

第三讲 宇宙中的暗物质和暗能量*

张新民[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 文章对暗物质粒子的候选者和宇宙中暗能量的研究现状作一简单介绍.
关键词 暗物质 暗能量 粒子宇宙学

Dark matter and dark energy in the universe

ZHANG Xin-Min[†]

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

Abstract A brief review is given of the candidates for dark matter particles and the current understanding of dark energy in the universe.

Key words dark matter, dark energy, particle cosmology

2003年, Wilkinson 微波背景各向异性探测器(WMAP)、Sloan 数字巡天(SDSS)和最近的超新星(SN)等天文观测以其对宇宙学参数的精确测量,进一步强有力地支持了大爆炸宇宙学模型.这在人类探索宇宙奥秘和物质基本结构的道路上无疑是一个光辉的成就. WMAP 的结果告诉我们,宇宙中普通物质只占4%, 23%的物质为非重子暗物质, 73%是暗能量, SDSS 也给出类似的结果.从物质基本结构的观点出发,普通的物质,如树木、桌子以及我们人类本身,是由分子、原子构成.然而分子、原子不是最基本的,目前已知的的基本粒子是由粒子物理标准模型所描述的夸克和轻子以及传递相互作用的规范玻色子.什么是暗物质呢?暗物质是不发光的,但是它有显著的引力效应.比如,对于一个星系考虑距其中心远处的旋转速度,如果物质存在的区域和光存在的区域是一样的话,由牛顿引力定律可知,距离中心越远,速度应该越小.可是天文观测事实不是这样的,这就说明当中有看不见的暗物质.目前各种天文观测和结构形成理论强有力地表明宇宙中有大约三分之一是暗物质.中微子是一种暗物质粒子,但 WMAP 和 SDSS 的结果说明,它的质量应当非常小,在暗物质中只能占微小的比例,绝大部分应是所谓

的冷暗物质.它们究竟是什么目前还不清楚.理论物理学家猜测,至少有两个可能性,一个是轴子(axion),另一个是中性伴随子(neutralino).另外还有额外维空间理论中最轻的 KK(Kaluza-Klein)粒子.近年来,为了解决冷暗物质在小尺度上可能的疑难而提出了相互作用暗物质^[1]、温暗物质等.轴子是由罗伯特·派切(Roberto Peccei)和海伦·奎因(Helen Quinn)为解决强相互作用中的电荷共轭-宇称(CP)破坏问题而引进的.中性伴随子是超对称理论中的最轻的超对称伴随子,它是稳定的,在宇宙演化过程中像微波背景光子一样被遗留下来.另外,这种暗物质粒子也可由一些超重粒子或宇宙相变过程产生的一些拓扑缺陷(如宇宙弦)衰变而产生^[2].目前世界各国科学家,例如中国和意大利科学家合作组 DAMA,正在进行着各种加速器和非加速器实验,试图找到这种暗物质粒子.

最近,人们还探讨了 Gravitino^[3], Quintessino^[4] 等一类超弱相互作用的暗物质模型.特别是后者理论,统一地描述了暗物质和暗能量.在这类模型中,一个重要特点是预言了一些亚稳超对称粒子.这些

* 2004-12-14 收到初稿, 2004-12-29 修回

[†] Email: xzmzhang@mail.ihep.ac.cn

粒子有可能在加速器和非加速器物理实验,如 L3 + C 上得到检验。

暗能量是近年宇宙学研究的一个里程碑性的重大成果. 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,而且与想象中的不一样,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, ρ 和 p 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 $p < -\rho/3$. 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 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^[5],其基本特征是具有负压,在宇宙空间中几乎均匀分布或完全不结团. 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 $(2.3 \times 10^{-3} \text{eV})^4$. 这一能标比粒子物理中的基本能标都要低,仅与中微子质量相当. 意指中微子可能与暗能量存在着某种内在的联系^[6]. 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未知的负压物质主导今天的宇宙。

一种可能性是宇宙学常数,它是 1917 年爱因斯坦为建立一个静态的宇宙模型而引进的. 当他得知哈勃(Hubble)关于宇宙膨胀的结果后称宇宙学常数是 他一生中最大的错误. 值得指出,在当今宇宙学研究中宇宙学常数有深一层的意义,它包含真空能. 在量子场论中“真空”是不“空”的. 根据协变性要求,真空的能-动量张量正比于度规张量,等效于爱因斯坦引进的宇宙学常数. 在实验测量中,二者是不可区分的. 这种能量在日常的生活和科学实验中感觉不到,但却支配着宇宙的演化,驱动宇宙的加速膨胀. 不过,很难从直观上想象真空的压强是负的. 数学上,真空的能-动量张量正比于度规张量,它的状态方程应为 $w = p/\rho = -1$. 另外利用能量守恒方程,由于真空能密度是个常数,可以得到 $p = -\rho$. 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即宇宙学常数问题是对当代物理学的一大挑战。

暗能量也可以是一种随时间变化的动力学的

能量. 最简单的是一个具有正则动能的标量场 Q , 在文献中它被称为“quintessence”(精质)^[7],直译为“第五元素”. 在古希腊哲学中,宇宙由水、火、土、空气及第五种元素组成. Quintessence 的势能形式一般写为 $V(Q)$,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 quintessence 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 quintessence 场对时间的导数. 如果势能函数是非常平坦的话,quintessence 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(或真空能)和 quintessence 场作一比较. 在 quintessence 模型中,暗能量随时间而变,不光能量密度 ρ_Q ,且状态方程 $w = p_Q/\rho_Q$ 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 . 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_v 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_v/ρ_m 才能给出今天的 ρ_v/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,这个问题也叫作一致性问题(coincidence problem). 在 quintessence 模型中,由于暗能量随宇宙演化而改变,这一问题有可能得到解决。

另外,由于 quintessence 是一种动力学场,它将带来一系列有趣的物理现象. 例如,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. 这种“常数”不“常”的物理现象一旦被证实,也将是一个重大发现。

除了 quintessence 外,近年人们还研究了 K-essence, tachyon 和 phantom 等暗能量模型,这些都是基于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直接或间接地证实希格斯粒子、暴涨子和 quintessence 的存在。

理论研究暗能量模型并从观测(例如 WMAP、SDSS、SN、Planck 以及我国正在设计制造的 LAMOST 望远镜等)上确定其状态方程是当今宇宙学研究的一个焦点。表征暗能量模型的一个重要量是状态方程 $w = p/\rho$, 比如,对于宇宙学常数(或真空能)它是 -1 ; 对于 quintessence 模型,它介于 $+1$ 和 -1 之间;对于 phantom 模型,它小于 -1 。由此用天文观测数据对 w 进行限制对于暗能量的研究是至关重要的。在文献中,常用的 w 的参数化包括 $w(z) = w_0 + w_1 z$ 或 $w(z) = w_0 + w_a z/(1+z)$ 。最近利用 SN 数据分析结果显示,宇宙学常数 $w = -1$ 可以解释观测结果,但有迹象表明 w 可能随着红移 Z 增加由小于 -1 到大于 -1 。为此,我们提出了一类新的暗能量模型,叫做 quintom^[8]。然而要确定暗能量是否是动力学的需要进一步更精确的观测数据。

暗能量的本质决定着宇宙的命运。如果加速膨胀是由真空能(即宇宙学常数)引起的,那么宇宙将永远延续这种加速膨胀的状态。宇宙中的物质和能量将变得越来越稀薄,星系之间互相远离的速度将变得非常快,新的结构不可能再形成。如果导致当今宇宙加速膨胀的暗能量是 quintessence,那么宇宙的未来将由 quintessence 场的动力学决定,有可能会永

远加速膨胀下去,也有可能重新进入减速膨胀的状态,甚至可能收缩。然而目前已知的理论都不能自然地解释暗能量,而且存在着灾难性的宇宙学常数问题。解决这一问题需要新的理论,这样的理论一旦被找到,很可能是人们长期追求的包括引力在内的各种相互作用统一的量子理论。这将是一场重大的物理学革命。

参 考 文 献

- [1] Spergel D N, Steinhardt P J. Phys. Rev. Lett., 2000, 84 : 3760
- [2] Lin W B, Huang D H, Zhang X M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86 : 954; Zhang X M. Plenary talk at Cosmo - 99, ICTP. Italy. Ed. Cotti U *et al.* The proceedings of the third International Workshop on Particle Physics and the Early Universe, Cosmo - 99. 222
- [3] Jonathan L. Feng, Arvind Rajaraman, Fumihiro Takayama. Phys. Rev. Lett., 2003, 91 : 011302
- [4] Bi X J, Li M Z, Zhang X M. Phys. Rev. D, 2004, 69 : 123521
- [5] Turner M. astro - ph/0108103
- [6] Zhang X M. Plenary talk at 12th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY 04), Tsukuba, Japan, 17 - 23 Jun 2004. e - Print Archive : hep - ph/0410292
- [7] Ratra B, Peebles P J E. Phys. Rev. D, 1988, 37 : 3406; Wetterich C. Nucl. Phys. B, 1988, 302 : 668; Steinhardt P, Wang L, Zlatev I. Phys. Rev. D, 1999, 59 : 123504
- [8] Feng B, Wang X L, Zhang X M. astro - ph/0404224; Feng B, Li M Z, Piao Y S, Zhang X M, astro - ph/0407432; Guo Z K, Piao Y S, Zhang X M, Zhang Y Z. astro - ph/0410654; Xia J Q, Feng B, Zhang X M. astro - ph/0411501

· 物理新闻和动态 ·

美国研究致痛武器

美国军方在拨款研制一种武器用以对付暴乱者。这种武器可以在 2km 以外使受打击者感受到极大疼痛,而又不使他们受到伤害。但是研究疼痛的人员对于为控制疼痛开展的研究工作被用于研制武器感到愤怒。他们担心这种技术会被用于刑讯。

美国海军研究办事处(Office of NAVAL Research)和在 Gainesville 的 Florida 大学签署了一项研究合同,其标题为《激光引起的等离子体发射的电磁脉冲的感官后果》。这份文件涉及所谓的脉冲能量炮弹(PEPs),这种武器能发射出激光脉冲,当激光脉冲冲击中某种固体(比如人)的时候会产生爆胀的等离子体(New Scientist, 12 October 2002, 42)。预定于 2007 年投入使用的这种武器,将使暴乱者完全不能控制自己。

根据美国海军研究委员会的一份关于非致命武器 2003 年评论,在动物试验中已证明,脉冲能量炮弹能产生“疼痛和暂时的瘫痪”。这看来是由于膨胀的等离子体产生的电磁脉冲在神经元中触发了神经脉冲所致。这一项要进行到 2005 年 7 月份的新的研究,将与 Orlando 的 Central Florida 大学的研究人员一起完成,研究的目的是优化这种效应,解决如何产生既能触发疼痛神经元而又不损坏细胞组织的脉冲。

这份研究合同在公开之前进行了严格的审查。合同要求研究人员寻求最佳的脉冲参数,以便能最大限度地激活伤害感受器,换言之,能引起尽可能剧烈的疼痛。对于实验室培植的细胞进行的研究将确定在不引起伤害和死亡的情况下,可以使某个人经受疼痛的剧烈程度。

College London 大学的一位临床心理学家 Amanda Williams 担心受害者会冒有受到长期损害的危险。她说:“想象的非破坏性刺激可能改变神经系统的功能,从而导致长期的持续疼痛。”

(树华 编译自 New Scientist Magazine, No. 2489 5 March 2005 8)