

COBE：宇宙学的一块里程碑 ——2006 年诺贝尔物理学奖解读

COBE, A Milestone in Cosmology: Comments on Nobel Prize in Physics 2006

俞允强/YU Yun-qiang

北京大学物理学院, 北京 100871

Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

[摘要] 瑞典皇家科学院将 2006 年诺贝尔物理学奖授予美国科学家约翰·马瑟和乔治·斯穆特, 以表彰他们发现了宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性。扼要地阐述了 COBE 的两个重要成果的物理含义。

[关键词] 宇宙学; 宇宙背景辐射; 宇宙背景探测者

[中图分类号] P159

[文献标识码] C

[文章编号] 1000-7857(2006)12-0012-03

Abstract: The Nobel Prize in Physics for 2006 was awarded by The Royal Swedish Academy of Sciences to John Mather and George Smoot for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation. The physical implications of COBE's achievement are briefly expounded.

Key Words: cosmology; cosmic background radiation; COBE

CLC Number: P159

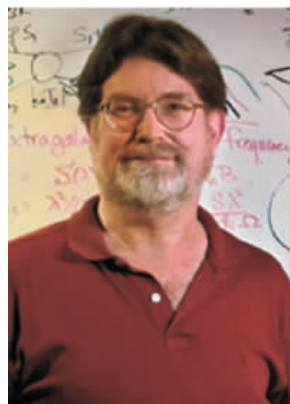
Document Code: C

Article ID: 1000-7857(2006)12-0012-03

COBE 的全称是 Cosmic Background Explorer, 意思是宇宙背景探测者。2006 年 Nobel 物理奖授予了它的主要研究者——美国科学家 J. Mather 和 G. Smoot, 使宇宙学又一次引起了大众的关注。



J. Mather 博士



G. Smoot 博士

图 1 2006 年诺贝尔物理学奖获得者

宇宙背景辐射的观测研究已两次被授予诺贝尔奖了。这个不算很大的研究领域确实是宇宙学甚至物理学的一个亮点。在 50 多年里, 这里已立起了 4 块里程碑。照这样说, COBE 是第三块里程碑。它对大爆炸宇宙学的确起了决定性的作用, 并对物理学也产生了深刻的影响。

1 Gamow 立起第一块里程碑

1950 年前后, Gamow 第一个把宇宙膨胀的动力学延用到宇宙的早期, 提出了宇宙演化的思想^[1]。宇宙在膨胀, 但早期宇宙并不是今天宇宙的缩影。那么, 今天宇宙的面貌为什么如天文学家所看到的那样? 这是物理学应当回答, 并应当能够回答的问题。Gamow 为物理学的基础研究开拓了一块新领域, 当然是了不起的贡献。

历史的发展常常带戏剧性。Gamow 提出他的今天看来既正确又重要的理论(现在称为大爆炸理论)后非但没有受到欢迎, 反而被欧洲学术界斥之为伪科学。直接原因是这样: 当时 Hubble 定出宇宙膨胀率为 $500 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 按宇宙动力学, 由此推出宇宙年龄为 20 亿年。这比当时已经估出的地球年龄(46 亿年)还小, 完全不可能正确。Friedmann 的宇宙动力学^[2]假定了宇宙物质是均匀的, 这在当时完全没有观测上的根据。一个试探性理论, 其前提没有根据, 其推论又与事实不符, 人们拒绝接受是有道理的。但是, 把它斥之为伪科学是无论如何都过分了。背后的主要因素不是物理的, 而是哲理的。

按 Friedmann 的宇宙动力学, 宇宙年龄必定有限。这意味着宇宙必有“创生”。Gamow 实际上是在进一步探索这创生过程。于是它被认为是“科学在向神学献媚”。科学界给它戴上了伪科学的帽子。

从 Gamow 理论已得到充分证实的今天回头看, 这历史的启示实在是深刻的。物理学基础研究的生命在于猜想, 而猜想常要借助哲理。但是哲理与物理的是非标准并不完全一样。弄得不好, 哲理是能扼杀科学发展的。这是一把双刃剑, 我们务必十分谨慎地使用。

收稿日期: 2006-10-10

作者简介: 俞允强, 男, 北京大学物理学院, 教授, 主要研究方向为宇宙学; E-mail: yqyu@water.pku.edu.cn

2 Penzias 和 Wilson 立了第二块碑

宇宙学作为物理学的一个分支, 遵奉同样的信条: 只有被观测证实了的理论才是必须相信的。Gamow 的早期宇宙理论预言了背景辐射场的存在, 并预言它的温度在 10 K 以下。用观测来证实或证伪它十分关键。这在当时是有可能做得到的事, 可是没有人想这么做。在 10 几年后的 1965 年, Bell 电话公司的 Penzias 和 Wilson 偶然地发现了一个背景信号^[3]。他们完全不知道这信号是什么。Princeton 大学的 Dicke, Peebles 等研究宇宙学的人说, 它是宇宙学家正想寻找的、早期宇宙留下的遗迹^[4]。以此为契机, 宇宙学开始了它的复。

问题在于 Peebles 等人这么说, 大家会信吗, 必须信吗? 显然的回答是: 不! 这事件的作用仅是使很多人意识到 Gamow 的理论是值得认真对待的。此后几年里, 不同人在不同频率上作了探测。按理论, 在厘米波段上任何频率都应能找到, 而且与同一温度相对应。他们都成功了, 于是很有眼力的评奖委员会让最初的发现者 Penzias 和 Wilson 分享了 1978 年诺贝尔物理学奖。

说评奖委员会有眼力, 因为这些结果其实并不足以说明所发现的信号肯定就是早期宇宙的遗迹。事实上当时反对 Gamow 的人提出过别的设想, 也能够解释背景辐射的存在, 无可置疑地证实这背景辐射来自早期宇宙, 功劳是 COBE 的。

3 COBE 敲定了背景辐射是 Planck 谱

Gamow 的热大爆炸理论预言了背景辐射的存在, 观测又肯定地证实有背景辐射存在, 这已经很好。可是因为事情太重要了, 人们有理由问: 怎么进一步证明这两个背景辐射是一回事? 对此, 许多宇宙学研究者是抓到要点的。

按理论, 早期宇宙应是等温的火球, 因此它发出的辐射谱应高度地符合 Planck 的热辐射公式; 可是反之亦然。原因在于, 在宇宙物质已结团, 有了星系和恒星后, 宇宙整体已不处于高度热平衡的状态。也就是说, 只有一切恒星和星系形成之前的早期宇宙才是好的热辐射源。后来的宇宙已不存在严格意义的热辐射源了。

太阳不是热辐射源吗? 是的, 但严格说也不是。实测的太阳辐射谱偏离 Planck 公式很远。因为太阳辐射来自其光球层, 它是局地地热平衡的。光球内外的气体温度与光球本身都很不一样。这样, 这热平衡只能是粗略地近似, 其辐射谱只能粗略地与 Planck 公式相符。别的热辐射体有同样的问题。因此有理由说, 如发现背景辐射高度地与 Planck 公式相符, 那应是它来自早期火球的强烈证据。

这样想来, 用实测看清背景辐射谱是否高度符合 Planck 公式十分关键。认识到这一点的人很多, 但做起来很难。背景辐射的温度约 3 K, 其强度峰值在波长 2 mm 左右。地球大气对短波长的微波很不透明, 观测准确度很低。在 1980 年代, 有的观测结果显示在峰值附近偏离 Planck 公式很远, 因而又引起了对大爆炸模型的怀疑。COBE 就是在这样的情况下设计的 (见图 2)。

COBE 作为飞行高度达 900 km 的卫星, 躲开了大气的干扰, 这使它能可靠地通过测量做出判定。J. Mather 设计的远红外分光光度计 (FIRAS) 能在从 0.1~10 mm 的 30 几个频率上进行精确测量。1989 年 11 月升天后仅 9 min 就得到惊人的结果: 这背景辐射的频谱与 Planck 公式高度一致 (见图 3)^[5]。理论拟合定出温度为 2.735 K, 有 4 位有效数字, 反映了它与理论公式一致程度之高。

有了这样的结果, 人们意识到: 所测到的背景辐射是早期宇宙的遗迹, 早期宇宙是一个火球, 这两点都已经得到难以置疑的证实了。于是大爆炸理论完成了它的三部曲: 从被当作伪科学, 到值得认真对待, 到可靠得难以置疑。而最后的一锤是 COBE 敲定的。若 10 年前给它诺贝尔奖都不会让人感到意外。

4 宇宙结构的形成疑难

按大爆炸理论, 早期宇宙决不是今天宇宙的缩影, 而是全空间均匀的火球。另一方面天文家用实测弄清, 今天宇宙有层次性

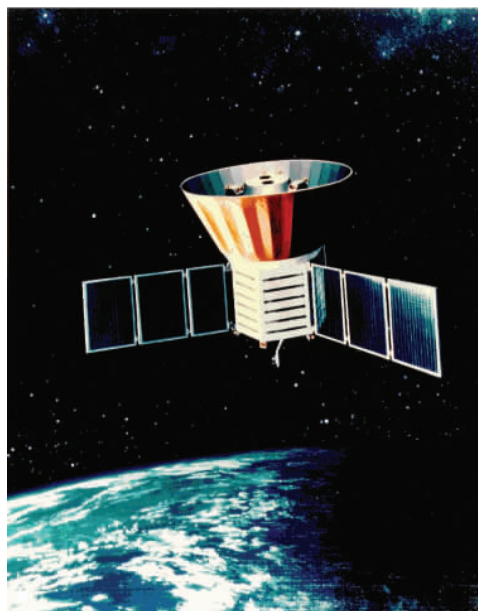


图 2 COBE 卫星

Fig. 2 COBE (Cosmic Background Explorer) satellite

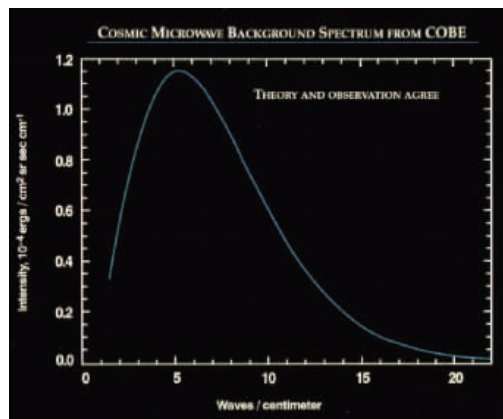


图 3 COBE 卫星测量的宇宙微波背景辐射谱形与理论预言的普朗克谱密合

Fig. 3 Cosmic microwave background spectrum from COBE perfectly agrees with the Planck form expected by the theory

的结构, 即恒星、星系、星系团和超团。于是大爆炸理论有责任回答: 这样的结构是如何演化出来的。在这很朴素的问题面前, 宇宙学又经历了一段戏剧性的历史。COBE 对此又起过很重要的作用。

人们早就清楚结构形成的定性机理: 均匀气体是自引力不稳定的, 微小起伏会因引力而变成大的起伏, 最终将发展成气体分块结团。这样看来, 在微波背景形成时, 宇宙气体应在高度均匀的基础上有微小的起伏, 这起伏是将来结构形成的“种子”。从 1970 年代初起, 人们就想在背景辐射上发现这起伏。在当时的观测精度下, 得到的是零结果, 即没有观测到起伏。于是推出: 温度的起伏 $\delta T/T < 1 \times 10^{-4}$ 。意思是说, 如果起伏比这上限大, 是应当观测到的。意外的是这很粗略的结果引出了灾难: 如果宇宙中未被观测到的暗物质也是由重子组成 (当时看来几乎当然如此), 那么宇宙背景上这么小的起伏是来不及在 100 亿年内分块结团的。可是今天大量星系已经形成却是铁定的事实。

在这种理论很清楚、观测也很肯定的情况下, 两方面的结果却有明显冲突是非常有意思的局面。那常常意味着有某个被当作

常识的观念出了差错。一旦这种差错得到纠正,它常会给物理学带来新的生长点。

5 宇宙以非重子为主观念的由来

1980 年一位苏联人 Liubimov 发现,中微子的静质量约达 30 eV。这结果与当时粒子物理实验定出的上限是尖锐冲突的。几年后人们就清楚了:这不是新发现而是一个错误。戏剧性的是,这错误却对宇宙学做出了重要贡献。

宇宙学家知道,宇宙中弥漫着背景中微子。其粒子数密度约为每立方厘米 100 个。若每个中微子有 30 eV 的静质量,那么一估即知,中微子是宇宙密度中占绝对优势的主要贡献者,重子物质只在总密度中占很小一部分。要是事实是这样,人们用模型计算发现,气体结团所需的时间会缩短 1~2 量级。结构形成的时间疑难也许就没有了。

这当然是好消息,但“中微子有那么大的静质量”为错误的消息也几乎是同时出来的。结构形成的研究者没有放弃,锲而不舍地继续往前走。他们发现不一定要靠中微子。只要宇宙以非重子为主,星系就可能来得及形成。基于星系“必须”在理论上来得及形成,研究者心里产生一种信念:宇宙应当确是非重子为主的。此后很细致的模型研究没有中断过。可是除专业研究者外的人多数不相信这个观念。一位国际上很有名的天文学家在 1980 年代后期还说过:“这是物理学家在随意地玩弄宇宙学。”从常识看,非重子为主的观念的确有些“另类”。

回到背景辐射问题上来。1980 年代的观测精度提高了。可是背景辐射各向异性的测量仍是零结果。于是温度不均匀程度的上限提高到了 $\delta T/T < 1 \times 10^{-5}$ 。当时的模型研究表明,即使宇宙以非重子为主,背景辐射上应观测到 $\delta T/T > 1 \times 10^{-6}$,否则星系还是来不及形成的。事实与愿望的关系进入了临界,于是气氛有点紧张。各种思想都很活跃。有人开始想新招,有人认为再一次否定大爆炸理论的机会来了。在这关键时刻,又是 COBE 一锤定音。

6 COBE 第一个发现了星系形成的种子

COBE 是一个多目标的科学探测卫星。它的另一重要目标是在 10^{-6} 的水平上探测微波背景的各向异性程度。这对结构形成问题是重要探索,对非重子为主的观念是尖锐考验。

这个非常困难的任务由 Smoot 负责的较差微波辐射计(DMR)承担。到 1992 年,他们才把浩瀚的观测数据的统计结果算了出来^[6]。扣除各种应扣的干扰因素,公布出微波背景上的温度不均匀度为 $\delta T/T = 5 \times 10^{-6}$,出奇地理想(见图 4)! 于是各种怀疑逐渐平息了下来。COBE 又一次帮宇宙学度过了一个必须过的难关。我想强调,这结果也暗示了宇宙以非重子为主的观念很可能

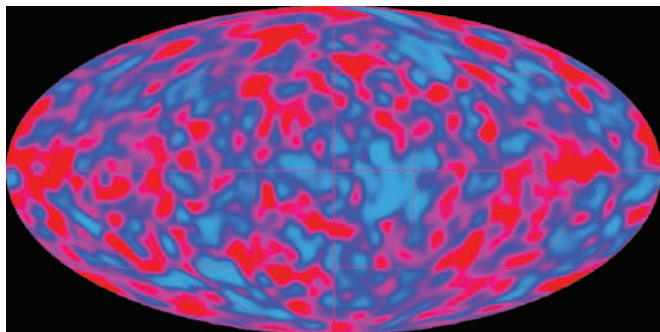


图 4 COBE 卫星测得宇宙微波背景温度随方向的起伏($\delta T/T = 5 \times 10^{-6}$),这种微小起伏是形成今天星系和恒星的种子

Fig. 4 COBE measured the temperature fluctuations of CMB in different directions($\delta T/T = 5 \times 10^{-6}$), which are seeds forming galaxies and stars nowadays

是事实。它当然是既对宇宙学又对物理学都极有价值的成果^[7]。

7 后 COBE 时期的进展及结论

COBE 之后,进一步证实大爆炸理论的可靠性已不太重要了。微波背景观测研究在继续,目标主要是想从观测中攫取更多早期宇宙的信息。2001 年发射的另一观测卫星 WMAP(威尔金森微波各向异性探测器)的成果很轰动。它主要是在大得多的分辨率和高得多的精度上重新观测了微波背景的各向异性。其结果堪称 COBE 后的又一块里程碑。具体谈论它是越出本文范围的事,但是与“非重子为主”有关的要点还是值得一提的。

关于宇宙实物以非重子为主的问题,上面已讲了很多,但是从物理讲是非,再有道理的猜想也只是猜想,只有被观测肯定了的才是真的。现在终于由 WMAP 说出:宇宙实物中重子物质只占 1/6 左右,非重子物质占 5/6 左右。它无疑是 COBE 后的实质性进展。

非重子是什么,开始成了现实问题。天文学家对此尚无可奉告。这是粒子物理学家该回答的问题。WMAP 的结果意味着:一定存在尚未被观测到的、稳定的、弱作用的中性粒子。粒子物理学家对此决不会惊讶,但原来对他们也只是猜想。重要的是现在观测说:这是真的。要回答它是什么,还有漫长的路要走。

另一个重要的问题是真空能密度是否为零。“WMAP 测到了真空能密度”不是确切的说法。肯定的是,它测到了近期宇宙在加速膨胀(而不是减速),因此一定有产生斥性引力(作者注:讲斥性引力,总觉得语言上很尴尬。中文把 attractive force 和 gravity 都叫引力。斥性引力这术语的实际意思是 repulsive gravity。尴尬纯粹是语言上的。)的物质存在,其密度在总密度中约占 70%。它才是非重子物质的最主要的组分。斥性引力源(作者注:现在常有人把这斥性引力源叫暗能量,以与暗物质相区分。它不是好的名称。有能量就一定有质量。这样暗能量和暗物质没有界线。两者的实际差别在于其 gravity 是吸引的还是排斥的,而不在于它是能量还是物质。千万不要顾名思义。)是什么?不清楚。真空是能扮演这角色的,但反之则不一定。存在一种另类物质(作者注:除真空外,一切已知物质都只产生 attractive gravity,所以理论上想出来的、会产生斥性引力的物质难免会是非常规的。)在产生这一效果是完全可能的。近年这方面的试探研究很多。到底实际上是什么,这不是争论的问题,而是要由将来的新观测来回答的。

无法预料将来的实验会说什么。可是,不管斥性引力的源是真空或不是真空,它对物理学都将很重要。这重要性是需要有专文才讲得清的。简而言之,它很可能都需要物理学改变某种被当作常识的东西,例如何谓真空。这种影响当然是深刻的。

WMAP 的意义远不仅如此,我们无意全面谈论它。这里只想讲 COBE。它的前一成果终结了一个时代——大爆炸理论可以被怀疑的时代。这当然了不起。但是同时还有另一成果也了不起。它开启了一个时代,让宇宙研究从依靠物理学转向了影响物理学。这是宇宙学走向成熟的标志。前后两个成果都是里程碑式的。

参考文献 (References)

- [1] GAMOW G. The evolution of the universe [J]. Nature, 1948, 162: 680.
- [2] FRIEDMANN A. Über die Krümmung des Raumes [J]. Z. Phys, 1922, 10: 377.
- [3] PENZIAS A A, WILSON R W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s [J]. Astrophys. J (Letters), 1965, 142: 419.
- [4] DICKE R H, et al. Cosmic-black-body radiation [J]. Astrophys. J (Letters), 1965, 142: 414.
- [5] MATHER J C, et al. A preliminary measurement of cosmic microwave background spectrum by the cosmic Background Explorer (COBE) satellite [J]. Astrophys. J (Letters), 1990, 354: 37.
- [6] SMOOT G, et al. Structure in the COBE differential microwave radiometer first year maps [J]. Astrophys. J (Letters), 1992, 396: 1.
- [7] 俞允强. 热大爆炸宇宙学[M]. 北京大学出版社, 2001.

(责任编辑 胡春华)