

序

在过去几年中，一个全新的非凡的理论占据了物理学家的想象。这个理论，即弦理论或更成熟的形式即超弦理论，声称能统一地描写所有的力，构成物质的所有基本粒子和时空。简言之，它是一个包罗万象的理论。这个理论的核心是认为物理世界是由一些很小的弦构成的。这听起来可能很荒谬，但理论是构筑在美妙的数学观念之上的，而且结论与现实世界是如此自洽。

弦理论现在已经是理论物理最活跃的研究分支之一了，它吸引了很多著名的理论物理学家。一些科学家深受这个理论的前景的鼓舞，并且充满激情地宣称它可能成功。但是这个理论也不乏批判者，正如你将在书中读到的。

1987年，我们决定在英国广播公司三台纪实地回顾超弦研究的状况。这个节目《寻求超弦》在1988年初开始播出，内容是弦理论领头的支持者和反对者对这个论题的解释和意见。像我们以前的节目《原子中的幽灵》（牛津大学出版社，1986年）一样，它是先以纪实广播形式出现，然后再编辑成书的。我们觉得完整地出版这些采访录并保存它们是很有意义的。我们将尽量保持原始纪录的对话风格，当然，为了更适于付印，我们也不得不对采访录作一些变动。

本书旨在让物理学家和好奇的读者对弦理论的基本思想有透彻的了解。我们也希望读者通过阅读本书了解那些杰出的物理学家是怎样谈论和辩论当代的重要问题的。因为本书是面向普通读者的，我们要求被采访者尽量少使用专业词语。每一个采访都是独立的，可以分开阅读。但是为了贯穿全书，我们写了一个很长的引言，解释了一些理解本书所需的背景知识，包括相对论、量子论和粒子物理的概述。

虽然超弦理论仍在发展之中，但理论的精要已经建立，我们希望本书将为读者提供我们时代有可能是最伟大的科学进展的一个有用的而有趣的快照。

我们感谢伊安·莫斯博士在文字处理上对我们的帮助，同时也感谢艾琳·德莱堡小姐记录了录音。

P.C.W. 戴维斯

J.R. 布朗

超弦

你相信宇宙是由一些极小的弦构成，在人类生存的三维空间之外，还存在更多维的空间吗？

近年来，“超弦”理论已成为物理学中最活跃、最激动人心的分支之一，吸引了众多著名物理学家的注意，他们声称“超弦”理论是一个包罗万象的理论，能统一地描述所有的力，物质的所有基本粒子和时空。

1996年8月22日人民日报和光明日报以“美科学家认为以‘弦论’为标志—物理学迎来第三次革命”为题刊载文章，将“弦论”与量子力学和爱因斯坦的相对论相提并论。

1 . 引言

1 . 1 什么是包罗万象的理论？

物理学是最自负的一门科学，物理学家把理解宇宙的奥秘视为自己的职责。而其他科学家只局限于研究一些具体的东西，像生物学家研究活的有机体，化学家研究原子和分子，心理学家研究人类及其他生物，等等。像神学家一样，物理学家们不承认任何系统在原则上处于他们的研究范围之外。

当然，物理学家也承认他们实际上对大多数系统的认识是很有限的。像云和雪花这样基本的系统就很难用物理学家熟悉的定律来构造模型。而由于一些生物系统极端复杂，即便最原始的生物如病毒或细菌，物理学家对它也一无所措。尽管这样，任何复杂系统不管多么神秘，其行为最终总是由物理定律所决定的，绝无例外。与此比较起来，那些在实践中的无能为力就显得微不足道了。

简化主义哲学一直引导着物理定律细致入微地主宰着宇宙的观念。这个思想学派的鼓吹者，包括许多科学家，一直相信原则上心理学、生物学、化学可以依次简化，最后到物理学。换句话说，‘诠释之箭’一直射向现实的最深一层，最终任何事物都可由物质的基本组成来解释。简化主义者因而断定，假如一个关于物质的基本组成的自治而完整的理论能够被阐明，那么，这个理论就是一个包罗万象的理论。

在这里我们不准备争论简化主义的推理是否正确，但要提到最近物理学家讨论的包罗万象的理论（或 TOE）正是贯彻这种精神。这种“包罗万象的理论”不是要解释所有事物，像在数学里面，几何公理并没有真正解释毕达哥拉斯（Pythagoras）定理。确实，毕达哥拉斯定理可以从这些公理演绎得到，但是证明是非常繁杂的。这足我们明白，即使明确了物理世界的基本组成元素，我们也不能过分以使期望理解所有事物的复杂特性。所以，物理学家们的包罗万象的理论不能解决许多实际问题，如给我们提供云和雪花的模型的答案，更不用说生命的起源和意识的本质。但是，按照简化主义哲学，对上述现象的解释原则上可以由包罗万象的理论演绎而来。

我们所知的第一个包罗万象的理论的例子是由公元前 5 世纪的古希腊哲学家留基伯（Leucippus）和德谟克利特（Democritus）提出的原子说，他们认为世界是由原子和虚空构成的。原子有许多种，它们是不可穿透和破坏的，因此是基本的。原子没有内部结构，它们不能说是由更小的东西组成的，它们很小，不能直接观察到，也不能在虚空中处于连续运动的状态。原子相遇，就会互相粘合构成延续的物体，而这些原子的重新排列则引起了物理世界的任何改变。

17 世纪，伽利略（Galileo）和牛顿（Newton）的工作带来了现代科学的兴起。同时关于物体运动定律的认识也强烈地支持原子说。人们意识到原子的运动也遵循一些熟悉的物理定律。这些进步促使拉普拉斯（Laplace）发明了他著名的“魔力计算机”。

“一种智力，在任一给定时刻如能知悉所有的自然力和构成宇宙的所有物质的瞬时位置，而且它能分析所有的有关数据，则能用一个式子描述世上最大物体和最微小原子的运动。对它来说，没有东西是不可确定的，历史和将来在它的眼前展现。”

这当然是一个包罗万象的理论的尝试。

但是，一些事情在这个可能的包罗万象的理论里面是很奇怪的。没人尝试去解释为什么宇宙是由原子构成的，我们不知道它们来自何处，也不知道它们为什么有这样的质量和形状。原子之间相互作用力的本质也是含混不清的。牛顿发现了引力，但并不能完全解释原子间的力。进而，原子通过的空间和度量它们运动的时间完全是在理论范围之外的。时空被简单地认为是存在的，但它们不是物理。总之，伽利略、牛顿和拉普拉斯的工作并不能说是已经给出了一个很令人满意的包罗万象的理论。

直到 19 世纪下半叶，当詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）的电磁理论补充了牛顿的力学和引力论后，这种情况才有所改变。在那段时间，人们设想所有自然力只是引力或电磁力的一些具体表现。虽然原子的存在，时空的非物理性等问题还没有解决，许多物理学家认为他们将来的任务只是把一些物理测量精确到下一个小数点，正如开耳芬（Kelvin）勋爵在 1900 年的英国科学进步协会的一次演讲中所说的：“物理中已经没有新的待发现的东西了，剩下的只是越来越精确的测量。”这就是当时对包罗万象的理论的普遍倾向。

再回顾当时的包罗万象的理论，我们发现一个不是十分令人满意的特点，即需要假设两种基本作用力：引力和电磁力。在 1920 年，数学家西奥多·卡鲁扎（Theodor Kaluza）设法补救了这个缺陷，他发现了两种力之间的一个可能的联系。因此如果物理学没有陷入概念的漩涡，一个可能的严谨的包罗万象的理论会在本世纪早些时候出现。

电子和放射性的发现，马克斯·普朗克（Max Planck）量子假说的成功和爱因斯坦（Einstein）的相对论的出现摧毁了牛顿——麦克斯韦时代物理的整个基础。牛顿的运动定律和他关于时空的常识性假设被抛弃了。甚至德谟克利特的原子假说也被微观世界的更细致和复杂的图像所代替，此时，原子不再是不可分的，具有确定的位置和动量的粒子。显然整个经典物理的基础已经坍塌。

大约到了 1930 年,原来的经典物理已经被新的理论框架:量子力学、广义相对论和原子的更精致的模型所取代。虽然一些细节还没有弄清楚,但是物理学好像又重新回复到一些相对简单的原理上来了。原子被发现只是复合的物体,它们由少数的满足相对论和量子力学的基本粒子(电子、质子、中子)所构成。事实上,受这种高度的乐观主义的影响,早在 1923 年爱丁顿(Eddington)就发表了他所声称的基本理论,一个基于神奇的数理逻辑关系之上的包罗万象的理论的尝试。在他于 1946 年去世以前,爱丁顿一直在设法深入研究这种想法。同时,爱因斯坦也在用他的余年的大部分时间寻找一种用纯几何描述的自然“统一场论”。

但是现在我们知道,20 年代建立包罗万象的理论的这些希望是不成熟的。中微子假设、正电子和 μ 子的发现,以及原子内核子之间额外作用力的发现都给宇宙的基本定律是在电子、中子和质子水平的简单作用这个想法带来了挑战。实验粒子物理有了长足的发展,大量的亚原子碎片和令人困惑的作用力被发现了,物理学比 20 年代所猜想的要复杂得多。

这些丰富的亚原子水平的现象背后隐藏的更深层次的结构又花费了物理学家半个世纪的时间,我们多少有了令人满意的理论。最近,一些物理学家又大胆地提出一种新的包罗万象的理论。这个理论,即超弦理论是最新的也是最令人信服的一个包罗万象的理论的尝试。这个方案所处理的对象是超微观的,比原子世界或实验高能粒子物理小 10^{20} 倍。

我们能从一个真正令人满意的包罗万象的理论中获得什么呢?首先,它必须能解释物理学家为什么可以观测到许多基本粒子而且能预言它们所有的重要性质像质量、电荷、磁矩等等。其次,它能真实地描写粒子间所有的相互作用,即它不仅能解释自然的四种基本力,而且能解释它们的相对强度。理论计算也必须能准确给出一些粒子间散射振幅,衰变率、分支比等的观测数字。简单而言,理论必须能给出粒子物理中所有已经测量的常数。另外,它能解释时空的几何和拓扑,像可感觉的维数,并给出宇宙起源的令人信服的解释。

但是这还不是全部,一个包罗万象的理论同时要统一物理。

1.2 自然核心的统一

任何人都可以构造一种包罗万象的理论，他可以随意翻阅一些教科书，写下所有的基本定律，所有已知的亚原子粒子和它们的相互作用力，即需要了解宇宙的所有东西。

这种方法有什么欠缺呢？从审美的观点来看，这样开出的清单太混杂不清了。一个好的包罗万象的理论必须不能单单是基本定律和事物的汇总，而应具有解释能力，它必须建立自然的不同侧面的联系。对这种包罗万象的理论的探索是某种程度的有信心的举动，而这种有信心的举动是建立在自然必定是简单的这个信念之上的。

一般来说，一个科学理论所作的独立假设越少，它就越有说服力。理论通常有一些由经验确定的自由参数，更深层次的理论必须能预言它们的数值。一个具体的例子是，1880 年代的斯蒂芬-玻尔兹曼（Stefan-Boltzman）辐射定律确立了黑体辐射的能量密度与温度的四次方的关系，比例常数由实验确定。1900 年普朗克的量子假说成功地解释了这个常数不是自然的独立的基本常数，而是可由某些物理常数，如光速、普朗克常数和玻尔兹曼常数导出的。

科学实验无数次表明我们越深入地探寻事物的本质，就能越多地发现它们之间的联系，同时由直接实验来确定的理论的那些随意性也就越少。现代的原子的概念更深刻地表明原子如何由物质的同样的少量成分构成，所以它比原子的经典图像更先进。现今，已经没有必要假设 90 种左右对应着不同化学元素的基本物体，不同原子的物理和化学性质可以直接系统地由它们的组成部分来确定。

最终的包罗万象的理论，理想地说，是不需要参照实验的。所有事物都可以由所有其他事物来定义，仅剩下一个尚未确定的参数来定义理论适用的标度，此参数必须由实验来确定。（在这个最终的包罗万象的理论中，实验仅仅是用来定义测量的习惯，它不能确定理论的任何参数。）这种理论是基于可以导出所有事物的自然的基本原则的，这个原则设想是一个包容所有基本物理的简练的数学表式。按照芝加哥附近的庞大的粒子加速器设施——费米实验室的主任莱昂·莱德曼（Leon Lederman）的话来说，它是一个简洁到甚至可以让你写在“文化衫”上的公式。

统一物理的努力有两种不同的方案，第一种是可称为“自上而下”的方案，从某个可能由简单性、美妙性，而且能以简练的数学形式表达的广义的原则出发，我们可以得到对世界的描述，从而得到对特殊事例的预言。

爱因斯坦的大部分工作是致力于“自上而下”这个方向的。广义相对论是建立在引力和惯性力的等价原则，以及物理是不依赖于描写事件

的坐标系的原则上的。从这些基本的想法出发，爱因斯坦得出了引力场方程。这些方程以美妙性、简单性和紧凑性而闻名，但是，方程的解并不简单，行星运行或双星的引力波辐射非常复杂。所以，60 年后的今天，这个理论蕴含的所有现象还没有被完全揭示。

另一个或许是更为普遍的科学研究方法是“自下而上”的方案。这种方法从现象学出发，系统地整理实验的原始数据，并推导出某些规律。这些规律被提炼成假想，推广到更普遍的定律，根据定律在新的领域对现象作出预言，再用实验验证预言。通过一点点的积累，科学家们得出了比这些事实的总和更深刻的理论。粒子物理就给这种方法提供了很多佐证，如夸克理论就是由实验所观测到的很多不同粒子的某些物理的相似性，经过逐步摸索，把它们归化为一些类或多重态。“自下而上”方法的重要性在于它总是伴随着实验的进展而发展，如果实验事实偏离了哲学上的优美，那么哲学就不会如想象的那样优美。

物理学经历了多次统一。牛顿声称天体的运行与地面附近的物体遵从同样的动力学和引力定律。麦克斯韦统一了电和磁，并阐明了光是电磁波的一种形式，从而建立了电磁场理论和光学的联系。爱因斯坦建立了时空，能量和质量的关系，并进一步延伸到时空和引力的联系。

近年来，更进一步统一自然的尝试集中于高能粒子理论，因为每当我们寻求更深层次的结构，就必须提高探测的能量。在这个框架里，主要的是两个理论，即相对论和量子论。近年来的统一物理的各种尝试的起点是这两种理论显然的不调和。在考察粒子物理之前，我们先简单地回顾一下相对论和量子论。

1.3 相对论

在 19 世纪下半叶，牛顿的力学定律和麦克斯韦的电动力学对相对运动描述的不一致已经是很显然了。按照伽利略和牛顿的观点，在直线上的恒速运动是相对于某个参照系并且不会产生任何物理效应的，因此在平稳飞行的飞机上乘客不会对速度有真正的感受，而只能参照外部系统如窗外或地面上的物体来辨别飞机的运动。另一方面，麦克斯韦的方程预言电磁波，如光在自由空间以恒定的速度传播，光速是自然界的一个普适常数。理论没有提及测量这个速度的参照系，因此有人提出空间充满了不可见的称为以太的介质。以太可以被定义为一个绝对的静止系，而所有的运动在原则上都可以相对于它来加以测量。这好像解决了麦克斯韦的理论伽利略、牛顿的相对性原则的矛盾。但是，实验测量地球通过以太的速度却给出了零结果。这简直太荒谬了，因为这意味着地球是静止的，而天空却围绕着它转动。

1905 年，爱因斯坦的狭义相对论直接解决了这个悖论。他承认相对性原则，即直线匀速运动是相对的，但抛弃了以太假说。他引入了新的假想，即光速在所有坐标系的速度是一致的，这表明不管光源或观察者的运动状态如何，观察者总是接收到相同速度的光讯号。对同一个光脉冲，两个相对运动的观察者看到的脉冲速度相同。

爱因斯坦光速不变的新原则抛弃了时空的旧观念，牛顿对空间，时间和运动的观点被新的“相对性”理论所取代。时空的相对性概念的核心是空间距离和时间间距在运动状态不同的观测者是不同的，地球上的一个小时在一艘以不可思议的速度飞行的飞船上就可能只有半个小时，对长度也有类似的现象。但是当速度比光速慢很多时，相对论效应是不显著的。高能物理中粒子通常以接近光速的速度运行，相对论的时间膨胀效应就非常显著，如不稳定粒子在粒子加速器中运行时就比静止时寿命更长。

时空的延长缩短对力学定律有深刻的影响。像一个运动的物体，粗略地讲要比静止时重得多，在加速时其质量会增加。因此质量的概念就有点含混。物理学家通常把物体静止时（相对于进行测量的观测者）的质量定义为质量，与惯性有关的有效质量或相对论质量依赖于它的速度，并且随着速度的不断接近光速而不断地增加。相对论中关于质量、速度和能量的研究揭示了质量和能量的等价性，即质量是能量的一种形式，它们可以相互转化。这同时也隐含着在某些情况下，物质可能会以能量的其他形式出现，反之，能量也能用来产生物质。这些观点包含在爱因斯坦著名的方程 $E = mc^2$ 中，这里 E 、 m 、 c 分别代表能量、质量和光速。

这个理论的一个结论是运动物体不能越过光障，即不能从低于光速

的运动加速到高于光速的运动。从物体的质量很容易看出，在以光速运动时，物体的质量将是无穷大，因而需要无法达到的无限大的能量来加速它。

以上的限制并不是说物体不能以光速运动，显然，光就是一个例子。以光速运动的粒子的静止质量必须是零（虽然不是实际质量，因为这样的粒子永远不会是静止的）。甚而，相对论也不排除超光速运动的可能。这种假想的粒子称为快子（tachyons）。按照相对论，它们不能以低于光速的速度运行，而它们的静止质量是虚数（即负数的方根）。如果快子的静止质量可以测量，这简直是不可想象的。但是，因为它不能以低于光速的速度运行，所以也就不存在静止质量的问题。

虽然快子在理论上是允许的，许多物理学家还是不太欢喜它。它那比光速还快的速度隐示着在某些情况下它们会从现在向过去运动。如果它与平常物体作用，可能会向过去传播信息，因此会引起所有各种因果性悖论。人们作了一些尝试，想通过重新定义时间箭头来克服这个困难（即把从 A 时向 B 时运动的快子看作从 B 时向 A 时运动的快子），但还不清楚这种作法是否自治。在我们讨论量子理论时，快子的概念将会遇到更大的麻烦。

相对论预言的时空间隔的转化暗示时空是物理的一部分，而不仅仅是物理表现的舞台。事实上，转化的方式揭示了时空的内禀联系，它们可以看成是一个四度的连续体，称为时空。因而物理学家把世界视为四维，而非三维。爱因斯坦不久就意识到狭义相对论迫使我们不仅要放弃牛顿关于空间和时间的概念和力学定律，而且也必须放弃牛顿的引力论。按照牛顿的观点，引力是瞬时作用的，这表明引力效应的传播比光还快，因此与相对论矛盾。

到 1915 年，爱因斯坦完成了狭义相对论的推广，建立了新的引力理论。在原先的狭义理论中，他主要涉及的是匀速运动。如果物体加速，它的运动就不仅只相对于某些参照系。飞机中的乘客很容易感受到飞机的突然减速或倾斜。为了处理这种更普遍的运动方式，爱因斯坦假设加速产生的惯性力与引力是不可区分的。因此离心运动可以用“虚拟的引力”来形容，火箭的突然加速承受了“引力”。

伽利略和牛顿早就注意到了加速运动和引力的等价性，但是爱因斯坦首先把它提高到了自然的基本原理的地位。当落体自由下降时，下降所引起的“引力”将抵消了它的重量，自由下落的观测者将经受失重状态。现今的宇航员对这种状态是已经很熟悉了，但是在爱因斯坦的时代，他只能想象一个坐在自由下落的升降机里的观测者。

因为自由下落的升降机里的东西是失重的，里面的邻近物体的相对位置不会改变。所以，从地面上的观测者来看，这些物体下落的加速是相同的。是这个事实引发了不管物体的重量或构成如何，落体同时到达

地面的观点。（据说伽利略在比萨斜塔用下落的球验证了这一点。）

严格说，前面提到的只有在我们忽略了三种情况时才能成立。第一是空气阻力，它虽然很复杂，但只是无关紧要的因素。（更精确的实验可以在没有大气的月球上进行。）第二是升降机里面物体之间微弱的引力，当物体非常轻时，这种效应就可以忽略。那些只是用来检测引力场而相互作用不显著的物体称作检测物体。

上面提到的忽略的第三个因素是地面的弯曲，虽然实际上这种效应很小，但对引力的理解是很关键的。为了了解这一点，请看图 1。在图中，升降机中两个检测物体自由地落向弯曲的地面。如果地球的曲率可以忽略，则它们下落的路径是平行的，因此它们之间的相互位置不会改变。事实上，每个物体下落都指向地心，因此它们的路径是逐渐会聚的。升降机中的观测者无法看到外面的景物却能够从检测物体的会聚速度来推断地球的曲率。

图 1. 两个邻近的物体向地面自由下落，两条路径互相逐渐会聚。

图 2 (a) 中 4 个检测物体排成菱形。当升降机下落时，中间的一对物体逐渐靠近。最底下的物体靠地面稍近，由于地球引力与到地面距离的平方成反比，所以，它所受的引力也稍强。因此最底下的物体比邻近的物体下落得要稍稍快点。同样道理，最上面的物体下落得要慢。菱形在水平方向上被压缩，而在垂直方向将拉长，最终将成为图 2 (b) 的拉长的形状。

升降机的实验表明，需要一个抵消引力效应的参考系来验证自由下落。但是由于引力场不是恒定的，检测物体所置的位置不同，引力也会有所不同。这些引力的细微影响被称为潮汐力，因为它们在月球引力场中引起了海洋的潮汐。

图 2 (a) 排成方阵的四个粒子自由下落。

图 2 (b) 由于它们感受到的引力的不同，方块形逐渐变为菱形。

底下的粒子由于更靠近地面，因此受的引力较大，下落更快。

最上面粒子由于离地面较远，因此落得比较慢。外边的一对粒子逐渐靠近，见图 1。

可能有人会指出原始引力只是相对于某个参照系，只有潮汐力才是绝对的，才代替真正的引力场。所以爱因斯坦构造了广义相对论。它的基本特征是，像图例中菱形的几何形状的改变是不依赖于检测物体的构成或质量（检测物体的质量不能太大）。这表明弯曲是物体下落空间的基本特征，而非作用于物体的力的结果。换言之，你可以看到物体在弯

曲或卷曲空间的自由下落，而不是受力的作用而下落。爱因斯坦因而得出引力只是几何，空间的几何的弯曲的观点。

让我们更仔细地解释它。首先，很重要的一点是相对论把空间和时间结合了起来，实际上，在这里有关系的是时空的弯曲而非仅是空间。（弯曲的时空可能但不一定就是指弯曲的空间。）在学校里我们学的是欧氏几何，它适用于平面或三维情况下的平直空间。而在一个弯曲表面上几何规律就有所不同，如图 3 所示，在球面不可能画平行线。球面上和直线相对应的是大圆，就像经线。图中画出两条经线，它们在赤道处相互平行，但在北极相交。在这种弯曲面上，线的弯曲类似于在非稳恒引力场中落体路径的弯曲。后者的不同主要在于弯曲的几何不是二维甚至也不是三维，它是三维空间和一维时间的弯曲。虽然很难观察四维的弯曲，但是数学上的描述是很方便的。

图 3．弯曲的测地线。因为地球的几何不是平的，两条直线（测地线）虽在赤道平行，但会在北极交汇。这类似于引起下落的升降机中两个物体一起运动的潮汐力。

爱因斯坦的广义相对论把引力场看作是时空几何的弯曲或卷曲。在这种理论里，落体不再被认为是在引力作用下的下落，而是沿内在的弯曲时空的可能的最直路径（测地线）的运动。在牛顿的引力理论里，地球绕太阳的轨道的弯曲是因为太阳引力迫使它偏离直线；而在爱因斯坦的理论中，没有这样的引力（虽然我们将继续不精确地说“引力”），它认为太阳在地球周围引起了时空的弯曲，而地球在这个弯曲的时空中自由地沿着测地线运动。引力效应可以确切地看成几何效应，因为它是普适的：引力可以相同地作用于所有的检测物体。因此，甚至光线在引力场中也将沿着弯曲的路径传播。图 4 是实验测得的星光受太阳的引力而弯曲的图示。更大范围地，星系的分布依赖于空间的几何。

图 4．光线受重力影响而弯曲。太阳引力引起了遥远的恒星 A 的星光的弯曲，使得 A 看上去处于 B 处。这种移动可以在日食时观察和测量。

可能存在宇宙范围的空间规则的曲率这一事实带来了有关宇宙拓扑的有趣问题。如果空间是平坦的，它必须是无限的或者拥有某种类型的边界。但是如果空间是弯曲的，则会有另外的可能。想象一个二维面，弯曲的面可能围成一个球体，或者一个环体（见图 5）。（请记住虽然球体是三维的，但球面是二维的。）闭合的球面的三维推广（称为超球面）

是能够想象到的。如果宇宙具有超球面的拓扑，它将拥有有限的体积，但却没有边界或宇宙边缘。现在虽然还不清楚空间实际上拥有什么样的拓扑，但是，我们将要看到，这在超弦中是很关键的。

图 5．拓扑是研究线、面怎样联接的学科。球体的拓扑与环体的拓扑是不同的，环体中有一个洞。

1.4 量子论

相对论使我们不得不放弃一些关于空间、时间和运动的日常观念。它以抽象的图像，像卷曲时空这样很难想象的概念取代了牛顿的直观物理。量子论也同样需要对物质本质的日常观念作根本的重新评定。

量子理论始于 1900 年马克斯·普朗克关于电磁辐射以分立波包或量子存在的假设，这些量子称为光子。光子在某种程度可视为光的粒子，这与传统的观念即光和其他电磁辐射以波的形式存在是难以相容的。这个显然的矛盾由波粒二象性的概念加以解决。光按它被测量的方法不同而表现出类波动或类粒子的方面，但是，它不能同时以粒子和波动的形式存在。尼尔斯·玻尔 (Niels Bohr) 把这种事件称为单一现实的粒子和波动互补性，这种现实本身在我们的感觉范围之外。反之，电子，质子和其他亚原子物体，虽然通常被看作是粒子，在某些情况下也表现出波动性。而光子与这些物体的情况一般说来相同，所以也被看作粒子的一种。

量子论的核心——波粒二象性隐示着某些与亚原子物体有关的量不能很好地定义。像量子波动有确定的动量，但在空间中它是弥漫的，因此没有确定的位置。另一方面，如果能精确地测定电子或光子的位置(通过光敏屏幕)，它的动量就不能确定。因此我们能由一类实验来决定物体的动量，而由另一类实验来决定物体的位置，但是这两类测量是互相排斥的，我们不能同时确定量子物体的位置和动量。总之，量子系统的行为具有著名的维纳·海森堡 (Werner Heisenberg) 的测不准原理所表示的模糊性。

表述测不准原理的一种方法是假定所有的测量量都受不可预计的涨落的影响，从而使得测量值不精确。不能相容的物理量成对存在，像位置和动量。位置和动量的测不准或模糊性程度如分别记为 Δx , Δp ，那么测不准原理则使得乘积 $\Delta x \times \Delta p$ 永远大于一个普适常数：普朗克常数 h 。因此 h 代表了自然的模糊程度， h 的数值很小 (6.63×10^{-34} 焦耳秒)，也就是说虽然原则上它可用于任何系统，量子模糊性只在原子和亚原子层次才很显著。

另一对测不准原理应用的物理量是能量 E 和时间 t 。此时， $\Delta E \times \Delta t$ 不能小于 h 。总之，测不准原理的这两种表现说明了只有在动量的测不准程度大的情况下才能有小程度的位置测不准的可能，而时间的测不准程度大可以减少能量的测不准。在很多情况下，这就是说辨别极短长度和时间间隔需要极大的动量和能量。量子论因此对每个时间和空间间隔都给予了自然的能量和动量标度，探测的范围越小，需要的能量和动量越高。所以，物理学家建造了很大的粒子加速器。同时，任何物质终极结构的理论都需要论及最小的距离和最大的能量。这些理论的高能特征是

特别有趣的问题。

因为量子论本身具有的不确定性，对电子之类的物体，牛顿力学定律不再有效（即便考虑了相对论效应），而必须由全新的量子力学来代替，它是由海森堡、欧文·薛定谔（Erwin Schrödinger）在 20 年代发展起来的。类似地，像麦克斯韦方程之类的电磁场方程也必须由新的场量子理论取代，这方面工作从 30 年代开始发展。

亚原子粒子通常以光速运动，因此要求描述它们运动的量子理论与狭义相对论自治，这由保罗·狄拉克（Paul Dirac）在 1928 年建立起来，他的工作正确地预言了反物质。进而量子论应用于场（像电磁场），将能得到与相对论自治的数学理论，称为量子电动力学或 QED，即便这样，理论也遇到了数学上的困难，这个疑难直到第二次世界大战后才被解决。现在，所有的物理现象的基本理论都必须与相对论和量子论自治。

1.5 亚原子粒子的世界

已知的亚原子粒子有数百种。电子、质子和中子只是其中的三种，其他粒子从宇宙射线中发现或在粒子加速器中通过其他粒子的对撞而产生。除了少数亚原子粒子以外，多数粒子都是极不稳定的，通常在极短时间内衰变成其他粒子。

一种给定的粒子的所有成员都是相同的，我们不可能区别两个电子。同时，所有粒子都有它的反粒子，除了质量相同外，所有其他量都相反。所以电子带固定的负电荷，而反电子（即正电子）带有同样数量的正电荷。

粒子带有一些本征的物理量，其中最重要的是质量和电荷。由于某种现在还不了解的原因，所有已知粒子的电荷都是电子电荷的简单的倍数；而不同粒子的质量就没有简单的数值关系。

亚原子粒子的另一个重要本征量是它们的内禀自旋。许多粒子具有类似于绕本身的轴转动的内部转动。然而事实上，自旋是量子力学的性质，没有经典力学的对应，它与地球绕地轴转动是不同的。宏观物体的自转的角动量可以在一个连续范围内取值，而亚原子粒子的自旋角动量是量子化的，即只能取 $\frac{1}{2}h$ 的整数倍， h 是普朗克常数 h 除以 2π 。为表达方便，自旋 $\frac{1}{2}h$ 的粒子可以简单地说“自旋 $\frac{1}{2}$ ”。电子自旋为 $\frac{1}{2}$ ，光子的自旋为 1，

Ω^- 粒子自旋为 $\frac{3}{2}$ ，等等。

内禀自旋的几何特性也非常奇特。通常自转的物体需要旋转 360° 才能恢复原来的位置，而自旋 $\frac{1}{2}$ 的粒子则需要转动 720° 。换句话说，自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子需要周转两次才能像自转的经典物体那样回复原先位置，好像这个粒子比我们看到的世界要大。我们的空间相对于粒子的空间是双值的，我们看到世界的两个相同模本，每一个都转动 360° ，对粒子就是可以区分的。显然自旋 $\frac{1}{2}$ 的粒子的空间的几何与通常空间的几何有本质与微妙的

区别。

粒子自旋的精确值对决定它的物理性质也十分关键。自旋为 $\frac{1}{2}h$ 偶数倍的

粒子与自旋为 $\frac{1}{2}h$ 奇数倍的粒子的行为极不一致，前者称为玻色子，后者称为费米子。费米子受泡利（Pauli）不相容原理的约束，两个全同的费米子不能处于同一量子态。而玻色子则不遵守这一原理。

物质的基本构造单元可分为两类。一类称为轻子，最普通的轻子是电子。另一种轻子 μ 子的质量是电子的 206 倍，它不稳定，在两毫秒内衰变为电子。还有一种质量大于电子的轻子是 τ 子，在 1970 年代被发现，它很不稳定。

除了三种带电轻子外，还可能三种电中性粒子，称为中微子。每一种中微子对应着一种带电轻子，因而它们分别称为电子中微子， μ 子中微子，和预言的 τ 子中微子（ τ 子中微子未能探测到）。很长的一段时间人们认为中微子无质量，以光速运动。电子中微子质量确实很小，但没有任何令人信服的理由说明为什么它没有质量。现在还没有人知道它的确切质量。

六种轻子都是自旋 $\frac{1}{2}$ 的费米子。它们的相互作用相对地较小，也不参与核

作用。反之，核内粒子相互作用很强，除了熟悉的质子和中子，还有很多与核有关的粒子，这些粒子和其他由核作用产生的粒子称为强子。

强子一般比轻子重得多。质子的质量是电子质量的 1836 倍。较重的强子通常是费米子，这些费米子的强子称为重子。另外有些强子是玻色子，称为介子。质子和中子是自旋为 $\frac{1}{2}$ 的重子。最轻的介子是 π 介子，自旋为

0。表 1 列出一些常见的强子，大部分以希腊字母命名。所有强子中，只有质子是稳定的，其余的将衰变成较轻的强子或轻子。

强子如此之多表明它们不是基本粒子，而是有内部结构的复合粒子，这正与轻子相反，轻子一般被认为是基本的粒子。在 60 年代早期盖尔曼（Gell-Mann）和兹威格（Sweig）猜测所有强子都是由更小的组元即夸克组成的，现在，这猜想已被实验证实。

像轻子一样，可能存在六种夸克，奇妙地称为夸克的味道。具有的名字是上、下、粲、奇异、顶和底（或真和美）夸克。同样，像轻子一样，

夸克是自旋为 $\frac{1}{2}$ 的费米子。

夸克以两种方式组成强子。第一种是三个夸克的组合，按照量子力学

的原理，三个夸克的自旋或平行或反平行，所以总自旋为 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{3}{2}$

称为重子。由于组成夸克的味道不同，因此不同的夸克组合对应不同的已知重子。例如质子、中子、 Ω^- 粒子分别由两个上夸克和一个下夸克，一个上夸克和两个下夸克，以及三个奇异夸克组成。

另一种方式是夸克和反夸克组合。量子力学原理则决定最后的产物是自旋为 0 或 1 的玻色子，对应着介子。因为介子只含一个夸克和一个反夸克，而重子含三个夸克，所以介子一般较轻。但因为粲夸克的质量比

上、下夸克的大许多，所以由粲夸克-反夸克对组成的介子质量比质子实际上大很多。由于三个夸克组成一个重子，所以夸克的电荷量必须为基本单位（质子的电荷）的 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{2}{3}$ 。这种分数电荷使得夸克在实验上非常奇特，但是一

般认为夸克不能自由存在，它们被禁闭在强子中。所有由粒子对撞来分解强子的努力都失败了，并且从已知的有关夸克的内部结构来看，夸克确实是完全禁闭的。

虽然物理学家不能研究孤立的夸克，电子射过核物质的实验为夸克的存在提供了一些间接证据。电子散射的花样显示了每个核粒子内存在三个重的微小物体。夸克存在的其他证据来自强子的衰变和高能对撞实验的强子喷注的产生等等。

多数物理学家认为夸克和轻子代表了物质结构的最基本层次，即所有的物质都由它们构造而来。当然也可以猜测这些粒子由更小的物体构成。事实上，一些物理学家认为，作为基本粒子，夸克和轻子数目太多。（除六种夸克味之外，每一个味道的夸克有三种“颜色”，因而总共有18种不同的夸克。）但是，承认夸克和轻子是基本的就会带来它们的存在形式的问题。

作为基本粒子，它们不能分裂也不能通过内部的重新排列变成其他的东西。因此长期以来夸克和轻子被认为是没有内部结构的点粒子。但是，我们将看到，点粒子假设在理论上有很严重的问题，这些基本粒子看来终究还是可能有某种内部结构的。