

# 最初三分钟

宇宙起源的现代观点

【美】 S. 温伯格 著

## 内 容 简 介

宇宙是如何起源的，自古以来一直是人类最感兴趣和不断探索的问题，历史上曾经出现过各种各样的神话故事，但宇宙起源本身却是一个科学问题。本世纪二十年代，有人根据一些理论，提出了宇宙起源于大爆炸的学说。六十年代中期，天文学上发现了3K宇宙背景辐射，被认为是这种大爆炸的遗迹。因此，大爆炸学说受到了科学界广泛的重视和注意。本书根据天体物理学上的发现，描写了大爆炸最初三分钟的情况，对宇宙早期的温度、组成物及其密度等变化过程，作了比较浅显的阐述，并介绍了有关的观测结果与理论解释。本书主要介绍宇宙膨胀，宇宙微波辐射，早期宇宙的现代论点及其论据。论点清晰明确，反映了现代科学研究方法的严谨性。书后附有专门术语解释与有关的数学补充。

本书适合于中等以上文化水平的读者阅读。

Steven Weinberg

THE FIRST THREE MINUTES

*A modern view of the origin of the universe*

Basic Books, Ins., Publishers, New York

### 最 初 三 分 钟

宇宙起源的现代观点

[美] S. 温伯格 著

洗鼎钧 译

洗鼎昌 邹振隆 校

责任编辑 陈咸亨

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1981年12月第一版 开本：787×1092 1/32

1981年12月第一次印刷 印张：5

印数：0001—7,750 字数：108,000

统一书号：13031·1767

本社书号：2405·13—3

定价：0.65元

## 中译本前言

宇宙是如何起源的？自古以来一直是人类最感兴趣和不断探索的问题，历史上曾经出现过各种各样的神话故事，但宇宙起源本身却是一个科学问题。近年来由于科学技术的发展，在观测宇宙方面得到了不少重大发现，1965年发现的3K宇宙微波背景辐射，就是其中最重要的一个，它使得十九世纪二十年代由勒梅特提出的，四十年代由加莫夫加以发展的“大爆炸学说”，又受到了科学界的重视和注意。大爆炸模型认为，宇宙是由高度致密和高度炽热的均匀物质，有时称之为原始火球、原始原子或宇宙蛋的爆炸而形成的，而3K微波背景辐射被认为是这种大爆炸所留下的遗迹。因此，十多年来探索早期宇宙起源的历史，就成了当代宇宙学上的重要课题。

本书作者温伯格是著名的美国物理学家，1979年诺贝尔物理学奖金获得者，对基本粒子物理学和天体物理学都有精湛的造诣。他在本书中以生动的笔调，严格的科学性和清晰的逻辑性，系统地介绍了宇宙微波背景辐射发现以来所得到的有关宇宙早期的新知识，特别是对宇宙最初三分钟的情况作了深刻的具有说服力的阐述。因此本书出版后，立即获得好评。例如，著名物理学家、诺贝尔物理学奖金获得者李政道教授指出：“我以极大的兴趣读了温伯格教授的《最初三分钟》，作者以严格的科学准确性，生动而清楚地介绍了我们宇宙的这一短暂而重要的时刻，这的确是值得称道的成就。”美国著名科普作家阿西摩夫指出：“我曾接触过不少描述宇宙早期历史的读物。一直到读了这本书之后，我才认识到，专门的观

察和详细计算的结果,能使这个问题如此明白易懂。”从这些评述可以看出,本书是阐述现代宇宙起源观点的一本优良读物,为此,曾获得 1978 年美国卡林格科普读物奖金。

但是,关于宇宙起源问题,无论在哲学上和科学上都是一个探索性的问题,目前科学界提出了各种学说,大爆炸模型只是其中之一。尽管已有一些天文学上的发现支持这一观点,但仍处在探索阶段,是否符合客观实际,尚有待于进一步观测来检验。我们将此书译成中文出版,旨在向我国读者介绍这一正在发展中的科学理论。

## 原 序

本书是根据 1973 年 11 月我在哈佛大学学生科学中心的讲话写成的。基础丛书主编和出版者厄文·格拉克斯 (Erwin Glikas) 从我们共同的朋友丹尼尔·贝尔 (Daniel Bell) 那里知道了这个讲话,便怂恿我将它写成一本书。

最初,我对这个主意没有多大兴趣。虽然我常常也对宇宙论作一点探索,不过我的工作主要是有关基本粒子理论方面的。再说,在过去几年,基本粒子理论特别活跃,我已经花费了太多的时间去为一些杂志撰写非专业性的文章,因此我非常渴望将全部时间用到我的本行上,为《物理评论》撰稿。

然而,我发觉我自己情不自禁地想写一本关于早期宇宙的书,还有什么比创世纪问题更有趣呢? 况且正是在宇宙开始时,特别是在最初的百分之一秒中,宇宙学问题和基本粒子理论是会合在一起的。最重要的是在过去十年里,一个被称为“标准模型”的有关早期宇宙事件的进程的详细理论已经被广泛接受,所以现在正是写有关早期宇宙问题的好机会。

能够说出宇宙在最初的一秒、一分、或一年的终了时是什么样子,是一件了不起的事情。物理学家最喜欢用数字说明问题,希望能够说出在某时某刻宇宙的温度、密度和化学组成是什么数值。说实在的,对这些事情虽然我们还未曾彻底搞清楚,但是令人振奋的是,我们现在总算能多少有点把握地说一说这些事情了。本书要告诉读者的就是这个令人振奋的好消息。

我最好说一说本书是为哪些读者写的。本书的读者对象

是一些虽然并不精通数学和物理，但却愿意花费功夫去弄通一些详尽论据的读者。虽然在本书里，我必须引入一些相当复杂的科学概念，但是在正文内除了算术之外没有用到其他数学工具，也不要求读者预先多少有点物理学和天文学知识。对每个科学术语，第一次出现时我都尽量仔细地给它下一个定义，并且在本书末还附有一个天文学和物理学的术语解释。我甚至只要有可能，就将数字写成一千亿，而不用更方便的科学记数法  $10^{11}$ 。

然而，我决不是说我企图写一本容易读的书。一个律师要为普通读者写点什么时，他会设想他们不懂法律法语 (Law French) 或者反永久所有权法 (The Rule Against Perpetuities)。但他决不会因此低估读者，亦不会屈尊俯就。而我想照他的办法行事。我想象我的读者是一个精明的老律师，他的用语和我的用语不一样，但是，他仍然希望先听到一些有说服力的论据，然后作出一个决定。

我在正文后面还附加了一个数学附录。这是为想知道书中某些论据是如何计算出来的读者准备的。这里用到的数学在程度上相当于任何物理学科或数学学科大学生的水平。幸亏宇宙学里最重要的计算都相当简单，只在某些地方才用到更精致的广义相对论或者核物理学。如果读者需要达到更专门化的水平，他可以参阅“进一步参考读物”所列出的书目，其中也包括有我本人写的一些内容较深的书。

我还应当说明本书所拟涉及的题材。本书肯定不是一本宇宙学的全面读物。在宇宙学中有所谓“经典”的部分，它主要涉及目前宇宙的大尺度结构：关于旋涡星云是否在银河系外的争论；遥远星系的红移及其与距离的关系的发现；以及爱因斯坦 (Einstein)、德西特 (de Sitter)、勒梅特 (Lemaître)、弗里德曼 (Friedmann) 等人的广义相对论宇宙模型等等。宇

宙学的这一部份在许多名著里已有详细的介绍，因此，我不打算在这里赘述。本书主要叙述早期宇宙的问题，特别是在1965年发现了宇宙微波背景辐射以后所得到的早期宇宙的新知识。

当然，宇宙膨胀理论是早期宇宙的现代观念的基础。因此，在第二章里，我不得不对宇宙学中的较“经典”的几个方面作简略介绍。我相信这一章能够为一些即使全然不懂宇宙学的读者提供适当的背景知识，以便他们了解在本书其它各章中将要涉及的关于早期宇宙理论的新发展。如果读者希望得到有关宇宙学中这一较老部分的全面介绍，他可以参阅“进一步参考读物”所列出的书籍。

另一方面，我还没有见到任何有关宇宙学新发展的有条理的历史陈述。因此，我只好自己作一些发掘工作了。我特别想要弄清楚一个令人迷惑的问题：为什么直到1965年之前，人们一直没有对宇宙微波辐射背景进行研究（这在第六章里讨论）。虽然，我极其尊重科学史所需要的细节问题，以免对这些历史进程造成任何错觉。但这并不是说，我认为本书是这些发展的最终确立的历史。相反，假如有真正的科学史工作者用这本书作为起点而写出一本近三十年来的宇宙学研究史的话，我将会十分高兴。

我极其感谢基础丛书的编者厄文·格拉克斯和法莱·菲力普斯 (Farrel Phillips)，他们对把我的手稿整理成书提出了不少宝贵的建议；在写本书时，我的物理学和天文学的同事们也给了我极多的帮助，特别是拉尔夫·阿尔法 (Ralph Alpher)、伯纳·伯克 (Bernard Burke)、罗伯特·迪克 (Robert Dicke)、乔治·费尔德 (George Field)、格雷·费因伯格 (Gray Feinberg)、威廉·阜勒 (William Fowler)、拉伯特·哈尔曼 (Robert Herman)、福莱德·霍伊尔 (Fred Hoyle)、吉姆·皮伯斯

(Jim Peebles)、阿尔诺·彭齐斯 (Arno Penzias)、比尔·帕莱斯 (Bill Press)、厄特·帕肖尔 (Ed Purcell) 和罗伯特·华格纳 (Robert Wagoner)，他们不厌其烦地阅读了本书的各部份，并提出了许多宝贵意见；我同样地感谢艾萨克·阿西摩夫 (Isaac Asimov)、伯纳·科恩 (I. Bernard Cohen)、马尔他·里勒尔 (Martha Liller) 和菲力普·摩里逊 (Phillip Morrison)，他们给我提供了不同课题的资料；我特别感谢尼格尔·卡尔德 (Nigel Calder)，他全部读过本书的第一稿，并且提出一些非常有益的意见。我不能指望这本书全无错误或含混不清之处，但是由于我有幸得到上述各位惠予帮助，使本书得以写得比当初要清晰及准确得多。

温 伯 格

1976年7月于马萨诸塞州坎布里奇



# 目 录

第一章	引言 .....	1
第二章	宇宙的膨胀 .....	7
第三章	宇宙微波辐射背景 .....	37
第四章	热宇宙的组成 .....	64
第五章	最初三分钟 .....	81
第六章	历史的曲折 .....	96
第七章	最初百分之一秒 .....	104
第八章	结束语: 展望将来 .....	117
附录	.....	121
表 1	.....	121
表 2	.....	122
术语解释	.....	123
数学补充	.....	133
进一步参考读物	.....	144

## 第一章 引 言

关于宇宙的起源，冰岛文学家斯托里森（Snorri Sturluson）在 1220 年左右编写的北欧神话集《新埃达》中已有所阐述。按这本神话集所说，最初是一无所有的。既没有地，也没有天，只有一个裂口，也没有草原。而在这混沌虚无的北方和南方，则是冰雪的区域尼夫尔翰和火的区域穆斯皮尔翰。穆斯皮尔翰的火融化了尼夫尔翰的一些冰。在融化的水滴里产生了一个巨人伊默。伊默吃什么呢？啊，看来还有一头母牛阿豪姆拉。可是母牛又吃什么呢？好吧，还要有点盐。故事就是这样继续下去。

我不想冒犯宗教感情，即使是北欧维京海盗的宗教感情。但是，我想这个故事实在不是一幅令人满意的宇宙起源的图景。且不说对那些无稽之谈的非议，只就故事本身，它所引起的问题就和它解答的问题一样多，而每个疑问的解答都要求初始条件的进一步复杂化。

我们当然不会只在这里嘲笑这本《新埃达》，而放弃对宇宙起源的推敲。追溯宇宙起源的这个念头是不可抗拒的。自从十六至十七世纪开始出现现代科学以来，物理学家和天文学家曾一次又一次地回到宇宙起源问题。

然而，这种探索经常遭到非议。我记得在五十年代里我还是一个学生，刚刚开始做研究（对另外一些问题）的时候，人们普遍地认为，一个认真的科学家根本不值得在早期宇宙的研究上去花费时间。这种说法当时不无根据。在现代物理学和天文学的主要历史里，简直就没有足够的观测的和理论的

基础，足以建立早期宇宙的历史。

可是，就在这刚刚过去的十年里，一切都改变了。一个早期宇宙理论已经被广泛的接受，以致常常被天文学家称为“标准模型”。这个理论多少有点象有时被称为“大爆炸”的理论，但是它进一步对宇宙的内容作了明确得多的规定，这个关于早期宇宙的理论，就是本书的主题。

为了使读者了解本书的梗概，一开始就简要地介绍一下从这个“标准模型”得到的早期宇宙历史是有益的。当然，这也只是走马观花，它的细节和使我们相信它的证据，则分别在以后各章中叙述。

最初发生了一次爆炸。这不是习见于地球上发生在一个确定的点，然后向四周的空气传播开去的那种爆炸，而是一种在各处同时发生，从一开始就充满整个空间的爆炸，爆炸中每一个粒子都离开其他每一个粒子飞奔。“整个空间”可以指的是整个无限的宇宙，或者指的是一个就像球面一样能弯曲地回到原来位置的有限宇宙。无论哪一种都不是容易理解的，但这都与我们无碍；对于早期宇宙来说，宇宙究竟是有限的，抑或是无限的，这个问题几乎完全无关重要的。

在爆炸发生后的百分之一秒，即我们能多少有把握谈论的最早时刻，宇宙的温度大约是摄氏一千亿度( $10^{11}^{\circ}\text{C}$ )。这比最热的恒星中心还要热，事实上，它是这么热，以致不可能聚集任何普通的物质成分，即不可能聚集成分子、原子、甚至原子核，能够在爆炸中相互飞速地分离的只是各种基本粒子，它们是现代高能核物理的主题。

在本书里，我们将会一次又一次地碰到这些粒子。在这里我们只提一下在早期宇宙里存在最多的几种，而更详细的解释则留待第三章和第四章。一类大量存在的粒子是电子，就是在电线的电流中运动的那种带负电荷的粒子，它们组成了

现在宇宙中所有原子和分子的外层部分。另外一种在早期宇宙里非常丰富的粒子是正电子，这是一种质量和电子完全相同，但却带着正电荷的粒子。在今天的宇宙里，正电子只有在高能实验室里找到，或者在某些放射性现象中找到，或者在宇宙线和超新星爆炸等剧烈天文现象里找到，然而，在早期宇宙里正电子的数目几乎完全和电子相等。除电子和正电子之外，还有数目大致相等的各种中微子。这种幽灵般的粒子既没有质量，也没有电荷。最后，宇宙里还充满了光。但是不必要把光和粒子分别处理。量子力学告诉我们，光是由质量和电荷都为零的粒子——光子所组成的。（每当灯泡的灯丝里的原子从一个较高能级改变到一个较低能级时便发射出一个光子。从一根灯丝发射出的光子是很多的，以致看起来它们组成为连续的光线。可是一个光电管可以逐个地数出单个的光子。）每个光子携带着一定数量的能量和动量，大小取决于其波长。光子的数目和平均能量和电子、正电子、或者中微子的数目大致相等。

这些粒子(电子、正电子、中微子、光子等)不断地从纯能量中产生出来，经历很短的寿命后又湮灭了。因此，它们的数目并不是预先注定的，而是由产生过程与湮灭过程的平衡确定的。从这个平衡我们可以推算出，这盆宇宙汤在温度为一千亿度时的密度是水的四十亿( $4 \times 10^9$ )倍。此外，宇宙汤内还掺有很少量的较重粒子：中子和质子——它们组成今天世界里的原子核(质子是带正电荷的；中子比质子稍微重一点，是电中性的)，比例大致是每十亿个光子(或正电子、电子、中微子)对一个质子和中子。十亿个光子对一个核粒子这个比值是建立宇宙标准模型的关键性数值，必须由观测来得到。在第三章将要讨论到的宇宙辐射背景的发现，实际上就是这个数值的测量。

随着爆炸继续下去，温度下降了。在约十分之一秒以后下降到摄氏三百亿( $3 \times 10^{10}$ )度；约一秒以后降至一百亿度；十四秒后降至三十亿度。冷却到这个地步以后，电子和正电子湮灭的速度开始快于它们从光子和中微子重新产生出来的速度。这种物质湮灭过程所释放出的能量暂时延缓了宇宙的冷却速度，不过温度仍然在下降，在最初的三分钟终了时，下降到十亿度。这个温度已经足够低，能使中子和质子开始组合成复合的原子核。首先是由一个中子和一个质子组合成一个重氢(氘)核。由于这时的密度还足够大(稍为比水小一些)，所以这些氘核可以迅速地组成最稳固的轻原子核，即是由两个质子和两个中子组成的氦核。

最初三分钟终了时宇宙的组成主要是光、中微子和反中微子。核物质仍然只占很小一个份额，现在它们当中有百分之七十三是氢，有百分之二十七是氦，还有跟这些核物质同样稀少的电子，它们是经过电子-正电子湮灭期以后剩下的。所有这些物质继续飞驰分离着，一直在冷却下去和稀薄下去。又过了几十万年，温度终于冷却到足够低，可以让电子与氘核和氦核组成原子。这样组成的气体由于引力影响而形成气团，最后凝聚为今日宇宙里的星系和恒星。但无论如何，星辰得以开始它们的生命的组成物，正是在这最初三分钟所产生的。

上面简单叙述的标准模型仍然不是关于宇宙起源可以想得出的最令人满意的理论。就和《新埃达》一样，在阐述宇宙的开始时，或者在第一个百分之一秒左右，这个理论仍然存在着令人困惑的含混之处。再则，还有必要去确定起始条件，特别是光子对核粒子的初始比率——十亿比一，而这是令人不愉快的工作。我们宁愿在理论里有更大的逻辑必然的观念。

例如，另一个称为“稳恒态模型”的理论在哲学上就有更大的吸引力。这个模型是在四十年代由赫尔曼·邦迪(Herman Bondi)，托马斯·戈尔德(Thomas Gold)和以稍为不同形式，由弗里德·霍伊尔(Fred Hoyle)提出的，在这个模型里，宇宙永远都是和现在一样。当它膨胀时，在星系分离的缝隙里，有新的物质产生。这个理论隐含了所有关于宇宙为什么会是这个样子的问题的答案。答案是宇宙之所以如此，是因为只有如此它才能保持着永远不变。宇宙起源的问题被一笔勾销了。在这个理论里根本不存在早期宇宙。

那么我们怎么会得出“标准模型”的呢？它是怎样胜过诸如稳恒态模型等其它理论的呢？它之所以成立，是因为近代天体物理学基本上是客观的，人们对它达到了一致的看法，既非由于哲学偏爱的变迁，也非由于天体物理学巨匠们的影响，而是由于来自经验数据的压力。

下面的两章里将介绍从天文观测得到的两个伟大发现：遥远星系的退行和充斥宇宙之间的微波辐射，标准模型正是根据它们产生的，这对于科学史工作者是一个饶有兴味的故事，其中充满了错误的起点，失去的机会，理论的先入之见和个人的作用。

在叙述了观察到的宇宙学现象之后，我将试图把各别的资料并在一起，以组成一幅早期宇宙物理条件的连贯的图画，这将更具体地把我们带回到最初的三分钟去。我们将会象看电影那样，按顺序地看到宇宙的膨胀、冷却和形成。我们还将试图看一下那个仍然笼罩着迷雾的时期(最初的百分之一秒)和在此之前的事情。

我们可以确信这个标准模型吗？它会不会由于新的发现而被推翻，而被别的宇宙起源说所超过？或者，甚至稳恒态模型会东山再起？也许会。我不能否认在我写到最初三分钟的

事情时,似乎是充满信心,但心里并不是那么踏实。

但是,即使它最后被别的理论所取代了,标准模型终究在宇宙学历史里起过重要的作用。现在(虽然是在最近的十多年以来),把物理学及天体物理学的理论想法在标准模型中计算出其结果来进行检验,已经是正规的方法。标准模型已经经常被用作论证天文观测计划的理论基础。这样,标准模型为理论工作者和观测者提供了基本的共同语言,使他们了解彼此在做些什么。如果有一天标准模型被一个更好的理论所取代的话,这个理论很可能是由于受到标准模型启发而进行的观察和计算所得到的。

在最后一章里,我将稍稍谈到宇宙的将来。它可能永远不断地膨胀下去,变得更冷、更空虚、更死寂;或者它可能重新收缩,将星系、恒星、原子和原子核重新粉碎成原来的组成粒子。这样我们在预言最后的三分钟里的事件进程时所遇到的问题,便和我们在回顾最初的三分钟里所遇到的问题是同样的了。

## 第二章 宇宙的膨胀

人们仰望夜空，总会得到一个强烈的印象，认为宇宙是不变的。诚然，浮云掩月，天空绕北极星迴旋，以更长的时间看还有月亮圆缺，月亮和行星又在星空背景上运行。不过，我们知道，这些只不过是在我们太阳系里的运动所产生的局部现象。在行星以外，所有恒星都象是永恒不动的。

然而，恒星事实上却是在运动着的，而且速度可以达到每秒几百公里，一颗快速的恒星每年走一百亿公里左右。然而，即使离我们最近的恒星的距离也都比这个数字大一千倍以上，所以它们在天穹上的视位置变化得非常缓慢。例如，称为巴纳德（Barnard）星的一颗较快的恒星，它的距离是56万公里，它垂直于视线的运动速度是大约每秒89公里或每年28亿公里。结果，它的视位置每年只移动0.0029度。天文学家把近处恒星在天空中视位置的移动称为“自行”。至于更遥远的恒星，由于它们的视位置变化得更缓慢，即使是最耐心的观测，也发现不了它们的自行。

我们马上就可以知道宇宙不变的印象是虚假的，我们在下面介绍的观测将要证明，宇宙处于剧烈的膨胀状态中。一些称为星系的大恒星岛正以接近光速的速度离开我们飞驰而去。更进一步，我们可以反推出在很久以前它们必定都挤在一起。那时它们挤得这样紧，以致无论星系、恒星、甚至原子或原子核都不可能分离存在。这就是我们称为“早期宇宙”的时期。本书的主题就是关于“早期宇宙”的事情。

我们对于宇宙膨胀的认识完全是基于如下的事实：天文



学家测量一个发光体沿着视线方向的运动，远比测量它垂直于视线方向的运动精确得多。其方法应用了任何波动都具有的一种熟知的性质——多普勒效应。当我们观测从一个固定源发射的声波或光波时，到达我们的仪表的每两个波峰之间的时间间隔，都等于它们离开发射源的间隔。但是，当发射源是在离开我们而运动时，相继的两个波峰之间的抵达时间间隔，便要比它们离开发射源时的时间间隔增大了，因为每一个波峰都要比前一个波峰多走一点路程，才能抵达我们这里。波峰之间的时间间隔等于波长除以波速，因此，我们会觉得，从一个离开我们而运动着的发射源发出的波的波长，要比这个发射源在静止时所发射的要长些。（具体地说，波长的相对增长等于波源运动速度和波速之比值。见数学附注1。）同样地，假如波源在向我们移动，两个波峰到达的时间间隔将会缩短，因为每个波峰都要比前一个波峰走的路程短些。这好象一个旅行着的推销员在他的旅程中每星期都定期地发一封家信，当他的旅程是离家而去时，每一封信都比前一封信的邮程长一些，因此，他的家收到的每两封信相隔的时间便要超过一个星期；而当他的旅程是向家而来时，每一封信的邮程都比上一封短一些，于是他家里不到一个星期便接到一封信了。

今天要看到声波的多普勒效应是很容易的。你只要站在公路的旁边，留意一辆快速行驶汽车的引擎声音，当它向你行驶时声音的音调会高些，而驶过以后音调便变得低些。在光波及声波中的这个效应，最先是由布拉格的一个数学教授 J. C. 多普勒在 1842 年明确指出的。荷兰气象学家拜斯-巴洛特 (C. H. D. Buys-Ballot) 在 1845 年用一个很有趣的试验，测出了声波的多普勒效应。他让一队喇叭手站在一辆从荷兰乌德勒支附近疾驶而过的火车敞蓬车上吹奏，由此测出了音调的改变。