

# 一种新的宇宙学模型：具有局部因果视界和红移能量再分配的辐射驱动膨胀

我提出了一种宇宙学模型，其中膨胀期由辐射压力驱动，而不是标量膨胀场。从普朗克时代的线性膨胀开始，宇宙在  $t \approx 10^{22} t_P$  时过渡到指数膨胀，此时时空扩展超出因果视界，将光速 ( $c$ ) 重新定义为局部不变参数。假设由于光子红移损失的能量被重新分配到辐射压力中，从而驱动膨胀并确保在膨胀宇宙中能量守恒。局部闵可夫斯基区域保持  $c$  的不变性，解决了视界和平坦问题，同时调和了狭义相对论与宇宙学的超光速退行。概述了八个观测测试，预计在宇宙微波背景 (CMB)、引力波和大尺度结构中会有特定信号。当前数据与  $\Lambda$ CDM 一致，但并未排除此模型，为未来高精度实验验证留下了空间。

## 1. 引言

标准  $\Lambda$ CDM 宇宙学描述了在  $t = 0$  时的热大爆炸，随后是  $t \approx 10^{-36}$  s 至  $10^{-34}$  s 的短暂膨胀期。这一时期由标量“膨胀场”驱动，其势能产生指数膨胀 ( $a(t) \propto e^{Ht}$ ) [1, 2]。这解决了视界和平坦问题，并在宇宙微波背景 (CMB) 中留下了痕迹。尽管取得成功， $\Lambda$ CDM 依赖于推测性元素：未探测到的膨胀粒子、精细调整的势能景观以及对光子红移导致的表面上能量不守恒的容忍。

我提出了一种辐射驱动的替代模型。我的模型从线性膨胀开始，当光子主导且视界分离时，自然过渡到指数膨胀，并持续到现代加速时代。三个核心原则区分了这一框架：

1. **无需膨胀场。** 辐射压力本身，通过红移能量的增强，驱动膨胀。
2. **能量守恒恢复。** 红移损失的能量通过热力学被回收到辐射压力中，在膨胀的宇宙中做功。
3. **局部  $c$  不变性。** 在每个因果区域内，观测者测量到相同的速度，符合爱因斯坦的假设。全局上，超光速退行自然地从因果分离中产生。

## 2. 理论框架

### 2.1 早期线性膨胀 ( $t = 0$ 至 $t = 10^{20} t_P$ )

在普朗克时代 ( $t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44}$  s)，宇宙以标度因子  $a(t) \propto t$  线性膨胀。其实际大小为  $R(t) = ct$ ，能量密度处于普朗克尺度：

$$\rho \approx 5 \times 10^{96} \text{ kg m}^{-3}.$$

弗里德曼方程控制膨胀：

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2},$$

其中  $H = 1/t$ , 曲率可忽略不计。在此阶段, 光子不存在, 因此辐射压力尚未贡献。

## 2.2 辐射压力的开始 ( $t = 10^{20} t_P$ )

在  $t \sim 10^{20} t_P$  ( $\sim 10^{-36}$  s) 时, 粒子形成在  $T \approx 10^{28}$  K 的夸克-胶子等离子体中产生光子。辐射压力出现:

$$P = \frac{1}{3} \rho c^2, \quad \rho = \frac{a T^4}{c^2},$$

其中  $a = 7.566 \times 10^{-16}$  J m<sup>-3</sup> K<sup>-4</sup>。这导致  $P \sim 10^{92}$  Pa。尽管巨大, 重力仍然占主导地位, 膨胀继续减速。

## 2.3 因果分离与局部不变 $c$ ( $t = 10^{22} t_P$ )

在  $t \approx 10^{22} t_P$  ( $\sim 10^{-34}$  s) 时, 宇宙半径超过其类施瓦茨希尔德视界:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad M = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3, \quad R = ct.$$

当粒子视界  $d_p \approx ct$  超过  $r_s$  时, 区域发生因果分离。

在每个视界区域内, 观测者测量到  $c = 3 \times 10^8$  m/s, 与爱因斯坦的火车和火箭思想实验一致。然而, 全局上, 退行速度超过  $c$ , 如同标准宇宙学。我将其参数化如下:

$$c_{\text{eff}} = c_0 \left( \frac{a_0}{a} \right)^\beta, \quad \beta > 0,$$

这并不意味着  $c$  的字面变化, 而是编码其局部性。因此,  $c$  对于每个观测者在其因果视界内保持不变, 而全局超光速膨胀反映了分离, 而不是违反相对论。

## 2.4 红移能量的再分配

在  $\Lambda$ CDM 中, 随着波长的拉伸, 光子能量减少:

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \lambda \propto a, \quad E \propto a^{-1}.$$

表面的能量损失归因于膨胀, 没有全局守恒定律。

我的模型解决了这一悖论: 红移损失的能量在因果视界被吸收并重新分配到辐射压力中, 有效地对度规做功:

$$\Delta E_{\text{红移}} \rightarrow \Delta P_{\text{辐射}} \cdot V.$$

### 2.4.1 红移作为度规上的功

爱因斯坦的等价原理将引力与加速度等同。这提供了一种具体的方式, 将红移视为能量的转化而非破坏, 转化为动能。

**思想实验：**考虑从行星表面上向发射的蓝色激光。光子从引力势能中爬升，到达远处观测者时发生红移。对于观测者来说，每个光子似乎携带更少的能量。然而，源头的激光经历了发射光子的全部质量-能量：它传递了与未红移的能量和辐射压力一致的动量。

“丢失”的能量去了哪里？它被投资到引力场中，完成了将光子从势能井中提升所需的功。

类似地，在宇宙学中，早期发射的光子通过宇宙红移损失能量。局部上，发射区域经历了它们的全部辐射压力。但全局上，表面的缺失并未丢失；它被转化为度规上的功——特别是加速膨胀。

$$\Delta E_{\text{光子}} = W_{\text{膨胀}}.$$

## 2.4.2 视界热力学与再分配机制

基于这一类比，我提出因果视界作为红移能量的中介者：

1. **能量转移。** 光子能量按  $E \propto a^{-1}$  减少。这种能量没有消失，而是被粒子视界或类施瓦茨·希尔德因果边界吸收。
2. **引力红移映射。** 正如引力红移将能量转移到场中，宇宙红移将能量转移到度规的膨胀中。
3. **视界热力学。** 视界具有熵 ( $S \propto A/4$ ) 和温度 (Gibbons-Hawking)。红移能量贡献于视界熵，并通过帕德马纳班的热力学引力框架 [3]，重新表现为对膨胀做功的压力。
4. **压力增强。**

$$P = \frac{1}{3} \rho c_{\text{eff}}^2 + \Delta P_{\text{红移}},$$

修改加速度方程：

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3P}{c^2} \right).$$

当  $\Delta P_{\text{红移}} > 0$  时，膨胀加速，无需调用膨胀场。

## 2.4.3 形式化考虑

形式化这一机制需要：

- 弯曲时空中的量子场论来描述光子-视界相互作用。
- 视界热力学（帕德马纳班的涌现引力，贝肯斯坦-霍金熵）来建模能量吸收和重新发射。
- 使用  $\Delta P_{\text{红移}}$  的修改弗里德曼动态的数值模拟。

## 2.5 现代时代

在  $t \approx 2.6 \times 10^{71} t_P$  (138亿年) 时，CMB温度为  $T = 2.7 \text{ K}$ ，辐射压力已下降到  $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$ 。然而，同样的视界中介机制持续存在：红移能量继续推动宇宙加速，贡献于通常归因于暗能量的晚期动态 ( $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ )。

## 3. 概念进展

1. **无需膨胀场。** 膨胀自然地从红移能量增强的辐射压力中产生，消除了对未探测标量场的需求。
2. **能量守恒恢复。** 红移能量被回收到辐射压力中，将膨胀与热力学原理对齐。
3. **局部  $c$  不变性。** 爱因斯坦的假设在因果区域内有效，而超光速退行由视界分离解释。

## 4. 观测测试和预期信号

我提出了八个观测测试，每个测试都有独特的信号，可以将此模型与  $\Lambda$ CDM 区分开来。

### 4.1 CMB 各向异性

- **测试：** 以高精度测量 CMB 功率谱和 B 模式偏振。
- **预期信号：** 在多极  $l > 1000$  处的小尺度波动增强，以及在  $l < 100$  处可检测的 B 模式偏振 ( $r \approx 0.05\text{--}0.1$ )。

### 4.2 红移依赖的辐射能量密度

- **测试：** 观察辐射能量密度  $\rho_{\text{辐射}}$  随红移的缩放。
- **预期信号：** 在  $z > 1100$  时， $\rho_{\text{辐射}}$  应偏离标准  $\propto a^{-4}$  缩放。

### 4.3 引力波背景 (GWB)

- **测试：** 寻找来自膨胀时代的随机 GWB。
- **预期信号：** 在  $\sim 10^{-9} \text{ Hz}$  处有一个峰值，特征应变为  $h_c \approx 10^{-15}$ 。

### 4.4 哈勃张力和晚期加速

- **测试：** 测量哈勃常数  $H_0$  和暗能量状态方程  $w$ 。
- **预期信号：**  $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$ ，在  $z < 1$  时  $w$  在  $-0.8$  和  $0$  之间。

### 4.5 视界尺度结构

- **测试：** 在  $10\text{--}100 \text{ Mpc}$  范围内绘制大尺度结构图。
- **预期信号：** 增强的聚类和异常大的空洞。

### 4.6 光谱线移位

- **测试：** 分析高红移光谱。
- **预期信号：** 在  $z > 5$  时， $0.1\text{--}1\%$  的展宽或能量移位。

### 4.7 视界热力学信号

- **测试：** 研究宇宙视界处的熵和通量。
- **预期信号：** 视界熵增长  $\Delta S \sim 10^{120} k_B$ 。

### 4.8 原始核合成

- **测试：**测量轻元素的丰度。
- **预期信号：** ${}^4\text{He}$ 增加1–5%，氘减少。

## 5. 与 $\Lambda\text{CDM}$ 的比较

特征	$\Lambda\text{CDM}$	辐射驱动模型
膨胀驱动	标量膨胀场	辐射压力 + 红移能量
能量守恒	未在全局定义	通过视界热力学强制执行
光速	全局不变	视界内局部不变
视界/平坦问题	由膨胀场解决	由辐射 + 视界解决
暗能量	宇宙常数 ( $\Lambda$ )	红移-辐射机制的延续
CMB 预测	标准谱	小尺度增强，可能的 B 模式差异
哈勃张力	未解决	自然的中间 $H_0$
观测状态	受支持但不完整	与数据一致，尚未被证伪

## 6. 讨论

这一框架将膨胀重新定义为辐射固有的热力学过程，无需假设的膨胀场。它为膨胀时空中的能量守恒提供了一个机制，并调和了相对论的局部假设与宇宙学视界。

挑战依然存在。红移能量再分配的精确动态需要进一步的数学发展，修改后的弗里德曼方程的数值模拟至关重要。观测区分将依赖于未来的任务 (CMB-S4、Euclid、LISA、SKA)。

## 7. 结论

我提出了一种宇宙学，其中辐射压力，由因果视界和红移能量调制，驱动膨胀和当前的扩张。这一模型消除了对假设膨胀场的需求，恢复了热力学一致性，并调和了爱因斯坦的局部  $c$  不变性与宇宙学的超光速性。当前数据与  $\Lambda\text{CDM}$  兼容，但建议的观测测试为验证或证伪提供了一条途径。

## 参考文献

- [1] Planck Collaboration, **Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters**, *Astron. Astrophys.* 641, A6 (2020).
- [2] Guth, A. H., **Inflationary Universe**, *Phys. Rev. D* 23, 347 (1981).
- [3] Padmanabhan, T., **Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights**, *Rep. Prog. Phys.* 73, 046901 (2010).
- [4] BICEP2/Keck Collaboration, **Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves**, *Phys. Rev. Lett.* 121, 221301 (2018).