

(一)

卞毓麟

在大爆炸后的第一秒钟内，我们这个宇宙的状况与今天截然不同。那时的密度和温度是如此之高，以至于目前的太阳核心与之相比竟成了寒冷的真空。如今已经极其罕见的超重高能粒子，当时相当普遍。它们以强得不可思议的辐射为背景参与异乎寻常的反应。物质的形态是如此易于转换，以至于你很难将它们分辨。各种基本的自然力全都复归于一个整体：统一的原始力。它控制着那时的时空结构，导致深远的后果。目前这个宇宙的结构与特征多半由那时的事件决定。粒子物理学的进展使我们懂得了许多，然而不少事情却依然是个谜。

献给关心混沌初开的朋友

人类的求知欲是永无止境的。在探索与征服自然的道路上，他们从未有过片刻的停留。他们总是力图阐明宇宙间那些最精深微妙的奥秘，“天地如何开启”便是脍炙人口的一例。

二千三百年前，大诗人屈原在他的不朽诗篇《天问》中对当时关于宇宙与历史的传统观念一气提了一百七十多个问题，淋漓尽致地表现了他的怀疑态度与批判精神。雄踞《天问》全篇之首的便是天地如何形成的问题：

“曰：遂古之初，谁传道之？上下未形，何由考之？冥昭瞢闇，谁能极之？冯翼惟像，何以识之？明明闇闇，惟时何为？阴阳三合，何本何化？圜则九重，孰营度之？惟兹何功，孰初作之？”

用现代的话来说，那就是：

“请问：关于远古的开头，谁个能够传授？那时天地未分，能根据什么来考究？那时是浑浑沌沌，谁个能够弄清？有什么在迴旋浮动，如何可以分明？无底的黑瞎生出光明，这样为的何故？阴阳二气，渗合而生，它们的来历又在何处？穹窿的天盖共有九层，是谁动手经营？

这样一个工程，何等伟大，谁个是最初的工人？”吟诵着这些气势磅礴、思想深邃、融文学哲学科学于一炉的绝世佳句，谁还能对“上下未形，何由考之？冥昭瞢闇，谁能极之”无动于衷呢？

人类的科学史本身也是一部波澜壮阔的史诗。为了揭开一个又一个自然之谜，不知有多少人费尽了移山心力。他们发明了无数科学仪器，以延长自己的感官，扩大自己的视野。为了穷宇宙之大，人类造出了“大得骇人”（这是三百年前戏剧家莫里哀形容巴黎天文台台长卡西尼的望远镜时使用的语言）的天文望远镜，把自己的目光投入了远离我们百亿光年（ 10^{10} 厘米）的太空深处；为了尽粒子之微，人们又造出了同样“大得骇人”的加速器，使自己具备了洞察 10^{-13} 厘米以内的粒子世界的的能力。

人类的科学想象力不仅驰骋在广漠无涯的空间里，而且也遨游在绵绵无尽的时间中。今天，正如历史学家研究着远古社会，人类学家追踪着早期猿人、地学家探究着地球初诞那样，宇宙学家们也正在尽力描绘一幅尽可能真实的画卷：我们这个宇宙在其襁褓时代的状态和模样！

这并不是神话，而是真正的科学。它是近几年来刚诞生的科学分支，名叫“极早期宇宙学”关心混沌初开的朋友一定会对它深感兴趣，我们要讲的也正是有关它的故事。

膨胀中的宇宙

历史学家手中有金文甲骨，考古学家有出土文物，古生物学家有鱼龙化石，宇宙学家们追溯太初的宇宙又所持何物呢？

为了回答这个问题，我们先得看看，今天的宇宙是什么样的。

通常，我们将天文观测所能达到的整个时空称为“可观测宇宙”，或者更通俗地称为“我们的宇宙”。在不致发生混淆的情况下，天文学家也往往直接用“宇宙”两字来称呼它。随着天文学的发展，天文观测仪器的威力不断增强，可观测宇宙的范围也在不断地扩大。平时我们常谈的正是可观测宇宙的状态、运动和变化，它的往昔、今日与未来。

那么，关于可观测宇宙的整体结构，天文学家究竟向我们提供了多少可靠的情报呢？

我们生活在小小的地球上，它是一颗普普通通的行星。地球围绕着一颗同样普普通通的恒星运转，后者便是我们的太阳。太阳和另外两千亿颗左右的恒星一起构成一个极其庞大的恒星系统，它叫做银河系，其跨度达 10 万光年（ 10^{23} 厘米）。而我们的银河系又只是一个很普通的星系。目前人们观测到的类似银河系这样的星系已达十亿个。正是这些河外星系——天文学中常用“河外”两字指明所述对象远远位于银河系之外——在半个世纪以前首次向我们透露了可观测宇宙正在整体膨胀的信息。

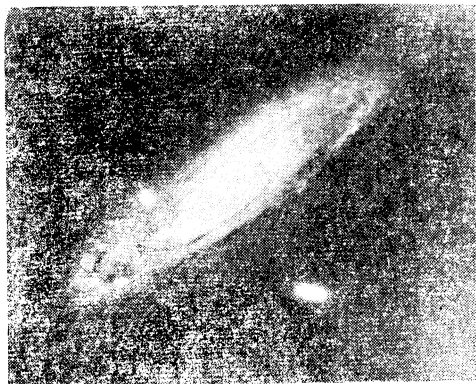


图 1 M31 (仙女座星系), 一个典型的河外星系, 它与我们的银河系十分相似

1929 年, 美国天文学家哈勃从河外星系的光谱线普遍向光谱红端移动这一事实出发, 用可靠的观测资料令人信服地证明, 就当时已研究的 46 个河外星系而言, 它们正在普遍地向远离观测者的方向运动, 而且距离我们越远的星系远离我们而去的速度也越大。五十年来, 人们探测的空间范围与日俱增, 而星系的这种“退行速度”却始终与它离开我们的距离保持着良好的正比关系。这一规律叫做“哈勃定律”。如今, 人们已观测到与地球相距百亿光年的极遥远星系, 它们的退行速度达每秒 150,000 公里, 已为光速之半。多数天文学家据此相信, 星系四散“逃离”的普遍现象乃是可观测宇宙正在不断膨胀着的直接证据。

另一方面, 在理论上, 还在广义相对论初创不久的 1917 年, 爱因斯坦就首先用它考察了时空的大尺度特征。1922 年, 苏联人弗里德曼已用数学方法推算出一

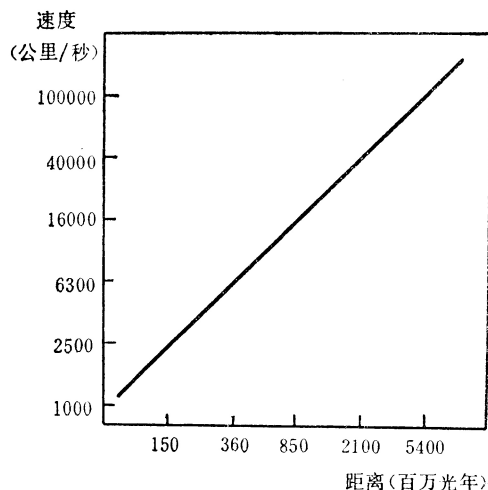


图 2 哈勃定律

个宇宙模型。他的结论是：一个物质均匀分布的各向同性的宇宙乃是不稳定的，它会膨胀，或者收缩。可惜当时人们并未对这一创见给予足够的重视，就连弗里德曼本人也并不完全清楚他那个数学解的重大意义。1927 年，比利时天文学家勒梅特提出了一个尺度随时间膨胀的宇宙模型。不久，哈勃定律问世，英国天文学家爱丁顿立即把河外星系谱线红移与勒梅特宇宙模型联系起来，从而提出了众所周知的膨胀宇宙学说。

宇宙在膨胀着，这一崭新的科学思想深深动摇了宇宙静止不变的陈旧观念。它乃是二十世纪天文学和物理学中最具有深远历史意义的杰出成就之一。

向大爆炸挺进

既然今天的宇宙还在膨胀，那么昨天它的空间尺度就应该比今天小，物质密度则比今天大。如果宇宙中的物质总量保持一定，那么愈早的时候宇宙中的物质就愈密集，温度和压强也就愈高。这意味着往昔的某一时刻，宇宙可能处于一个极端高温与高密的状态。

我们不妨设想可观测宇宙中的一切事物统统被压得粉碎，并挤入一个比原子还小的体积中；然后突然发生一场难以言状的猛烈爆发，以近乎光速的极高速度一下子把所有的东西都抛射开去。就在这狂暴剧烈的一瞬间，我们的宇宙诞生了。人们颇为贴切地将这种爆发性的开端称之为“大爆炸”，它最初是在四十年代末由美籍俄国物理学家盖莫夫与他的合作者阿尔弗提出来的。根据河外星系的退行速度倒推回去，我们可以得知大爆炸大约发生在 150 亿年以前。

现在，我们不妨进而假想自己居然获得了能够逆着时间往回旅行的本领。于是，我们开始向大爆炸挺进了。由于时间倒转，我们的宇宙看起来便不是在膨胀，而仿佛是在收缩。作为这个坍缩王国中的普通臣

民，我们并不能立刻察觉到它与膨胀宇宙有何不同，只有经历数十亿年的漫长岁月，这两种不同宇宙演化的结果才会向人们显示出一目了然的差异。

然而，天文学家却能立刻将它们区分开来。由于多普勒效应，在坍缩宇宙中，遥远星系的光谱线全都会发生蓝移，而在膨胀宇宙中观测到的却是红移。

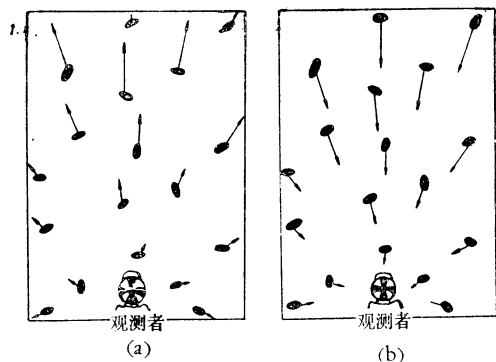


图3 (a) 在膨胀宇宙中，河外星系远离我们而去，因此它们的光谱线发生“红移”
(b) 在坍缩宇宙中，河外星系迎着我们奔来，因此它们的光谱线发生“蓝移”

让我们继续向大爆炸挺进吧。以后我们将会讲到，今天整个宇宙的背景温度还不足 3K。其辐射主要集中在微波波段，其波长远较可见光为长。坍缩中的宇宙温度将不断地上升。光和热在一点一滴地积累。起初你很难察觉到这一点；可是后来黑暗的天空渐渐变亮了。它开始发出最深的红光，继而这血红的微弱光辉逐渐变黄，然后又变成蓝白色，于是整个天空就象是一颗恒星的表面，倾泻出无比强烈的光辉。

远远在此之前(注意此地时间逆转，先后颠倒)，宇宙的温度已经高得使一切生命都无法生存了。嗣后，仅仅在生命完结之后一百多万年，行星和恒星的大气都会同样由于温度太高而逸入太空。原子碎裂成原子核和电子，继而原子核本身又炸裂了。仅仅剩下组成它们的那些基本粒子。最后，整个宇宙中除了基本粒子(包括光子)而外将一无所有。它象什么呢？我们很难作出恰当的形象化比拟。也许，它象一种极其致密而又热得令人难以置信的原始羹汤。

这时还可能出现少量黑洞。随着宇宙的进一步凝缩，许多黑洞将会碰撞和结合。然而，到头来所有的黑洞、粒子和辐射都会统统聚集到一个极小、然而却重得无与伦比的“宇宙核”中去。

宇宙核是什么样子的？它的密度怎样？在本世纪四十年代，也就是大爆炸理论刚形成的时候，人们相信原始宇宙核绝大部分是由中子组成的，因此其密度约为每立方厘米一亿吨(10^{14} 克)。然而，现在我们知道它可能比这还要密得多。实际上，在发生大爆炸的那一瞬间，也就是所谓的“奇点”(通常将那时算作宇宙时

的起算点，用数学的语言来讲，就是宇宙时 $t = 0$ 的时刻)，宇宙核的密度可能是近乎无穷大的。然而对于那时的具体情况，我们实际上一无所知。

现在，让我们重新回到自己这个膨胀宇宙上来吧。我们想知道的是，就在大爆炸发生之后的第一秒钟以内，究竟发生了什么事情。乍一看，要回答这样的问题似乎是不可思议的，毕竟，大爆炸距今已有 150 亿年了。当时的宇宙与今天截然不同，我们怎么竟敢对这太初第一秒的事态说长道短呢？这岂不太狂妄离奇了吗？

幸而，物理学、尤其是基本粒子物理学的最新进展已经使我们有可能做到这一点了。宇宙学家们把大爆炸之后 1 秒钟内的阶段称为宇宙极早期。当我们再现极早期宇宙的事件时，我们的对手已经不再是行星、恒星或者星系；这时我们必须与基本粒子以及它们之间的相互作用力打交道。为此我们先来回顾一下这些力的情况。

四种自然力

现在已知的自然力有四种。无疑，每个人至少都熟悉其中之一：引力。它使你留在地面上而不致甩向太空，也使地球保持在环绕太阳的轨道上万古奔波。它似乎很强大，可实际上却很弱。例如电磁力的相对强度就要比它大 10^{37} 倍。电磁力也是人们比较熟悉的，带电物体的“同性相斥”“异性相吸”就是它在起作用；使电子束缚在原子核周围的也正是电磁力。

另外两种力对一般人来说比较生疏，但是粒子物理学家却毕身与它们打着交道。这便是弱相互作用力和强相互作用力，有时也常简称为弱力和强力。即使是弱力，其相对强度也还比引力强 10^{24} 倍；强力则是上述四种力中最强的，其相对强度为引力的 10^{39} 倍。

为了便于理解强力的作用，我们不妨设想使两个质子越靠越近。由于它们电性相同，电磁力便迫使它们彼此分离。它们之间的引力则是微不足道的。然而，倘若我们能用某种方法克服电磁力的排斥作用，并使这两个质子靠近到 10^{-13} 厘米以内的话，那它们就会突然被一种极其强大的吸引力所控制，这就是强力在起作用。强力的表现行为与电磁力截然不同，它的作用范围极小，也就是力程极短，甚至在一个原子直径那样小的距离上它就已经化为乌有了。

弱力与强力不同，它并不能起到使原子核保持一体而不至瓦解的作用。但是，在另一些核过程中弱力却很重要，例如在放射性衰变中便是如此。考尔德称它为“星体爆发力”，因为它似乎能说明某些恒星的爆发。弱力与强力的相同之处在于它也是一种短程力，因此作用范围也极小。

迄今我们所知的自然力仅仅是这四种，它们在宇宙中分别扮演着不同的角色。然而，问题是为什么恰

恰就只有这么四种力呢？为什么不是五种或者六种呢？或者，为什么不是只有一种统一的力呢？这个问题非常重要，这里我们先提出来，往后再作回答。

现在我们应该来看一下这些力的作用对象——构成宇宙的那些基本粒子了。

怎样建造一个宇宙

通常，不同的人总是从不同的角度来理解我们这个宇宙的。且不谈哲学家、诗人或者神学家的宇宙观念有何异同；单就科学家来说吧，如果请问：欲造一个我们置身于其中的宇宙，您打算怎么办？不同的科学家会作出多么不同的回答呢？

传统的天文学家将会告诉你：我需要的原料是恒星和星际介质。在适当的条件下，它们又可以互相转化：星际介质可以凝聚为新的恒星，同时老死的恒星瓦解后又复归为星际介质。行星、卫星等等固态天体只是恒星形成与演化的副产品，行星上的生命、包括人类也只是这些天体演化到一定阶段的产物而已。我们还可以按适当的方式使恒星结合成群，形成双星、聚星、星团、乃至星系；同样再按一定的方式使许多星系结合为双星系、多重星系、星系群、星系团、乃至超星系团。还需要什么呢？不必了。只要再令所有这些天体按现在的方式运动，不就得到我们目前观测到的整个宇宙了吗？

化学家们的回答与此大不相同。他们说，我们并不需要巨大的星球，相反，只要小小的原子就行了。请按我们这个宇宙中每种化学元素的丰富度为我配料吧，有了这些元素我就能用它们造出天地间所有的一切了。原子将结合成分子、然后又形成岩石、细胞星球、等等等等。当然这里也包括了人类智慧的大脑和洞察宇宙的眼睛。

核物理学家听罢微微一笑。他说：事情还可以更简单些，只要有足够多的电子和少数几种原子核就行了。我们可以通过聚变或裂变生产出更多种类的新原子核。只要让这些原子核与恰当数量的电子相结合，便可以形成所有元素的原子和它们的同位素。往后的一切，化学家和天文学家已经告诉诸位了，因此我不再多费口舌。

数学家、生物学家也都有自己的一套。但是，最富于哲理意味的回答却出自粒子物理学家之口。下面就是他讲的故事：

造一个宇宙就象制造一件家具一样，需要两种不同类型的东西。一种叫做“材料”，例如木头，另一种是把这些材料联系起来的“结合物”，例如钉子。当然，假如你手头具备好几种互不相同的材料，那么你的产品可能就更丰富多彩了。不同的材料也许需要不同的结合物来联结，例如木头要用钉子、布头要用线、金属要用焊锡一般。但是，也应该有一些结合物是能同时适用

于多种不同材料的；只有这样，不同材料的零件才能联结成一个整体。这样的结合物并不神秘，例如“万能胶”既可以用于塑料，又可以用于金属和木头。

建造真正的宇宙与这种家务活计颇为相似。它也需要“材料”以及联结材料的“结合物”。材料部分是一些粒子，我们称它们为费密子，结合物则称为玻色子。用量子力学的方法我们可以为每个粒子确定一个重要的数值，它称为粒子的“内禀自旋”。所有玻色子的内禀自旋值都是整数，例如 0, 1 或者 2；所有费密子的内禀自旋值均为半整数，例如 $1/2$, $3/2$, 或者 $5/2$ 等等。

下面就让我们先去看看我们的材料费密子的情况吧。

建造宇宙的砖块——费密子

假如我们仅有一种“材料”，那么可以想象，用它造出来的宇宙就比较乏味。幸好，事实上并非如此，我们的宇宙大厦乃是由两种完全不同的砖块筑成的。这两类根本不同的费密子分别称为轻子和夸克。由于科学家们目前还找不到任何迹象表明它们有什么内部结构，因此认为它们也许是真正“基本”的粒子；也就是说，我们确实可以暂时将它们看作物质世界最基本的单元。

在两类费密子中，轻子是人们较为熟悉的。电子就属于轻子之列。每当你打开家里的电视机，就有无数的电子在那儿为你奔忙不息。但是，除了电子以外，其它几类轻子就不是家喻户晓的了。在那些轻子中，有一类叫做 μ 子，我们可以将它设想为某种较重的电子；还有一种叫做 τ 子，它比 μ 子还要重。 τ 子是不久以前才探测到的。上述三种轻子中的每一种，恰好分别与另外三种轻子之一配对。这另外三种轻子就是电子型中微子、 μ 中微子和 τ 中微子。它们合起来统称为中微子。

最后，这六种轻子又各有自己的孪生反粒子，因此总共就有六种反轻子。

当代物理学中最引人入胜的成就之一，就是发现了轻子与夸克之间存在着一种明显的对称性。就象存在着配成三对的六种轻子那样，看来同样也存在着配成三对的六种夸克。第一对是上夸克和下夸克，第二对是奇夸克和粲夸克，第三对则称为底夸克和顶夸克，有时人们也把最后这一对称作美夸克和真夸克。这些名称听起来十分怪诞，但它们并不是什么严格的定义。采用这些名称只是为了将它们互相区分开来。

不过，夸克不象轻子，它们从来不孤立地出现，而总是以各种方式结合成为强子。如果一个强子由三个夸克组合而成，我们就称它为重子。质子和中子都是重子。质子由两个上夸克和一个下夸克组成，中子则由两个下夸克和一个上夸克组成。由一个夸克和一个

反夸克组合而成的强子称为介子。

有一个颇令人费解而又饶有兴味的**事实**：我们的宇宙整个儿地似乎仅由一对轻子——电子和中微子，以及一对夸克——上夸克和下夸克构成。人们在日常生活中从来也没有见过另外那两对轻子和另外两对夸克，它们仅在高能物理实验中才会出现。为什么会存在这些“非常的”粒子？这乃是现代物理学中最神秘的**疑谜之一**。从某种意义上理解，我们可以说这些粒子仿佛是“多余的”；这就好象你原本只想造一只小小的木头轮船模型，却买了十四布和一吨薄钢板一样。

好吧，费密子已经谈得不少了。那么，将它们联系在一起**的玻色子情况又如何呢**？

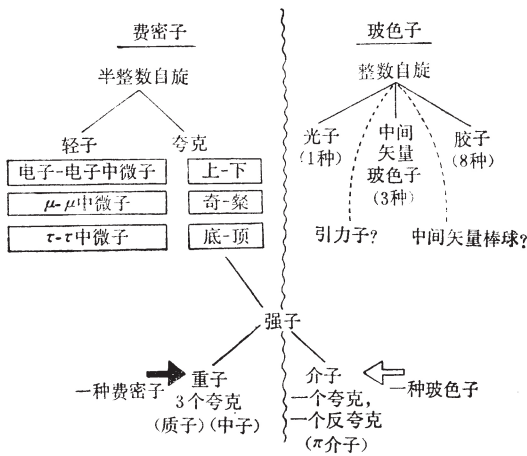


图4 宇宙的基本构件。费密子构成宇宙中的“物质”，玻色子提供了将粒子维系在一起的结合力。图中省略了反粒子。

- 三个半整数自旋的夸克结合为一个半整数自旋的强子，因此它是一种费密子。这种费密子称为重子。
- 两个半整数自旋的夸克-反夸克结合为一个整数自旋的强子，因此它是一种玻色子。这种玻色子称为介子。

费密子的“联系”——玻色子

玻色子也有不同的类型，它们各以不同的方式联系着不同的费密子。不同的玻色子还分别相应于不同的自然力。携带，或者说传递电磁力的玻色子只有一

种，它就是光子。传递弱力的玻色子有三种，它们称为中间矢量玻色子。强力总共需要八种玻色子来传递，它们称为胶子。这一名称直接点明了它们起着胶水般的作用，使各种夸克结合在一起。最后，由于我们尚未象对付其它三种力那样用量子力学来阐释引力，所以迄今还不能肯定究竟存在或者说需要多少种“引力子”来传递引力。

结合物的作用不仅在于使不同的粒子联结起来，而且它们还能使一种费密子转化为另一种费密子。例如，一个中间矢量玻色子能使一个μ子变为一个电子。我们可以站在四维时空的立场上来看待这一事件。这时，我们可以把它看成是某种时间上的、而不是空间上的联系。于是中间矢量玻色子的作用就可以看作是过去的μ子与未来的电子之间的一种“胶水”。用这种方式分析问题，我们会发现一个非常引人注目的事实：看来并没有哪种“胶水”能将过去的轻子与未来的夸克或者过去的夸克与未来的轻子联系起来。光子只是在空间上将电子与三个夸克组成的质子联系在一起，但这并不是时间上的联系。换句话说，我们不能使轻子与夸克这两大类不同的费密子互相转化：既没有办法使一个轻子转变为一个夸克，也没有办法使一个夸克转变为一个轻子。

面对着夸克与轻子之间美妙的对称性，理论粒子物理学家不得不怀疑，也许实际上还是有某种东西能够将这两类基本的费密子联系起来的。那种东西应该是自然界中的第五种基本力，理论家们甚至已经为它取了一个名字：超弱力。它也应该象其它力一样，由某种类型的玻色子来传递。它们可以使质子衰变成阳电子，等等。它们也可用来解释为什么宇宙中粒子比反粒子多得多。粒子物理学的理论计算告诉我们，这些玻色子的质量应该是十分巨大的——远大于迄今为止我们所观察到的任何粒子的质量。正是由于质量巨大，理论家们便赋予它们一个十分形象的名称：中间矢量棒球。尽管实际上它的质量根本没法与真正的棒球相比拟。这些超重粒子在许多方面有助于解释我们的宇宙究竟是怎样在太初第一秒内建立起来的。总而言之，有了这些费密子和玻色子，我们这些粒子物理学家就能够造出一个目前观测到的宇宙了。（待续）

（题头：牛枢学）