ^4He ，氘核及 ^3He 的丰度要明显小得多。

为了验证大爆炸核合成理论的正确性，我们可以计算一下 ^4He 的丰度(这里指



的是其质量丰度)。假设所有的中子最终都合成了 ${}^4\text{He}$ ，并且假设前面关于核合成阶段的初始条件(包括起始时间以及中子与质子的数密度之比等)的估计也是正确的话，我们可以得到 ${}^4\text{He}$ 的质量分数为 $Y_p = 0.246$ ，这里的下标 p 代表“初始”(primordial)的意思。

但是 ${}^4\text{He}$ 的含量不会维持恒定，随着星系的演化和氢核等的燃烧，在恒星内部， ${}^4\text{He}$ 往往和氧、氮等“金属”元素(在天文学中，质量重于 ${}^4\text{He}$ 的元素往往都被称为“金属”元素)一起合成。再加上 ${}^4\text{He}$ 的稳定性，它不会参与到重核素的合成过程中去，导致现在宇宙中 ${}^4\text{He}$ 的含量比起 Y_p 来要稍稍高出。显然，我们无法直接测量原初 ${}^4\text{He}$ 的丰度。实际上，我们首先测量那些低金属(metal-poor)的星系中热电离气体区域的 ${}^4\text{He}$ 丰度。在这些区域中，只有极少量的重核素是通过星系氢核聚变反应而生成的。然后，我们综合大量积累的观测数据，将结果外推到金属含量为零的情形。几个不同的研究小组得到的 Y_p 结果是相互支持的，也和上面得到的理论预计值 $Y_p = 0.246$ 高度吻合。

根据大爆炸核合成理论，我们不仅可以计算 ${}^4\text{He}$ 的丰度，同时也可以计算其他轻核素(比如 D ， ${}^3\text{He}$ 和 ${}^7\text{Li}$)的原初丰度。这些核素的丰度与 ${}^4\text{He}$ 的丰度相比要小，但与星系内部仅仅通过热核反应而生成的轻核素的丰度相比则大得多。

研究原初氦核的丰度有着重要的物理意义。不过宇宙现阶段的氦核的丰度比起原初氦核的丰度也是大为不同，原因何在？在恒星内部，氦核会燃烧生成 ${}^3\text{He}$ 。我们只能说，现在的观测结果对于原初氦核的丰度提供了一个下限值。值得一提的是，虽然在一个有大量氢核燃烧反应的星系里，氦核会大量生成，不过生成的氦核同时会通过聚变反应生成氦。为了确定原初氦核的丰度，我们可以测量高红移、低金属度的气体云中的氦核的丰度。这些气体云非常遥远，它们不曾是某一个恒星的组成部分，在其内部从未进行过氢核燃烧等各种元素合成的过程，所以较好地保留了原初的信息，就如同是来自太古时代的信使。好几个实验组都对氦核的含量进行了测量，这些实验结果的平均值 $D/H|_p = (2.82 \pm 0.21) \times 10^{-5}$ 。不过，在宇宙

空间中，氦核的分布并不均匀，至少目前的观测结果如此。值得一提的是，氦核和 ^4He 的丰度与中微子的种类有关，所以精确测定二者的丰度有助于我们进一步了解核合成时期中微子的种类等基本物理信息。

^7Li 星系演化中含量变化的情况要稍微复杂一些，因为在星系演化过程中，既有 ^7Li 的消耗，又有 ^7Li 的合成。大多数在大爆炸核合成时期所合成的 ^7Li 其实已经不存在了，只有位于那些质量很小、温度又很低的恒星的表面的部分幸存了下来，因为这部分的 ^7Li 不参与原子核的燃烧反应。现有的一些观测显示，红巨星在其演化的某一阶段会合成 ^7Li ，不过我们也没有足够证据能够证明红巨星在消亡之后 ^7Li 进入到了星际介质中。另外，星际介质和宇宙射线的相互碰撞也会产生 ^7Li 。如何精确地估计各部分的贡献是比较复杂的问题。不难想象，对 ^7Li 丰度的测量存在比较大的不确定性。到目前为止，对 ^7Li 的原初丰度的精确测定主要来自于对银河系中温度很高且金属含量较低的恒星的测量，其结果同样可以外推到无金属的情形。现在的观测数据指向 $^7\text{Li}/\text{H}|_p = (1.7 \pm 0.06 \pm 0.44) \times 10^{-10}$ ，不过这个结果所对应的宇宙重子数和光子数的比值 η 较小(见图1)，与通过测量宇宙微波背景辐射以及轻核素的丰度所确定的 η 值有明显的出入，出现了所谓的“锂难题”。该疑难问题目前悬而未决，可能和我们对星系结构或演化过程的理解不够充分有关，当然也有其他的可能性，比如存在超越标准模型的新物理。

测量 ^3He 的原初丰度是相当困难的。目前只在银河系的星系介质中观测到了 ^3He ，这些星际介质往往是气体状态，而且早已经历了很多代的恒星演化过程，相关区域的金属含量很高。同 ^7Li 类似， ^3He 在演化过程中也会有消失和产生，因而测

量结果的精确度较差。

正如我们在前面所指出的那样，根据大爆炸核合成理论，通过测量原初 ^4He 和氦的丰度，我们可以得到宇宙中的重子数和光子数的比值以及中微子的种类等重要信息。需要注意的是，大爆炸核合成之前的宇宙空间中既有核子又有反核子，只不过核子和反核子的数目并不对称，前者要多一些。核子和反核子后来发生了湮灭，存留下来的核子只有其初始值的十亿分之一左右，它们参与了大爆炸核合成，并由此形成了我们现在所观测到的、由重子构成的物质世界。

4 探测宇宙背景中微子

根据大爆炸宇宙学，中微子在宇宙年龄约为1s的时刻发生退耦，形成宇宙空间的背景。宇宙的中微子背景与它的微波背景辐射十分类似，只不过后者的形成要晚一些，大约在大爆炸发生后380000年左右。因而可以说，背景中微子是宇宙中现存的最古老的“遗物”，它就好比殷墟考古中发现的甲骨文，那是来自上古时代的直接信号，记录了很多原始的信息，对于我们破解各种悬而未决的宇宙学难题可以起到事半功倍的作用。迄今为止，科学家对背景中微子的研究都是通过间接的途径来进行的，比如测量轻核素的原初丰度、宇宙微波背景辐射的各向异性以及宇宙的大尺度结构等。能否在可望的将来实现对背景中微子的直接探测，这是中微子天文学和中微子宇宙学的一个重要问题。

宇宙背景中微子的温度、数密度和动能分别为 $T_\nu \approx 1.945 \text{ K}$ ， $n_\nu \approx 336 \text{ cm}^{-3}$ 和 $\langle p_\nu \rangle = 3T_\nu \approx 5.8 \text{ K} \approx 5 \times 10^{-4} \text{ eV}$ ，因此其中至少有两种中微子现在已经是非相对论性的。在大尺度上，背景中微子应该是分布均匀而且是各向同性的。不过宇宙空间中

还存在大量的星系和冷暗物质结构，它们的引力集聚效应会导致背景中微子在一些局部区域过量，其密度会超过理论标准值，这对于我们探测背景中微子的存在是有好处的。但由于背景中微子的动能很小，与探测器的相互作用截面也很小，所以直接探测它们的存在是极其困难的。下面我们简要介绍几种探测宇宙中微子背景的思路和手段。

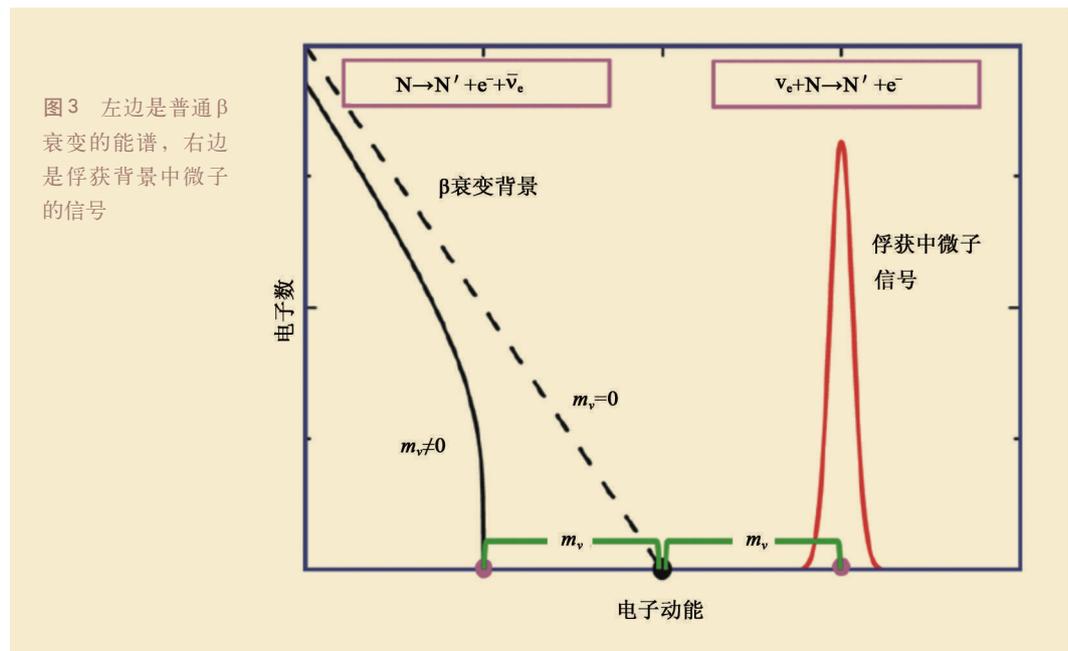
4.1 利用β衰变核俘获背景中微子^[3]

1979年的诺贝尔物理学奖得主史蒂文·温伯格(Steven Weinberg)在1962年提出了利用β衰变核俘获宇宙背景中微子的设想：在核素的β衰变末态能谱中，如果伴随有大爆炸遗留下来的电子型中微子的吸收，能谱末端之外就会出现一个峰，如图3所示。温伯格的这一想法目前被很多人认为是最有前景的直接探测宇宙背景中微子的方法。

如果一个核素可以通过β衰变释放出一个子核、一个电子和一个电子型反中微子，则该核素同样可以俘获一个电子型中

微子而放出一个子核和一个电子。这种俘获中微子的反应有一个显著的特点，就是该反应对入射的中微子没有阈能限制。换句话说，无论被俘获的背景中微子的动能有多小，它都能够触发该反应，保证反应前后的轻子数守恒。由于末态中电子的质量远小于子核的质量，我们可以粗略地认为，该俘获反应所释放出的能量全部都转化为电子的动能，后者具有很好的单能性。而β衰变所生成的产物含有三个粒子，所释放出的能量在三者之间的分配是随机的，因此末态的电子不是单能的。从图3可以看到，在俘获背景中微子的反应中，电子的动能比β衰变能谱的末端高出 $2m_\nu$ （其中 m_ν 笼统地表示中微子的质量）。这一差别就是信号(俘获反应)与噪音(β衰变)之间的差别。至少在理论上，温伯格的想想法可以用于直接探测背景中微子，只不过因为中微子的质量很小，导致该方法对探测器的能量分辨率要求很高。

一般来说，实验室所能制备的靶物质(即所选取的用于俘获宇宙背景中微子的核素)的量都很小，因此俘获中微子的概率较低。延长实验的持续时间，可以显著



地提高俘获率。主要的问题在于,作为噪音的 β 衰变本身的反应率明显高于作为信号的背景中微子俘获过程的反应率,导致后者可能被淹没在前者中。在这种情况下,有效地俘获中微子的难度就变得特别大。此外,如果没有显著的重力集聚效应的话,实验的信噪比会比较差,目前用于探测中微子绝对质量的探测器(如德国的KATRIN)的核素质量和能量分辨率还明显不足,难以用于俘获神秘莫测的宇宙背景中微子。

考虑一个天然的 β 衰变反应,其母核与子核的寿命都很长,可以和宇宙的年龄相当。如果因为参与俘获背景中微子的反应,最终导致在宇宙空间中发生 β 衰变的核素与子核的丰度比相对于没有中微子背景的情况有明显的变化,则一切问题就迎刃而解了。宇宙中能够满足条件的天然核素有 ^{187}Re 和 ^{138}La ,它们的寿命都很长,子核也非常稳定。但是目前局限于探测精度和其他因素,这一有趣的想法实现起来困难太大。

温伯格的设想也可以用于俘获可能存在的、质量较轻的惰性(sterile)中微子及其反粒子,前提条件是它们与三种普通的中微子有较大的味混合效应。假设惰性中微子的质量在0.5 eV量级,显著地高于已知的三种中微子的质量,那么我们对于探测结果至少会有如下预期:(1)惰性中微子的信号明显地位于 β 衰变能谱末端的右边,其间隔可达到1 eV左右;(2)惰性中微子的信号大小取决于它与其他三种普通中微子的味混合角的大小;(3)探测器的能量分辨率 Δ 必须满足 $\Delta \leq m_\nu/2$ 的必要条件^[4]。

4.2 卡文迪什式扭力天平

宇宙背景中微子的分布是近似各向同

性的,而地球在宇宙空间中运动,因此二者之间自然有相对运动。背景中微子与地面上的探测器发生相干弹性散射后,探测器会受到力的作用。这种力虽然极其微小,但是通过信号对卡文迪什式扭力天平的作用做年度修正,还是有可能探测到它的存在。不过从目前的探测精度来看,该想法的实现还遥遥无期^[5]。

根据波粒二相性,背景中微子的波动波长约为 $\lambda_\nu = 1/T_\nu \approx 0.12 \text{ cm}$ 。经过计算就能够得到宇宙中的中微子风对探测器的加速效应。这个加速度非常微小,而且与作为靶的物质的极化情况有关。目前的卡文迪什式扭力天平一般能够测量到的最小加速度是 10^{-13} cm/s^2 ,未来有可能达到 10^{-23} cm/s^2 的精度。但是即便如此,也远远达不到测量宇宙背景中微子的要求。

4.3 其他可能的途径

也有人提出使用能量极高的粒子(比如通过加速器提升粒子的动能或利用天然的高能宇宙射线)与作为靶的宇宙背景中微子相互作用来探测后者的存在,因为此时弱相互作用的截面较大。以加速器为例,即使是目前世界上能量最高的大型强子对撞机(large hadron collider),被它加速到几个TeV能量的粒子与背景中微子相互作用的概率也不足以产生一个可探测的信号。考虑一种极端情况,假设有一天人类能够造出一台终极对撞机,它的加速环沿着地球的赤道建造,最终将质子能量加速到 10^7 TeV 的量级。在这种情况下,粒子束和背景中微子发生相互作用的概率还算可以接受,但是真正的信号依然无法探测,因为该反应的动量转移相比粒子本身的能量而言是微不足道的。

天文学家更愿意求助于无所不在的宇宙射线,以期直接探测无所不在的宇宙中



Messe München
International

中国光学行业完美展示平台
China's Platform for the Photonics Community

慕尼黑上海光博会
LASER World of PHOTONICS CHINA
SOLUTIONS in LIGHT

2014年展会亮点:
Show Highlights in 2014:

- 600 家国内外参展企业
Exhibitors from home and abroad
- 34,500 平米展示面积
Exhibit space
- 38,000 名专业观众
Trade visitors

抢位热线
Hotline: 021-2020 5587

激光加工与生产技术 Laser Systems for Production Engineering	激光器与光电子 Lasers and Optoelectronics	光学与光学制造 Optics and Manufacturing Technology for Optics	成像、检测和质量控制 Imaging, Optical Metrology and Quality Assurance
--	---------------------------------------	--	---

2014年3月18-20日
March 18-20, 2014
www.photonicschina.cn
www.photonicschina.net

上海新国际博览中心
Shanghai New International
Expo Centre



立即扫描二维码观看展会视频

微子背景。一般认为,高能宇宙射线可能产生于某种神奇的宇宙加速器,被它加速到极高能量的质子可以与宇宙的微波背景光子相互作用,从而产生带电的 π 介子,而后的衰变会产生高能中微子。极高能的宇宙线中微子在空间传播时可能与宇宙背景反中微子发生共振湮灭,生成Z玻色子,进而产生高能粒子的簇射信号。这种极高能中微子束流被宇宙中微子背景“吸收”的特性,在一定程度上类似于极高能宇宙线被宇宙微波背景吸收的情形(即著名的GZK截断效应)。可惜的是,上述想法对于目前的探测技术来说依旧难以实现。

参考文献

- [1] Xing Z Z, Zhou S. Neutrinos in Particle Physics, Astronomy and Cosmology. Germany: Springer-Verlag, 2011
- [2] Beringer J *et al* (Particle Data Group). Physical Review D, 2012, 86:010001
- [3] Weinberg S. Physical Review, 1962, 128:1457
- [4] Li Y F, Xing Z Z, Luo S. Physics Letters B, 2010, 692:261
- [5] Ringwald A. Nuclear Physics A, 2009, 827:501c



水生植物的超疏水结构

水生植物演化出了许多独特的应对水的智慧。它们既能充分利用水环境以获取生存的资源,同时又发展出极端疏水的结构。

图中所示为迷你水芙蓉 (pistia stratiotes) 的叶子,叶上布满毛状体(trichome,长度约为 $800\ \mu\text{m}$,底部直径约 $80\ \mu\text{m}$,一般6—10节)。叶子上表皮以及毛状体的表面都覆盖有一层疏水的蜡质层,毛状体的密度约为 $20/\text{mm}^2$ 。水滴附着在叶片表面时,毛状体阻止了水滴与叶片底面的接触,空气被压缩在毛状体缝隙之间,从而使得叶片表现出Cassie超疏水状态,其上的水珠因而呈几乎完美的球形。

(中国科学院物理研究所 张文彬、江南、曹则贤 供稿)