

# 从罗伯森到今天的宇宙学

Ya. B. Zel'dovich<sup>1)</sup>

爱因斯坦创立了引力的现代理论——广义相对论。这一理论将引力和宇宙学都几何化了。爱因斯坦本人曾设想一种空间封闭的定态宇宙。弗里德曼发现(或猜想)了一种爱因斯坦场方程的非定态解。哈勃发现了遥远星系的红移,从而证实了宇宙膨胀演化的观念。

罗伯森采取了一条在逻辑上和数学上都严格的途径。在假定宇宙是严格均匀和各向同性的情况下,他找出了所有可能的“宇宙学”。他的结果和弗里德曼的猜测一致但更为可信。

罗伯森继后还探讨了 this 解的所有观测性质:如天体的红移、角大小、亮度等与光从发射到接收所经历的时间的关系。

1965年发现了宇宙微波背景辐射,并在此基础上发展了热大爆炸理论。在此,我想强调与热大爆炸理论有关的两点:第一点是原始核合成。计算的氢、氦-4、氘和氦-3的丰度与观测的一致,肯定了我们对于宇宙最初几秒内演化情况的想法。另一方面,将已知的恒星和气体等所包含的物质总密度与由引力相互作用的观测确定出的物质总密度相比,发现90%的总物质密度是源于某种未知的物质。我们称它为暗物质。基础物理学并不排除暗物质的存在,但在目前还不能确切地预言它的性质。第二点是目前正在活跃地进行的宇宙大尺度结构的研究。已经发现,在小于100 Mpc尺度上,物质密度的分布是很不均匀的。

可视物质集中于恒星,它们又形成星系,星系分布也不均匀,形成星系团和超团。宇宙中还存在着巨大的尺度达50—100 Mpc的通常称为空洞的区域。这些区域中实际上没有星系存在。非均匀分布物质的引力不稳定性理论,可以定性地解释这些观测事实。但我们还远不能

定量和严格地解释我们周围宇宙的结构。

过去十年来的第二个主要成就是由古斯、林德和斯塔罗宾斯基所发展起来的宇宙暴涨理论。假定宇宙早期曾一度充满了相应于负压的标量场,暴涨宇宙学预言宇宙将产生指数膨胀。这一图象导致如下结论:宇宙现在实际上是平坦的,其总密度仅和哈勃常数有关。此外,宇宙暴涨理论解释了为什么从标准模型看来相距太远而不能相互影响的区域,却会有相同的情况。

以我看来,标量场观念的最重要结果是它对宇宙膨胀的解释。弗里德曼和罗伯森并未对今天观测到的膨胀作过解释。他们只说宇宙今天在膨胀是因为它早些时候在膨胀。当负压的概念被放进广义相对论方程后,导致引力的排斥而不是吸引。正是这种排斥给后来等离子体相的膨胀以初速度。暴涨理论所假定存在的标量场从未在实验室中被观测到,有可能不是标量场而是在广义相对论基本方程中的另一个几何项(如 $R^2$ 或 $R^2 \ln R$ ,  $R$ 是时空曲率)。这种项在许多方面与标量场类似。不管怎样,引力排斥和由此产生的指数膨胀现在看来至少在定性上已被很好地确立起来。

标量场(或几何)的量子零点振动是初始扰动的根源。这些初始扰动导致现在可视物质的不均匀分布。零点振动是海森伯测不准原理的直接结论:标量场 $\phi$ 相似于质点坐标;场对时间的导数 $\dot{\phi}$ 相似于速度或动量。测不准原理认为, $\phi$ 和 $\dot{\phi}$ 不能同时准确地确定,这意味着

1) 雅·夫·捷尔多维奇是苏联物理问题研究所教授,科学院院士。他在流体力学、广义相对论和宇宙学等领域的研究中都有重要贡献。1987年12月2日由于心肌梗塞去世。本文是根据他1987年4月29日发表的纪念罗伯森的讲演编译而成。

它们不能严格地在处处相同。零点振动是星系形成的种子，这种观点是萨哈罗夫在 1965 年提出的。很大距离上积累的起伏不一定小，格里斯丘克和我在 1978 年曾论述过，密度必须是准均匀的，但宇宙整体度规可以不是各向同性和均匀的。这导致在某些方面和罗伯森相反的图象。罗伯森事先假定宇宙是均匀各向同性的。现在的看法是宇宙度规根本不是均匀各向同性的。观测到的宇宙区域看来是均匀各向同性（甚至是平坦的），这是因为它只是整个宇宙的很小部分。

超大尺度时空度规具有栗弗西兹和卡拉特尼科夫引入的所谓准各向同性度规  $ds^2 = a^2 \times (dt^2 - dr^2)$  的形式。事实上，我们需要的只是这种度规的一种特殊情况。即弗里德曼-罗伯森-沃克尺度因子  $a$  不随时间改变，却含有一空间梯度充分小的任意函数因子  $f(\mathbf{r})$ 。  $f(\mathbf{r})$  的形式由暴涨阶段中量子起伏的情况决定。

什么是将来的宇宙学？考虑了量子起伏的标量场理论，可导致存在着永恒宇宙的可能性。由于扰动而使标量场增加的区域将较其它区域膨胀更久更快，这样的膨胀可以给出一幅起伏的但又是持久的总的宇宙图象。另一方面，如

果宇宙是封闭的并含有标量场，宇宙就有可能从通过一次量子跃迁而产生出来的。如特莱恩和弗明所指出的，这种宇宙的创生之可能，首先是因为封闭世界的总能量为零。标量场的能量被势能为负的引力相互作用所抵消。这种性质对于广义相对论中的所有封闭流形都普遍成立。

暴涨理论在小的新诞生的宇宙和大的充满等离子体的宇宙以及更大的今天的宇宙之间建立了一座桥梁。前面谈到的是与早期宇宙有关的问题以及早期宇宙和现今宇宙的结构间的联系。未来几十年内的宇宙学研究，将以它们为特征。

应当指出，宇宙学现在应用了带有很多假定的基础物理学，它们尚未得到任何实验证实。我们将物理定律外推到目前最大加速器所能达到的  $10^{15}$  倍以上的能量范围。一个新的分支学科诞生了，即应用天文学知识来发现（至少限定）那些不可能直接由实验达到的范畴内的基本物理定律。

（邓祖淦根据 Physics Today 1988 年第 3 期第 27 页编译）

## 横向塞曼激光器<sup>1)</sup>

横向塞曼激光器 (TZL) 的优异特性是：可同时产生两个垂直偏振的线偏振光，二者之间的频差从几十千赫到几百千赫（取决于磁场强度、谐振腔的各向异性性和激活介质的非线性），频差连续可调；具有高的频率稳定性和频率再现度。因此，它在精密干涉计量，晶体旋光性和双折射的检测，多普勒测速等方面有广泛应用前景。

TZL 的工作原理是基于横向磁场（磁场方向垂直于光的传播方向）下的反常塞曼效应和激光谐振腔的各向异性。原子的发射光谱在磁场作用下发生分裂。在没有谐振腔的作用时，

沿光的传播方向可接收到三种线偏振光： $\pi$ 、 $\sigma_+$  和  $\sigma_-$ ，它们分别对应于磁量子数之差  $\Delta m = 0, \pm 1$ 。而在激活腔中，由于腔的非线性作用， $\sigma_+$  和  $\sigma_-$  合二为一，成为单一的  $\sigma$  成分。此时，只接收到两个垂直偏振光： $\pi$  和  $\sigma$ 。其间频差为

$$f_b = \nu_\pi - \nu_\sigma,$$

$\nu_\pi$  和  $\nu_\sigma$  分别为  $\pi$  成分与  $\sigma$  成分的频率。 $f_b$  与腔失谐量  $\Delta\omega$  之间的关系曲线（称拍频调谐曲线）呈 S 形（或倒 S 形）。

$f_b$  由三个因素决定：（1）谐振腔两端反射

1) 本发明专利号 86 2 07157，摘要见《实用新型专利公报》第 3 卷第 29 号（总第 86 期）1987 年第 57 页。