

第一篇

从牛顿到爱因斯坦

1. 统一路上话牛顿

回头看历史，牛顿(Isaac Newton, 1643—1727 年)创立的经典力学无疑是物理史上第一片追求“统一”的港湾。

牛顿有过如此一段名言：“将简单的事情考虑复杂，可以发现新领域；把复杂的现象看得简单，可以发现新规律。”这句话描述了牛顿做物理和数学的基本思想方法，前一段说的是科研中的具体过程，后一段则代表了他对物理理论规律追求“统一”的奥卡姆剃刀原则。牛顿是这么说的，也是这么做的。牛顿发明微积分是前者，总结、建立力学三大定律及万有引力定律则是后者。

牛顿出生于普通农家，是个身体羸弱的早产儿。少年时代的牛顿，也似乎并未表现出现代人眼中的“天才”或“神童”的特质。他自幼丧父、母亲改嫁，资质一般、成绩平平。但谁也没有预料到，这个不起眼的小家伙，后来居然会成为科学界的一代巨匠。

中学毕业后，母亲让牛顿在家务农，以便养家糊口。但牛顿志不于此，他喜欢读书和钻研数学问题，还不时别出心裁地搞点小发明。他的一位舅父发现了牛顿对科学的浓厚兴趣，因而说服他的母亲，没有让他继续务农。在 19 岁时，牛顿考上了著名的剑桥大学三一学院。舅父的这个偶然建议，使得牛顿进入物理学的领域一展宏图。

牛顿从剑桥大学毕业后的那一年半是牛顿科研生涯中的“奇迹时期”。1665 年 5 月，蔓延伦敦的瘟疫迫使剑桥大学关门，牛顿只好回到乡下的老家居住。这段时间是牛顿精力旺盛、思绪联翩，最富创造力的一段黄金岁月。在短短的 18 个月内，他思考数学问题、进行光学实验、计算星体轨道、探索引力之谜……牛顿生平最重要的几项成就，都在这一年半的时间内初现雏形^[1,2]。

首先，牛顿思考了二项式展开的问题。当时的数学前辈笛卡儿，对牛顿的数学思想影响很大。但在这个二项式展开的问题上，笛卡儿的想法很奇怪，他认为这没有什么可想的，展开后的项数好像有无穷多，太复杂了，但人的大脑是有限的，不应该去思考这种与无穷有关的复杂问题。二项式的表达式多么简单，为什么要将它展开成复杂而无穷的多项式呢？可牛顿却偏偏迷上了这个由无穷多项求和的复杂概念。这个概念又引导牛顿进一步思考无限细分下去，而得到的无穷小量的问题。他将这无穷小量称之为“极微量”，也就是现在我们所说的“微分”。牛顿用他的无穷小量的方法，对几何图形进行了很多详细的思考和繁复的计算，他曾经将双曲线之下图形的面积算到 250 个数值。正是这种不畏艰难的精神和进行繁复计算的超人能力，使牛顿最后发明了微积分，为数学、物理乃至其他所有的科学

技术,开拓了一片崭新的领域!

在这段时期内,牛顿用三棱镜作各种光学实验,研究颜色的理论。此外,他对引力问题的钻研也颇有成效。有关苹果打到头上的故事据说也就发生于此。苹果未必真正击中了牛顿的脑袋,但苹果朝下落而不往上飞的事实肯定给了牛顿启发。为什么是往下掉呢?不仅仅是苹果,周围的一切物体都往下掉。那么,一定是地球在吸引它们。如果地球吸引所有的物体,也吸引天上的月亮吗?地球对月亮也应该有吸引力,但是月亮为什么不掉下来呢?对了,牛顿想,月亮虽然不掉到地上,但是月亮也没有从地球附近跑开,而是在地球周围绕圈圈,不停地做圆周运动。荷兰物理学家惠更斯(Huygens,1629—1695年)研究过这个问题,他认为圆周运动也需要“力”来维持,就像孩子们用绳子绑着石头转圈的情形一样,绳子对石头的牵引力维持着石头的圆周运动。因此,地球对月亮的吸引力维持着月亮绕地球的圆周运动。

惠更斯虽然认识到圆周运动需要向心力,但却不知道月亮绕地球转动的向心力来自何处。将吸引苹果下落的力与吸引月球绕地球转动的力归纳为同一种力,继而扩展到所有的物体之间都存在这种相互作用力,是牛顿建立万有引力过程中,思想上的一次大突破、大统一。

一年半过去了,瘟疫的疫情有所缓解,牛顿便带着他数月思考的成果回到了剑桥。他迅速地被授予了硕士学位,成为了一名教授。牛顿的才能得到了剑桥物理学家伊萨克·巴罗的高度赞赏。为了使牛顿有安定优越的科研环境,巴罗还辞去了自己的教授一职,让贤于牛顿。此举在科学史上被传为一段佳话。

当时还有另外一位英国物理学家，比牛顿大 8 岁的胡克 (Robert Hooke, 1635—1703 年) 也对引力进行了多年的研究。胡克后来被科学史学家们公认为是引力平方反比率的发现者。据说胡克和牛顿曾经以通信方式讨论过万有引力，胡克在信中提到他的许多想法，包括平方反比定律。但胡克不擅长数学，不知道如何利用平方反比律来计算轨道。牛顿得益于他创建的强大数学工具——微积分，最终解释了开普勒有关行星轨道的结论，发现了万有引力定律。

在牛顿之前的天文学家和物理学家，对力学已经有了很多理论和实验。然而，是牛顿第一个从这些孤立定律中找出了它们的内在联系。他将伽利略的惯性原理总结成牛顿第一定律，首先定义了不受外力作用的惯性参考系。然后，再将“惯性”的概念推广到外力不为零的情形，提出非零的力将使物体产生非零的加速度。这个加速度与外力成正比，与物体内在的物理性质——惯性质量成反比。因此，牛顿第二定律将力、加速度、惯性质量三者之间的关系，总结、统一在一个简单的数学公式 ($F=ma$) 中，迈出了将运动学发展为动力学的关键一步，发现了物体在力的作用下的运动规律。接着，牛顿又在第三定律中，提出任何力都是成双出现的，称为“作用与反作用”，这两个力总是大小相等、方向相反。

牛顿三大定律所描述的是所有物体，在“任何”形式的力的作用下的运动规律。这里的物体，可以是地面上的沙粒，也可以是宇宙中的天体，这些大大小小的物体在力的作用下都符合同样的运动规律。

伟大的科学家多少都有些古怪。牛顿成名之后，在某些方面表现得恃才自傲、专横跋扈，与多位物理学家频起纠纷：和莱布尼茨争夺微积分的发明权，对胡克的打压更是过分。牛顿对光学有杰出的

贡献,与胡克最早的争论也是起源于光学。牛顿主张光的“微粒说”,胡克和惠更斯则坚持波动说。本来这只是不同观点的学术之争,但因为胡克早期在皇家学会光学讨论会上曾经对此争论有过一些尖锐言辞,当时就使得牛顿勃然大怒,从此对胡克充满敌意。后来,牛顿利用他显赫的地位,打压得胡克一生都抬不起头,最后变得愤世嫉俗,郁闷而死。牛顿还发表了《光学》一书,由于他的权威性,这个光微粒的概念统治物理界 100 多年,直到后来菲涅尔的工作,光的波动说才重见天日。从这个角度看,牛顿在物理理论的统一之路上既有推波助澜的正向作用力,也有逆向的反作用力。根据现在的物理学观点,光既有微粒性,也有波动性,它们是光学理论中不可或缺的两个方面。

牛顿晚年的思想就更令人捉摸不透了。他将研究目标转向神学,将理性思维代之以对上帝的膜拜,对炼金术的寻求取代了少年时代痴迷的科学实验。最后,牛顿以 85 岁的高龄逝世。

无论如何,正如牛顿的墓碑上所写的:“人类应该欢呼,地球上曾经存在过这样一位伟大的人类之光”。他的确是人类之光,他也是物理学统一路上的第一人。

2. 法拉第和麦克斯韦的忘年交

不同于牛顿的争名夺利,英国物理学家法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867 年) 是一位令人可敬的谦谦君子。

法拉第和牛顿也有相似之处,他们都出身贫寒。牛顿因舅父发

现他的科学兴趣和才能，得以上了大学，而法拉第则没有受到正式教育，完全靠自学成才。法拉第的数学仅限于简单的代数，连三角函数都不熟悉。

当时的英国皇家学会会长，是鼎鼎有名的汉弗里·戴维爵士。戴维被誉为“无机化学之父”，是发现化学元素种类最多的科学家。法拉第因为在打工之余去听皇家学会的科学演讲而被戴维发现他的才能并被聘为助手。法拉第对戴维的这段提携之情终身不忘，尽管戴维后来对法拉第并不友好，特别是当法拉第的科学成就及其在物理界的威望超过了戴维本人之后，更是激发了戴维强烈的嫉妒心。戴维借助于自己的威望和权力，打压法拉第，多次阻止他成为皇家学会的会员。事实上即使是在当年，戴维也是将法拉第当作助手和仆人来使唤的。当戴维带着法拉第到各地旅游时，戴维的夫人更是摆出贵族的架子，对法拉第颐指气使。但是，法拉第对戴维却总是不计前嫌，始终评价戴维是一个伟大的人。戴维最后终于被感动，或许只是良心发现。在他逝世的前几年，疾病缠身之时，他提名推荐法拉第担任皇家学院实验室主任一职。在戴维临终时，别人问及什么是他一生中最重要的发现时，他没有列举周期表里那些被他发现的元素，而是自豪地说：“我最伟大的发现是发现了法拉第！”

不过，在法拉第与戴维关系的问题上，法拉第也有过一次不智之举。在 1821 年，戴维对奥斯特发现的电磁现象感兴趣，试图与另一位物理学家渥拉斯顿一起，进行一个类似“电动马达”的实验，但一直没有成功。法拉第不时地参与到两人的讨论中，并且逐渐形成了自己的想法，他独自建造了两个装置且成功地产生了导线绕着磁铁旋转的“电磁转动”现象。法拉第的方法完全不同于戴维和渥拉斯顿

的,但他犯了一个错误:他独自发表了这项研究成果,因而得罪了戴维和渥拉斯顿。也许这就使戴维从此对法拉第有了偏见,他很长时间不让法拉第进行电磁学研究,而派他去作光学玻璃实验。

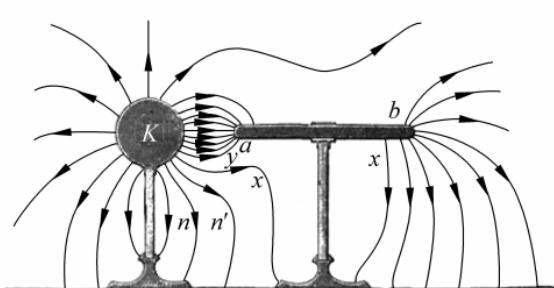
不过法拉第对戴维的感激之情贯穿其一生且是真诚的。实际上,我们也应该感谢戴维,如果不是他“发现”了法拉第并将他带进了科学的殿堂,人类对电磁规律的发现和应用,也许要被推后数年。

戴维去世后,法拉第犹如一匹没有了羁绊的脱缰之马,得以继续他喜爱的电磁研究。他夜以继日地进行了大量的实验,并将平生心血总结汇编在三卷《电学实验研究》中。这本书中有三千多个条目,详细记载了法拉第所做过的实验和结论。

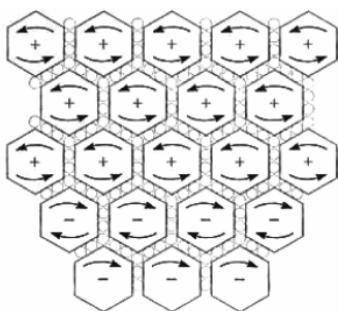
法拉第不仅仅是一位杰出的实验物理学家,他对电磁理论问题的思考方式也独树一帜,直到现在也能对我们有所启发。牛顿经典力学中的“力”,是一种超距作用。地球吸引月亮,遥隔几十万公里,这个作用力是如何传递过去的?其中的空间起着什么作用?没有人在乎这个问题,只要有公式算出了月亮精确的轨道,大家就满足了。而法拉第在研究电场和磁场时使用了不同的构思。他在电荷和磁铁周围的纸上,画上了密密麻麻的电力线和磁力线,并且用充分的想象将它们延续扩展到全空间。他认为这些力线是真实存在的,就像能够伸缩、具有弹性的橡皮筋一样,它可以把两个互相作用的电荷联系在一起。现在看起来,法拉第的力线思想实际上就是现代物理中“场”的概念,他是最早认识到相互作用应该通过“场”来实现的物理学家。

法拉第虽然学历不高,但擅长言辞,能用精辟、简练的语言解释物理概念。他在英国皇家研究院组织发起的面向公众的系列讲座一

直延续至今。1846年4月3日，法拉第原本邀请了一位名为惠斯通的教授做这天的讲座报告。惠斯通得出了一些有关导线中电流速度之类的结果，但惠斯通害怕在公众场合演讲，因为恐惧而临阵脱逃。当时的法拉第只好自己上台作了一个无准备的即兴演讲。也就是因为没有预先考虑那么多，法拉第任思绪自由驰骋，侃侃而谈，谈到了不少对光和电磁理论不同寻常的看法。其中最富想象力的，是惊人地预见了光的电磁理论。法拉第认为空间中充满了电力线和磁力线（图1-2-1(a)），光很可能就是这些力线的某种横向弹性振动所产生的。这次演讲中，法拉第的大胆推测震惊四座，但却没有人听懂了他在说些什么。法拉第的思想太超前了，它在等待另一位大师的到来。



(a)



(b)

图1-2-1 法拉第的力线图(a)和麦克斯韦的以太模型(b)

麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831—1879年）出身贵族，从小受到良好的教育，擅长数学。当40岁的法拉第已经做了一大堆电磁实验，提出了著名的电磁感应定理之时，麦克斯韦才在苏格兰首府爱丁堡呱呱落地。30年之后，年轻的麦克斯韦和老迈的法拉第结成了忘年之交，共同建造了电磁王国。

1860年左右，麦克斯韦来到伦敦的国王学院执教，他经常出席

皇家科学研究院的公众讲座，并与法拉第进行定期交流。麦克斯韦和法拉第，他们的友谊及合作本身就是一种奇妙的“统一”：他们的年龄相差 40 岁，一老一少，两人有完全不同的人生经历。法拉第出自寒门，是自学成才的实验高手；麦克斯韦身为贵族，是不懂实验的数学天才。然而他们互相敬重彼此的才能，共同打造出了完全不同于牛顿力学的经典电磁理论的宏伟体系。

早在来到伦敦之前，麦克斯韦就已经对法拉第的力线图像感兴趣，他用不可压缩的匀速流体来类比电力线和磁力线，用流体的速度和方向代表空间中力线的密度和方向。与法拉第深入交流合作之后，法拉第将电磁现象视为“场”作用的观点更是深深地影响了麦克斯韦。如何为这种“场”作用建立一个适当的数学模型？这个问题经常在麦克斯韦的脑海中萦绕。

为了解释法拉第的力线图景和“场论”思想，麦克斯韦试图借助于以太模型。不过，后来证明，麦克斯韦方程组描述的电磁理论完全不需要以太的存在，电磁场本身就是一种物质，不需要任何介质就可以在真空中传播。但从历史角度看，当时的麦克斯韦对以太的力学模型进行了很深入的研究，他的理论最原始的形式就是建立在“以太”的基础上。麦克斯韦的“力学以太”模型实际上是半以太、半介质的混合物。

“以太”的概念在古希腊时就被提出来了，之后由笛卡儿将其科学化。到了 17 世纪的牛顿时代，无论是提倡波动说的惠更斯，还是坚持微粒说的牛顿，都认为以太充满整个宇宙，是传播光的承载物。因而，以太的存在成为人们心中根深蒂固的概念。麦克斯韦也一样，对以太坚信不疑，只不过他为了建立电磁场的数学模型需要对以太

赋予适当的力学性质。因此，麦克斯韦想象空间里充满了小球，这些小球类似现代可以旋转的轴承，它们被更小的粒子（轴承之间的钢珠）隔开，如图 1-2-1(b) 所示。这些小球有很小的质量和一定的弹性，小球的变化将互相影响。麦克斯韦在这种“以太”的力学性质的基础上，提出了位移电流的概念，并成功地将电学磁学中的库仑、法拉第、安培等定律，归纳总结为麦克斯韦微分方程组。

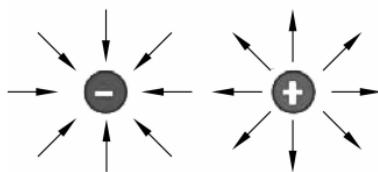
根据麦克斯韦的电磁理论，电荷之间的相互作用通过空间中的电场 **E** 和磁场 **H** 起作用，见图 1-2-2。麦克斯韦用 4 个形式对称的微分方程描述了电场和磁场的性质，以及它们之间的关系。电场 **E** 和磁场 **H** 都是三维空间中的矢量场，所谓“场”的意思就是说，物理量是空间位置的函数，每一个点都有不同的函数值。电场 **E** 和磁场 **H** 对应于电力和磁力，由于力是一个矢量，因而电场和磁场都是矢量场，它们在空间中每一个点都有 3 个分量，一共便有 6 个分量。

矢量场在空间的变化情形可以用“散度”和“旋度”来描述。以水流作类比，“散度”和“旋度”有非常直观的几何图像。水从水源向外流，汇聚到下水道。因此，在水源和下水道附近，水流的流线是“发散”或“汇聚”的，表明散度不为零（有源场）。这种情形类似于电荷附近的电场，见图 1-2-2(a)，电力线（电场之力线）从正电荷散出，汇聚到负电荷，因而电场的散度不为零，且正比于电荷密度 ρ_v 。如图 1-2-2(a) 中的公式 1 所示，这是麦克斯韦的第一个方程。

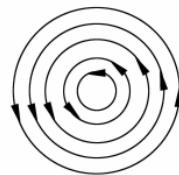
因为这个世界上有电荷，但没有磁荷，所以磁场和电场不一样。磁铁的南极和北极是无法分开的，即使你将一个磁体断成两截，你得到的也是两个磁体，却得不到单独存在的磁极。磁力线都是封闭的圈圈线，这说明磁场是无源场。所以，磁场的散度为零，见图 1-2-2(b)，

$$1. \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon}$$

$$2. \nabla \cdot H = 0$$



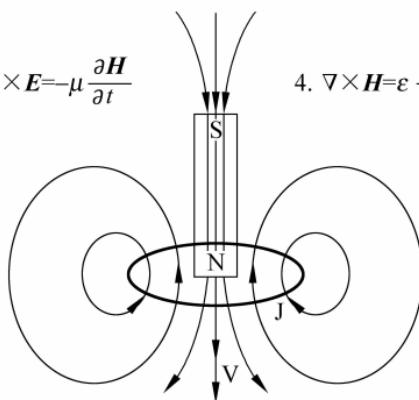
(a) 电场散度不为零



(b) 磁场散度为零

$$3. \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$4. \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}$$



(c) 磁场变化产生电场

(d) 电场变化产生磁场

图 1-2-2 麦克斯韦方程统一了光、电、磁的理论

图 1-2-2(b)中的方程 2 是麦克斯韦的第二个方程。

图 1-2-2(c)和图 1-2-2(d)所描述的,则是电场和磁场的旋度。旋度的几何图像可以比喻为水流中的涡旋。图 1-2-2(c)对应于麦克斯韦的第三个方程:磁场对时间的变化率,等于电场的旋度;图 1-2-2(d),即麦克斯韦的第四个方程,说的则是电场对时间的变化率,等于磁场的旋度。两个方程的说法是对称的,描述了电场磁场之间的联系:变化的电场产生磁场,变化的磁场产生电场。

经典电磁理论最令人兴奋的成果就是预言了电磁波的存在，为法拉第在那场即兴演讲中的大胆推测找到了理论根据。遗憾的是，

当时的法拉第已经太老了，没能用实验证实电磁波的存在。在麦克斯韦预言电磁波的两年之后，法拉第就去世了。麦克斯韦自己呢，也只活了 48 岁，没能等到电磁波的实验证实。

第一次用实验观察到电磁波的人，是发现了光电效应的海因里希·赫兹，时间则是在 1887 年，麦克斯韦逝世 8 年之后。如今，麦克斯韦方程建立了近 150 年，电磁波漫天飞舞，携带着数不清的信息，让这个世界热闹非凡。

3. 时间、空间成一统

19 世纪末，牛顿力学和麦克斯韦电磁理论这两座大厦一统天下、高耸入云。人们乐滋滋地以为物理学家们从此再无大事可干，只需要对这两种理论修修补补即可。没想到上帝并没有闲着，他在暗地里进行着下一步的工作，逐渐在基础物理学晴朗的天空上积累起两朵乌云。不过这时候，爱因斯坦已经来到人间，而且正在接受教育，准备挑战前辈建立的经典基础物理学。

这两朵小乌云各有来头，都是来自于实验物理学家的功劳，都与“光”有关。第一朵乌云来自于“迈克耳孙—莫雷实验”，与上一节中介绍的光的波动理论中“以太”说有关。第二朵乌云来自于黑体辐射实验结果中的“紫外灾难”，与光的辐射性质有关。

爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879—1955 年) 生逢其时，又有两位难得的数学界朋友的帮助。天时地利人和，造就了一代伟人。这两位数学家，一位是他的老师闵可夫斯基，一位是他的同学格罗斯曼。

开始时老师并不看好这个经常逃课的“懒狗”学生,但当爱因斯坦建立狭义相对论之后,闵可夫斯基却成了一名对相对论极其热心的数学家。他在 1907 年提出的四维时空概念,成为相对论最重要的数学基础之一。不幸的是,闵可夫斯基 45 岁时就因急性阑尾炎抢救无效而去世。据说他临死前大发感慨,说自己在相对论刚开始的年代就死去,实在太划不来了。

爱因斯坦的数学家同学格罗斯曼,则在 3 个关键场合帮助了爱因斯坦:一是在大学时代,是格罗斯曼完整的课堂笔记成为爱因斯坦每次考试的救命稻草;二是爱因斯坦大学毕业后,找不到好工作,靠格罗斯曼父亲的关系到瑞士专利局当职员;三是将黎曼几何介绍给爱因斯坦,使他如获至宝般地用这个强大的数学工具顺利地建立了广义相对论。

与黑体辐射有关的第二朵乌云,首先被德国物理学家普朗克拨动。之后,爱因斯坦用光量子的概念成功地解释了光电效应,为其赢得了 1921 年的诺贝尔物理学奖。量子理论由此开始发迹,我们将在第二篇中详细介绍。

爱因斯坦感兴趣的是与光线传播性质有关的第一片乌云。光,是大自然展示给人类的最古老的现象之一,但也是延续几千年,至今尚未完全破解的物理之谜。

与光传播有关的问题,从少年时代就困惑着爱因斯坦。1895 年,16 岁的爱因斯坦踏进了中学的大门。那时候,法拉第和麦克斯韦都早已仙逝,但他们有关光和电磁波的理论却深入到了爱因斯坦的心里。这个 16 岁少年的脑海中经常琢磨着一个深奥的“追光”问题,用

现代物理学的语言来说，爱因斯坦想象了一个如下的思想实验：光是一种电磁波，以大约 $300\,000\text{ km/s}$ 的速度向前“跑”，那么如果我以和光相同的速度去追上一束光，将会看见什么情景呢？

根据麦克斯韦理论，变化的电场产生变化的磁场，变化的磁场又产生变化的电场，如此循环往复下去，便产生了电磁波，或者说产生了光。但是，少年爱因斯坦想，如果我的速度和光一样快的话，我看到的应该是一个静止而不是变化的电场（或磁场）。那么，没有了变化的电场，便不会产生变化的磁场（或电场），便产生不了光，便没有了光。光怎么会因为我追着它跑就消失了呢？所以，爱因斯坦认为，这个“追光”的思想实验是一个不可能发生的悖论。也就是说观察者不可能以和光线一样的速度运动！

10 年的时光很快就过去了，16 岁的中学生已经大学毕业，并且成了专利局的一名普通小职员。但是，“光”给他带来的困惑，在脑海中一直挥之不去。这位专利局小职员在思考着物理学的大问题，也注意到了与光的传播理论相关的，物理学天空上出现的“乌云”：迈克耳孙—莫雷实验。

法拉第和麦克斯韦建立的经典电磁理论将光解释为一种在以太中传播的电磁波。“以太”的概念带给物理学家许多新问题。首先，如果承认以太存在，就应该有一个相对于以太静止的参考系。这个参考系应该位于宇宙中的哪儿呢？由此，人们不由得想起了早年的地心说和日心说，相信地心说的人会认为以太相对于地球静止；相信日心说的人会认为以太相对于太阳静止。而后来的宇宙图景告诉我们，地球和太阳都不是宇宙的中心，宇宙根本没有什么中心。那么，哪一个参考系有资格作为相对于以太静止的“绝对”参考系呢？实际

上,根据伽利略提出的“相对性原理”,这样的“绝对”参考系不存在。

物理定律不应该依赖于观测者所在的参考系,这是物理理论“统一”之路的三个基本目标之一。根据伽利略的相对性原理,物理规律应该在伽利略变换下保持不变,牛顿的经典力学满足这点,但麦克斯韦的电磁理论却不具有这种协变性。麦克斯韦方程只在一个特别的、绝对的惯性参考系中才能成立,这就是被称之为“以太”的参考系。

退一步说,如果假设存在一个“以太”参考系,那么,在相对于以太运动的参考系中,就应该能够探测到“以太风”的效应。比如说,地球以 30 km/s 的速度绕太阳运动,在其运动轨道的不同地点,就应该测量到不同方向的“以太风”。“迈克耳孙—莫雷实验”便是为了观测“以太风”而进行的。

然而,这个实验却得到了一个“零结果”,就是说没有探测到任何地球相对于以太运动所引起的光速的变化。

为了调解电磁理论与相对性原理的矛盾,荷兰物理学家洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz,1853—1928 年)在仍然承认以太的前提下,对伽利略变换进行了修正。在伽利略变换中,空间的变化与时间无关,并且空间中的弧长是不变的。比如说,有一根棍子,无论它运动还是不运动,它的长度都不会改变。但洛伦兹设想,如果这根棍子相对于以太运动的话,也许受到了以太施予其上的某种作用而使它的长度变短。于是,洛伦兹在相对于以太运动的伽利略变换中加上了一个在运动方向的长度收缩效应。这样做的结果,正好抵消了原来设想的相对于以太不同方向上运动而产生的光速差异。如此一来,洛伦兹用他的新变换公式(洛伦兹变换),轻而易举地解释了迈克

耳孙—莫雷实验的零结果。

长度会变短多少呢？洛伦兹意识到，在这个问题上光速起着重要的作用，因而缩短因子应该与运动坐标系的速度与光速的比值 β ($\beta = v/c$) 有关。

爱因斯坦看中了洛伦兹变换，却认为应该赋予它更为合理的物理解释。因此，爱因斯坦摒弃了以太的概念，因为它与相对性原理不相容。爱因斯坦从物理本质上重新考虑了时间和空间的定义，发现不假设以太的存在时仍然能够得到洛伦兹变换。最后，爱因斯坦用没有以太的洛伦兹变换统一了时间和空间，用狭义相对论统一了相对性原理和麦克斯韦方程。这是物理理论统一路上的重要一步。

狭义相对论基于两个基本原理：一个是相对性原理，另一个是光速不变原理。认为光速在真空中的数值对任何惯性坐标系都是一样的，并且光速是宇宙中传递能量和信息的最大速度，质量不为零的任何物体的速度只能无限接近光速，不能达到或超过光速。这个结论，是爱因斯坦从 16 岁开始就暗暗认识到而且深藏于心的物理规律。

4. 惯性、引力、流形与几何

爱因斯坦很快发现了狭义相对论的不足之处，问题是其中的相对性原理只对于互相做匀速直线运动的惯性参考系成立。物理规律为什么对惯性参考系和非惯性参考系表现不一样呢？惯性参考系似乎仍然具有特殊性，这不符合爱因斯坦所信奉的马赫原理，因而原来

的相对性原理概念需要扩展到非惯性参考系。

爱因斯坦认为,不仅速度是相对的,加速度也应该是相对的。非惯性系中物体所受的与加速度有关的惯性力,本质上是一种引力的表现。因而,引力和惯性力可以统一起来。

类似于 16 岁时思考的“追光”问题,爱因斯坦又想到了另一个思想实验:如果我和“自由落体”一样地下落,会有些什么样的感觉?追光实验是个悖论,因为它描述的情况不可能发生。而自由落体实验在现实生活中有可能发生,比如说,设想电梯的缆绳突然断了,电梯立刻变成了自由落体,其中的人会有什么感觉?这个问题如今不难回答,那就是在许多游乐场大玩具有中可以体验到的“失重”感觉。因为那时候,电梯中的人将以 9.8m/s^2 的加速度向下运动。这个加速度正好抵消了重力,因而使我们感觉失重。

加速度可以抵消重力的事实说明它们之间有所关联。加速度的大小由物体的惯性质量 m_i 决定,重力的大小由物体的引力质量 m_g 决定。由此,爱因斯坦将惯性质量 m_i 和引力质量 m_g 统一起来,认为它们本质上是同一个东西,并由此而提出等效原理。爱因斯坦猜想,等效原理将提供一把解开惯性和引力之谜的钥匙。

爱因斯坦的思想实验也可以用图 1-4-1 的例子来说明。

图 1-4-1 所示的是站在宇宙飞船中的人。设想宇宙飞船的两种不同情况:图 1-4-1(a)中,宇宙飞船在太空中以加速度 $a=9.8\text{m/s}^2$ 上升,太空中没有重力;图 1-4-1(b)中的太空船静止于地球表面,其中的人和物都应感受到地球的重力,其重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。两种情形下的加速度数值相等,但一个是推动飞船运行的牵引力产生的加速度,方向向上;另一个是地球表面的重力加速度,方向向下。

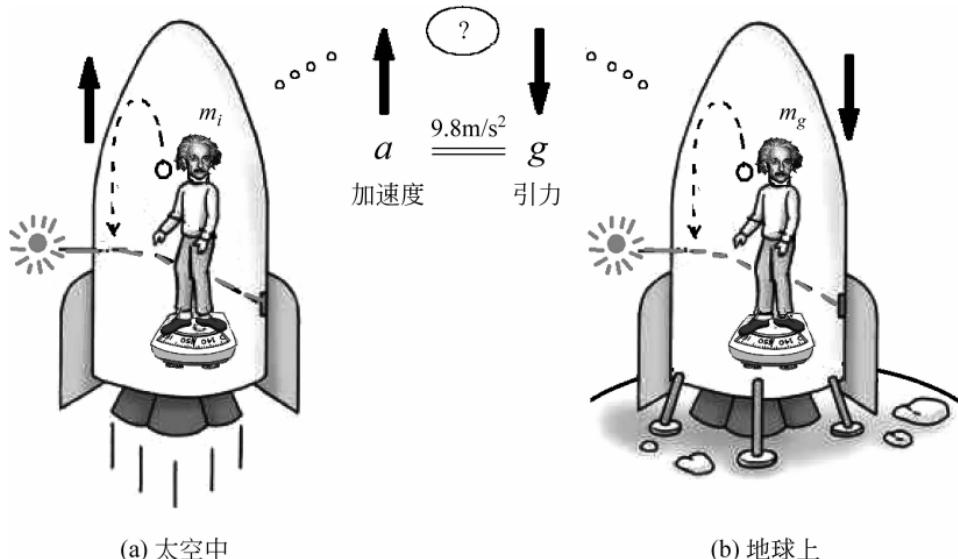


图 1-4-1 爱因斯坦说明等效原理的思想实验

如果引力质量和惯性质量相等的话，飞船中的观察者应该感觉不出这两种情形有任何区别。所有物理定律的观察效应在这两个系统中都是完全一样的。包括人的体重、上抛小球的抛物线运动规律、光线的偏转等。

等效原理揭示了引力与其他力在本质上的不同之处。引力系统可与加速度系统等效，似乎可以用变换“参考系”的方法来将其“抵消”掉！这是电磁力没有的性质。不过，爱因斯坦也注意到，对于引力分布的真实情况，这种“抵消”实际上是做不到的。上述爱因斯坦的思想实验中，图 1-4-1(b)描述的是均匀的重力场，它等效于作匀加速运动的太空船。但是，均匀重力场在宇宙中并不存在。电磁力的情形不同，因为电磁作用只存在于带电物体之间，我们可以通过安排电荷的分布情形来人为造出均匀的电场，如平板电容器两个极板之