《中国科技史杂志》第 26卷 第 1期 (2005年) : 5～11
The Chinese Journal for the History of Science and Technology Vol 26 No. 1 (2005)

风光无限的 1905年:爱因斯坦奇迹年

约翰 ·施塔赫尔
(波士顿大学,美国)

编者按 1905年是爱因斯坦的奇迹年,也是现代物理学的奇迹年。这一年爱因斯坦发表了 5篇划时代的物理学论文,不仅充实完善了经典物理学,而且奠定了 20世纪新物理学的基础。值此爱因斯坦奇迹年 100周年之际,本刊发表此文以回顾那一段激动人心的历史。作者约翰 ·施塔赫尔是美国波士顿大学物理学教授和爱因斯坦研究中心主任,担任《阿尔伯特 ·爱因斯坦文集》主编。本文的简短版本已经发表于英国《自然》杂志 2005年第 1期 (*Nature*, vol 432, 20 January 2005, pp. 3～5)。这里发表的是作者为本刊特别提供的原稿全文。

中图分类号 N091 O4-091
文献标识码 A **文章编号** 1673-1441 (2005) 01-0005-07

1904年底,倘若有一位读者碰巧瞥了一眼一位名叫阿尔伯特 ·爱因斯坦 (Albert Einstein)的瑞士专利局小职员在《物理学年刊》(德国最重要的物理学杂志)上发表的文章,那么他就会看到只有 5篇文章 ——其中第一篇发表在 1901年,作者时年 22岁。这些文章就是他的全部著作,而且没有一篇特别出色而足以使我们这位假想的读者能预见到爱因斯坦接下来的 5篇论文[1～5]的性质或份量。这些论文都在 1905年投给了《年刊》,这是他的奇迹年 (annus mirabilis)。

若是一位与他过往甚密的人,像他的物理系的同学,后来成为他妻子的米列娃 ·玛丽琦 (Mileva Mari),或他的老朋友、专利局同事贝索 (Michele Besso),肯定比那位读者更能预见到即将发生的一切。这些人知道,至少从他在瑞士联邦工学院的学生时代起 (1896～1900年),年轻的爱因斯坦对理论物理的基础已倍感兴趣。在这个领域,他不断地探求他的前辈们所筹建的大厦,讨论它的优劣,并已经开始提出对大厦的基础进行修正[6]。

1 对牛顿传统的新挑战

机械论世界观以艾萨克 ·牛顿 (Isaac Newton)的关于物质微粒的运动学和动力学的《原理》一书为基础,并以他的极其成功的引力理论为登峰造极之举。这一世界观在 19世纪中,先是受到了光学的挑战,而接着又受到了运动物体的电动力学的挑战。牛顿的光微粒说不再站得住脚:它假定光粒子从低折射率的媒质传到高折射率的媒质时速度会加快,以此来解释斯奈尔折射定律。1849年,傅科 (Foucaut)和裴索 (Fizeau)实验证明了光速减慢,如与牛顿同时代的惠更斯所支持的对立理论光的波动说所预言的一样,光的微粒

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

说与波动说的争论似乎已经结束。现在的问题就是要把光的波动理论与牛顿世界图景的其余部分相兼容。以太——这种假设的媒质,认为通过它光波可以不依靠普通的、有重量的物质而传播——似乎为牛顿的绝对空间提供了一个物质化身。不过,解释以太与有重量物质之间的关系成了一个严重的问题:物体运动时是否全部或部分地带动以太,或者说以太仍然保持静止吗?事实证明,无法把这些假设的推论与关于运动物体光学的新实验结果调和在一起。

裴索实验和菲涅尔拖曳系数

假设 $c_{med} = c/n$ =水中光速

v_{lab} =水速 "实验室"

c_{lab} =光速 "实验室"

那么 根据伽利略速度合成原理,实验室中的光速 c_{lab}应该是 $c_{lab} = c_{med} \pm v_{lab}$,正负号视水流方向是否与光的传播方向一致而定。

裴索事实上在 1850年做了这样的实验,并且根据两束光线的干涉效应,确实得出这样的结论 $c_{lab} = c_{med} \pm fv_{lab}$,这里 $f = (1 - 1/n^2)$。

系数 f叫做菲涅尔拖曳系数,因为它开始时解释为以太受媒介的拖曳而获得的这个媒介速度的分量大小。现在裴索的结果被看作速度速成相对性原理的一个特例,而后来爱因斯坦把这次实验称为"支持相对论的一个关键性的检验"①。

在 1818年,菲涅尔(Fresnel)提出了一个解释所有已知现象的公式[7]。根据菲涅尔的公式,在运动的透明媒介中,光只是获得了其在静止媒介中的速度的一部分,其分量大小取决于该媒介的折射率。这可能意味着,伽利略(Galileo)的速度合成定律很可能对光不适用——正如我们现在已经知道的那样。但是,如此激进的解释方案在当时是不可思议的。菲涅尔这样解释他的公式,就是假定以太部分地受到运动媒介的拖曳而跟着运动——他的方案告诉了我们被拖动的速度分量大小。利用太阳光线的平均折射率,该方案解释了布拉德雷(Bradley)的恒星光行差定律(1726年),预言了裴索的移动水介质中的光速实验结果(1851年),而且还预言了一切试图在一阶项上(以 v/c表示,其中 v表示地球速率,c表示真空中的光速)探测地球穿过以太的运动实验的失败。但是不同颜色的光有不同的折射率,而且精心的实验表明,对每一种颜色,对在双折射媒质中的每一束光线,都不得不假定拖曳的量是不同的。公式固然很好,但是它显然需要一个不涉及以太拖曳的解释。直到 19世纪的最后 30几年里,许多物理学家都敏锐地觉察到了这一问题。[10]

麦克斯(Maxwell)韦表明,光能被解释为一种电磁场的运动并遵循所谓的麦克斯韦电磁方程。此后人们认识到,光学问题不过是在试图调和运动物体的电动力学与牛顿运动学和动力学的冲突时所面临的相似问题的特例罢了。这样又造成了新的问题,比如当一个充电电容器通过以太时,特鲁顿(Trouton)和诺布尔(Noble)无法(1902年)探测到所预测的转动扭矩。

① Albert Einstein *Relativity: The Special and General Theory.* tr. Robert Lawson. New York: Crown Publishers, 1961, p. 41.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　洛伦兹挽救牛顿理论的尝试

临近 20世纪末,通过对麦克斯韦方程的解释,洛伦兹似乎已经克服了所有的这些问题。他认为,电磁以太是完全静止的(没有拖曳!)。物质是由带电粒子组成,当它们在以太运动时产生电磁场,而且反过来由于这些电磁场它们也受到一种力,现在称之为洛伦兹力。

尽管在力学中对首选的惯性坐标系无法彼此区分(这种效果常常被称为伽利略相对性原理),但是在电动力学与光学中情况似乎已经有所不同。静止的以太提供了一种首选的惯性坐标系,而以太中的运动应该是可觉察到的。然而,借助光学、电学或磁学效应来探测这种运动的所有尝试均一再失败。洛伦兹成功地解释了为什么。他证明了他的理论不用假定拖曳就能够解释菲涅尔公式。这样,对一阶效应 (v/c)敏感的实验都理应探测不到在以太中运动的效应。直到 19世纪 80年代,人们没有做过更为灵敏的实验,而对所有先前实验的失败的解释实际上是洛伦兹理论的最为辉煌的成就。

3　风起云涌

牛顿力学现在似乎是经受住了光学和电动力学的挑战,但其破败的种子已经播下。在菲涅尔公式的一个证明中,洛伦兹顺势引进了一种从牛顿绝对时间到一个新的时间变量的变换,它对每一个在以太中运动的惯性坐标系而言都是不同的。由于绝对时间和他提出的新时间的关系因地点的不同而不同,洛伦兹把它称之为该参照系下的"当地时间"。洛伦兹把这种从绝对时间到当地时间的变换看作一种纯数学手段,是一种对证明物理结果有用的手段。

庞加莱(Henri Poincare),这位对物理学问题有着广泛涉猎的伟大数学家,能够在牛顿运动学的框架下对当地时间给出一个物理上的解释:当地时间是指在相对于以太中运动的参照系中静止的时钟所会显示的时间,如果时钟是用光信号来校对,而且没有考虑该参照系的运动。这是一个重要的暗示,说明运动物体的电动力学和光学问题与时间概念有关。不过,下文就要知道,还是爱因斯坦最终决定与这种绝对的时间概念分道扬镳,认为一个惯性系中的"当地时间"与另一个惯性系中的"当地时间"在物理上具有同样的意义,因为不存在什么二者可以与之比较的绝对时间。

在洛伦兹的理论完善之时(1892年),它已是步履维艰。迈克耳逊(Michelson),这位光学干涉测量的专家,成功地做了一次旨在探测对以太中运动的,对二阶效应即 $(v/c)^2$ 敏感的实验。根据洛伦兹的理论,这回实验本该成功,但是却失败了。为了解释这种失败,洛伦兹开始引进在运动惯性系中新的空间坐标变换来修订其理论。为了使这种数学变换能够剔除预计的二阶效应,洛伦兹本人把这种效应解释为对应于刚体在其在以太中运动方向上的由运动引起的真的收缩,原因是组成该刚体的粒子受到了电磁力的作用。现在我们把这种效应称之为洛伦兹收缩,尽管由于爱因斯坦的研究,我们现在把它看作是在两种惯性系下比较长度的所引起的纯粹的运动学效应,而不是由于在以太中运动而引

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

起的动力学收缩。终于 (1905年)洛伦兹也不得不修改了他对当地时间的定义 ,而且就是这个修改了的定义在形式上与 1905年爱因斯坦导出的运动学时间变换定律是一致的。

4 分子运动论的挑战

尽管在与电动力学的一致方面存在着问题 ,但是在 19世纪末机械论世界观远非山穷水尽。麦克斯韦、克劳修斯 (Rudolf Clausins)和玻耳兹曼 (Ludwig Boltzmann)进行了一系列卓越的理论研究 ,这些研究开始表明 ,物质的分子运动论模型可以解释那些由经验得出的热力学定律 ,先是适用于气体 ,尔后经拓广而适用于液体和固体。这些物质的许多特性 ,如它们的导热性及粘滞性 ,也能根据这样的模型来解释。但是热的分子运动论有许多方面还不清楚。例如 ,那些支配构成物质的粒子的行为的力学的时间可逆性原理 ,是如何造成大体质物质的由热力学第二定律概括的时间不可逆性行为的。

濒临 20世纪末 ,有一群有影响的物理学家 ,特别是物理化学家 ,叫做“唯能论者 ”,向整个热的分子运动论发起了挑战 ,要求所有的物理学都应该基于能量的宏观概念 ,并且对原子 分子假设本身提出了质疑。如果能量学是正确的 ,那么热力学定律也绝对没错 ;而根据分子运动论 ,这只是对一个通常体积大小的物质中巨大数量 (阿伏伽德罗常数)的分子某种平均作用而极可能产生的结果 。因此 ,证明有热力学定律的微观反例存在是对分子运动论的一个关键性考验。

5 空腔辐射的挑战

新发现的支配热平衡电磁辐射的定律 [之所以德语称为“空腔辐射 ”—— *Hohlraum-strahlung*,是因为 ,如果由器壁围成的空腔在某个固定温度下 ,就达到了这种辐射状态 ;之所以英语叫黑体辐射 ,是因为这是一个完全吸收体 (因此表面是黑色的)在某一固定温度下产生的辐射]也构成了一种挑战。这种挑战既是实用上的 (人们利用这种辐射来提供一种急需的气体照明标准和新的电子照明设备) ,又是理论上的。单位体积内黑体辐射的全部能量 ,以及它如何依赖于温度 ,热力学和电气力学的已知定律都能给予解释。但是辐射能量在不同频谱的非均匀分布与经典计算值不符 :如果一直坚持这种经典理论 ,就会导致荒唐的结论 ,无论是多么低的辐射温度 ,单位体积内的能量是无限的。在世纪之交 ,实验已经得到了相当完美的能量频谱分布 (普朗克定律)。这就有必要寻找普朗克经验公式的理论解释。在 1900年 ,普朗克提出了这样的一个解释 ,但是这一解释所意味的物质结构和辐射组成都仍然模糊不清。

6 爱因斯坦加入 :保护经典物理学

爱因斯坦关注着我们所提到的存在问题的所有领域。因为他远非一个彻底的革命者 ,一直到 1904年 ,爱因斯坦的首批论文关注的还是进一步发展经典物理学 ,特别是热的分子运动论和热力学。他试图弥补那种理论中他认为存在的某些缺口 (他后来意识到这

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

些缺口是出于他自己对已有文献的了解不足)。直到 1905年,爱因斯坦一直既想证明分子确实存在,方法是说明如何根据液体中悬浮颗粒的液体粘滞性的效应估计出分子的大小,又想证明分子运动论的必然性,方法是说明热力学定律的微观反例确实存在。也就是说,涨落现象,尽管与纯粹的宏观热力学不符,但却易于用分子运动论解释,事实上能够被观察,而且以布朗运动的形式被观察了一个世纪,期间人们实际上一直是眼瞧着想要找的热力学定律的微观反例。

在该领域中爱因斯坦的工作得出了下列公式:

(1) 溶剂的粘度变化,可表示为一个现有溶质百分比函数 (为提醒大家人无完人,我不妨指出爱因斯坦对这个系数的计算原先是错误的。只是在发现了与实验矛盾之后,他才在 1911年发现该错误并发表了修正的结果)。

(2)液体中悬浮颗粒的扩散系数。

(3)单个粒子的平均位移的变化,可表示为一个粒子被观察的时间段的函数。

事实上,这最后一项结果是从理论上成功地处理随机过程的第一个范例。从实际应用来看,爱因斯坦的这些研究结果经常被各种各样的领域引用,如空气中的气雾颗粒研究,牛奶的特性研究,以及半导体物理学的研究——事实上,其引用率比他的 1905年发表的其他论文都高。

7　批判经典物理学

面对试图用机械观来解释电磁场的失败,一些物理学家 [如马克斯·亚伯拉罕 (Max Abraham)]想用基于麦克斯韦理论的电磁世界图景来替换机械论的世界图景,那就要为力学定律给出电动力学的解释。另一些物理学家 (如马克思·普朗克),面对经典物理学不能解释黑体辐射的频谱的情况,想用经典力学或麦克斯韦理论来做修修补补的工作——具体地说,就是修改那些支配机械振荡器与电磁辐射场之间的能量转换的定律。但是,爱因斯坦对热辐射问题的极度关注使他在 1905年得出这样的结论,经典力学和麦克斯韦电动力学都不可能是完好无损。考虑到普朗克关于作用量子 h的发现,两者都不得不被修正。热辐射定律,以及物质与辐射之间的能量转换定律,需要物质与辐射的量子理论来解释。只是这一方面工作,爱因斯坦才把它说成是“异常革命性的”[8]。

在他的第一篇论量子的论文中,他提出位于高频区的电磁辐射可看作由“光量子”组成,这是非常激进的一步,实际上当时没有人能像他一样能接受它。普朗克本人也不相信,而且在几乎十年后,在推荐爱因斯坦在普鲁士科学研究院谋职时,他仍觉得那是爱因斯坦明显的失态,所以要为他开脱。[只是到了康普顿效应 (1923年)发现之后,光子概念才深入人心。]

两年后,即在 1907年,爱因斯坦把量子理论应用到固态晶体。把晶体看成是具有量子化能量的粒子在其平衡位置振荡的系综,他就能解释这种固体低温时的反常低比热这一长期以来的难题。事实上,正是由于实验成功地证实了爱因斯坦的比热公式,量子理论才首次引起了绝大数物理学家的注意——并且帮助他获得了柏林的邀请。[9]

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

8 完善经典物理学

爱因斯坦从未把自己对导致现今称之为狭义相对论的一系列问题的研究看成是革命性的——至少不像他看待他关于量子理论的研究那样。而是相反,他把他提出的新运动学看成是经典物理学的顶点和终点。他对运动物体的电动力学问题长达10年的对峙终于导致了1905年的突破,此时他意识到,在经典(非量子)水平上,只要承认牛顿的绝对时间概念需要并且可以修正,力学与电动力学之间的一切矛盾就能化解,而这一修正最终为所有物理学科奠定新的运动学基础。他把洛伦兹-庞加莱的当地时间的新解释作为这次修正的基础。每个惯性系的当地时间,在与那真正的、绝对的和普遍的牛顿时间比较时,爱因斯坦不是把它看成是"似是而非的"时间,而是把它看成是每个惯性系中的时间的一种可能定义,按此定义则要求真空中的光速 c(他不再提及那至高无上的以太参照系)在所有惯性系中都是相同的。注意这里微妙但却关键的差别:庞加莱已经把当地时间解释为在相对以太运动的参照系中静止的时钟给出的时间,如果时钟是这样校对,好像光速在所有惯性坐标系下不变,这与牛顿的运动学的基本假设不同。爱因斯坦抛弃了以太和好像:直接根据庞加莱的约定在每个惯性系中校对时钟,从而承认,用这样方法校对的时钟测量光速时,所有所有惯性系中的光速就真是一样了。

当然,伽利略速度合成原理不再成立,而这意味着需要一个新运动学。爱因斯坦展示了如何建立这样一个运动学,现在我们称之为狭义相对论。在这种运动学中,在牛顿理论中只适用于力学现象的相对性原理(即所有惯性系等价的原理),现在适用于一切现象,特别是光学和电磁现象。所以,像迈克耳逊那样得到的否定结果就不需要一个动力学的解释(而在洛伦兹对麦克斯韦的理论看法中,则需要解释)。它们只不过是从经验得出的相对性原理成为普遍正确的原理而产生的一个结果,就如同不可能有永动机是从热力学定律产生的结果一样。

当地时间

1892年:通过引入一个从绝对时间 t 到在 x 方向上穿越以太的运动速度为 v 的某惯性系的当地时间 t' 的数学变换,洛伦兹简化了菲涅尔公式的推导,

$$t' = t - (v/c^2)x$$

1900年:庞加莱在物理上对 t' 的解释:在运动坐标系中,观察者用光信号来校对他们的时钟,并没有考虑到穿越以太的运动,那么精确到一阶效应 (v/c),该系下的时钟所显示的时间是洛伦兹当地时间。

1904～1905年:洛伦兹和庞加莱都认识到,要使这种解释对 (v/c) 的各阶效应都有效,当地时间的定义必须修正为:

$$t' = \gamma[t - (v/c^2)x],\text{这里 } \gamma = [1 - (v/c)^2]^{1/2}$$

1905年:虽然爱因斯坦从他的假设中也导出了同样的变换,但是他抛弃了以太和绝对时间概念,把 v 看作任意两个惯性系的相对速度,而把 t 和 t' 都看作是有效的时间坐标,对各自的坐标系有效。

正如基于绝对时间概念的牛顿运动学产生了伽利略的速度合成原理,基于每一个惯性系的相对时间概念的新运动学则产生了一个新的狭义相对论的速度合成原理。菲涅尔的公式现在成了新的速度合成原理的运动学推论。回过头来看,这根本同光本身没有关系,但是当涉及趋近于 c 的速度时,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

它是需要一个新运动学最早的征兆。

先前在调和力学和电动力学时所遇到的问题,现在其理论原因变得显而易见了。麦克斯韦的电磁原理在新运动学的时空变换中是固定不变的;而牛顿的力学原理在旧运动学的时空变换中也是固定不变的。前者现今叫做洛伦兹变换;后者常称为伽利略变换。因此,经典力学不得不被一个适于粒子和连续媒质的狭义相对论的新力学所替代(完全刚体与狭义相对论是不相容的,因为它们能即时地传送信号)。新力学在接下来的十年中由爱因斯坦、普朗克、博恩(Max Born)、劳厄(Max Laue)以及另外的一些人发展起来。

在新运动学中固有的新空间概念,特别是新时间概念,对许多物理学家来说,证明是很难理解的——并且事实上现在对许多人仍是这样。而爱因斯坦对这些概念最具革命性的修改还在后头,那是在 1907年他着手把引力作用纳入他的新运动学框架之中。他很快明白—尽管别人又需要很长一段时间才能明白——囿于狭义相对论是不可能做到这点的。所以他又踏上了一个长达十年的探索历程,一个导致广义相对论的历程——但这是别的场合要说的故事。

我感谢 Skuli Sigurdsson博士 和 Galina Granek博士对本文初稿提出了有益的批评。

参 考 文 献

1 Einstein A. Über Einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes Betreffenden Heuristischen Gesichtspunkt[J]. *Ann. Phys.*, 1905, **17**: 132～148.

2 Einstein A. Über die von der Molekularkinetischen Theorie der Wärme Geforderte Bewegung von in Ruhenden Flüssigkeiten Suspendierten Teilchen[J]. *Ann. Phys.*, 1905, **17**: 549～560.

3 Einstein A. Zur Electrodynamik Bewegter Körper[J]. *Ann. Phys.*, 1905, **17**: 891～921.

4 Einstein A. Ist die Trägheit Eines Körpers von Seinem Energieinhalt Abhängigä[J]. *Ann. Phys.*, 1905, **18**: 639～641.

5 Einstein A. Eine neue Bestimmung der Molekü dimensionen[J]. *Ann. Phys.*, 1906, **19**: 289～306.

6 *The Collected Papers of Albert Einstein*[M]. vol. 1, The Early Years, 1879～1901. Princeton University Press, 1987.

7 Stachel J. *Fresnel's Formula as a Challenge to 19th Century Optics of Moving Bodies*[M]. Preprint 283. Berlin: Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, 2004.

8 Letter 18 of 25 May 1905 to Conrad Habicht[A]. *The Collected Papers of Albert Einstein*[C]. vol. 5. The Swiss Years: Correspondence 1902～1914. Princeton University Press, 1993. 31～32.

9 Kuhn T S. *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894～1912*[M]. ch. IX. Oxford: Oxford University Press, 1978.

10 Janssen M., Stachel J. *The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies*[M]. Preprint 265. Berlin: Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, 2004.

(王国强译　孙小淳校)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net