

纪念伟大的科学家爱因斯坦诞辰一百周年

爱因斯坦对二十世纪物理学的贡献

朱保如 钱尚武

(中国科学院) (北京大学)

阿尔伯特·爱因斯坦在悼念普朗克时曾经讲过：“一个以伟大的创造性观念造福于世界的人，不需要后人赞扬。他的成就本身就已经给了他一个更高的报答。”因而对于爱因斯坦本人，当然也毋庸多加颂词赞语；重要的是回顾他不平凡的科学生涯以及他对近代自然科学的贡献，以便从中吸取应有的教益，在崎岖的科学荆途上，使后人借得一片光亮。

一

人类对于自然认识的长河，在经历了一段相对平静的流动之后，往往会出现汹涌澎湃、一泻千里的壮观局面。这是人类认识的大变革时期。

由于哥白尼、布鲁诺等人的英勇和殉身，力学挣脱了亚里斯多德的教义，“从此自然科学便开始从神学中解放出来。”¹⁾其后，主要由于牛顿的卓越贡献，把伽利略、开普勒的研究成果纳入了一个统一的经典力学体系，物理学史上出现了第一次大综合。到了十九世纪，热力学和统计力学日趋完善，物理学已经能从宏观和微观的统一高度上把握物质世界；另外，麦克斯韦电磁理论的创立，完成了电、磁以及光的统一。经典物理学的宏伟大厦就此巍然屹立。

即使这样，当时物理学晴空仍然飘浮着两朵乌云——黑体辐射和迈克尔逊、莫勒实验。到了十九世纪末，一系列新发现使得经典物理学面临新的挑战，物理学大变革时期就此来临。

新的历史时期必定是造就科学巨匠的时代。虽则爱因斯坦并不早慧，然而他从小喜爱自学，擅长独立思考。在瑞士联邦工业大学期间，他自修了当时一些有名物理学家的古典理论物理著作，也研究了麦克斯韦的电磁理论，这使他自已较早地走到了当时科学的前沿。另外，爱因斯坦从青年时代起，便爱好哲学，善于思辨、富有哲理的素养，使他能够站在前人的肩膀上，穿过当时物理学晴空中的乌云，看到新时代的曙光。

爱因斯坦早期的研究条件并不良好。作为瑞士联邦专利局的一个职员，研究工作主要靠业余时间进行。

然而正是在专利局工作的七年，是他富有创造性的岁月。

爱因斯坦于1901年发表的第一篇论文是研究毛细管现象的。其后几年的早期科学工作是在统计力学方面。1905年，爱因斯坦在德国《物理年鉴》上发表了四篇论文，其中一个重要工作是关于布朗运动的理论。早在1827年，植物学家布朗观察到花粉在平静溶液中也会作无规则的运动，爱因斯坦采用分子运动论处理了平静溶液中这种微小粒子的运动。那时，关于分子的存在以及它们的热运动，争议尚在进行。因而，爱因斯坦的工作具有重要意义，致使他在1905年获得了慕尼黑大学的博士学位。

然而，爱因斯坦具有突出意义的两方面工作，乃是发展了普朗克的光量子学说以及狭义相对论的创建。

二

对于光的本性的争论，持续了好几个世纪。后来，由于解释干涉、衍射现象的成功，波动说获得了较大的胜利。随着麦克斯韦电磁理论的创立，波动学说已经登峰造极。既然是波动，能量应该是连续的。

然而，到了十九世纪末，在处理黑体辐射问题上，热力学与经典统计力学遇到了不可逾越的困难。从经典统计力学看来，如果我们把黑体腔壁物质和腔内辐射场看作是一系列简谐振子的振动，那么可以求得频率间隔 ν 与 $\nu + d\nu$ 之间单位体积内的自由度数为 $8\pi\nu^2 d\nu/c^3$ ，因而在这一间隔中的辐射能为

$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \bar{u}_\nu$$

\bar{u}_ν 是每一自由度的平均能量。根据“能量均分定理”，应有 $\bar{u}_\nu = kT$ ，这样 $u_\nu d\nu = \frac{8\pi}{c^3} kT\nu^2 d\nu$ 。这就是瑞利-斯公式，这一公式在低频区域与实验十分符合；但在高频区域，完全不能用，因为它随着频率的无限增加而趋

1) 恩格斯，《自然辩证法》，人民出版社，1971，第8页。

于无穷。另外,从原则上说来,它还不能解释辐射场与物质如何能达到平衡状态。因为具有无穷多个自由度的辐射场必定会把具有有限自由度的物质能量全部夺走而使物质冷却到绝对零度。经典理论所遇到的上述致命困难称作“紫外灾难”。

为了驱除这个令人困惑的灾难,德国物理学家普朗克在1900年提出了一个大胆假设,他认为黑体腔壁物质中存在着很多简谐振子,它们不断与空腔中的辐射场发生相互作用(发射并吸收)。但是他假定简谐振子的能级不是连续的,而只能取一些分立值 n, h, ν 其中 n 是正整数, h 就是普朗克常数。采用这一假设之后,前面所说的黑体辐射的能量分布公式便成为

$$u_{\nu} d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3 d\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}.$$

这一以普朗克的名字命名的辐射公式与实验结果完全符合。在低频区域,它近似地化为瑞利-斯公式;在高频区域,它的近似公式为

$$u_{\nu} d\nu = \frac{8\pi}{c^3} h\nu^3 \exp(-h\nu/kT) d\nu.$$

这就是维恩在1896年得到的公式。

普朗克的理论取得了圆满的成功,但是能量分立的假设,与经典物理学的连续观念是如此抵触,以致在当时被视作一个“怪胎”。普朗克本人在以后一段时期中,对此也表现出犹疑。

正在这样一个物理学史的关键时刻,爱因斯坦把革新的旗帜高擎起来。1905年他的题为《关于光的产生和转换的一个试探性观点》的论文,的确如他本人认为的那样是“十分革命的”。他进一步发展了普朗克的观念,认为辐射场(电磁场)本身就是由一个个光量子(现在叫光子)组成的。每个光量子的能量为 $h\nu$ 。采用这一新观念,除了同样得到普朗克公式之外,爱因斯坦还解决了当时几个令人迷惑的现象。如荧光、光致电离,特别是光电效应。

1907年,爱因斯坦又把能量量子化的观念运用到固体比热的研究上去。早在十九世纪初,德国物理学家杜隆与珀替发现了一条经验规律:单原子固体的比热与原子量的乘积是一常数。可是后来发现固体的比热在温度较低(有时是常温)时,远低于杜隆-珀替定律给出的数值。爱因斯坦假定固体的原子以同一种频率振动,让振动能量取前面那样的分立值,便十分简单地解释了上述偏离,并且证明固体比热随温度一起趋于零。后来又经过其他人的共同努力,建立了固体比热的完备理论,揭示了固体中的热、光与弹性运动之间的联系。

由于爱因斯坦的工作,“量子”这一新观念成为新物理学的基本要素。关于光的本性的认识,随之也螺旋式地上升到了一个新阶段:光既是一种波动,又是一种微粒。

物理

1908年以后,爱因斯坦把工作重点转向光量子的成因,但是,几年的紧张探索没有取得成功,因而他转向引力理论的研究。当他1916年重又回到量子论上时,局面已经大为改观。这时,玻尔的原子模型已经建立:原子内部的电子轨道也是分立的。爱因斯坦把玻尔的原子模型应用到黑体辐射问题上来,重新推导了黑体辐射定律。这一新的推导特别简洁、十分普遍,爱因斯坦认为这才称得上是真正的“推导”。不过,更重要的是,爱因斯坦在这一工作中引进了自发辐射和受激辐射的概念。正是受激辐射的理论观念,为四十年以后迅速发展起来的一个重要科技领域——激光,奠定了理论基础。而当今的激光技术对于人类未来的物质文明正展示着难以估量的前景。

1924年,印度物理学家玻色把辐射场作为光子气体处理,导出了普朗克公式。他把这篇论文寄给爱因斯坦。爱因斯坦看到这篇文章后,亲自译成德文,并且把玻色的新的统计思想进行推广,发展了一个关于物质粒子的类似理想气体的统计理论。这就是玻色-爱因斯坦统计。

爱因斯坦关于光的波粒二重性、光子气体与粒子气体的深邃思想,处于当时物理学思想的前沿。因而当他获知法国物理学家德布罗意提出了著名关系 $E = h\nu$, $p = h/\lambda$ (p, E 是粒子的动量、能量; ν 与 λ 是频率与波长)之后,他立即接受了物质波的概念。并且提出许多可能实施的实验。德布罗意提出的、爱因斯坦支持的物质波的概念,促使玻恩在1927年提出了关于波函数的统计解释。不过,爱因斯坦直到临终为止,一直对量子力学的统计描述持有强烈的异议。他与尼·玻尔展开了持续不断的论战。1935年,他与波图尔斯基和罗逊写了一篇论文,举出了一个例子,原则上动量、坐标这一对互补物理量可以同时具有实在性,这一点恐怕至今还是一个疑案。

无论如何,爱因斯坦不相信物理学的基本理论是统计性而不是决定性的,因为他坚信“上帝不会是在掷骰子”。爱因斯坦的亲密合作者英菲尔德有一次问他:“为什么你对量子理论如此不满意,特别是对后来的发展不满意?而事实上这种发展是从你自己的工作起始的。”爱因斯坦回答道:“是的,可能是我使得量子力学发展起来,但我总是认为量子力学的观念是权宜之计。我决没想到其他人会比我如此认真地采纳了这些观念。”

的确,爱因斯坦后来选择了一条与他大多数同事分离的道路。为此,玻尔认为:“我们中的许多人认为这对他说来是个悲剧,因为他独自一人摸索前进;而对我们说来,这也是个悲剧,因为我们失去了领袖和旗手。”不过,关于量子力学的基础,争论一直在进行。究竟是爱因斯坦具有连他自己也无力实施的洞察力,还是他的机械决定论驱使他走上死胡同,这一点恐怕要

由未来的科学实践来判定。

三

狭义相对论的创建同电磁现象密切相关。光是一种电磁波,人们认为这种波动像声波一样,必定存在着一种媒质作为载体,这就是所谓“以太”。按照牛顿的观念,时间是绝对的,同时也应该有绝对空间。这种弥漫在宇宙中的“以太”,便是绝对空间的化身,而麦克斯韦方程仅仅在相对于绝对空间静止的参考系中才成立。

如果情况确实如此,那么由于地球运动,应该能够观测到“以太风”。1886年,被称为“判决性实验”的迈克尔逊-莫勒实验问世了。实验的主要装置是水平方向和垂直方向的两个干涉臂。假若确实存在“以太风”,那么当把整个实验装置转过 90° 后,两束光的干涉条纹会有移动。但是不同季节的观察几乎都给出了否定结果。这表明,假若确有“以太”存在,那么除非地球完全带动了“以太”。然而,早在1851年,斐索做了个实验,观察流水对于光线传播的影响。结果发现有一个“拖曳系数”,完全与费涅耳公式相符。而按照洛仑兹的电子论,这就要求“以太”完全不被流水带动。这样,在“以太”是否能被运动物体所带动的问题上,出现了进退维谷的局面。当然,还有另一类实验,如像1902年特鲁顿与诺布尔的平行板电容器实验,完全与麦克斯韦方程只能在以太静止系中成立的观念相冲突;而1901年考夫曼发现的阴极射线质量随速度增加的实验,则直接动摇了牛顿运动定律。

这一系列的疑难,激起了当时物理学家的新探索,特别是洛仑兹与庞加莱这两位先驱者,他们作出了杰出的贡献。

然而,以彻底的创新精神革新了旧有观念,这要归功于爱因斯坦。1905年,他的《论动体的电动力学》一文的发表,宣告了狭义相对论的创立。

爱因斯坦注意到电磁感应现象的不对称描述并非现象本身所固有的,再考虑到“以太”根本观察不到的事实,他认为绝对参考系不是一种客观实在。凡是运动都是相对的,所有惯性系应该处于平权的地位。而一切物理现象,无论是力学现象或者电磁现象,在所有惯性系中应该具有相同的规律。这就是著名的相对性原理。

相对性原理要求所有物理定律的形式对于惯性系之间的变换是不变的。因而必须扬弃作为绝对空间化身的“以太”观念,并且去寻找一种新的时空坐标变换。爱因斯坦从光速不变假设出发,据此规定了不同地点的“同时”,建立了新的“时间”观念。进而根据光速不变和相对性原理¹⁾,推得了一种新的时空变换——洛仑兹变换。虽则这一变换大约在一年前已由洛仑兹得到了,但是在爱因斯坦的理论中,它的诠释是崭新的。

麦克斯韦方程对于洛仑兹变换是不变的;然而牛顿运动定律则不然。因而爱因斯坦重新改造了力学定律,使它同样符合相对性原理的要求。

狭义相对论的创立对于人类的时空观念带来了根本的变迁。在此以前,根据牛顿的绝对时空观念,物质及其运动是与时空分离的:空间是个广袤无边的大容器,时间就像永远流逝的背景;万物运动就在其中展开。然而,狭义相对论表明,由于物质运动存在一个速度上限(真空光速),时间和空间不再是分离的,它们连成一个有机整体,而且同运动状态紧密相关。相对论的时空观念后来经过爱因斯坦的老师闵可夫斯基进行数学加工而显得格外明显:时间和空间构成一个四维的伪欧空间(闵可夫斯基空间),而洛仑兹变换相当于这一四维时空中的转动。

狭义相对论的创立,重新改造了整个宏观物理学理论,把它扩充到高速运动领域。而老的理论乃是低速运动下的近似。当代自然科学的一个前沿领域——高能物理(粒子物理),如果没有狭义相对论是完全不能想像的;反过来,也正是这一领域的大量实验支持了相对论的许多预言。

爱因斯坦狭义相对论还带来了重大的社会应用。在1905年发表的另一篇论文中,爱因斯坦提出了著名的质能关系 $\Delta E = \Delta mc^2$;1907年又进一步论证了质能等价: $E = mc^2$ 。这一重要发现成为近代原子能利用的理论基础,揭开了原子核能的新时期。

四

如果说狭义相对论乃是当时人类对于高速电磁现象进行日积月累研究的产物,布满了集体探索的足迹,那么广义相对论则更多地铭刻着爱因斯坦个人思辨的痕迹。

1907年,爱因斯坦就开始转向狭义相对论的可能推广。他最初仍然从洛仑兹不变性出发,企图修改牛顿引力理论:保留经典引力理论中的标量势,在势方程中加入二次时间项。(这种企图,其他人也作了尝试。)但是由于物质的惯性与能量有关(亦应与水平速度有关),这一结果与所有物体在引力场中具有相同加速度这一事实相矛盾。因而,他改变了前进道路,从上述基本事实中,引出了等效原理:一个匀加速系统所看到的运动,与存在有引力场时惯性系中看到的运动是完全相当的。也就是说,在时空小范围内,加速系与引力场等价。在其后的几年中,爱因斯坦沿着这一道路摸索前进。

1911年,爱因斯坦著文论述了引力场对于光线传

1) 现在我们知道,仅根据光速不变假设,就足以导出洛仑兹变换。

播的影响,得到了光线在引力场中弯曲的结论。不过其定量结果与后来得到的正确理论值相差了一半。1912年,爱因斯坦发表了两篇论文,力图建立一个包含等效原理的引力理论。其特点是静止引力场是由局部光速所标志,相当于用局部光速替代了牛顿引力势。

不过,爱因斯坦深信相对性原理应该在更为广泛的意义下成立,即物理定律的形式应该对于任意的坐标变换说来都是不变的。因而他转而考虑任意的坐标变换,希望找出一种能把静止引力场的情况作为一个特例包括在内的普遍理论。在朝着这一目标前进的道路上,当时和他一起在母校任教的大学同学格罗斯曼,从数学上帮了他大忙。1913年,他们联名发表的论文《广义相对论和引力理论纲要》勾划出广义相对论的主要面貌。关键的一步是找到了合适的数学工具——微分几何,从而认识到必须要用十个函数(它们表征每一时空点的度规性质),而不是由一个标量函数去描述引力场。

到了1915年3月25日,爱因斯坦在普鲁士科学院宣称已经找到了正确的引力场方程,不久发表了这一结果。同年10月,希尔伯特在哥廷根从变分原理的角度也得出了引力场方程。接着,爱因斯坦又著文解释了水星近日点的进动。对于这一现象,当时已经有人指出不能用牛顿理论加以满意的解释,爱因斯坦这一工作可以说是广义相对论的第一个实验验证。此外,在这篇文章中,爱因斯坦还得到了光线掠过太阳时的正确偏转值,它刚好是以前所得结果的两倍。

1916年发表的题为《广义相对论的基础》的论文,是爱因斯坦这方面工作的总结,它标志着广义相对论的最终建立。按照这一引力理论,引力场“消失”了,但仍然有电磁场。物质的存在使时空产生了弯曲。时空性质由十个度规函数表征。引力效应由时空的几何性质加以体现。

广义相对论的理论体系的确十分优美,不过任何一个理论的价值最终还是在实践。1919年5月29日,在科学史上是一个不平凡的日子。由爱丁顿和戴逊率领的两支探险队利用日全食的时机,通过观察证实了光线弯曲现象。这一广义相对论预言的被证实,自然使得爱因斯坦获得了更大的声望。1921年,爱因斯坦荣获了诺贝尔物理学奖,不过主要是为了表彰他在光电效应方面的贡献。

创立广义相对论之后,爱因斯坦接着考虑把它应用到宇宙大尺度的范围。当考虑引力场方程的边界条件时,自然也会转向这一方面。最初,他在场方程中加进了一个修正项(宇宙项),构造出了一个静态“宇宙”模型。其特点是有限而无界。这一工作发表于1917年。到了1922年,弗里德曼发现了两种非静态的膨胀模型。爱因斯坦立刻认识到添加宇宙项是完全不必要

的。以后随着哈勃发现了宇宙红移效应,爱因斯坦与荷兰天文学家德·席脱合作,建立了一个膨胀模型。如果把空间想像为二维的,那么根据这一模型,整个宇宙相当于一个不断膨胀着的气球面。另外,爱因斯坦还在1936年预言了引力波的存在。这些奠基性的重要工作,导致了近代一门新学科——相对论天体物理与宇宙论的蓬勃发展。然而,也必须指出,在这些领域中,无论从科学或哲学角度,都存在着重大的争议。

广义相对论成功地把引力效应归结为时空几何的弯曲,然而电磁场仍未几何化。爱因斯坦认为,这种理论处理上的差异是不应该的。另外,引力场存在着奇点,这也使他感到不满意。因而,爱因斯坦差不多花了后半生的精力,企图建立一种能够克服上述缺陷的统一场论。这种长期的顽强努力虽则并未取得多大成功,然而近来正在受到热衷探索的规范场理论和统一场论,其思想源头或许也要追溯到爱因斯坦。

五

统观爱因斯坦的科学业绩,完全证实了列宁的话:他是一位“自然科学大革新家”。在整个科学史上,也许只有牛顿的业绩才能与之媲美。

一个理论自然科学家,在某种程度上必定也是一个哲学家。爱因斯坦更是如此。在他看来,自然科学如若没有认识论作为基础,乃是不可思议的,即便有的话,那也是一种“蒙昧”而“混沌”的东西。早在大学时代,爱因斯坦发起组织了三人哲学小组,起名为“奥林比亚科学院”。他们阅读了马赫、休谟的唯心主义著作,也阅读了斯宾诺莎的唯物主义著作。爱因斯坦并没有一个清晰的哲学思想体系,他的哲学思想是庞杂而有变化的。不过仍然富有哲理原则。

爱因斯坦早年主要受马赫和休谟的影响。然而,作为一个自然科学家,他主要汲取了注重实践经验、不信任任何“先验”原则的积极方面。由此形成了他对旧有理论的彻底怀疑态度,这一点对于他的早期科学活动起了积极作用。到了创立广义相对论时期,他的思想起了变化,朝着注重理念的方向发展。也许可以这样说,笃信哲理和注重经验,在爱因斯坦身上得到了统一体现。就科学思想而言,运动的相对性和经典决定论的信念始终贯穿于他的整个科学生涯。

1921年,著名的德国物理学家劳厄曾经写过一段话:“当今,对于广义相对论有许多赞美,也有许多诅咒。但是从两种角度叫得最响的人,有一个共同之点:他们对于自己所说的东西,简直一无所知”。当然,半个世纪以后的今天,情况已经大不相同了。但是对于爱因斯坦的哲理观念和科学道路,仍然需要作出全面、深刻、科学的研究。

(下转第373页)