

充满宇宙的暗能量和加速膨胀的宇宙

高崇寿

(北京大学物理学院 100871)

古代的天地概念可视作一种有限范围的宇宙理论，并受到人的视野的限制，尽管有许多人猜测，宇宙是无限的。直到16世纪中叶，哥白尼才提出新的以太阳为中心的宇宙观，并且经过近一个半世纪的发展才形成了一种科学的宇宙理论。

内物质之间的相互作用，进而制约着宇宙中物质的运动，及其演变的过程。

现代宇宙学是在广义相对论的基础上发展起来的，广义相对论方程也就是宇宙方程，它描写了宇宙中物质的发展和演化，它的大致的发展历程如表1。

1. 现代宇宙学发展进程

众所周知，我们周围的极其广大的空间中充满了物质，物质和物质之间有相互作用，物质通过这些相互作用而运动，这就是宇宙。

1915年，爱因斯坦建成了20世纪最重要的理论之一——广义相对论，即引力的精确且普遍的理论。引力是物质普遍具有的长程相互作用，并决定着宇宙

表1 现代宇宙论的发展历程

广义相对论	(Einstein, 1915)
静态宇宙论模型	(Einstein, 1917)
动态宇宙论模型	(Friedmann, 1922)
宇宙大爆炸起源说	(Lemaître, 1927)
发现河外星系光谱红移	(Hubble, 1929)
大爆炸元素合成说	(Gamow, 1949)
发现宇宙微波背景辐射	(Penzias, Wilson, 1965)
时空奇点定理	(Hawking, Penrose, 1970)
宇宙暴胀说	(Guth, 1981)
宇宙学基本参量精密测定	(1995~2000)

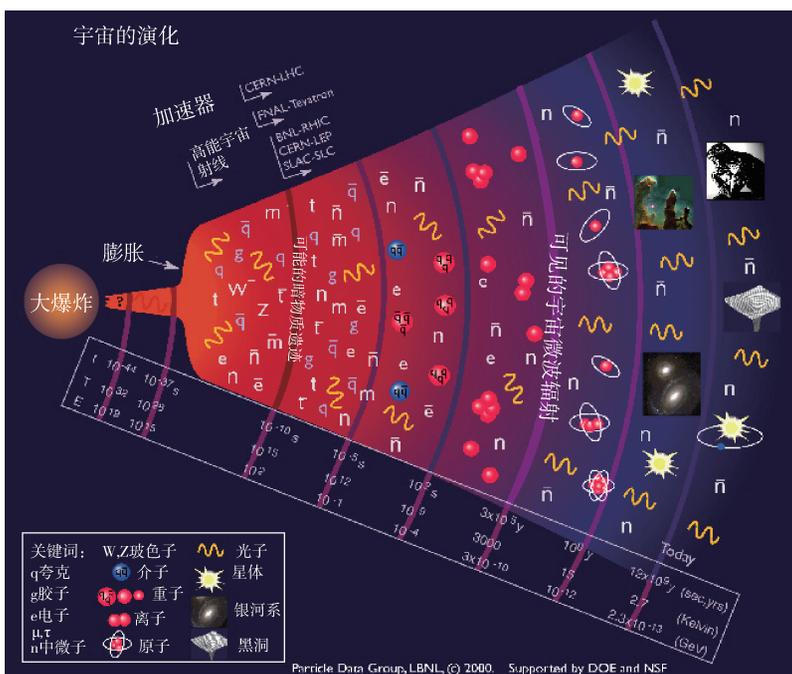


图1 宇宙演化

今日宇宙来自于早先的“大爆炸”，这是 138 亿年以前的一次大爆炸，以及随之而来的漫长的自然演化。作为宇宙的起始，大爆炸发生于一个极小区域，但却在这个很小的体积内集中了宇宙中的全部物质，因此质量密度极大；相应地能量密度也很大，且宇宙的温度极高，演化非常快。在宇宙的体积极其迅速膨胀之同时，这个宇宙的能量密度迅速下降，温度随之迅速下降。

在大爆炸开始后的 10^{-8} 秒以内，宇宙温度仍然很高，体积极小，密度极大，演化非常快。这段时间宇宙中的物质以什么形式存在还不清楚。但大体上可以说，在 10^{-10} 秒以前，宇宙以夸克物质形态为主，即以密集的夸克胶子等离子体形式存在。 10^{-10} 秒时宇宙的平均温度大约为 10^{15} K。

当温度降到一定范围时，出现了夸克、轻子、胶子和其他规范粒子，形成极高温度的夸克和胶子等离子体。这时的宇宙中的物质是以夸克和胶子等离子体的形式存在。这种“夸克和胶子等离子体”像是一种气体，通常的气体的组元是分子。夸克胶子等离子体的组元是各种夸克、反夸克、轻子、反轻子，以及各种相互作用的媒介粒子（如光子、胶子、W 粒子和 Z 粒子等）。

当宇宙的体积继续膨胀，且温度继续降低后，夸克、反夸克又结合成各种介子和重子，形成强子物质，这个温度大约在 2×10^{12} K 左右。强子物质的组元是各种介子、重子和反重子。质子和中子的形成大约开始于大爆炸后 0.01 秒的时刻。

所有这些演化的过程都发生在宇宙大爆炸后的第 1 秒内。大爆炸后的 1 秒钟时宇宙的平均温度大约为 10^{10} K。当温度继续降低，到大约 180 秒（即 3 分钟）时，质子和中子开始结合成比较重的原子核，首先是形成氦核。这时宇宙的平均温度大约为 10^9 K。

此后，宇宙仍继续膨胀，温度也继续降低，到 380000 年时，一步步地出现了各种原子、分子。这时温度降到了大约 6000 K。从大的范围来说，已经开始形成星体，并出现星云系。

在温度降到 3000 K 时，光子退耦合，不再和别的粒子相互作用，独立在宇宙中传播。这些光子的分

布反映了当时的宇宙温度。但由于这些光子是在 138 亿年以前从红移为 1100 处发来的，由于多普勒效应，现在显现为温度 $T = 3000 / 1101 = 2.725$ K 的宇宙微波背景辐射。

10^9 年时宇宙的平均温度降低到大约为 -255°C ，并逐步演化到现在的世界；从 10^9 年到 1.20×10^{10} 年，地球上出现分子形式的生命。

现在宇宙的温度可以从微波背景辐射的温度得到，即绝对温度 (2.725 ± 0.001) K。

2. 大爆炸与现今的宇宙

1948 年，美籍苏联物理学家伽莫夫 (G. Gamow) 提出热大爆炸宇宙学说，从理论上预言，起源于大爆炸的辐射冷却到现在仍有约 25K 的黑体辐射谱。1964 年，美国天体物理学家狄克等人作了少许的修正，并预言，这种背景辐射至今仍约有 10K 以下的温度。1964~1965 年，美国贝尔实验室物理学家彭齐亚斯 (A. Penzias) 和威尔逊 (R. Wilson) 发现，在太空中总有一些各向同性的不能消除的微波噪声，称为微波背景辐射。微波背景辐射相当于一定温度的热辐射，反映了宇宙演化的温度进程。微波背景辐射的发现和确立是对大爆炸宇宙论的重要支持和印证，对现代宇宙学的发展有重要的影响。彭齐亚斯和威尔逊两人由于这项重大发现获 1978 年诺贝尔物理奖。

总结起来，对今日宇宙的认识，可得到这样的一些知识：

(1) 宇宙的年龄

从大爆炸起到现在宇宙的年龄大约为

$$t_0 \approx (1.2 \sim 1.8) \times 10^{10} \text{ 年,}$$

更精确的估计

$$t_0 \approx 1.37 \times 10^{10} \text{ 年, 误差 } 1\%.$$

(2) 可观测宇宙的半径

$$R_0 \approx (1.16 \sim 1.74) \times 10^{26} \text{ m.}$$

(3) 可观测宇宙体积的量级

$$V_0 \approx (6.49 \sim 21.89) \times 10^{78} \text{ m}^3.$$

(4) 宇宙中的“明亮物质”

明亮物质是可以发出和吸收电磁辐射（包括一切波段的电磁波：长波、中波、短波、微波、红外线、

可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等），从而可以利用电磁波观测明亮物质。因此明亮物质可以是质子、原子核、电子等，又被统称为重子物质。这样，宇宙中明亮物质总量相当于质子数目为

$$N_{B0} \approx (1.18 \sim 4.00) \times 10^{78}.$$

早在 20 世纪 30 年代，英国物理学家和天文学家爱丁顿曾估计为

$$N_{B0} \approx 10^{79}.$$

这两个数值只相差了一个数量级，仔细考察后可发现，估计的方法是一致的，差别来源于许多观测数据的发展和更新。

3. 哈勃定律与广义相对论方程

1929 年，美国天文学家哈勃 (E. Hubble) 发现，河外星系光谱的红移大体上随星系与我们的距离的增加而增加。光谱的红移来自多普勒效应：

$$v_{\text{obs}} = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} v_0, \quad \lambda_{\text{obs}} = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \lambda_0,$$

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1 \approx \frac{v}{c} + \frac{v^2}{2c^2} + \dots \quad (\text{如果 } v \ll c).$$

大体上，河外星系的“后退速度”与红移成正比。

哈勃定律可以表为：

$$v = H_0 R,$$

其中 v 是星系的后退速度， R 是星系到地球的距离， H_0 称为哈勃常量，现在确定的数值为

$$H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}.$$

哈勃定律在很大范围内成立，说明现在我们所在的宇宙正在持续膨胀着。宇宙从 138 亿年前的大爆炸开始，除了在早期可能有爆胀外，一直在不断地膨胀着，直到现在。但是，作为宇宙演化的模式，存在着三种可能性（如图 2 所示），即减速膨胀宇宙、匀速膨胀宇宙和加速膨胀宇宙。

说明宇宙中物质之间普遍存在的引力相互作用的方程是广义相对论方程，因此广义相对论方程可用于描写宇宙的结构和演化。普遍的广义相对论方程可写作

$$R_{\mu\nu} + 0.5 R g_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu},$$

在方程中存在两个基本的参量，一个是牛顿引力常量 G_N ，一个是宇宙常量 Λ 。它们都是基本的、普适的常量。它们决定着物质的相互作用和运动。

广义相对论方程也是描写宇宙结构和演化的方程，可以从广义相对论方程的解来推测现实的宇宙是哪种类型的宇宙。

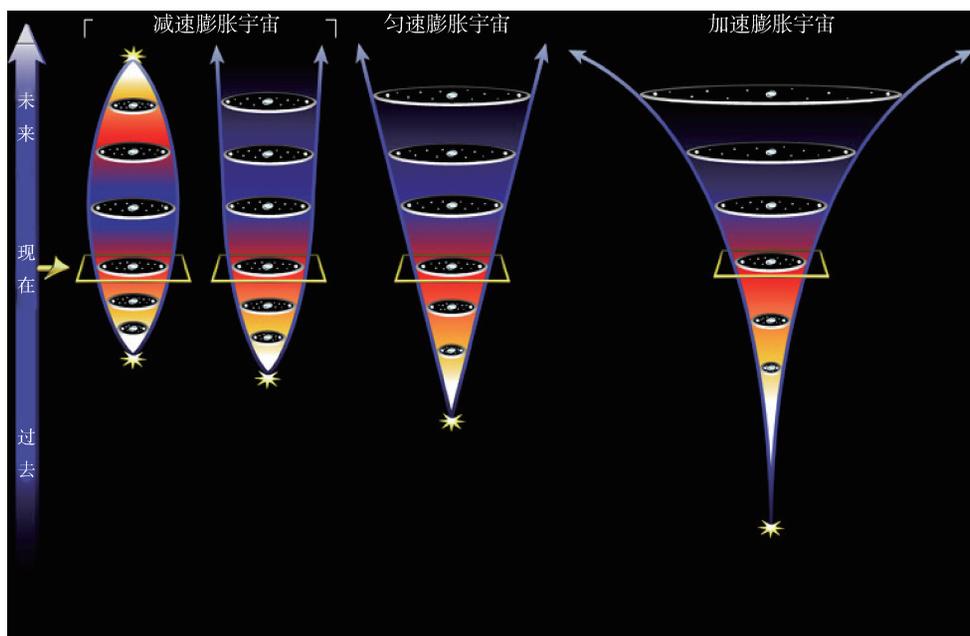


图 2 膨胀宇宙的三种可能的模型

自从1975年以来，对哈勃常数的测量已超过了300次，所得的值大体集中在 $50\sim 100\text{ km s}^{-1}\text{ Mpc}^{-1}$ 范围内。一般可以写作

$$H_0 = 71^{+4}_{-3}\text{ km s}^{-1}\text{ Mpc}^{-1},$$

或写作 $H_0 = (70 \pm 5)\text{ km s}^{-1}\text{ Mpc}^{-1}$ 。

这可在图3中呈现出，即位于两条虚线之间的数值。

在图4中，可以显示宇宙的发展和演化，横轴表示时间的演化

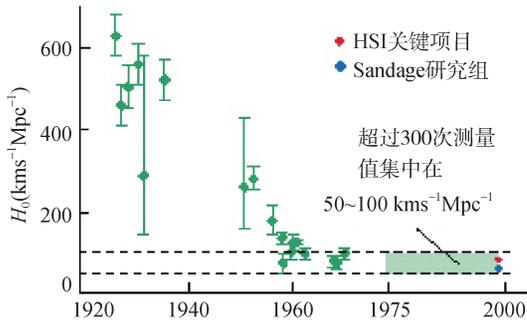


图3 哈勃常数的测量值

的时间要早得多；宇宙大爆炸产生了38万年时，发出了最初的光线，也可以说是最老的光；到2亿年时，开始有了星的点火。宇宙（大爆炸）产生后38万年到2亿年时，是宇宙的黑暗时代；到10亿年时，形成了第一批星的点火，持续发出最老的光。

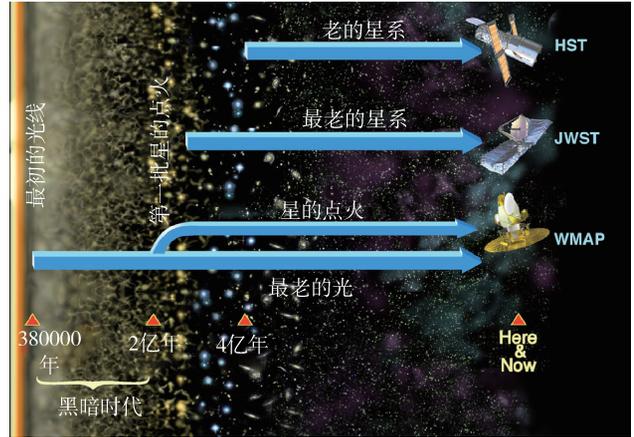


图4 宇宙的发展和演化（横轴表示时间的演化）

示时间的演化。最上面显示的是老的星系的产生和演化，在下面的是最老的星系的产生和演化，它们产生

4. 用标准蜡烛测量宇宙的历史和未来（哈勃（红移）定律）

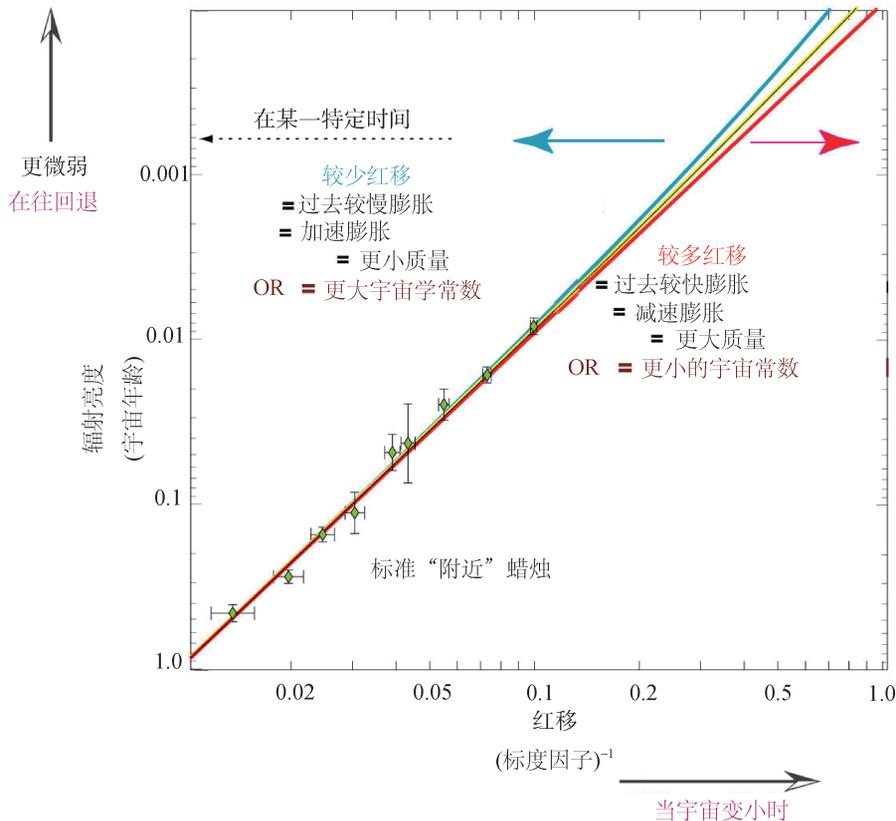


图5 用超新星作为标准蜡烛来研究宇宙加速膨胀

观察远方星云，一些科学家尤其注重观测其中的 Ia 型超新星。根据 Ia 型超新星的亮度变化可推算它们到地球的距离，再根据它们的红移量来检验对哈勃关系式的偏离，从而给出宇宙是否加速膨胀（或减速

膨胀，如图 6 和图 7 所示）的判断。有两个研究组进行持续的观测和研究，他们是 Supernova Cosmology Project 和 Hi-Z Team，正是这两个小组发现了加速宇宙的证据（如图 6 和图 7 所示）。

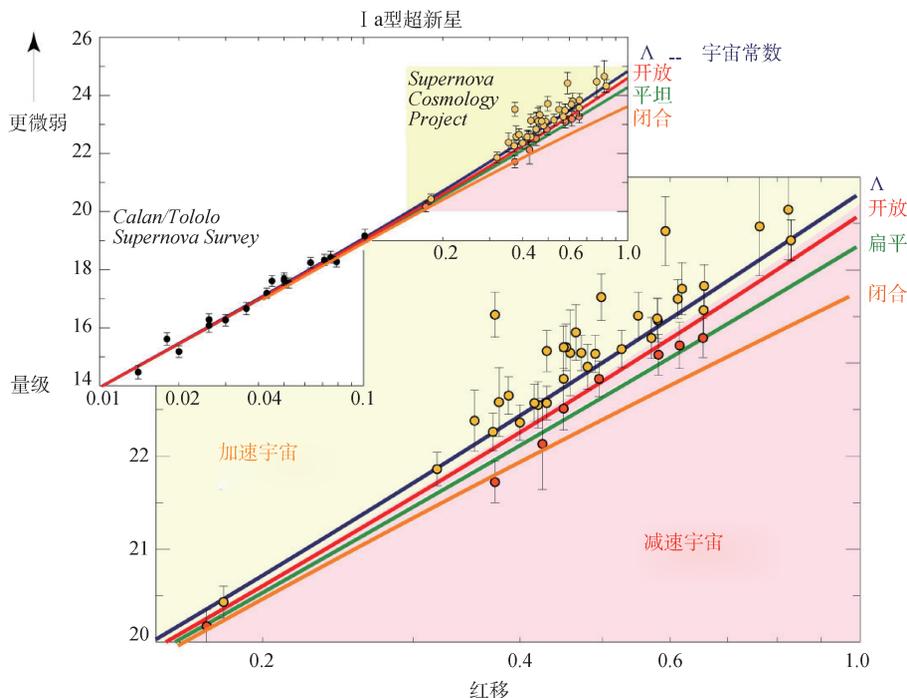


图 6

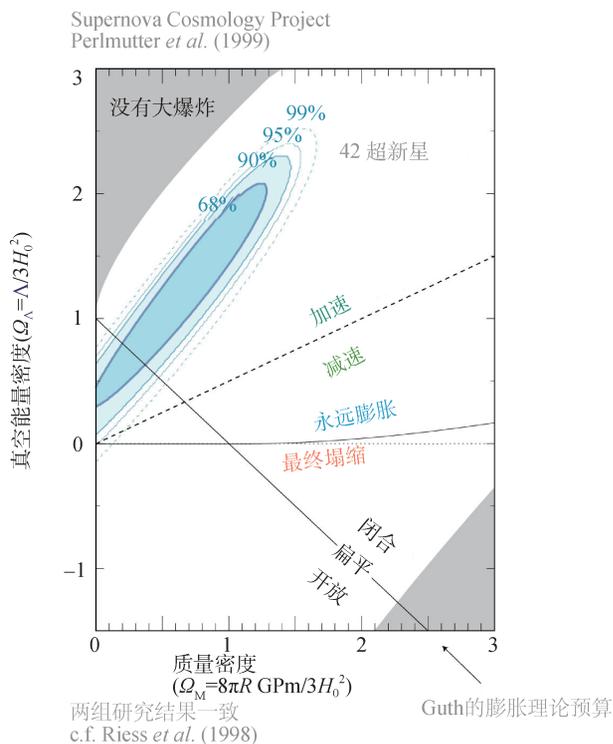


图 7

从图 7 可以看出，超新星观测给出的允许范围如曲线所画。对于加速区（横轴是质量密度，纵轴是真空能量密度），斜线是宇宙暴胀理论预言的平坦宇宙区，下面是开放宇宙区，上面是闭合宇宙区。斜点线之上是加速区，斜点线之下是减速区。

对于减速区，对应三种情况，即闭合宇宙、平坦宇宙、开放宇宙。

5. 宇宙微波背景辐射温度的测定

1989 年发射的宇宙背景探测器卫星（简称 COBE），其主要任务之一是确定微波背景辐射谱。测得微波背景辐射谱（图 8）很好地与普朗克谱（也称为黑体辐射谱，见图 9）的预言符合。现在由此定出的宇宙微波背景辐射的温度为 2.725 ± 0.001 K。

2002 年发射的 MAP 观测卫星，以更高的精度对宇宙微波背景辐射谱进行观测。

宇宙微波背景辐射是宇宙演化的产物，在大爆炸后 38 万年时温度下降到 3000 K 左右，光子退耦合后

不再发生碰撞，并持续地在宇宙中传播。空间各方向来的宇宙微波背景辐射反映出该方向在大爆炸后光子退耦合时的温度，这应该是各个方向都是相同的。从实际观测到的数据可显示，温度分布有偶极型的变化。这是来自地球相对于宇宙微波背景辐射“静止参考系”运动的多普勒效应。由宇宙微波背景辐射的精确测量，定出太阳相对于宇宙微波背景辐射参考系的速度为：

$$v_{\text{earth}} = 371 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}.$$

若考虑到太阳系在银河系中绕银河系中心的转动速度为 220 km s^{-1} ，还可进一步定出银河系相对于宇宙微波背景辐射参考系的速度为：

$$v_{\text{earth}} = 627 \pm 22 \text{ km s}^{-1}.$$

由于宇宙在膨胀，现在观察到的这些光子是来自远方发出的光子，上面提到，若接收点的距离可用红移表示为 $z=1100$ 。这是多普勒效应的反映，现在观察到的这些光子所体现的温度应该是：

$$T = \frac{3000 \text{ K}}{1101} = 2.725 \text{ K}.$$

这与现在的观测结果符合得很好。

由此可见，为了描述宇宙的运动情况，尽管从微波背景辐射看，它的各向同性达到了很高的程度，但更加精确的观测值表明，宇宙背景的温度分布尚存在微小的非各向同性。进一步的分析后发现，这是太阳系以速度 $v = (370.8 \pm 0.5) \text{ km/s}$ 运动造成的。这个速度是相对于一个特殊的参考系的，在这个特殊的惯性参考系中微波背景辐射的温度分布仍是完全各向同性的。

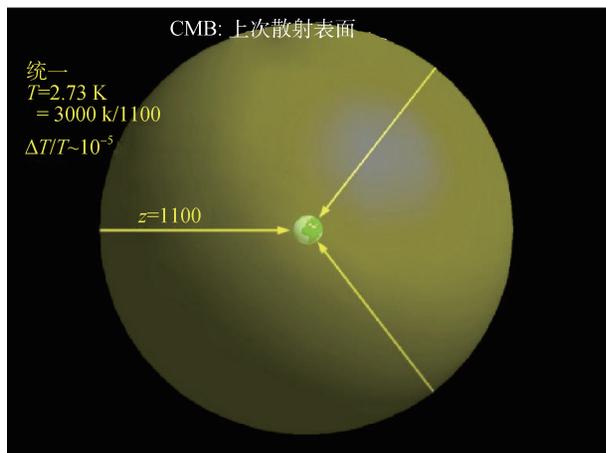


图 8 宇宙微波背景辐射的温度

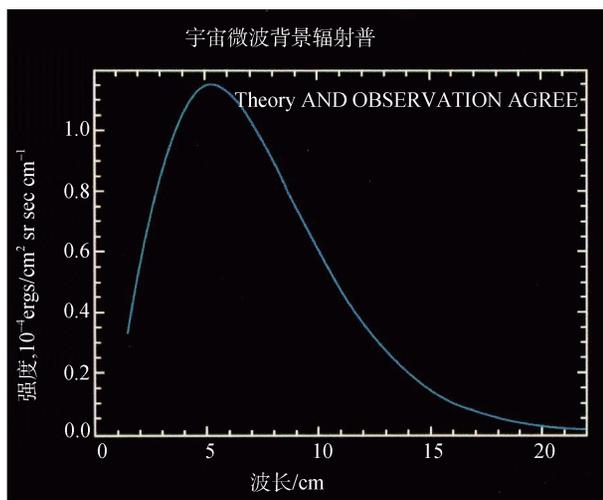


图 9 普朗克谱，也称为黑体辐射谱

这说明，通过微波背景辐射可以定出一个特殊的惯性参考系，这个惯性参考系是从宇宙演化过程中形成的，可以在这个特殊的惯性参考系中研究所有的物理问题。所以，这个惯性参考系常常被简单地称为微波背景辐射参考系。

由于宇宙物质的构成（如图 10 所示），各种明亮物质的比例是重元素为 0.03%，中微子为 0.3%，星体物质为 0.5%，氢和氦为 4%，可见重子物质中绝大部分是自由的氢和氦，其他的物质和能量均为不可视的。

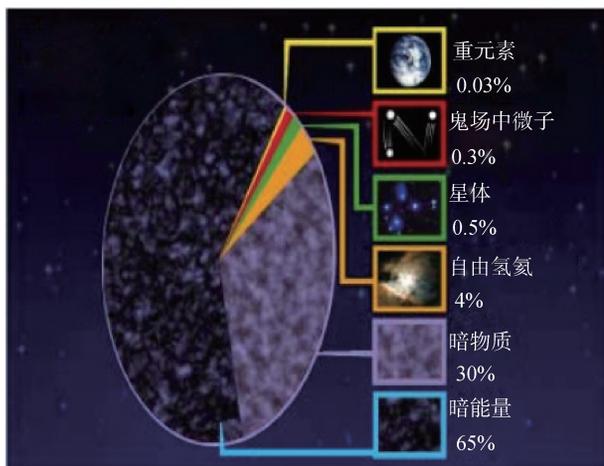


图 10 宇宙的物质构成

这样看来，从精确测量的宇宙微波背景辐射看，在所得到的数据中，重子物质的绝大部分是自由的氢和氦，这支持了宇宙平坦的观点；而极远的星系的后退速度偏离哈勃关系的要求，反映出宇宙仍然在加速膨胀。由于



图 11

这种加速过程难以从现有的理论得到说明，可能的原因是宇宙常量大于零，由此推论，宇宙中充满了暗能量。

简单地写出来，宇宙中物质的构成大致是：暗能量——占 68.3%，暗物质——占 26.8%，重子物质——占 4.9%。

6. 充满宇宙的暗能量

从宇宙学方程中的宇宙常量 Λ_0 的物理效应看：

(1) 所有空间中都存在固有的“暗能量”，它的密度正比于 Λ ，是全宇宙统一的。这种“暗能量”是固定在空间体积上的，因此不能稀释，也不能设法浓聚。

(2) 暗能量对其他物质的相互作用表现为一种“万有斥力”。在宇宙演化早期，宇宙体积小，万有斥力不显出明显的效应，现在在大尺度距离会显现效应：远方星系的“后退速度”已经离开哈勃定律的线性估计。

(3) 可以通过现在的观测结果，估计宇宙常数

Λ 的值，估计出当今观测到宇宙中真空物质的总量。随着宇宙的膨胀，暗能量的总量是在不断地增加的。但宇宙中其他物质：重子物质、暗物质并不增加。

(4) 暗能量是“固定”于空间体积上的，因此它不是由任何粒子组成，因为任何粒子都可以通过它所参与的相互作用而移动，使之浓聚或稀释。

(5) 宇宙中暗能量的密度大约为 3.878 GeV/m^3 ，即相当于每立方米有 4 个质子的静止能量。这是宇宙真空中固有的能量密度。作为对比，宇宙中暗物质的平均密度大约为 1.222 GeV/m^3 。宇宙中重子物质的平均密度大约为 0.2125 GeV/m^3 。尽管重子物质和暗物质比暗能量少得多，但它们都是可以移动、聚集的，它们可以聚集成星体星云。

7. 宇宙的结构和演化进程四句诀

宇宙学的研究已经表明：

宇宙产生于 138 亿年前的大爆炸，

宇宙在不断降温且加速膨胀，

宇宙中存在大量的暗物质，

宇宙中充满了暗能量。

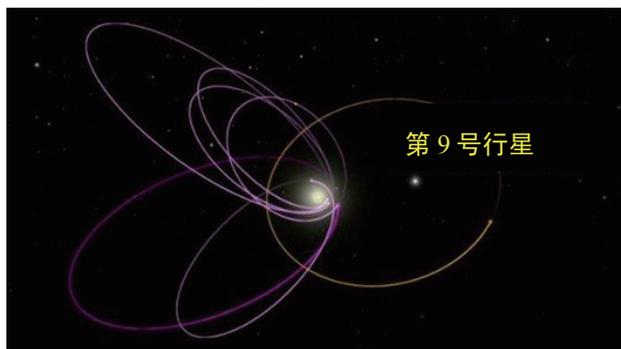
这四句话描述了宇宙的现状，可以视作形成了对现代天体物理学的挑战，同样，现代物理学要勇敢地接受这种挑战，同时也不放过这难得的机遇——期望着新物理学的诞生。

科苑快讯

太阳系有望发现真正的第九大行星

如果你为冥王星痛失第九大行星身份而遗憾的话，现在有个好消息，那就是在冥王星之外有一颗公转周期约为 1 万~2 万年的行星将填补冥王星留下的空缺。由于无法直接观测到，美国加州理工学院的巴特金 (Konstantin Batygin) 和布朗 (Michael E. Brown) 认为该行星的质量约为地球的 10 倍或更多，它的存在解释了柯博伊带奇怪的天体聚集现象 (如图)。

这颗行星距离太阳非常遥远，所以很难直接观察到，但是夏威夷的昂星团望远镜 (Subaru Telescope) 和智利的大型综合巡天望远镜 (Large Synoptic Survey Telescope) 将开展观测工作，有望在 10 年内观测到它。



(高凌云编译自 2016 年 3 月 18 日《欧洲核子中心快报》)