

反物质和暗能量

张新民

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

上个世纪,人类在探索宇宙奥秘和物质基本结构及其相互作用的道路上取得了辉煌的成就,建立了描述微观世界的粒子物理标准模型和描述宇观世界的大爆炸宇宙学标准模型。粒子宇宙学将微观世界和宇观世界、粒子物理学和天文学结合起来,研究早期宇宙这一极端条件下的物理规律,探讨基本粒子的相互作用的统一。

近代宇宙学研究表明,在宇宙演化过程中经历了暴涨(Inflation)阶段。基于粒子物理的标量场理论,暴涨宇宙学不仅为经典大爆炸宇宙模型中的初始条件和疑难给予了答案,而且提供了一个描述宇宙大尺度结构成因的合理理论,并为近年观测所支持。自1998年以来,多种天文观测特别是2003年2月WMAP(Wilkinson微波各向异性探测器)的结果表明,宇宙是平坦的并在加速膨胀,强有力地支持了“暴涨 ⊕ 暗物质 ⊕ 暗能量”的宇宙模型。

另一方面,我们知道从探索物质基本结构的观点出发,高能物理学站在微观世界研究的最前沿,粒子物理的标准模型告诉我们自然界的基本组成成分为3代夸克和轻子,其相互作用由规范玻色子传递。那么,什么是暗物质组成成分?暴涨的动力学机制是什么?暗能量的物理本质是什么?在暴涨宇宙学中,物质与反物质在初期以同等数量产生,但是,众所周知,在我们可观测宇宙的范围之内还没有发现反物质存在的区域,那么反物质到哪里去了呢?在国际上,寻找暗物质、研究暗能量等关于粒子宇宙学课题的探讨,结合微观世界和宇观世界的研究是21世纪物理学和天文学的一个重要趋势。

本文将浅谈宇宙中正反物质不对称疑难和暗能量之谜。

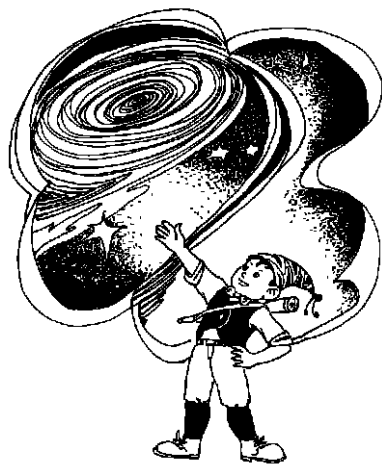
一、宇宙中的反物质是怎样丢失的

70年前,理论物理学家狄拉克提出了反物质的概念。在微观物理研究领域,电荷共轭对称性告诉我们,每个粒子都存在着一个反粒子,例如电子的反粒子是正电子,质子的反粒子是反质子。如果这种对称性在宇观世界是根本的话,将会存在着由反质子、反中子和正电子构成的反物质。然而至今在浩

瀚的宇宙空间还没有找到反物质。那么,反物质到哪里去了?

物理学家通常用 $\eta = (n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma$ 来定义物质与反物质不对称的度量(其中 n_B 和 $n_{\bar{B}}$ 分别为重子和反重子的数密度, n_γ 为光子的数密度,大

约为 $400/\text{cm}^3$)。直观上,一个没有反物质的宇宙会告诉我们 η 不为零。对 η 的精确确定主要来自于宇宙早期核合成理论和近年的微波背景辐射的研究。前者给出 $\eta = (2.6 \sim 6.2) \times 10^{-10}$, 后者为 $\eta = (6.1^{+0.3}_{-0.2}) \times 10^{-10}$ 。注意,这两个物理过程分别发生在温度相差大约 10^6 倍数的时刻,却给出了几乎相同的结果,这说明了标准大爆炸宇宙模型的自洽性和成功之处。



理论上讲,这种正反物质不对称性可能是原始宇宙就有的。然而,近代宇宙学研究表明,宇宙在早期经历了一个暴涨阶段。暴涨解决了经典宇宙学中的平坦性、均匀性等问题,但同时剧烈的膨胀使得原始的重子数密度趋近于零。在暴涨宇宙学中,物质在暴涨后的再加热(Reheating)过程中产生,所以物质与反物质的不对称也必须是宇宙演化的结果。

1967年前苏联科学家萨哈洛夫(Sakharov)给出了动力学产生正反物质不对称(Baryogenesis)所需要的3个条件。条件一是重子数需不守恒。这一点很显然,如果重子数守恒,正反物质对称的宇宙将永远是对称的。条件二是C和CP对称性的破坏。C不对称是粒子反粒子不对称,CP不对称是粒子反粒子、左和右联合的不对称。只要C或CP中的任意一个对称性存在,重子数破坏的反应过程就会产生相同数量的重子和反重子。第三个条件是脱离热平衡。因为在热平衡时,重子与反重子满足玻耳兹曼分布,由CPT定理(T是时间反演)可知,正反粒子质量相等,所以重子与反重子的密度相等。但是,如果宇宙早期发生了CPT破坏的话,情况就会大不一样。

自上世纪 80 年代末以来,人们认识到粒子物理的标准模型可以满足萨哈洛夫的 3 个条件。在标准模型中,经典拉氏量具有重子数和轻子数守恒的对称性,但在量子层次,反常效应和非阿贝尔规范场真空的特殊性破坏了重子数和轻子数。然而这种效应在零温时是微不足道的,所以质子是稳定的。但当温度高于弱电标度,即 $T > O(100) \text{ GeV}$ 时,重子数破坏作用将处于热平衡中。决定这一反应率的一个重要因素是 Sphaleron,它是标准模型的一个经典解,它导致的重子数破坏实现了萨哈洛夫的第一个条件。在标准模型中,C 和 CP 对称性是破坏的。萨哈洛夫的第三个条件由弱电一级相变来实现。但定量计算表明,标准模型给出的正反物质不对称 η 远远小于 10^{-10} 。其主要原因是卡比玻-小林-益川(CKM)机制给出的 CP 破坏量不够。这一问题说明虽然粒子物理的标准模型完美地解释了实验室中的物理现象,但它不能解答宇宙中正反物质不对称疑难。

正反物质不对称疑难的研究促进了对超出标准模型新物理的探讨。目前在弱电标度正反物质不对称产生机制的研究领域,人们分别考虑了多个希格斯(Higgs)模型、左右对称弱电统一模型等,但关注的焦点是超对称标准模型,在这个模型中,有新的 CP 破坏源,有丰富的希格斯粒子。是否超对称模型破解了反物质丢失之谜有待于实验上的验证。这需要发现超对称粒子和新的 CP 破坏现象。

近年来,由于中微子振荡物理的推动,轻子数不对称的产生机制(Leptogenesis)倍受关注。在标准模型中,重子数与轻子数分别由 Sphaleron 过程破坏,但二者之差却是守恒的。这就将重子数的改变与轻子数的改变连在了一起。

同样轻子数不对称的产生机制需要轻子数破坏过程、轻子部分的 C 和 CP 破坏以及非平衡态的实现。这些条件在一般的描述有质量中微子的模型中都可以实现。比如对于简单的跷跷板(See-Saw)模型,中微子是马约拉纳(Majorana)型,破坏了轻子数对称性,重的右手中微子退耦提供了非平衡条件。在这一理论中,中微子部分的 CP 破坏是一个重要的预言,它可以由长基线中微子振荡实验(例如,我国正在建议的由日本到北京的 2100 千米中微子振荡实验)来检验。一旦找到,将是一个重大的发现。

二、什么是暗能量

近年来,宇宙学研究表明除了普通物质和暗物

质外,宇宙中存在着暗能量。支持暗能量的主要证据有两个。一是对遥远的超新星所进行的观测表明,宇宙不仅在膨胀,而且与想像中的不一样,在加速膨胀。在标准宇宙模型框架下,爱因斯坦引力场方程给出 $\ddot{a}/a = -4\pi G(\rho + 3p)/3$ (其中 a 是宇宙标度因子, G 为引力常数, p 和 ρ 分别为宇宙中物质的压强和能量密度),加速膨胀 $\ddot{a} > 0$ 要求压强为负: $p < -\rho/3$ 。注意,对于通常的辐射、重子和冷暗物质,压强都是非负的,所以必定存在着一种神秘的负压物质主导今天的宇宙。另一个证据来自于近年对微波背景辐射的研究,精确地测量微波背景涨落的角功率谱第一峰的位置揭示宇宙是平坦的,即宇宙中物质的总密度等于临界密度 $\rho_c = 4.05 \times 10^{-11} (\text{eV})^4$ 。但是,我们知道所有的普通物质与暗物质加起来只占宇宙总物质的约 1/3 左右,所以仍有约 2/3 的短缺。这一短缺的物质称为暗能量,其基本特征是具有负压,在宇宙空间中均匀分布且不结团。最近 WMAP 数据显示,暗能量在宇宙中占总物质的 73%,其能量密度大约为 $(2.3 \times 10^{-3} \text{ eV})^4$ 。值得指出,相对应的能标 10^{-3} eV 仅可与中微子质量相比拟,远远低于其他的物理标度。

什么是暗能量呢?在弗里德曼-罗伯逊-沃克(Friedman-Robertson-Walker)宇宙学模型框架下,暗能量模型主要分为两大类,其一是宇宙学常数(或真空能),在另一类模型中,如 Quintessence(硬译为精髓)模型,暗能量随时间而变。在量子场论中,真空具有能量,而且由协变性要求,真空的能量-动量张量正比于度规张量,所以真空能的状态方程: $w = p/\rho = -1$,满足加速膨胀的要求。但是目前量子场论的理论预言值远远大于观测值。如果认为爱因斯坦的广义相对论和粒子物理的标准模型在普朗克标度以下都是有效的,理论计算的真空能将比观测值大 10^{120} 倍。这一理论与实验的冲突便是著名的宇宙学常数问题。

不同于真空能,暗能量也可以是一种随时间变化的动力学场的能量。最简单的是引入一个具有正则动能的标量场 Q ,在文献中它被称为“精髓”场,其势能形式一般写为 $V(Q)$,具体形式由模型而定。随着宇宙的演化, Q 场沿着 $V(Q)$ 由高能往低能区滚动。对于分布均匀的精髓场,它的能量密度和压强分别为 $\rho_Q = \dot{Q}^2/2 + V(Q)$, $p_Q = \dot{Q}^2/2 - V(Q)$,其中 \dot{Q} 是精髓场对时间的导数。如果势能函数是非常平坦的话,精髓场将处于慢滚阶段,满足 $\dot{Q}^2 \ll$

$V(Q)$, 这样压强将取负值, 驱动宇宙的加速膨胀。

现在我们对于作为暗能量的两种可能性: 宇宙学常数和精髓场作一比较。在精髓模型中, 暗能量随时间而变, 不仅能量密度 ρ_ϕ , 且状态方程 $w = p_\phi/\rho_\phi$ 不同时刻可取不同的值。而对于真空能, 能量密度是一个常数且状态方程永远是 -1 。目前各种观测, 例如今年初的 WMAP 组分析表明, 暗能量的状态方程 $w < -0.78$, 与真空能状态方程吻合, 不支持, 当然也没有排除精髓作为暗能量的可能性。但是, 用真空能来解释暗能量存在着两个大的问题, 其一是上面已谈过的老的宇宙学常数问题, 即观测的真空能为什么这么小? 第二个问题是: 现今宇宙中的物质占 27%, 暗能量占 73%, 二者的能量密度处于同一个量级, 然而, 真空能与物质有完全不同的演化行为。对于物质, 其密度 ρ_m 随着宇宙的膨胀而减少, $\rho_m \propto a^{-3}$; 而对于真空能, 它的密度 ρ_ϕ 是一个常数, 不随宇宙的演化而改变。对于具有 137 亿年演化历史的宇宙来说, 只有在宇宙早期非常精细地调整 ρ_ϕ/ρ_m 才能给出今天的 ρ_ϕ/ρ_m 。理论上讲这个精细调整是非常令人不满意的, 在文献中这个问题也叫做一致性问题(Coincidence Problem)。在精髓模型中, 由于暗能量随宇宙演化而改变, 这一问题可以得到解决。

另外, 由于精髓是一种动力学场, 不同于真空能, 它将带来一系列有趣的物理现象。例如, 精髓场与电磁场的相互作用 $QF_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ (其中 $F_{\mu\nu}$ 是电磁场张量) 将会导致精细结构常数的改变; 又如, 精髓场与中微子的耦合将导致中微子质量在宇宙演化过程中发生变化; 上面提到, 相对应的暗能量标度 10^{-3}eV 可与中微子质量相比拟, 是否暗能量与中微子确有一定的联系是值得探讨的。

除了精髓外, 近年人们还研究了 K-essence 和 Phantom 等暗能量模型, 这些都是基于量子场论中的标量场理论。这些标量场可为基本的, 也可为复合的。在粒子物理的标准模型中, 希格斯场也是一个标量场, 实验上至今还没有找到, 理论上存在着一些困难, 如平庸性和自自然性等问题。暴涨模型中的暴涨子也是标量场, 理论上, 保证暴涨势的平坦性也存在着一定的困难。由此可知, 标量场在粒子物理和宇宙学中有广泛的应用, 但它的物理性质有待深入的理论研究, 当然更重要的是实验上需要证实希格斯粒子、暴涨子和精髓的存在。

在精髓模型中, 老的宇宙学常数问题并没有得到解决。从根本上讲, 认识暗能量的本质需要一个完善的包括引力在内的各种相互作用统一的量子理论, 即包罗万象的理论(Theory of Everything)。

三、两个疑难之间有联系吗

在狄拉克的理论中, 有两个重要的概念, 一个是反物质, 另一个是真空不“空”。与这两个概念相联系的反物质粒子的存在和真空极化、真空涨落等效应在粒子物理实验中都得到了证实, 然而在宇宙中却没有找到反物质, 人们也无法理解如此之大的真空能。描述微观世界的成功与在宇观世界中的疑惑, 使得人们猜测正反物质不对称疑难和暗能量之谜可能存在着一些内在的联系。近年我们在这方面作了一个尝试, 出发点是暗能量由精髓场来描述, 在这个模型里, 精髓场与标准模型中的基本粒子有相互作用 $\partial_\mu Q J_B^\mu$ (其中 J_B^μ 为重子流)。在宇宙演化过程中, 精髓场充满着宇宙空间, 沿着特定的轨迹运动, 驱动今天宇宙的加速膨胀。同时, 当精髓场滚动时, 它的时间导数 $\dot{\phi}$ 不为零, 导致 CPT 的破坏, 以此产生正反物质的不对称。在这个理论框架内, $\dot{\phi}$ 的大小决定着 CPT 破坏的程度。宇宙的加速膨胀要求今天的 $\dot{\phi}$ 很小, 由此得到的 CPT 破坏也很小, 不与现今的实验相矛盾。然而在宇宙的早期, $\dot{\phi}$ 可以很大, CPT 破坏也大, 由此可以产生正反物质不对称, 并满足观测的要求。这个模型统一地解释了正反物质不对称疑难和宇宙的加速膨胀。此外, 我们最近的研究表明精髓场的超对称伴子精髓子可以作为一个冷暗物质粒子的候选者。这样我们的模型有可能统一地描述宇宙中的重子物质、暗物质和暗能量。

近几年, 一个重大的发现是暗能量在宇宙中起主导作用。通过认识暗能量的物理本质, 我们可以了解宇宙的将来。我们知道, 当暗能量为零时, 空间曲率 K 决定着不同的宇宙演化行为。闭合的($K > 0$) 宇宙最终会塌缩, 而平坦的($K = 0$) 和开放的($K < 0$) 宇宙将会一直膨胀下去。然而, 当暗能量存在时, 宇宙的演化行为将是不同的, 比如一个闭合的宇宙可以永远膨胀下去。的确暗能量的动力学决定着宇宙的命运, 而正反物质的不对称决定着我们的存在, 如果没有这种不对称性, 宇宙中的物质就会与反物质发生湮灭而消失掉。由此, 破解正反物质不对称和暗能量之谜具有重大的科学意义。