

文章编号: 1007-4627(2005)04-0387-04

宇宙质心参考系*

张邦固

(科学出版社, 北京 100717)

摘要: 根据实际天文观测论述了膨胀着的宇宙系统的时间可以与空间分开来讨论; 宇宙的空间是平直的。在宇宙质心坐标系中, 由背景辐射温度、宇宙密度和宇宙半径(最远星系的距离)3个观测数据计算了宇宙这个引力系统的总能量, 结果表明系统是一个引力束缚态, 将来会收缩。在均匀分布的初始条件下计算了收缩过程, 这是同步自由落体过程。在宇宙的膨胀过程与其收缩过程对称的假设之下, 建立膨胀时间与背景辐射温度的一一对应的关系。

关键词: 背景辐射; 光子平衡态; 引力束缚态; 同步收缩

中图分类号: P159.3 **文献标识码:** A

1 引言

宇宙论的标准模型^[1]在预言宇宙将来会收缩还是持续膨胀这个重大问题上遇到了麻烦。几十年来, 人们在寻找暗物质方面做出了极大的努力。然而, 直到最近, 包括暗物质, 观测到的物质密度也只有临界密度的四分之一^[2]。而认为宇宙是开放的观点除了无法解释减速因子远大于1/2之外, 它还无法解释当初一团能量这种引力开放态如何演变成现在的背景辐射这种平衡态^[3, 4]。现在是到了换一种方式来思考这个问题的时候了。

2 天文观测与宇宙质心参考系

2.1 时间坐标

20世纪20年代哈勃总结了星系退行速度与距离的关系^[5]。之后, 许多天文观测都与之相符。它揭示了宇宙正在膨胀的现实。其中, 接收到的遥远星系的光发自很早的过去, 因此, 所反映的星系退行是很早以前宇宙膨胀的情形。实际上, 哈勃关系反映了宇宙百亿年来持续减速膨胀的过程。

20世纪60年代所发现的宇宙微波背景辐射^[6]是又一个最重要的与宇宙论有关的观测事实。它有两个基本性质:

(1) 其频谱符合普朗克分布

$$\rho_\nu = 8\pi h\nu^3 / c^3 (e^{h\nu/kT} - 1), \quad (1)$$

其中, h 是普朗克常量, c 是光速, k 是玻尔兹曼常量, 其特征温度的现在观测值是^[7]

$$T = 2.735 \text{ K}; \quad (2)$$

(2) 其空间分布具有高度各向同性。几十年来人们不断观测, 精度已经达到 10^{-6} ^[8]。

这两个性质表明, 背景辐射是一种黑体辐射, 一种光子平衡态。不过, 它没有壁, 它是靠宇宙中所有物质(包括静止质量非零的物质和光子)的引力而束缚在一起的。

随着宇宙的膨胀, 这个引力系统的势能不断增加。相应地, 它的动能不断减少。作为其动能的主要形式, 背景辐射的能量也在不断减少。这体现在背景辐射的特征温度持续降低。也就是说, 背景辐射的温度是随着时间单调下降的。

原则上, 可以建立这个温度与时间一一对应的关系。这样, 测定了背景辐射的温度就确定了宇宙的时间。

由于背景辐射是均匀的, 充满了宇宙的所有空间。所以, 这样建立起来的时间坐标是可以与空间分开来的。

2.2 空间的平直性

几十年来人们努力寻找暗物质, 测量的宇宙密度都表明宇宙的空间是平直的。

近年来,对背景辐射多极矩^[9, 10]的测量从另一个方面,甚至是更彻底地显示了空间的平直性。

2.3 宇心参考系

宇宙是有限的(关于原因,可以参考本文第 3 节)。我们假设,在大尺度上,星系的分布是均匀的。一个均匀膨胀的系统应该是球形的。球心就是质量中心。

应该注意,在边界,在宇宙球的球面存在着不均匀。但是,这个不均匀不影响本文的讨论。另外,由于引力,物质(包括背景辐射)的分布应该是分层均匀的。不过,因为密度太小,引力场很弱,各层的这种不均匀所造成的影响很小。下面还要更细致地讨论这个问题。

3 引力束缚态

在宇心坐标系中,可以计算宇宙这个引力系统的总能量

$$E = U + K + M_0 c^2, \quad (3)$$

其中, U 是系统的引力势能, K 是系统的动能, M_0 是系统的总静止质量。

作为一个均匀的物质球,很容易得到其引力势能^[11, 12]

$$U = -0.6 \times \frac{GM^2}{R}, \quad (4)$$

其中, G 是引力常量, M 是系统的总质量, R 是宇宙球的半径,我们先用测量到的最远星系的距离来代替。

显然,应该有总静止质量

$$M_0 = \frac{4}{3} \pi \rho_0 R^3, \quad (5)$$

其中, ρ_0 是观测到的宇宙物质密度。 R 和 ρ_0 的测量很困难,所得到的数据有比较大的差异。我们先采用由 150 位美国物理学家推荐的 ρ_0 值^[13]

$$\rho_0 = 3 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3, \quad (6)$$

和如下的^[14]

$$R = 2 \times 10^{10} \text{ l.y.} \quad (7)$$

之后再对文献中出现的其他值进行讨论。

由观测值和(5)式容易得到

$$M_0 = 1.0053 \times 10^{55} \text{ g.} \quad (8)$$

根据普朗克分布(1)式和特征温度(2)式,容易

计算出光子数密度,再由(6)式和中子质量得到重子数密度。光子数密度竟然是重子数密度的 10^{10} 倍^[15, 16]。所以说,整个宇宙处于光子平衡态之中。系统的动能就是粒子(包括光子)的热动能。每一个粒子的动能基本相等。于是,我们可以忽略重子的动能,而只计算光子的动能。由(1),(2)和(7)式容易得到

$$Kc^{-2} = 1.4623 \times 10^{52} \text{ g.} \quad (9)$$

在(3)式中,先用质能关系把左边的总能量换成总质量 M ,再由(4),(8)和(9)式便获得一个关于总质量的二次方程。解之,略去没有物理意义的负质量,就得到

$$M = 0.9852 \times 10^{55} \text{ g.} \quad (10)$$

显然,它小于总静止质量。我们对文献中给出的 ρ_0 和 R 的几种值进行过计算^[17],定性的结果为 $M < M_0$ 。这说明宇宙是一个引力束缚态。与由宇宙微波背景辐射存在的事实所推出的定性结论是一致的。

这个结果告诉人们,宇宙将要终止膨胀,进而转入收缩。

我们知道,根据 ρ_0 的值,宇宙论“标准模型”得到的结论是正在膨胀的宇宙将永远膨胀下去。依据同样的天文观测数据,为什么会有如此截然相反的结果?实际上,认真分析就会发现,对于判断孤立引力系统是否会消散,标准模型所给的判据是,这个系统必须是一个黑洞。这个条件太严格了。一个孤立引力系统不消散,并非一定是一个黑洞。只要是引力束缚态,任何孤立系统都不会消散。实际例子非常多:由地球和地面物体、鸟儿、云彩、大气及月亮组成的地球系统,太阳系统,银河系,……,黑洞不允许一个光子逃遁。然而,个别光子是否逃逸与整个引力系统是否会消散并没有必然的联系。从能量角度分析,引力束缚态的总能量小于它的静止能量,即系统引力势能的绝对值大于系统的动能。随着膨胀,系统的动能会不断减少。当系统动能减少到零,系统各组成部分均处于相对静止状态时,系统引力势能仍不会等于零。也就是说,系统仍处于引力束缚之中。系统不会消散!

4 同步收缩

随着宇宙膨胀,背景辐射温度降到了零时,它

就彻底消失了。各星系不再退行，宇宙将不会进一步膨胀。将 $K=0$ 和(4)式代入(3)式(其中的总能量用质能关系替换)，就有

$$R_{\max} = \frac{0.6 GM^2}{(M_0 - M)c^2} \quad (11)$$

把上面得到的质量数据代入，容易算出 $R_{\max} = 22.46 \text{ Gl. y.}$ 。就是说，宇宙的膨胀已经接近尾声，其半径再增大约 12% 便会终止。这时的密度是

$$\rho_{\min} = \frac{3M}{4\pi R_{\max}^3} = 2.076 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3 \quad (12)$$

在重力之间引力的作用下，宇宙将进入收缩阶段。

在宇心坐标系中，在均匀分布的初始条件下，我们考虑一个距离宇心 r 的粒子的运动。显然，其方程为

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{GM'}{r^2} \quad (13)$$

其中 M' 是以 r 为半径的球内质量。容易得到初始距离为 r_0 的粒子运动到宇心的时间是

$$t = \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2G\rho_{\min}} \right)^{1/2} \quad (14)$$

我们看到，它与粒子的质量和初始位置都没有关系。这就是说，所有物质的运动是同步的。这个性质维持了系统在整个运动过程中的均匀性。

5 对称假设

由方程(13)，我们还可以得到初始位于宇宙球边 R_{\max} 的粒子运动到 R 所用的时间^[18]

$$t = \left(\frac{3}{8\pi G\rho_{\min}} \right)^{1/2} \left\{ \arccos\left(\frac{R}{R_{\max}}\right) + \left[\left(1 - \frac{R}{R_{\max}}\right) \frac{R}{R_{\max}} \right]^{1/2} \right\} \quad (15)$$

这也是整个宇宙球收缩到 R 所用的时间。

因为存在同步性，收缩过程比较简单。由于不清楚背景辐射的能量转变成系统引力势能的具体机制，膨胀过程难以描述。我们假设，膨胀的减速过程与收缩的加速过程是对称的。也就是说，图 1 给出的宇宙半径随时间的变化图是左右对称的。这样，时间差 $t_0 - t_p$ 就可以用 $t_p' - t_0$ 来代替。

可以把膨胀时期的总能量公式(3)写成

$$(M_0 - M)c^2 = \frac{0.6 GM^2}{R} - \frac{32}{45} \left(\frac{\pi^2 R}{ch} \right)^3 (kT)^4 \quad (16)$$

在膨胀过程中，随着半径 R 的增大，温度 T 不断降低。把(15)和(16)式联立起来消去 R ，就可以得到时间与温度的函数关系。也就是说，我们找到了通过测量背景辐射特征温度而计算时间坐标的具体方法。

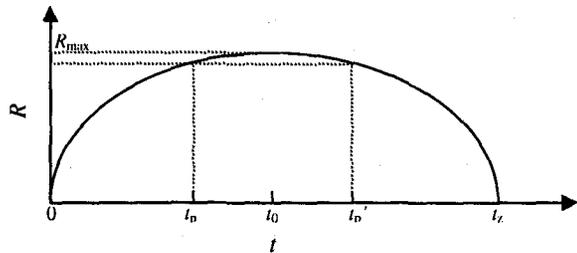


图 1 宇宙半径随时间的变化

6 讨论和结论

背景辐射分层均匀 因为引力，当光子离开宇心时，它会红移。容易算出一个从宇心运动到宇宙球边的光子的相对红移是 $0.016^{[19]}$ 。它显然很小，对于本文的讨论没有太大的影响。

宇心的方位 也是由于背景辐射径向的不均匀性太小，目前还没有找到切实可行的确定宇心方位的方法。从地球在背景辐射中的运动速度寻找宇心的可能性将另文探讨。

非相对论性 运用牛顿理论与广义相对论计算得到数据的差是^[20] $2GM/(Rc^2)$ 数量级的。目前，这个值是 0.073 ，远小于 1 。所以，广义相对论的结果应该与本文没有质的区别。

虽然单个光子以光速运动，但是，作为整体，光子平衡态的膨胀速度目前不大，如果用对称假设，可计算出它的值是 $2.69 \times 10^9 \text{ cm/s}$ ，不到光速的十分之一。所以，可以运用由非相对论性流体得到的(4)式。

宇宙半径 宇宙半径和最远星系的距离的关系将另文讨论。

结论 虽然宇心的位置还不能确定，但是，它是存在的。这是由如下观测事实得到的：(1)星系退行和背景辐射温度单调下降说明时间可以与空间分开来；(2)宇宙密度和背景辐射多极矩的测量数据

都说明空间是平直的；(3)背景辐射的平衡态性质说明宇宙是有限的。

所以，理论上，完全可以应用宇心参考系来讨

论问题。本文用宇心参考系得到了宇宙将会终止膨胀，进而转入同步收缩。

参 考 文 献:

[1] S. 温伯格著. 邹振隆等译. 引力论和宇宙论. 北京: 科学出版社, 1980, 541.

[2] Marshall Jor, John E Carlstrom. *Science*, 2001, **291**, 1 715.

[3] 张邦固. 光散射学报, 1998, **10**(1): 47.

[4] 张邦固. 原子核物理评论, 2004, **21**(2): 162.

[5] Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A, *et al.* Freeman and Company, 1973, 709.

[6] S. 温伯格著. 洗鼎钧译. 最初三分钟. 北京: 科学出版社, 1981, 37.

[7] 何香涛. 观测宇宙学. 北京: 科学出版社, 2002, 112.

[8] Sironi G. *et al.* *New Astronomy*, 1998, **3**: (1).

[9] 顾以藩. 物理, 2002, **31**(6): 382.

[10] Alejandro Gangui. *Science*, 2001, **291**: 837.

[11] Kittel C, Kinght W D. *Mechanics McGraw-Hill*, 1973, 277.

[12] 张邦固. 宇宙奥秘. 北京: 科学出版社, 2002, 81.

[13] 引力、宇宙学和宇宙线物理学专门小组等著. 赵志强等译. 引力、宇宙学和宇宙线物理学, 90 年代物理学. 北京: 科学出版社, 1994, 82.

[14] Field G B, *et al.* *Cosmic Evolution*. H M C Boston, 1978, § 8. 3.

[15] S. 温伯格著. 洗鼎钧译. 最初三分钟. 北京: 科学出版社, 1981, 4.

[16] 张邦固. 宇宙奥秘. 北京: 科学出版社, 2002, 78.

[17] 张邦固. 湖南师范大学自然科学学报, 1998, **21**(4): 46.

[18] 张邦固. 工科物理, 1999 年, 增刊, 26.

[19] 张邦固. 宇宙奥秘. 北京: 科学出版社, 2002, 115.

[20] 俞允强. 广义相对论引论. 北京: 北京大学出版社, 1988, 6.

Cosmic Center-of-mass Frame

ZHANG Bang-gu

(*Science Press, Beijing 100717, China*)

Abstract: According to astronomical observation we point out that the time of our expanding cosmic system can be discussed separating from the space. And the space in our universe is flat. In the cosmic center-of-mass frame(CCF), based on the temperature of CMBR, the cosmic density and the cosmic radii, the distance of the farmost galaxy, the total energy of our universe asa gravitation system has been calculated. It shows that our universe is in a gravitational bound state, and it will contract. In CCF the contracting progress is a synchronized freely falling body under initial condition of uniform distribution. Uder assumption of the symmetry of cosmic expanding and contracting progresses, th one-to-one correspondence of the expanding time to the temperature of CMBR can be obtained.

Key words: cosmic microwave background radiation; photon equilibrium state; gravitational bound state; synchronized contraction