

# 光子、热力学与膨胀宇宙

李惕碚<sup>①②③\*</sup>, 吴枚<sup>①</sup>

① 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;

② 清华大学物理系, 清华大学天体物理中心, 北京 100084;

③ 中国科学院大学物理科学学院, 北京 101408

\* 联系人, E-mail: litp@tsinghua.edu.cn

2015-09-06 收稿, 2015-10-22 接受, 2015-11-05 网络版发表

国家自然科学基金(11033003)资助

**摘要** 基于宇宙学观测以及含宇宙常数的广义相对论场方程建立的标准宇宙模型, 存在着违背物理学基本规律的疑难, 提示我们需要仔细审视宇宙动力学的物理基础. 例如, 同实物退耦后的背景黑体辐射光子数目不再随宇宙膨胀而变化, 但宇宙学红移效应导致辐射温度反比于宇宙尺度下降, 则背景辐射总能量也反比于宇宙尺度而不断减少, 违背了热力学第一定律, 损失的宇宙背景辐射能量到哪里去了? 又如, 宇宙常数对应的暗能量密度不随时间变化, 膨胀宇宙中物质不断被创生, 总能量随宇宙膨胀趋于无穷. 在宇宙学中坚持能量守恒, 需要限制暗物质和暗能量的基本物理性质, 其中作为零质量玻色子的光子扮演着重要角色. 基于爱因斯坦场方程同时又不放弃能量守恒定律的宇宙学模型, 给出了和标准模型完全不同因而可以被观测证实或证伪的演化图景: 暗物质同暗能量平衡状态下的匀速膨胀才是宇宙的常态, 而减速或加速膨胀只是宇宙介质相变导致的瞬态过程. 近期开始出现的高精度宇宙学观测结果对标准模型提出了挑战, 而有利于能量守恒宇宙模型的预期. 正在进行和计划中的宇宙学观测将最终判定2类模型, 并且推动基本物理的发展.

## 关键词

宇宙背景辐射  
热力学  
暗物质  
暗能量  
宇宙动力学

爱因斯坦于1915年建立的广义相对论场方程为

$$G_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}, \quad (1)$$

式中 $G_{\mu\nu}$ 和 $T_{\mu\nu}$ 分别为爱因斯坦张量和能量-动量张量,  $G$ 为牛顿引力常数. 对于均匀和各向同性的宇宙(宇宙学原理), 时空度规 $g_{\mu\nu}$ 为由线元

$$ds^2 \equiv -g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \\ = -dt^2 + a^2(t) \left( \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2 \right), \quad (2)$$

确定的罗伯逊-沃克(R-W)度规, 其中 $a$ 为宇宙尺度因子(宇宙半径 $R=aR_0$ ,  $R_0$ 为当前宇宙半径),  $k$ 为曲率参数. 将理想流体的能量-动量张量 $T_{\mu\nu}$ 代入R-W度规下的场方程(1)即可导出描述宇宙膨胀的弗里德曼方程

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho a^2 - k,$$

式中 $\rho$ 为物质的平均密度. 在R-W度规给出的共动座标系中存在统一的宇宙时间, 而宇宙学观测又确定了宇宙空间实际上是高度平坦的, 宇宙介质应遵从能量守恒定律. Cai等人<sup>[1]</sup>从热力学第一定律也导出了弗里德曼方程, 表明弗里德曼方程确实是能量守恒方程. 与膨胀宇宙共动的理想流体总机械能 $E$ 应守恒:  $E = MR^2/2 - GM^2/R$ , 式中宇宙静能量 $M = \rho V$  ( $V$ 为宇宙体积), 则表述能量守恒的弗里德曼方程为

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho a^2 + \varepsilon, \quad (3)$$

式中能量参数 $\varepsilon = 2E/R_0^2 M$ 为常数. 方程(3)也可写为

$$\dot{R}^2 = 2GMR^{-1} + E', \quad (3a)$$

其中常数 $E' = E/M$ .

爱因斯坦为建立静态宇宙模型于1917年在场方

程(1)左边增加了宇宙常数项 $\lambda g_{\mu\nu}$ , 在哈勃1919年发现宇宙膨胀后撤消了这个常数项. 20世纪末发现宇宙膨胀加速后, 标准宇宙模型又恢复了宇宙常数(或暗能量密度 $\rho_\lambda=\lambda/8\pi G=\text{constant}$ )作为加速宇宙的动力源. 标准宇宙模型的弗里德曼方程也是(3)式[或(3a)], 只是其中的能量密度 $\rho$ 和总能 $M$ 定义为

$$\rho = \rho_m + \rho_\lambda, \quad (4)$$

$$M = M_m + M_\lambda, \quad (5)$$

(4)~(5)式中下标 $m$ 表示物质,  $\lambda$ 表示暗能量.

## 1 膨胀宇宙的辐射能丢失

当膨胀宇宙的温度降至 $kT_{\text{dec}} \approx 0.25 \text{ eV}$ 时, 光子与实物粒子退耦成为背景辐射. 背景辐射光子不再同实物粒子发生碰撞, 光子总数不随宇宙膨胀变化, 而宇宙学红移效应使背景黑体辐射温度 $\propto 1/R$ 下降, 则辐射总能量也 $\propto 1/R$ 减少, 违背了热力学第一定律. 宇宙背景辐射损失的能量到哪里去了? Peebles在*Principles of Physical Cosmology*<sup>[2]</sup>一书中用题为“Blackbody Radiation in an Expanding Universe”一节论述了这一疑难问题, 其结论是: “The resolution of this apparent paradox is that while energy conservation is a good local concept...and can be defined more generally in the special case of an isolated system in asymptotically flat space, there is not a general global energy conservation law in general relativity theory.” 即时空弯曲导致能量不守恒.

当发现一个被认为是孤立的系统其能量不守恒时, 物理学应当探寻有没有被忽略的物质形态或能量转换过程, 而不应满足于“时空弯曲导致能量不守恒”这样的解释. 即令在广义相对论框架下, 也是物质为因, 时空弯曲为果——如惠勒(J A Wheeler)的名言所述: “物质告诉时空如何弯曲”. 宇宙中普通物质组分小于5%, 不能不考虑大量存在的暗物质和暗能量, 仅凭与实物粒子脱耦, 就认定背景辐射构成了一个孤立系统并轻易地得出宇宙能量不守恒的结论.

其实, 更早期宇宙的辐射能就已经在大规模地转换为非实物粒子的其他宇宙组分. 高温高密的早期宇宙以辐射为主, 辐射能密度超过实物的能量密度(本文中“实物”指具有静质量的普通物质和冷暗物质, “物质”则包括实物和辐射). 膨胀宇宙的温度 $T \propto a^{-1}$ 下降, 实物密度 $\rho_s \propto a^{-3}$ 下降, 而辐射密度 $\rho_r \propto a^{-4}$ 下降, 则随着宇宙膨胀降温, 实物与辐射的

密度比以 $\rho_s/\rho_r \propto a$ 上升, 即 $\rho_s/\rho_r \propto T^{-1}$ . 当温度下降到 $T_{\text{eq}} \approx 1.8 \times 10^4 \text{ K}$ , 实物密度超过辐射密度, 宇宙开始以实物为主<sup>[3,4]</sup>. 通常认为, 辐射-实物的转换是通过光子转换为正反粒子对的过程完成的. 但是, 当温度降到 $T_c \approx 10^{10} \text{ K}$ 时, 辐射能密度仍远大于实物密度, 而辐射光子能量( $kT_c \approx 1 \text{ MeV}$ )已低于产生正负电子对的阈能. 所以, 早期宇宙在 $T_c \approx 10^{10} \text{ K}$ 到 $T_{\text{eq}} \approx 10^4 \text{ K}$ 的阶段, 辐射能已不可能转化成为实物粒子, 辐射-实物的转换只能是光子转换为以非实物粒子形态存在的冷暗物质. 背景辐射能量丢失不过是早期宇宙中辐射转化为非物质粒子过程的继续, 只是此时光子能量已很低( $kT < 0.25 \text{ eV}$ ), 已与实物粒子脱耦的光子同粒子碰撞的概率太小, 能量传递只能通过光子与密度连续分布的暗物质与暗能量的相互作用才能实现.

相对论引力理论提供给宇宙论的立论基础是: 宇宙的动力源是引力, 而且仅仅是引力; 宇宙动力学中的引力能量密度 $\rho$  ( $\rho = T_{00}$ ,  $T_{00}$ 为能动张量的时-时分量)是宇宙中所有局域系统各种类型能量总和的平均, 即引力能量密度 $\rho$ 中包含着星系质量、恒星和星系的动能、星系际气体、宇宙线、磁场、压力、热、辐射、暗物质、暗能量等各种能量类型的贡献. 宇宙能量守恒仅要求

$$\rho = \rho_0 a^{-3}, \quad (6)$$

式中 $\rho_0$ 为当前密度. 我们不能在全面了解不同类型能量间的相互转换之前, 仅因某一组分的能量不守恒就认定宇宙学必须放弃能量守恒.

将(6)式代入(3)式, 不含宇宙常数的弗里德曼方程可以写为

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 a^{-1} + \varepsilon, \quad (3b)$$

由于 $\rho_0$ 和 $\varepsilon$ 都是常数, 所以能量方程完全确定了宇宙膨胀的历史, 即宇宙膨胀速率 $\dot{a}$ 随宇宙尺度因子 $a$ 的变化. 宇宙的膨胀完全被作为长程力源的引力质量所驱动, 不可能也不允许单独将任何一种局域能量形式(包括压力)抽出来作为膨胀宇宙的动力源. 宇宙动力学的这一重要特点已被一些引力和宇宙学者注意到. 例如, 早在20世纪70年代, 麦思纳、索恩和惠勒(Misner, Thorne and Wheeler)就在《引力论》(*Gravitation*)<sup>[5]</sup>一书中由爱因斯坦场方程导出弗里德曼能量方程和加速度方程后, 用题为“为什么动力学

方程是多余的”一节指出：“不损失任何信息……可以不管「加速度方程」或「动力学方程」……而使用能量方程或更适当地称为「初值方程」即可”。瓦尼安和鲁菲尼(Ohanian and Ruffini)在《引力与时空》(Gravitation and Spacetime)<sup>[6]</sup>一书中明确指出：“辐射压对于宇宙的膨胀没有任何作用……流体压力不能影响宇宙动力学的原因是，(宇宙)流体是均匀的，在流体中所有的点，压力都是一样的，没有压力梯度……没有可能引起流体加速或减速的净力作用于流体。虽然有时候把大爆炸描述为原初的“爆炸”，但它与通常的爆炸有一个关键性的区别——它的向外运动是初始条件的结果，而不是向外的压力所造成的”。所以，不同于质点或局域系统的动力学，对于宇宙动力学，物质的状态和能量转化的具体过程并不重要(不需要状态方程)，也不需要运动方程，只要有初始条件，例如当前能量密度 $\rho_0$ 和总机械能参数 $\varepsilon$ ，则能量守恒定律，即弗里德曼能量方程(3)，就完全决定了膨胀宇宙的演化。所以，能量守恒、或能量是否守恒，从根本上决定了宇宙动力学的性状。

## 2 加速膨胀与宇宙常数

标准宇宙模型的一个重要成就是可以解释加速膨胀。标准模型中宇宙物质密度 $\rho_m = \rho_{m,0}/a^3$ ( $\rho_{m,0}$ 为当前物质密度)，将(4)式代入(3)式，则能量方程可以写为

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_{m,0}a^{-1} + \rho_\lambda a^2) + \varepsilon, \quad (7)$$

取 $\rho_{m,0}$ 、 $\rho_\lambda$ 和 $\varepsilon$ 为待定参数，用(7)式拟合对宇宙学红移 $0 < z < 2$ 区间哈勃参量 $H = \dot{a}/a = \dot{a}(1+z)$ 的观测值<sup>[7]</sup>，拟合结果为图1的倒钟型曲线。

标准宇宙模型的弗里德曼方程(3)中的物质密度 $\rho = \rho_m + \rho_\lambda$ ，此处的暗能量同普通物质和暗物质一样，也是一种作为引力源的物质，只是它的密度 $\rho_\lambda$ 在空间均匀分布，而且不随时间变化。很明显，宇宙常数破坏了能量守恒：要保持 $\rho_\lambda$ 为常数，则膨胀宇宙必须不断地创生出暗能量

$$R \rightarrow \infty \quad M_\lambda = (4\pi R^3/3)\rho_\lambda \rightarrow \infty, \quad (8)$$

奇怪的是：总质量 $M = M_m + M_\lambda$ 不断增加的宇宙，何以在标准模型里不但不被愈来愈强的引力减速，反而不断地加速？

标准模型的弗里德曼方程(3a)可以写为

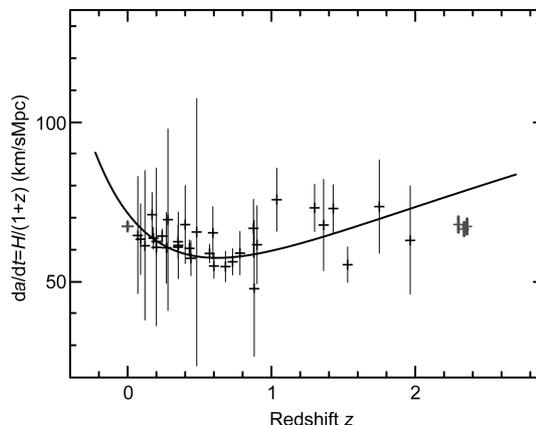


图1 宇宙膨胀速度的演化. 观测数据源于文献[7]的收集, 其中  $z=0$  处的结果为 *Planck* 卫星公布的  $H_0$ ,  $z=2.3, 2.34$  和  $2.36$  处为斯隆巡天的结果. 曲线为标准模型拟合  $0 < z < 2$  区间观测值的结果

Figure 1 Expansion rate versus redshift. The used data are collected by ref. [7], where the red cross at  $z=0$  is from the *Planck* satellite, and red crosses at  $z=2.3, 2.34$  and  $2.36$  from SDSS. The line is the standard model from fitting data between  $0 < z < 2$

$$\begin{aligned} \dot{R}^2 &= 2GMR^{-1} + E' \\ &= 2G(M_m R^{-1} + 4\pi\rho_\lambda R^2/3) + E', \end{aligned} \quad (9)$$

上式中只有 $\dot{R}$ 和 $R$ 2个变量，完全确定了标准模型膨胀速度 $\dot{R}$ 的演化。令 $R_{m\lambda} \equiv \sqrt[3]{3M_m/4\pi\rho_\lambda}$ ，当 $R < R_{m\lambda}$ 即 $M_\lambda < M_m$ ，由(9)式算得的 $\dot{R}^2$ 随 $R$ 增大而减小，宇宙减速膨胀；而当 $R > R_{m\lambda}$ ，由(9)式算得的 $\dot{R}^2$ 随 $R$ 增大，宇宙加速膨胀。弗里德曼方程(3a)又可以写为

$$\frac{1}{2}M\dot{R}^2 - \frac{GM^2}{R} = \frac{ME'}{2},$$

上式左边第1项为质量 $M$ 速度 $\dot{R}$ 的膨胀超曲面动能，第2项为引力势能，右边为常数，即：膨胀宇宙机械能守恒。有常数密度成分的宇宙，如(8)式所示，其能量不守恒，即弗里德曼方程(3)中的 $\varepsilon$ 或(3a)中的 $E'$ 不再是常数；标准模型使用一个能量守恒公式去推算一个能量不守恒系统的动力学演化，才得出在 $z$ 大于 $\approx 0.6$ 后宇宙加速膨胀的结果。而如图1所示，标准模型预期总质量将无限地增大的宇宙，其膨胀速度将单调地和无限地上升，这是令物理学者难以接受的一个完全违背了物理学基本规律的图景。

宇宙学者可能辩称：作为物质成分的暗能量之所以能加速宇宙膨胀，并不一定是由于使用了能量守恒公式，而是由于暗能量具有状态方程

$$P_\lambda = -\rho_\lambda, \quad (10)$$

使其压力为排斥力。姑无论符合宇宙学原理的膨胀不可能被压力驱动，即使采用暗能量压力作为宇宙

加速的动力源,上述暗能量状态方程同样也是用能量守恒公式处理能量不守恒系统得到的结果:推出暗能量状态方程(10),需要利用由热力学第一定律导出的流体方程<sup>[2]</sup>

$$\dot{\rho}_\lambda \frac{a}{\dot{a}} = -3(\rho_\lambda + P_\lambda),$$

而常数 $\rho_\lambda$ 违背了流体为孤立系统的设定,不能遵从热力学第一定律.

宇宙常数 $\lambda$ 能被普遍接受的一个原因是:在广义相对论场方程(1)中加入散度为零的项 $\lambda g_{\mu\nu}$ 不破坏毕安基恒等式 $\nabla^\nu G_{\mu\nu} = 0$ ,因而仍然保持能量动量守恒条件 $\nabla^\nu T_{\mu\nu} = 0$ .但是,系统的能量守恒还有一个物理的先决条件:该系统是孤立系统;一个具有常数密度、物质不断创生的膨胀宇宙不可能是孤立系统,无论什么样的时空对称性也不可能使它保持能量守恒.

迄今没有任何实验依据要求物理学必须放弃能量守恒定律.宇宙学观测,特别是微波背景辐射观测,还表明宇宙空间实际上是平直的.标准宇宙模型轻易地放弃了能量守恒,而在计算宇宙演化时却又使用表述能量守恒的公式,因而是一个不自洽的理论,它给出的宇宙演化图景是高度可疑的.

### 3 能量守恒宇宙的动力学

爱因斯坦在引入宇宙常数 $\lambda$ 的文献[8]中特别申明:常数密度的(静态)宇宙其总质量是守恒的.非静态的膨胀宇宙不允许有常数密度,因此宇宙膨胀发现后爱因斯坦从场方程中撤回宇宙常数是完全正确的.宇宙膨胀的加速表明宇宙组分中有斥力源(暗能量),但标准模型因此恢复场方程的 $\lambda$ 项是不恰当的:一方面,膨胀宇宙的暗能量密度不能为常数;另一方面,爱因斯坦宇宙常数 $\lambda > 0$ ,所对应的是与通常物质一样也是产生吸引力的物质,只不过它在空间均匀分布,而斥力源的引力密度必须与引力源的符号相反.用(4)式定义的标准模型能量方程中的密度 $\rho$ 实际上是惯性质量密度 $\rho_1$ :

$$\rho_1 = \rho_m + \rho_\lambda, \quad (11)$$

服从质量守恒

$$\rho_1 = \rho_0 a^{-3}, \quad (12)$$

$\rho_0$ 为当前宇宙的静止质量密度.而包含暗能量的宇宙,其净引力的势密度(引力能量密度)应为

$$\rho_G = \rho_m - \rho_\lambda, \quad (13)$$

能量方程势能项中的能量密度应当用势密度,而不应当是惯性密度,则表述宇宙机械能守恒的弗里德曼能量方程应为

$$\begin{aligned} \dot{a}^2 &= \frac{8\pi G}{3} \rho_G a^2 + \varepsilon \\ &= \frac{8\pi G}{3} (\rho_m - \rho_\lambda) a^2 + \varepsilon. \end{aligned} \quad (14)$$

如果宇宙不发生相变,宇宙的2个组分——物质和暗能量不相互转换,各自保持常量,则 $\rho_m = \rho_{m,0} a^{-3}$ ,  $\rho_\lambda = \rho_{\lambda,0} a^{-3}$ ,  $\rho_G = (\rho_{m,0} - \rho_{\lambda,0}) a^{-3}$  ( $\rho_{m,0}$ 和 $\rho_{\lambda,0}$ 分别为当前物质和暗能量密度).从能量方程(14)可以看出:若 $\rho_G = 0$  ( $\rho_m = \rho_\lambda$ ,物质和暗能量平衡),宇宙将始终保持平衡状态以速率 $\dot{a}_c = \sqrt{\varepsilon}$ 匀速膨胀;  $\rho_G > 0$  ( $\rho_m > \rho_\lambda$ ,物质为主),宇宙始终减速膨胀;  $\rho_G < 0$  ( $\rho_m < \rho_\lambda$ ,暗能量为主),宇宙始终加速膨胀.所以,能量守恒宇宙匀速、加速和减速间的转换只能由物质和暗能量的相互转换——宇宙相变引起.

超新星观测<sup>[9-11]</sup>发现宇宙膨胀在 $z_b \approx 0.6$ 时从减速转变为加速,表明宇宙膨胀过程中存在相变.相对势密度

$$\eta = \frac{\rho_G}{\rho_1} = \frac{\rho_G}{\rho_0(1+z)^3}, \quad (15)$$

可以表征宇宙偏离平衡态的程度,  $-1 \leq \eta \leq 1$ .相变使宇宙偏离 $\eta=0$ 的稳定态( $\rho_G=0$ ,匀速膨胀),从而加速或减速膨胀.取 $\eta$ 为序参量, $z$ (对应于宇宙温度)为控制参量,设 $z_c$ 为相变临界点,则连续相变的朗道平均场理论<sup>[12]</sup>给出

$$\begin{aligned} \eta &= 0, & (z > z_c), \\ \eta &= \pm \sqrt{\alpha(z_c - z)}, & (z < z_c), \end{aligned} \quad (16)$$

式中 $\alpha$ 为常数.将(15)和能量守恒条件(11)代入(16)得膨胀速率演化为

$$\begin{aligned} \dot{a}^2 &= \varepsilon, & (z > z_c), \\ \dot{a}^2 &= \varepsilon \pm \frac{8\pi G}{3} (1+z) \sqrt{\beta(z_c - z)}, & (z < z_c), \end{aligned} \quad (17)$$

式中参数 $\beta = \rho_0^2 \alpha$ .设相变于 $z_b$ 时结束后恢复到稳定态的弛豫过程对称于相变过程,取 $\varepsilon$ ,  $\beta$ ,  $z_c$ 和 $z_b$ 为待定参数,用(17)式拟合 $0 < z < 2$ 区间哈勃参量测量值得图2所示曲线.

从 $\varepsilon$ 和 $\beta$ 的拟合值<sup>[3]</sup>以及 $\rho_0 = 3H_0^2/8\pi G = 3\varepsilon/8\pi G$ ,用(16)和(17)式还可以计算出相对势密度的演化,结

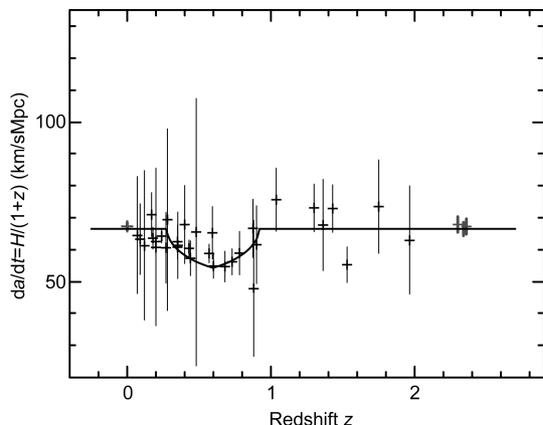


图2 保持能量守恒的宇宙动力学方程和朗道相变模型对  $0 < z < 2$  区间哈勃参量观测值的拟合结果

Figure 2 Result of fitting the cosmic dynamical equation with energy conservation and Landau model of phase transition to the data between  $0 < z < 2$

果见图3。

将图2与1所示标准模型的结果比较，保持能量守恒的宇宙具有完全不同的膨胀演化图景，因而可以被观测证实或证伪。可以预期，更多测量哈勃参量的高精度结果和更大红移处的观测结果将明确地断定宇宙是否遵从能量守恒与转化规律。

#### 4 宇宙学与基础物理

作为物理学的研究对象，宇宙是一个理想的孤立系统。但是标准模型下的膨胀宇宙，却严重背离了能量守恒：其辐射能量不断地丢失，暗能量连续地创

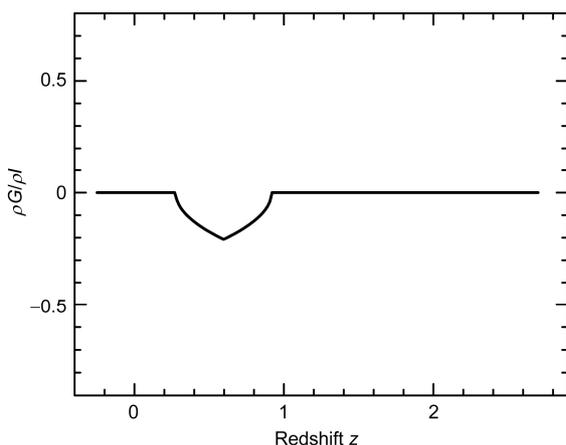


图3 相对势密度  $\eta = \frac{\rho_m - \rho_\lambda}{\rho_m + \rho_\lambda}$  的演化

Figure 3 Evolution of fractional potential density  $\eta = \frac{\rho_m - \rho_\lambda}{\rho_m + \rho_\lambda}$

生。“物理学是关于物质性质和能量转换的系统知识”<sup>[13]</sup>；对于物理学者，膨胀宇宙的能量疑难提示我们需要进一步探索尚未被认识的物质形式及能量转换方式，而毋需在弯曲时空无法确保能量守恒的理论局限前止步。辐射能量的丢失，表明辐射光子和暗宇宙间存在不同于已知的光子-实物粒子相互作用和转化的过程；暗能量无限创生，表明需要放弃宇宙常数，代之以遵从物理学基本规律的斥力物质模型。宇宙的动力学源是宇宙介质的内秉引力和斥力，同局域物质的状态和能量转换无关，因此虽然宇宙中的物质形式及能量转换过程尚未被完全了解，仍然可以建立宇宙动力学；而研究能量守恒宇宙所要求的光子与暗宇宙的作用和转化过程，是基本物理学的重要课题。

当前宇宙物质以实物为主，辐射能密度远小于实物密度， $\rho_{r,0}/\rho_{s,0} \approx 1.7 \times 10^{-4}$ ，但辐射光子数目远大于重子数目： $n_r/n_b > 10^9$ <sup>[3]</sup>。宇宙继续膨胀，背景光子能量将趋于零，但总数仍保持不变。作为零质量玻色子的光子在辐射-暗物质能量转换中应当扮演着一个重要的角色。设想宇宙膨胀的时间回溯过程：宇宙收缩，暗物质(及其引力势能)转化为辐射能，温度上升，直到光子能量超过实物粒子的产生阈能，从而复现早期宇宙丰富的粒子物理过程——不需要破坏能量守恒，也不需要额外的对称破缺。

赵峥等人<sup>[14]</sup>把系统热平衡时辐射具有普朗克黑体谱看作一条基本的物理规律，在平直和弯曲时空中，证明了热力学第零定律(热平衡的传递性)等价于钟速同步的传递性，从而可以在全时空定义统一的同步的时间，指出热力学和时空的属性可能存在深刻的本质联系。宇宙的均匀与各向同性，宇宙空间的高度平坦，和宇宙背景辐射的黑体谱，这些观测事实表明理想流体可能是过于简化的模型，由吸引和排斥作用相互耦合的宇宙介质更类似一个凝聚态。宇宙学原理和宇宙的热平衡及能量守恒要求必须考虑宇宙组分间的相互作用和转换，特别不能忽略热平衡辐射光子向宇宙介质中声子的转换。在工程热物理研究中，过增元等人<sup>[15,16]</sup>指出，基于相对论，热能应具有质量，当热流密度很大时不能忽略的惯性导致傅里叶导热定律不再适用，并导出了计及固体声子气质量的状态方程及其运动守恒方程，还向物理学者提出了疑问：在热耗散过程中，热质能到哪里去了？与在实验室条件下分辨声子复杂的能量转换过

程的困难相比, 膨胀宇宙中的辐射光子在超大规模地转化为宇宙背景介质的能量, 这一过程对于暗物质和暗能量的性质提出了强烈的限制. 研究这一对于宇宙学和基本物理学都有重要意义的过程, 显然不能仅靠粒子物理, 借鉴热力学和统计物理的思路和方法是非常必要的.

同标准模型比较, 一个服从能量守恒与转化规律的宇宙, 其常态不是减速或加速, 而是平稳地匀速膨胀的平衡态. 这一特点有助于缓和宇宙总体的均匀与各向同性同高度不均匀、非平衡和传播速度有限的局域物理间的矛盾. 一个吸引与排斥平衡的宇宙

图景, 对于长期困扰物理学的一些重大疑难问题提供了可能的解决途径<sup>[17-19]</sup>. 在物质与暗能量耦合的宇宙动力学中, 膨胀的减速或加速源于2个基本的宇宙组分(也应当是物理学的基本组分)的相互转化, 即宇宙相变. 对减速和加速时期的宇宙演化性状的高精度观测, 从而测定和研究宇宙相变性质, 不但对于宇宙动力学和天体物理学很重要, 对于基本物理学也有重要价值. 例如, 按连续相变的平均场理论, 在临界点附近涨落的关联长度趋向无穷大. 比较不同空间方向的宇宙膨胀速率演化曲线, 可以测量相变的传播速度, 从而检验宇宙学原理和测定时空的对称性质.

## 参考文献

- 1 Cai R G, Kim S P. First law of thermodynamics and Friedmann equations of FRW universe. *JHEP*, 2005, 2: 50
- 2 Peebles P J E. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton: Princeton Universe Press, 1993
- 3 Yu Y Q. *Physical Cosmology (in Chinese)*. Beijing: Peking University Press, 2002 [俞允强. 物理宇宙学讲义. 北京: 北京大学出版社, 2002]
- 4 Weinberg S. *Gravitation and Cosmology*. New York: John Wiley, 1972 [Weinberg S, 著. 邹振隆, 张历宁, 译. 引力论和宇宙论. 北京: 科学出版社, 1980]
- 5 Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973 [麦思纳, 索恩, 惠勒, 著. 陈秉乾, 马骥, 陈熙谋, 等, 译. 引力论. 台湾: 正中书局, 1995]
- 6 Ohanian H C, Ruffini R. *Gravitation and Spacetime*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013 [Ohanian H C, Ruffini R, 著. 向守平, 冯珑珑, 译. 引力与时空. 北京: 科学出版社, 2008]
- 7 Meng X L, Wang X, Li S Y, et al. Utility of observational Hubble parameter data on dark energy evolution. arXiv: 1507.02517
- 8 Einstein A. Cosmological consideration of the general theory of relativity. *Acad Wiss*, 1917, 1: 142–152. English Translation in the *Principal of Relativity*. New York: Dover, 1952
- 9 Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astron J*, 1998, 116: 1009–1038
- 10 Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae. *Astrophys J*, 1999, 517: 565–586
- 11 Riess A G, Nugent P E, Gilliland R L, et al. The farthest known SN: Support for an accelerating universe and a glimpse of the epoch of deceleration. *Astrophys J*, 2001, 560: 49–71
- 12 Landau L D, Lifshitz E M. *Course of Theoretical Physics. Statistical Physics*. Beijing: Higher Education Press, 2007. [Landau L D, Lifshitz E M, 著. 束仁贵, 束莼, 译. 理论物理学教程. 第五卷, 统计物理学. 北京: 高等教育出版社, 2007]
- 13 Peng H W. On the properties of physics (in Chinese). *Physics*, 1981, 10: 147 [彭桓武. 谈物理学的性质和发展中的特点. 物理, 1981, 10: 147]
- 14 Zhao Z, Pei S Y, Liu L. Planck black body spectrum claims transitivity of clock rate synchronization being equivalent to zero law (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 1999, 48: 2004–2010 [赵峥, 裴寿镛, 刘辽. 钟速同步的传递性等价于热力学第零定律. 物理学报, 1999, 48: 2004–2010]
- 15 Guo Z Y, Cao B Y, Zhu H Y, et al. State equation of phonon gas and conservation equations for phonon gas motion (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2007, 56: 3306–3311 [过增元, 曹炳阳, 朱宏辉, 等. 声子气的状态方程和声子气运动的守恒方程. 物理学报, 2007, 56: 3306–3311]
- 16 Cao B Y, Guo Z Y. Equation of motion of a phonon gas and non-Fourier heat conduction. *J Appl Phys*, 2007, 102: 053503
- 17 Li T P. Constructing a robust universe with attraction-repulsion coupling and energy conservation. 2011, arXiv: 1110.2678
- 18 Liu H, Li T P. Missing completely of the CMB quadrupole in WMAP data. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1243–1249
- 19 Li T P, Wu M. Evolution of dark energy-dark matter-coupled expanding universe. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 4473–4477

## Photons, thermodynamics, and expanding universe

LI TiPei<sup>1,2,3</sup> & WU Mei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>2</sup>Department of Physics & Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>3</sup>School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

The total number of blackbody photons of cosmic background radiation after decoupling from matter is independent of time, but the cosmic redshift effect lets the radiation temperature decrease with the universe scale increasing, then the total energy of cosmic background radiation decreases as the universe expands, which is contrary to the first law of thermodynamics. The density of dark energy corresponding to the cosmological constant is independent of time, which means that matter is continuously created in an expanding universe, then the total energy of the universe will reach to infinity. The paradoxes in the standard model of cosmology indicate that the foundation of cosmic dynamics needs to be carefully inspected. We propose an alternative model of cosmology with energy conservation giving an evolution picture of universe completely different with the standard model. In our model the state of equilibrium between matter and dark energy with a constant expansion rate is ordinary for universe, acceleration or deceleration is just temporary deviation from the equilibrium state by a phase transition with transformation between balanced matter and dark energy. It is expected that cosmological observations will judge the two kinds of cosmological model.

**cosmic background radiation, thermodynamics, dark matter, dark energy, cosmic dynamics**

doi: 10.1360/N972015-01017