

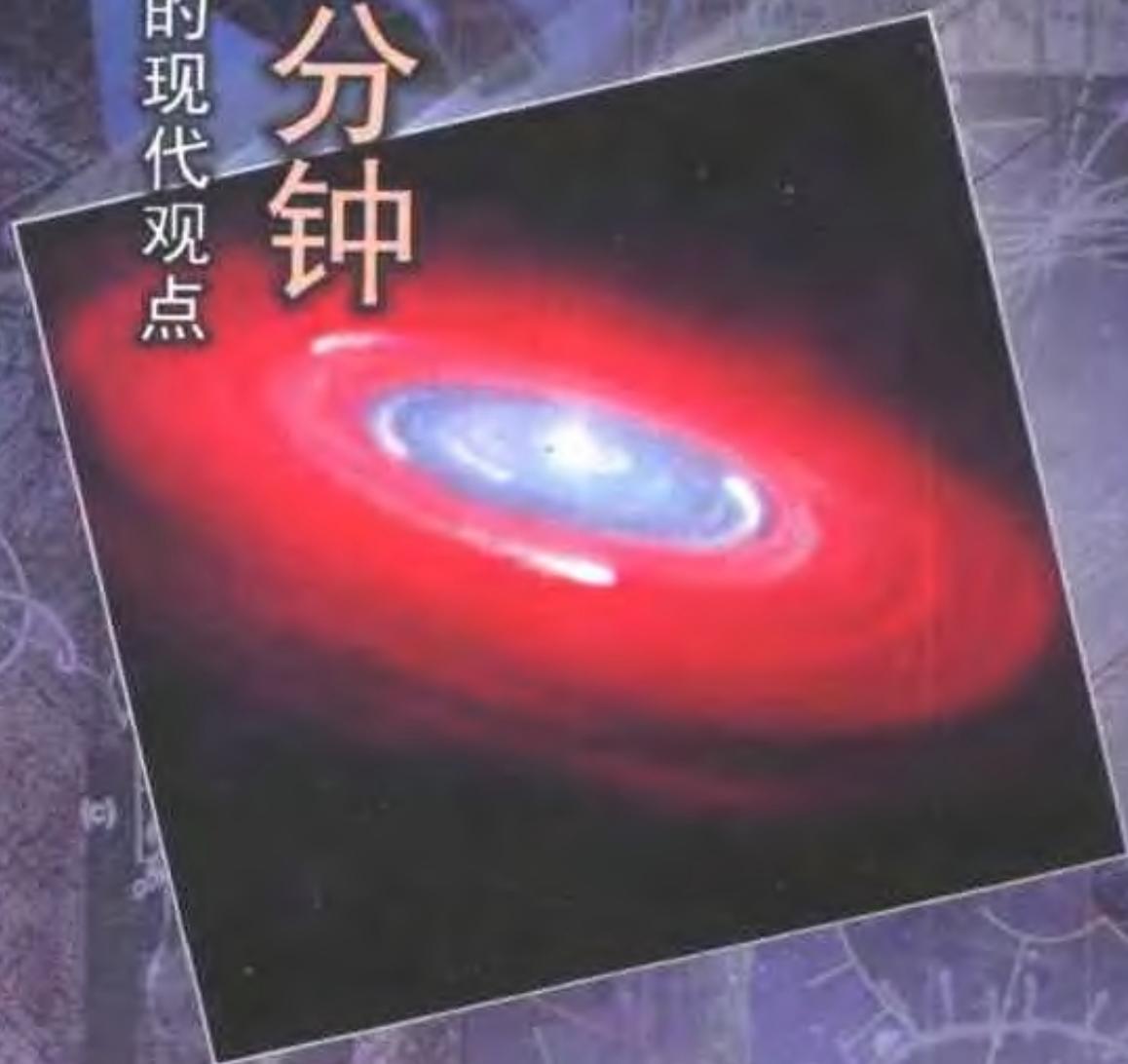
第二辑

科学与人译丛

〔美〕史蒂文·温伯格 著

# 宇宙最初三分钟

——关于宇宙起源的现代观点



中国对外翻译出版公司

# 宇宙最初三分钟

——关于宇宙起源的现代观点

[美] 史蒂文·温伯格 著

张承泉 高鼎新 李靖 译

中国对外翻译出版公司

**图书在版编目 (CIP) 数据**

宇宙最初三分钟：关于宇宙起源的现代观点 / (美) 温伯格 (Weinberg, S.) 著；张承泉等译. - 北京：中国对外翻译出版公司，1999

(科学与人译丛)

书名原文：The First Three Minutes

ISBN 7-5001-0595-9

I. 宇… II. ①温… ②张… III. 宇宙-起源-研究  
IV. P159.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 45137 号

版权登记号图字 01 - 1999 - 1701

---

出版发行/中国对外翻译出版公司

地 址/北京市西城区太平桥大街 4 号

电 话/66168195

邮 编/100810

责任编辑/黄义林

封面设计/常燕生

排 版/北京市乾坤灰色系统工程研究院

印 刷/北京市通州区鑫欣印刷厂

经 销/新华书店北京发行所

规 格/850 × 1168 毫米 1/32

印 张/5.75

版 次/2000 年 1 月第一版

印 次/2000 年 1 月第一次

---

ISBN 7 - 5001 - 0595 - 9/G·116 定价：9.00 元

## “科学与人译丛”出版说明

英国著名科学专栏作家布赖恩·阿普尔亚德在其《理解现在——科学与现代人的灵魂》一书中有这样一段话：

“1609年，加利莱奥·伽利略使用一架望远镜观看月亮。这一时刻，对世界的意义如此重大，以至人们将它与耶稣的诞生相提并论。因为，就像在伯利恒，自这一时刻，人类生活中的不可能成为可能。”

阿普尔亚德据此将科学划分为伽利略之前的科学，或称“智慧”，以及从1609年开始的现代科学。前一科学建立在推理基础上，后一科学建立在观察与实验基础上。经过如此划分，我们习以为常的科学，竟然只有400年的历史。

但人类就在这400年内经历了飞速发展。

我们有了蒸汽机，有了轮船，有了电话、电报，有了飞机、火箭，有了电视、电脑、互联网络，我们还有重力场理论、元素周期表、量子力学、相对论乃至被称为“自然中最基本物体”的超弦。工业革命、农业革命、信息革命使人类的社会生活发生了前人难以想象的变化。

人类改造了自然，也改造了人类自己。回顾这一切，人类完全有理由感到自豪。因为，人类就像上帝，也有自己的“创世纪”。人说，要有科学，就有了科学。科学是好的，它行之有效。

然而，“创世纪”中写道“到第七日，上帝造物的工已经完毕，就在第七日歇了他一切的工，安息了”。而人类的工却没有完毕，400年后的今天仍然不能安息。

就像有光必有影，人在发现、发明、创造、拥有上述一切的

同时，还得到了原子弹、氢弹、核泄漏、酸雨、温室效应、臭氧层空洞乃至伴随科学技术而来的种种风险。

人类曾以为已找到了通往自由王国的必由之路，他将乘着科学的飞船，摆脱一切束缚，重新确立自己在宇宙中的位置。但在科学爆炸的 20 世纪，人类终于开始反思：

科学行之有效，但它是否就是真理？

为此，我们编辑了这套《科学与人译丛》，陆续分辑推出。其中，有对信息崇拜的批判，有对生命起源的求索，有对技术所导致风险的分析，有对世界最新科学动态和研究方向的展望。数学家用对策论证明，完全的民主实际上并无可能；物理学家提出全新的超弦理论，试图统一描述所有的力、物质的所有基本粒子和时空，继量子力学和相对论之后，成为“第三次物理学革命的重要标志”……《译丛》汇集了物理学家、数学家、生物学家、天文学家、哲学家、人类学家、伦理学家……自本世纪后半期、尤其是在本世纪末打通自然科学与社会科学之间的隔膜，对科学这一决定人类命运的工具的深刻思索。通过这套丛书，我们期望读者可以对科学的现状、科学的未来、科学的正面与负面效应，有一个较为全面的了解，更好地认识科学、掌握科学、利用科学。

中国对外翻译出版公司

## 前 言

本书的缘起是 1973 年 11 月我在哈佛大学本科生科学中心落成典礼上的一次讲话。通俗读物出版社的总裁兼出版人欧文·格莱克斯从我们一个共同的朋友——丹尼尔·贝尔那里听说了这次讲话，于是敦促我将它改写成书。

起初，我对这个主意并不热心。虽然我一直时不时地在宇宙学方面做一点研究，但我的工作涉及更多的却是基本粒子理论，即研究极小物质的物理学。再者，基本粒子物理学在过去几年中一直热闹非凡，而我却把过多的时间用在了别处，即为各种杂志撰写非专业性文章。我很想再次全身心地投入到本应属于我的领域——《物理学评论》。

但是，我发现无法控制自己，撰写一本关于早期宇宙的书的想法一直萦绕在我的脑际。有什么能比“创世纪”的问题更有意思呢？而且，恰恰是在早期宇宙方面，尤其是在最初百分之一秒的时候，基本粒子理论的问题和宇宙学的问题汇合在了一起。最重要的是，这是写一写早期宇宙的大好时机。在过去几十年中，一种详尽的关于早期宇宙中事态发展经过的理论，作为一种“标准模型”，得到了广泛承认。

能够说出在最初一秒钟、最初一分钟或最初一年，宇宙是什么样子，那真是一件了不起的事情。对一个物理学家来说，令人兴奋的是能够在数值上把情况搞清楚，能够说出在某某时候，宇宙的温度、密度和化学成份是这样或那样的值。的确，我们对所有这些都无绝对把握，但我们现在谈论起来能够有一点信心，就

足以令人兴奋了。我想向读者表达的也正是这种兴奋。

我最好讲一讲本书针对的是哪些读者。它是为这样一些读者撰写的：他们愿意对一些详细的论证进行思索，但对数学或物理学又不在行。虽然我必须介绍一些较为复杂的科学思想，但在本书正文中却没有使用超出算术范围的数学，也不需要读者事先具备什么物理或天文学知识。对于初次用到的科学术语，我都小心地给出定义，此外，我还提供了一份物理学和天文学术语词汇表（见附录）。在可能的情况下，我还对数字采取了诸如“1000亿”的写法，而非使用更为方便的科学记法： $10^{11}$ 。

然而，这并不意味着我在尽力写一本简易读物。当一个律师针对普通公众写东西时，他的假设是他们不了解法律专用法语或“禁止永久拥有房产之规定”，但他并不将事情想到最糟，也不摆出一副屈尊俯就的样子。我想将这一句恭维话反过来使用：我心目中的读者是些精明的资深律师，他们讲的不是我的语言，但他们想先听一听某些令人信服的论点，然后再拿主意。

针对那些确实想了解作为本书论据基础的运算的读者，我编写了“数学补充材料”，附在本书正文之后。根据本书所用的数学程度，这些注释可为物理学或数学本科专业的任何人所理解。幸运的是，宇宙学的最重要运算是相当简单的；广义相对论或核物理更精妙的观点只是偶尔才发挥作用。想对这一论题进行更深的专业性探索的读者，可参阅书后所附的“推荐书目”中列出的一些高级论文（其中也有我自己的论文）。

我还应明确指出我想在本书探讨的主题是什么。它当然不是一本全面探讨宇宙学的著作。本书的主题中有一个“古典”部分，它涉及的主要是当前宇宙的大尺度结构：关于旋涡形星云的河外性质的辩论；遥远星系的红移的发现及其与距离的相依性；爱因斯坦、德西特、勒梅特和弗里德曼的广义相对论宇宙学模型；等等。好多优秀著作已对宇宙学的这一部分作了精辟的论

述，我不想在这里从头再叙述一遍。本书涉及的是早期宇宙，尤其是人们根据 1965 年宇宙微波辐射背景的发现，对早期宇宙提出的新认识。

当然，宇宙膨胀理论是我们当前早期宇宙观的一个基本组成部分，所以我不得不在第二章中对宇宙学更“古典的”方面作简要的介绍。我认为这一章可为理解早期宇宙理论的新近发展（本书其余部分讲述的就是这一内容）提供一个充分的背景，即使对一点也不熟悉宇宙学的读者来说也是如此。然而，如果读者想对更早的宇宙学有一个彻底的了解，那就得去参阅“推荐书目”中所列的那些著作了。

另一方面，由于没能找到任何条理清晰的有关宇宙学近来进展的历史记述，我不得不亲自做点挖掘工作，尤其是 1965 年以前为什么很长时间没有人对宇宙微波辐射背景进行搜寻这一令人着迷的问题。（第四章对此进行了讨论。）这并不是说我认为本书是对这些进展的权威性记述——我对人们在科学史工作研究中所付出的努力和他们对各种事件所做的关注是非常尊敬的，不会在这方面有任何幻想。相反，假使某个真正的科学史学家要用本书作为起点，撰写一部真正关于过去 30 年的宇宙学研究史的话，我会很高兴的。

我非常感谢欧文·格莱克斯和法雷尔·菲利普斯，他们在本书作出版准备的过程中向我提出了非常宝贵的建议。在我撰写本书时，我的物理界和天文学界的同仁们也向我提出了善意的忠告，他们的帮助是我难以用语言表达的。我尤其想感谢拉尔夫·阿尔弗、伯纳德·伯克、罗伯特·迪克、乔治·菲尔德、加里·范伯格、威廉姆·福勒、罗伯特·赫尔曼、弗雷德·霍伊尔、吉姆·皮布尔斯、阿诺·彭齐亚斯、比尔·普雷斯、埃德·珀塞尔和罗伯特·瓦戈纳，他们不辞辛劳，分别阅读了本书的各个部分并提出了建议。我还想感谢伊萨克·阿西莫夫、I. 伯纳德·科恩、马撒·利勒和

菲利普·莫里森，他们向我提供了有关各个专题的信息。我尤其感激奈杰尔·考尔德，他从头到尾阅读了整个初稿，并提出了深刻的见解。我不敢奢望本书现已没有任何差错和晦涩之处，但我敢肯定，若非我有幸得到所有这些慷慨帮助，它是不会像现在这样清晰、易懂和准确的。

史蒂文·温伯格  
于马萨诸塞州坎布里奇大学  
1976年7月

## 第二版平装本前言

近来天文知识的发展业已基本证实，在《宇宙最初三分钟》首次出版的 1977 年，人们所理解的宇宙理论的总体思想是正确的。但在过去的 16 年中，各种没有把握的问题已得到解决；新的问题也已出现；对最初一秒之前这段时间的早期宇宙史，又提出了全新的思想。因此，我很高兴能借这次出版新版的机会增补后记，使本书的内容得以更新。感谢通俗读物出版社的马了·凯斯勒对这一新版所作的指导，感谢保罗·夏皮罗和伊桑·维什尼亚克对后记提出的宝贵意见。

史蒂文·温伯格  
于得克萨斯州奥斯汀  
1993 年 4 月

# 目 录

前言	(1)
第二版平装本前言	(5)
第一章 导论：巨人和牛	(1)
第二章 宇宙的膨胀	(7)
第三章 宇宙微波辐射背景	(38)
第四章 炽热宇宙的配方	(66)
第五章 最初三分钟	(83)
第六章 历史的题外话	(98)
第七章 最初百分之一秒	(106)
第八章 尾声：未来前景	(119)
图表：	(123)
表 1. 一些基本粒子的特性	(123)
表 2. 一些辐射类型的特性	(124)
词汇表	(125)
数学注释	(135)
后记：1977 年后的宇宙学	(147)

## 第一章

### 导论：巨人和牛

冰岛巨匠斯诺里·斯图鲁松于 1220 年左右编纂的斯堪的那维亚神话集《新埃达》对宇宙的起源作了解释。书中说，起初，什么都没有。“看不到大地，也看不到苍天，倒是有一个大大的缺口，但没有草。”在空空如也的北面和南面，坐落着霜区和火区。火区的热融化了霜区的霜，从水滴中诞生了巨人伊美尔。伊美尔吃什么？似乎还有一头牛——厄伊德许姆拉。她又吃什么？噢，还有些盐。等等。

我可不能触犯宗教情感，哪怕是北欧海盗的宗教情感也是如此，但我认为，要说这样描述宇宙起源不能令人满意却是公正的。即便抛开所有那些对传闻证据的异议，这个故事产生的问题也同它所提供的答案一样多，而且每个答案都使原有情况变得更为复杂。

我们不能仅对该书报以微笑，而坚决放弃所有的宇宙学推测——对宇宙史溯本求源的迫切心情是难以抑制的。自 16 和 17 世纪现代科学诞生以来，物理学家和天文学家们就一直不断提出宇宙的起源问题。

然而，一种不体面的氛围一直笼罩着这种研究。我记得，当我还是个学生及后来我在 1950 年代自己开展研究工作（研究的是其他问题）时，人们就普遍认为研究早期宇宙是体面的科学家不屑为之的事情。这种论断也不无道理。纵观整个现代物理学和

天文学历史，赖以构建早期宇宙史所需的充分的观测与理论基础根本就不存在。

然而，在刚刚过去的十年中，所有这一切都发生了变化。有一种早期宇宙理论已被人们广泛接受，以致于天文学家常常将之称为“标准模型。”它与人们有时所说的“大爆炸”理论基本相同，只不过它对宇宙成分的认识更加具体。这种早期宇宙理论正是本书的论题。

为了便于理解，或许应首先对当前按照标准模型所理解的早期宇宙史作一概述。这里仅仅是一个简要说明——在以后的各章中，我还要对这一历史的详细情况以及我们相信它的理由作出解释。

起初，发生了一次爆炸。这个爆炸不同于地球上所常见的那些爆炸，即先从一个明确的中心开始，然后向四周扩展，周围被吞噬的空气越来越多；而是一种各个地方同时发生的爆炸，从一开始便充满了整个空间，每个物质粒子都与其他粒子迅速分离开来。这里的“所有空间”可以指整个无穷宇宙，也可以指像球面那样蜿蜒回到自身的整个有穷宇宙。任何一种可能性都不易为人理解，但这并无妨碍；在宇宙形成的初期，太空是有穷的还是无穷的并不重要。

在大约百分之一秒的时间（这是我们能够自信地谈论的最早的时间）里，宇宙的温度达到大约1,000亿摄氏度（ $10^{11}$ ）。这一温度甚至比最热的恒星的中心还热得多，事实上，它热得使寻常物质的组成部分——分子、原子、甚至是原子核——没有一个能聚集在一起。相反，在这一爆炸中迅速分离的物质是由各种类型的所谓基本粒子组成的。基本粒子是现代高能核物理的研究课题。

我们在本书中将多次谈到这些粒子，更详细的解释将在第三和第四章中讨论，这里仅指出早期宇宙中最多的那些就足够了。

大量存在的一类粒子是电子，即以电流形式流过电线并形成当前宇宙中所有原子和分子的外壳的带负电的粒子。早期宇宙中数量巨大的另一类粒子是正电子，即体积与电子完全相同的带正电的粒子。在当前的宇宙中，正电子只有在实验室中，在某类放射线和诸如宇宙射线以及超新星这样剧烈的天文现象中才能找到，但在早期宇宙中，正电子的数量与电子的数量几乎不相上下。除了电子和正电子外，还有数量大致相同的各类中微子，即没有任何质量或电荷的幽灵似的粒子。最后，宇宙中还充满光线。对此，不必与粒子分别对待——量子理论告诉我们，光线是由零质量、零电荷、被称为光子的粒子组成的。（每当灯丝中的一个原子从高能状态转变到低能状态时，就会发射出一个光子。灯泡中发射出的光子非常之多，因此他们看上去就像汇集成了一条连续的光束一样，但通过光电池，可一个一个地计算出单个光子的数量。）每个光子都携带着一定数量的能量和动量，数量多少取决于光的波长。为了概述早期宇宙中无所不在的光线，我们可以说，光子的数量和平均能量与电子、正电子或中微子大致相同。

这些粒子——电子、正电子、中微子、光子——不断地从纯能量中创造出来，短暂存在后即再次湮灭。因此它们的数量不是早就注定的，而是由创造与湮灭过程中的平衡所决定。根据这一平衡，我们可以推断，温度高达 1,000 亿度的这一宇宙汤的密度约为水的 40 亿 ( $4 \times 10^9$ ) 倍。此外，还有少量的杂质，它们由较重的粒子、质子和中子组成，在当今世界中，它们是原子核的组分。（质子带正电；中子稍重且不带电。）比例大致为每 10 亿个电子、正电子、中微子或光子，对一个质子和一个中子。为了设计标准的宇宙模型，这个数值——每有一个核较子，就有 10 亿个光子——是必须从观测中获得的关键数值。在第三章讨论的宇宙辐射背景的发现实际上就是对这一数值的说明。

随着爆炸的继续，温度开始下降，大约十分之一秒后下降到

300 亿 ( $3 \times 10^{10}$ ) 摄氏度；大约一秒后下降到 100 亿度；大约 14 秒后下降到 30 亿度。这一温度已低到足以使电子和正电子开始以快于它们从光子和中微子中再次创造出来的速度归于湮灭。物质的这一湮灭所释放出来的能量，暂时降低了宇宙的冷却速度，但温度继续下降，最后，在最初三分钟结束时，降到了 10 亿度。这时，温度已低得足以使质子和中子开始形成复杂的核，首先形成的是重氢（或氘），它由一个质子和一个中子组成。其密度这时仍非常高（比水的密度稍低），所以这些轻核能迅速地结合成最稳定的轻核，即氦核，它是由两个质子和两个中子组成的。

在最初三分钟结束时，宇宙的成分大多表现为光、中微子和反中微子。仍有少量的核材料，它们现在是由大约 73% 的氢和 27% 的氦组成的，此外，还有数量相同的、从电子 - 正电子湮灭时代遗留下来的电子。这种物质继续迅速分离，温度越来越低，密度越来越小。很久之后，即几十万年后，它的温度降低到足够的程度，使电子能够与核相结合，形成氢原子和氦原子。由此产生的气体开始在引力的作用下形成团，并最终凝聚成当今宇宙的星系和恒星。然而，恒星形成时的成分完全是在最初三分钟的时间里所形成的那些成分。

以上简要叙述的这一标准模型，并非想象范围内的最令人满意的宇宙起温理论。同《新埃达》一样，它对宇宙的起点，也就是对最初大约百分之一秒的说法有些笼统，让人摸不着头脑。此外，令人为难的是，还需要明确当初的情况，尤其是当初的光子与核粒子 10 亿比 1 的比例。如果这一理论能提出更大的逻辑必然性，那就更好了。

比如，另一个在哲学上似乎更有吸引力的理论是所谓的恒稳态模型。在由赫尔曼·邦迪、托马斯·戈尔德和弗雷德·霍伊尔（其表述方式与他们稍有不同）于 1940 年代末提出的这一理论中，宇宙基本上一直就是理在这个样子。随着它的膨胀，新物质

不断被创造出来，填补了星系间的空白。从潜在可能性上讲，有关宇宙为何是目前这种状况的问题都可用这一理论来回答，可以说，它之所以是这样，是因为这是它能够保持不变的唯一一种办法。早期宇宙问题被排除了，因为本来就没有早期宇宙。

那我们是如何得出这一标准模型的？它又是如何取代其他理论（如恒稳态学说）的？这一共识的取得，不是因为哲学倾向的转变或天体物理学界名流的影响，而是从经验中得出的数据的结果，是对现代天体物理学必须具备的客观性的赞许。

下面两章将描述导致我们得出这个标准模型的两个重要线索，即对遥远星系后退的发现和充满宇宙的微弱无线电静电的发现，它们都是从天文观测中发现的。对科学史学家来说，这可是个内容丰富故事：既有错误的开端、良机的错失、理论上的先入为主，又有个性的展示。

在对观测宇宙学作了这一概述之后，我将力图将零散的数据汇总在一起，对早期宇宙的物理状况作一连贯清晰的描述。这样，我们就能更为详细地重温一下最初三分钟了。采用电影式的处理方法似乎很合适：我们可以一格一格地观看宇宙膨胀、冷却和形成的过程。我们还将力图对一个仍笼罩在神秘中的时代——最初百分之一秒及其之前——作一番小小的探索。

我们对这个标准模型真的有把握吗？会不会有新的发现将它推翻并用其他宇宙起源学说取代当今的标准模型，甚至是复兴恒稳态学说？或许会。我不能否认我在描述最初三分钟时有一种虚构感，好象我们真的知道我们在谈论什么似的。

然而，即使标准模型最终被取代，它也在宇宙学的历史上发挥过巨大的重要作用。通过标准模型环境去检测物理学或天文物理学的理论思想的微法，现已得到人们的推崇（尽管这只是近十年左右的事）。用标准模型作为理论基础来证明天文观测计划的价值，已成为司空见惯的事。因此，标准模型提供了一种不可或

缺的共同语言，从而使理论家和观测人员能够彼此理解各自所做的工作。假使有一天标准模型被一个更好的理论所取代，那或许也是因为人们根据标准模型获得了别的观测结果或计算结果。

在最后一章，我将简单谈一谈宇宙的未来。它可能会永远膨胀下去，变得越来越冷，越来越空旷，越来越缺乏生机。它也有可能再次收缩，将星系、恒星、原子和原子核分解，使之重新变成它们的组分。那样一来，在预测最后三分钟的事态发展时，我们在理解最初三分钟时所面临的所有问题又将重新出现。

## 第二章

# 宇宙的膨胀

望一眼夜空,就会对它产生强烈的印象,好象宇宙一成不变。的确,浮云掠过月亮,天空绕着北极星旋转,一段时间过后,月亮本身又出现盈缺,月亮和行星在恒星形成的背景上运动。但我们知道,这些只不过是和我们太阳系内部的运动所造成的局部现象而已。在行星的背后,恒星似乎静止不动。

当然,恒星是运动的,运动速度可高达每秒几百公里,因此,速度快的恒星在一年可运行 100 亿公里左右。这比到最近的恒星的距离还少一千倍,所以它们在天空中的表面位置变化得非常之慢。(比如,被称为伯纳德星的这颗恒星的运动速度相对较快,它的距离约为 5,600 万公里;它以每秒约 89 公里或每年 280 亿公里的速度越过视线,结果,它的表面位置在一年中要变化 0.0029 度。)天文学家称天空中邻近恒星的表面位置的变化为“自行”。较远的恒星在天空中的表面位置变化得非常之慢,它们的自行甚至用最耐心的观察方法也无法察觉。

我们在这里将会发现,这种静止不变的印象是我们产生的一种幻觉。我们在本章将要谈论的观察结果显示,宇宙处于一种剧烈爆炸状态,称为星系的巨大宇宙岛正以接近光速的速度分离开来。此外,我们还可从时间上往后推断这一爆炸,并认为所有星系的距离在过去同一时间肯定比现在近得多——事实上,它们是如此之近,无论星系还是恒星,甚至是原子或原子核,都不可能单独

存在。我们将这一时期称为“早期宇宙”，它正是本书的论题。

我们对宇宙膨胀的了解完全取决于这一事实，即天文学家直接沿着视线方向对发光体的运动进行测量，这种方法比从垂直于视线方向对其速度进行测量要精确得多。这一技术利用的是为人熟知的任何类型的波运动所共有的一个特性，称为多普勒效应。当我们观察来自处于静止状态的波源的声波或光波时，各波峰到达我们的仪器的时间，同各波峰离开波源的时间，是相同的。另一方面，如果波源正在远离我们，那各连续波峰到达之间的时间，就会在它们离开波源之间的这段时间里，不断增加，因为每个波峰在到达我们这里时，需要走的路程都比上一个稍远。各波峰到达间的时间恰好是波长除以波速，因此，正在远离的波源所发出的波的波长，似乎比波源处于静止状态时要长。（具体地讲，波长的分数增加值，是由波源的速度与波本身的速度间的比率决定的，如书后数学注释所示。）同样，如果波源正向我们靠近，那各波峰达到间的时间就会不断缩短，因为每个连续波峰需要走的路也在缩短，而波的波长也似乎越来越短。这就好像旅行推销员在旅途中要每周定期发一封家书一样：离开家的途中，每封信的路程都比上一封稍远，因此他的信到达的时间也相差一周多一点；回家的途中，每封信的路程都比上一封要近，所以它们到达的频率要多于每周一封。

目前，观察声波上的多普勒效应是很容易的事——站到高速公路的边上就可以了，你会发现高速行驶的汽车的发动机在驶来时的声音比驶离时高（即波长短）。多普勒效应的理论显然是由布拉格的数学教授约翰·克里斯蒂安·多普勒就光波和声波于1842年首次提出的。荷兰气象学家克里斯托弗·迪特里希·白贝罗在1845年通过一个可爱的试验，对多普勒声波效应进行了测试——他用一个站在火车敞蓬车厢里的小号乐队作运动声源，从荷兰乌得勒支附近的乡村疾驶面过。

多普勒认为他的理论或许说明了恒星有不同颜色的原因。假

设有一颗正在远离地球的恒星的光将向较长的波长转变,由于红光的波长比可见光的平均波长长,所以,这颗恒星可能看上去比一般的恒星更红。同样,假设正在向地球移动的恒星的光将向较短的波长转变,这颗恒星可能看上去更蓝。白贝罗和其他人很快指出,多普勒效应实质上与恒星的颜色毫无关系——正在远去的恒星的光的确会向红色转变,但与此同时,该恒星通常不可见的紫外光也会转变成可见光谱,所以整个颜色几乎是不变的。恒星的颜色不同,主要是因为它们的表面温度不同。

然而,当多普勒效应于 1868 年被应用于个体光谱线的研究时,它的确开始对天文学产生巨大作用。若干年前,慕尼黑光学家约瑟夫·夫琅和费就已在 1814-1815 年发现,当阳光通过一个狭缝,然后再通过一个玻璃棱镜时,由此而形成的色谱上就会穿插着数百条黑线,每条黑线都是狭缝的映象。(甚至在更早的时候,威廉姆·海德·沃拉斯通就已在 1802 年发现了其中一些黑线,但当时并未进行认真研究。)黑线总是存在于同样的颜色中,每条线都与一个具体的光波相对应。夫琅和费还在月亮和较亮的恒星的光谱的同一位置发现了同样的黑色光谱线。他很快认识到,这些黑线是对某些特定波长的光的选择性吸收面产生的,因为光是通过恒星外围较凉爽的空气从其表面发射过来的。每条线都是由于一个化学元素对光的吸收而造成的,所以可以确定,太阳上的元素,如钠、铁、镁、钙和铬,同地球上发现的那些元素是一样的。(我们现在知道,黑线的波长是该波长的光子恰好通过适当能量将原子从低量态提升到激发态的波长。)

1868 年,威廉姆·哈金斯爵士指出,一些较亮的恒星的光谱中的黑线正从它们在太阳光谱中的通常位置向红或蓝的方向作轻微的偏移。他恰当地称之为多普勒偏移,因为恒星正在远离或靠近地球。比如,五车二星的光谱中的每条黑线的波长,比太阳光谱中相对应的黑线的波长长 0.01%;这种向红色的偏移,说明五车二

星正以 0.01% 的光速或每秒 30 公里的速度远离我们。在随后的几十年中,多普勒效应被应用于日珥、双星以及土星环的速度研究。

通过观察多普勒偏移来测量速度,是一种具有内在精确性的技术,因为光谱线的波长可非常精确地测量出来;用长达八位有效数字来表示波长的情况并不少见。此外,只要夜空的辐射背景下存在选取光谱线的足够光线,无论光源有多远,这一技术都能保障其精确性。

通过多普勒效应的应用,我们了解到本章开头所提及的星球速度的典型数值。多普勒效应还在邻近恒星的距离方面为我们提供了有关线索;如果我们对一个恒星的运动方向作个假设,那多普勒偏移就可告知我们它跨过我们的视线和沿我们的视线运动时的速度,因此通过对恒星穿越天球的自行的测量,可得知它的距离。但只有当天文学家开始研究比可见恒星远得多的物体的光谱时,多普勒效应才开始产生具有重大宇宙学意义的结果。我只好先略微谈一下那些物体的发现,然后再回过头来讨论多普勒效应。

在本章的开头,我们首先讲到了夜空。除了月亮、行星、恒星外,还有两个具有更大的宇宙学意义的可见物体,我或许已提到过它们。

其中一个非常显眼,非常明亮,有时通过灰蒙蒙的城市夜空都能看到。它是以巨大的圆圈横跨天球的光带,自古以来被称为银河。1750 年,英国仪器制造商托马斯·赖特出版了一本引人注目的书,名为《关于宇宙的独创理论或新假设》。他在书中提出,恒星位于一个平坦、厚度有限的厚板即“磨石”之中,但却沿着厚板平圈的所有方向绵延很长的距离。太阳系就位于这个厚板内,所以,我们在地球上沿厚板平面观察时,理所当然地比在任何其他方向观察时所看到的光都多得多。这就是我们所看到的银河。

赖特的理论久已得到证实。人们现在认为,银河系有一个由恒星组成的平坦的盘,其直径为 80,000 光年,厚度为 6,000 光年。

它还有一个球形晕,直径近 100,000 光年。总质量通常估计为太阳质量的 1,000 亿倍左右,但有些天文学家认为,在延伸的晕中,可能还有更大的质量。太阳系离盘的中心约 30,000 光年,位于盘中心平面稍微偏“北”的地方。盘以高达每秒 250 公里左右的速度旋转,并呈现着巨大的旋臂。总体而论,景象非常壮观,如果我们能从外部看到它的话!整个系统现在通常被称为银河系,或从更大的角度上说,“我们的星系”。

夜空还有另一个具有宇宙学意义的特征,但没有银河系明显。在仙女星座中,有一个朦朦胧胧的块,平时不易看到,但如果知道在哪儿寻找的话,它在晴朗的夜晚还是清晰可见的。第一次用文字提到这一天体的似乎是《恒星录》中的一个名单,它是公元 964 年由波斯天文学家阿卜杜勒-拉赫曼·苏非编纂的。他将其描述为一“小片云”。有了望远镜后,越来越多的这类延伸物体被发现,17 和 18 世纪的天文学家发现,这些物体妨碍了人们搜索真正令人感兴趣的东西——彗星。为了提供一个便利的、在搜寻彗星时不需要观察的物体的清单,查尔斯·梅西耶在 1781 年出版了一个著名的天体目录——《星云和星团》。天文学家仍按梅西耶编号称呼这个目录中的 103 个天体,比如,仙女星云是 M31,蟹状星云为 M1,等等。

即使在梅西耶时代,这些延伸物体也显然并非完全相同。有些显然是星团,如昴星团(M45)。有些则是不规则的发光气体云,往往带有颜色,且往往与一个或多个恒星结合在一起,如猎户座大星云(M42)。如今我们知道,这两类物体都位于我们的星系中,我们在这里不需要再关注它们。然而,梅西耶目录中约有三分之一的物体是形状相对规则的椭圆形白色星云,其中最为突出的是仙女星云(M31)。随着望远镜的改进,又有成千上万个这样的星云被发现,到 19 世纪末,有些星云(包括 M31 和 M33)的旋臂已被辨明。但是,18 和 19 世纪最好的望远镜也无法分辨出椭圆形或旋

涡形星云中的恒星，它们的性质是个谜。

似乎是伊曼纽尔·康德首次提出，有些星云就是和我们的星系一样的星系。康德利用赖特的银河系理论，于1755年在他的《宇宙自然史和天体理论》中提出，星云“或确切地说它们的一个种类”，实际上是同我们的星系在大小和形状上大体相当的圆形盘子。它们看似椭圆，是因为它们大多是被斜着观察的，当然，由于它们是如此之远，所以比较暗淡。

到19世纪初，宇宙充满与我们的星系一样的星系这种思想，虽未被普遍接受，但也得到了广泛认可。不过，这些椭圆形或旋涡形星云同梅西耶目录中的其他物体一样，被证明仅仅是我们星系之内的一些云的可能性依然存在。引起混乱的一个重大因素，来自对一些旋涡形星云中的正在爆炸的恒星的观察。如果这些星云果真是独立的星系，由于太远，我们无法辨别出单个恒星，那爆炸的威力必定大得惊人，这样，它才在如此大的距离内还如此明亮。在这方面，我禁不住要引用19世纪最成熟的科学散文并以此为例。英国天文史学家艾格尼斯·玛丽·克拉克在1893年的文章中写道：

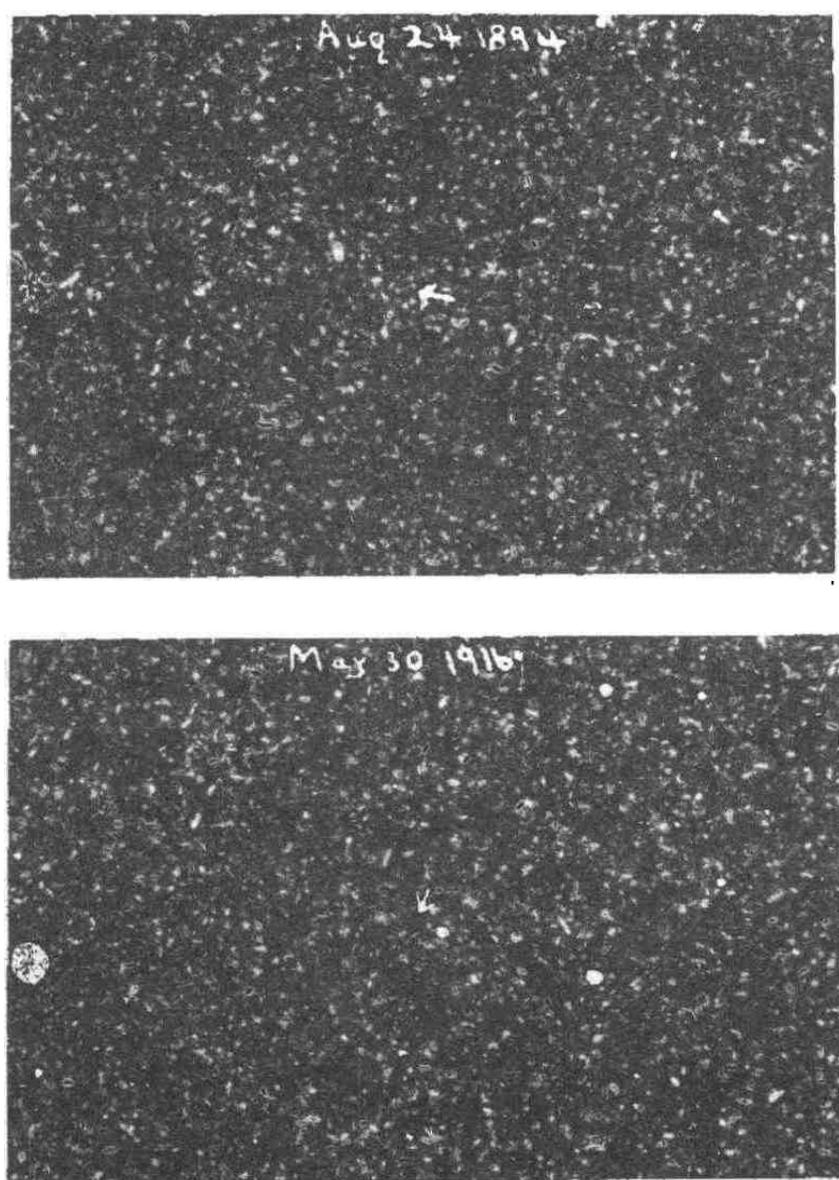
著名的仙女座星云和猎犬座大旋涡星云属于发出连续光谱的较引人注目的天体。一般来讲，将因距离过于遥远而变得模糊不清的星团的表象展现出来的所有那些星云所发的光，都属于同一个类型。然而，因此而断定它们的确就是这类太阳形物体的聚集体，显然有些轻率。它们当中有两个每隔四分之一世纪的时间就发生一次星球大爆炸，这大大地增加了作出这样一种推断的不可能性。因为几乎可以肯定的是，无论星云多么遥远，恒星的距离都是相同的；因此，如果前者的组成微粒是太阳，那么，几乎可以掩盖掉它们的微弱光线的庞大天体，正如普罗克特先生所说的那样，必定属于难以想象的数量级。

如今我们知道,这些星球大爆炸的确“属于难以想象的数量级”。它们是超新星,爆发时,一个恒星的光度可接近整个星系的光度。但在1893年,人们并不知道这一点。

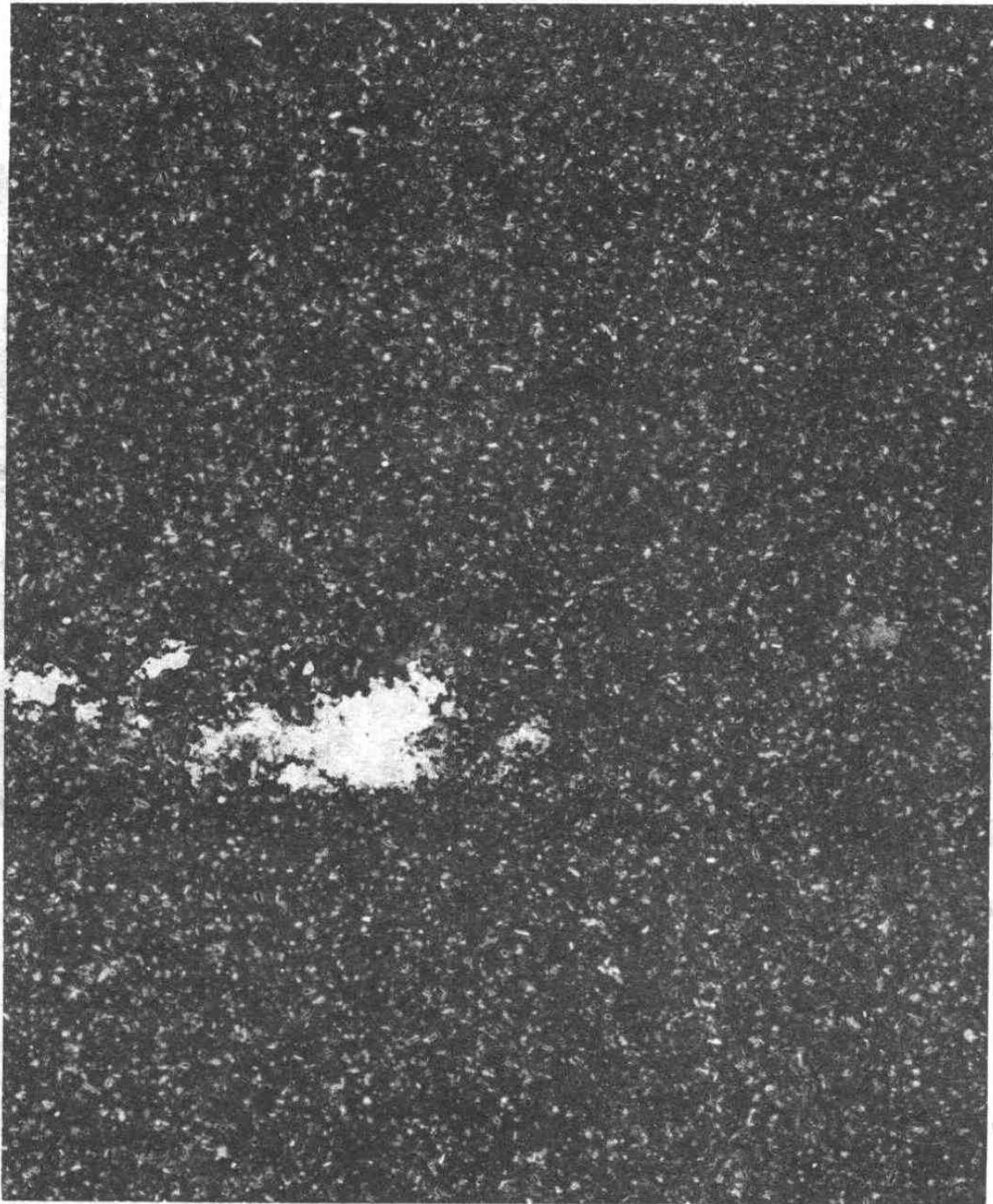
没有一些可靠的方法来确定旋涡形和椭圆形星云的距离,就无法解决它们的本质问题。在洛杉矶附近的威尔逊山上安装完成100"的望远镜后,终于找到了这样的尺度。1923年,爱德温·哈勃首先分辨出仙女座星云是由相互独立的恒星组成的。他发现,它的旋臂中有一些明亮的变光恒星,其光度有着相同类型的周期性变化,这在我们星系中称为造父变星的一类恒星中是常见的。这一点之所以重要,是因为在上一个十年中,哈佛学院天文台的亨里埃塔·斯旺·莱维斯和哈洛·沙普利的工作,已提示了造父变星的观测光变周期与其绝对光度间的紧密关系。(绝对光度是天文物体沿所有方向的总辐射功率。视光度是每平方厘米的望远镜镜片所接收到的辐射功率。决定天文物体主观明亮程度的,是它们的视光度,而非绝对光度。当然,视光度不仅取决于绝对光度,也取决于距离;因此,知道了天文物体的视光度和绝对光度后,就能推断出它的距离。)观测到仙女座星云中的造父变星的视光度,并根据它们的光变周期估计出它们的绝对光度后,哈勃能利用视光度与绝对光度成正比、与距离的平方成反比的简单规则,立即计算出它们的距离,从而也计算出了仙女座星云的距离。他的结论是:仙女座星云的距离是900,000光年;比我们星系中已知最远的物体远10倍以上。沃尔特·巴德和其他人对造父变星的周期与光度关系进行了几次重新测定,结果将仙女座星云的距离提高到了200万光年以上,但这个结论在1923年就已得到证明:仙女座星云以及成千上万个类似星云,都是跟我们的星系一样的星系,沿各个方向伸展得很远、很远,充满了宇宙。

甚至在星云的河外性质得到确定之前,天文学家就已能够将其光谱中的线同熟知的原于光谱中已知的线联系起来。然而,洛

维尔天文台的维斯托·梅尔文·斯莱弗在 1910 - 1920 年的十年中发现,许多星云的光谱线稍微偏移向了红端或蓝端。这些偏移立即被认为是多普勒效应的缘故,意思是星云正在远离或靠近地球。比如,仙女座星云被发现正以大约每秒 300 公里的速度向地球移动,而室女座中更远的星系团被发现正以大约每秒 1,000 公里的速度远离地球。



**伯纳德星的自行:**拍摄时间相距 22 年的两幅照片显示了伯纳德星(白色箭头所指)的位置。相对于较明亮的背景星,伯纳德星的位置发生了明显的变化。在这 22 年中,伯纳德星的方向变化了 3.7 分弧;因此,其“自行”为每年 0.17 分弧。(叶凯士天文台图片)



**人马座中的银河系：**这幅照片显示了人马座中沿我们星系中央方向的银河系。星系显得很平坦。穿过银河系平面的黑色区域是由尘云造成的，因为尘云吸收了它们背后的恒星的光。（海耳天文台图片）



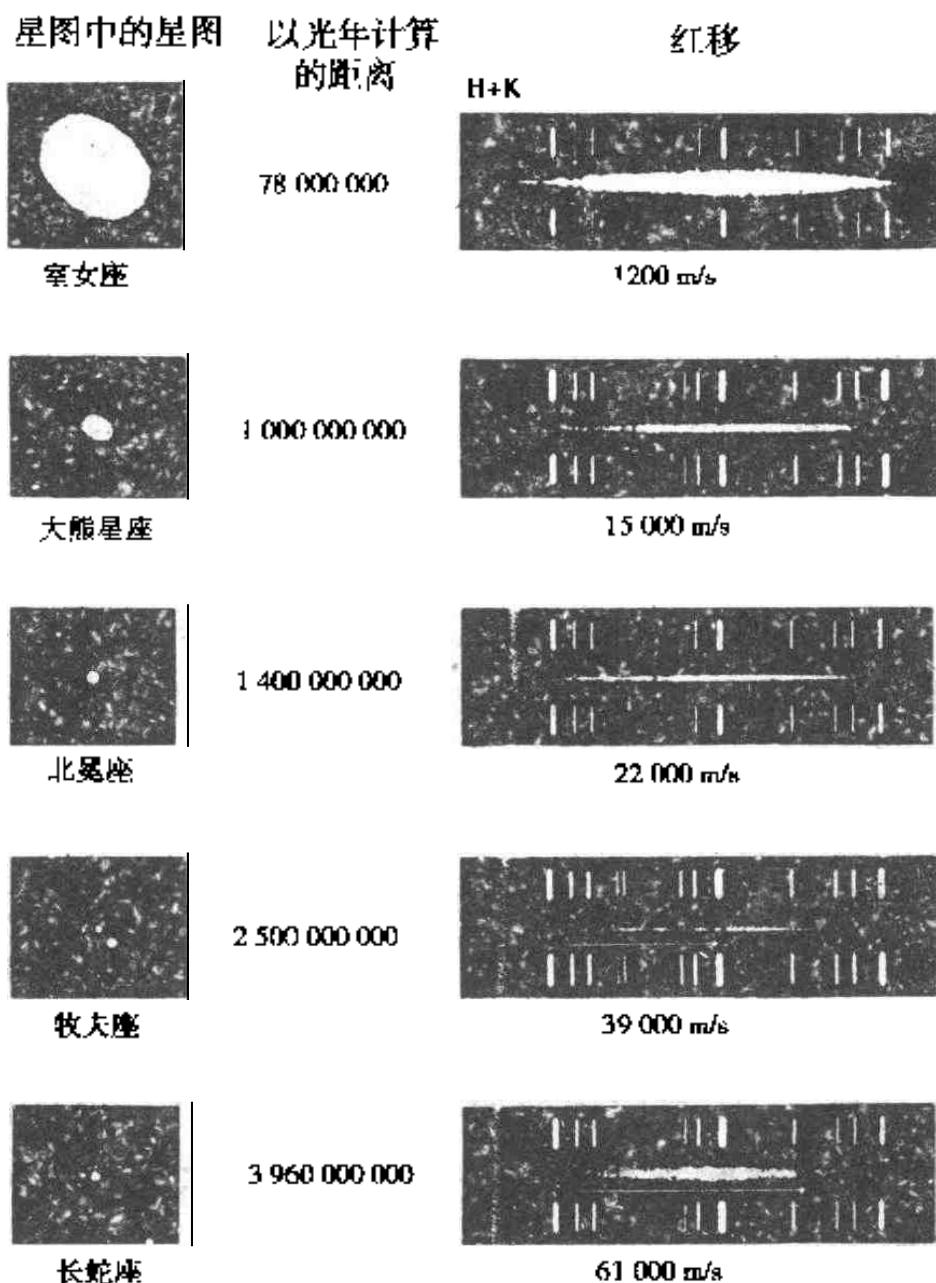
**旋涡星系 M104：**这是一个由大约一万亿颗恒星组成的巨大星系，同我们的星系非常相似，只是与我们的星系相距约 6,000 万光年之遥。从我们的角度看，M104 几乎是竖着的，这清楚地表明那里既有一个明亮的球晕，也有一个平坦的盘。盘上有若干黑色尘道，与我们星系的尘埃区非常相似，如前一幅照片所示。这幅照片是用加州威尔逊山上 60 英寸的反射望远镜拍摄的。（叶凯士天文台图片）



仙女座中的大星系 M31：这是离我们的星系最近的巨大星系。右上方和中部下面的两个亮点是较小的星系 NGC205 和 221，M31 的引力场使它们保持在轨道上。照片中的其他亮点是前景物体，即正巧位于地球和 M31 之间的属于我们星系的恒星。这幅照片是用帕洛马的 48 英寸望远镜拍摄的。（海耳天文台图片）



**仙女座星系的局部：**它显示了仙女座星系 M31 的一部分，即上幅照片中的右下角部分（“偏南区”）。这幅照片是用威尔逊山上 100 英寸的望远镜拍摄的，分辨率很高，足以显示出 M31 旋臂中的各个恒星。哈勃正是通过在 1923 年研究这类恒星得出结论，认为 M31 是在某种程度上与我们的星系相似的星系，而非我们星系的一个边远部分。（海耳天文台图片）



**红移与距离的关系：**这里显示的是五个星系团的明亮星系及其光谱。星系的光谱是长长的水平白色物，上面交叉着一些短短黑色垂直线。这些光谱中的每个位置均相当于来自这些星系的一定波长的光；黑色垂直线是由于这些星系中恒星大气内的光线吸引而造成的。（每个星系光谱上面和下面的明亮垂直线仅仅是标准对比光谱，把它们加在星系光谱上面，是为了有助于确定波长。）每个光谱下面的箭头表示两个具体吸收线（钙的H和K线）从其正常位置向光谱的右（红）端的偏移。如果将这些吸收线的红移解释为多普勒效应，那它说明的就是，从室女座星团到长蛇座星团，速度为每秒1,200公里到每秒61,000公里。由于红移与距离成正比，所以，这说明这些星系的距离是依次递增的。（这里给出的距离是用15.3公里/秒/百万光年的哈勃常数计算出来的。）这种解释得到了以下事实的证实，即这些星系随着红移的增加而看上去越来越小，越来越暗。（海耳天文台图片）

起初，人们认为，这些可能仅仅是相对速度，反映了我们的太阳系朝着一些星系和背离另一些星系的运动。但是，随着越来越多的更大的光谱偏移被发现——全都偏向光谱的红端——这种解释就失去了道理。似乎除了像仙女座星云这样的近邻外，其他星系正普遍与我们的星系迅速分离开来。当然，这并不意味着我们的星系居于任何特殊的中心位置。相反，似乎宇宙正在发生某种类型的爆炸，在爆炸中，每个星系都在与所有其他星系迅速分离。

这种解释在 1929 年之后被人们普遍接受，当时，哈勃宣布，他发现星系红移的增加，大致与它同我们的距离成正比。这一观测结果的重要性在于，这恰恰是我们应该根据正在爆炸的宇宙中最简单的物质流动的可能情景而作出的预测。

我们可能会凭直觉认为，在任何特定时刻，宇宙对所有典型星系上的观测者看上去都应是一样的，无论他们从什么方向进行观测。（这里，以及在下文中，我将用“典型”这一称呼来指自身不作任何大的奇特运动、而只是被携带着随星系的一般性宇宙流动而运动的星系。）作这样的假想很有道理（至少自哥白尼以来），所以英国天文物理学爱德华·阿瑟·米尔恩一直将它称为“宇宙学原理”。

当宇宙学原理被应用于星系本身，它认为典型星系上的观测者应能看到所有其他星系按相同的速度模式运动，无论观测者正在什么典型星系上。这一原则产生的一个直接数学结果是，任何两个星系的相对速度都应与它们之间的距离成正比，正如哈勃所发现的那样。

为了说明这一点，让我们以 A、B、C 三个典型星系为例（参见图 1）。假设 A 和 B 之间的距离与 B 和 C 之间的距离相同。无论从 A 上看 B 的速度如何，宇宙学原理都认为 C 应该有着相对于 B 的同样速度。但接下来应当注意，与 A 的距离是 B 的两

倍的 C，也以两倍于 B 的速度相对于 A 运动。我们可以在我们的链条中加入更多的星系，得出的结论都会是：相对于任何其他星系的任何星系的退行速度，都与它们之间的距离成正比。

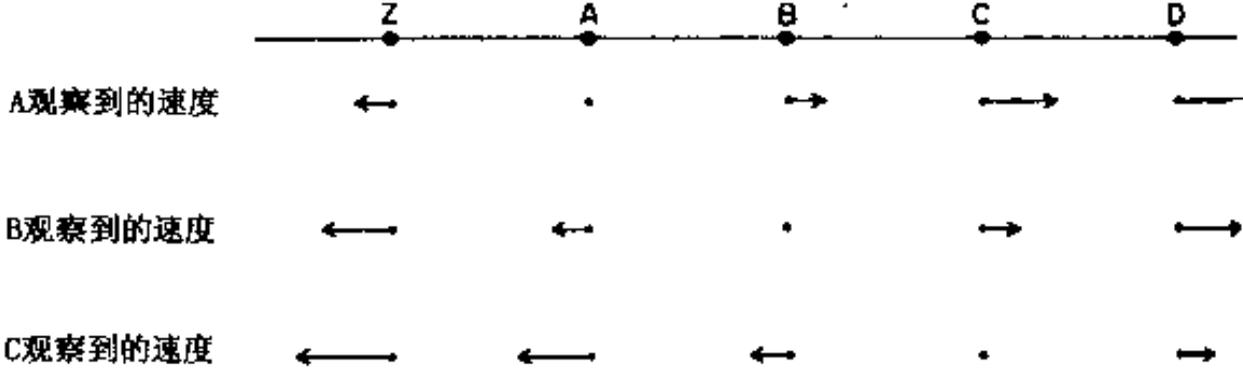


图1 均匀性和哈勃定律 这里显示的是一连串间距相等的星系 Z、A、B、C……，以及用附加箭头表示的，从 A、B 或 C 的角度测量的速度。均匀原理要求 B 所观察到的 C 的速度等于 A 所观察到的 B 的速度；将这两个速度相加，得出的则是 A 所观察到的 C 的速度，在图中用两倍长的箭头表示。以此类推，我们能得出图中显示的整个速度模式。可以看出，各个速度均符合哈勃定律：从其他任何星系上看到的任何星系的速度，都与它们之间的距离成正比。这是与均匀原理相一致的唯 一种速度模式。

正如在科学中司空见惯的那样，这一论据既可进一步使用，也可退一步使用。哈勃在观测星系的距离及其退行速度之间的比例时，也是在间接地核实宇宙学原理的真实性。这在哲学上极其令人满意——为什么宇宙的任一部分或任一方向应与其他任一部分或方向有所不同？它还有助于向我们保证，天文学家观测的确实是宇宙的某个有相当份量的部分，而不只是巨大的宇宙旋涡中的一个局部旋涡。另一方面，我们可从推论出发，视宇宙学原理为理所当然，并推断出距离和速度之间的比例关系，正如我们在本章最后一段所做的那样。这样，通过对多普勒偏移进行相对较为容易的测量，我们就能根据遥远物体的速度判断其距离了。

除了多普勒偏移这一测量方法外，宇宙学原理还得到了另一种类型的观测上的支持。充分考虑到因我们的星系及室女座的近

距富星系团所造成的畸变后，就会发现宇宙有着非凡的各向同性；即从各个方向看，它都是一样的。（在下一章所讨论的微波背景辐射更有说服力地说明了这一点。）但自哥白尼以来，我们已学会在假设人类在宇宙中的位置有什么特殊性时，谨慎从事。所以，如果宇宙在我们周围是各向同性的，那它对每一个典型星系也应该是各向同性的。然而，宇宙中的任何点都有可能被围绕着固定中心的一系列旋转带进任何其他点（参见图 2），所以，如果宇宙在任何点的周围都是各向同性的，那它必定也是均匀的。

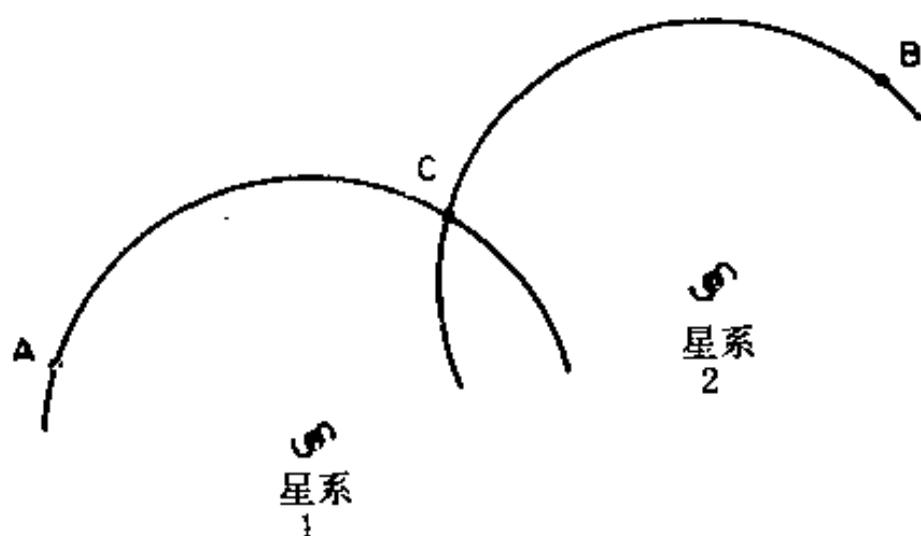


图 2 各向同性和均匀性 如果宇宙对星系 1 和星系 2 来说都是各向同性的，那它也是均匀的。为了说明两个任意点 A 和 B 上的情况是相同的，可以绕星系 1 沿 A 划一个圆，绕星系 2 沿 B 划另一个圆。围绕着星系 1 的各向同性，要求 A 和两圆相交处的 C 点的情况是相同的。同样，围绕着星系 2 的各向同性，要求 B 和 C 的情况是相同的。因此，A 和 B 的情况也是相同的。

在作进一步论述之前，应对宇宙学原理附加若干限定条件。首先，它显然不适用于小尺度——我们所在的星系和其他星系（其中包括 M31 和 M33）属于一个小的本星系群，而这个星系群又在位于室女座中的巨大星系团附近。事实上，梅西耶目录中的 33 个星系中，近半数位于一小部分天空——室女座——内。假

使宇宙学原理从任何方面考虑都是有效的話，那也只有当我们以至少达到星系团之间的距离那么大的尺度，或以大约 1 亿光年的尺度观测宇宙时，它才能发挥作用。

还有一个限定条件。在利用宇宙论来推断银河速度与距离之间的比例关系时，我们的假设是，如果 C 相对于 B 的速度与 B 相对于 A 的速度相同，那 C 相对于 A 的速度就是两倍大。这只是人人都熟悉的计算速度的一般规则，它当然非常适用于日常生活中相对较低的速度。但是，对于接近光速的速度，这一规则肯定就失效了，因为否则的话，将若干相对速度相加后，得到的速度就会大于光速，而这是爱因斯坦的“狭义相对论”所不允许的。举例来说，根据计算速度的一般规则，如果正以四分之三光速飞行的飞机上的一个乘客向前方发射了一颗四分之三光速的子弹，那么，这颗子弹相对于地面的速度就是光速的 1.5 倍，而这是不可能的。狭义相对论通过改变计算速度的规则，避免了这一问题：C 相对于 A 的速度实际上或多或少地小于 B 相对于 A 和 C 相对于 B 的速度的总和，这样，无论我们将小于光速的速度相加多少次，都不会得到大于光速的速度。

在 1929 年，这些对哈勃来说都不是问题；他当时所研究的星系中没有一个有着接近光速的速度。但是，当宇宙学家思考整个宇宙所特有的巨大距离时，他们必须有一个能够处理接近光速的速度的理论框架，即爱因斯坦的狭义和广义相对论。实际上，当我们处理如此巨大的问题时，距离概念本身也变得模糊起来，因此我们必须明确指出我们所指的距离是按光度观测结果来测量的，还是按直径、自行或其他方法来测量的。

现在再回到 1929 年。哈勃根据 18 个星系中最明亮的恒星的视光度，估计出这 18 个星系的距离，并将这些距离同这些星系各自的速度作了比较，而它们的速度是根据它们的光谱用多普勒偏移确定的。他的结论是：速度和距离之间存在着一种“大致的

线性关系”（即简单比例）。实际上，看到哈勃的数据后，我对他何以会得出这样一个结论感到有些疑惑不解——星系的速度与其距离似乎关系不大，而只存在着随距离而增加的轻微倾向。事实上，我们并不期望这 18 个星系的速度和距离间存在任何简单明了的比例关系——它们彼此间的距离太近，没有一个远于室女座星团。很难不让人得出这样的结论，即，无论是根据上文概述的简单论据，还是根据下文讨论的相关的理论发展，哈勃都知道他要找的答案。

不管怎样，到 1931 年，证据得到大大充实，哈勃因此而得以验证速度最高可达每秒 20,000 公里的星系的速度与距离之间的比例关系。根据当时对距离作出的估计，得出的结论是：每隔 100 万光年的距离，速度就增加每秒 170 公里；比如，每秒 20,000 公里的速度，意味着 1.2 亿光年的距离。这个速度随距离增加的量，通常被称为“哈勃常数。”（在某个特定时刻，速度和距离间的比例对所有星系来说都是相同的，从这个意义上讲，它是个常数，但是，正如我们将要看到的那样，哈勃常数随着宇宙的演化和时间而变化。）

1936 年，哈勃同光谱学家密尔顿·休马森合作，对大熊座 II 星系团的距离和速度进行了测量。发现它正以每秒 42,000 公里的速度——光速的 14%——退行。当时的估计距离是 2.6 亿光年，由于超出威尔逊山天文台的观测能力极限，所以哈勃的工作只好中断。随着战后更大的望远镜矗立在帕洛马和汉密尔顿山上，其他天文学家（主要是帕洛马和威尔逊山的阿兰·桑德奇）重新承担起哈勃的计划，并坚持到现在。

从这半个世纪的观测中通常得出的结论是，星系正在退行，远离我们而去，速度与距离成正比（至少对不是太接近光速的速度来说）。当然，正如我们在讨论宇宙学原理时业已强调的那样，这并不意味着我们在宇宙中处于任何特殊的受宠或遭冷落的地

位；每对星系都在以与其间隔成正比的相对速度分离开来。对哈勃原始结论的最重要的修改是对河外距离尺度的修订：部分地由于沃尔特·巴德及其他人对莱维特·沙普利造父变星的周期-光度关系所作的重新标定，目前估计遥远星系的距离比哈勃时代所认为的要大 10 倍左右。因此，人们现在认为，哈勃常数大约只有 15 公里/秒/百万光年。

所有这些对宇宙的起源意味着什么？如果星系在迅速分离，那它们必定曾一度关系较为紧密。具体地讲，如果它们的速度一直保持不变，那任何一对星系达到它们当前间隔所需的时间，恰好就是它们之间的当前距离除以它们的相对速度。但对与其当前间隔成正比的速度来说，这个时间对任何一对星系都是一样的——它们在过去的同一时刻必定都曾密不可分！假设哈勃常数为 15 公里/秒/百万光年，那么自星系开始分离以来的时间就是 100 万光年除以 15 公里/秒，或 200 亿年。我们将把按这种方法计算的“年龄”称为“特征膨胀时间”；它仅仅是哈勃常数的倒数。宇宙的真正年龄实际上小于特征膨胀时间，因为，正如我们将要看到的那样，星系并没有一直按恒速运动，而是在它们的相互引力的作用下逐渐慢了下来。因此，如果哈勃常数为 15 公里/秒/百万光年，那宇宙的年龄必定小于 200 亿年。

有时，在对所有这些进行概述时，我们只是简要地说，宇宙的规模在不断扩大。这并不意味着宇宙的规模一定有穷，尽管这很有可能。之所以这样表述，是因为在任何特定时间，任何一对典型星系间的间隔都按相同的分数增加。在任何非常之短、以致于星系的速度几乎保持不变的时间间隔里，一对典型星系间的间隔的增加值，将是其相对速度和实耗时间的乘积，或者，按照哈勃定律，是哈勃常数、间隔和时间的乘积。但这样一来，间隔的增加和间隔本身的比率，就将是哈勃常数乘以实耗时间，任何一对星系都是这样。比如，在特征膨胀时间（哈勃常数的对等物）

1%的时间间隔里，每对典型星系的间隔也按1%增加。然后，我们可以不精确地说，宇宙的规模是按1%增长的。

我不想给人一种印象，好象每个人都赞同对红移的这一解释似的。我们实际上并没有观测到迅速远离我们而去的星系；我们能够肯定的，是其光谱中的线向红端的偏移，即向较长波长的偏移。有些著名天文学家对红移是否与多普勒偏移或宇宙的膨胀有任何关系表示怀疑。海耳天文台的霍尔顿·阿普强调指出了天空中存在着这样一些星系群，其中有些星系的红移与其他星系截然不同；如果这些群表示相邻星系有真的物理联系，那它们就几乎不可能有着总体不同的速度了。此外，马顿·施米特在1963年发现，某类貌似恒星的物体却有着巨大的红移，有时竟超过了300%！如果这些“类星体”像它们的红移所显示的那样遥远，那它们发射的能量必定非常巨大，所以才如此明亮。最后，在极遥远的距离处确定速度和距离之间的关系并非易事。

然而，有一种独立的方法可以确认星系是否真的像红移所显示的那样，正在分离开来。我们业已看到，对红移的这一解释，意味着宇宙的膨胀开始于稍稍不到200亿年前的时间。因此，如果我们能找到任何其他证据，说明宇宙的年龄的确那么大，那它基本上就得到了证实。事实上，有大量的证据表明我们的星系约为100-150亿岁。这一估计数字既是根据地球上较为丰富的各种放射性同位素（尤其是铀同位素、U-235和U-238）得出的，也是根据对恒星演化情况的计算得出的。放射率或恒星演化速度与遥远星系的红移当然没有直接关系，所以，如下假设非常具有说明力，即根据哈勃常数推断出的宇宙年龄的确代表着一个真正的开始。

在这方面，回顾一下历史是很有意思的。在1930和1940年代，哈勃常数被认为要大得多，约为170公里/秒/百万光年。这样，按照我们上面的推理，宇宙的年龄就应为100万光年除以

170 公里/秒，即大约 20 亿岁，如果将引力制动考虑在内，还应更小。但自拉瑟福德勋爵研究放射现象以来，人们已非常清楚，地球的年龄比这要大得多；目前认为约为 46 亿岁！地球的年龄几乎不可能比宇宙大，所以天文学家不得不怀疑，红移是否真的对我们了解宇宙的年龄有所帮助。一些最有见地的天文学思想即起源于这一明显的悖论，其中或许还包括恒稳态理论。1950 年代，河外距离尺度膨胀了 10 倍，从而解决了年龄悖论，或许，这正是大爆炸宇宙学作为一个标准理论所赖以出现的基本前提。

我们在这里一直描绘的宇宙图景，是一个不断膨胀的星系群。迄今为止，光仅仅起着“恒星信使”的作用，传送着有关星系距离与速度的信息。然而，在早期宇宙中，情况千差万别；正如我们将要看到的那样，光在当时组成了宇宙的主要成分，而寻常物质只起着微不足道的点缀作用。因此，重述我们在膨胀宇宙中的光波行为方面对红移的了解，对以后还是有用的。

假设一个光波在两个典型星系间传播。两个星系间的间隔等于光的传播时间乘以光速，而这一间隔在光的传播过程中的增加量，等于光的传播时间乘以星系的相对速度。当我们计算间隔的分数增加值时，我们用这一间隔的平均值除以间隔增加值，结果发现光的传播时间被抵消了；这两个星系（因此也是任何其他典型星系）在光传播期间的间隔的分数增加值，恰恰等于星系的相对速度与光速的比率。但正如我们前面所看到的那样，这一比率还给出了光波在传播途中的波长的分数增加值。因此，任何一条光线的波长，都是完全按照宇宙膨胀过程中典型星系间的间隔而增加的。我们可以认为，波峰是被宇宙的膨胀“拉”得彼此越来越远。尽管我们的论点应用得非常严格，只对短的传播时间有效，但将一系列传播旅程汇总在一起后，我们就可得出结论，认为总的来讲，情况都是相同的。比如，当我们观测星系 3C295，发现其光谱中的波长比我们的标准光谱波长表中的波长大 46%

时，我们就可得出结论，认为宇宙现在比光离开 3C295 时大了 46%。

至此，我们已论述了物理学家所谓的“运动”物质，对运动作了描述，而没有考虑支配运动的那些力量。但是，若干世纪以来，物理学家和天文学家也曾试图了解宇宙动力学。这不可避免地导致了对在天体间发挥作用的唯一一种力量——引力——的宇宙作用的研究。

或许正如人们所料想的那样，伊萨克·牛顿首先解决了这一问题。在与剑桥古典主义者理查德·本特利的一个著名通信中，牛顿承认，如果宇宙物质均匀地分布在有穷的区域中，那它们都会有向中心降落的倾向，“并在那里形成一个巨大的球形质量”。另一方面，如果物质均匀地分散在无穷的空间中，那它们就没有中心可降落。它们在这种情况下有可能收缩成无数的团，散布在整个宇宙中；牛顿提出，这甚至有可能是太阳或恒星的起源。

在广义相对论提出之前，在研究无穷介质的动力学上所遇到的困难，严重地阻碍了进一步的进展。这里不适合解释广义相对论，不管怎样，事实证明，它对宇宙学的重要性比人们最初认为的要小。阿尔伯特·爱因斯坦用现有的关于非欧几里得几何的数学理论解释了作为时空曲率之效应的引力。仅作此说明就足够了。1917年，即他的广义相对论完成一年后，爱因斯坦试图为他的方程找到解法，以描述整个宇宙的时空几何。遵循当时流行的宇宙学思想，爱因斯坦非常明确地要寻找一种均匀的，各向同性的，不幸的是还是静态的解法。但却没能找到。为了得到一个适合这些宇宙学假设的模型，爱因斯坦不得不将他的方程肢解，引进了一个项，即所谓的宇宙常数，这极大地损害了原始理论的精确性，但却有助于平衡大距离内的引力。

爱因斯坦的宇宙模型确实是静态的，没有作出红移预测。同一年，即 1917 年，荷兰天文学家 W. 德西特找到了被修正了的

爱因斯坦的理论的另一个解法。尽管这个解法看似是静态的，因此，根据当时的宇宙学思想，也是可以接受的，但它有一个非凡特点，即作出了红移与距离成正比的预测！星云的大红移的存在在当时还不为欧洲天文学家所知。但第一次世界大战结束时，观测到大红移的消息从美国传到了欧洲，德西特的模型立即声名远扬。事实上，在1922年，当英国天文学家阿瑟·爱丁顿撰写关于广义相对论的第一篇综合性论文时，他就按照德西特模型分析了现有的红移数据。哈勃本人曾说，是德西特模型引起了天文学家对红移与距离有着依赖关系的重要性的注意，当他在1929年发现红移与距离的比例关系时，这个模型可能就已出现在他的脑中

了。

在今天看来，对德西特模型的这种强调似乎是不适当的。举个例子说，它根本就不是一个真正的静态模型——它看似静态，是因为它运用空间坐标的方式比较奇特，但这个模型中的“典型”观测者之间的距离实际上是随着时间的变化而增加的，正是这一总体退行产生了红移。此外，在德西特的模型中，红移被证明与距离成正比的原因，恰恰是这个模型符合宇宙学原理，而且，正如我们业已看到的那样，我们认为在符合这一原理的任何理论中，相对速度与距离都是成正比的。

无论如何，对遥远星系的退行的发现，很快便引起了人们对均匀的、各向同性的、但非静态的宇宙模型发生兴趣。于是，引力场方程已不再需要“宇宙常数”，爱因斯坦开始对自己曾考虑过如此修改自己的方程而感到后悔。1922年，俄罗斯数学家亚历山大·弗里德曼找到了爱因斯坦原始方程的基本的、均匀的、各向同性的解法。这些是基于爱因斯坦原始场方程的模型，而非爱因斯坦或德西特模型，为大多数现代宇宙理论提供了数学背景。

弗里德曼模型分为两种截然不同的类型。如果宇宙物质的平

均密度小于或等于某个临界值，那宇宙在空间上必定是无穷的。在这种情况下，当前的宇宙膨胀会永远继续下去。另一方面，如果宇宙的密度大于这一临界值，那物质产生的引力场就会使宇宙弯曲并回到自身；尽管它无边无际，但却是有穷的，就像球面那样。（也就是说，如果我们沿直线行进，我们不会找到宇宙的任何边缘，而是仅仅又回到我们的原始出发点。）在这种情况下，引力场会最终强大到一定程度，使宇宙膨胀停止，并最终塌缩，重新形成无限高的密度。临界密度与哈勃常数的平方成正比；就当前流行的 15 公里/秒/百万光年的值来说，临界密度等于  $5 \times 10^{-30}$  克/立方厘米，成大约每千升空间三个氢原子。

在弗里德曼的模型中，任何典型星系的运动都与从地面向上抛起的石头的运动完全相似。如果石头抛起的速度足够快或者地球的质量足够小（两者等于一回事），那么，石头就会逐渐降下速来，但仍会脱离地球，进入无穷的宇宙。这意味着宇宙密度小于临界密度。另一方面，如果石头抛起的速度不足，那它就会在升到最大高度后回降。这当然意味着宇宙密度大于临界密度。

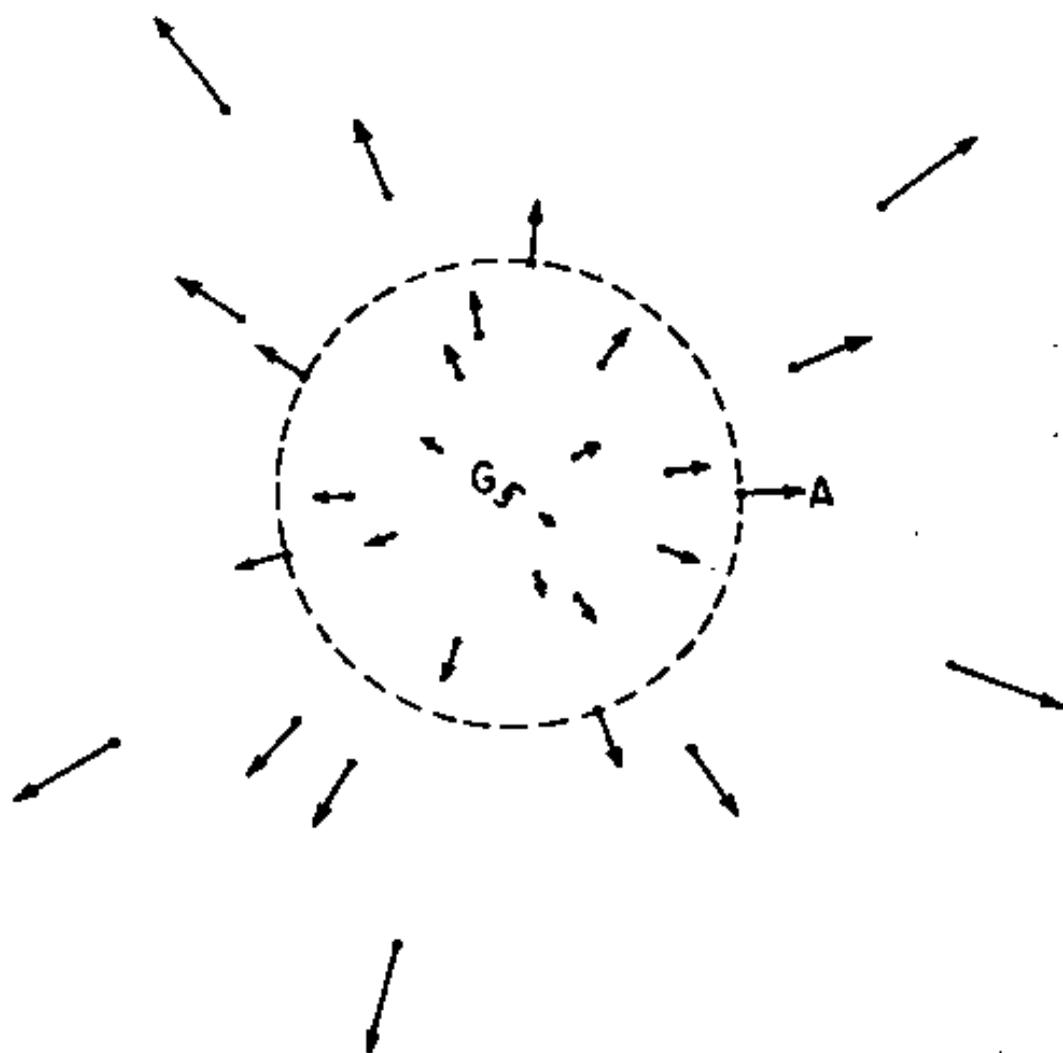
这一类比清楚地说明了为什么不可能找到爱因斯坦的方程的静态的宇宙学解法——看到石头从地面抛起或向地面降落，我们或许不以为怪，但我们却不可能看到石头静止不动地悬浮在半空中。这个类比还有助于我们避免对宇宙膨胀产生一个常见的误解。星系在迅速分离开来，不是被一些神秘的力量推开的，就像我们类比中抛起的石头不是受地球的排斥一样。相反，星系的分离是由于过去某种类型的爆炸面造成的。

人们在 1920 年代还没有认识到这一点，但弗里德曼模型的许多详细特性，可利用这一类比，在量上计算出来，而不必参考广义相对论。为了计算任何典型星系相对于我们星系的运动，我们可以画一个球，我们在中心，相关星系在球面：这个星系的运动是完全相同的，就好像宇宙的质量仅仅是由这个球的内部物质

组成的，而没有任何外来物质一样。这完全就像我们在地球的内部挖一个深洞，并观测物体降落的方式一样——我们会发现，向着中心的重力加速度，仅仅取决于离中心比离我们的洞穴近的物质数量，就好像地球表面是在我们的洞穴的深处似的。这个引人注目的结果已收入一个定理之中，它既在牛顿的引力理论中有效，也在爱因斯坦的引力理论中有效，它仅仅取决于正在研究中的系统的球面对称。这一定理的广义相对论形式，在1923年得到美国数学家G.D. 伯克霍夫的证实，但其宇宙学意义在随后的几十年中都没有为人所认识。

我们可以用这一定理来计算弗里德曼模型的临界密度（参见图3）。假如我们画一个球，我们在中心，一些遥远星系在球面时，我们可用球内部的星系的质量来计算逃逸速度，即球面的一个星系所具有的、使它刚好无法逃逸到无穷中去的速度。事实证明，这一逃逸速度与球的半径成正比——球的质量越大，星系逃逸所需的速度就越大。但哈勃定律告诉我们，处于球面的一个星系的实际速度也与球的半径——与我们的距离——成正比。因此，尽管逃逸速度取决于半径，星系的实际速度与其逃逸速度的比率却不取决于球的大小；对所有星系来说都是这样，无论我们以哪个星系为球的中心，情况都如此。根据哈勃常数值和宇宙密度值，按照哈勃定律运动的每个星系，要么超过逃逸速度，逃入无穷，要么达不到逃逸速度，在将来的某个时刻向我们回落。临界密度只不过是宇宙密度值，在这一密度上，每个星系的逃逸速度正好等于哈勃定律所给的速度。临界密度只能取决于哈勃常数，事实上，结果发现，它与哈勃常数的平方成正比（参见书后数学注释2）。

宇宙规模与时间的详细相依性（即任何典型星系间的距离），可用类似的参数计算出来，但结果相当复杂（参见图4。）然而，有一个简单结果在以后将会对我们非常重要。在宇宙形成之初，



**图 3 伯克霍夫的定理和宇宙膨胀** 显示了若干星系，以及它们相对于特定星系  $G$  的速度，这里用附加箭头的长度和方向表示。（根据哈勃定律，这些速度应与  $G$  的距离成正比。）伯克霍夫的定理称，为了计算星系  $A$  相对于  $G$  的运动，只需考虑通过  $A$  的、在  $G$  周围的球体内所包含的质量，这里用虚线表示。假使  $A$  与  $G$  的距离不是太远，那球体内的物质的引力场就是适中的， $A$  的运动则可通过牛顿力学规则计算出来。

宇宙的规模与时间的乘方成正比：如果辐射密度可忽略不计，则为三分之二次方，如果辐射密度超过了物质的密度；则为二分之一方（参见书后数学注释）。弗里德曼宇宙模型一个没有广义相对论就无法理解的方面是密度与几何之间的关系——根据星系

的速度是大于还是小于逃逸速度，宇宙要么是开放的、无穷的，要么是封闭的、有穷的。

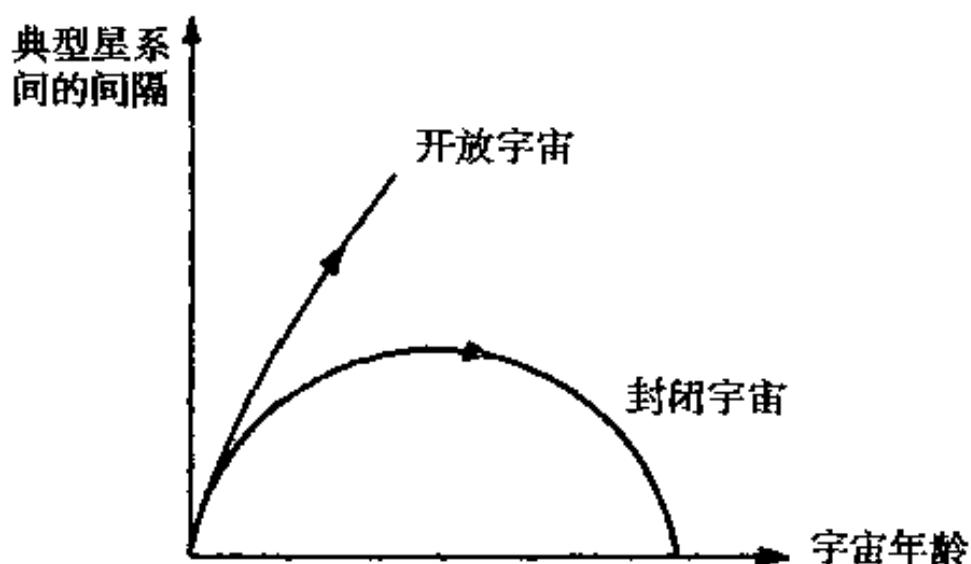


图4 宇宙的膨胀和收缩 两个可能的宇宙学模型的典型星系间的间隔是作为时间函数显示的（以任意单位）。在“开放宇宙”中，宇宙是无穷的；密度小于临界速度；膨胀尽管在减速，但仍将永远继续下去。在“封闭宇宙”中，宇宙是有穷的；密度大于临界密度；膨胀将最终停止并随后开始收缩。这些曲线是针对以物质为主导的时代，用爱因斯坦的场方程式计算的，没有使用宇宙学常数。

决定星系速度是否超过逃逸速度的一个方法，是测量它的减速程度。如果这一减速小于（或大于）某个数，那逃逸速度就会被（或不会被）超越。事实上，这意味着必须测量极遥远星系的红移与距离图的曲率（参见图5）。随着从密度较大的有穷宇宙向密度较小的无穷宇宙发展，红移与距离的曲线在极远的地方变平。对远处红移—距离曲线形状的研究，常常被称为“哈勃项目”。

哈勃、桑德奇，最近还有其他一些人，都为这一项目付出了巨大努力。但却没有取得定论性结果。问题在于，在估计遥远星系的距离时，是不可能找出造父变星或最明亮的恒星作距离参数

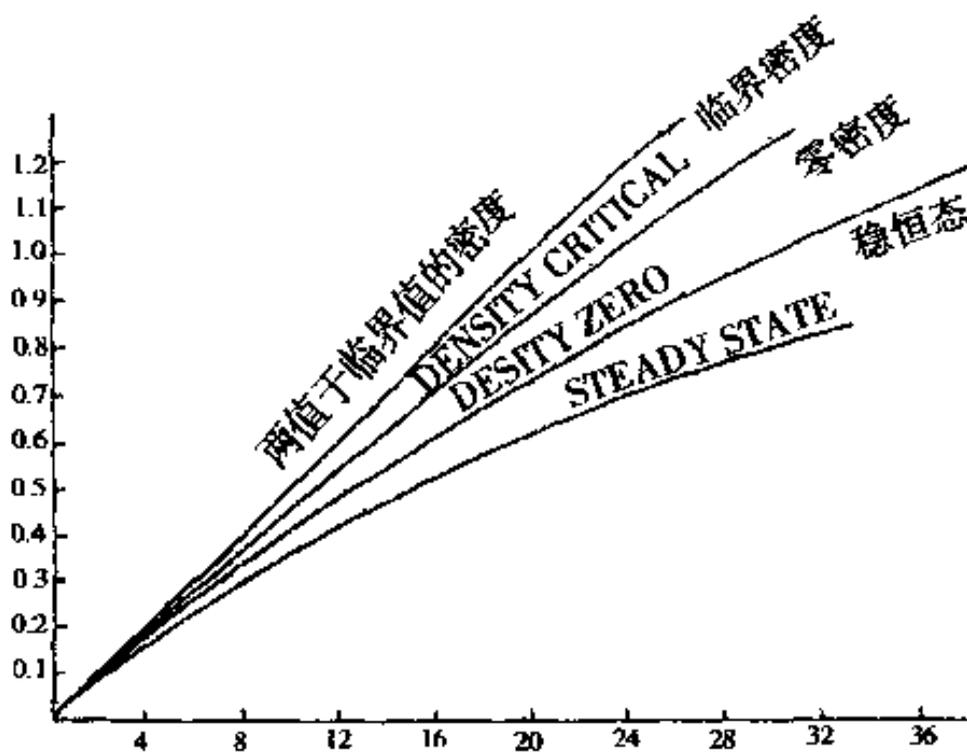


图5 红移与距离 这里，四种可能的宇宙学理论的红移是作为距离函数来显示的。(确切地讲，这里的“距离”是“光度距离”——根据对已知其固有或绝对光度的物体的视光度的观测，推断出的距离。)标有“两倍于临界值的密度”、“临界密度”和“零密度”的曲线，是在弗里德曼模型中，用爱因斯坦的场方程式，针对以物质为主导的时代计算的，没有使用宇宙学常数；与它们分别对应的是封闭宇宙、基本不开放宇宙和开放宇宙（参见图4）。标有“稳恒态”的曲线将适用于认为宇宙外表不随时间而变化的任何理论。当前的观测结果与“稳恒态”曲线不是很一致，但这并不一定确定其他可能性，因为在非稳恒态理论中，星系的演化使确定距离的工作变得非常棘手。所有曲线都是用15公里/秒/百万光年（相当于200亿年的特征膨胀时间）的哈勃常数绘制的，但通过调整所有距离，这些曲线也适用于任何其他的哈勃常数值。

的；相反，我们必须根据星系本身的视光度进行估计。但如何知道我们所研究的星系都有着同样的绝对光度呢？（记住视光度是我们每单位望远镜面积所接收到的辐射功率，而绝对光度是天文物体沿所有方向发射的总功率；视光度与绝对光度成正比，与距

离的平方成反比。)选择效应会产生可怕的危险——当我们观测的距离越来越远时,我们挑选的星系的绝对光度往往也会越来越大。一个更为严重的问题是星系的演化。当我们观察极为遥远的星系时,我们看到的是它们几十亿年前的情景,也就是光线开始向我们射来时的情景。如果典型星系在当时比现在亮,那我们就会低估它们的实际距离。最近由普林斯顿的 J.P. 奥斯特里科和 S.D. 特里梅因提出的一个可能性是,较大的星系的演化,不仅仅是因为它们的个体恒星的演化,还是因为它们吞并了周围的小星系!还需要很长一段时间,我们才能确信我们对各种星系的演化获得了充分的定量认识。

目前,能从哈勃项目中得出的最好的推断是,遥远星系的减速似乎相当小。这意味着它们的运动速度大于逃逸速度,所以宇宙才是开放的,并将继续无休止地膨胀下去。这与对宇宙密度的估计非常吻合;星系中的可见物质似乎加起来也不超过临界密度的几个百分比。然而,对这一点也没有完全的把握。对星系质量的估计数额近年来在不断增大。此外,如哈佛的乔治·菲尔德及其他人所提出的那样,可能存在着一一种星系际气体——电离氢,它能提供一种宇宙临界物质密度但却没有被人发现。

幸运的是,在对宇宙的创始作出结论时,没有必要对宇宙的大尺度几何作出定论。原因是宇宙有一种视界,这一视界会随着我们追溯宇宙的创始而迅速缩短。

没有任何信号的传播速度快于光速,所以在任何时候,我们都只能受到发生距离很近、使光线自宇宙创始起有时间到达我们的那些事件的影响。在这一距离之外的任何事件都还未对我们产生影响——它们处于视界之外。如果宇宙现在是 100 亿岁,那视界现在就是 300 亿光年远。但当宇宙的年龄为几秒时,视界则只有几光秒远——比现在从地球到太阳的距离还小。整个宇宙在当时较小,也是事实,我们一致认为,任何一对物体间的间隔都比

现在小。然而，随着我们追溯宇宙的创始，离视界的距离比宇宙的规模缩小的还快。宇宙规模与时间的二分之一一次方或三分之二二次方成正比（参见书后数学注释），而离视界的距离仅与时间成正比，所以时间越早，视界在宇宙中所围住的部分就越小（参见图 6）。

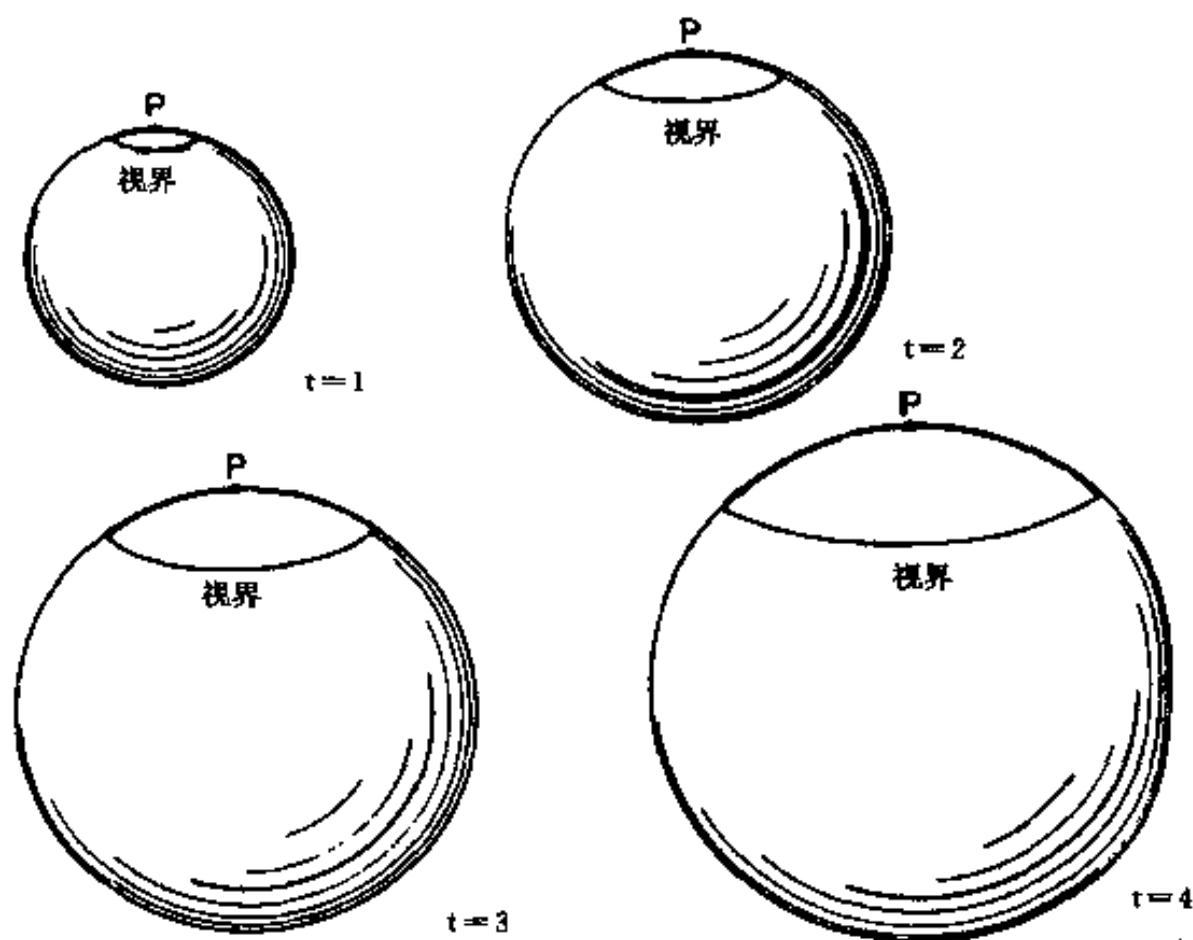


图 6 膨胀宇宙的视界 这里用球来表示四个相同时间间隔的宇宙。特定点 P 的“视界”，是指超出该距离，光信号就没有时间到达 P 的距离。这里，视界内的这一部分宇宙用没有阴影的球的顶部表示。从 P 到视界的距离的增加，与时间成正比。另一方面，宇宙“半径”的增长如同时间的平方根，相当于以辐射为主导的宇宙的情形。因此，时间越早，视界所包围的宇宙范围就越小。

作为早期宇宙中视界的这种缩短所产生的结果，整个宇宙的

曲率会随着我们追溯的时间越早而变得差别越来越小。所以，尽管当今的宇宙理论和天文观测还没有揭示宇宙的广度或未来，但它们却相当清楚地描述了它的过去。

本章所讨论的观测活动向我们展示了宇宙简单而壮丽的画面。宇宙正在一致地和各向同性地膨胀着——观测人员在所有典型星系中、在所有方向上，都发现了同样的流动型式。随着宇宙的膨胀，光线的波长也随着星系间距离的增加而伸长。据认为，膨胀不是任何类型的宇宙斥力所造成的，而仅仅是过去的爆炸的剩余速度所导致的结果。这些速度在引力的作用下正在逐渐变慢；这种减速看上去相当慢，说明宇宙的物质密度很低，其引力场太弱，既不能使宇宙在空间上变得无穷，也不能最终扭转膨胀。我们的计算结果使我们能够从时间上往回推断宇宙的膨胀，并揭示出，这一膨胀肯定是在 100 亿或 200 亿年前开始的。

## 第三章

# 宇宙微波辐射背景

上一章所讲述的情况是过去的天文学家所熟知的，连背景也是常见的：大型望远镜从加利福尼亚或秘鲁的山顶上探视着夜空，或者，观测者用肉眼在塔上“经常观望着熊星座，直到它消失”。正如我在前言中所提到的那样，这种情况在过去已讲述了多次，而且比这里往往还要详细。

现在我们来谈一谈一种不同的天文学，一些在十年前不可能讲述的事情。我们将要涉及的不是对几亿年前从或多或少类似我们的星系的那些星系上发射出来的光的观测，而是对从宇宙形成之时遗留下来的一种射电静电干扰弥漫背景的观测。背景也发生了变化，变成了大学物理楼的楼顶，变成了飞翔在地球大气上面的气球或火箭，变成了新泽西北部的田野。

1964年，贝尔电话实验室获得了新泽西州霍尔姆德尔市格劳福德山上的一座不同寻常的无线电天线。修建该天线是为了通过回声号卫星进行通讯，但其特点——20英尺长的超低噪声号角状反射器——使其成为射电天文学的一个大有作为的仪器。一对射电天文学家，阿诺·A. 彭齐亚斯和罗伯特·W. 威耳孙着手用这个天线来测量我们的星系在高银纬，即在银河系平面之外发射的射电波的密度。

这种测量难度很大。我们星系的射电波，同大多数宇宙的射电波一样，最好称之为一种“噪声”，跟雷雨天气时收音机上的

“静电干扰”声非常相似。这种静电噪声与射电天线结构和放大器电路内部的电子的随意运动所不可避免地产生的电噪声，与天线从地球大气中接收的射电噪声，都不易分辨开来。研究相对“较小”的射电噪声源（如恒星或遥远星系）时，这个问题还不是那么严重。在这种情况下，可以将天线射束在噪声源和邻近的空旷天空之间来回转换；来自天线结构、放大器电路或地球大气的任何乱真噪声，无论天线是朝向噪声源还是朝向附近天空，都是基本相同的，这样，当将两者进行比较时，它就会相互抵消。然而，彭齐亚斯和威耳孙打算测量的是来自我们自己星系——实际上是来自天空本身——的射电噪声。因此，辨析出有可能在他们的接收系统内部产生的任何电噪声，都是至关重要的。

事实上，在过去对这一系统的测试中所发现的噪声，比能够讲明其原因的噪声稍多一点，但这一差异有可能是放大器电路中的电噪声稍微超量造成的。为了消除这种问题，彭齐亚斯和威耳孙采用了一种称为“冷负载”的办法——将来自天线的功率与用超出绝对零度四度左右的液体氮冷却的人工源所产生的功率相比较。这样，放大器电路中的电噪声就会在两种情况下都相同，从而在比较中相互抵消，于是就可对来自天线的功率进行直接测量了。用这种方法测量的天线功率仅包括来自天线结构、地球大气和任何天文射电波源的功率。

彭齐亚斯和威耳孙估计天线结构内部所产生的电噪声寥寥无几。但是，为了检验这一假设，他们首先用相对较短的 7.35 厘米的波长进行观测，在这一波长，来自我们星系的射电噪声应能够忽略不计。当然，在这一波长，可能会有一些射电噪声来自地球大气，但这对方向有着独特的依赖：它与天线所指的方向的大气厚度成正比——偏向天顶时较小，偏向地平线时较大。据估计，减去有方向依赖性特征的大气项后，基本上就不会有天线功率残留下来了，这就证实天线结构内部所产生的电噪声的确可忽

略不计。接下来，他们就可用 21 厘米左右的较长波长研究星系本身了，在这一波长，星系射电噪声有可能相当可观。

（顺便提一句，波长为 7.35 厘米或 21 厘米，最高可达 1 米的射电波，被称为“微波辐射”。这是因为这些波长比第二次世界大战初期雷达上所使用的甚高频波段的波长短。）

令彭齐亚斯和威耳孙吃惊的是，他们在 1964 年春发现，他们在 7.35 厘米的波长上接收到了一种数量相当大的、不受方向影响的微波噪声。他们还发现，这种“静电干扰”并不随着时辰的变化、或一年内季节的变换而变化。它似乎不可能来自我们的星系；如果真是那样，那仙女座中的大星系 M31（它在大多数方面都与我们的星系相似）也应正在 7.35 厘米的波长上发出强大的辐射，而这一微波噪声应该已被人们观测到了。尤其是，所观测到的微波噪声不因方向而发生任何变化，这一点非常强烈地说明，这些射电波即使是真的，那也不是来自银河系，而是来自宇宙的一个大得多的天体。

显然，有必要重新考虑，天线本身产生的电噪声是否比预料的多。特别是，据知，一对鸽子一直栖息在天线的颈部。这对鸽子被捉住后寄往设在惠帕尼的贝尔实验室；释放后，发现它们几天后又回到了霍尔姆德尔的天线上；再次将它们捉住；最后，为了阻止它们而采取了更果断的措施。然而，在鸽子的栖息过程中，它们已将天线的颈部弄上了一层被彭齐亚斯绝妙地称为“一种白色介电物质”的东西，这种东西在室温下有可能成为电噪声源。1965 年初，得以打开天线并将这些杂物清理掉，但这以及所有其他努力，都只是使所观测到的噪声级降低了一点点。不解之谜依然存在：这种微波噪声来自何处？

彭齐亚斯和威耳孙所掌握的一条数字数据，是他们所观测到的射电噪声的强度。描述这一强度时，他们使用了一种在射电工程师中常见的措辞，但事实证明，它在这种情况下却产生了意想

不到的意义。高于绝对零度的任何温度的任何类型的物体，都会不断发射射电噪声，这是由物体内部电子的热运动产生的。在一个四壁不透明的盒子中，任何特定波长的射电噪声的强度，都仅仅取决于四壁的温度——温度越高，静电干扰强度越大。因此，可以用“等效温度”一词来描述在一个特定波长所观测到的射电噪声的强度。等效温度指的是盒子四壁的温度，在盒子中，射电噪声会达到观测强度。当然，射电望远镜不是温度计；它是通过记录射电波在天线结构中所导致的微小电流测量射电波的强度。当一个射电天文学家说他观测到了有着什么样的等效温度的射电噪声时，他的意思仅仅是说，这是为了获得射电噪声观测强度而不得不将天线置于其中的不透明盒子的温度。至于天线是否真的在这样的一个盒子中，那就是另一回事了。

（为了防止专家们提出反对意见，我想说一下，射电工程师常常用所谓的天线温度来描述射电噪声的强度，它与上述“等效温度”略有不同。对彭齐亚斯和威耳孙所观测到的波长和强度来说，这两种定义几乎完全相同。）

彭齐亚斯和威耳孙发现，他们所接收到的射电噪声的等效温度约为绝对零度以上 3.5 摄氏度（或更精确地说，为绝对零度以上 2.5 至 4.5 度）。按摄氏温标测量、但却指绝对零度而非冰的溶点的温度，是用“开氏温度”来描述的。因此可以说，彭齐亚斯和威耳孙所观测到的射电噪声的“等效温度”为 3.5 开氏度，简称为 3.5°K。这比预想的要高，但从绝对意义上讲仍然很低，所以不足为怪，彭齐亚斯和威耳孙在发表他们的结果前曾思考再三。当然，人们当时并没有立即看到这是自发现红移以来最重要的宇宙学进展。

神秘的微波噪声的含义，不久便开始通过天文物理学家组成的“无形学院”的行动得到阐释。彭齐亚斯碰巧因为其他事情给一个射电天文学界同仁——麻省理工学院的伯纳德·伯克——打

电话。伯克刚刚从另一位同事——卡内基学院的肯·特纳——那里听到特纳在约翰·霍普金斯处听到的、由来自普林斯顿的年轻理论家 P.J.E. 皮布尔斯所作的讲话。在这次讲话中，皮布尔斯提出，应该存在着一种从早期宇宙残留下来的射电噪声背景，其当前的等效温度大约为  $10^{\circ}\text{K}$ 。伯克已知道彭齐亚斯正在用贝尔实验室的角状天线测量射电噪声温度，所以他就借电话交谈之机，询问测量工作进展如何。彭齐亚斯说测量工作进行得很顺利，但对结果，却在有些方面不理解。伯克向彭齐亚斯建议说，普林斯顿的物理学家对他的天线所接收到的是些什么或许能提出一些有趣的看法。

皮布尔斯在他的谈话中，以及在 1965 年 3 月撰写的一个预印本中，已谈到了早期宇宙中可能存在的辐射。“辐射”当然是一个广义词，它囊括了所有波长的电磁波——不仅有射电波，还有红外线、可见光、紫外线、X 射线，以及称为  $\gamma$  射线的波长极短的辐射（参见书后所附图表）。它们之间没有明显的区分，随着波长的变化，一种辐射可逐渐与另一种辐射融为一体。皮布尔斯指出，如果在宇宙形成的最初几分钟没有一个强大的辐射背景存在，那核反应的进行就会非常迅速，当时存在的很大一部分氢就会被“烹饪”成较重的元素，这就与当前宇宙的大约四分之三是氢的事实相矛盾了。只有在宇宙充满辐射的情况下，这种迅速的核烹饪才能受到阻止，因为辐射可将核炸开，其爆炸速度如同其形成速度一样快。

我们将会看到，这种辐射在随后的宇宙膨胀中生存了下来，但其等效温度却随着宇宙的膨胀面继续下降，与宇宙的规模成反比。（我们将会看到，这实质上是第二章所讨论的红移的一个效应。）因此，当前宇宙也应充满辐射，但其等效温度要比最初几分钟低很多。皮布尔斯估计，辐射背景强度必定非常之大，使其当前温度至少达到 10 开氏度，只有这样，它才能保持在最初

几分钟内产生的氢和较重元素在已知的限度。

10°K 这一数字估计得多少有些高，不久，皮布尔斯和其他人又作出了更为慎重、更为精确的计算，这一点将在第五章中谈到。事实上，皮布尔斯的预印稿从未以原始形式发表过。不过，这一结论还是非常正确的：根据氢的观测丰度，我们可以推断，宇宙在最初几分钟必定充满了数量巨大的辐射，这种辐射能够阻止太多的较重元素的形成；随后的宇宙膨胀使其等效温度降低到几开氏度，从而形成了目前的射电噪声背景，它们平均地来自所有方向。这好像立即就成为了对彭齐亚斯和威耳孙的发现的理所当然的解释。因此，从某种意义上讲，设在霍尔姆德尔的天线的确是在一个盒子中——这个盒子就是整个宇宙。然而，天线所记录的等效温度却不是当前宇宙的温度，而是宇宙很久之前的温度，它是随着宇宙自那时起所发生的巨大膨胀而降低的。

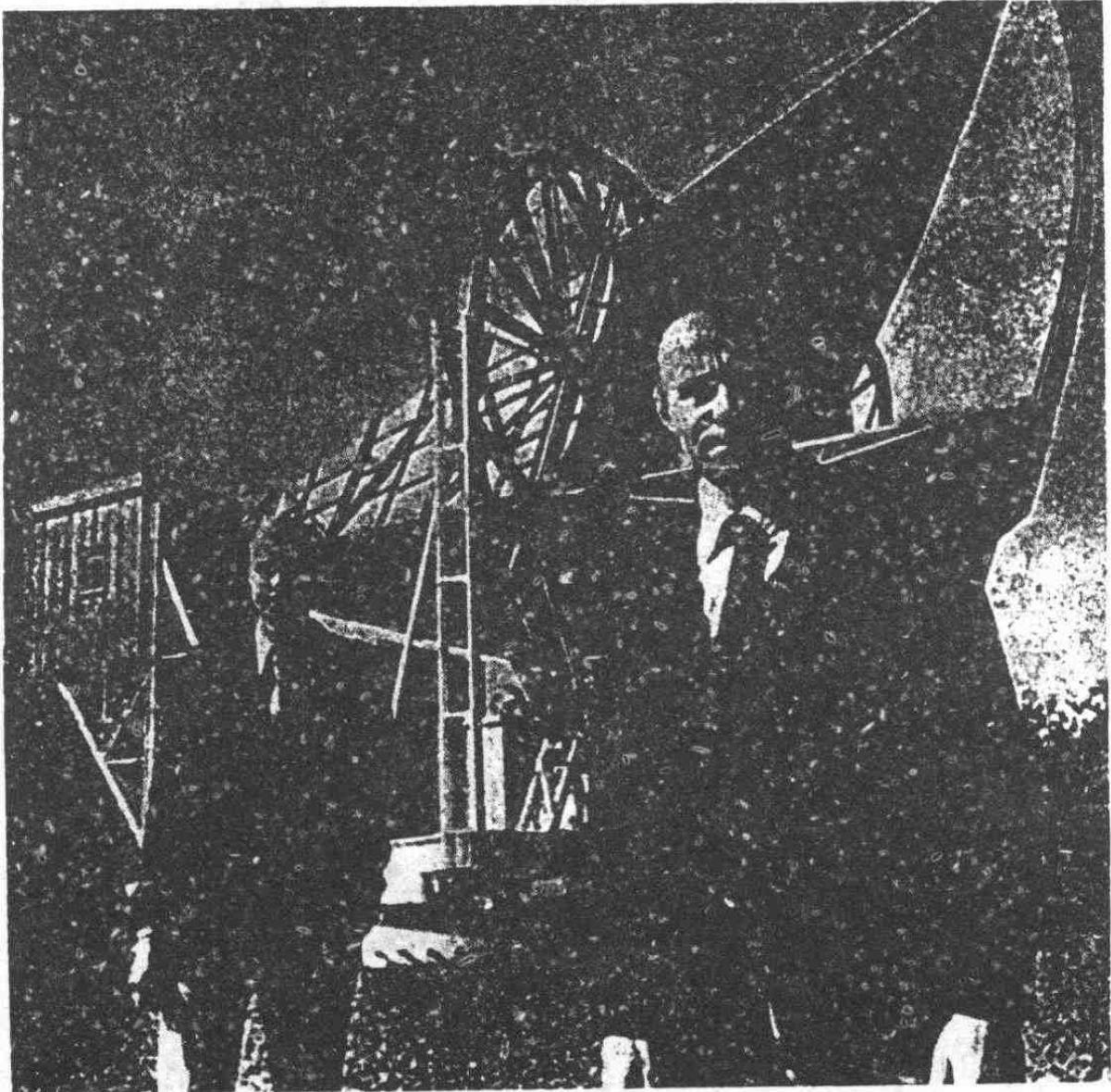
皮布尔斯所做的工作只不过是一系列大量类似的宇宙猜测中最晚作出的。事实上，在 1940 年代末叶，乔治·伽莫夫及其伙伴拉尔夫·阿尔弗和罗伯特·赫尔曼就已提出了关于核合成的“大爆炸”理论，1948 年，阿尔弗和赫尔曼运用这一理论作出预测，认为存在着一个辐射背景，其等效温度约为 5°K。1964 年，俄罗斯的亚·B. 泽利多维奇，英国的弗雷德·霍伊尔和 R.J. 泰勒又分别作出了类似的计算。这些早期工作开始不为贝尔实验室和普林斯顿的小组所知，也没有对辐射背景的实际发现产生影响，所以我们到第六章再来详细讨论。在第六章，我们还将探讨为什么这些早期工作没有一个导致对宇宙微波背景的研究这一令人费解的历史问题。

皮布尔斯在 1965 年进行的计算，受到了普林斯顿资深实验物理学家罗伯特·H. 迪克的思想的促动。（除了其他方面外，迪克还发明了射电天文学家所用的一些关键性微波技术。）在 1964 年的某个时候，迪克开始考虑，在宇宙温度高且密度大的早期阶

段，是否残留下来一些可观测到的辐射。迪克的猜测依据是一种关于宇宙的“振荡”理论。（我们将在本书的最后一章讨论这一理论。）他对这一辐射的温度似乎没有什么明确的期望，但对认为还是有东西值得探究的这一实质性观点表示赞赏。迪克向 P.G. 罗尔和 D.T. 威尔金森建议，他们一起对微波辐射背景开展研究，于是，他们着手在普林斯顿的帕洛马物理实验室的楼顶上架设了一个小型低噪声天线。（没有必要为此而使用大型射电望远镜，因为辐射来自四而八方，所以，安装一个针对性更强的天线，没有任何益处。）

在迪克、罗尔和威尔金森完成测量前，迪克接到了彭齐亚斯的电话，彭齐亚斯刚刚从伯克那里听说了有关皮布尔斯的工作的事。他们决定在《天文物理杂志》上发表两篇姊妹文章，彭齐亚斯和威耳孙宣布观测结果，迪克、皮布尔斯、罗尔和威尔金森则作出宇宙学解释。彭齐亚斯和威耳孙仍非常谨慎，给他们的论文起了一个很适中的标题——“在 4,080 Mc/s 上对过量天线温度的测量”。（天线调到的频率是 4,080 Mc/s，或每秒 40.8 亿周，相当于 7.35 厘米的波长。）他们仅宣布说，“对有效的天顶噪声温度的测量……已得出一个比预想值高约  $3.5^{\circ}\text{K}$  的值，”他们还避免提及宇宙学，仅是指出，“对所观测到的过量噪声温度的可能解释，是迪克、皮布尔斯、罗尔和威尔金森在本期的姊妹文章中所作的解释。”

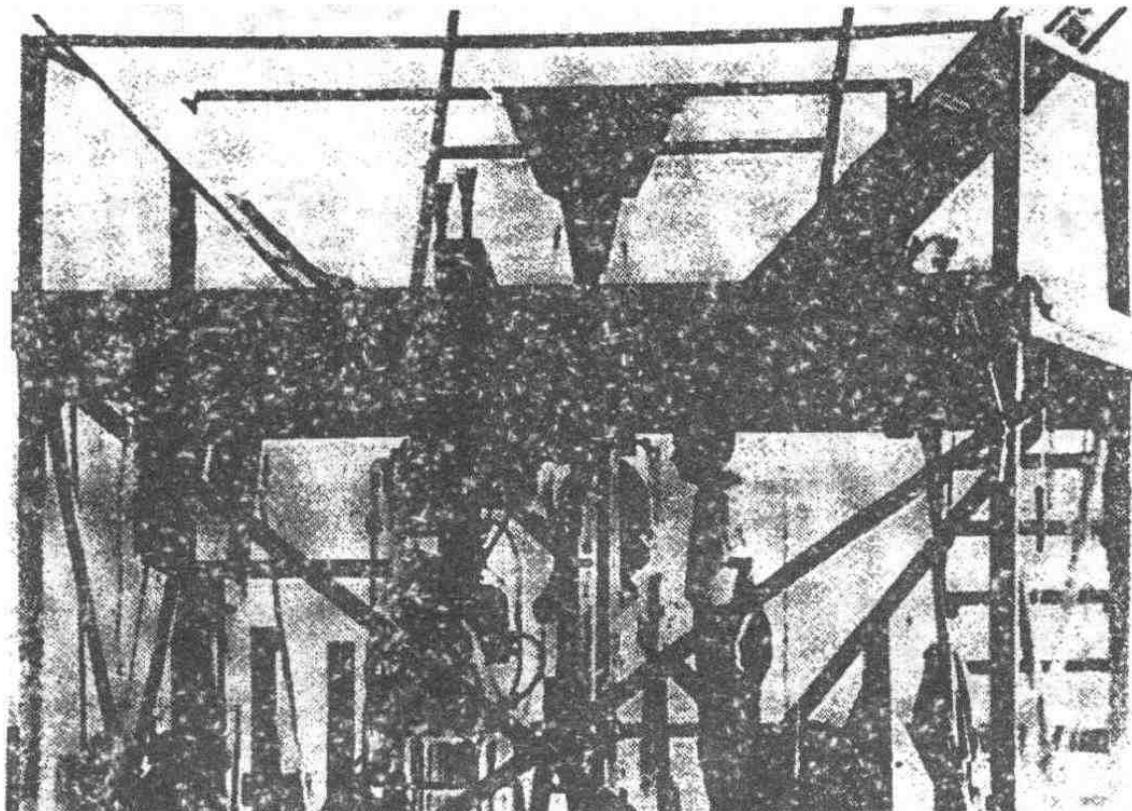
彭齐亚斯和威耳孙所发现的微波辐射真的是从宇宙初期残留下来的吗？在我们接着考虑自 1965 年以来为解决这一问题而开展的实验之前，我们应该首先了解我们在理论上的预想：如果当前的宇宙学思想是正确的，那应该充满宇宙的辐射的基本特性是什么？这个问题会使我们想到，随着宇宙的膨胀——不仅包括发生核合成时、最初三分钟结束时，还包括自那时起已过去的十亿年时间——辐射发生了什么。



**霍尔姆德尔的射电望远镜：阿诺·彭齐亚斯（右）和罗伯特·W. 威耳孙（左）以及他们 1964 - 65 年用来发现  $3^{\circ}\text{K}$  的宇宙微波辐射背景的 20 英尺号角状天线。这个望远镜坐落在贝尔电话实验室的所在地——新泽西的霍尔姆德尔。（贝尔电话实验室图片）**

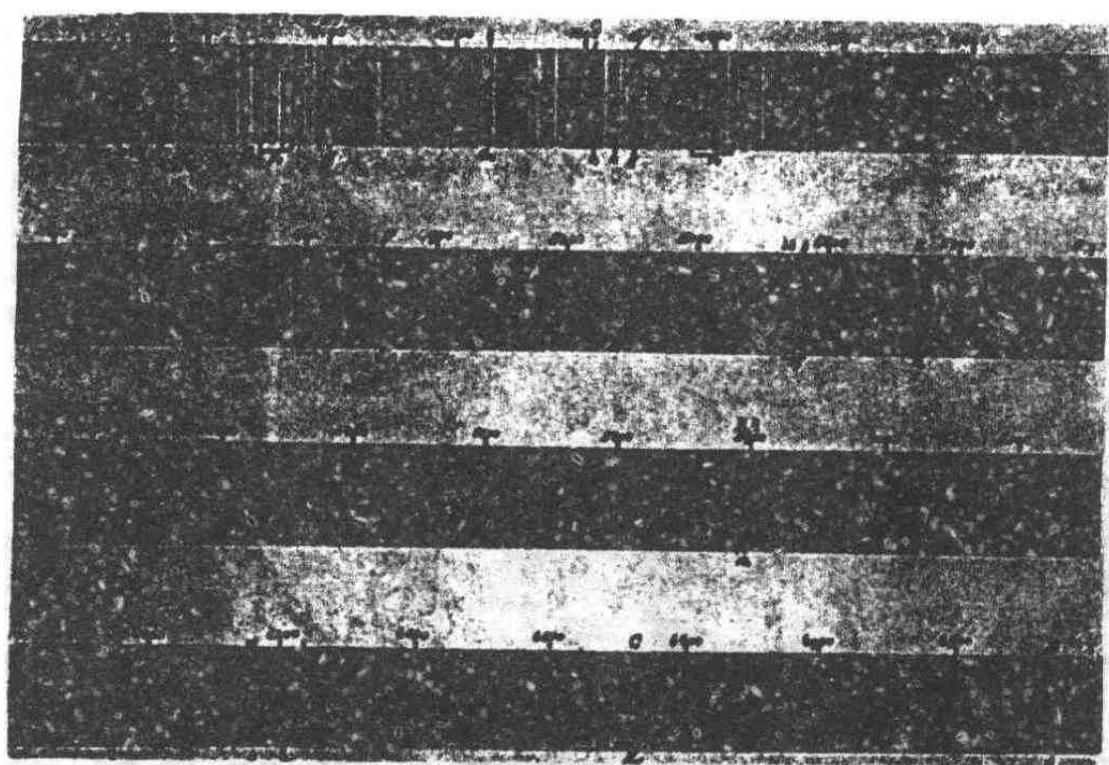


**霍尔姆德尔射电望远镜的内部：**图中，彭齐亚斯正在轻轻拍打霍尔姆德尔20英尺的号角状天线的接合处，威耳孙则在一旁观看。为了消除天线结构中有可能造成1964—65年所观测到的3°K的微波静电的任何可能的电噪声源，他们进行了努力，这是其中的一部分。他们的所有此类努力仅轻微地减少了微波噪声观测强度，这不可避免地导致一个结论，即这种微波辐射确实来自宇宙。（贝尔电话实验室图片）



**普林斯顿射电天线：**这是在普林斯顿进行最初实验时的照片，该实验的目的是寻找有关宇宙辐射背景的证据。小型角状天线朝向天空，安装在木制平台上。图中，威耳孙正在天线下面稍微偏右的地方；罗尔则正好在大线的下方，几乎让仪器完全遮挡住了。闪闪发光的、有着圆锥形顶部的圆柱体，是用来维持液体氦参照源的低温设备的一部分。可将液体氦参照源的辐射与来自天空的辐射进行对比。这次实验证实了在短于彭齐亚斯和威耳孙所使用的波长上， $3^{\circ}\text{K}$  的辐射背景的存在。（普林斯顿大学图片）

## 用 13 英尺的光谱仪制作的太阳光谱



**太阳光谱：**这幅照片显示了来自太阳的光，它被一个 13 英尺的聚集光谱仪分成了各种波长。平均说来，不同波长上的强度同温度为  $5800^{\circ}\text{K}$  的任何完全不透明（或“黑”）物体所发射的强度基本相同。然而，光谱中的黑色垂直夫琅和费线说明，来自太阳表面的光线正被一个相对凉爽和部分透明的外部区域所吸收，这个区域被称为反变层。每条黑线均是由一定波长的光线的选择性吸收造成的；线越黑，表示吸收的强度越大。波长是在光谱上面，以埃单位（ $10^{-8}$  厘米）表示的。其中许多线被认为是由于具体元素，如钙（Ca）、铁（Fe）、氢（H）、镁（M）、钠（Na），对光线的吸收而造成的。部分地通过研究这种吸收线，我们可以估计出宇宙中各种化学元素的丰度。据观测，遥远星系的光谱中的相应吸收线从它们的通常位置朝着较长波长移动；正是根据这种红移，我们推断宇宙正在膨胀。（海耳天文台图片）

如果现在放弃我们至此一直在使用的从电磁方面对辐射的传统描述，转而采用认为辐射是由称为“光子”的粒子组成的更时髦的“量子”观点，那在这里将是非常有帮助的。普通光波中包含着数量巨大的一起传播的光子，但如果我们要非常精确地测量波列所携带的能量，我们就会发现，它总是一定量的某种倍数。我们称之为单个光子的能量。我们将会看到，光子的能量一般都比较小，所以，从大多数实用目的上讲，似乎电磁波可以有任何能量。然而，辐射与原子或原子核的相互作用，通常是一次一个光子，因此在研究这种过程时，有必要采取光子而非波的描述法。光子的质量和电电荷为零，但它们却是实实在在的——每个光子都有一定的能量和动量，甚至还绕着它的运动方向作一定的自旋。

当单个光子在宇宙中传播时，会发生什么呢？从当前宇宙的情况看，不会发生很多事情。从大约 100 亿光年远的物体上发出的光传播到我们这儿，似乎没有任何问题。所以，无论星系际空间中存在的是何种物质，它的透明情况肯定都非常好，这样，光子才能跨越宇宙一段相当长的年代而没有被散射或吸收。

然而，遥远星系的红移告诉我们，宇宙正在膨胀，所以它的成分的压缩程度必定曾一度比现在大得多。当液体受到压缩时，液体的温度通常会升高，所以，我们还可推断，宇宙物质的温度在过去要高得多。实际上，我们认为一度曾有段时间（我们将会看到，这段时间自宇宙形成后可能持续了 700,000 年），宇宙成分的温度非常高，密度非常大，还不能凝聚成恒星和星系，甚至原子仍处于分裂状态，表现为其组分核和电子。

在这些不利的条件下，光子无法像在我们当前的宇宙中那样，做到不受阻碍地大距离传播。光子在旅途中会遇到大量的自由电子，自由电子可高效率地散射或吸收光子。如果光子被电子散射，在一般情况下，要么将少量能量给予电子，要么从电子那

儿获得少量能量，结果如何，取决于光子最初的能量是多于还是少于电子的能量。光子在被吸收或其能量发生明显变化前，能够传播的“平均自由时间”相当短，比宇宙的特征膨胀时间短得多。其他粒子——电子和原子核——的相应平均自由时间甚至更短。因此，尽管在某种意义上讲，宇宙起初的膨胀速度非常快，但对单个光子、电子或核来说，膨胀所用的时间已足够长了，长得足以使每个粒子随着宇宙的膨胀而多次被散射、吸收或再发射。

任何此类系统（在这一系统中，单个粒子有时间多次相互作用）都有可能逐渐达到一种平衡状态。其特性（位置、能量、速度、自旋，等等）在一定范围内的粒子的数量会达到一个值，使每秒撞出射幅的粒子数量等同于撞入的数量。因此，这样一个系统的特性不是由起初的任何条件决定的，而是由维持平衡的要求决定的。当然，“平衡”在这里不是指粒子被冻结——每个粒子都连续不断地受到相邻粒子的碰撞；而是说，平衡是统计意义上的——这是粒子在位置、能量等等方面的分布方式，这种方式不变化或变化得很慢。

这一统计类型的平衡通常被称为“热平衡，”因为这种平衡总是有一个特点，即整个系统内的温度都是一定的。实际上，严格地讲，只有在热平衡状态下，才能精确地确定温度。“统计力学”是理论物理的一个强大而深奥的分支，它为计算处于热平衡中的任何系统的特性，都提供了一种数学工具。

热平衡的实现方式，同人们所认为的价格机制在古典经济学中的运作方式有点相似。如果求大于供，商品价格就会上涨，从而抑制有效需求，并促进产量的提高。如果供大于求，价格就会下跌，从而提高有效需求，并抑制进一步的生产。在两种情况下，供求都会趋于平衡。同样，如果某个特定射幅中具有能量、速度等等的粒子过多或过少，那它们离开射幅的速度就会大于或

小于它们进入射幅的速度，直至实现平衡。

当然，价格机制的运行方式，并不总是与古典经济学所认为的方式完全相一致，但这一类比在这里同样适用——现实世界中的大多数物理体系都与热平衡相去甚远。在恒星的中心，热平衡几近完美，所以我们在估计那里的情况时还能有些信心，但地表却与平衡差得很远，所以我们没有把握明天是否会下雨。宇宙从未达到过完美的热平衡，因为它毕竟在不断地膨胀着。不过，在早期，当单个粒子的散射或吸收速度大大超过宇宙的膨胀速度时，还是可以这样认为的：即宇宙正从一种近乎完美的热平衡状态“缓慢地”向另一种状态演化。

宇宙曾经过一个热平衡状态，这对本书的论点至关重要。根据统计力学的结论，一旦我们明确了处于热平衡的任何系统的温度以及一些守恒量（下一章将作更多论述）的密度，那就能彻底地确定该系统的特性了。比如，宇宙保存下来的有关其早期情况的线索非常有限。这是件令人遗憾的事，如果我们要做的是重现宇宙的创始的话，但它也提供了一种补偿，即我们可以对宇宙创始以来的事态进程进行推断，而不必随心所欲地东猜西想。

我们业已看到，彭齐亚斯和威耳孙所发现的微波辐射，被认为是从宇宙处于热平衡状态的时候残留下来的。因此，为了弄清我们认为所观测到的微波辐射背景具有什么特性，我们应提出如下问题：与物质有着热平衡的辐射的基本特性是什么？

也巧，这个问题恰好是在历史上导致量子理论及对辐射作出光子解释的问题。到1890年代，已得知与物质处于热平衡状态的辐射的特性仅仅取决于温度。更具体地说，这种辐射在一定波长范围每单位体积能量的数量，都是通过一个仅仅涉及到波长和温度的通用公式计算出来的。用这个公式还可计算出四壁不透明的盒子内的辐射数量，所以，射电天文学家可用这个公式，从“等效温度”方而来解释他所观测到的射电噪声的强度。实质上，

用这个公式还可计算出任何完全性吸收表面在任何波长上每秒和每平方厘米所发射的辐射量，所以这类辐射通常被称为“黑体辐射”。也就是说，黑体辐射的特点是能量随波长的确切分布可用一个仅依赖于温度的通用公式计算出来。理论物理学家在 1890 年代所面临的最热门问题是找到这一公式。

马克斯·卡尔·恩内斯特·路德维希·普朗克在 19 世纪即将结束前的最后几周找到了黑体辐射的正确公式。图 7 显示了普朗克的结论的精确形式，它表示的是所观测到的宇宙微波噪声  $3^{\circ}\text{K}$  的特定温度。对普朗克的公式，可作如下定性归纳：在一个充满黑体辐射的盒子中，任何波长范围的能量都随着波长的增加而陡增，达到最高点后便再次陡降。这一“普朗克分布”是通用的，它不取决于与辐射相互作用的物质的性质，而是仅仅取决于其温度。按今天的用法，“黑体辐射”一词指的是其中的伴随着波长的能量分布，与普朗克公式相符合的任何辐射，无论辐射是否真的是由黑体发射的。因此，至少在开始时的第 100 万年左右的时间里，当辐射与物质处于热平衡状态时，宇宙中必定充满了与宇宙的物质成分的温度相同温度的黑体辐射。

普朗克的计算结果的重要性，远远超出了黑体辐射问题的范围，因为它在其中引进了一个新思想，即能量是以不同的量或“量子”的形式出现的。普朗克起初只考虑到了与辐射处于平衡状态的物质能量的量子化，但几年后，爱因斯坦提出，辐射本身也是以量子的形式产生的，这在后来被称为光子。这些研究进展最终在 1920 年代导致了科学史上伟大的知识革命之一——用一种全新的语言，即量子力学，取代古典力学。

我们在本书中不能深入地讨论量子力学。然而，看一看从光子的角度展现的辐射是如何导致普朗克分布的基本特征的，对我们理解宇宙膨胀中辐射的行为还是有益的。

黑体辐射的能量密度在极大波长的情况下出现降低的原因很

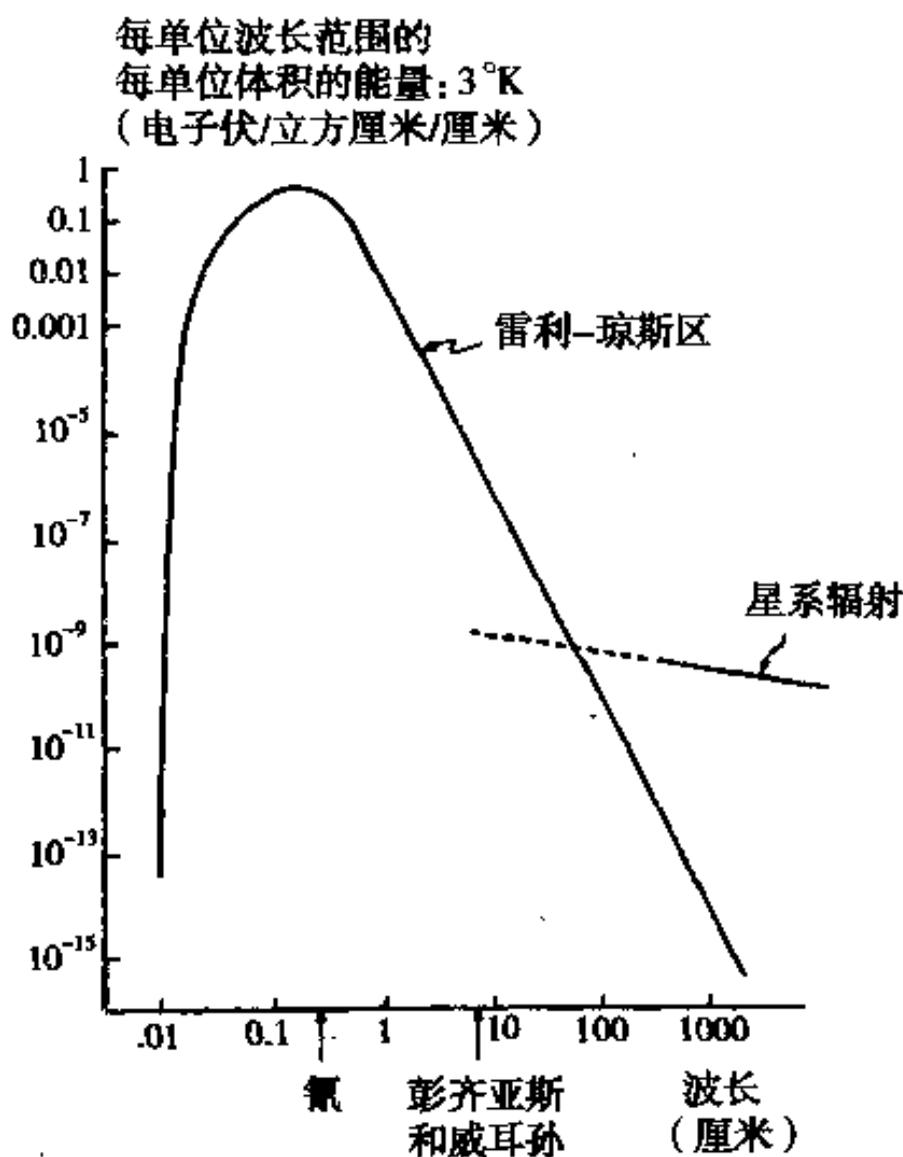


图7 普朗克分布 温度为  $3^{\circ}\text{K}$  的黑体辐射的每单位波长范围的能量密度，是作为波长的函数来显示的。(对比  $3^{\circ}\text{K}$  高  $f$  倍的温度来说，只需要将波长减少为  $1/f$ ，将能量密度增加为  $f^5$ 。) 曲线右边的直线部分用“雷利-琼斯分布”作了近似描述；除了黑体辐射外，许多情况下都有可能出现这一斜度的线。左边的陡降是由辐射的量子性质造成的，是黑体辐射的一个具体特点。标有“星系辐射”的线显示了来自我们星系的射电噪声的强度。(箭头表示彭齐亚斯和威耳孙最初测量的波长，在这一波长上，可根据对星际氟的第一个激发转动态吸收所作的测量结果来推断辐射的温度。)

简单：将辐射纳入其尺度小于波长的任何体积都是困难的。这一点，没有量子理论，仅凭以前的关于辐射的波理论，也可理解（人们也这样理解了）。

另一方面，黑体辐射的能量密度在极短波长的情况下也出现降低，这就不能用非量子描述辐射的做法理解了。众所周知，统计力学有一个推论，即在任何特定温度下，都难以产生能量大于与温度成正比的一定数量的任何类型的粒子、波或其他激发。然而，如果辐射子波可以有任意小的能量的话，那就不会有任何东西限制极短波长的黑体辐射的总数量了。这不仅与实验结果相矛盾——而且还会导致黑体辐射的总能量变得无穷尽这一灾难性后果！唯一的解决办法是假设能量是以块或“量子”的形式出现的，每个块的能量随着波长的缩短而增加，这样，在任何特定温度下，短波长的辐射极少，因为块有高的能量。在来自于爱因斯坦的这一假说的最后公式中，任何光子的能量都与波长成反比；在任何特定温度下，黑体辐射所包含的有着极大能量的光子都极少，因此它所包含的有着极短波长的光子也极少，这就阐明了在短波长上普朗克分布出现减少的原因。

具体地讲，波长为一厘米的光子的能量为 0.000124 电子伏，随着波长变短，它会相应增大。电子伏是一种方便的能量单位，等于一个电子在通过一个一伏的电压降时所获得的能量。比如，一个普通的 1.5 伏的闪光灯电池，推动每个电子通过电灯丝时所消耗的电子伏为 1.5 伏。（用能量测量单位表示，一电子伏为  $1.602 \times 10^{-12}$  尔格，或  $1.602 \times 10^{-19}$  焦耳。）极据爱因斯坦的规则，在彭齐亚斯和威耳孙所调到的 7.35 厘米微波波长上的一个光子的能量，为 0.000124 除以 7.35，即 0.000017 电子伏。另一方面，可见光的典型光子的波长约为两万分之一厘米（ $5 \times 10^{-5}$  cm），因此它的能量为 0.000124 电子伏乘以 20,000，或大约 2.5 电子伏。在其中任何一种情况下，一个光子的能量从宏观上讲都是很小

的，所以，光子似乎是在混合在一起后才形成连续辐射流的。

顺便提一下，化学反应能量的数量级通常为每个原子带一电子伏或每个电子带一电子伏。比如，打破一个氢原子，弄出里面的电子，总共需要 13.6 电子伏，但这是极端强烈的化学事件。阳光中的光子也有着—个电子伏左右的数量级的能量这一事实，对我们至关重要；是它使这些光子得以产生对生命不可或缺的化学反应，如光合作用。核反应能量的数量级通常为每个原子核一百万电子伏，所以—磅铀的爆炸能量大致相当于一百万磅的 TNT 炸药。

光子的这种情景使我们很容易就能理解黑体辐射的主要定性特性。首先，统计力学的规则告诉我们，典型光子的能量与温度成正比，而爱因斯坦的规则则说任何光子的波长都与光子能量成反比。因此，综合这两个规则得出，黑体辐射中的光子的典型波长与温度成反比。从量上说，其附近聚集着黑体辐射的大部分能量的典型波长，在  $1^{\circ}\text{K}$  的温度下，为 0.29 厘米，随着温度的升高，它会相应变短。

比如，—个处于  $300^{\circ}\text{K}$  ( $=27^{\circ}\text{C}$ ) 普通“室”温的不透明物体所发出的黑体辐射的典型波长，为 0.29 厘米除以 300，或大约千分之一厘米。这属于红外辐射的范围，其波长太长，非肉眼所能见。另一方面，太阳表面的温度约为  $5,800^{\circ}\text{K}$ ，所以它发出的光的峰值波长，大约为 0.29 厘米除以 5,800，也就是说，约为 50 万分之一厘米 ( $5 \times 10^{-5}\text{cm}$ )，或相当于 5,000 埃左右。(—埃为—亿分之一或  $10^{-8}$  厘米。) 业已指出，这正处在—我们经过演化后的肉眼能够看到的波长范围的中间，我们称之为“可见”波长。这些波长是如此之短这一事实，说明了为什么直到 19 世纪初，才发现光有着波的性质；只有当我们研究通过非常小的孔的光时，我们才能发现波传播所特有的一些现象，如衍射。

我们还看到，较长波长的黑体辐射的能量密度的降低，是由

于难以将辐射纳入尺度小于波长的任何体积而造成的。事实上，黑体辐射中光子之间的平均距离，大致等于典型光子波长。但我们看到，这种典型波长与温度成反比，所以光子之间的平均距离也与温度成反比。固定体积中任何类型的物体的数量，都与其平均间隔的立方成反比，所以，黑体辐射中的规则是，特定体积中的光子的数量与温度的立方成正比。

我们可将这些信息综合起来，得出有关黑体辐射中能量数量的一些结论。每升的能量，或“能量密度”，是每升的光子数量乘以每个光子的平均能量。但我们业已看到，每升的光子数量与温度的立方成正比，而平均光子能量与温度成正比。因此，黑体辐射中每升的能量与温度的立方乘以温度成正比，或换言之，与温度的四次方成正比。从量上说，黑体辐射的能量密度在  $1^{\circ}\text{K}$  的温度下为每升 4.72 电子伏，在  $10^{\circ}$  的温度下为每升 47,200 电子伏，以此类推。（这被称为斯蒂芬-玻耳兹曼定律。）如果彭齐亚斯和威耳孙所发现的微波辐射的确是温度为  $3^{\circ}\text{K}$  的黑体辐射，那它的能量密度就应为每升 4.72 电子伏乘以 3 的四次方，或大约每升 380 电子伏。当温度提高一千倍时，能量密度则提高一万亿 ( $10^{12}$ ) 倍。

现在我们可以回到古老微波辐射的起源了。我们业已看到，宇宙必定有一个时期，其温度非常高，密度非常大，致使原子被分解成了核和电子，而自由电子对光的散射，则保持着物质和辐射之间的热平衡。随着时间的推移，宇宙开始膨胀和冷却，最终达到了足以使核和电子结合成原子的低温（约  $3,000^{\circ}\text{K}$ ）。（在天体物理文献中，这通常被称为“再结合，”这是个不恰当的词，因为在我们所谈的那个时间，核和电子从未在过去的宇宙史上结合成原子过！）自由电子的突然消失断开了辐射和物质之间的热联系，此后，辐射继续自由地膨胀着。

这一事件发生时，各种波长的辐射中的能量是由热平衡状况

支配的，因此可通过关于与物质温度相等的温度（约  $3,000^{\circ}\text{K}$ ）的普朗克公式计算出来。

自那时起，光子发生了什么情况？单个光子不会被创造或摧毁，所以光子之间的平均距离只不过是随着宇宙规模，即随着典型星系间的平均距离的增大而增加而已。但我们在上一章看到，宇宙学上的红移效应是随着宇宙的膨胀，将所有光线的波长都“拉长”；因此，所有单个光子的波长也只不过是随着宇宙规模的增大而增加而已。所以，光子之间的间隔仍保持着大约一个典型波长的距离，恰如黑体辐射那样。实际上，从量上讲，照此推理，可以说，随着宇宙的膨胀，充满宇宙的辐射仍可用普朗克黑体公式准确地描述，尽管它不再与物质保持着热平衡（参见书后数学注释4）。膨胀的唯一效应是使典型的光子波长随着宇宙规模的增大而增大。黑体辐射的温度与典型波长成反比，所以它会随着宇宙的膨胀而降低，与宇宙的规模成反比。

比如，彭齐亚斯和威耳孙发现，他们所发现的微波静电干扰相当于大约  $3^{\circ}\text{K}$  的温度。据估计，如果宇宙自温度（ $3,000^{\circ}\text{K}$ ）高得足以使物质与辐射保持热平衡以来一直按 1,000 的系数膨胀的话，那结果恰好就是这样。如果这一解释是正确的，那  $3^{\circ}\text{K}$  的射电静电干扰就是迄今天文学家所接收到的最古老的信号，它的发射时间比我们所能看到的最遥远星系的光还早得多。

但彭齐亚斯和威耳孙所测量的仅仅是处于一个波长，即 7.35 厘米的宇宙射电静电干扰的强度。因此，当务之急是确定伴随着波长的静电能量的分布是否可用普朗克黑体公式来描述，如果这确实是从辐射和宇宙物质处于热平衡时的某个时期残留下来的古老红移辐射的话，估计是可以这样描述的。在这种情况下，通过将射电噪声观测强度与普朗克公式相对应而计算出来的“等效温度”，就应在所有波长上都有着与彭齐亚斯和威耳孙所研究的 7.35 厘米的波长上相同的值。

我们已看到，当彭齐亚斯和威耳孙作出发现时，另一个旨在探测宇宙微波辐射背景的努力也已在新泽西州展开。贝尔实验室和普林斯顿的小组发表首对姊妹论文后不久，罗尔和威尔金森又宣布了他们自己的成果：在波长 3.2 厘米处的辐射背景的等效温度，处于 2.5 至 3.5 开氏度之间。即是说，在实验误差内，在 3.2 厘米波长处的宇宙静电干扰的强度，大于 7.35 厘米处，其比率恰好就是用普朗克公式描述辐射时所得出的比率！

自 1965 年以来，射电天文学家已在从 73.5 厘米到 0.33 厘米的许多波长上，对古老微波辐射的强度进行了测量。每次测量的结果都与相对于波长的普朗克能量分布相一致，温度都在  $2.7^{\circ}\text{K}$  和  $3^{\circ}\text{K}$  之间。

然而，在我们作出这确实就是黑体辐射的结论之前应回忆一下，普朗克分布达到最高值的“典型”波长，是 0.29 厘米除以开氏温度，对  $3^{\circ}\text{K}$  的温度来说，计算结果恰恰不到 0.1 厘米。因此，所有这些微波测量活动都是在普朗克分布的最高值的长波方面进行的。但我们业已看到，在波谱的这一部分，能量密度随着波长的缩短而增加的原因，在于难以将大波长纳入小体积中，估计许多辐射场都是这样，其中也包括那些不是在热平衡状态下产生的辐射。（射电天文学家将这一部分波谱称为雷利 - 琼斯区，因为首次对它进行分析的，是雷利勋爵和詹姆斯·琼斯爵士。）为了证实我们所看到的的确是黑体辐射，我们应超越普朗克分布的最高值，进入短波领域，检查能量密度是否真的随着波长的缩短而降低，就像根据量子理论所得出的结论那样。在小于 0.1 厘米的波长上，我们实际上已超出了射电微波天文学家的研究领域，进入了红外天文学这一更新的学科。

不幸的是，我们地球的空气在 0.3 厘米以上的波长上几近透明，而在较短的波长上，透明度愈来愈小。坐落在地而甚至是高山上的任何一个射电天文台，要在大大小于 0.3 厘米的波长上测

量宇宙辐射背景，似乎都是不可能的。

奇怪的是，辐射背景确实是在较短的波长上测量的，比本章迄今所讨论的任何天文观测工作都早许多，而且还是由一名光学而非射电或红外天文学家进行的！在蛇夫星座中，有一个星际气体云，它正巧处于地球和一个炽热但在其他方面并不显眼的恒星——蛇夫 $\zeta$ ——之间。蛇夫 $\zeta$ 的光谱中交叉着好多不常见的黑带，说明贯穿于其间的这种气体正在一系列偏高波长上吸收着光线。在这些波长上，光子拥有的能量恰好是在气体云的分子中诱发跃迁、使能量从低状态转变到高状态所需的能量。（分子同原子一样，也仅仅以分立的或“量子化”能量状态存在。）因此，观测到黑带所发生的波长后，就有可能对这些分子的性质以及它们所处的状态，作出某些推断了。

蛇夫 $\zeta$ 的光谱中有一个吸收线处于 3,875 埃（一厘米的百万分之 38.75）的波长上，这说明在星系际气体云中存在着一种分子——氰（CN），它是由一个碳原子和一个氮原子组成的。（严格说来，CN 应被称作“基，”意思是在正常情况下，它会与其他原子迅速结合成更稳定的分子，如毒物氰化酸（HCN）。在星系际空间中，CN 是相当稳定的。）1941 年，W.S. 亚当斯和 A. 麦凯勒发现，这种吸引线实际上是分割开来的，由三个波长分别为 3874.608 埃、3875.763 埃和 3873.998 埃的部分组成。这些吸收波长中的第一个相当于一种跃迁，氰分子被从最低能态（“基态”）提升到振动态，即使氰的温度为零，这些波长也有可能产生。然而，另外两种线只能通过将分子从刚刚高于基态的转动态提升到其他不同振动态的跃迁来产生。因此，在星际云中，肯定有相当一部分氰分子处于这种转动态。麦凯勒运用基态和转动态之间的已知能量差以及各种吸收线的观测相对强度，作出估计，认为氰正受到其有效温度约为  $2.3^{\circ}\text{K}$  的某种扰动的影响，这种扰动能够将氰分子提升到转动态。

当时，似乎没有任何理由将这一神秘扰动与宇宙起源联系起来，它也没有引起很大注意。然而，在1965年发现 $3^{\circ}\text{K}$ 的宇宙辐射背景之后，有人（乔治·菲尔德、I.S. 什克洛夫斯基和N.J. 沃尔夫）意识到，这恰恰就是1941年观测到的正在造成蛇夫星座云中的氦分子转动的那种扰动。引起这种转动所需的黑体光子的波长为0.263厘米，比地面射电天文能够达到的任何波长都短，但要检测 $3^{\circ}\text{K}$ 的普朗克分布中低于0.1厘米的波长的迅速减少，它又不够短。

自那时起，人们开始寻找因处于其他转动态的氦分子或处于各种转动态的其他分子的激发而产生的其他吸收线。1974年，观测到了星际氦的第二种转动态的吸收，由此而作出的估计是，0.132厘米波长上的辐射强度，也相当于大约 $3^{\circ}\text{K}$ 的温度。然而，此类观测迄今为止仅确定了低于0.1厘米的辐射能量密度的上限。这些结果令人鼓舞，因为它们表明，如果这是黑体辐射，像预计的一样，辐射能量密度的确是在0.1厘米左右的某个波长上开始陡减的。然而，我们并不能根据这些上限来证实这确实就是黑体辐射，也不能据此来确定一个确切的辐射温度。

只有用气球或火箭将红外接收器发射到地球大气以上，才有可能解决这一问题。这些实验格外困难，开始时得出的结果也不相一致，时而使标准宇宙学的支持者深受鼓舞，时而又长了反对者的志气。康奈尔的一个火箭小组发现，短波上的辐射远远多于对普朗克黑体分布的预测，而麻省理工学院的一个气球小组则获得了与对黑体辐射的预测大体一致的结果。两个小组都继续其工作，到1972年，他们都发表成果报告，说得出了温度接近 $3^{\circ}\text{K}$ 的黑体分布。1976年，伯克利的一个气球小组证实，辐射的能量密度在0.25厘米至0.06厘米范围的短波上继续降低，降低的方式与对离 $3^{\circ}\text{K}$ 不到的 $0.1^{\circ}\text{K}$ 的温度的估计相同。现在似乎可以确定的是，宇宙辐射背景确实就是黑体辐射，其温度接近 $3^{\circ}\text{K}$ 。

读者或许在此产生疑问，为什么这个问题不能通过将红外设备装上人造卫星，花费所需要的全部时间，在地球大气之上进行精确测量来解决呢？我对为什么一直不能这样做没有十足的把握。通常所说的原因是，为了测量低至  $3^{\circ}\text{K}$  的辐射温度，需要用液体氦来冷却仪器（一种“冷负载”），但人们却不具备用地球卫星远载这类低温设备的技术。然而，人们不禁会想，这些名副其实的宇宙调查或许应在空间预算中占有更大的份额。

当我们考虑宇宙辐射背景伴随着波长以及方向的分布时，在地球大气之上进行观测的重要性似乎更大了。迄今的所有观测都与完全各向同性，即独立于方向之外的一种辐射背景相一致。如前一章所提到的那样，这是赞同宇宙学原理的最有力的论据之一。然而，将宇宙辐射背景固有的对方向的可能依赖，与仅仅因为地球大气的效应而产生的对方向的依赖区分开来，却非常困难；实际上，在对辐射背景温度的测量中，区分辐射背景和来自我们的大气的辐射的办法，是假设它是各向同性的。

使微波辐射的方向依赖性成为如此具有吸引力的课题，是这一辐射的强度可能并不完全是各向同性的。强度有可能出现波动，方向也有可能随之发生轻微变化，这要么是在辐射发射时，要么是在辐射发射后，由宇宙实际的崎岖不平造成的。比如，在初期形成阶段的星系可能在天空中表现为暖点，其黑体温度稍高于平均温度，跨度或许为半分的弧。此外，在整个天空，辐射强度几乎肯定有着微小的平缓变化，这是由地球在宇宙中的运动造成的。地球以每秒 30 公里的速度绕着太阳旋转，而太阳系则被我们星系的旋转携带着以每秒约 250 公里的速度旋转。没有人确切地知道我们的星系相对于典型星系的宇宙分布的速度，但根据假设，它的运动速度在某些方向上为每秒 300 公里。比如，如果我们假设地球相对于宇宙平均物质，从而也是相对于辐射背景的运动速度为每秒 300 公里，那来自地球运动方向之前或之后的辐

射的波长就应分别缩短或增加，为每秒 300 公里与光速之比，或 0.1%。因此，等效辐射温度应随着方向的变化而发生平缓的变化，在地球运动的方向上约比平均值高 0.1%，在我们所来的方向上约比平均值低 0.1%。在过去几年，等效辐射温度的任何方向依赖性的最佳上限刚好约为 0.1%，所以我们一直处于一个尴尬境地：几乎但又不完全能测量出地球在宇宙中的速度。在能够通过沿着地球轨道运行的卫星进行测量之前，这个问题或许不可能解决。（在对本书作最后修正时，我收到了国家航空航天局的约翰·马瑟寄来的《宇宙背景探索卫星简讯》第一期。它宣布说，现已任命了一个六人科学家小组，它将在麻省理工学院的雷尼尔·韦斯领导下，研究从太空上对红外和微波辐射背景进行测量的问题。旅途愉快。）

我们发现，宇宙微波辐射背景提供了强有力的证据，说明辐射和宇宙物质曾处于热平衡状态。然而，我们还没有从等效辐射温度的特定观测数值  $3^{\circ}\text{K}$  中，得出很多宇宙学上的深刻见解。事实上，这一辐射温度使我们得以确定一个关键数字，我们在研究最初三分钟的历史时将需要它。

我们业已看到，在任何特定温度下，每单位体积的光子数量与典型波长的立方成反比，因此与温度的立方成正比。对恰好  $1^{\circ}\text{K}$  的温度来说，每升的光子数量应为 20,282.9 个，所以  $3^{\circ}\text{K}$  的辐射背景，每升的光子数量应约为 550,000 个。然而，当前宇宙的核粒子（中子和质子）的密度约为每千升 6 至 0.03 个粒子。（上限是第二章所讨论的临界密度的两倍；下限则是对在可见星系上实际观测到的密度的最低估计数。）所以，根据粒子密度的实际值，当今宇宙的每个核粒子对应 1 亿至 200 亿个光子。

此外，光子与核粒子的这一巨大比率，在很长的一段时间内一直大体保持稳定。在辐射自由膨胀期间（自温度降到大约  $3,000^{\circ}\text{K}$  以下起），背景光子和核粒子既没有被创造，也没有被摧

毁，所以它们的比率自然而然地保持着稳定。在下一章我们将会看到，这一比率甚至在更早的时候，即当单个光子正在被创造和摧毁的时候，也大致保持着稳定。

这是从对微波辐射背影的测量中得出的最重要的定量结论——在我们能够追溯的早期宇宙中，每个中子或质子对应1亿至200亿个光子。为了避免不必要的模棱两可，我将在下而对这一数字进行取舍，并为了阐述之目的而假定在现在和过去，在宇宙平均成分中，每个核粒子一直对应10亿个光子。

根据这一结论得出的一个非常重要的推论是，在宇宙温度低得足以使电子被俘获并形成原子之前，物质向星系和恒星的分化是不可能开始的。引力要将物质集结成牛顿所预见的分离的碎片，就必须克服物质及相关辐射的压力。任何初生块内的引力都随着块的规模而增加，而压力却不依赖于规模；因此在任何特定密度和压力上，都有一个易受引力集结影响的最小质量；这个质量被称为“琼斯质量，”因为它是由詹姆斯·琼斯爵士在1902年首次引进恒星形成理论的。事实证明，琼斯质量与压力的3.5次方成正比（参见书后数学注释5）。在电子刚刚开始在大约3,000°K的温度下被俘获并形成原子之前，辐射压力巨大无比，琼斯质量也相应地很大，比大星系的质量大100万倍左右。此时，星系甚至是星系团都还不够大，还都没有真正形成。然而不久，电子就与核结合成了原子；随着自由电子的消失，宇宙变得可为辐射穿透；辐射压力因此而失去了作用。在特定温度和密度下，物质或辐射的压力分别与粒子数或光子数成正比，所以，当辐射压力失去作用时，总有效压力降低了大约10亿倍。琼斯质量则降低了这一系数的3.5次方，为一个星系的质量的大约100万分之一。自那时起，仅物质一方的压力就非常弱了，根本无法阻止物质集结并形成我们在空中所看到的星系。

这并不是说我们真正弄清了星系的形成过程。星系形成理论

是天体物理学重要的未决问题之一，在今天，这个问题似乎还远未解决。但那是另一回事。对我们来说，重要的是，在早期宇宙中，在高于大约  $3,000^{\circ}\text{K}$  的温度下，宇宙不是由我们今天在空中看到的星系和恒星组成的，而仅仅是由一种电离化的、未分化的物质和辐射汤组成的。

从光子与核粒子的这一巨大比率中得出的另一个惊人推论是，过去必定曾有一个时期，相对来说也不是很早，辐射能量曾大于宇宙物质中所包含的能量。爱因斯坦的  $E = mc^2$  公式给出的一个核粒子质量中的能量，为大约 9.39 亿电子伏。在  $3^{\circ}\text{K}$  的黑体辐射下，一个光子的平均能量要小得多，约为 0.0007 电子伏。所以，即使每个中子或质子对应 10 亿个光子，那当前宇宙的大部分能量也会表现为物质而非辐射。然而在更早的时候，温度较高，所以每个光子的能量也较高，而中子或质子质量的能量却一直不变。在每个核粒子对应 10 亿光子的情况下，辐射能量如要超过物质能量，一个黑体光子的平均能量就需要超过一个核粒子质量能量的大约 10 亿分之一，或大约一电子伏才行。当温度比目前高约 1,300 倍或约为  $4,000^{\circ}\text{K}$  时，情况就是这样。这一温度标志着从“以辐射为主导的”时代（在这一时代，宇宙中的大部分能量表现为辐射）向当前“以物质为主导的”时代（在这一时代，大部分能量存在于核粒子的质量中）的过渡。

引人注目的是，从以辐射为主导的宇宙向以物质为主导的宇宙的过渡，是在大约  $3,000^{\circ}\text{K}$  下，几乎与宇宙成分开始变得可为辐射穿透这一现象同时发生的。没有人真正知道为什么会是这样。我们也并不真正知道首先发生的是哪一种过渡：如果此时每个核粒子对应 100 亿个光子，那在温度降至  $400^{\circ}\text{K}$  之前，在宇宙成分变得透明之后很久，辐射仍会继续在物质之上居于主导地位。

这些不确定性并不影响我们对早期宇宙的讨论。对我们来说，重要的是，在宇宙成分变得透明很久之前的任何时候，都可

认为宇宙主要是由辐射组成的，它的物质杂质很少。早期宇宙中的辐射的巨大的能量密度之所以丧失，是因为随着宇宙的膨胀，光子波长开始向红端移动，致使核粒子和电子这些杂质发展成为当前宇宙的恒星、岩石和生命体。

## 第四章

### 炽热宇宙的配方

在前两章讨论的观测显示，宇宙正在膨胀，而且其中完全充满了一种辐射背景，现在的温度约为  $3^{\circ}\text{K}$ 。这一辐射似乎是从宇宙不透明的时候残留下来的，它在当时比现在小约 1,000 倍，热约 1,000 倍。（同平常一样，当我们说宇宙在过去比现在小 1,000 倍时，我们仅是指任何一对典型粒子之间的距离比现在小 1,000 倍。）为了为叙述最初三分钟作最后的准备，我们应追溯到更早的时期，那时，宇宙甚至更小、更热，我们在研究当时主要的物理状况时，运用的应是理论工具，而非光学或射电望远镜。

在第三章的最后，我们指出，当宇宙比现在小 1,000 倍，其物质成分恰好处于使辐射可以穿透的边缘时，它也正从以辐射为主导的时代走向目前的以物质为主导的时代。在以辐射为主导的时代，不仅每有一个核粒子就有同现在的数量一样巨大的光子，而且单个光子的能量非常高，足以使宇宙的大部分能量表现为辐射而非质量。（记住，根据量子理论，光于是组成光的无质量的粒子，或“量子。”）因此，把那时的宇宙当作由纯粹的辐射充满。基本上完全没有物质来处理是一个好的近似。

应对这一结论附加一个重要条件。我们在本章将会看到，纯辐射时代实际上只是在最初几分钟结束时才开始的，当时的温度已下降到了几十亿开氏度以下。在更早的时候，物质确是重要的，但那时的物质与组成我们当前宇宙的物质属于极不相同的一

类。不过，在我们追溯到那么早之前，让我们先简要地考虑一下真正的辐射时代，它是从最初几分钟结束时开始，到几十万年后物质再次变得比辐射重要时为止。

为了追踪这一时代的宇宙史，我们需要了解的是，所有东西在任何特定时间有多热。或换个说法，随着宇宙的膨胀，温度与宇宙规模的关系是怎样的？

如果可以认为辐射正在自由膨胀，那这个问题就容易回答了。在这种情况下，随着宇宙的膨胀，每个光子的波长就会随着宇宙规模的增大而相应地（被红移）拉长。此外，我们已在前一章看到，黑体辐射的平均波长与其温度成反比。因此，温度会与宇宙规模成反比地降低，就像现在这样。

对理论宇宙学家来说，幸运的是，即使在我们考虑到辐射并非真的在自由膨胀——在以辐射为主导的时代，光子与数量相对较少的电子和核粒子的迅速碰撞，使宇宙成分变得不透明——这一事实时，这一简单的关系也是站得住脚的。当光子在碰撞间隔中处于自由飞行状态时，其波长会随着宇宙规模的增大而相应变长，每个粒子中对应如此之多的光子，以至于碰撞只能迫使物质温度跟着辐射温度的变化而变化，而不是相反。因此，举例来说，当宇宙比现在小一万倍时，温度就会相应地比现在要高，约达到  $30,000^{\circ}\text{K}$ 。关于真正的辐射时代，我们就谈到这里。

最后，随着我们对宇宙历史的追溯越来越远，我们会来到一个时期，那时的温度非常高，以至于光子彼此之间的碰撞能够从纯能量中产生出物质粒子。我们将会发现，通过这种方式从纯辐射能量中产生的粒子，在决定各种核反应的速度以及在决定宇宙本身的膨胀速度方面，在最初几分钟内起着同辐射一样重要的作用。因此，为了研究早期的事态发展，我们需要了解，宇宙需要有多热才能从辐射能量中产生数量巨大的物质粒子，以及因此而产生的粒子有多少。

从光的量子方面入手，能最好地理解物质从辐射中产生的过程。辐射的两个量子，或光子，有可能碰撞并消失，它们所有的能量和动量会产生两个或更多物质粒子。（这一过程实际上是从当今的高能核物理实验室里间接地观测到的。）然而，爱因斯坦的狭义相对论告诉我们说，物质粒子即便在静止状态，也会有某种“静止能量，”著名的  $E = mc^2$  公式即给出了这一能量。（这里， $c$  代表光速。这是在核反应中释放的能量的来源，在核反应中，原子核的一部分质量会湮灭。）因此，两个光子如要产生两个  $m$  质量的物质粒子，每个光子的能量就必须至少与每个粒子的静止能量  $mc^2$  相等。如果单个光子的能量大于  $mc^2$ ，反应仍会发生；多余的能量则会提高物质粒子的速度。然而，如果光子的能量小于  $mc^2$ ， $m$  质量的粒子就不能在两个光子的碰撞中产生，因为这样一来，就不会有足够的能量来产生哪怕是这些特定粒子的质量了。

显而易见，为了判断辐射在产生物质粒子中的效益，我们必须知道辐射场中单个光子的特征能量。对于我们当前的目的来说，这完全可通过一个简单的快速估算法计算出来：要计算光子的特征能量，将辐射的温度乘以统计力学的基本常数，即所谓的玻耳兹曼常数，就可以了。（路德维希·玻耳兹曼以及美国的威拉德·吉布斯，是现代统计力学的奠基人。他于 1906 年自杀，据说至少有部分原因是因为他的工作在哲学方面遭到了反对，但所有这些争议早已得到了解决。）玻耳兹曼常数值是每开氏度 0.00008617 电子伏。比如，在  $3,000^\circ\text{K}$  的温度下，当宇宙成分刚刚开始变得透明时，每个光子的特征能量约等于  $3,000^\circ\text{K}$  乘以玻耳兹曼常数，即 0.26 电子伏。（记住，一个原子伏是一个电子在通过一个一伏的电位差时所获得的能量。化学反应能量通常是每个原子一个电子伏的数量级；这就是温度高于  $3,000^\circ\text{K}$  的辐射足以使数量可观的电子不断被并入原子的原因。）

我们看到，要在光子的碰撞中产生  $m$  质量的物质粒子，光子的特征能量就必须至少与静止粒子的能量  $mc^2$  相等。由于光子的特征能量是温度乘以玻耳兹曼常数，因此辐射的温度必须至少为静止能量  $mc^2$  除以玻耳兹曼常数。也就是说，对每种类型的物质粒子来说，在这类粒子能够从辐射能量中创造出来之前，都有一个用静止能量  $mc^2$  除以玻耳兹曼常数确定的“阈值温度”，必须达到。

比如，已知最轻的物质粒子是电子  $e^-$  和正电子  $e^+$ 。正电子是电子的“反粒子”——也就是说，它的电荷相反（正电荷而非负电荷），而质量和自旋却相同。当一个正电子与一个电子相碰撞时，电荷可相互抵消，这两个粒子的质量中的能量则表现为纯辐射。这当然就是正电子在日常生活中如此罕见的原因——它们在找到电子并湮灭前，存在的时间不长。（正电子是 1932 年在宇宙射线中发现的。）湮灭过程也可逆行——有着足够能量的两个光子有可能发生碰撞并产生一个电子-正电子对，光子的能量被转化成了电子和正电子质量。

两个光子要在直接碰撞中产生一个电子和一个正电子，那每个光子的能量就必须大于一个电子或一个正电子质量中的“静止能量”  $mc^2$ 。这一能量是 51.1003 万电子伏。为了找到使光子有相当大的机会获得这一能量的阈值温度，我们将这一能量除以玻耳兹曼常数（每开氏度 0.00008617 电子伏），得出的阈值温度为 60 亿开氏度 ( $6 \times 10^9$ °K)。在任何更高的温度上，电子和正电子都会在光子的相互碰撞中自由地创造出来，因此它们的存在数量极大。

（顺便说一句，我们推断出的从辐射中创造出电子和正电子所需的  $6 \times 10^9$ °K 的温度，比我们在当前宇宙中通常遇到的任何温度都高得多。即使太阳的中心也只有大约 1,500 万度。所以，当光线明亮时，我们是不会看到电子和正电子从空荡荡的太空中

突然出现的。)

类似的观点适用于各种类型的粒子。对自然界中每种类型的粒子来说，都有一个相对应的“反粒子”，它们的质量和自旋完全相同，而电荷却相反，这是现代物理学的一个基本规则。唯一的例外是某些纯中性粒子，如光子本身，可以认为，它们自己就是自己的反粒子。粒子和反粒子的关系是互反的：正电子是电子的反粒子，而电子又是正电子的反粒子。给它们有足够的能量，在一对光子的碰撞中创造出任何类型的粒子-反粒子对都永远是可能的。

(反粒子的存在是量子力学的原则和爱因斯坦的狭义相对论的一个直接数学推论。反粒子的存在是1930年由保罗·狄喇克首次在理论上推断出来的。他不想将一种未知粒子引进他的理论，所以他将反电子视为当时已知的唯一一种带正电的粒子——质子。正电子在1932年的发现，证实了反粒子理论，也说明质子不是电子的反粒子；它有它自己的反粒子——反质子，这是1950年代在伯克利发现的。)

次于电子和正电子的最轻的粒子类型是 $\mu$ 介子 $\mu^-$ （这是一种不稳定的重电子）及其反粒子 $\mu^+$ 。正如电子和正电子那样， $\mu^-$ 和 $\mu^+$ 也有着相反的电荷和相同的质量，也能在光子彼此间的碰撞中创造出来。 $\mu^-$ 和 $\mu^+$ 的静止能量 $mc^2$ 都等于1.056596亿电子伏，除以玻耳兹曼常数后，得出的相应阈值温度为1.2万亿度( $1.2 \times 10^{12} \text{K}$ )。书后表1给出了其他粒子的相应阈值温度。查看该表可以弄清哪些粒子可能曾在宇宙史的各个时期大量存在过；它们是那些其阈值温度在当时低于宇宙温度的粒子。

这些物质粒子中有多少真正在高于阈值温度的温度上存在着？在早期宇宙中以高温度和高密度为主导地位的情况下，粒子的数量是受热平衡的基本条件支配的：粒子数量必定刚好高到一定程度，这样，被摧毁的和被创造的数量就恰好一样多。（即供

等于求。)任何一对特定粒子-反粒子湮灭成两个光子的速度,都与任何一对同一能量的特定光子转变为这种粒子和反粒子的速度大致相等。因此,热平衡状况要求其阈值温度低于实际温度的每种类型的粒子的数量,大致等于光子的数量。如果粒子少于光子,那它们被创造的速度就会高于被催毁的速度,它们的数量就会上升;如果粒子多于光子,那它们被摧毁的速度就会高于被创造的速度,它们的数量就会下降。比如,在高于60亿度阈值的温度上,电子和正电子的数量必定与光子的数量大致相同,可以认为,这时的宇宙主要是由光子、电子和正电子组成的,而不仅仅是由光子组成的。

然而,在高于阈值温度的温度上,物质粒子的行为方式很像光子。其平均能量大致等于温度乘以玻耳兹曼常数,这样,在高于阈值温度的情况下,其平均能量比粒子质量中的能量大很多,因此质量可忽略不计。在这种情况下,特定类型的物质粒子所提供的压力和能量密度就同光子一样,与温度的四次方成正比。因此,我们可以认为,在任何特定时期的宇宙,都是由种类繁多的“辐射”组成的,其阈值温度在当时低于宇宙温度的每类粒子都有一种辐射。特别是,任何时期的宇宙的能量密度都与温度的四次方以及其阈值温度在当时低于宇宙温度的粒子种类的数量成正比。在这类情况下,温度非常之高,以至于在热平衡中,粒子-反粒子对于光子同样普遍。这类情况在当前宇宙中并不到处都存在,或许只有爆炸中的恒星的中心是个例外。然而,我们对我们的统计力学知识充满信心,完全有把握对在此类异常情况下的早期宇宙中必定发生的事情提出各种理论。

确切地说,我们应铭记,像正电子( $e^+$ )这样的反粒子是作为一种不同种类计算的。此外,像光子和电子这样的粒子都处于两种应当分别计算的不同的自旋状态。最后,像电子(但不是光子)这样的粒子遵从着一特殊规则——“泡利不相容原理”,

这一规则禁止两个粒子处于同一状态；它有效地降低了它们对总能量密度的增量，降低系数为八分之七。（是不相容原理阻止了原子中的所有电子都陷入同一最低能量壳中；因此，是它造成了元素周期表中所揭示的原子的复杂壳结构。）书后表1将每种粒子的有效种类数量同阈值温度一起列了出来。在特定温度下，宇宙的能量密度与温度的四次方以及其阈值温度低于宇宙温度的粒子的有效种类数量成正比。

现在让我们提出宇宙在何时处于这些高温度的问题。支配宇宙膨胀速度的是宇宙成分的引力场和外向动量间的平衡。最初，提供宇宙引力场源的是光子、电子、正电子等的总能量密度。我们业已看到，宇宙的能量密度实质上仅取决于温度，因此，我们可将宇宙温度作为一种记录仪，随着宇宙的膨胀，它不是嘀答作响，而是不断冷却。更具体地讲，可以说，宇宙的能量密度从一个值降到另一个值所需的时间，与能量密度的平方根的倒数的差成正比（参见书后数学注释3）。但我们已看到，能量密度与温度的四次方成正比，也与其阈值温度低于实际温度的粒子种类数量成正比。因此，只要温度不超过任何“阈”值，宇宙从一个温度降到另一个温度所需的时间，就与这些温度的反平方差成正比。比如，如果开始时的温度为1亿度（大大低于电子的阈值温度），这一温度降到1,000万度需要0.06年（或22天），那它降到100万度就会再需要六年，降到100,000度又会再需要600年。以此类推，宇宙从1亿度降到3,000°K（即降到宇宙成分即将变得可为辐射穿透的程度）所需的总时间为700,000年。（参见图8）当然，我在这里写到“年”时，我指的是某个数量的绝对时间单位，比如，在氢原子中，电子沿轨道围绕着原子核旋转一周所需的某个数量的时间段。我们在这里讨论的是地球开始围绕着太阳旋转之前很久的时代。

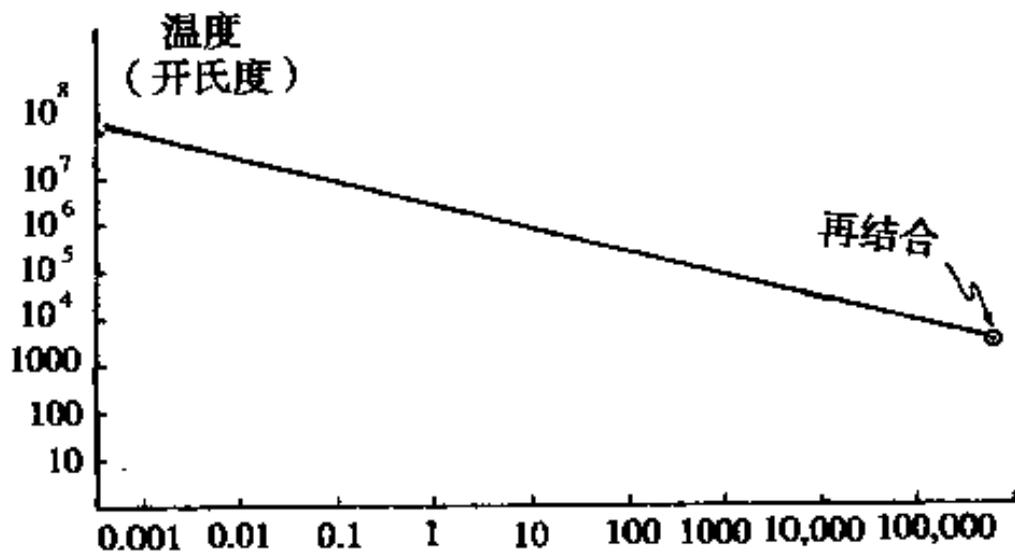


图8 以辐射为主导的时代 从核合成刚刚结束到核和电子再结合成原子这一时期的宇宙温度，是作为时间函数显示的。

如果宇宙在最初几分钟真的是由数量完全相等的粒子和反粒子组成的，那它们就会在温度降到10亿度以下时全部湮灭了，除了辐射外，一无所剩。有很好的证据可排除这种可能性——我们还在这儿呢！在某种程度上，电子肯定多于正电子，质子多于反质子，中子多于反中子，只有这样，在粒子和反粒子湮灭后，才会有东西残留下来形成当前宇宙的物质。在写到这里之前，我一直有意忽略这一数量相对较小的残留物质。如果我们要做的仅仅是计算早期宇宙的能量密度或膨胀速度，那这样做是没有问题的；我们在上一章看到，核粒子的能量密度在宇宙冷却到大约4,000°K之前，是无法与辐射的能量密度相比的。然而，残留电子和核粒子的数量虽小，仍值得我们予以特别关注，因为它们在当前宇宙的成分中居于主导地位，尤其是，它们是本作者和读者所讨论的主要问题。

我们一旦承认了在最初几分钟，物质数量有超过反物质数量的可能性，就等于提出了确定早期宇宙的组成成分的详细清单的问题。在劳伦斯·伯克利实验室每六个月发布一次的清单上，几

乎有数百个所谓的基本粒子。我们需要确定这类粒子中每类粒子的具体数量吗？为什么停在基本粒子上——我们还需要确定不同类型的原子、分子、盐和胡椒的具体数量吗？如果这样，我们或许完全可以断定，宇宙太复杂，太反复无常了，不值得我们去了解。

幸运的是，宇宙并非那么复杂。为了弄清如何才能为其成分开出一个配方，有必要对热平衡状态的含义作稍微进一步的思考。我已强调指出宇宙业已通过了一种热平衡状态是多么的重要，它使我们得以如此自信地谈论任何特定时间的宇宙成分。我们在本章迄今所作的讨论，实际上涉及的是处于热平衡状态的物质和辐射的已知特性的一系列应用。

当碰撞成其他过程使一个物理系统进入一种热平衡状态时，总有一些数量的值不发生变化。这些“守恒量”之一是总能量；尽管碰撞有可能将能量从一个粒子传给另一个粒子，但它们却从不改变参与碰撞的粒子的总能量。对每个此类守恒定律来说，在我们能够找出处于热平衡状态的系统的特性之前，都必须先明确确定一个量——显然，如果某个量在系统接近热平衡时不发生变化，那就不能从平衡的条件中推断出它的值，而是必须提前将它确定下来。处于热平衡状态的系统的一个非常奇特的方面是，一旦确定了守恒量的具体值，它的所有特性就都明确了。宇宙业已通过了一个热平衡状态，所以，如要为早期宇宙成分开出一个完整的配方，我们需要做的一切，就是弄清随着宇宙的膨胀，守恒的物理数量是多少，这些数量的值又是多少。

通常，我们用确定温度来代替确定处于热平衡中的系统的总能量。我们迄今考虑最多的那类系统完全是由辐射以及相同数量的粒子和反粒子组成的，对它来说，温度是计算系统的平衡特性时所需要给出的唯一一种东西。但除了能量外，通常还有其他守恒量，而且有必要明确确定每种守恒量的密度。

比如，在处于室温的一杯水中，发生着连续不断的反应：一个水分子分裂成一个氢离子（一种裸质子，被剥去了电子的氢核）和一个羟离子（捆绑在氢原子上的一個氧原子，它多帶一个电子），或氢离子和羟离子重新结合在一起，形成水分子。请注意，在每个这样的反应中，一个水分子的消失都伴有一个氢离子的出现，反之亦然，而氢离子和羟离子总是一起出现或消失。因此，守恒量是水分子加上氢离子的总数，氢离子数减去羟离子数。（当然，还有其他守恒量，如水分子加上羟离子的总数，但这些仅仅是两个基本守恒量的简单相加。）如果我们规定温度为 $300^{\circ}\text{K}$ （开氏温标下的室温），水分子加氢离子的密度等于每立方厘米 $3.3 \times 10^{22}$ 个水分子或离子（大体相当于海平面压力下的水），氢离子的密度减羟离子等于零（相当于零净电荷），那我们就能完全确定我们这杯水的特性了。比如，事实证明，在这些条件下，大约每五亿个水分子中才有一个氢离子。注意，我们不必在一杯水的化学成分中明确指出这些；我们可根据热平衡规则推断氢离子的比例。另一方面，我们不能根据热平衡的条件来推断守恒量的密度——比如，我们可通过提高或降低压力，使水分子加氢离子的密度稍大或小子每立方厘米 $3.3 \times 10^{22}$ 的分子数——所以，为了了解杯子中的物质，我们需要明确确定守恒量的密度。

这个例子还有助于我们理解我们所说的“守恒”量是如何变化的。比如，如果我们的水温是数百万度，就像恒量的内部那样，那么，分子或离子就会很容易分解，组分原子就会很容易失去它们的电子。因此，守恒量就是电子的数量及氧核和氢核的数量。在这些情况下，水分子加羟原子的密度，应根据统计力学的规则来计算，而非提前予以确定；当然，事实证明它相当的小。（滚雪球式的增加毕竟罕见。）实际上，在这些情况下是会发生核反应的，所以，就连每个种类的核数量也不是绝对固定的，但这

些数量变化得非常之慢，以至可以认为，恒星是在从一种平衡状态逐渐向另一种状态过渡。

最后，在早期宇宙的几十亿度的温度下，就连原子核也会随时分解成它们的组分——质子和中子。反应发生的速度是如此之快，以至于物质和反物质可轻而易举地从纯能量中创造出来，或再次湮灭回去。在这些情况下，守恒量指的不是任何具体种类的粒子的数量。而是相关的守恒定律减少到少数（据我们所知）可适用于各种可能情况的那些。相信，在我们的早期宇宙配方中心须明确确定其密度的守恒量，只有三种：

**1. 电荷** 我们可用相等或相反的电荷创造或摧毁粒子对，但净电荷永远不变。（我们对这一守恒定律的把握大于其他任何一个，因为如果电荷不守恒，公认的麦克斯韦电与磁性理论就失去了意义。）

**2. 重子数** “重子”是一涵盖而很广的术语，它包括核粒子、质子和中子，还有稍重且不稳定的粒子——超子。重子和反重子可成双成对地创造或摧毁；重子可衰变成其他重子，正如在放射核的“ $\beta$ 衰变”中，中子可变成质子，反之亦然。然而，重子总数减反重子（反质子、反中子、反超子）数的差却永远不变。因此，我们把“重子数”+1 赋予质子、中子和超子，“重子数”-1 则为相应的反粒子；这样得出的规则是，重子总数永远不变。重子数似乎不像电荷那样有任何动力学意义；据我们所知，没有任何东西像重子数所产生的电场或磁场。重子数是一种记录器——其意义完全在于它是守恒的。

**3. 轻子数** “轻子”是较轻的带负电的粒子——电子和  $\mu$  介子，还有一种不带电、质量为零、被称为中微子的粒子，以及它们的反粒子——正电子、反  $\mu$  介子和反中微子。尽管中微子和反中微子的质量和电荷都为零，但它们并不比光子更虚无；它们像其他粒子那样携带着能量和动量。轻子数量守恒是另一种记录

性的规则——轻子总数减反轻子总数的差永远不变。（1962年，对中微子束的试验揭示，实际上至少有两种中微子——一种“电子型”和一种“ $\mu$ 介子型”——和两种轻子数：电子轻子数是电子加电子型中微子的总数，再减去它们的反粒子数，而 $\mu$ 介子轻子数是 $\mu$ 介子加 $\mu$ 介子型中微子的总数，再减去它们的反粒子数。两者似乎都绝对守恒，但人们并没有太大的把握。）

说明这些规律的一个很好的例子，是一个中子  $n$  放射性衰变成一个质子  $p$ ，一个电子  $e^-$ ，和一个（电子型）反中微子  $\bar{\nu}_e$ 。每个粒子的电荷、重子数和轻子数的值如下：

	$n$	$\rightarrow$	$p$	+	$e^-$	+	$\bar{\nu}_e$
电荷	0		1		-1		0
重子数	+1		+1		0		0
轻子数	0		0		+1		-1

读者很容易就会发现，最后状态的粒子的任何守恒量的值的总和，都与初始中子的同一量的值相等。我们说这些量守恒，指的就是这一点。守恒定律远非毫无意义，因为是它们告诉我们，许多反应并不会发生，如禁戒衰变过程，在这一过程中，一个中子衰变成一个质子、一个电子和一个以上的反中微子。

因此，要完成任何特定时间的宇宙成分的配方，都必须明确确定当时的温度以及每单位体积的电荷、重子数和轻子数。守恒定律告诉我们，在随着宇宙膨胀的任何体积中，这些量的值都固定不变。因此，每单位体积的电荷、重子数和轻子数，都只是随着宇宙尺度的反立方而变化。但是，每单位体积的光子数也随着宇宙尺度的反立方而变化。（我们在第三章看到，每单位体积的光子数与温度的立方成正比，而正如本章开头所指出的那样，温度随着宇宙尺度的倒数而变化。）因此，每个光子对应的电荷、重子数和轻子数都是固定不变的，我们可通过确定作为它们与光

子数之比率的守恒量的值，彻底得出我们的配方。

(严格说来，随着宇宙尺度的反立方而变化的量，不是每单位体积的光子数，而是每单位体积的熵。熵是统计力学的基本量，它与一个物理系统的无序度有关。除了是一个普通的指数外，熵可以由在热平衡中的所有粒子——物质粒子和光子——按书后表 1 所示的不同种类粒子给定的权重加权的总数，得到足够的近似值。我们真正应用来表示我们宇宙特点的常数，是电荷与熵、重子数与熵和轻子数与熵的比率。然而，即使在极高的温度下，物质粒子的数量至多也是与光子的数量为同一数量级，因此，如果我们用光子数而非熵来作为比较的标准，我们是不会犯严重的错误的。)

估算每个光子的宇宙电荷很容易。据我们所知，在整个宇宙中，电荷的平均密度为零。如果地球和太阳的正电荷多于负电荷（或者相反）的数量只有一万亿亿亿亿（ $10^{36}$ ）分之一，那它们之间的电斥力就会大于引力。如果宇宙是有穷的和封闭的，那我们甚至可以将这一观测提高到定理的高度：宇宙的净电荷必定为零，因为如果不是这样，电力线就会一圈圈地绕宇宙弯曲，形成一个无穷的电场。但无论宇宙是开放的还是封闭的，都可以万无一失地说，每个光子的宇宙电荷都可以忽略不计。

每个光子的重子数也很容易估算。唯一的稳定重子是核粒子——质子和中子——以及它们的反粒子——反质子和反中子。（自由中子实际上是不稳定的，平均寿命为 15.3 分钟，但核力量使中子在通常物质的原子核中变得绝对稳定。）此外，就我们所知，宇宙中没有数量可观的反物质。（以后再详述。）因此，当前宇宙的任何一部分的重子数，实质上等于核粒子数。我们在前一章看到，在微波辐射背景中，现在每 10 亿个光子有一个核粒子（精确数字不详），所以每个光子的重子数约为 10 亿分之一（ $10^{-9}$ ）。

这的确是一个非凡的结论。为了了解它的意义，让我们想一想过去温度高于 10 万亿度 ( $10^{13}^{\circ}\text{K}$ )，即中子和光子的阈值温度的一个时期。当时，宇宙中有着大量的核粒子和反粒子，其数量与光子不相上下。但重子数是核粒子数和反粒子数之间的差。如果这一差数比光子数小 10 亿倍，从而也比核粒子总数小约 10 亿倍，那么核粒子数就会仅仅比反粒子数多 10 亿分之一。按照这一看法，当宇宙冷却到核粒子的阈值温度以下时，反粒子与相应的粒子全都湮灭了，残留下的是稍稍多出反粒子的那部分粒子，这部分粒子最终变成了我们所知道的世界。

小到 10 亿分之一的纯粹数量在宇宙学中的出现，使一些理论家提出了这一数字实际上是零的假设——也就是说，宇宙中实际上有着相同数量的物质和反物质。这样，解释每个光子的重子数似乎是 10 亿分之一这一事实时，就必须假设，在宇宙温度降到核粒子的阈值温度以下之前的某个时期，宇宙曾分为不同的领域，有些领域的物质稍稍超过反物质（10 亿分之几），有些领域的反物质则稍稍超过物质。在温度降低、尽可能多的粒子-反粒子对湮灭后，出现的宇宙中包含着纯物质领域和纯反物质领域。这一观点的问题是，还没有人在宇宙的什么地方看到数量可观的反物质。进入我们地球大气上层的宇宙线，据认为部分来自我们星系极遥远的地方，可能还有另外的部分来自我们的星系之外。宇宙线中占绝对优势的是物质而非反物质——事实上，迄今还没有有人在宇宙线中观测到反质子或反核子。此外，我们也没有观测到从宇宙规模的物质和反物质的湮灭中应该产生的光子。

另一个可能性，是光子（或更确切地说，是熵）的密度没有与宇宙尺度的反立方保持正比。如果出现了某种热平衡偏离，出现了某种摩擦或粘滞性，使宇宙温度升高并产生额外的光子，就有可能发生这种情况。在这种情况下，每个光子的重子数有可能从某个适当的值开始（或许是一左右），然后随着更多光子的产

生，下降到当前的低值。问题是，还没有人能够就产生这些额外光子的任何详细机制提出假设。几年前，我曾试图找到一个，但却没有成功。

在下面，我将不计所有这些“非标准的”可能性，仅仅假设每个光子的重子数就是看起来的那样：约 10 亿分之一。

宇宙的轻子数密度又怎样呢？宇宙不带电这一事实直接告诉我们，现在，每个带正电的质子恰好有一个带负电的电子。当前宇宙中，约 87% 的核粒子是质子，所以电子的数量接近核粒子的总数。如果电子是当前宇宙中的唯一一种轻子，那我们就可立即得出结论：每个光子的轻子数与每个光子的重子数大致相同。

然而，除了携带着非零轻子数的电子和正电子外，还有另一种稳定的粒子。中微子及其反粒子——反中微子——是不带电的、没有质量的粒子，就像光子一样，但它们还分别有着 +1 和 -1 的轻子数。因此，为了确定当前宇宙的轻子数密度，我们必须对中微子和反中微子的总数有所了解。

遗憾的是，获得这方面的信息格外困难。中微子像电子的地方，是它不受将质子和中子维持在原子核内的强大核力量的影响。（我有时用“中微子”指中微子和反中微子。）然而，不同于电子的是，它不带电，因此也不受诸如将电子维持在原子内的电力和磁力的影响。事实上，中微子对任何类型的力量的反应都不大。它们的确也像宇宙中的其他任何东西那样对引力作出反应，而且还受那些造成放射过程（如前面提到的中子衰变）的弱力的影响，但这些力量给日常物质带来的相互作用微不足道。通常用来说明中微子的相互作用是如何之弱的例子是，若要有相当大的机会拦截散射在某个放射过程产生的任何特定中微子，就需要在它的路途中放上几光年长的导线。太阳连续不断地放射着中微子，它们是在质子在太阳核的核反应中变成中子时产生的；这些中微子在白天对着我们向下照射，在夜晚，当太阳在地球的另一

面时，则对着我们向上照射，因为它们来说，地球完全是透明的。在中微子被观测到很久以前，沃尔夫冈·泡利就对它们提出假设，认为它们是解释诸如中子衰变这样的过程中的能量平衡的一个途径。只是到了 1950 年代末以来，才有了直接探测中微子或反中微子的可能，办法是，在核反应堆或粒子加速器中制造大量的中微子，这样，就会有几百个中微子在探测仪器中停留下来。

已知中微子的相互作用是如此微弱，就很容易理解为什么数量巨大的中微子和反中微子可能充满我们周围的宇宙，而我们它们的存在却没有任何线索了。勉强给中微子和反中微子的数量规定一些上限是可能的：如果这些粒子的数量也非常大，那某些微弱的核衰变过程就会受到轻微影响，此外，宇宙膨胀也会以比所观测到的速度更快的速度减速。然而，这些上限并不排除中微子和/或反中微子的数量同光子差不多且有着相似能量的可能。

尽管这样说，宇宙学家仍通常假设每个光子的轻子数（电子、 $\mu$  介子和中微子数，减去与它们相对应的反粒子数）很小，比一还小得多。这纯粹是根据类比得出的——每个光子的重子数很小，为什么每个光子的轻子数就不可能也很小呢？这在探讨“标准模型”的假设中，是最没有把握的假设之一，但幸运的是，即便它是错误的，我们得出的基本看法也仅仅是在细节上发生变化而已。

当然，在电子的阈值温度以上，有许多轻子和反轻子——电子和正电子的数量同光子差不多。此外，在这些情况下，宇宙的温度非常高，密度非常大，即使是幽灵似的中微子也实现了热平衡，所以中微子和反中微子的数量也同光子差不多。标准模型中提出的假设是，轻子数，即轻子和反轻子数的差，在现在和过去都比光子数小得多。轻子可能稍多于反轻子，就像前面提到的重子稍多于反重子一样，多出来的这部分轻子一直生存到了当今。

此外，中微子和反中微子的相互作用非常之弱，所以它们有许多可能逃脱了湮灭，在这种情况下，中微子和反中微子的数量现在应几近相同，堪与光子数量相比。我们在下一章将会看到，人们的确是这样认为的，但在可预见到的将来，在我们的周围观测到数量巨大的中微子和反中微子，似乎是根本不可能的。

简而言之，这就是我们的早期宇宙成分配方。每个光子的电荷等于零，每个光子的重子数等于 10 亿分之一，每个光子的轻子数不明但很小。任何特定时间的温度都高于当前辐射背景的温度  $3^{\circ}\text{K}$ ，为宇宙的当前尺度与当时尺度之比。经过足够搅拌后，以便使各种类型的粒子的详细分布是符合热平衡的要求。将它置于一个不断膨胀的、其膨胀速度受这一介质所产生的引力场的支配的宇宙中。等待足够长的时间后，其结果就会变成我们当前的宇宙了。

## 第五章

### 最初三分钟

我们现在可以关注宇宙在最初三分鐘的演化进程了。事件在开始时的发展变化要比后来快得多，所以，像普通电影那样，以相等的时间间隔来展示画面是没有意义的。相反，我将根据宇宙温度的不断降低，随时调整我们影片的速度，每当温度下降大约三倍时，就停下摄影机，选取一个画面。

遗憾的是，我不能从零时间和无限大温度开始电影的放映。当阈值温度高于 15,000 亿开氏度 ( $1.5 \times 10^{12} \text{K}$ ) 时，宇宙中就会有大量的、称为  $\pi$  介子的粒子，其重量约为一个核粒子的七分之一（参见书后表 1）。与电子、正电子、 $\mu$  介子和中微子不同的是， $\pi$  介子之间以及它们与核粒子之间的相互作用非常强——事实上， $\pi$  介子在核粒子中的持续交换，是产生将原子核凝聚在一起的大部分引力的原因。这类强烈相互作用的大量粒子的存在，使计算超高温下的物质行为变得格外困难，所以，为了避免这种艰难的数学问题，我在本章将从开始后的大约百分之一秒的时间着手进行讲述，那时，温度已降到只有 1,000 亿开氏度，完全低于  $\pi$  介子、 $\mu$  介子以及所有较重粒子的阈值温度。在第七章中，我将粗略谈一谈理论物理学家认为在离开始更近的一段时间里，有可能发生什么事情。

了解了这些后，现在让我们开始放电影。

第一个画面。宇宙的温度为 1,000 亿开氏度 ( $10^{11} \text{K}$ )。描述

此时的宇宙，比将来任何时候都更简单、更容易。它充满了一种无差别的物质和辐射汤，它们的每个粒子都非常迅速地与其他粒子发生着碰撞。因此，尽管宇宙在迅速膨胀，但仍处于一种近乎完美的热平衡状态。所以，宇宙成分是由统计力学的规律决定的，它们毫不依赖于在第一个画面之前所发生的事件。我们需要了解的，仅仅是温度是  $10^{11}\text{°K}$ ，守恒量——电荷、重子数、轻子数——都非常小或等于零。

数量丰富的粒子是那些阈值温度低于  $10^{11}\text{°K}$  的粒子；它们是电子及其反粒子——正电子，当然还有没有质量的粒子——光子、中微子和反中微子（参见书后表 1）。宇宙的密度非常大，就连能够在铅块中运行数年而不散射的中微子，也通过与电子、正电子和光子以及它们自己之间的迅速碰撞，与电子、正电子和光子保持着热平衡。（当我说中微子和反中微子时，我有时仍简单地称之为“中微子”。）

另一个非常简单的地方—— $10^{11}\text{°K}$  的温度，远远高于电子和正电子的阈值温度。因此，这些粒子以及光子和中微子的行为方式，完全就像种类如此众多的辐射一样。这些不同种类的辐射的能量密度是多少？根据书后表 1，电子和正电子提供的总能量相当于光子的  $7/4$ ，中微子和反中微子提供的能量则与电子和正电子相同，所以，在这一温度，辐射的总能量密度大于纯电磁辐射的能量密度，其系数为：

$$\frac{7}{4} + \frac{7}{4} + 1 = \frac{9}{2}$$

斯蒂芬-玻耳兹曼定律（参见第三章）给出的  $10^{11}\text{°K}$  温度下的电磁辐射的能量密度为每升  $4.72 \times 10^{44}$  电子伏，所以，这一温度下的宇宙的总能量密度高达  $9/2$ ，或每升  $21 \times 10^{44}$  电子伏。这相当于每升 38 亿公斤的质量密度，或正常地球条件下的水密度的 38 亿倍。（当我说一特定能量相当于一特定质量时，我当然是

说，这是在质量被完全转换成能量的情况下，根据爱因斯坦的公式  $E = mc^2$  得出的能量释放量。) 如果珠穆朗玛峰是由这一密度的物质组成的，那它的引力能摧毁地球。

第一个画面的宇宙在迅速地膨胀和冷却。它的膨胀速度是由如下条件决定的：宇宙的每一点都恰好正以逃逸速度作远离任意中心的运动。在第一个画面中的巨大密度下，逃逸速度也相应很高——宇宙膨胀的特征时间约为 0.02 秒。(参见书后数学注释 3。“膨胀特征时间”可大致确定为宇宙规模扩大 1% 所需的时间的 100 倍。更确切地说，任何时期的膨胀特征时间都是那个时期的哈勃“常数”的倒数。正如第二章所说的那样，宇宙的年龄总是小于膨胀特征时间，因为在引力的作用下，膨胀速度在持续不断地变慢。)

在第一个画面的时间里，有少量的核粒子，约每 10 亿个光子或电子或中微子有一个质子或中子。为了最终预测在早期宇宙中形成的化学元素的丰度，我们还需要知道质子和中子的相对比例。中子比质子重，它们的质量差相当于 129.3 万电子伏的能量。然而，在  $10^{11}^{\circ}\text{K}$  的温度上，电子、正电子等的特征能量要大得多，约有 1,000 万电子伏 (玻耳兹曼常数乘以温度)。因此，中子或质子与数量大得多的电子、正电子等的碰撞，会导致质子向中子或中子向质子的迅速转化。最重要的反应是：

反中微子加质子产生正电子加中子

(反之亦然)

中微子加中子产生电子加质子

(反之亦然)

根据我们的每个光子净轻子数和电荷非常小的假设，中微子和反中微子，正电子和电子的数量几乎完全一样多，这样，从质子向中子的转变就会与中子向质子的转变一样快。(在这里，中子的放射性衰变可忽略不计，因为它需要约 15 分钟的时间，而

我们现在涉及的时间范围是数百分之一秒。) 因此, 平衡要求质子和中子的数量在第一画面中应大致相等。这些核粒子现在还没有集结成核; 彻底分裂一个典型核所需的能量只有每个核粒子 600 至 800 万电子伏; 这比  $11^{11}\text{°K}$  下的特征热能量小, 所以复杂核的摧毁速度同形成速度一样快。

提出宇宙在很早的时候有多大这个问题是情理之中的。遗憾的是, 我们并不知道, 我们甚至不敢肯定这一问题是否有任何意义。正如第二章所指出的那样, 宇宙现在可能是无穷的, 在这种情况下, 它在第一画面所处的时间也是无穷的, 并将永远无穷。另一方面, 宇宙现在也有可能有一个有穷的周长, 有时估计约为 1,250 亿光年。(周长是一个人沿直线旅行重新回到自己的起始点所需旅行的距离。这是依据哈勃常数的当前值, 在宇宙的密度约为其“临界”值的两倍的假设下估计的。) 由于宇宙温度与宇宙规模成反比下降, 所以在第一画面所处的时间, 宇宙的周长比现在要小, 其比例为当时温度 ( $10^{11}\text{°K}$ ) 与当前温度 ( $3\text{°K}$ ) 之比; 这样得出的第一画面中的周长约为四光年。第一画面中的宇宙演化情况中没有一个细节将依赖于宇宙周长是无穷还是只有几光年。

**第二个画面。**宇宙的温度为 300 亿开氏度 ( $3 \times 10^{10}\text{°K}$ )。自第一个画面以来, 已过去了 0.11 秒。从质上讲, 没有发生任何变化——宇宙成分仍以电子、正电子、中微子、反中微子和光子为主, 它们都处于热平衡状态, 都高于其阈值温度。因此, 能量密度简单地按照温度的四次方下降到了寻常水的静止质量中所含能量密度的大约 3,000 万倍。膨胀速度的下降数量约为温度的平方, 这样, 宇宙的膨胀特征时间现已延长到了大约 0.2 秒。数量很小的核粒子仍未集结成核, 但随着温度的下降, 现在较重的中子转变成较轻的质子要比它们反过来容易得多了。核粒子的平衡因此变成了 38% 的中子和 62% 的质子。

**第三个画面。**宇宙的温度为 100 亿开氏度 ( $10^{10}\text{K}$ )。自第一个画面以来，已过去了 1.09 秒。大约在这个时候，不断下降的密度和温度已大大增加了中微子和反中微子的平均自由时间，致使它们开始像自由粒子那样活动，而不再与电子、正电子或光子保持热平衡。从现在起，除了它们的能量将继续为宇宙引力场提供部分来源外，它们将不再在我们的叙述中起任何积极作用。中微子走出热平衡后，没有发生任何大的变化。(在发生这一“去耦”前，典型的中微子波长与温度成反比，由于温度与宇宙规模成反比地下降，所以中微子的波长与宇宙规模成正比地增加。中微子去耦后，中微子将自由地膨胀，但一般性红移仍将与宇宙规模成正比地拉长其波长。顺便说一句，这表明，确定中微子去耦的精确瞬间并不太重要，这毫无妨碍，是因为它取决于中微子相互作用理论的细节，而这些到现在还没有彻底解决。)

总能量密度比第一个画面时要小，差额为温度比率的四次方，所以它现在相当于水的质量密度的 38 万倍。宇宙的膨胀特征时间也相应地增加到了大约两秒。现在的温度仅仅是电子和正电子阈值温度的两倍，所以，它们刚刚开始以快于它们从辐射中再创造出来的速度发生湮灭。

现在的温度仍太高，中子和质子还不能集结成原子核并保持相当长的时间。不断下降的温度已能使质子-中子平衡转变为 24% 的中子和 76% 的质子。

**第四个画面。**宇宙的温度现在是 30 亿开氏度 ( $3 \times 10^9\text{K}$ ) 自第一个画面以来，已过去了 13.82 秒。现在的温度低于电子和正电子的阈值温度，所以它们作为宇宙的主要组分，开始迅速消失。它们在湮灭过程中所释放的能量，降低了宇宙的冷却速度，这样，从这一额外热量中得不到一点能量的中微子，现在的温度比电子、正电子和光子低 8%。从现在起，当我们谈到宇宙的温度时，我们指的是光子的温度。随着电子和正电子的迅速消失，

宇宙的能量密度现在比它仅仅以温度的大约四次方降低的情况时多少要小一些。

现在的温度已低得足以形成像氦 ( $\text{He}^4$ ) 这样的各种稳定的核，但这并没有立即发生。原因是宇宙仍在非常迅速地膨胀着，只有在一系列迅速的双粒子反应中，核才能形成。比如，一个质子和一个中子可形成一个重氢核或氘，多余的能量和动量被一个光子带走。随后，氘核可能与一个质子或一个中子发生碰撞，要么形成一个轻同位素核——氦三 ( $\text{He}^3$ )，它由两个质子和一个中子组成，要么形成最重的氢同位素，它被称为氚 ( $\text{H}^3$ )，由一个质子和两个中子组成。最后，氦三可能与一个中子发生碰撞，氚可能与一个质子发生碰撞，在这两种情况下都会形成一个寻常氦核 ( $\text{He}^4$ )，它是由两个质子和两个中子组成的。但为了使这一反应链发生，有必要从第一步，即从氘的生成入手。

现在，寻常氦是一种结合牢固的核，所以，正如我曾说过的那样，它的确能在第三个画面中的温度下结合在一起。然而，氘和氦三的结合要松散得多，而氚尤为松散。(将氘核分裂开来所需的能量，只是将单个的核粒子从氘核中取出所需能量的九分之一。) 在第四个画面的  $3 \times 10^9 \text{K}$  的温度下，氘核形成后立即就爆炸开来，这样，较重的核根本就没有机会生成。中子仍在被转化为质子，尽管速度比以前慢得多了；现在的平衡为 17% 的中子和 83% 的质子。

第五个画面。宇宙的温度现在是 10 亿开氏度 ( $10^9 \text{K}$ )，仅为太阳中心的大约 70 倍。自第一个画面以来，已过去了三分零两秒。电子和正电子大多已消失，宇宙的主要组分现在是质子、中微子和反中微子。在电子-正电子的湮灭过程中释放出来的能量，已使光子的温度比中微子的温度高了 35%。

宇宙现在的温度已低得足以使氘和氦三以及寻常氦结合在一起，但“氘瓶颈”仍在发生作用：氘核结合在一起的时间不长，

不能形成数量可观的较重的核。中子和质子与电子、中微子及其反粒子的碰撞，现已基本停止，但自由中子的衰变开始变得重要起来；每隔 100 秒，剩余中子中就有 10% 衰变成质子。中子 - 质子平衡现在为 14% 的中子，86% 的质子。

稍后。在第五个画面过去后不久的某个时间，发生了一个剧烈事件：温度降到了使氦核能结合在一起的数值。一旦通过了氦瓶颈，较重的核就能通过第四个画面所描述的双粒子连锁反应，非常迅速地形成。然而，形成的比氦重的核的数量并不可观，因为还存在着其他瓶颈：没有拥有五个或八个核粒子的稳定的核。此后，当温度达到氦的形成点时，几乎所有剩余的中子都立即被烹饪成了氦核。使这些得以发生的准确温度，在很小的程度上取决于每个光子的核粒子数量，因为在粒子密度高的情况下，核的形成会更容易一些。（我只得不恰当地将这一时刻定在第五个画面“稍后”，原因即在于此。）在每个核粒子具有 10 亿个光子的情况下，核合成将在 9 亿开氏度 ( $0.9 \times 10^9 \text{K}$ ) 的温度上开始。此时，自第一个画面以来，已过去了三分四十六秒。（读者将会原谅我给本书起名为《最初三分钟》。它听上去比《最初三又四分之三》要好听一些。）中子的衰变在核合成刚要开始前，已将中子-质子平衡转变成了 13% 的中子，87% 的质子。核合成之后，氦按重量的比例恰好等于结合成氦的所有核粒子的比例；其中半数为中子，实质上，所有中子都结合成了氦，这样，氦按重量的比例只是核粒子中的中子比例的两倍，或大约 26%。如果核粒子的密度稍高一点，核合成开始得稍早一点，在还没有那么多的中子发生衰变时，生成的氦就会稍多一些，但可能也不会超过 28% 的重量（参见图 9）。

现已到达并超过了我们的计划放映时间，但为了更清楚地说明我们的成果，让我们再最后看一下温度再次降低后的宇宙。

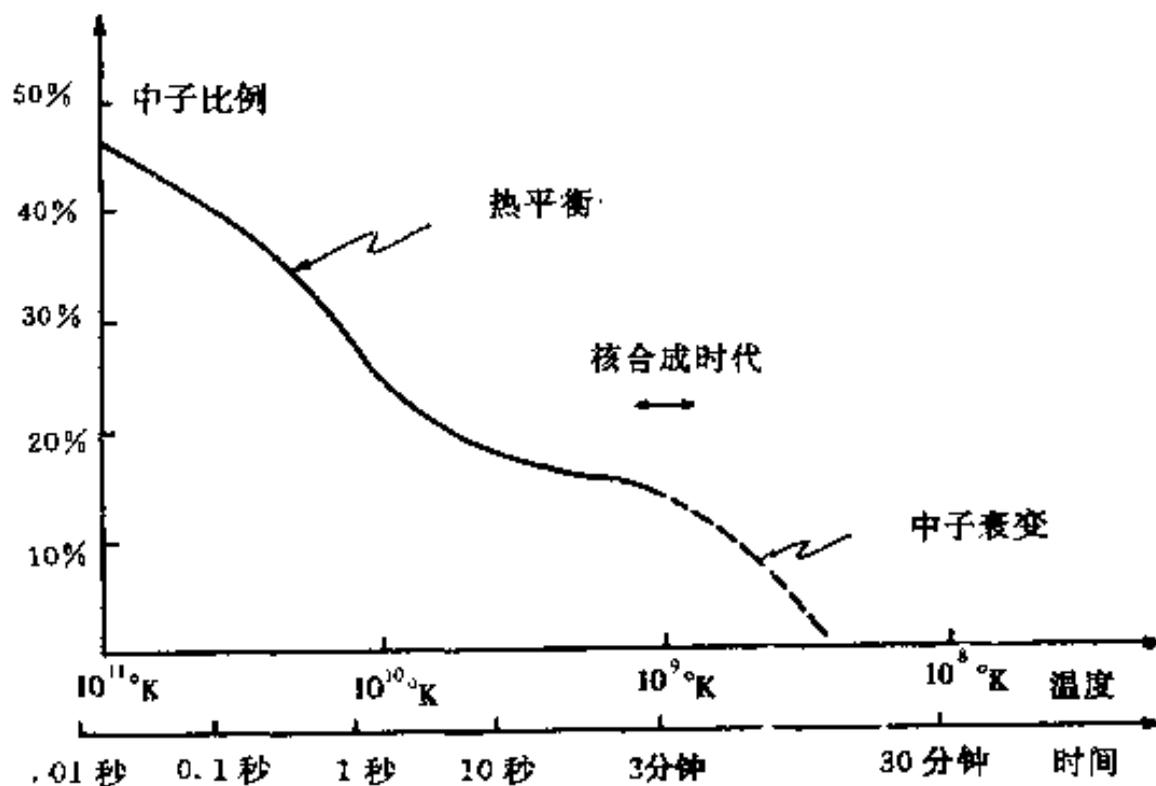


图9 中子-质子平衡的变化 中子与所有核粒子的比例是作为温度和时间函数的函数显示的。曲线中标有“热平衡”的部分描述了密度和温度都非常高，以至于所有粒子间都保持着热平衡的时期；这里的中子比例可根据中子-质子差，用统计力学的规则计算出来。曲线中标有“中子衰变”的部分描述了除自由中子的放射性衰变外，所有中子-质子转化过程都已停止的时期。曲线的中间部分取决于对弱相互作用转变速度的详细计算。曲线的虚线部分显示了在核在某种程度上无法形成的时候将会出现的情况。实际上，在图中用箭头表示的“核合成时代”的某个时候，中子迅速地结合成氦核，中子-质子比率被冻结在当时的值上。还可用这个曲线来估计宇宙学生成的氦的比例（按重量）：对温度或核合成时间的任何特定值来说，它正好是当时中子比例的两倍。

第六个画面。宇宙的温度现在是3亿开氏度（ $3 \times 10^8 \text{K}$ ）。自第一个画面以来，已过去了34分40秒。除了平衡质子电荷所需的少量（10亿分之一）多余电子外，电子和正电子现都已湮灭。在这一湮灭中所释放出来的能量，现已使质子的温度比中微

子的温度永远高 40.1% (参见书后数学注释 6)。宇宙的能量密度现在相当于水的质量密度的 9.9%；其中，31%表现为中微子和反中微子形式，69%表现为光子形式。这一能量密度使宇宙膨胀的特征时间为大约 1 小时又 15 分钟。核进程已停止——核粒子现在大多要么结合成了氦核，要么变成了自由质子（氢核），按重量氦约占 22% 到 28%。每有一个自由或结合质子，就有一个电子，但宇宙仍然很热，稳定的原子仍无法聚合在一起。

宇宙将继续膨胀和冷却，但在 700,000 年中将不会发生很多令人感兴趣的事。那时，温度将下降到能使电子和核形成稳定原子的度数；由于缺少自由电子，宇宙的成分可为辐射所穿透；物质和辐射的去耦使物质得以开始形成星系和恒星。再过大约 100 亿年后，生命体将开始改造这个故事。

从对早期宇宙的这一叙述中可得出一个推论，对此，可立即根据观测结果进行检验：从最初三分钟残留下来的物质（恒星起初必定是由它们形成的），含有 22 - 28% 的氦，其余的几乎全部是氢。我们业已看到，这一结果依赖于光子与核粒子的比率非常大这一假设，而这一假设反过来又建立在当今宇宙微波辐射背景的测量温度为 3°K 的基础之上。利用辐射的测量温度对宇宙氦的生成进行的首次计算，是在彭齐亚斯和威耳孙发现辐射背景之后不久，由普林斯顿的 P.J.E. 皮布尔斯在 1965 年进行的。几乎与此同时，罗伯特·瓦戈纳、威廉姆·福勒和弗雷德·霍伊尔在一个更为详尽的计算中也独自得出了类似的结果。这一结果是标准模型的一个巨大成功，因为当时已有人作出有独到见解的估计，认为太阳和其他恒星开始自己的生命时的确主要是氢，而氦约占 20 - 30%！

当然，氦在地球上极少，但这只是因为氦原子太轻，化学惰性太大，大部分在很久之前就逃出了地球的缘故。对宇宙中初生氦丰度的估计，是根据对恒星演化的详细计算结果和对恒星观测

特性的统计分析进行比较，再加上对炽热恒星和星际物质的频谱中的氦线的直接观测作出的。实际上，正如它的名字所显示的那样，氦在 J. 诺曼·洛克耶 1868 年进行的关于太阳大气光谱的研究中，第一次被证认为一个元素。

1960 年代初，一些天文学家发现，星系中的氦含量不仅很大，而且还不像较重元素那样，因地点而发生很大变化。当然，如果重元素是在恒星中生成的，那结果可能就会是这样，但氦是在早期宇宙中生成的，那时，任何恒星都还没有开始受到烹饪。在对核含量的估计中，仍有许多不确定的地方和差异，但有关 20 - 30% 的初生氦的证据却很确凿，足以给标准模型的支持者以巨大鼓励。

除了最初三分钟结束时生成的大量氦外，还有较轻的核的痕迹，它们主要是没有被结合成寻常氦核的氘（有一个多出的中子的氢）和轻氦同位素  $\text{He}^3$ 。（对它们的丰度，瓦戈纳、富勒和霍伊尔在其 1967 年的论文中首次进行了计算。）不同于氦的丰度，氘的丰度对核合成时的核粒子的密度很敏感：密度越大，核反应进行的越快，这样，几乎所有氘都被变成了氦。具体地讲，以下是瓦戈纳就光子与核粒子三个可能的比率值，给出的在早期宇宙中生成的氘的丰度值（按重量）：

光子/核粒子	氘的丰度 (百万分之...)
1 亿	0.00008
10 亿	16
100 亿	600

显然，如果我们能够确定在恒星开始烹饪之前存在的初生氘的丰度的话，我们就能准确地确定光子与核粒子的比率；已知当前的

辐射温度为  $3^{\circ}\text{K}$ ，我们就能确定宇宙当前的核质量密度的精确值了，并判断它是开放的还是封闭的。

遗憾的是，真正的初生氘的丰度一直极难确定。地球上水中的氘的重量丰度的典型值，是百万分之 150。（如果热核反应能得到充分控制的话，可用这种氘来为热核反应堆提供动力。）然而，这是个有偏数字；氘原子是氢原子重量的两倍这一事实，使它们更有可能被结合成重水分子（ $\text{HDO}$ ），这样，逃脱了地球的引力场的氘比氢的比例少。另一方面，光谱学表明，太阳表面的氘的丰度很低——少于百万分之四。这也是一个有偏数字——太阳外部区域的氘大多已被摧毁，与氢聚变成了轻同位素氦—— $\text{He}^3$ 。

1973 年，从哥白尼号人造地球卫星上所作的紫外线观测，使我们对宇宙氘的丰度的了解有了一个更为坚实的基础。氘原子，同氢原子一样，也能在某些不同的波长上吸收紫外线，这相当于使原子从最低能量状态被激发进入较高状态的跃迁。这些波长对原子核质量的依赖很小，所以，其光线穿过氢和氘的星际混合体而到达我们的恒星紫外线光谱，会交叉着若干黑色吸收线，每条线都分为两个组成部分，一部分来自氢，一部分来自氘。根据吸收线任何两个组成部分的相对黑暗程度，可立即得出星际云中的氢和氘的相对丰度。遗憾的是，由于地球大气的缘故，在地面上进行任何类型的紫外线天文观测都非常困难。哥白尼号卫星上携带着一个紫外线光谱仪，用来研究炽热恒星半人马座  $\beta$  的光谱中的吸收线；从它们的相对强度中发现，我们和半人马座  $\beta$  之间的星际介质中含有大约百万分之二十（按重量）的氘。对其他炽热恒星的紫外吸收线所作的更新的观测，也得出了类似的结果。

如果这百万分之二十的氘真的是在早期宇宙中创造的，那每个核粒子肯定曾（现在也是这样）刚好有大约 11 亿个光子（参

见上表)。在当前  $3^{\circ}\text{K}$  的宇宙辐射温度上，则每升有 550,000 个光子，因此，每百万升现在肯定有大约 500 个核粒子。这比封闭宇宙的最低密度还小很多，我们在第二章中看到，它大约为每百万升 3,000 个核粒子。因此而得出的结论是，宇宙是开放的；也就是说，星系现在的运动速度高于逃逸速度，宇宙将永远膨胀下去。如果一些星际介质曾在往往会摧毁氦的恒星中（如在太阳中）受到过处理，那宇宙中生成的氦丰度必定曾大于哥白尼号卫星所发现的百万分之 20，因此，核粒子的密度必定比每百万升 500 个粒子还小，这进一步证实了我们生活在一个开放的、永远膨胀着的宇宙中的结论。

我必须说，我个人认为这个论点很缺乏说服力。氦不同于氦——尽管它的丰度似乎比密度相对较高的封闭宇宙高，但从绝对意义上讲，氦仍极其少见。我们可以认为这么多的氦是在“近来的”天体物理现象——超新星、宇宙射线，甚至是类星体——中生成的。氦不是这样；在没有释放我们观测不到的大量辐射的情况下，20-30% 的氦丰度是不可能近来创造出来的。有人认为，在不同时生成数量巨大的其他稀有轻元素（锂、铍和硼）的情况下，任何传统天体物理机制都是不可能生成哥白尼号所发现的百万分之 20 的氦的。但我不知道我们如何才能肯定氦的这一痕迹不是由无人曾想到的某种非宇宙机制产生的。

在我们周围无所不在，但又似乎不可能观测到的、还有另一种早期宇宙的残留物。我们在第三个画面中看到，自宇宙温度降低到 100 亿开氏度以下以来，中微子的行为表现就如同自由粒子一样。在此期间，中微子的波长与宇宙尺度成正比地伸长；因此，中微子的数量和能量分布与它们处于热平衡时保持一致，但其温度却与宇宙尺度成反比地降低。与此间光子发生的情况大致相同，尽管光子保持热平衡的时间比中微子长得多。因此，当前的中微子温度应与当前的光子温度大体相同。所以，在宇宙

中，有一个核粒子，大约就有 10 亿个中微子和反中微子。

在这一点上做到更为精确是可能的。在宇宙变得可为中微子穿透之后不久，电子和正电子开始湮灭，从而提高了光子而非中微子的温度。结果，当前的中微子温度应比当前的光子温度稍低。很容易就能计算出，中微子的温度比光子的温度低一个 $4/11$ 立方根的系数，或 71.38%；因此，中微子和反中微子向宇宙提供的能量为光子的 45.42%（参见书后数学注释 6）。尽管我没有如此明确地说明，但每当我在此前引用宇宙膨胀时间时，我都考虑到了中微子这一多出来的能量密度。

对早期宇宙标准模型的最为惊人的证实，是这一中微子背景的发现。我们对其温度作出了明确的预测；它是光子温度的 71.38%，或只有大约  $2^{\circ}\text{K}$ 。在中微子的数量和能量分布上，唯一真正在理论上不能确定的，是轻子数密度是否很小这个问题，正如我们一直假设的那样。（记住，轻子数等于中微子数和其他轻子数减去反中微子数和其他反轻子数。）如果轻子数密度同重子数密度一样小，那中微子和反中微子的数量就应彼此相等，为 10 亿分之一。另一方面，如果轻子数密度比得上光子数密度，那就会出现一种“简并”，即中微子（或反中微子）明显地过多，而反中微子（或中微子）却不足。这种简并会影响最初三分钟不断变化的中子-质子平衡，并从而改变在宇宙中生成的氦和氘的数量。对  $2^{\circ}\text{K}$  的宇宙中微子和反中微子背景的观测，可立即解决宇宙中是否有着数量巨大的轻子的问题，但更为重要的是，它将证明早期宇宙的标准模型确实是可靠的。

哎呀，中微子与普通物质的相互作用是如此之弱，以致于一直没有人能想出任何方法来观测  $2^{\circ}\text{K}$  的宇宙中微子背景。这确实是一个很有意思的问题：每有一个核粒子，就有大约 10 亿个中微子和反中微子，但却没有人知道如何去探测它们！或许有朝一日，有人会知道。

在听我讲述最初三分钟的过程中，读者可能会感到，我带有一种在科学上过于自信的口气。这种感觉可能是对的。然而，我并不认为推动科学进步的最好办法，总是保持完全开放的头脑。忘掉疑虑，无论假设的结果如何，都接受它们，往往是必要的——重要的不是摆脱理论偏见，而是要有正确的理论偏见。对任何理论看法的检验，都是看其产生的结果。早期宇宙的标准模型业已取得某些成功，它为未来的试验项目提供了一个清晰的理论框架。这并不意味着它是正确的，但这的确意味着这是值得认真对待。

但是，确实有一个重大的不确定性像乌云一样笼罩着标准模型。本章所描述的所有计算结果，都是以宇宙学原理为基础的，该原理假设，宇宙是均匀的和各向同性的。（参见第二章有关叙述。“均匀”指的是宇宙在任何被宇宙的普遍膨胀所携带着运动的观测者看来，都是一样的，无论该观测者身处何地；“各向同性”指的是宇宙在这样一个观测者看来，在所有方向上都是一样的。）我们从直接观测中得知，宇宙微波辐射背景在我们周围有着很高各向同性性，从中，我们又推断出，自辐射在大约  $3,000^{\circ}\text{K}$  的温度上与物质失去平衡以来，宇宙一直有着很高的各向同性性和均匀性。然而，我们没有证据说明宇宙学原理在更早的时候也是有效的。

起初，宇宙有可能既很不均匀，又是各向异性的，但随后被膨胀宇宙的各个部分间相互作用的摩擦力磨平。这样一种“混合大师”模型尤其受到了马里兰大学的查尔斯·米斯纳的支持。宇宙的摩擦性均匀化和各向同性化所产生的热，导致了光子和核粒子当前 10 亿比 1 的巨大比率，甚至也是可能的。然而，据我们所知，没有人能说出为什么宇宙起初有着具体程度的不均质性和各向异性，也没有人知道如何计算它在磨平过程中产生的热。

在我看来，对这些不确定性的正确反应，不是（像有些天文

学家可能喜欢的那样) 抛弃标准模型, 而是认真对待它并彻底弄清它的结果, 如果能发现与观测结果存在矛盾就好了。我甚至不清楚, 起初的巨大各向异性和不均匀是否会对本章的论述产生重大影响。宇宙有可能在最初几秒就被磨平; 在这种情况下, 可假设宇宙学原理总是有效的, 并以此来计算宇宙中生成的氦和氘。即使宇宙的各向异性和不均质延续到了氦合成时代以后, 任何均匀膨胀着的团块中的氦和氘的生成, 也仅仅依赖于该团块内的膨胀速度, 与按标准模型计算出来的生成情况可能不会有很大差别。甚至还有可能, 我们一直追溯核合成时期所能看到的整个宇宙, 仅仅是一个更大的不均质的和各向异性的宇宙中的一个均匀的和各向同性的块。

当我们追溯宇宙创始或展望宇宙的最后结局时, 围绕着宇宙学原理的不确定性就变得真正重要起来。在最后两章的大部分论述中, 我仍将依靠这一原理。然而, 必须时刻承认, 我们简单的宇宙模型, 描述的可能仅仅是宇宙的一小部分, 或其历史中有限的一段时间。

## 第六章

### 历史的题外话

让我们暂时放下早期宇宙史这个话题，先谈一谈过去 30 年的宇宙研究史。我尤其想在这里解决一个我认为既令人费解又让人感兴趣的问题。1965 年发现的宇宙微波辐射背景，是 20 世纪最重要的科学发现之一。它为什么只能偶然发现？或换句话说，在 1965 年之前的若干年，为什么没有对这一辐射进行系统探寻？

我们在上一章看到，宇宙的辐射背景温度和质量密度的当前测量值，使我们得以预测宇宙的轻元素丰度，其丰度似乎与我们的观测结果非常一致。在 1965 年之前很久，是不可能向后推算这一计算结果、预测宇宙的微波背景并开始探寻它的。根据宇宙当前大约 20 - 30% 的氦和 70 - 80% 氢的观测丰度，可以推断，核合成肯定是在核粒子的中子比例降到 10 - 15% 时开始的。（记住，按照重量的氦的当前丰度，恰好是核合成时中子分数的两倍。）中子分数的这个值是在宇宙处于大约 10 亿开氏度 ( $10^9\text{K}$ ) 的温度时达到的。根据核合成是在此时开始的这一情况，可以粗略地估计出  $10^9\text{K}$  的温度下核粒子的密度，而光子在这一温度时的密度，可根据已知的黑体辐射的特性计算出来。因此，此时还可得知光子与核粒子数的比率。但这一比率是不变的，因此当前也可对它同样清楚的了解。因而，根据对核粒子的当前密度的观测，可预测出光子的当前密度，并推断出一个当前温度约为  $1\text{K}$  至  $10\text{K}$  的宇宙微波辐射背景的存在。如果科学史和宇宙史一

样，是如此地简单和直接，有人就会在 1940 年代或 1950 年代沿这些思路作出预测了，而促使射电天文学家去探寻辐射背景的也就会是这一预测了。但事实并非完全如此。

实际上，在 1948 年，有人确实曾按这些思路作出过预测，但这一预测在当时和后来都没有导致人们对辐射的探寻。在 1940 年代晚期，乔治·伽莫夫以及他的同事拉尔夫·A. 阿尔弗和罗伯特·赫尔曼正对一个“大爆炸”宇宙理论进行研究。他们假设宇宙开始时完全是中子，随后，通过人们熟悉的，一个中子自发地转变为一个光子、一个电子和一个反中微子的放射性衰变过程，光子开始转化为质子。在膨胀过程中的某个时刻，温度会冷却到一定程度，足以使重元素通过快速而连续的中子捕获，在中子和质子中逐渐形成。阿尔弗和赫尔曼发现，为了解释轻元素的当前观测丰度，有必要假设光子与核粒子的比率为 10 亿数量级。随后，运用核粒子当前的宇宙密度，他们预测出了从早期宇宙残留下来的一个辐射背景的存在，其当前温度为 5°K！

阿尔弗、赫尔曼和伽莫夫最初的计算，在细节上没有一个是正确的。我们在前一章看到，宇宙开始时有着相同数量的中子和质子，而不仅仅是中子。此外，中子向质子的转化（和质子向中子的转化）主要是通过电子、正电子、中微子和反中微子的碰撞，而不是通过中子的放射性衰变而发生的。林忠四郎在 1950 年注意到了这些问题，到 1953 年，阿尔弗和赫尔曼（联同小福林）修改了他们的模型，对不断变化的中子-质子平衡进行了非常正确的计算。这实际上是现代对早期宇宙史的首次透彻分析。

但是，没有人在 1948 或 1953 年着手寻找预测存在的微波辐射。实际上，在 1965 年之前的若干年中，天文学家一般都不知道在“大爆炸”模型中，氢和氦的丰度要求当前宇宙中存在着一个宇宙辐射背景，而且它或许还能真的观测到。在这里，令人惊讶的并不完全是天体物理学家一般都不知道阿尔弗和赫尔曼的预

测——一两篇论文很容易淹没在科学文献的浩瀚海洋中。而更让人费解的是，在十多年的时间里，竟再也没有人进行同样的推理。所有的理论材料都是具备的。直到 1964 年，对“大爆炸”模型中的核合成的计算才又重新开始，它们是由俄罗斯的亚·B. 泽利多维奇、英国的霍伊尔和 R.J. 泰勒和美国的皮布尔斯分别独立进行的。然而此时，彭齐亚斯和威耳孙已经在霍尔姆德尔开始了他们的观测，他们对微波辐射背景的发现，是在没有受到宇宙理论家的任何促动的情况下作出的。

令人费解的还有，那些确实知道阿尔弗-赫尔曼预测的人似乎没有对它予以足够的重视。阿尔弗、福林和赫尔曼本人也在他们 1953 年的论文中，将核合成这个问题留待“以后研究”，所以他们不可能很据他们的改进模型，重新计算微波辐射背景的期望温度。（他们也没有提到他们以前作出的有可能存在着一个 5K 的辐射背景的预测。他们的确曾在 1953 年的美国物理学会的会议上报告过一些核合成计算情况，但后来他们三人分别调到了不同的实验室，所以这一工作从未形成最后的书面形式。）若干年后，在微波辐射背景发现后致彭齐亚斯的一封信中，伽莫夫指出，他 1953 年在《荷兰皇家学院论文集》中的一篇文章中，曾预测存在着一个辐射背景，其温度为 7K，这一数量级大致正确。然而，看一眼他 1953 年的这篇论文便会发现，伽莫夫的预测是很据一个涉及到宇宙年龄的、在数学上荒谬的论点，而非很据他自己的宇宙核合成理论作出的。

可能有人会辩解说，宇宙的轻元素丰度在 1950 年代和 1960 年代初还没有完全弄清，所以不可测对辐射背景的温度作出任何明确结论。的确，即使是现在，我们也还不能真正肯定宇宙的氦丰度为 20 - 30%。但重要的一点是，早在 1960 年以前很久，人们就一直认为宇宙的大部分质量表现为氢。（比如，汉斯·修斯和哈罗德·尤里在 1956 年的一项调查中，给出的按重量的氢的丰度

为 75%。)而且,氢不是在恒星中生成的——它是恒星通过制造较重的元素,赖以从中获得能量的初始燃料。这本身就足以说明,光子与核粒子的比率必定很大,这样才能阻止早期宇宙中的所有氢被烹饪成氦和较重元素。

有人可能会问:究竟是什么时候开始在技术上能够观测到 3°K 的各向同性的辐射背景的?对这一点,很难精确地说清,但同我一起作实验的同事告诉我说,这在 1965 年之前很久可能就已做到了,可能是在 1950 年代中期,甚至还有可能是在 1940 年代中期。1946 年,麻省理工学院辐射实验室一个除了罗伯特·迪克无人能领导的小组,开始确定出任何各向同性的地球外辐射背景的上限:在 1.00、1.25 和 1.50 厘米的波长上,等效温度不到 20°K。这一测量结果是大气吸收研究的一个副产品,当然不是观测宇宙学的某个项目的一部分。(事实上,迪克告诉我说,等他开始想知道是否存在着一个宇宙微波辐射背景时,他已忘了他自己关于背景温度的上限是在差不多 20 年前获得的!)

在我看来,精确确定 3°K 的各向同性的微波背景的发现时间,并没有非常重大的历史意义。重要的是,射电天文学家不知道他们应该试一试!相比之下,中微子的历史就是另一番情景了。当泡利在 1932 年首次提出关于中微子的假设时,在当时可能的任何实验中观测它,显然都是完全不可能的。然而,探测中微子一事却一直作为一个挑战性的目标留在物理学家们的脑海里,而当 1950 年代可将核反应堆用于此类目的时,他们就对中微子进行了搜寻并发现了它。在反质子方面,对比甚至更为鲜明。1932 年在宇宙线中发现了正电子后,理论家们一般均认为,质子和电子都应有一个反粒子。用 1930 年代拥有的早期回旋加速器,是根本不可能生成反质子的,但物理学家们却对这个问题一直耿耿于怀,到 1950 年代,他们专门建造了一个加速器(伯克利的高能质子同步稳相加速器),该加速器有足够的能量生成

反质子。在迪克和他的同事们在 1964 年着手探测宇宙微波辐射背景之前，在这方面根本就没有过类似情况。即便是在那时，普林斯顿的小组也没有注意到伽莫夫、阿尔弗和赫尔曼在十几年前的工作！

问题出在哪里呢？在这里，至少可找出三个有趣的理由，说明人们为什么在 1950 和 1960 年代没有普遍认识到寻找 3°K 的微波辐射背景的重要性。

首先，必须认识到，伽莫夫、阿尔弗、赫尔曼和福林等人从事的是更为广泛的宇宙理论的研究。在他们的“大爆炸”理论中，实际上所有的复杂核（不仅仅是氦），都被假设是在早期宇宙中通过一个中子的快速增加过程而形成的。然而，尽管这一理论正确地预测出了一些重元素的丰度，但在解释为什么竟然会存在重元素，却遇到了麻烦！业已指出，没有有着五个或八个核粒子的稳定核，所以，通过向氦（He4）粒子中增加中子或质子，或通过熔合成对的氦核，是不可能生成重于氦的核的。（首先发现这一障碍的是恩里科·费密和安东尼·图尔凯维奇。）已知这一困难，就很容易理解为什么理论家甚至也不愿意认真对待在这一理论中对氦的生成进行的计算了。

随着另一种理论的进展，即元素是在恒星中合成的之后，宇宙学关于元素合成的理论失去了更多的支持。1952 年，E.E. 萨尔皮特证实，有着五个或八个核粒子的核的空隙，可在高密度的富氦恒星核中得到填补：两个氦核的碰撞会产生一个不稳定的铍核（Be8），在密度很高的情况下，铍核有可能在衰变前与另一个氦核发生碰撞，产生一个稳定的碳核（C12）。（发生宇宙核合成时，宇宙的密度太低，所以这一过程无法在当时发生。）1957 年，杰弗里和玛格丽特·伯比奇、富勒和霍伊尔发表了一篇著名论文，证实在中子通量较强的时期，重元素可在恒星中，尤其是在恒星爆炸（如超新星）中形成。但即使是 1950 年代之前，天

体物理学家们也有一种强烈的倾向，认为除了氢以外的所有元素都是在恒星中生成的。霍伊尔向我发表评论说，这可能是天文学家为了认识恒星中产生的能量的来源而不得不在本世纪最初的几十年中进行奋斗的结果。到 1940 年，汉斯·贝特和其他人的研究成果揭示，关键过程是四个氢核聚变成一个氦核的过程，这一情况使人们在 1940 和 1950 年代对恒星演化的认识有了迅速提高。正如霍伊尔所说，在许多天文学家看来，在取得所有这些成功之后，还怀疑恒星是元素形成的场地，那就是执迷不悟了。

但核合成的恒星理论也存在着问题。很难弄清恒星何以能够形成像 25 - 30% 的氦丰度这样的东西——实际上，在这一聚变中所释放的能量，比恒星似乎一生所释放的能量都多得多。宇宙理论很巧妙地排除了这一能量——它仅仅是在普遍的红移中丧失了。1964 年，霍伊尔和 R.J. 泰勒指出，当前宇宙中巨大的氦丰度，是不可能寻常恒星中产生的，他们对在“大爆炸”的早期阶段可能生成的氦的数量进行了计算，得出的按重量的丰度为 36%。奇怪的是，他们确定的可能发生核合成时的温度，为多少有些任意性的 50 亿开氏度，尽管这一假设取决于为当时已知的一个参数所选取的值——光子与核粒子的比率。如果他们用自己的计算结果来估计这一来自氦观测丰度的比率的话，那他们就已经预测出了其温度为正确数量级的当前的微波辐射背景。但是，引人注目的是，作为恒稳态理论的创始人之一的霍伊尔，愿意沿这个推理思路走下去，并承认它为“大爆炸”模式之类的东西提供了证据。

今天，人们一般认为，核合成既发生在宇宙中，也发生在恒星中；氦，或许还有其他一些轻核，是在早期宇宙中合成的，而其余的则是在恒星中生成的。“大爆炸”核合成理论想做的太多，以至于失去了自己作为一种氦合成理论而已经取得的貌似合理性。

其次，这是理论家和实验者之间缺乏交流的一个典型例子。大多数理论家从未意识到会发现一个各向同性的辐射背景。在致皮布尔斯的一封信日期为1967年6月23日的信中，伽莫夫解释说，他和阿尔弗、赫尔曼都没有考虑到发现从“大爆炸”残留下来的辐射的可能性，因为在他们开始宇宙学研究的时候，射电天文学仍处于发展初期。（但阿尔弗和赫尔曼告诉我说，他们事实上曾同约翰·霍普金斯大学、海军研究实验室和国家标准局的雷达专家共同探索过观测宇宙辐射背景的可能性，但却被告知说， $5^{\circ}\text{K}$ 或 $10^{\circ}\text{K}$ 的辐射背景温度太低，用当时拥有的技术是无法发现的。）另一方面，苏联一些天体物理学家似乎已意识到了发现微波背景的可能性，但却受到了美国技术杂志的用语的误导。在1964年的一篇评论文章中，亚·B·泽利多维奇针对当前辐射温度的两个可能的值，对宇宙的氦丰度进行了正确计算，并正确地强调指出，这些数量是相互联系在一起的，因为每个核粒子的光子数量（或每个核粒子的熵）是不随着时间的变化而变化的。然而，他似乎受到了1961年刊登在《贝尔系统技术杂志》中的E.A. 欧姆的一篇文章中所使用的“天空温度”一词的误导，进而推断辐射温度的测量值不足 $1^{\circ}\text{K}$ 。（欧姆使用的天线同彭齐亚斯和威耳孙最终用来发现微波背景的天线，是同一个20英尺长的角形反射器！）这一点，再加上对宇宙氦丰度的一些相当低的估计值，致使泽利多维奇暂时放弃了早期宇宙温度很高的想法。

当然，与信息从实验者不好传给理论家同时，也从理论家不好传给实验者。当彭齐亚斯和威耳孙在1964年着手检查他们的天线时，他们从未听说过阿尔弗-赫尔曼预测。

第三，我认为也是最重要的，是“大爆炸”理论之所以没有导致对 $3^{\circ}\text{K}$ 的微波背景的搜寻，是因为物理学家认真地去对待任何一个早期宇宙理论是极其困难的。（我是部分地很据我对自己在1965年前的态度的回忆而这样说的。）上述每一种困难都可通

过小小的努力来克服。但最初三分钟在时间上离我们是如此遥远，温度和密度状况对我们是如此陌生，使我们在应用我们的普通统计力学和核物理理论时，往往感到很不安。

这种情况在物理中很常见——我们的错误不是对我们的理论太认真，而是我们对它们不够认真。我们总是难以意识到我们在书桌上把弄的这些数字和公式与现实世界有什么联系。更为糟糕的是，人们似乎常常有一种共识，认为某些现象不配作体而的理论，与实验研究的课题。伽莫夫、阿尔弗和赫尔曼值得我们大加赞扬，尤其是因为他们愿意认真地对待早期宇宙，并探索根据已知物理定律，可对最初三分钟得出怎样的认识。但即使是他们，也没有迈出最后一步，去说服射电天文学家寻找微波辐射背景。1965年3°K的辐射背景的最终发现所带来的最重要的成果，是它迫使我们去认真对待认为曾有一个早期宇宙的想法。

我之所以重点讲述业已失去的这次机会，是因为我认为这类科学史最具启发性。有那么多科学史著作谈论它的成功，谈论偶然的发现、杰出的推论，或牛顿、爱因斯坦式的人物的巨大神奇飞跃，这是可以理解的。但我不认为，不理解科学是多么的艰辛——被误导是多么地容易，而随时知道下一步该做什么又是多么地难——就可能真正理解它的成功。

## 第七章

### 最初百分之一秒

我们在第五章对最初三分鐘的论述不是从一开头讲起的，而是从“第一个画面”入手的，那时，宇宙的温度已冷却到了1,000亿度，而且反有大量存在的粒子是光子、电子、中微子及其反粒子。如果它们的确是大自然中仅有的粒子类型，那我们或许就可从时间上倒着推断宇宙膨胀，并断定宇宙肯定曾有过一个真正的开头，它处于一种无穷的温度和密度状态，发生在我们的第一个画面之前0.0108秒的时候。

然而，还有许多其他类型的、已为现代物理学所知的粒子： $\mu$ 介子、 $\pi$ 介子、质子、中子，等等。当我们追溯的时间越来越早时，我们会遇到极高的温度和密度，所有这些粒子都数量巨大，保持着热平衡，并都处于连续不断的相互作用状态。由于各种我希望弄清楚的原因，我们对基本粒子物理学的了解还不够，对计算这样一些大杂烩的特性，还没有什么把握。因此，我们对微观物理学的无知如同一个面纱，遮挡住了我们对宇宙创始的认识。

自然，透过面纱向外窥视，还是很诱人的。这种诱惑对像我这样的理论家尤为强烈，我们的工作涉及的更多的是基本粒子物理学而非天体物理学。当代粒子物理学的许多有趣想法，产生了极其微妙的推论，在当今的实验室中很难对它们进行检验，但当这些想法被用于早期宇宙时，它们的推论就相当惊人了。

我们追溯 1,000 亿度以上的温度时遇到的第一个问题是由基本粒子的“强相互作用”产生的。强相互作用是将中子和质子维持在原子核中的那种力。它们并不像电磁力和引力那样在日常生活中常见，因为它们的有效距离极短，约为十万亿分之一厘米 ( $10^{-13}$  cm)。即使在核与核之间的距离一般为几亿分之一厘米 ( $10^{-8}$  cm) 的分子中，不同核之间的强相互作用也几乎不会产生什么影响。然而，正如它们的名字所显示的那样，强相互作用还是非常强的。当两个质子被推到足够近的距离时，它们之间的强相互作用约比电排斥高 100 倍；这就是面对几近 100 个质子的电排斥，强相互作用仍能将原子核稳固在一起的原因。氢弹的爆炸是经过对中子和质子的重新安排而产生的，这种安排能使中子和质子通过相互作用，更为紧密地结合在一起；氢弹的能量正好是这种安排所产生的多余能量。

正是这种强相互作用的强度，使它们比电磁相互作用更难以进行数学处理。比如，当我们计算两个电子因彼此之间的电磁排斥而产生散射的速度时，我们必须将无限数量的贡献加在一起，每个对应的都是光子和电子-正电子对的一特定发射与吸收序列，如图 10 所示，“费因曼图”对此作了形象的描述。（运用这些图进行计算的方法是里查德·费因曼在 1940 年代晚期制定的，他当时正在康奈尔大学。严格地讲，散射过程的比率是由贡献之和的平方给出的，每个图都对应一个贡献。）在任何一个图上多增加一条内线都会使该图的贡献降低一个系数，该系数大致等于大自然的一个基本常数，称为“精细结构常数”。这一常数很小，约为  $1/137.036$ 。因此，复杂图的贡献也很小，我们可通过将几个简单图的贡献相加，计算出散射过程的比率的充分近似值。（我们有信心能几乎无限精确地预测原子光谱，原因即在于此。）然而，对于强相互作用来说，起着精细结构常数作用的常数大致等于 1，而不是  $1/137$ ，因而，复杂图提供的基值同简单图正好一

样大。涉及到强相互作用的过程的比率难以计算这一问题，一直是影响基本粒子物理学在过去四分之一的世纪中向前发展的唯一最大障碍。

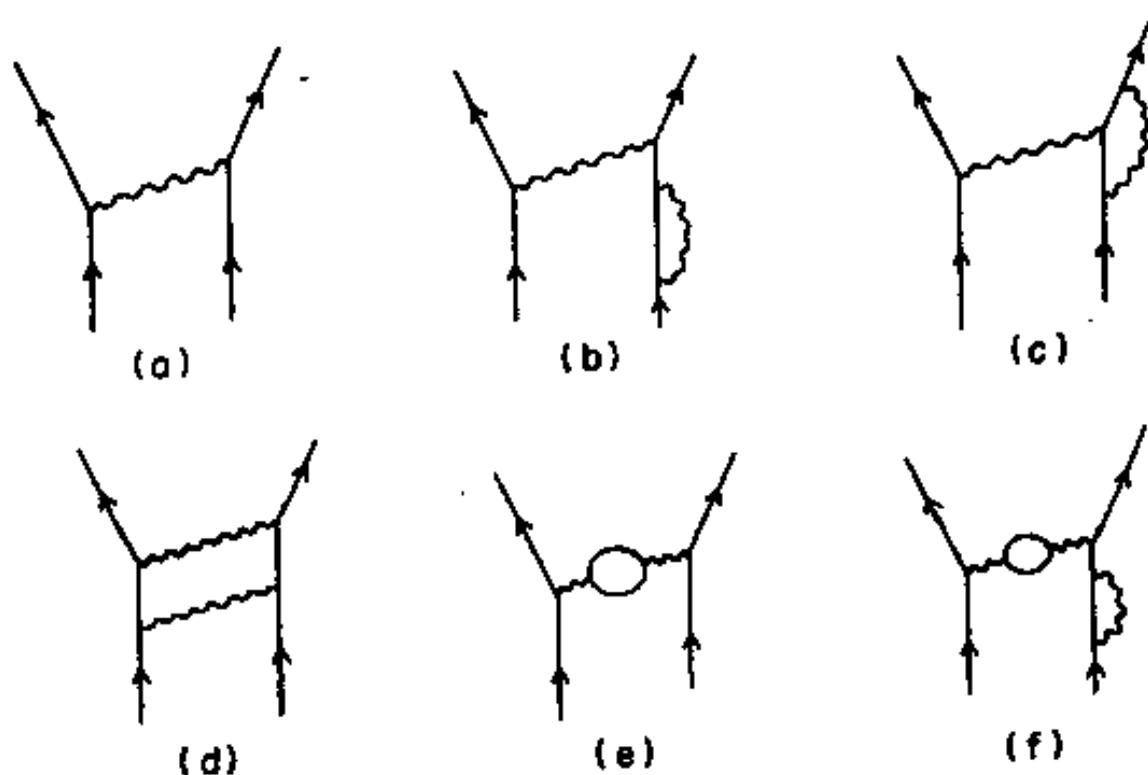


图 10 一些费因曼图 这里显示了一些有关电子-中子散射的较简单的费因曼图。直线表示电子或正电子；波形线表示光子。每个图均代表某个数值数量，这个数值数量取决于进入电子和外出电子的动量和自旋；散射进程的比率为与所有费因曼图相关联的这些数量的总和的平方。每个图对这个总和的贡献，与光子线的数量给出的若干个  $1/137$  的系数（精细结构常数）成正比。图 (a) 代表单个光子交换，提供的增量最大，与  $1/137$  成正比。图 (b)、(c)、(d) 和 (e) 代表对 (a) 作出主要“辐射”校正的所有类型的图；它们提供的数量级均为  $(1/137)^2$ 。图 (f) 提供的增量更少，与  $(1/137)^3$  成正比。

并非所有过程都涉及到强相互作用。强相互作用仅影响到被称为“强子”的一类粒子；它们包括核粒子和  $\pi$  介子，以及被称为 K 介子、 $\eta$  介子、 $\Lambda$  超子、 $\Sigma$  超子等的其他不稳定的粒子。强

子一般比轻子重（“轻子”的名称来自希腊的“轻”字），但它们之间真正重要的区别，是强子能感受到强相互作用，而轻子——中微子、电子和 $\mu$ 介子——却不能。电子感受不到核力这一事实无比重要——它同电子的小质量一起，造成了如下事实：原子或分子中的电子云约比原子核大100,000倍，此外，将原子稳固在分子中的化学力，比将中子和质子稳固在核中的力弱数百万倍。如果原子和分子中的电子能感受到核力，那就不会有化学、晶体学或生物学了——而只有核物理学。

作为第五章的开始，我们提出的1,000亿开氏度的温度是经过精心挑选的，为的是低于所有强子的阈值温度。（根据书后表1，最轻的强子—— $\pi$ 介子——的阈值温度约为1.6万亿开氏度）因此，在第五章的整个讲述中，唯一大量存在的粒子是轻子和光子，它们之间的相互作用完全可以忽略不计。

我们如何对待较高的温度呢？在那种情况下，强子和反强子以巨大的数量存在着。对此，有两种截然不同的回答，它们反映了关于强子性质的两种截然不同的思想流派。

根据一个流派，实际上不存在“基本”强子这种东西。每个强子都如同其他强子那样基本——不仅有像质子和中子这样稳定和近乎稳定的强子，以及像 $\pi$ 介子、K介子、 $\eta$ 介子和超子这样中等不稳定的粒子（它们存在的时间足以使之在照相底片或气泡室中留下可测量的痕迹），甚至还有像 $\rho$ 介子这样完全不稳定的“粒子”（它们存在的时间正好使它们在接近光速的速度上，几乎不能穿过原子核）。这一学说是在1950年代末和1960年代初，主要由伯克利的杰弗里·丘提出的，它有时被称为“核民主”。

按照对“强子”的这样一种自由定义，其阈值温度低于100万亿开氏度的已知强子的数量有数百个，可能还有数百个正有待于发现。在有些理论中，强子类型的数量是无限的；粒子种类的数量将随着我们探索的质量越来越大而越来越快地增加。对这样

一个世界做到理解，似乎是无望的，但粒子光谱的复杂性也有可能变成简单性。比如， $\rho$  介子是一种强子，可以认为它是一种由两个  $\pi$  介子组成的不稳定的合成物；当我们在计算中明确地计入  $\rho$  介子时，我们已在某种程度上考虑到了  $\pi$  介子之间的强相互作用；或许，通过在我们的热力学计算中明确地计入所有强子，我们可忽略强相互作用的所有其他影响。

再者，如果强子的类型数量的确无限，那当我们在一特定体积中加入越来越多的能量时，该能量就不会增加粒子的随机速度，而是增加该体积中现有粒子类型的数量。这样，温度就不会像在强子类型固定的情况下那样，随着不断增大的能量密度而迅速上升。事实上，在这类理论中，可有一个最高温度，在这个温度值上，能量密度变得无限。这是难以逾越的温度的上限，正如绝对零度是难以逾越的下限一样。关于强子物理学中最高温度的思想，起初是由日内瓦欧洲核子研究中心实验室的 R. 哈格多恩提出的，后得到其他理论学家的进一步发展，其中包括我本人。甚至对最高温度也作出了相当精确的估计——它低得惊人，约为两万亿开氏度 ( $2 \times 10^{12} \text{K}$ )。我们越接近开始，温度离这一最高值越近，存在的强子类型的数量也越丰富。然而，即使在这些异常情况下，也有一个开始，有一个有着无穷能量密度的时候，它大致在第五章第一个画面之前的百分之一秒。

还有另一个思想流派，它传统得多，比“核民主”更接近普通直觉，在我看来，也更接近事实。根据这个流派，并非所有粒子都是相等的；有些实际上是基本粒子，其余的则仅仅是基本粒子的复合物而已。据认为，基本粒子是由光子和所有已知轻子，而非任何已知强子组成的。相反，据认为，强子是称为“夸克”的更基本的粒子的复合物。

原始夸克理论是由默里·盖耳曼和乔治·茨威格（分别）提出的，他们都属于加州理工学院。理论物理学家诗人般的想象力，

在给不同种类的夸克命名时，得到了充分发挥。夸克被分为不同的类型或“味”，给它们起的名字有“浓味”、“淡味”、“奇异味”和“粲味”等。此外，夸克的每种“味”又分为三种不同的“颜色，”美国的理论学家们通常称之为红、白、蓝。北京的理论物理学家小组长期以来一直偏爱某个夸克理论，但他们却称之为“层子”而非夸克，因为这些粒子比寻常强子代表着更深层的现实。

如果夸克思想是正确的，那早期宇宙物理学就有可能比原认为的要简单。根据夸克在核粒子内部的空间分布，对它们之间的力作出某种推断是可能的，反过来，也可根据对电子与核粒子的高能碰撞的观测，确定这一分布（如果夸克模型是正确的）。按这种方法，几年前，麻省理工学院与斯坦福大学线性加速器中心合作发现，当夸克彼此间的距离非常接近时，夸克之间的力似乎消失了。这说明在某个温度下，也就是在几万亿开氏度左右，强子会分裂成它们的组分——夸克，就像原子在几千度下会分裂成电子和核，核在几十亿度下会分裂成质子和中子一样。根据这一情况，可以认为，在很早的时候，宇宙是由光子、轻子、反轻子、夸克和反夸克组成的，它们实质上都是作为自由粒子运动的，因而，每个粒子类型实际上仅是提供了又一种类型的黑体辐射而已。这样，很容易就能推算出，大约在第一个画面前百分之一秒的时候，必定曾有一个开端，有一个无穷密度和无穷温度的状态。

这些相当直觉的想法，近来有了一个更加坚实的数学基础。1973年，三位年轻的理论学家——哈佛大学的休·戴维·波利策和普林斯顿大学的戴维·格罗斯、弗兰克·维尔泽克指出，在一个特别的量子场理论类别中，夸克之间的力确实随着夸克被推得彼此越来越远而变得越来越弱。（这类理论被称为“非阿贝尔规范理论”，由于技术性太强，这里不便解释。）这些理论有着“渐近

自由”的显著特性；在渐近的短距离或高能量上，夸克的行为方式如同自由粒子。J.C. 科林斯和 M.J. 佩里在剑桥大学甚至指出，在任何渐近自由理论中，一个温度足够高、密度足够大的介质的特性，实质上就如同该介质纯粹是由自由粒子组成的一样。因此，这些非阿贝尔规范理论为最初百分之一秒的简单情景——宇宙是由自由基本粒子组成的——提供了坚实的数学理由。

夸克模型在众多的应用中非常有效。质子和中子的行为方式的确就像它们是由三个夸克组成的似的，而  $\rho$  介子的行为方式也就像它们是由一个夸克和一个反夸克组成的一样，等等。但尽管在这方面取得了成功，夸克模型却也带来了一个很是令人费解的问题：迄今业已证明，即使利用现有加速器提供的最大能量，也无法将强子分裂成它的组分——夸克。

同样，宇宙学也无法将自由夸克分离出来。如果强子真的在早期宇宙的高温下分裂成了自由夸克，那一些自由夸克就有可能残存到目前。苏联天体物理学家亚·B·泽利多维奇估计，残留下来的自由夸克在当前宇宙中的普遍程度应与金原子大致一样。不用说，黄金并不丰富，但购买一盎司的黄金，比购买一盎司的夸克要容易得多。

不存在分离的自由夸克这一难题，是理论物理学在当前面临的最重要问题之一。格罗斯和维尔泽克以及我本人曾提出，“渐近自由”提供了一个可能的解释。如果两个夸克之间的相互作用力随着它们彼此的推近而减弱，那它也会随着它们彼此的拉远而增强。因此，在寻常强子中将一个夸克与其他夸克的距离拉远所需的能量，会随着距离的增加而增加，它似乎最终将大到足以在真空中创造出新的夸克-反夸克对的程度。结果，我们得到的不是几个自由夸克，而是一些寻常强子。这完全就像将一根绳子的一端分离出来一样：如果用力拉，就会将绳子拉断，但得到的却是两根绳子，每个又有两个端点！在早期宇宙中，夸克彼此间的

距离非常近，所以它们感受不到这些力，因而能像自由粒子那样行动。然而，在非常早的宇宙中，随着宇宙的膨胀和冷却，每个自由夸克不是与一个反夸克湮灭，就是在质子或中子中找到了栖身之地。

关于强相互作用，就讲到这里。随着我们追溯早期宇宙，我们还会遇到其他问题。

现代基本粒子理论作出的一个非常有趣的推论是，宇宙可能曾发生过相跃迁，就像水温降到  $273\text{K}$  ( $=0^\circ\text{C}$ ) 以下时，水会结冰一样。与这一相跃迁相关联的不是强相互作用，而是粒子物理学的另一种短距离相互作用——弱相互作用。

弱相互作用是造成某些放射性衰变过程（如自由中子的衰变，参见第四章有关章节）的那些作用，更广泛地说，它们是造成涉及到中子的任何反应的那些作用。正如它们的名字所显示的那样，弱相互作用比电磁相互作用或强相互作用弱得多。比如，在能量为 100 万电子伏特的中微子和电子的碰撞中，弱力约为按同样能量碰撞的两个电子间的电磁力的一千万 ( $10^{-7}$ ) 分之一。

尽管弱相互作用的力粒弱，但人们长期以来一直认为弱力与电磁力之间或许存在着某种很深的关系。1967 年，我本人提出了一个将这两种力结合在一起的场理论，1968 年，两卜杜斯·萨拉姆也独自提出了这样的理论。这一理论预测存在着一种新类型的弱相互作用，即所谓的中性流，它的存在在 1973 年的实验中得到了证实。始于 1974 年的整个新强子类型的发现，又使它得到了进一步的验证。这类理论的主体思想是，大自然的对称性相当高，它将各种各样的粒子和力相互联系起来，但在普通物理现象中却被掩盖了。自 1973 年起用来描述强相互作用的场理论，都属同一数学类型（非阿贝尔规范理论），许多物理学家现在认为，规范理论或许能为认识大自然所有的力提供一个统一的基础。这些力包括：弱力、电磁力、强力，或许还有引力。这一观

点得到了统一的规范理论的一个特性的支持，这一理论是由萨拉姆和我本人提出的，并在 1971 年由杰拉德特·胡夫特和本杰明·李得到了证实：复杂费因曼图的贡献尽管看上去无穷，但却给出了有关所有物理过程的比率的有穷结果。

对于早期宇宙研究来说，正如莫斯科列别杰夫物理研究所的 D.A. 基尔日尼茨和 A.D. 林德在 1972 年所指出的那样，规范理论的重要之处，在于它们展示了在大约 3,000 万亿度 ( $3 \times 10^{15} \text{K}$ ) 的“临界温度”上的相跃迁，即一种冻结。在低于临界温度的温度上，当时的宇宙就跟现在一样：弱相互作用较弱，且距离较短。在高于临界温度的温度上，弱相互作用和电磁相互作用之间的重要统一，表现得很明显：弱相互作用与电磁相互作用遵循同一类型的平方反比律，并有着大约相同的强度。

用一杯冰水作类比，对此很有启发性。高于冰点，液态水表现出很高的均匀性：在杯中的一个点上发现水分子的可能性，与其他任何点都一样。然而，当水冻结后，不同点在空间上的对称就会部分丧失：冰形成了一个晶格，水分子都处于某种固定的间隔上，在其他任何地方找到水分子的可能性都几乎为零。同样，当宇宙随着温度下降到 3,000 万亿度以下而“冻结”时，对称性就丧失了——跟一杯冰不同，它失去的不是空间上的均匀性，而是弱相互作用和电磁相互作用之间的对称性。

将这一类比作更进一步的发挥，也是可能的。每个人都知道，当水结冰时，它通常并不形成完美的冰晶，而是形成某种更为复杂的东西：一大堆零乱的晶畴，中间用各种类型的不规则晶线分隔开来。宇宙也曾冻结成畴吗？我们是否也生活在这样一个畴中，弱相互作用和电磁相互作用之间的对称是否也以某种特定方式被打破？我们最终能否发现其他的畴？

迄今为止，我们的想象力将我们带回到了温度为 3,000 万亿度的时候，而我们不得不而对强相互作用、弱相互作用和电磁相

互作用。物理学已知的另一大类相互作用——引力相互作用，又怎样呢？引力当然曾在我们的讲述中起过重要作用，因为它控制着宇宙密度与其膨胀速度的关系。然而，迄今还没有发现引力对早期宇宙的任何部分的内部特性有什么影响。这是因为引力极其弱；比如，氢原子中的电子和质子间的引力，比电力还弱  $10^{39}$  次方。

（引力场中的粒子生成过程，可说明宇宙进程中引力的微弱程度。威斯康辛大学的莱昂纳多·帕克指出，宇宙引力场的“潮汐”效应，在宇宙起始后大约 1 亿亿亿分之一秒（ $10^{-24}$  秒）的时候，会大得足以在空洞的空间中产生粒子-反粒子对。然而，引力在这些温度上仍然太弱，按这种方式产生的粒子的数量，对热平衡中业已存在的粒子的贡献可忽略不计。）

但是，我们至少可想象曾有一个时候，引力强大得如同上述强大的核相互作用一般。引力场不仅是由粒子质量产生的，还是由所有形式的能量产生的。地球围绕着太阳运行的速度，比太阳不炽热的情况下要快，因为太阳热量的能量是引力的一部分来源。在超高温度下，处于热平衡的粒子的能量可变得非常之大，以至于使它们之间的引力变得如同其他力量那么强。我们可以估计，这一事态是在大约 1 亿亿亿度（ $10^{32}$  K）的温度上实现的。

在这一温度上，所有类型的奇异事情都会发生。不仅引力变得强大，引力场引起的粒子生成量巨大，而且“粒子”这一概念也不再有任何意义。“视界”，即超过它就无法接收到任何信号的距离（参见第二章），此时会比处于热平衡的一个典型粒子的一个波长都近。粗略地说，每个粒子都大得跟可观测到的宇宙差不多！

我们对引力的量子性质了解得还不够，甚至还不能对此前的宇宙史进行明智地推测。我们能大致估计， $10^{32}$  K 的温度是在起始后的大约  $10^{-43}$  秒的时候达到的，但这一估计有何意义，现在

还不真正清楚。因此，无论其他迷雾是否已被揭开，在  $10^{32}\text{K}$  的温度上，仍有一团迷雾在遮挡着我们对最早时代的观察。

然而，这些不确定性对公元 1976 年的天文学来说，都没有太大的影响。关键之处在于，在最初的整整一秒中，宇宙被假定处于热平衡状态，在此状态下，所有粒子（甚至是中微子）的数量和分布都是由统计力学的定律，而非它们的过去决定的。当我们在今天测量氦的丰度、微波辐射甚至是中微子的丰度时，我们观测的是在第一秒结束时结束的热平衡状态的残留物。就我们所知，我们能够观测到的任何东西都不取决于那个时候之前的宇宙史。（特别是，或许除了光子与核粒子比率本身外，我们现在观测到的任何东西都不取决于在最初的一秒之前，宇宙是不是各向同性的和均匀的。）这就像精心准备了一顿晚餐——最新鲜的配料，最精制的佐料，最上乘的葡萄酒——而随后便全扔到了一个大锅中，煮了好几个小时。这样一来，即使是最有鉴赏力的美食家也难以辨明端上桌来的是什么了。

可能有一个例外。引力现象，如同电磁现象一样，有可能表现为波；还有可能表现为更为常见的远距离静力作用。两个静止电子通过取决于它们之间的距离的静电力，相互排斥，但如果我们前后摆动一个电子，在间距发生变化的消息通过电磁波从一个粒子传送给另一个粒子之前，另一个电子是不会感受到作用力的任何变化的。几乎不必说，这些波是以光速传播的——它们就是光，尽管未必是可见光。同样，如果某个不明智的巨人前后摆动太阳，那我们在地球上八分钟内也不会感受到其影响，八分钟是波以光速从太阳传播到地球所需的时间。这不是一种光波，一种振动电波或磁波，而是一种引力波，振动发生在引力场中。正如对待电磁波那样，我们将所有波长的引力波都归并为“引力辐射”。

引力辐射与物质的相互作用远远弱于电磁辐射，甚至弱于中

微子。(因为这一原因，尽管我们在理论上对引力辐射的存在有相当的把握，但大多数艰苦的努力迄今显然都没有侦测到任何来源的引力波。)因此，引力辐射可能在很早的时候就与其他宇宙成分失去了热平衡——事实上，是在温度约为  $10^{32}\text{K}$  的时候。自那时起，引力辐射的有效温度开始下降，与宇宙规模成反比。宇宙其他成分的温度遵循的也是这一递减规律，只有一个例外，那就是夸克-反夸克和轻子-反轻子对的湮灭，提高了宇宙其他部分的温度，但却没有提高引力辐射的温度。因此，当今的宇宙中应充满了引力辐射，其温度接近但却稍低于中微子或光子的温度——或许约为  $1\text{K}$ 。发现这一辐射，意味着要对宇宙史上的最早时刻进行直接观测，就连当代理论物理学也能对这一时刻作出估计。遗憾的是，在可预见到的将来发现  $1\text{K}$  的引力辐射背景的可能性微乎其微。

在许多具有大量推测成分在内的理论的帮助下，我们得以从时间上往后追溯宇宙史，一直追溯到密度无穷大的时刻。但这并不能使我们感到满足。自然，我们想知道在这一时刻之前，在宇宙开始膨胀和冷却之前，存在着什么。

一个可能性是，实际上从来就没有过一个密度无穷大的状态。宇宙当前的膨胀可能是从以前的一个收缩时期结束时开始的，当时的宇宙密度已达到了某个非常高但却是有穷的值。在下一章，我将对这一可能性作稍多的论述。

然而，尽管我们不知道是否的确曾有过一个开端，但这至少在逻辑上是可能的，而且在那一时刻之前，时间本身是没有意义的。我们都已习惯了绝对零度概念。将任何东西冷却到  $-273.16\text{C}$  以下都是不可能的，这不是因为太难或是因为没有人想到制造一种非常合适的冰箱，而是因为低于绝对零度的温度是没有意义的——绝对不可能有低于无热的热量。同样，我们或许也应去习惯绝对零时间这一思想——在过去的这一时刻之前，在

原则上讲是不可能追溯任何因果链的。这个问题仍有待商榷，也可能将永远值得商榷。

对我来说，从对早期宇宙的这些猜测中得出的最为令人满意的事，是宇宙史与其逻辑结构间可能存在着相似之处。大自然现已展示出种类繁多的粒子和相互作用。而我们业已学会透过这一多样性进行更深入的研究，尽力将各种粒子和相互作用看作一个简单而统一的规范场理论的各个方面。当前宇宙非常寒冷，不同粒子和相互作用之间的平衡性被一种冰冻掩盖；它们在日常现象中表现得不明显，必须在我们的规范场理论中，通过数学方式来表达。我们现在通过数学所做的事情，在早期宇宙中是由热来完成的——这一物理现象直接展示了大自然在本质上的简单性。可没有人能亲眼目睹。

## 第八章

### 尾声：未来前景

宇宙当然会一如既往地膨胀一个时期。至于它以后的命运，标准模型作出了含糊的预测：它完全取决于宇宙密度是小于还是大于某个临界值。

我们在第二章看到，如果宇宙密度小于临界密度，那宇宙就是无穷的，就将继续永无休止地膨胀下去。我们的后代，假使我们那时还有后代的话，将会看到热核反应在所有恒星上逐渐结束，留下的是各种各样的熔渣：黑矮星、中子星，或许还有黑洞。行星可能继续沿轨道运行，并随着它们发射引力波而稍微降低速度，但却永远不会在任何有穷的时间内进入静止状态。宇宙辐射背景和中微子的温度将继续与宇宙规模成反比地下降，但它们将不会逃过人们的眼睛；即使现在我们还难以侦测到 3K 的微波辐射背景。

另一方面，如果宇宙密度大于临界值，那宇宙就是有穷的，其膨胀将最终停止下来，取而代之的将是加速收缩。举例来说，如果宇宙密度是其临界值的两倍，如果当前通用的哈勃常数（每百万光年每秒 15 公里）是正确的，那宇宙现在就有 100 亿岁了；它将再继续膨胀 500 亿年，而后开始收缩（参见图 4）。收缩只不过是倒退的膨胀而已；500 亿年之后，宇宙将重新回到当前的规模，再过 100 亿年，它将接近奇特的无穷密度状态。

至少在收缩阶段的初期，天文学家（如果还有的话）将能够

欣赏到红移和蓝移。来自附近星系的光将会在宇宙比观测到光的时候大的时候发射，因此，当它被观测到的时候，这种光似乎在朝着光谱的短波端，即朝着蓝色偏移。另一方面，来自极遥远物体的光将在宇宙仍处于最初膨胀阶段的时候发射，那时宇宙甚至比观测到光的时候还小，因此，当它被观测到的时候，这种光似乎在朝着光谱的长波端，即朝着红色偏移。

由光子和中微子形成的宇宙背景的温度将会下降，而后再随着宇宙的膨胀和随后的收缩而上升，它总是与宇宙的规模成反比。如果宇宙现在的密度是其临界值的两倍，那我们的计算结果就是，当宇宙膨胀到最大时，它将比现在正好大两倍，因此，微波背景温度将只有当前值  $3^{\circ}\text{K}$  的一半，即  $1.5^{\circ}\text{K}$  左右。所以，随着宇宙开始收缩，温度将开始上升。

刚开始，不会出现警报——在几十亿年的时间里，辐射背景的温度不高，需要付出很大的气力才能发现它。然而，当宇宙再次收缩到当前规模的百分之一时，辐射背景将开始主宰天空：夜空将如同我们今天的白昼一样温暖 ( $300^{\circ}\text{K}$ )。7,000 万年后，宇宙将再收缩十倍，我们的后人（如果有的话）将会感到天空亮得难以忍受。行星和恒星大气中以及恒星际空间中的分子将开始分解成它们的组分——原子，而原子则又分解成自由电子和原子核。再过 70,000 年，宇宙温度将达到 1,000 万度；随后，恒星和行星自己也将溶化成一种由辐射、电子和核组成的混合物。再过 22 天，温度将上升到 100 亿度。而后，核开始裂变成它们的组分——质子和中子，从而又恢复到了恒星核聚变和宇宙核聚变之前的样子。此后不久，电子和正电子将在光子与光子的碰撞中大量产生，中微子和反中微子的宇宙背景将与宇宙的其他部分重新形成热共享。

我们真的能将这一令人沮丧的故事一直这样讲述下去、一直讲到无穷温度和无穷密度状态吗？在温度达到 10 亿度大约三分

钟后，时间真的停止了吗？显然，我们没有把握。我们在上一章力图探索最初百分之一秒时所遇到的所有不确定的地方，在我们探究最后百分之一秒时，将再次使我们不知所措。最为重要的是，我们必须用量子力学的语言，在高于10万亿亿亿度（ $10^{32}$ K）的温度上描述整个宇宙，但没有人知道那时发生了什么。再者，如果宇宙并非真的是各向同性的和均匀的（参见第五章结尾），那在我们不得不面对量子宇宙学的问题之前，我们的整个讲述可能就早已失去了真实性。

从这些不确定性中，有些宇宙学家看到了某种希望。或许，大地将发生一种宇宙“反弹”，重新开始膨胀。在《埃达》中，诸神和巨人在世界毁灭时经过最后一场激战后，地球被水火摧毁，但水退后，托尔的儿子们又拿着他们父亲的锤子，从地狱中走了出来，整个世界重又开始了。但如果宇宙真的会重新膨胀，那它的膨胀也会再次缓慢并停下来，然后开始另一轮的收缩，并在另一次的宇宙毁灭中结束，然后又发生反弹，循环往复，永无休止。

如果我们的未来是这个样子，按理说，我们的过去也应是这个样子。当今的宇宙膨胀只不过是上一次收缩和反弹后的一个阶段而已。（事实上，迪克、皮布尔斯、罗尔和威尔金森在他们1965年关于宇宙微波辐射背景的论文中，就已作出过假设，他们说宇宙在过去肯定有一个完整的膨胀和收缩阶段。他们还认为，宇宙必定曾有过足够的收缩，这样才将温度至少提高到了100亿度，从而将在以前的阶段形成的重元素分解开来。）再往后看，我们可以想象一个无穷尽的膨胀和收缩循环，它一直延伸到无穷的过去，根本就没有什么开端。

有些宇宙学家是从哲学意义上对振动模型感兴趣的，这尤其是因为，同衡稳态模型一样，它巧妙地回避了创世纪的问题。然而，它的确也面临着一个严重的理论难题。在每个循环周期中，

随着宇宙的膨胀与收缩，光子与核粒子的比率（或更确切地说，每个核粒子的熵），会因一种摩擦（称为“体积粘度”）而略有增加。据我们所知，这样一来，宇宙开始每次新的循环时，其光子与核粒子之比率都是新的且略有提高。目前，这一比率很大，但并非无穷，所以难以看出，宇宙何以能够在过去历经无数次的循环。

然而，所有这些问题或许都是可以解决的，而且无论哪个宇宙模型被证明是正确的，都不会给人以多大慰藉。人类几乎不可避免地会这样认为，即我们与宇宙有着某些特殊的关系，人类生命不仅仅是始于最初三分钟的一系列事件所带来的具有喜剧色彩的产物，而且我们自宇宙创始时就在某种程度上被内置在宇宙里面了。写到这儿时，我正坐在一架飞行在 30,000 英尺高空的飞机上，正在从旧金山返回波士顿的途中飞经怀俄明的上空。下而，地球看上去非常柔软、舒适——绒毛似的浮云四处可见，积雪在落日的映照下变成了粉红色，公路从一个城镇到另一个城镇，笔直地伸展在大地上。很难想象，所有这些都只不过是充满敌意的宇宙中一微不足道的部分而已。更难想象，当前这个宇宙是从人类完全陌生的早期环境中演化而来的，而且在将来有可能毁灭，进入无穷期的寒冷或无法忍受的酷热。宇宙越是看似容易理解，越是让人不可捉摸。

但即使我们的研究成果中没有令人宽慰的东西，那研究本身也至少称得上是某种宽慰。人们并不满足于神和巨人的传说，也不愿将全部精力放在日常琐事上；他们还制造了望远镜和卫星以及加速器，整日坐在办公桌旁分析所收集的数据。旨在理解宇宙的努力，是使人类生活多少减少一些喜剧色彩，增加某些悲剧色彩的少数事情之一。

## 图 表

### 表 1 一些基本粒子的特性

	粒子	符号	静止能量 (百万电子伏)	阈值温度 (十亿开氏度)	有效种类数量	平均寿命 (秒)
轻子	光子	$\gamma$	0	0	$1 \times 2 \times 1 = 2$	稳定
	中微子	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	0	$2 \times 1 \times 7/8 = 7/4$	稳定
		$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0	0	$2 \times 1 \times 7/8 = 7/4$	稳定
	电子	$e^-, e^+$	0.5110	5.930	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	稳定
	$\mu$ 介子	$\mu^-, \mu^+$	105.66	1226.2	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	$2.197 \times 10^{-6}$
强子	$\pi$ 介子	$\pi^0$	134.96	1566.2	$1 \times 1 \times 1 = 1$	$0.8 \times 10^{-16}$
		$\pi^+, \pi^-$	139.57	1619.7	$2 \times 1 \times 1 = 2$	$2.60 \times 10^{-8}$
	质子	$p, \bar{p}$	938.26	10, 888	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	稳定
	中子	$n, \bar{n}$	939.55	10, 903	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	920

一些基本粒子的特性 “静止能量”是粒子的所有质量被转化为能量时所释放的能量。“阈值温度”是静止能量除以玻耳兹曼常数；在这个温度以上，粒子可自由地从热辐射中创造出来。“有效种类数量”给出了在大大高于阈值的温度上，每种粒子对的总能量、压力和熵的相对增量。这个数量被称为三个系数的乘积：根据粒子是否有单独的反粒子，第一个系数为2或1；第二个系数是粒子自旋方向的数量；最后一个系数是7/8或1，这取决于粒子是否遵循泡利排斥原理。“平均寿命”是粒子在发生放射性衰变，或为其他粒子之前，所存在的平均时间长度。

表 2 一些辐射类型的特性

	波长 (厘米)	光子能量 (电子伏)	黑体温度 (开氏度)
无线电 (至甚高频)	$> 10$	$< 0.00001$	$< 0.03$
微波	0.01 至 10	0.00001 至 0.01	0.03 至 30
红外线	0.0001 至 0.01	0.01 至 1	30 至 3,000
可见光	$2 \times 10^{-5}$ 至 $10^{-4}$	1 至 6	3,000 至 15,000
紫外线	$10^{-7}$ 至 $2 \times 10^{-5}$	6 至 1,000	15,000 至 3,000,000
X 射线	$10^{-9}$ 至 $10^{-7}$	1,000 至 100,000	$3 \times 10^6$ 至 $3 \times 10^8$
$\gamma$ 射线	$< 10^{-9}$	$> 100,000$	$> 3 \times 10^8$

一些辐射类型的特性 每种辐射都有一定的波长范围，这里用厘米表示。与这一波长范围相对应的，是光子能量的范围，这里用电子伏表示。“黑体温度”是这样一种温度，在这一温度上，黑体辐射的大部分能量都聚集在特定波长附近；这里，这<sup>里</sup>温度用开氏度表示。（比如，彭齐亚斯和威耳孙在发现宇宙辐射背景时所测到的波长为 7.35 厘米，所以这是微波辐射；当核发生放射性嬗变时所释放的光子能量通常约为 100 万电子伏，所以这是  $\gamma$  射线；太阳表面的温度为 5800K，所以太阳发射的是可见光。）当然，不同类型的辐射并没有明显的区别，而且人们对各种波长范围也没有一个普遍一致的看法。

## 词汇表

**绝对光度** 任何天体每单位时间所发射的总能量。

**仙女座星云** 离我们的星系最近的大星系。它呈旋涡状，具有大约  $3 \times 10^{11}$  的太阳质量。它在梅西耶星表中编号为 M31，在“星云呈因新总表”中编号为 NGC224。

**埃单位** 一厘米的一亿分之一 ( $10^{-8}$  cm)。用符号 Å 表示。典型原子的大小为几个埃；可见光的典型波长为几千个埃。

**反粒子** 与另一个粒子的质量和自旋相同，但却有着等量而相反的电荷、重子数、轻子数等等的粒子。每个粒子都有一个相应的反粒子，只有某些纯中性粒子是例外，如光子和  $\pi^0$  介子，它们自身就是自己的反粒子。反中微子是中微子的反粒子；反质子是质子的反粒子；以此类推。反物质是由反质子、反中子和反电子或正电子组成的。

**视光度** 每单位时间和每单位接受面积从任何天体上所接收到的总能量。

**渐近自由** 关于强相互作用的某些场理论的特性，认为力在短距离内会变得越来越弱。

**重子** 一类强烈相互作用的粒子，其中包括中子、质子和被称为超子的不稳定的强子。重子数是一个存在子体系内的重子总数减去反重子总数。

**“大爆炸”宇宙学** 这一理论认为宇宙的膨胀始于过去某个有穷的时刻，当时它正处于密度和压力都非常大的状态。

**黑体辐射** 其每个波长范围中的能量密度与完全吸收性热物体所发射的辐射的能量密度相同的辐射。处于任何热平衡状态的辐射都是黑体辐射。

**蓝移** 光谱线向更短波长的移动，是由渐近光源的多普勒效应引

起的。

**玻耳兹曼常数** 统计力学的基本常数，它将温度尺度与能量单位联系在一起。通常用  $k$  或  $k_B$  表示。等于每开氏度  $1.3806 \times 10^{-16}$  尔格，或每开氏度 0.00008617 电子伏。

**造父变星** 明亮的变星，其绝对光度、变化周期和颜色间存在着明确的关系。取名于仙王星座中的恒星仙王座  $\delta$ （中国星名造父一）。用来指示相对较近的星系的距离。

**特征膨胀时间** 哈勃常数的倒数。大约是宇宙膨胀 1% 所需的时间的 100 倍。

**守恒定律** 确定某些量的值在任何反应中都不发生变化的定律。

**宇宙射线** 高能带电粒子，是从外层空间进入我们的地球大气的。

**宇宙学常数** 爱因斯坦在 1917 年在他的引力场公式中增加的一个项。这样一个项会在非常大的距离内产生排斥力，静止的宇宙中需要用它来平衡因引力而产生的吸引力。目前没有理由怀疑宇宙学常数的存在。

**宇宙学原理** 认为宇宙是各向同性的和均匀的假说。

**临界密度** 宇宙的膨胀最终停下来并由收缩所取代所需要的当前最小的宇宙质量密度。如果宇宙的密度超过临界值，那宇宙在空间上就是有限的。

**临界温度** 使相变得以发生的温度。

**氰** 化合物 CN，由碳和氮组成。可通过吸收可见光，在恒星间空间中找到。

**减速因子** 用以描述遥远星系的退行速度减缓情况的数量。

**密度** 每单位体积的任何量的数量。质量密度是每单位体积的质量；它常常被简单地称为“密度”。能量密度是每单位体积的能量；数密度或粒子密度是每单位体积的粒子的数量。

**氘** 一种氢重同位素  $H_2$ 。氘核是由一个质子和一个中子组成的。

**多普勒效应** 任何信号的频率变化。

**电子** 最轻的巨大的基本粒子。原子和分子的所有化学特性都是由电子彼此之间以及电子与原子核之间的电相互作用决定的。

**电子伏** 一种能量单位，在原子物理学中很常用，等于一个电子通过一伏的电压差时所获得的能量。等于  $1.60219 \times 10^{-12}$  尔格。

**熵** 统计力学的基本量，与某个物理体系的紊乱程度相关。熵在持续保持热平衡的任何过程中都是守恒的。热力学的第二个定律说，熵的总量在任何反应中都永不减少。

**尔格** 厘米-克-秒系统中的能量单位。以每秒一厘米的速度运动的一克质量的动能，为半尔格。

**费因曼图** 表示基本粒子反应率的各种因素的图。

**精细结构常数** 原子物理学和量子电子动力学的基本数值常数，为电子电荷的平方除以普朗克常数和光速的乘积。用  $\alpha$  表示，等于  $1/137.036$ 。

**频率** 任何类型的波的波峰通过一特定点的速度。等于波速除以波长。以每秒的循环周期或“赫兹”来衡量。

**弗里德曼模型** 宇宙的时空结构的数学模型，以广义相对论（没有宇宙学常数）和宇宙学原理为基础。

**星系** 巨大的因引力而集结在一起的恒星集团，包含有多达  $10^{12}$  太阳质量。我们所在的星系有时被称为“银河系”。星系通常按照其形状（如椭圆形、旋涡形、有棒的旋涡形或不规则）来分类。

**规范理论** 一类场理论，作为关于弱、电磁和强相互作用的一种可能的理论，目前正受到深入研究。此类理论在对称变换下是不变的，其效应在时空中因点而异。“规范”一词来自普通的英语词，意思是“测量”，但这个词大多是在涉及到历

史时才使用。

**广义相对论** 阿尔伯特·爱因斯坦在 1906 - 1916 年的十年中提出的引力理论。正如爱因斯坦所阐述的那样，广义相对论的基本思想是，引力是时空连续体的曲率的效应。

**引力波** 引力场中的波，类似于电磁场中的光波。引力波的运动速度同光波一样，也是每秒 299.792 公里。在引力波方面现在还没有广泛认可的实验证据，但它们的存在却是广义相对论所需要的，而且也没有受到严重的怀疑。引力辐射的量子，类似于光子，称为引力子。

**强子** 参与强相互作用的任何粒子。强子分为重子（如中子和质子）和介子，重子符合泡利不相容原理，而介子则不符合。

**氦** 第二个最轻的也是第二个最丰富的化学元素。稳定的氦同位素有两种：核  $\text{He}^4$  中包含有两个质子和两个中子，而核  $\text{He}^3$  中则包含有两个质子和一个中子。氦的原子中在核的外面有两个电子。

**均匀性** 宇宙的假定特性，即在特定的时刻，它在所有典型观测者看来都是一样的，无论他们位于何处。

**视界** 在宇宙学中，它指的是这样一个距离，在这一距离之外，没有任何光信号有足够的时间到达我们。如果宇宙有一个确切的年龄，那视界的距离就是年龄乘以光速的数量级。

**哈勃定律** 距离中等的星系的退行速度和它们的距离之间的比例关系。哈勃常数则是速度和距离在这方面的比率，用  $H$  或  $H_0$  表示。

**氢** 最轻和最丰富的化学元素。寻常氢的核是由一个单一的质子组成的。还有两种较重的同位素：氘和氚。任何一种氢的原子都是由一个氢核和一个单一的电子组成的；正氢离子中没有电子。

**羟离子** 离子  $\text{OH}^-$ ，由一个氧原子、一个氢原子和一个额外的

电子组成。

**红外辐射** 波长大约在 0.0001 厘米到 0.01 厘米（1 万到 100 万埃）的电磁波，介于可见光与微波辐射之间。室温下的物体发出的主要都是红外辐射。

**各向同性** 宇宙的假定特性，即在一个典型观测者看来，它在所有方向上都是一样的。

**琼斯质量** 引力能够克服内部压力并产生在引力作用下集结在一起的系统的最小质量。用  $M_J$  表示。

**开氏度** 温度尺度，同摄氏度一样，但它是用绝对温度而非冰的熔点来表示零度的。一个大气压下的冰的熔点为  $273.15^\circ\text{K}$ 。

**轻子** 不参与强相互作用的一类粒子，包括电子、 $\mu$  介子和中微子。轻子数是一个系统中存在的轻子总数减去反轻子总数。

**光年** 光线在一年中所运行的距离，等于 9.4605 万亿公里。

**最高温度** 温度的上限，是某些强相互作用理论提出的。这些理论估计它为 2 万亿开氏度。

**平均自由程** 一特定粒子在与它所运动于其中的介质发生的两次碰撞之间所运行的平均距离。平均自由时间为碰撞之间的平均时间。

**介子** 一类强相互作用的粒子，包括  $\pi$  介子、K 介子、 $\rho$  介子，等等，其重子数为零。

**梅西耶编号** 查尔斯·梅西耶星表中各星云和星团的星表编号。通常缩写为 M……；如仙女座星云为 M31。

**微波辐射** 波长大约为 0.01 厘米到 10 厘米的电磁波，介于甚高频射电和红外辐射之间。温度在几开氏度的物体主要在微波带发出辐射。

**银河** 我们星系平而上的恒星带的古称。有时用来指我们的星系本身。

**$\mu$  介子** 一种不稳定的带负电的基本粒子，与电子相似但却比电

子重 207 倍。用  $\mu$  表示。它虽被称为介子，但却不像真正的介子那样发生强相互作用。

**星云** 有着云一样外表的延伸天体。有些星云是星系；有些则实际上是我们星系中的灰尘和气体。

**中微子** 一种没有质量的不带电的粒子，只发生弱相互作用和引力相互作用。用  $\nu$  表示。中微子至少有两个种类，分别被称为电子型 ( $\nu_e$ ) 和  $\mu$  介子型 ( $\nu_\mu$ )。

**中子** 不带电的粒子，和质子一起存在于寻常原子核中。用  $n$  表示。

**牛顿常数** 牛顿和爱因斯坦的引力理论的基本常数。用  $G$  表示。在牛顿的理论中，两个物体之间的引力是  $G$  乘以质量的乘积再除以它们之间距离的平方。按公制单位计算，则等于  $6.67 \times 10^{-8}$  立方厘米/克秒。

**核民主** 认为所有强子都一样基本的理论。

**核粒子** 存在于寻常原子的核中的粒子，即质子和中子。通常简称为核子。

**秒差距** 天文学上的距离单位。被界定为其视差（因地球绕着太阳运动而引起的年偏移）为一秒弧的物体的距离。等于  $3.0856 \times 10^{13}$  公里，或 3.2615 光年。比光年更常用于天文文献中。宇宙学的传统单位是百万秒差距，缩写为 Mpc。哈勃常数通常用公里/秒/百万秒差距来表示。

**泡利不相容原理** 认为没有两个同一类型的粒子会处于恰好相同的量子状态的原理。重子和轻子符合这一原理，但光子或介子都不符合。

**相变** 一个系统从一种位形向另一种位形的剧烈转变，通常会发 生对称上的变化。熔化、沸腾以及从普通传导性向超寻性的转变都是这方面的例子。

**光子** 在光子辐射的量子理论中，与光波联系在一起的粒子。用

$\gamma$  表示。

**$\pi$  介子** 最小质量的强子。分为三个种类：带正电的粒子 ( $\pi^+$ )、它的带负电的反粒子 ( $\pi^-$ ) 和略轻的不带电的粒子 ( $\pi^0$ )。

**普朗克常数** 量子力学的基本常数。用  $h$  表示。等于  $6.625 \times 10^{-27}$  尔格秒。普朗克常数是 1900 年在普朗克的黑体辐射理论中首次提出的。随后又出现在爱因斯坦 1905 年的光子理论中：一个光子的能量是普朗克常数乘以光速再除以波长。今天，常数  $\hbar$  在中国人民使用得更多一些，它是用普朗克常数除以  $2\pi$  得出的。

**普朗克分布** 处于热平衡的辐射，即黑体辐射，在不同波长上的能量分布。

**正电子** 电子带正电的反粒子。用  $e^+$  表示。

**自行** 天体沿与视线方向垂直的运动引起的在天空中的位置的移动。通常用秒弧/年测量。

**质子** 带正电的粒子，与中子一起存在于寻常原子核中。用  $p$  表示。氢核是由一个质子组成的。

**量子力学** 1920 年代提出的基本物理理论，取代了古典力学。在量子力学中，波和粒子是同一个基本实体的两个方面。与一特定波相关联的粒子是它的量子。此外，像原子或分子这样的束缚系统的状态只能处于某些显著的能级；一般认为能量被量子化了。

**夸克** 假定的基本粒子；根据假设，所有强子都是由夸克组成的。现在还从未发现过单独的夸克，在理论上也有理由怀疑，尽管夸克在某种意义上是真实存在的，但它们永远也不可能作为单独的粒子被发现。

**类星体** 有着恒星的外表和非常小的角尺度，但又有着大的红移的一类天体。当它们是强射电源时，也被称为类星源。它们的真实性质现在还不为人所知。

**雷利-琼斯定律** 能量密度（每单位的波长间隔）和波长的简单关系，适用于普朗克分布的长波长范围。这一范围的能量密度与波长的反四次方成正比。

**复合** 原子核和电子结合成寻常原子。在宇宙学中，复合常常被专门用来指氦和氢原子在大约 3,000 K 温度下的形成。

**红移** 由退行光源的多普勒效应引起的光谱线向较长波长的偏移。在宇宙学中，它指的是观测到的遥远天体的光谱线向长波的偏移。作为波长的分数增加值，红移用  $z$  表示。

**静止能量** 处于静止状态的粒子的能量，如果粒子的所有质量能被湮灭，那这种能量就会释放出来。用爱因斯坦的公式  $E = mc^2$  得到。

**$\rho$  介子** 许多极端不稳定的强子之一。衰变为两个  $\pi$  介子，平均寿命为  $4.4 \times 10^{-24}$  秒。

**狭义相对论** 阿尔伯特·爱因斯坦在 1905 年提出的关于时空的新观点。在牛顿力学中，有一套数学变换式，它们将不同观测者所用的时空坐标相互联系起来，使自然法则在这些观测者看来都是一样的。然而，在狭义相对论中，时空变换有一个实质性的特性，即无论观测者的速度如何，光速都是不变的。一般认为，包含有其速度接近光速的粒子的任何系统，都是相对论性的，都必须根据狭义相对论而非牛顿力学的规则来对待。

**光速** 狭义相对论的基本常数，等于每秒 299,729 公里。用  $c$  表示。质量为零的任何粒子，如光子、中微子或引力子，都是以光速运动的。当物质粒子的能量与它们质量中的静止能量  $mc^2$  相比，非常之大时，它们的速度就接近于光速。

**自旋** 基本粒子的基本特性，它描述了粒子的旋转状态。根据量子力学的规则，自旋仅有某些特殊值，等于一个整数或整数的一半乘以普朗克常数。

**恒稳态理论** 邦迪、戈尔德和霍伊尔提出的宇宙学理论，按照这一理论，宇宙的平均特性从不随着时间的变化而变化；为了使密度在宇宙膨胀过程中保持不变，必须不断有新物质创造出来。

**斯蒂芬-玻耳兹曼定律** 黑体辐射中的能量密度和温度的四次方成比例的关系。

**强相互作用** 在基本粒子相互作用的四个基本类型中，它是最强的一个。它产生了将质子和中子凝聚在原子核中的核力。强相互作用仅影响强子，不影响轻子或光子。

**超新星** 巨大的恒星爆炸，在爆炸中，除了恒星的内核外，其余部分全都被炸得飞进了恒星际空间。一个超新星在几天内所产生的能量，相当于太阳在 10 亿年中所释放的能量。在我们的星系中所观测到的最后一颗超新星，是 1604 年由开普勒（以及朝鲜和中国的宫廷占星家）在蛇夫座中发现的，但有人认为，射电源仙后座 A 是由于一颗更新的超新星而引起的。

**热平衡** 在这样一种状态下，粒子进入任何特定的速度、自旋等范围的速度，恰好与它们离开的速度相等。如果在足够长的时间内不受干扰，任何物理系统都会最终接近某种热平衡状态。

**阈值温度** 高于这一温度，黑体辐射就会大量产生特定类型的粒子。等于粒子的质量乘以光速的平方，再除以玻耳兹曼常数。

**氚** 不稳定的氢的重同位素  $H^3$ 。氚核由一个质子和两个中子组成。

**典型星系** 这里用来指没有异常速度，因而仅随着由宇宙膨胀所产生的一般性物质流动而运动的星系。典型粒子或典型观测者在这里也指的是这个意思。

**紫外辐射** 波长在 10 埃至 2,000 埃 ( $10^{-7}$  厘米到  $2 \times 10^{-5}$  厘米) 的电磁波, 介于可见光与 X 光之间。

**室女星系团** 室女座中超过 1,000 个星系的巨大星系团。这一星系团正以大约 1,000 公里/秒的速度远离我们, 据认为, 它与我们的距离为 6,000 万光年。

**波长** 指在任何类型的波中, 波峰之间的距离。对电磁波来说, 波长可以定义为电场或磁场矢量的任何分量达到了其最高值的点之间的距离。

**弱相互作用** 基本粒子相互作用的四个基本类型之一。在寻常能量下, 弱相互作用比电磁或强相互作用弱得多, 尽管比引力又强得多。弱相互作用导致像中子和  $\mu$  介子的衰变速度相对较慢, 也导致了与中微子相关的所有反应。人们现在广泛认为, 弱、电磁或许还有强相互作用, 是简单的、基本的和统一的规范场理论的外在表现。

## 数学注释

这些注释面向的是那些想了解本书正文进行非数学阐释时所依据的一些数学材料的读者。阅读正文的讨论，不一定非要研究这些注释。

### 注释 1 多普勒效应

假设波峰按周期  $T$  的固定时间间隔离开光源。如果光源正以  $V$  的速度远离观测者，那么，在相连波峰之间的时间间隔里，光源就会运行  $VT$  的距离。这就使波峰从光源到达观测者所需的时间增加了  $VT/c$ ，这里， $c$  代表光速。这样，相连波峰到达观测者的时间间隔就是

$$T' = T + \frac{VT}{c}$$

光发射时的波长是

$$\lambda = cT$$

光达到时的波长是

$$\lambda' = cT'$$

因此，这些波长的比率是

$$\lambda'/\lambda = T'/T = 1 + \frac{V}{c}$$

如果光源正朝着观测者运动，这一推理也同样适用，只不过  $V$  被  $-V$  所取代。（它不仅适用于光波，还适用于任何类型的波信号。）

例如，室女座星系团的星系正以大约每秒 1,000 公里的速度远离我们的星系。光的速度是每秒 300,000 公里。因此，来自室女座星系团的任何光谱线的波长  $\lambda$  都比其正常值大如下比率

$$\lambda'/\lambda = 1 + \frac{1,000 \text{ 公里/秒}}{300,000 \text{ 公里/秒}} = 1.0033$$

## 注释 2 临界密度

以一个半径为  $R$  的星系球为例。(为便于本计算, 我们必须设  $R$  大于星系团之间的距离, 而小于具有整个宇宙之特点的任何距离。) 这个球的质量是它的体积乘以宇宙的质量密度  $\rho$ :

$$M = \frac{4\pi R^3}{3} \rho$$

牛顿的引力理论给出了任何典型星系在这个球的表面的势能

$$P.E. = \frac{mMG}{R} = -\frac{4\pi m R^2 \rho G}{3}$$

这里,  $m$  是星系的质量,  $G$  是牛顿的引力常数

$$G = 6.67 \times 10^{-8} \text{ 厘米}^3/\text{克 秒}^2$$

这一星系的速度是由哈勃定律给出的

$$V = HR$$

这里,  $H$  是哈勃常数。因此它们的动能是

$$K.E. = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} mH^2 R^2$$

星系总能量是动能和势能之和

$$E = P.E. + K.E. = mR^2 \left[ \frac{1}{2} H^2 - \frac{4}{3} \pi \rho G \right]$$

在宇宙膨胀的过程中, 这一数量肯定保持不变。

假设  $E$  是负数, 那星系永远也不能逃逸并进入无穷, 因为在极大的距离中, 势能会变得无足轻重, 在这种情况下, 总能量也仅仅是动能而已, 而动能总是正数。另一方面, 假设  $E$  是正数, 那星系就能用剩余的一些动能进入无穷。因此, 星系几乎刚好没有逃逸速度的条件是  $E$  消失, 从而得出

$$\frac{1}{2} H^2 = \frac{4}{3} \pi \rho G$$

换言之，密度必定为如下值

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

这就是临界密度。（尽管这一结果在这里是用牛顿物理原理推算出来的，但即使是在宇宙成分具有非常高的相对论性时，它实际上也是有效的，前提条件是将  $\rho$  解释成总能量密度除以  $c^2$ 。）

比如，假设  $H$  的当前普通值为 15 公里/秒/百万光年，那么，根据一光年有  $9.46 \times 10^{12}$  公里，我们得出

$$\begin{aligned} \rho_c &= \frac{3}{8\pi (6.67 \times 10^{-8} \text{厘米}^3/\text{克秒}^2)} \left( \frac{15 \text{公里/秒}/10^6 \text{光年}}{9.46 \times 10^{12} \text{公里/光年}} \right)^2 \\ &= 4.5 \times 10^{-30} \text{克/厘米}^3 \end{aligned}$$

每克有  $6.02 \times 10^{23}$  个核粒子，所以当前临界密度的这个值相当于大约每立方厘米  $2.7 \times 10^{-6}$  个核粒子，或每升 0.0027 个粒子。

### 注释 3 膨胀时间尺度

现在看看宇宙的指数是如何随着时间的变化而变化的。假设在  $t$  时间，一个质量为  $m$  的典型星系与一些任选的中央星系（比如我们所在的星系）的距离为  $R(t)$ 。我们在上一数学注释中看到，这个星系的总能量（动能加势能）为

$$E = mR^2(t) \left[ \frac{1}{2} H^2(t) - \frac{4}{3} \pi \rho(t) G \right]$$

这里， $H(t)$  和  $\rho(t)$  为  $t$  时间的哈勃“常数”和宇宙质量密度。这肯定是一个真正的常数。然而，我们将在下面看到，在  $R(t)$  变成 0 的过程中， $\rho(t)$  的增加速度至少达到了  $1/R^3(t)$ ，所以， $R(t)$  要变成零， $\rho(t) R^2(t)$  的增加速度应至少达到  $1/R(t)$ 。因此，为了使能量  $E$  保持不变，括号中的两个项就必须近乎约去，这样，为了使  $R(t)$  变为 0，我们得出

$$\frac{1}{2}H^2(t) \rightarrow \frac{4}{3}\pi\rho(t)G$$

特征膨胀时间恰好是哈勃常数的倒数，或

$$t_{\text{exp}}(t) \equiv \frac{1}{H(t)} = \sqrt{\frac{3}{8\pi\rho(t)G}}$$

比如，在第五章第一个画面所处的时间，质量密度为 38 亿克/立方厘米。因此，当时的膨胀时间为

$$t_{\text{exp}} = \sqrt{\frac{3}{8\pi(3.8 \times 10^9 \text{ 克/厘米}^3)(6.67 \times 10^{-8} \text{ 厘米}^3/\text{克 秒}^2)}} \\ = 0.022 \text{ 秒}$$

现在再看  $\rho(t)$  是如何因  $R(t)^3$  面异的？如果质量密度受核粒子质量的支配（以物质为主导的时代），那半径为  $R(t)$  的一个运动球体中的总质量就恰好与该球体内的核粒子数量成正比，因而肯定是不变的：

$$\frac{4\pi}{3}\rho(t)R(t)^3 = \text{常数}$$

因此， $\rho(t)$  与  $R(t)^3$  成反比

$$\rho(t) \propto 1/R(t)^3$$

（符号  $\propto$  的意思是“与……成正比”）另一方面，如果质量密度受相当于辐射能量的质量支配（以辐射为主导的时代），那  $\rho(t)$  就与温度的四次方成正比。但温度又像  $1/R(t)$  那样发生变化，所以  $\rho(t)$  与  $R(t)^4$  成反比。

$$\rho(t) \propto 1/R(t)^4$$

为了能同时研究以物质为主导的时代和以辐射为主导的时代，我们将以如下方式表述这方面的结果

$$\rho(t) \propto [1/R(t)]^n$$

这里

$$n = \begin{cases} 3 & \text{以物质为主导的时代} \\ 4 & \text{以辐射为主导的时代} \end{cases}$$

顺便指出，为了使  $R(t)$  变为 0， $\rho(t)$  的增加速度的确像保证的那样，至少达到了  $1/R(t)^3$ 。

哈勃常数与  $\sqrt{\rho}$  成正比，因此，

$$H(t) \propto [1/R(t)]^{n/2}$$

但典型星系的速度就是

$$V(t) = H(t)R(t) \propto [R(t)]^{1-n/2}$$

微分演算的一个基本结果是，只要速度与距离的某个次方成正比，从一个点到另一个点所需的时间就与距离与速度比率的变化成正比。更具体地讲，对与  $R^{1-n/2}$  成正比的  $V$  来说，这一关系为

$$t_1 - t_2 = \frac{2}{n} \left[ \frac{R(t_1)}{V(t_1)} - \frac{R(t_2)}{V(t_2)} \right]$$

或

$$t_1 - t_2 = \frac{2}{n} \left[ \frac{1}{H(t_1)} - \frac{1}{H(t_2)} \right]$$

我们可用  $\rho(t)$  来表述  $H(t)$ ，并得出

$$t_1 - t_2 = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{3}{8\pi G}} \left[ \frac{1}{\sqrt{\rho(t_1)}} - \frac{1}{\sqrt{\rho(t_2)}} \right]$$

因此，无论  $n$  的值是什么，实耗时间都与密度的反平方根的变化成正比。

比如，在电子和正电子湮灭后的整个以辐射为主导的时代，能量密度是由以下公式给出的

$$\rho = 1.22 \times 10^{-35} [T(^{\circ}\text{K})]^4 \text{ 克/厘米}^3$$

(参见第 144 页的数学注释 6。) 此外，这里的  $n=4$ 。因此，宇宙从 1 亿度冷却到 1,000 万度所需的时间为

$$t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{8\pi (6.67 \times 10^{-8} \text{厘米}^3/\text{克 秒})}} \times \left[ \frac{1}{\sqrt{1.22 \times 10^{-35} \times 10^{28} \text{克/厘米}^3}} - \frac{1}{\sqrt{1.22 \times 10^{-35} \times 10^{32} \text{克/厘米}^3}} \right]$$

$$= 1.90 \times 10^6 \text{ 秒} = 0.06 \text{ 年}$$

我们还可以更简洁的方式表达我们的基本结果，我们可以说，密度从比  $\rho$  大得多的某个值降到  $\rho$  值所需的时间为

$$t = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{3}{8\pi G\rho}} = \begin{cases} 1/2 t_{\text{exp}} \text{ 以辐射为主导} \\ 2/3 t_{\text{exp}} \text{ 以物质为主导} \end{cases}$$

(如果  $\rho(t_2) \gg \rho(t_1)$ ，那我们就可忽略我们公式中关于  $t_1 - t_2$  的第二个项。) 例如，在  $3,000^\circ\text{K}$  的时候，光子和中微子的质量密度为

$$\rho = 1.22 \times 10^{-35} \times [3,000]^4 \text{ 克/厘米}^3 = 9.9 \times 10^{-22} \text{ 克/厘米}^3$$

这比  $10^8^\circ\text{K}$  (或  $10^7^\circ\text{K}$ , 或  $10^8^\circ\text{K}$ ) 时的密度小得多，宇宙从早期非常高的温度降低到  $3,000^\circ\text{K}$  所需的时间可简单地以如下方式进行计算 (设  $n=4$ )

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{8\pi (6.67 \times 10^{-8} \text{ 厘米}^3/\text{克 秒}^2) (9.9 \times 10^{-22} \text{ 克/厘米}^3)}} \\ = 2.1 \times 10^{13} \text{ 秒} = 680,000 \text{ 年}$$

我们业已说明，宇宙密度从早期非常高的值下降到  $\rho$  值所需的时间与  $1/\sqrt{\rho}$  成正比，而  $\rho$  与  $1/R^4$  成正比。因此时间与  $R^{n/2}$  成正比，换言之，

$$R \propto t^{2/n} = \begin{cases} t^{1/2} \text{ 以辐射为主导的时代} \\ t^{2/3} \text{ 以物质为主导的时代} \end{cases}$$

在动能和势能降低到它们开始与它们的总和——总能量——相似之前，这一直有效。

正如第二章所指出的那样，在起点后的任何时间  $t$  都在  $ct$  的距离上有一个视界，在这个视界之外，任何信息都还不能到达我们。我们现在得知，随着  $t \rightarrow 0$ ， $R(t)$  消失的速度低于离视界的距离，所以在足够早的时候，任何特定“典型”粒子都处于视界之外。

#### 注释 4 黑体辐射

普朗克分布给出了黑体辐射在从  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  的狭窄波长范围内，每单位体积的能量  $du$  为

$$du = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} d\lambda / [e^{(\frac{hc}{kT\lambda})} - 1]$$

这里， $T$  为温度； $k$  为玻耳兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-16}$  尔格/ $^{\circ}\text{K}$ )； $c$  为光速 (299,729 公里/秒)； $e$  为数值常数 2.178……； $h$  为普朗克常数 ( $6.625 \times 10^{-27}$  尔格·秒)，它起初是由普朗克作为这一公式中的一个部分而引进的。

对于长波来说，普朗克分布中的分母可通过以下公式来估计：

$$e^{(\frac{hc}{kT\lambda})} - 1 \approx \left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)$$

因此，在这一波长区域，普朗克分布给出

$$du = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} d\lambda$$

这就是雷利-琼斯公式。如果这个公式限制在任意小的波长上，那在  $\lambda \rightarrow 0$  的情况下， $du/d\lambda$  就会变得无穷，黑体辐射中的总能量密度也会无穷。

幸运的是，关于  $du$  的普朗克公式在一个波长上达到了最高值

$$\lambda = .2014052hc/kT$$

后，便随着波长的缩短而陡降。黑体辐射中的总能量密度为如下积分

$$u = \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc}{\lambda^5} d\lambda / (e^{(\frac{hc}{kT\lambda})} - 1)$$

此类积分可在标准定积分表中查到；结果为

$$u = \frac{8\pi^5(kT)^4}{15(hc)^3} = 7.56464 \times 10^{-15} [T(^{\circ}\text{K})]^4 \text{ 尔格/厘米}^3$$

这就是斯蒂芬-玻耳兹曼定律。

我们可根据光的量子，或者说根据光子，很容易地解释普朗克分布。每个光子都有一个由以下公式给出的能量

$$E = hc/\lambda$$

因此，在从  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  的狭窄波长范围内，黑体辐射中每单位体积的光子数量  $dN$  为

$$dN = \frac{du}{hc/\lambda} = \frac{8\pi}{\lambda^4} d\lambda / [e(\frac{hc}{kT\lambda}) - 1]$$

那么，每单位体积的光子总数为

$$N = \int_0^{\infty} dN = 60.42198 \left(\frac{kT}{hc}\right)^3 = 20.28 [T(^{\circ}\text{K})]^3 \text{ 光子/厘米}^3$$

平均光子能量为

$$E_{\text{平均}} = u/N = 3.73 \times 10^{-16} [T(^{\circ}\text{K})] \text{ 尔格}$$

现在，我们讨论在不断膨胀的宇宙中，黑体辐射发生了什么事情。假设宇宙尺度以系数  $f$  发生变化；比如，如果宇宙尺度增大了一倍，那么  $f=2$ 。我们在第二章看到，波长的变化与宇宙尺度成比例，它变化后的新值为

$$\lambda' = f\lambda$$

膨胀发生后，从  $\lambda'$  到  $\lambda' + d\lambda'$  的新波长范围内的能量密度  $du'$ ，比从  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  的旧波长范围内的原有能量密度  $du$  小，原因有二：

1. 由于宇宙体积以  $f^3$  的系数增大，只要没有光子被创造或催毁，那每单位体积的光子数量就以  $1/f^3$  的系数减少。

2. 每个光子的能量与其波长成反比，因此它以  $1/f$  的系数减少。所以，能量密度以  $1/f^3$  乘以  $1/f$  的总系数或以  $1/f^4$  的系数降低：

$$du' = \frac{1}{f^4} du = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 f^4} d\lambda / [e(\frac{hc}{kT\lambda}) - 1]$$

如果我们用新波长  $\lambda'$  重新表示这个公式，那就是

$$du' = \frac{8\pi hc}{\lambda'^5} d\lambda' / [e(\frac{hcf}{kT\lambda'}) - 1]$$

但它与关于从  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  的  $du$  的旧公式完全相同，只是  $T$  被如下新温度所取代：

$$T' = T/f$$

因此我们推断，自由膨胀的黑体辐射仍用普朗克公式来描述，但温度的降低却与膨胀的规模成反比。

### 注释 5 琼斯质量

物质块若要形成一个引力束缚体系，其引力势能就必须超过其内部热能。半径为  $r$ 、质量为  $M$  的块的引力势能为如下数量级：

$$P.E. \approx - \frac{GM^2}{r}$$

每单位体积的内部能量与压力  $p$  成正比，所以内部总能量为如下数量级：

$$I.E. \approx pr^3$$

因此，如果

$$\frac{GM^2}{r} \gg pr^3$$

的话，块就可通过引力而凝聚在一起。

但对于特定密度  $\rho$ ，我们可通过以下关系，用  $M$  表达  $r$ ：

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$$

因此，通过引力形成凝聚的条件可表达为

$$GM^2 \gg p (M/\rho)^{4/3}$$

或者

$$M \gg M_j$$

这里的  $M_J$  为（在无关紧要的数值系数内）被称为琼斯质量的数  
量：

$$M_J = \frac{P^{3/2}}{G^{3/2} \rho^2}$$

例如，在氢刚要重新结合前，质量密度为  $9.9 \times 10^{-22}$  克/厘米<sup>3</sup>（参见前面的数学注释 3），压力为

$$p \approx \frac{1}{3} c^2 \rho = 0.3 \text{ 克/厘米 秒}^2$$

那么，琼斯质量就是

$$M_J = \left( \frac{0.3 \text{ 克/厘米 秒}^2}{6.67 \times 10^{-8} \text{ 厘米}^3/\text{克 秒}^2} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{9.9 \times 10^{-22} \text{ 克/厘米}^3} \right)^2$$

$$= 9.7 \times 10^{51} \text{ 克} \approx 5 \times 10^{18} M_\odot$$

这里， $M_\odot$  为一个太阳质量。（我们星系的质量大约为  $10^{11} M_\odot$ 。）重新结合后，压力以  $10^9$  的系数降低，所以琼斯质量降低为

$$M_J = (10^{-9})^{3/2} \times 5 \times 10^{18} M_\odot = 1.6 \times 10^5 M_\odot$$

有趣的是，这大致是我们星系中的大球状星团的质量。

#### 注释 6 中微子的温度与密度

只要热平衡保持不变，被称为“熵”的量的总值就是固定的。对我们所讨论的问题而言，以下给出了在  $T$  的温度上，每单位体积的熵  $S$  的充分近似值：

$$S \propto N_T T^3$$

这里， $N_T$  是热平衡中其阈值温度低于  $T$  的粒子种类的有效数量。要使熵的总量保持不变， $S$  就必须与宇宙规模的反立方成正比。也就是说，如果  $R$  是任何一对典型粒子间的间距的话，那么

$$SR^3 \propto N_T T^3 R^3 = \text{常数}$$

在电子和正电子刚要湮灭前（在大约  $5 \times 10^9$  K 的温度上），中微子和反中微子已与宇宙的其他部分失去了热平衡，所以处于

热平衡的唯一丰富的粒子是电子、正电子和光子。从前面的表 1 中可以看出，在湮灭前，粒子种类的有效总数为

$$N_{\text{前}} = \frac{7}{2} + 2 = \frac{11}{2}$$

另一方面，电子和正电子在第四画面湮灭后，剩下的处于平衡状态的唯一丰富的粒子是光子。那么，粒子种类的有效数量仅为

$$N_{\text{后}} = 2$$

因此，从熵的守恒中可得出

$$\frac{11}{2} (\text{TR})_{\text{前}}^3 = 2 (\text{TR})_{\text{后}}^3$$

也就是说，电子和正电子的湮灭所产生的热使量 TR 有了增加，增加系数为

$$\frac{(\text{TR})_{\text{前}}}{(\text{TR})_{\text{后}}} = \left(\frac{11}{4}\right)^{1/3} \approx 1.401$$

在电子和正电子湮灭前，中微子的温度  $T_v$  和光子的温度  $T$  相同。但自那时起， $T_v$  降低了大约  $1/R$ ，所以在以后的所有时间里， $T_v R$  与湮灭前的 TR 的值相同：

$$(T_v R)_{\text{后}} = (T_v R)_{\text{前}} = (\text{TR})_{\text{前}}$$

我们因此而推断，在湮灭过程结束后，光子的温度高于中微子的温度，系数为

$$(T/T_v)_{\text{后}} = \frac{(\text{TR})_{\text{前}}}{(\text{TR})_{\text{后}}} = \left(\frac{11}{4}\right)^{1/3} = 1.401$$

尽管失去了热平衡，中微子和反微子仍为宇宙的能量密度提供了重要增量。中微子和反微子种类的有效数量为  $7/2$ ，或为光子种类有效数量的  $7/4$ 。（光子有两种自旋状态。）另一方面，中微子温度的四次方以  $(4/11)^{4/3}$  的系数小于光子温度的四次方。因此，中微子和反微子的能量密度与光子能量密度的比率是

$$\frac{u_\nu}{u_\gamma} = \frac{7}{4} \left( \frac{4}{11} \right)^{4/3} = 0.4542$$

斯蒂芬-玻耳兹曼定律（参见第三章）告诉我们，在  $T$  的光子温度上，光子的能量密度为

$$U_\gamma = 7.5641 \times 10^{-15} \text{ 尔格/厘米}^3 \times [T(^{\circ}\text{K})]^4$$

因此，电子-正电子湮灭后的总能量密度为

$$u = u_\nu + u_\gamma = 1.4542u_\gamma = 1.100 \times 10^{-14} \text{ 尔格/厘米}^3 \times [T(^{\circ}\text{K})]^4$$

我们可通过除以光速的平方，将它转化成等效质量密度，得出

$$\rho = u/c^2 = 1.22 \times 10^{-35} \text{ 尔格/厘米}^3 \times [T(^{\circ}\text{K})]^4$$

## 后记：1977 年后的宇宙学

在《最初三分钟》首次出版后的 16 年中，宇宙又膨胀了亿分之十三。也可能只膨胀了亿分之六点五。这两个数字之间的差额反映了我们对宇宙膨胀的速度仍没有把握。正如第二章所讨论的那样，这一速度是用宇宙学的重要数值指数之一——哈勃常数来表示的，而哈勃常数是通过观测遥远星系在距离越来越大时增速的速度来测量的。随着时间的推移，天文学家称他们对哈勃常数的测量越来越准确，但遗憾的是，他们的测量结果仍不一致，不一致的地方比他们所称的不确定要大。一组测量得出的值是，距离的增加约为 80 公里/秒/百万秒差距，而另一组测量得出的却是大约 40 公里/秒/百万秒差距。在宇宙膨胀速度上，我们面对的是系数为 2 的不确定性。

问题不是出在确定遥远星系的速度上——通过测量遥远星系的光谱线向光谱的红端的偏移，可以相对容易地做到这一点。而是一直出在测量星系的距离上。过去，测量星系距离的方法，是观测据认为有着同样内在光度的某类物体——如一特定类别的星系中最明亮的恒星或球状星团，或某类超新星——并运用它们的观测视光度来进行距离推断。它们的光越暗，说明距离越远。近年来，这些方法越来越多地被研究整个星系的特性的方法所补充，即将特定星系的内在光度与其内部观测特性，如该星系内恒星和气体云的速度，联系起来。超新星的视大小也被用来推断它们所发生于其中的星系的距离。尽管如此，获得的哈勃常数的结果仍相互不一致。人们曾希望这一传统问题能通过大型卫星运载仪器——哈勃太空望远镜的观测得到解决。遗憾的是，尽管通过这个望远镜获得了许多有价值的东西，但它闻名遐迩的据动过大和镜面变形问题，妨碍了对星系距离的最终测量。

尽管存在着这些困难，关于我们宇宙的标准“大爆炸”理论，还是在不断地得到认可。举个例子说，现已有更多的证据来支持宇宙学原理，支持这一在第二章所讨论的作为标准宇宙学理论之基础的重要假设。根据这一假设，平均来讲，在足够大的距离内，宇宙中的物质分布是均匀的（即均匀的和各向同性的）。曾有一段时间，在星系分布中发现的“巨大”不均匀现象——巨大墙壁，巨大空洞，巨大吸引物，等等——似乎越来越多。但现在看来，平均来讲，在足够大的距离内，在相当于相对速度约为每秒 40,000 公里的距离内，宇宙中的星系分布确实是均匀的。（对 80 公里/秒/百万秒差距的哈勃常数来说，这个距离为 500 百万秒差距，或大约 15 亿光年。）高能 X 宇宙射线来自比 500 百万秒差距还大的距离，它的强度在所有方向上似乎都是一样的，这一事实又为宇宙学原理提供了进一步的证据。

但对“大爆炸”宇宙学的最有力的支持，来自对 1965 年所发现的宇宙微波辐射背景的测量。近来，这些测量又得到了巨大完善。正如在第三章所讨论的那样，如果这个宇宙微波背景的确是早期宇宙残留下来的辐射，那其强度对辐射波长的相依性就应符合一个著名的分布定律——正如图 7 所显示的那样，这一定律支配着不透明的（“黑”）加热体所发射的各种波长的辐射的强度。自 1965 年以来，不时有报告说，发现了背离图 7 所显示的严格的黑体分布定律的情况，但没有人知道这些异常情况确实是宇宙学上的，还是仅仅是来自地球大气的辐射的效应。后来，到 1989 年 11 月 18 日，“宇宙背景探测器（COBE）”卫星由德耳塔火箭发射到大气上空的轨道。（在第三章中，我报告说，在 1977 年《最初三分钟》刚刚付印的时候，我收到了《“宇宙背景探测器（COBE）”卫星简讯》第一期，它宣布了有关该卫星的计划。该项目历时 20 多年，但等这么长时间是值得的。）在卫星入轨后的最初八分钟的时间里，卫星上的一个微波辐射仪测量到，不同波

长的宇宙微波背景的背景强度，适合黑体分布的程度好于千分之一，其温度为 $2.735^{\circ}\text{K}$ （即绝对零以上 $2.735^{\circ}\text{C}$ ）。过去20多年中不时报告的稍微背离黑体分布的情况，显然是不存在的。理论与试验如此相一致，我们可以有把握地说，这一辐射的确是从“大爆炸”后大约100万年的某个时间里残留下来的，当时，宇宙正首次变得越来越易于为辐射所穿透。

“宇宙背景探测器”上的微波辐射仪使用液态氦来标定它对辐射温度的测量，就像最初发现微波背景时使用的是“冷负载”一样（参见第七章）。然而，“宇宙背景探测器”上的液态氦挥发得很快，所以，通过“宇宙背景探测器”进一步增加我们对微波背景温度的了解是不可能的。但测量来自天空各个方向的辐射温度的差却不需要液态氦，液态氦挥发完后，“宇宙背景探测器”上的测量活动将继续进行。

实际上，对微波辐射温度随着方向的变化情况的测量，比对温度本身的测量引起的兴奋还大。1960年代在地面上进行的早期测量，显示了几乎是完全一致的辐射温度——说明这种辐射来自整个宇宙而非地球或我们的星系。后来，伯克利的一个小组在1977年用一架U2飞机发现了一种轻微的各向异性，如果我们的太阳系正以相对于辐射背景每秒几百公里的速度运动的话，那各向异性就应是这种情况——也就是说，我们所运动的方向的温度稍高，我们所来的方向的温度稍低。但没有人能找到为辐射本身所固有的任何各向异性。

随着时间的推移，这开始令人感到不安。毕竟，宇宙不是一种完全平衡的流体，而是充满了块状的星系和星系团。这些通过引力凝聚在一起的结构肯定是在引力的作用下，从宇宙首次变得可穿透时所存在的不够紧密的结构的基础上发展而来的，这些新生星系和星系团肯定会造成微波背景的某些波动。

最后，1992年4月，参与“宇宙背景探测器”项目的科学

家们宣布，他们发现微波辐射背景存在着轻微的不均匀。在从  $7^\circ$  到  $180^\circ$  的所有的角尺度上，天空中各点间辐射温度变化的平均差异约为一开氏度的百万分之 30，后来的气球运载仪器所作的测量也证实了这一结果。微波背景的这些波动，据认为是由于受宇宙刚刚开始变得可为辐射所穿透时——宇宙膨胀开始后的大约 100 万年——所存在的物质块的引力的影响而产生的。（但有些理论家认为，辐射温度的差异可能是由更早的时候产生的引力波所造成的，至少部分地是这样。）但有可能引起振动的块不是新生星系或星系团——它们太大了。要观测星系和星系团的创始，就应测量微波背景在远小于  $7^\circ$  的角尺度上随着角度的变化。目前，这种测量正在通过气球携带的微波天线或坐落在南极的微波天线井然有序地进行，那里海拔高，空气干燥，是进行地面观测的近乎理想的环境。

遗憾的是，星系形成理论仍无进展。这不足为怪，因为我们仍不知道星系是由什么组成的。如果星系的质量大多包含在发光的恒星中，那它就应大多包含在星系极明亮的中心区，在这一中心区之外的恒星所感受到的引力就会以离星系中心的距离的反平方而减弱，如同沿轨道运行的行星所感受到的太阳的引力那样。在这种情况下，在星系中心周围轨道中的恒星和气体的速度，就会以离中心的距离的反平方而减弱，就像我们的太阳系中的行星的速度那样。但对旋涡星系的观测结果显示，这些速度在非常大的距离之外，仍大体保持不变，说明星系的质量不是集中在作为光源的中心，而是大部分以“暗物质”的形式包含在巨大的晕中。

为便利起见，可以将宇宙中各种形式的物质的数量表示成刚刚不足以最终阻止并扭转宇宙膨胀的“临界质量”（对 80 公里/秒/百万秒差距的哈勃常数来说，约为  $10^{-29}$  克/立方厘米；参见注释 2）的分数。旋涡星系的旋转说明，星系中拥有 3% 以上到

10%的临界质量，而根据对大型星系团中的星系的运动的观测，得出了一个质量与光度比，如果这一比率在所有星系中具有典型性的话，那它就说明与星系相关的物质提供约为10%到30%的临界质量。近来通过红外辐射天文卫星对星系运动所作的一项调查显示，总质量密度比临界值大大约40%。

“暗物质”不仅不是由普通的发光恒星组成的；还有证据表明，它甚至不以组成普通原子的原子粒子——质子、中子和电子——的形式存在。我们在第五章看到，在“大爆炸”后最初几分钟内产生轻元素的核反应，是受这些原子粒子的数量与当时存在的光子（光的粒子）的数量的比率影响的。如果原子粒子与光子的比率相对较高，那将氢转化成氦的核反应就会一直进行下去，直到基本结束为止，从而使以结合不太紧密的轻元素的形式残留下来的物质（如氘或锂）的数量减少。据认为，这些轻元素不是在恒星中产生的，因此通过对其当前丰度的测量，我们可得知原子粒子与光子在最初几分钟的比率。但这一比率自那时起并未发生明显的变化，所以我们可对其当前值作出某种推断，从而（因为我们知道宇宙微波辐射背景中每立方厘米的光子数）也对原子粒子的当前丰度作出某种推断。随着有关氦和氘的丰度的早期数据被有关锂同位素  $\text{Li}^7$  的丰度的重要信息所补充，这种方法在1980年代有了更深刻的意义。因而，我们能够有某些把握地说，对80公里/秒/百万秒差距的哈勃常数来说，普通物质提供了2.3%到4%的临界质量，对40公里/秒/百万秒差距的哈勃常数来说，则提供了9%到16%的临界质量。

顺便说一句，早期宇宙中所产生的轻元素的数量还取决于中微子类别的数量：中微子的类别越多，膨胀的速度就越快，因而，将被转化成氦的原始氢的数量也就越大。粒子物理学家在1970年代就已作出了存在着三种类型的中微子的猜测，这个猜测在有关“大爆炸”核合成的成功计算中得到了应用，并在某种

程度上得到了证实。随后，日内瓦欧洲原子核研究组织的实验室就  $Z^0$  粒子的衰变所作的实验最终显示：确实只存在着三种类型的中微子。

对轻元素丰度的这些计算和测量具有重要意义，它超出了确定宇宙质量密度问题的范围。利用单一的自由参数，即原子粒子与光子的比率似乎合理的选取，不仅能解释普通氢和氦 ( $H^1$  和  $H^4$ ) 的当前观测丰度，还能解释同位素  $H^2$  (氘)、 $H^3$  和  $Li^7$  的当前观测丰度，这一点确实令人激动。这不仅是现代宇宙学理论取得的最重要的定量的成就，还是最强有力的证据，说明我们对宇宙最初几分钟的历史确实是有所认识的。

长期以来，人们一直希望能用基本原理来计算宇宙中原子粒子数与光子数的比率。在很早、很早的时候，宇宙炽热无比，每类粒子都很丰富，而且据认为其数量与其反粒子的数量相同。如果自然法则在物质和反物质间完全对称，或者，如果重子数和轻子数这些量完全守恒（参见第四章），那粒子数和反粒子数就会仍然相等，这与观测结果相矛盾，而且，几乎所有的质子、中子和电子以及反质子、反中子和反电子，都已湮灭，除了光子和中微子外，几乎一无所剩。但 1964 年关于基本粒子衰变的实验显示，自然法则在物质和反物质间并不是完全对称的。此外，关于基本粒子相互作用的现代理论提出了各种机制，这些机制能打破重子和轻子数的严格守恒。因此，早期宇宙中粒子和反粒子碰撞有可能使剩下的物质多于反物质，由于没有反物质来湮灭它，物质会生存至今。（我们掌握的情况不足以排除这一可能性，即生存下来的是反物质而非物质，但如果是这样的话，反地球上的反物理学家就会自然而然地将它称为物质而非反物质了。）由于违反物质和反物质间对称的情况很少，也由于重子和轻子数几乎守恒，所以，残留下来的原子粒子数和光子数的比率也会很小，这与当今宇宙中的这一比率大约为 10 亿至 100 亿分之一的观测结

果相一致。

遗憾的是，这一比率到底是多少，计算起来并不那么容易。当1970年代末人们首次积极地研究这些想法时，他们一般都假设违反重子和轻子守恒的情况发生在很早的时候，即宇宙的温度大约为 $10^{22}$ （1000万亿亿）开氏度的时候。近期的研究结果表明，弱相互作用和电磁相互作用理论中提出的微妙效应，有可能在后来当宇宙冷却到只有 $10^{16}$ （10亿亿）开氏度时造成物质多于反物质。在我们能够填补当前在弱相互作用和电磁相互作用认识方面的空白之前，得出具体结论的可能性不大。我们希望能通过新的加速器，如正在得克萨斯州建设的超导超级对撞机（SSC）或为欧洲原子核研究组织筹建的强子大对撞机（LHC），获得这方面的信息。

许多天文学家和物理学家几十年来一直怀疑，宇宙的质量密度是否恰好就处在临界值上。争论实质上是美学意义上的。随着宇宙的膨胀，其质量密度与临界值的比率会随着时间变化；在任何情况下，它开始时都接近100%，如果起初小于100%，则会减少，如果起初大于100%，则会增加。但现在，自“大爆炸”以来，几十亿年过去了，测量出的质量密度仍处于临界值的10的系数内。这只有在如下情况下才是可能的，即宇宙形成时（如最初几秒）的质量密度非常接近临界值。让人难以理解的是，为什么质量密度的值是这样，除非它一直恰好处在临界值上。

弄清宇宙是否有着临界质量密度的一个办法是测量宇宙膨胀降低的速度。原则上讲，我们可以采用同测量哈勃常数时一样的方法，即观测遥远星系的速度是如何随着距离而增加的（参见图5）。这里的问题同半个多世纪前一样：测量宇宙膨胀减速的办法只能是研究遥远星系，而这些星系的距离远到自我们所看到的光发射以来，宇宙膨胀的速度已降低了许多。但由于我们所看到的这些遥远星系是很久以前的星系，所以它们的固有光度可能与我

们通过研究临近星系所推断出的光度相差很大。因此，我们不能用其视光度来推断其距离。然而，星系的实际尺寸的变化可能小于它们的光度的变化，所以通过观测视大小来测量距离比观测视光度更可靠。1992年的一项此类调查显示，宇宙膨胀的减慢速度接近宇宙在拥有临界值的情况下可能表现出来的速度。

如果宇宙的质量的确处在临界值上，那它就不可能表现为普通物质而又不打破最初几分钟内轻元素数量的计算结果和这些元素当前丰度的观测结果之间的统一。实际上，无论宇宙的质量是否处在临界值上，它都可能大于“大爆炸”核合成的计算结果所允许的普通物质的最高值。因此，宇宙的质量是由什么组成的？在1970和1980年代，人们广泛推测，失踪的质量可能存在于非常轻但并非完全没有质量的中微子中。正如第四章所讨论的那样，中微子在今天差不多同光子一样丰富，很容易就能计算出，如果中微子的质量大约为20个电子伏（即一个电子的质量的大约4,000万分之一），那它们就可提供整个临界质量。但近来对核 $\beta$ 衰变进行的实验显示，中微子的质量即使不是零，也非常小。

失踪的质量还有可能存在于比这些假设拥有20个电子伏的中微子重得多但也少得多的粒子中。在温度非常高的早期，任何类型的粒子以及它们的反粒子，无论多重，都很丰富。随着宇宙的膨胀和冷却，最重的粒子和反粒子都被湮灭，直到最后变得非常稀少，再也找不到对方来湮灭了。如果稳定的话，剩余的未湮灭的粒子和反粒子在今天应仍然存在。得知任何类型的粒子的质量及其与反粒子的湮灭速度后，我们就可计算出这些粒子和反粒子在今天还存在着多少，以及它们对当前的宇宙质量有多大贡献。近年来，粒子物理学家对此类型的各种重粒子进行了推测。当前，他们认为最大的可能性是，失踪的质量是由某些稳定的叫做光微子粒子组成的，这些粒子的质量为10到10,000个光子的质量，湮灭速度缓慢，这是被称为超级对称的基本粒子的假设对

称所需要具备的前提。现在有人正在进行寻找这些粒子的实验，方法是用敏感的感应器寻找它们与原子的碰撞所产生的效应。这些奇异的重粒子如果存在的话，也许能用能量足够强大的新型加速器（如超导超级对撞机或大型强子对撞机）制造出来。如果能用超导超级对撞机或大型强子对撞机找到这些粒子，那将给宇宙学和基本粒子物理学带来一场革命。

我应该提一下另一种流行的叫做轴子的失踪质量的候选体，这是1977年为解决粒子物理学的一些问题而提出的假设。这些粒子是“大爆炸”后残留下来的，数量大大超过光子或中微子，如果它们的质量大约为十万分之一电子伏的话，那它们就能提供临界质量密度。实验人员目前正计划寻找这种粒子，但迄今为止，还没有实验证据说明它们的确存在。

但失踪质量还可能有另一个去处，它涉及到空虚空间的一个特性。任何类型的场量子理论都认为，真空从电磁场和其他场的连续量子波动中接受到大量能量。根据广义相对论，这种真空能量能产生一个引力场，该引力场相当于在整个空虚空间中分布不均匀的质量密度所产生的引力场。我们无法对这种真空的质量密度进行实际计算，因为我们的计算结果显示，能量的最大部分来自规模非常小的波动，在这些距离标度上，我们当前的引力理论是不可靠的。如果我们随意地只考虑规模非常大、使我们能依赖已知理论的波动，那我们得出的真空质量密度就会大于宇宙膨胀观测结果所允许的最大值（它大致是临界值的两到三倍）。这个密度就会大出大约120个数量级的系数：相当于1亿的15次方。如果我们认真地对待这一计算结果，那它无疑是科学史上理论与实验间最引人注目的数量上的不一致！

量子波动所产生的真空质量密度的作用方式，同1917年爱因斯坦在他的场方程式中引进的宇宙学常数项（在第二章讨论）的作用方式一样。爱因斯坦当时想建立一个稳固态宇宙模型，后

来，由于发现宇宙是不断膨胀的，而该项仍是一种逻辑上的可能性，所以他又逐渐为引进宇宙学常数而感到后悔。事实上，宇宙学常数是能够加入引力场方程式而又不违反爱因斯坦就所有坐标系的等效提出的基本假设的唯一一个项（在宇宙学距离上变得无足轻重的那些项除外）。说宇宙学常数是多余的还不够；我们在过去半个世纪中的场量子理论经验说明，场方程式中不为某种基本原理所禁止的任何项都有可能存在。

真空质量密度问题和是否将宇宙学常数纳入场方程式的问题，可互为答案。也就是说，场方程式中可能有一个宇宙学常数，它的值恰好约去量子波动所产生的真空质量密度效应。但为了避免与天文观测结果发生冲突，这种相约必须精确到小数点后至少 120 位。宇宙学常数究竟为何需要如此精确呢？

理论物理学家已研究这个问题几十年，但一直没有多大进展。有些自然常数是根据基本原理，参考其他常数确定的。里德伯常数就是一例，它给出了各种状态的氢原子的能量，可根据电子的质量和电荷及普朗克量子力学常数计算出来。但没有人知道用以确定宇宙学常数的任何原理。在 1983 和 1984 年，人们认为通过量子宇宙学有可能解决宇宙学常数和真空质量密度问题，并为此而激动不已。计算结果显示，宇宙或许不是处于一个有着明确的值的状态，因为无论什么样的自然常数，都不是根据基本原理来确定的，如（或许是）宇宙学常数。相反，似乎应用量子力学波函数来描述宇宙，这种波函数中含有许多项，每个项在这些常数上都有着若干不同的值。人类（或其他任何人）一开始进行测量，便发现自然常数有着明确的值，但到底是怎样的值，却无法预测，只能预测其概率。早期的计算结果显示，这些概率在宇宙学常数上达到了一个峰值，这个峰值在宇宙变得足够大和足够冷时恰好约去了真空能量密度。但这一结论受到了质疑，在我们将量子力学应用于整个宇宙获得更好的认识之前，这个

问题或许不会得到解决。

这件事给我们留下了一个有益的教训。即使常数（如宇宙学常数）的概率分布没有任何峰值，那提出假设，认为存在着某种概率分布，它决定着我們找到这些常数的具体值的可能性，也是不无道理的。无论分布的形式如何，聪慧的观测者可能发现的这些常数的值的范围是有限的，因为使生命和智能得以诞生和进化的值的范围是有限的。这一思想——认为自然常数必须具有使生命和智能得以存在的值——被称为人类原理。尽管这个原理没有被科学家广为接受，但量子宇宙学提供了一个环境，使它变得司空见惯。如果宇宙经过了几个阶段，或宇宙中包含着遥远区域，那里的自然“常数”具有不同的值，那从人类角度进行推理也是合情合理的。

从人类角度提出的这些论据适用的不是真空质量密度本身或宇宙学常数本身，而仅仅是净真空质量密度，它包括宇宙学常数的等效增量。宇宙引力场的来源，就是净真空质量密度（同任何普通物质一起）。具体地讲，如果净宇宙质量密度比当前的临界质量密度大得多且是负数，那宇宙的膨胀和收缩周期就会非常短，就不会有时间形成恒星，更不用说生命和智能了。如果净真空质量密度比当前的临界质量密度大得多且是正数，那宇宙的膨胀就会永远继续下去。然而，早期宇宙中形成的任何物质块，都会被远程排斥力击碎，没有星系或恒星，生命就无处产生。因此，人类原理可解释为什么净真空质量密度不比当前的临界密度大多少。

这种推理方式真正令人感兴趣的地方是，如果人类原理有效的话，那它就不会要求净真空质量密度消失甚至是比当前的临界密度小。我们从遥远类星体的红移上得知，当宇宙比当前的规模小六倍时，引力块就已开始形成。当时，普通物质的密度是当前密度的  $6^3$  或 216 倍；因此，净真空质量密度不会对引力凝结的

形成产生影响，除非它比当前宇宙中普通物质的密度大至少 100 倍。较小的净真空质量密度可能在后来对星系的形成产生过影响，但比当前普通物质的密度大大约 10 到 20 倍的净真空质量密度会给星系的形成留下充足的时间。因此，人类原理没有说明为什么真的净真空质量密度会比当前物质（包括星系和星系团中存在的任何暗物质）质量密度的大约 10 到 20 倍还小。有没有这种可能：80% 到 90% 的临界质量来自真空，而其余质量是由这种或那种普通物质（大多为暗物质）组成？

幸运的是，这个问题可通过天文观测来解决。普通物质的质量密度与量子真空波动和/或宇宙学常数所产生的质量密度有着重大区别：普通物质的密度一直在随着宇宙的膨胀而稳步变小，而真空质量密度一直保持恒定。这就是当我们向极遥远的地方观察时，我们所看到的东​​西有着巨大差别的原因，我们可用这些差别来区分临界密度是由普通物质组成的，还是由净真空质量密度造成的。

赞成真空质量密度较大的一个观点认为，这有助于解决哈勃常数的测量值与恒星年龄之间的潜在冲突问题。在临界密度是由普通物质组成的宇宙中，宇宙的年龄与哈勃常数成反比：哈勃常数为 80 公里/秒/百万秒差距，则宇宙年龄大约为 80 亿年，哈勃常数为 40 公里/秒/百万秒差距，则宇宙年龄为 160 亿年。但将球状星团中恒星的观测颜色和光度与计算机恒星演化计算结果进行比较后得出，这些恒星的年龄为 120 亿至 180 亿岁。此外，对各种放射性同位素丰度的研究显示，我们的星系至少有 100 亿岁。如果事实证实哈勃常数接近当前所言范围中的较高值，那将出现宇宙比其最古老的恒星还年轻的矛盾。但如果我们假设宇宙的质量密度大多产生于真空质量密度，那它过去的密度就会较低。因此而得出的结果是，宇宙的膨胀会较慢，对任何特定的哈勃常数来说，宇宙的年龄都会更大——大得足以消除与古老恒星

年龄的冲突。

真空质量密度大还会影响对处于各种红移或视光度的星系的计算；影响对起着引力透镜作用的星系（其引力场将更遥远物体的光聚集在同一条视线上的星系）的计算；影响星系的视规模随着红移而发生的变化。迄今为止，各种证据似乎表明真空对宇宙质量密度的增量作用不是很大，但现在作出定论还为时过早。如果净真空质量密度被证实的确大大小于当前的普通物质密度，那从人类角度对宇宙常数的值进行的解释就将是站不住脚的；从人类角度讲，没有理由说明为什么净真空质量密度应那么小。

在当前不断膨胀的宇宙中，无论净真空质量密度有多大，都有充分的理由认为过去曾有一个时期，净真空质量密度非常大。这是因为（正如第七章所讨论的那样）宇宙在膨胀和冷却过程中经过了一系列宇宙相变，就像温度降到  $0^{\circ}\text{C}$  以下时水会结冰一样。在这些相变中，遍布“空虚”空间的各种场的值突然发生了变化，真空的能量密度和等效质量密度也随之发生了变化。如果各种场没有立即达到它们的平衡值，那真空的能量密度就会过量，从而推动宇宙迅速发生膨胀。

1980年代初，有人指出，这种迅速膨胀将有助于解决长期未决的一些宇宙学问题，于是，理论学家对这些相变发生了浓厚的兴趣。首先，人们自1970年代晚期得知，早期相变会产生大量的孤立的磁极，这与当今宇宙中存在的这些“单极”数量的观测上限相矛盾。膨胀可“稀释”单极的数量，使之完全低于观测限度。更重要的是，膨胀宇宙学还解决了（至少是减少了）微波辐射背景的观测均匀性所带来的矛盾。我们所看到的来自天空中其相距距离超过大约2度的点的任何两束光线，都必定是从宇宙达到100万岁时相距很远的光源上发射过来的，这些光源的距离是如此之远，任何信号都没有时间以低于光速的速度从一个光源传播到另一个光源。但话又说回来，什么物理机制能使微波辐

射强度在所有方向上都产生近乎相同的观测强度呢？我们如何解释这一事实，即微波辐射温度在大于 7 度的角度上几乎是均匀的——其均匀程度是如此之大，以至于我们在“宇宙背景探测器”卫星的观测数据的帮助下，近来才发现了有背于均匀的情况？在膨胀宇宙学中，物理过程在早期膨胀时期有足够的时间使物质和能量的分布变得均匀，并使宇宙微波辐射背景产生高度的观测均匀性。

膨胀宇宙学现分为几个类型。有一个类型认为，膨胀不是相变延迟的结果，而是由于某个场中局部化的量子波动暂时促使一个小区域内的真空能量增高到正常值以上，随后这一小区域又膨胀为巨大规模而造成的。按照这种说法，我们的“宇宙”，我们从地球上能够看到的这个几十亿光年大的不断膨胀的星系云，仅仅是一个更大的宇宙中的小宇宙，这个更大的宇宙在不断地产生着新的小宇宙。

膨胀宇宙学提出了两个特征预测。一个是质量密度必定非常接近临界值。另一个是微波辐射背景中的不均匀性（在膨胀宇宙学中，这种不均匀性被解释为在膨胀的作用下扩大了量子波动）可能在大于 2 度的标度上有着独特的“平缓的”角分布。这两个预测都与实验结果相当一致。宇宙质量密度与临界值非常接近，让人觉得二者就是相等的，“宇宙背景探测器”卫星所研究的宇宙微波背景中的不均匀性也的确似乎遵循着平缓的分布定律。遗憾的是，这两个预测没有一个是膨胀宇宙学独自提出的；实际上，在膨胀宇宙学形成之前，它们就已提出了。现在还不清楚什么类型的天文观测将能够证实膨胀观点。观测宇宙学自 1977 年以来所取得的引人注目的进展，对巩固“大爆炸”标准宇宙学做出了重要贡献；但是让理论学家去思考的问题和天文学家能作的观测之间的差距一直存在。

基本粒子物理学近来的情况也大致相同。自 1977 年以来，

已进行了一系列出色的实验——最为引人注目的是 1983 至 1984 年发现了发射弱核力的 W 和 Z 粒子。结果，人们对电磁力以及弱和强核力标准模型的正确性已不再表示严重怀疑。特别是，“渐近自由”的强相互作用理论的不断成功，已使第七章所讨论的关于最高温度为两万亿开氏度 ( $10^{12}^{\circ}\text{K}$ ) 的推测失去了意义。在更高的温度上，核粒子会分解为它们的组成成分夸克，宇宙的物质也会表现为夸克、轻子和光子的气体。对物质的描述只有在  $10^{32}^{\circ}\text{K}$  这一更高的温度上才会变得非常困难，因为在这一温度上，引力会变得同其他力一样强。理论学家一直在对在这些温度上支配着物质的理论进行推测，但对他们的推测进行直接实验，还有很长的路要走。

自 1977 年以来所研究的最令人激动的推测性理论是弦论。它们不用粒子来描述物质，而是用弦——时空中微小的一维不连续——来描述。弦可以是振荡的无数种方式中的任何一种，每种方式在我们看来都是基本粒子的一个不同种类。引力在弦论中似乎不仅是自然的，也是必然的；引力辐射的量子是闭合线的振荡方式之一。在现代弦论中，可能有一个最高温度，但它大约为  $10^{32}^{\circ}\text{K}$ ，而不是  $10^{12}^{\circ}\text{K}$ 。

遗憾的是，弦论有上千种，我们不知道如何评估它们的推断或为什么应用来描述宇宙的是这个弦论而非另一个。但弦论有一个方面对宇宙学具有很大的潜在重要性。我们熟知的四维时空连续不是弦论真正的基本组成部分，而是用来对大自然作近似描述的，这种描述只有在低于大约  $10^{32}^{\circ}\text{K}$  的温度上才是有效的。或许我们真正的问题不是认识宇宙的起点，甚至也不是确定是否真的有一个起点，而是认识在时空没有任何意义的情况下的大自然。

## 参 考 书 目

### 1. 宇宙学与广义相对论

以下论著介绍了宇宙学的各个方面以及与宇宙学相关的广义相对论，从总体上讲，它们的专业性强于本书。

Bondi, H. *Cosmology* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1960) 现已有些过时，但对宇宙学原理、衡稳态宇宙学、奥伯斯佯谬等的讨论非常有趣。可读性强。

Eddington, A. S. *The Mathematical Theory of Relativity*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1924) 多年中一直是首屈一指的广义相对论著作。对红移、德西特模型等作了具有历史意义的早期探讨。

Einstein, A., et al. *The Principle of Relativity* (Methuen and Co., Ltd., London, 1923; reprinted by Dover Publications, Inc., New York) 爱因斯坦、明科夫斯基和外尔所著狭义和广义相对论论文的珍贵重印本，系英文译本。内附爱因斯坦 1917 年的宇宙学论文。

Field, G. B.; Arp, H.; and Bahcall, J.N. *The Redshift Controversy* (W. A. Benjamin, Inc., New York) 从宇宙退行的角度对红移进行了独特探讨，内附若干篇有参考价值的原始论文。

Hawking, S. W., and Ellis, G. f. R. *The Large Scale Structure of Space-Time* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1973) 对宇宙学和重力坍塌中的奇点问题进行了严谨的数字推断。

Hoyle, Fred. *Astronomy and Cosmology - A Modern Course* (W. H.

- Freeman & Co., San Francisco, 1975) 一本初级天文学教科书, 侧重于宇宙学, 数学内容极少。
- Misner, C. W.; Thorne, K. S.; and Wheeler, J. A. *Gravitation* (W. H. Freeman & Co., San Francisco, 1973) 三位著名专家对广义相对论作了最新和全面的介绍。对宇宙学也作了一些讨论。
- O'Hanian, Hans C. *Gravitation and Space Time* (Norton & Company, New York, 1976) 一本适用于大学生的相对论和宇宙学教科书。
- Peebles, P. J. E. *Physical Cosmology* (Princeton University Press, Princeton, 1971) 权威性的综述, 侧重于观测背景。
- Sciama, D. W. *Modern Cosmology* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1971) 广泛介绍了宇宙学及天体物理学中的其他问题, 可读性强。其专业程度“对数学和物理知识不多的读者来说, 也明白易懂”, 书中的方程式很少。
- Segal, I. E. *Mathematical Cosmology and Extragalactic Astronomy* (Academic Press, New York, 1976) 书中提出了奇异但却具有启发性的现代宇宙学观点。
- Tolman, R. C. *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology* (Clarendon Press, Oxford, 1934) 多年来一直是关于宇宙学的标准论文。
- Weinberg, Steven. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1972) 对广义相对论作了基本介绍。有大约三分之一的篇幅探讨的是宇宙学。因属本人所著, 不便多言。

## 2. 现代宇宙学史

下为有关现代宇宙学史的第一手和第二手资料来源。大多数专著都极少涉及数学, 但有些涉及到物理和天文学知识。

Baade, W. *Evolution of Stars and Galaxies* (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1968) 巴德 1958 年所作的演讲, 由 C. 佩恩-加波希金根据录音材料编辑而成。以个人观点讲述了本世纪的天文学进展, 其中包括在河外距离尺度上所取得的进展。

Dickson, F. P. *The Bowl of Night* (M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1968) 从塔莱斯到伽莫夫的宇宙学。内附德舍索和奥伯斯关于夜空黑暗问题的原始论文的摹本。

Gamow, George. *The Creation of the Universe* (Viking Press, New York, 1952) 没有什么新思想, 但作为对伽莫夫 1950 年左右的观点的阐述, 具有重要价值。是为普通大众撰写的, 具有伽莫夫著作中常有的那种引人入胜的风格。

Hubble, E. *The Realm of the Nebulae* (Yale University Press, New Haven, 1936; reprinted by Dover Publications, Inc., New York, 1958) 哈勃在书中对星系的天文学探索情况作了精辟描述, 其中包括对红移和距离关系的发现。最初是在耶鲁大学 1935 年的西利曼讲座上宣读的。

Jones, Kenneth Glyn. *Messier Nebulae and Star Clusters* (American-Elsevier Publishing Co., New York, 1969) 按年代对梅西耶目录和对目录中的物体的观测情况作了注释。

Kant, Immanuel. *Universal Natural History and Theory of the Heavens*. Translated by W. Hasties (University of Michigan Press, Ann Arbor, 1969) 康德的名著, 认为星云同我们的星系是一样的。内有 M. K. 穆尼兹很有价值的绪言, 以及当时对托马斯·赖特的银河理论的解释。

Koyré, Alexandre. *From the Closed World to the Infinite Universe* (Johns Hopkins Press, Baltimore, 1957; reprinted by Harper & Row, New

York, 1957) 从尼古拉斯到牛顿的宇宙学。书中还描述了牛顿和本特利在绝对空间和恒星起源方面的通信, 读起来很有意思。此外, 书中还有很实用的摘要。

North, J. D. *The Measure of the Universe* (Clarendon Press, Oxford, 1965) 从 19 世纪到 1940 年代的宇宙学。对相对论宇宙学的创始作了详细描述。

Reines, F., ed. *Cosmology, Fusion, and Other Matters: George Gamow Memorial Volume* (Colorado Associated University Press, 1972) 彭齐亚斯对微波背景的发现, 阿尔佩尔和赫尔曼对“大爆炸”核合成模型的发展, 作了很有价值的亲身描述。

Schlipp, P. A., ed. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (Library of Living Philosophers, Inc., 1951; reprinted by Harper & Row, New York, 1959) 第 2 卷中有勒梅特关于爱因斯坦引进“宇宙学常数”的文章和因费尔德关于相对论宇宙学的文章。

Shapley, H., ed. *Source Book in Astronomy 1900 - 1950* (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1960) 关于宇宙学及天文学其他领域的原始论文的重印本, 遗憾的是有许多删节。

### 3. 基本粒子物理学

现在还没有撇开数学来论述第七章所讲的基本粒子物理学的大部分最新进展的专著。下列文章可算一简要介绍:

Weinberg, Steven, “Unified Theories of Elementary Particle Interaction,” *Scientific American*, July 1974, pp. 50 - 59。

有关即将出版的对基本粒子物理学的更详尽介绍, 请参阅: Feinberg, G. *What is the World Made of? The Achievements of Twentieth Century Physics* (Garden City: Anchor Press/Doubleday, 1977)。

有关原始参考文献，专为内行人士撰写的介绍，请参阅以下著述：

Taylor, J. C. *Gauge Theories of Weak Interactions* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1976)。

Weinberg, S. "Recent Progress in Gauge Theories of the Weak, Electromagnetic, and Strong Interactions," *Reviews of Modern Physics*, Vol. 46, pp. 255 - 277 (1974)。

#### 4. 其他

Allen, C. W. *Astrophysical Quantities*. 3rd ed. (The Athlone Press, London, 1973) 查阅方便的天文物理学数据与公式集。

Sandage, A. *The Hubble Atlas of Galaxies* (Carnegie Institute of Washington, Washington, D.C., 1961) 内有大量精美的星系图片，用以阐述哈勃的分类方案。

Sturleson, Snorri. *The Younger Edda*, translated by R. B. Anderson (Scott, Foresman & Co., Chicago, 1901) 关于宇宙的起源与终结的另一种观点。

[ G e n e r a l I n f o r m a t i o n ]

书名 = 科学与人译丛 宇宙最初三分钟：关于宇宙起源的现代观点

作者 =

页数 = 1 6 6

S S 号 = 0

出版日期 =

V s s 号 = 9 3 6 6 1 0 4 2

封面  
书名  
版权  
前言  
目录  
正文