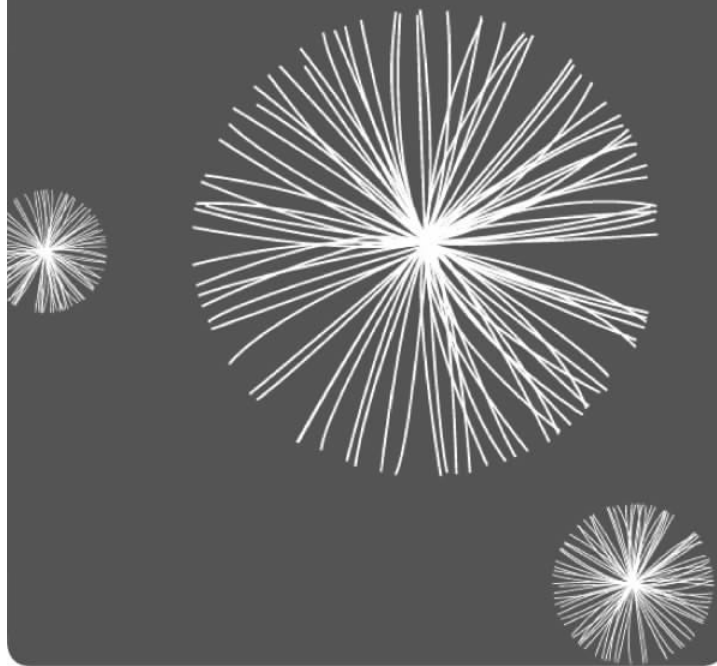


3

伟大的觉醒



现代物理学革命

1894 年美国物理学家迈克耳孙 (Albert Abraham Michelson) 在其对芝加哥大学 Ryerson 物理实验室的献辞中, 提出了后来成为物理学史上最值得记住的一次预言: “物理科学最重要的事实和基本定律全都被发现……我们未来的发现必定要在小数点后面六位里寻找。”

这一言之过早的颂词实在大谬不然。19 世纪末物理学的成功之后, 迎来的是 20 世纪初被称为“近代物理学革命”的惊人的大发展。在迈克耳孙的宣言 10 年之内, 一位名叫爱因斯坦的瑞士专利审查员完全改变了我们的时空观念, 颇具讽刺意味的是, 迈克耳孙本人的工作 (他因此获得 1907 年的诺贝尔奖) 为爱因斯坦的相对论提供了最初的实验基础。30 年之内, 量子理论的发展迫使人们抛弃牛顿的科学宿命论。

这些早期“现代”物理学家的的工作, 彻底唤醒了那些自满自得的物理学家: 20 世纪将是物理学空前或许未来也不会有 (又一预言!) 的最伟大的时代。物理学的灯塔被重新点亮, 它照亮的科学征途远远超出了 19 世纪经典物理学家的想象。

爱因斯坦的相对论

狭义相对论是爱因斯坦关于空间和时间的性质的两个伟大理论之一。它特别优美。狭义相对论基于两个令人难以置信的简单假设。第一个假设是, 光束穿过真空运动的速率永远是每秒 299 792 458 米, 不论你如何加速试图赶上它 (这是迈克耳孙特别精密的实验证明了的, 没有人比他自己更惊讶了)。第二个假设是, 物理学定律对于所有观察者都一样, 与观察者在空间的运动无关。第二个假设的另一种陈述是, 不可能做一个实验来证明一个观察者的参考系“优于” (相对于整个宇宙更接近于静止) 任何其他观察者。

这两个似乎温和的陈述, 得出了许多看似荒诞不经但可用实验验证的结论。这些结论彻底改变了人们的空间和时间——宇宙的机制编织在其中——的观念。度尺缩短, 时间变慢, 空间和时间的概念的界限变得模糊, 物质和能量变为单一的物理量“质能”的两个可交换的方面, 等。



对于粒子物理学家来说,狭义相对论已成为第二天性。它只是一件交易工具。他们熟悉狭义相对论,就像会计师熟悉联邦税则一样。幸运的是,相对论远不像税则那样任意,而且容易掌握得多。

重要的是,我们要谨记质量与能量之间的关系:质量与能量基本上是同一件事。

在爱因斯坦之前,一个不受外力作用的物体的能量 E_k ,被认为是粒子的质量 m 与其速率 v 的平方之积的一半:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

式中,下标 k 代表“动能”,表示这能量是因且仅因物体的运动产生,就是说,当且仅当速率 v 非零。

在我们对于物理世界的描述中,这一定量关系起着重要的作用,因为能量是**守恒**的(一个实验确立的极端重要的事实)。不管发生什么,在发生前和发生后总有同样多的能量在那里。如果一个以速率 v 运动的粒子与另一些粒子碰撞,原来那个粒子获得或失去了多少动能(经碰撞而减慢或增加速度),与之碰撞的那个系统中的粒子便失去或获得了同样多的能量。能量守恒将在本书的好几个地方起关键作用。

爱因斯坦大大修正了这个关系,并在这样做时写下了全部物理学中最著名的一个关系(可是专业物理学家并不叫它“爱因斯坦方程”):

$$E_m = mc^2$$

式中, c 是著名的永远不变的光速——麦克斯韦电磁力场波扰动的传播速度(注 3.1)。

暂时忽略因子 c^2 ,我们看到这方程表明质量与能量是一样的东西。因子 c^2 所表明的,是每千克质量对应于多少能量。光速如此之大(299 792 458 米每秒),这意味着通常数量的质量所对应的能量大得惊人。例如,一克质量要是全部转换为电能的话,将产生一座现代巨型电站一整天的输出。一个**不动**的物体具有能量,而且很多,这个概念是反直觉的。但这反直觉正是爱因斯坦相对论的性质,在很大程度上也是其优美之处。

这样,除了与运动相关的动能之外,我们必须考虑与物体质量相关的能量 E_m 。这“质能”是物体总能量的一部分,不管物体是否运动。简言之,物体总能量是质能



与动能之和。

在碰撞中,在依照能量守恒计算碰撞前和碰撞后的能量时,必须把这两种能量对于碰撞物体能量的贡献一并考虑。如果条件适当,例如,若一个粒子正巧与对应的反物质粒子碰撞,两者互相湮没,结果可能是质能完全转化为动能。或者,若条件适当,动能也可完全转化为质能。

在后一情形下,较轻和较寻常的粒子(如电子、反电子或正电子)可把巨大的动能猛然投向对方,结果使这动能转化为一个重而异常的新粒子的质能。这类新粒子激发理论家对它们进行研究的热情,引向科学认识的重大进展。大约 50 年来,这种方法成为实验粒子物理学的一个工作重心。

粒子物理学家如此熟悉质量和能量的联系,以至于如今他们已养成一种习惯,用质能来称呼粒子的质量。事实上还不止如此。粒子物理学家使用的能量单位并不是我们熟悉的焦耳或尔格,而是电子伏(eV),这个单位来源于粒子物理学家喜爱的玩具:粒子加速器。

可以把加速器想象为一架巨大并极其昂贵的电视机。从其内部电子源发出的电子被电场力加速,射向目标——屏幕。忘掉屏幕,电视机就是一台电子加速器。

加速的电场力之值乘以电子经受加速的距离称为电位差或电压。通过给定电压加速的电子获得一定的动能,若电压正好是 1 伏,电子在加速期间得到的动能就是 1 电子伏。

关于质能单位电子伏的一个要点是,一个具有 1 电子伏质能的粒子,若被其对应的反物质粒子湮没,释放出的动能恰恰这么多。

电子伏是能量大小的一种**一般表达**。任何物体的能量皆可表示为电子伏,电视机里一个电子具有的能量也好,你在看网球比赛时在网上传来飞去的网球具有的能量也好,你在看球时消耗的土豆片和苏打水的卡路里含量也好。

电子是最轻的粒子,其质量已被精确测定,用电子伏来说,其质能约为 511 000 电子伏。这就是说,假若你用某种方法把它的质能转化为动能,释放出的动能将为 511 000 电子伏;这也就是一个电子在经受 511 000 伏之高的电压加速后得到的动能。类似地,一个质子的质能约为 938 000 000 电子伏。已知最重的粒子叫顶夸克,具有的质能约为 175 000 000 000 电子伏(注 3.2)。这也是今日最强大的粒子加速器所能达到的动能,或即每束粒子的动能。比较起来,电视机里一个电子的最



大动能为数千电子伏。所以,如果我们把加速器想象为一台电视机,其图像多少反映宇宙的基本运行,那可真是一台巨大的电视机!

爱因斯坦的广义相对论尽管与本书的主要内容没有直接关系,我们也不能对此只字不提。形成这一理论花费了爱因斯坦 10 年的职业生涯——从 1905 年到 1915 年;他后来承认,这是一个艰难而不确定的时期。结果证明,爱因斯坦的努力是值得的。因为广义理论对狭义相对论时空观的重塑,意味着从根本上彻底告别了狭义相对论,就像后者从根本上彻底告别了相对论以前的经典和常识的时空观一样。广义相对论的宇宙是这样宇宙,在那里我们感觉到的普通的三维世界被更高的维度所扭曲,但我们的感觉器官不能觉察这种扭曲,就像插进球内的一张纸的曲率不会被住在纸上的二维人觉察一样。时空曲率依照一个方程式与宇宙中的质能分布相联系,这个方程式理所当然地被称为“爱因斯坦方程”。和狭义相对论一样,广义理论是容易验证的,如今它是宇宙学即宇宙起源和演化的理论的基础。

量子化：下一次伟大飞跃

近代物理学革命的第二个组成部分(第一个部分是爱因斯坦的相对论),是量子力学的发展。在量子力学的发展中,虽然没有人起着像爱因斯坦在相对论发展中那样的核心作用,但可以提出两位物理学家,他们的工作和思想推动了量子假设迅速变为严格的定量理论。这两位物理学家是薛定谔(薛定谔方程)和海森堡(海森堡不确定性原理)。基本上,是他们在 20 世纪 20 年代中期的几年中把一些迥异的定性概念综合成为简洁有力的理论。仅仅提出这两位遮蔽了其他许多人,特别是爱因斯坦,他勇于以睿智和激进的方式解释某些物理现象,为 20 世纪 20 年代的量子复兴奠定了基础。

由大量同样的自由原子组成的气体,如封在霓虹灯管内的气体,如果受到激发,就开始发光。发光是由于气体中各个原子发出大量短暂的闪光。如果你让这光通过一个棱镜,使其分解为其组成色,你不会看到你所熟悉的连续地从红通过黄和绿到深紫色的“虹谱”。你看到的是,这光由十到二十种离散的颜色或“谱线”组成;虹的其余部分不见了。观察到的颜色和模式是构成气体的特定原子类别的特征,这一原理常常用来识别未知气体的组成。



观察到离散而非连续谱的原因是,气体中各个原子不能发出任意颜色的光,它们只能发出某些“可容许”色。我们说原子系统是**量子化**的,意思是我们可将一个数(量子数)赋予每一种确定的颜色,从而定量地区分这些颜色。物理系统仅能取有限种离散的可容许态中的一种,其行为与此状态相对应,这种性质是量子化现象的本质。

在量子力学中,不但原子,一切物理系统都是量子化的。但这种量子化的效应要能被觉察到,系统必须是“小”的。即使大系统,可能的状态也是离散的;例如一块加热到白热的铁,当通过棱镜观察时似乎发射出虹的一切可能的颜色。其实可能态仍然是离散的,不过因为系统有大量紧挨着的可容许态,看起来它们好像形成了一个像虹那样的连续谱,实际上并非如此。但就霓虹灯的受激气体而言,在霓虹等离子体中,每一原子发射的光独立于所有其他原子,因此,有趣的实际上是单个霓虹原子,它小到足以使量子行为十分明显。

量子理论给了我们“小”这个词的明确概念。“小”,是使量子效应成为可观察的物理尺度。少数几个基本物理常数之一的普朗克常数 h ,与光速一起,是自然定律的标尺。普朗克常数之值可在任何物理学课本里查到: $h \approx 6.6 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒,其中焦耳是将一千克物质举起约十分之一米所需的能量(注 3.3)。普朗克常数之微小(比 1 小约 33 个数量级)告诉我们,量子力学的自然尺度实在非常之小(注 3.4)。

波与粒子

除了量子化现象,量子力学还讲物质的**波动**性。正是通过量子化,而非波动行为,20 世纪初的物理学家开始解开物质小尺度行为的秘密。所以“量子力学”这个名称有一点儿历史偶然性。一个更直接地包含这种新物理学、告别经典观念的名字,也许该是“波动力学”。然而“量子”比“波动”更具革命意味,故“量子力学”大概是更佳的选择,至少从修辞上来说是如此。

粒子是坚硬和离散的,像微细的台球。当两个粒子碰撞时,它们弹射开来,不同于碰撞前的方向和速率运动。更重要的是,粒子具有下述性质:你可以说出它们在哪里。如果你问一个给定粒子的位置,你可以用某种方法(例如照相)来确定地回答这个问题。所以对于粒子,位置的概念是有意义的。在任意给定的时间,



粒子在一个唯一确定的位置上,这个位置至少在原理上可由实验确定。

波与粒子完全不同。拿一根手杖在水池里轻轻上下挪动,水波便由此向前传播,最终以等间隔的上下波动从手杖扩散至整个水池。波究竟在池内何处呢?这是一个没有意义的问题。波并不局限于某个位置,它在池子里到处都是。

事实上,波根本不是一样“东西”,是不是?当然,波携带一定的能量,那是实实在在的,在沙滩上消磨时间的人都知道。但波本身不过就是水分子有秩序地上下运动而已。粒子(在此情形下是水分子)似乎是实在的物体,占有空间等。而波无外乎是这些粒子(从挪动的手杖、风或者别的什么东西)运送能量的一种描述方式罢了。

现在,如果有两根手杖在池子里不同的地方上下运动,产生的两个波并不是像粒子那样互相碰撞。它们穿过彼此运动,在此过程中相互**干涉**,但不改变各自的传播路径。

想象两个相等的波彼此穿过的情形。如果在某个点上,两个波都是峰,峰就两倍高(相长干涉);若一个波的峰与另一个的谷相遇,它们彼此抵消(相消干涉),池塘表面像波到达以前一样高。干涉是波的一种基本性质,也是波区别于粒子的特性之一。如果两个实体相互干涉而不是弹开,那这两个实体一定是波。

波既然不以位置为特征,那以什么为特征呢?简言之,四样东西:波长、频率、振幅和相位。还有其他方式可以表达一个给定的波(如波在水中传播的速度),但其他的性质可用上列四种性质表出。

设想你在大海上的一只帆船里。抛了锚故船是静止的,你爬上桅杆,向前望,你看到无尽的均匀的波浪向着地平线延伸。波浪向你涌来,冲到船头,越过船体,离开船尾。你的朋友在岸上,他在风浪大的时候会晕船。你要通过无线电把波浪的情形告知他,以便让他决定是不是要到船上来。他有多次晕船的经验,所以他在做出决定以前要知道有关波浪的一切。

首先,你注意到波浪越过船时船以有规律的周期上下颠簸。你测量每分钟船上下颠簸的次数,即**频率**或**周期**,并记下来。

其次,你注意到峰和谷之间的高度有固定的差别。这差别就是**振幅**,决定着在相继的波峰之间船颠簸得有多厉害。你仔细测量它,因为你那尚不习惯于海洋的朋友一定需要这信息。



再次,你注意到海浪的峰和谷相隔固定的距离。**波长**即波的两个相邻的峰之间的距离。不管你测量靠近船的波浪或者测量离船 1000 米处的波浪,峰—峰距离都一样。

最后,你认识到,如果你的朋友要知道船何时在浪尖、何时在浪底,你需要测量所谓波的**相位**:当你的手表指着正午时,你在波峰上、在波谷里或是在中间的什么地方?如何适当地定量测量和传送这一信息呢?

解答这个问题的关键是认识到下面这一点:在某种意义上,站在波上与沿着一个圆圈兜圈子十分相似。这一点是第 8 章中我们推导规范理论的一个重要部分,所以你最好记住它。

图 3.1 中,一条狗拴在屋子前院的一根桩上。狗儿打了一个盹儿醒来,左右观望。很快它便烦了,试图离桩而去。但它只能拉直了拴着它的绳子,绕桩转圈子。转过一整圈或绕桩 360° 后,它回到它的出发点上。

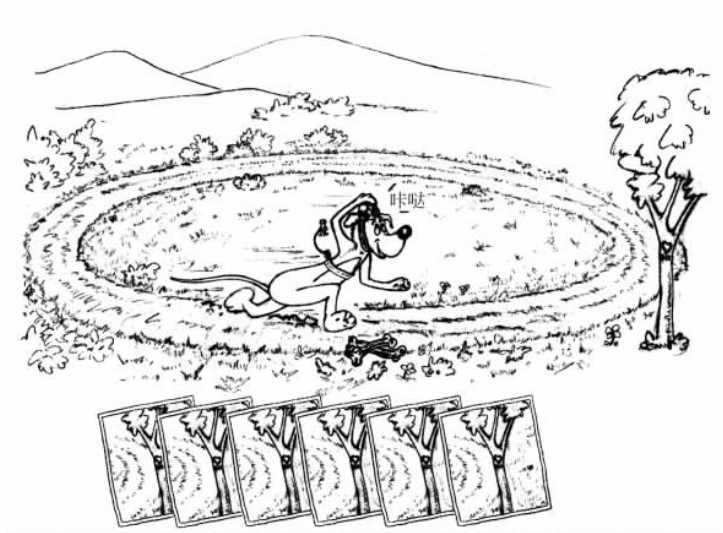


图 3.1 沿圆周绕圈子与随无穷的波浪上下浮动十分类似。当狗儿回到同一点(X 形状的狗骨)上时,一切看来与它跑一圈以前无异。同样,当你浮在下一个波的波峰上时,一切看来与你在上一个波的波峰上时无异(见图 3.2)。



为了在夏天午后做点什么好玩的事,你或许可以训练狗儿用装在它领圈上的相机拍照:每当它走到漆在地面上的 X 处时拍一张。假定你弄妥了这件事。狗儿醒来,它拍一张照,然后它绕桩转圈,每次回到它出发的地方时拍一张。

这些照片洗印出来时你看到什么? 36 张完全一样的全彩色照片。要点是:狗儿转了一整圈(360°),回到出发点。你光看那些照片,你不知道它是站在那里不动拍了 36 张照片,还是在两张照片之间转了一圈或更多圈。

类似地(见图 3.2),你随波从波峰下落再登上下一个波峰后,即使你知道你颠簸了一次,但你无法证明这一点。你在波的顶上,就像你开始前一样。如果你每在波峰上时拍一张照,看洗印出的胶卷的人将无法知道,你是在一个波的冠上时迅速拍了这一整卷,或是以较缓的节奏在每一次拍摄之间等一两个波过去。不管怎样拍,所有你看到的照片都是向着地平线远去的无尽的波,最近的那个波峰就是你在那上面拍照的那一个。就像绕圆周 360° 转一圈一样,你回到你的出发点:无尽海浪之一的波峰上。

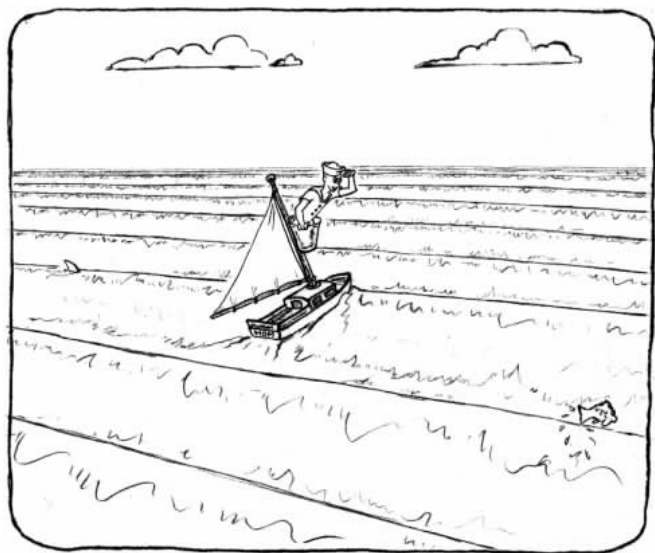


图 3.2 从一个波的波峰到下一个波的波峰整整一个周期后,世界看来一点不变。你所看到的不能让你确定你是在哪一个波的波峰上,就像绕圆周兜圈子,没有任何东西告诉你,你已经兜了多少圈。



假设正午时刻你正好在谷底,两个相邻峰的中间。利用圆圈的比拟,你知道如何定量地记录相位:相对于下一个波峰你在哪里。因为你正在波谷的底上,故你是在相邻两个波峰的中间,即 0° (一个波峰的顶部) 与 360° (下一波峰的顶部) 的中间: 180° , 于是你记录正午时刻 180° 。

有了你记录的频率值,根据这个相位信息,你的朋友应当能够推算出他何时在波峰、波谷或中间的什么地方。你很了不起,完成了这全部的测量,或者至少看起来如此。你通过无线电把这些信息报告你岸上的朋友,等待他做出决定。

最后,等了许久的答案终于出现。波长、频率以及特别是振幅,他似乎都可以接受。但他不明白,为何你费了那么多事去测量相位并报告他。对于他来说,他 1 点 01 分在波谷或 2 点 07 分在波峰有什么关系呢?

但若你对量子力学以及特别是量子力学在粒子物理学标准模型中的应用感兴趣,他可真是教了你重要的一课。因为在量子力学里,总相位没有什么关系。相位不但不影响我们感兴趣的任何东西,而且你不能够做任何测量量子系统总相位的实验。物理系统的量子力学相位是不可测量的(注 3.5)。我们马上要看到,一切系统都具有波动性,因此这一点需要特别注意。

似非而是的是,正是因为相位无足轻重,量子力学的相位概念才在粒子物理学家的头脑里占有重要的位置。相位无意义这一原理及其推广(为保证与相对论和量子场论的基本原理相容),把我们直接引向了物质行为的基本性质的重新诠释。并不是量子力学系统的相位变得要紧,而是相位的不要紧本身被理解为极其要紧。这一概念的严格表述叫做**规范理论**。规范理论是一种**不要紧的要紧**的理论。在这个**矛盾修辞**的灵感里,包藏着粒子物理学精彩的发展史上最深刻的知识飞跃之一。

波粒二象性 1: 光粒子

光是波,不是粒子;在我们明晰了什么是波和什么是粒子的概念之后,这似乎是明显的了。如果你让两束手电筒光相交,它们不会打架,摔在地上。相反,它们基本上互不影响地通过,就像你对真正的波所预期的那样。光可被聚焦和反射,可在折角上衍射从而照亮不直接在原来路径上的地方(这就是为何阴影的边缘是模糊的缘故)。所有这些性质都来源于作为波动基本性质的干涉效应。

