

为纪念物理大师费曼百年诞辰而作*

赵凯华[†]

(北京大学物理系 北京 1000871)

2018-06-20 收到

[†] email: khzhao@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20181003

20世纪物理学经历了从经典到近代的革命，蓬勃发展，推动了所有科学的进步，引领了各种现代化技术的产生。可以说，20世纪是物理学的世纪，大师云集。窃以为，20世纪顶尖的物理大师中，对物理教学贡献最大的有两位：朗道和费曼。朗道和栗弗席兹合著的九卷理论物理教程是理论物理的经典，三卷《费曼物理学讲义》被美国物理教师奉为“圣经”。朗道和费曼都才华横溢，聪敏过人，但性格各异。朗道自视甚高，个性鲜明，得罪了不少人，曾因“反革命罪”入狱一年，后为克格勃(苏联国家安全部)监控终生，不得出国。费曼性格爽朗，光明磊落，聪明好奇，多才多艺。他体验过催眠术，破译过马雅天文学的奥秘，能双手以不同的节奏打邦戈鼓，开密码保险箱，画模特素描，多达到专业水平。他开玩笑，甚至恶作剧，使人哭笑不得。有人说，一般的天才别人还可以学，而费曼的天才是别人学不来的。他是神奇的天才，也是魔术师般的鬼才。

科学研究方面费曼的最大贡献在于量子电动力学的建立。在20世纪20年代创立了量子力学



著名物理学家费曼 (1918—1988)

后，建立量子电动力学的工作就已经开始了。经过许多知名理论物理学家不懈的努力，克服了重重困难，经过40、50年代的热烈交流，到60年代成熟的理论体系才建立起来。为此1965年的诺贝尔物理学奖颁发给了

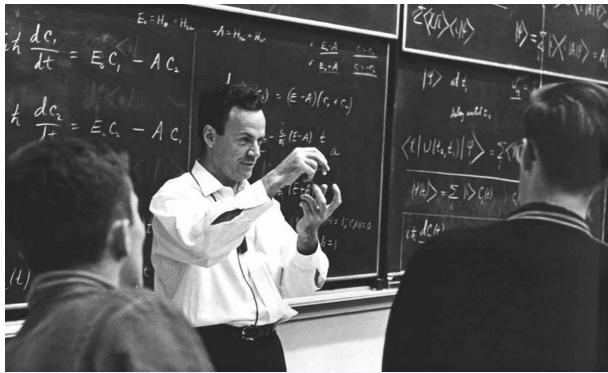
朝永振一郎、Schwinger和费曼三人。费曼在方面的最大贡献，一是费曼图解法和费曼规则，二是路径积分法。费曼图使量子场论的计算形象化、条理化和简明化，在同行里非常喜闻乐见。他自己也很得意，将费曼图喷涂在自家的汽车上。所谓费曼规则，是指量子系统概率的叠加与经典的Bayes规则不同，不是概率的直接叠加，而是概率幅的叠加。费曼晚年还根据这一规则提出了量子计算机的设想。路径积分法是把量子“粒子”的传播规律视为所有可能的路径按费曼规则叠加，即所谓历史的叠加。这是量子力学除海森伯、薛定谔之外的第三个等价方案，它在量子力学内的优越性不甚明显，但用到量子电动力学时其优越性就显得突出了。

费曼的另一项重要工作是液氦的超流理论，纠正了这方面理论创始人朗道的一个小错误。费曼比朗道小10岁，两位高傲的天才都非常欣赏对方的才华。

费曼在加州理工学院的35年中讲过34门课，其中24门是研究生的高级课程，本科生选修要批准。纯粹为本科生开课只有1次，即1961—1963年的那次给一二年级开的为时2年的大课。他的课没有讲稿，也没有提纲，有的只是他想表达的主题思想。助手费了很大力气才把他的演讲录音整理成三卷头的《费曼物理学讲义》^[1]，出版发行，这就是那本备受称道、畅销至今、被翻译成十多种语言的名著。《讲义》中的部分章节后来还被编辑成单独的小册子，如1994年的*Six Easy Pieces* (《费曼讲物理—入门》)^[2]，1997年的*Six Not-So-Easy Pieces* (《费曼讲物理—相对论》)^[3]，使更广大的读者群能够欣赏到这位物理大师的才智和风采。

掀开久远记忆的面纱，许多选了费曼那次课程的学生和旁听的教师都说，与费曼共度物理学

* 文章原载于《大学物理》2018年第1期，本次发表作了修订。



费曼在讲课

课程的两年时光是人生难得的一次经历。不过，当时的情况似乎并不是这样。许多学生害怕进教室，随着课程的进展，本科生到课人数急剧下降。可与此同时越来越多的教师和研究生开始来听课了。教室一直挤得满满的，费曼并不知道他正失去了一部分他特意要争取的听众。若以让学生通过考试拿学分为目的，费曼的课程是失败的，课后他也认为自己开的课并不成功。真正从这次课程中受益最大的，不是他原来设想的大学一二年级学生，而是教师和研究生。

笔者遗憾无缘赴美聆听费曼的精彩讲座，只能尽量汲取他讲稿的精神和内容，融入自己编写的教材中。读者可以发现，我主编的《新概念物理教程》和《定性与半定量物理学》吸收费曼的营养是很多的。

《费曼物理学讲义》与通常的《普通物理》或《大学物理》课程最大的不同是其前6章，也就是《费恩曼讲物理—入门》小册子里收录的内容。这6章里没有数学公式，定性地将物理学的各个方面及与其他自然科学的联系介绍出来。但这不是科普，听起来轻松，其中的深邃思想并不那么容易领会。第一章讲原子：物质的原子结构、原子过程和化学反应；第二章以旁观棋弈去猜测其比赛规则为比喻，说明物理学的研究方法；第三章介绍物理学与化学、生物学、天文学、地质学、心理学的联系；第四章讲能量守恒；第五章说万有引力；第六章谈量子行为。从这里我们可以体会到费曼的教学理念：物理课不能单纯讲物理本身，与学科有关的方方面面都应介绍。笔者接受这一思想，在所著教材中多处

联系到化学和生命科学的问题。从物理学角度看这些问题，确实非常有趣。

物理学是一门精确的科学，需要用精确的物理概念来表述。概念的定义不是唯一的，褒贬不一(概念是人为的约定，且不论对错)。好的物理能够以最好的概念表达最多最广泛的自然规律。“能量”无疑是物理学中，甚至是整个自然科学中最重要的概念，因而是最基本的最好的概念。“能量”这个概念之所以重要，因为它表达了自然界的一条最基本的规律——能量守恒定律。费曼的讲课中编造了一个生动的故事，在它的比喻下将“能量”的意义解释得清清楚楚。我在《新概念物理教程—力学》卷^[4]中引用了这个故事，大意如下：

一个孩子有28块积木，这些积木完全一样，而且不可破坏。每天早晨妈妈将孩子和他全部的积木关在一间房子里，晚上她回来后总仔细地把积木的数目点过。不错，多少天来一直是28块。有一天积木只剩下27块，她在室内细心地寻找后，发现有一块积木在小地毯下面。又有一天积木剩下26块，室内遍寻不着，然而窗子开着，她探头向外张望，发现两块积木在外边。再有一天，她惊愕地发现积木变成30块。后来她才知道，是一个小朋友带着他同样的积木来玩过，多出来的积木是这孩子留下的。她处置了多余的积木后，把窗子关起来，再不让别的孩子进来。于是在相当一段时间里情况正常，直到有一天她只能找到25块积木。孩子有个玩具箱，妈妈想打开这箱子找积木，孩子尖叫起来，不让她开箱。妈妈只好称一下这箱子的重量。她以前知道，每块积木重3盎司，28块积木在外时箱子的重量为16盎司，她计算后得到：

$$\text{眼前积木数 } 25 + \frac{\text{箱重} - 16 \text{ 盎司}}{3 \text{ 盎司}} = \text{常数 } 28$$

于是她确信，缺失的积木被锁在玩具箱里。这箱子没再打开过，可是积木又少了许多。妈妈仔细调查发现，澡盆里脏水的水位升高了。显然，孩子把一些积木丢进了澡盆。但是水太浑浊，妈妈无法看清，然而她知道，澡盆里的水原来有6英寸深，每块积木使水位升高1/4英寸，于是她的

计算公式里又添了一项：

$$\begin{aligned} \text{眼前积木数} & 25 + \frac{\text{箱重} - 16 \text{ 盎司}}{3 \text{ 盎司}} \\ & + \frac{\text{澡盆的水位} - 6 \text{ 英寸}}{1/4 \text{ 英寸}} = \text{常数} 28 \end{aligned}$$

随着事态一步步地复杂化，越来越多的积木跑到她无法看到的地方。可是她找到一系列附加项，需要添加到她的计算公式里，以代表那些看不到的积木块数。这个复杂的公式保持着 28 那个数目不变。

故事的比喻清楚说明历史上“能量”这一概念是怎样从机械能延拓到热能，再逐渐扩展到电磁能、辐射能、化学能、生物能、核能等多种形式。各种形式的能量可以相互转换，转换时的总量不变。物理学史上不止一次地发生过这样的情况，在某类新现象里似乎有一部分能量消失了或凭空产生出来，后来物理学家们总能够确认出一种新的能量形式，使能量的守恒律得以保持。虽然我们不能给能量下个普遍的定义，但这绝不意味着它是一个可以随意延拓的含糊概念。关键的问题是科学家们确定了能量转换时的各种当量，使得能量守恒定律可以用实验的方法加以定量地验证或否定。此外，每确认出一种新形式的能量之后，在其基础上建立起来的理论，又能定量地预言一大批新效应，后者经受住了新实验的检验。

以上故事写在《费曼物理学讲义》第 4 章里，我很欣赏这一章里另一个问题的讲法，即从永动机的不可能推演出重力势能的公式。这种讲法包含的物理思想非常深刻，我也把它纳入我自己的教材。

在讲“运动”时，费曼也编了个故事，大意是一位女士开车时被警察拦住：“你开了每小时 60 英里。”她说：“不可能，我只开了 7 分钟。”警察向她解释：“我是说，如果您以这种方式开车，您在 1 小时后会达到 60 英里外。”女士说：“如果我持续以这种方式开车，几分钟后我就会在街的那头撞墙的。”故事涉及的物理概念是平均速度和瞬时速度的区别。对于 7、8 岁的孩子来说，很可能搞不清楚，但一个成年人弄不明白，就显得遗憾了。《费曼物理学讲义》出版后，一次美国物理教师协会邀请他在旧金山作报告。报告结

束时，有位维护女权组织的示威者走到讲台下，举着大牌子，喊着：“费曼，你这个歧视妇女的猪猡！”理由是费曼讲的上面那个故事，暗示着女司机不如警察聪明，说她愚蠢。费曼机智地回答说：“啊！我忘了说，那位警察是女的。”幸亏我没有把这个故事写到我的书里，我没有费曼那种机智。

《费曼物理学讲义》最精彩的部分是对量子力学波粒二象性的解说。在卷 I 第 37 章里假想的追踪电子双缝干涉实验把量子的波粒二象性说透了。如果您的实验装置能够判断电子穿过哪条缝，电子就表现为粒子，没有干涉条纹；如果您的实验装置不能判断电子穿过哪条缝，电子就表现为波动，出现干涉条纹。从经典物理的观点看，电子的这种行为太神秘了，甚至是“荒诞”的。但是必须承认这种观点，按量子力学所作的推论都是符合实验的；不认可这种观点，推论就不符合实际。关键的问题是在量子力学中概率按前面提到的费曼规则叠加，而不是按经典的 Bayes 规则叠加。当代成熟的物理学家都会自觉地按照标准的量子力学思路去推理，即 to think quantum-mechanically，不去理会其背后的神秘性或“荒诞性”。一些量子力学的初学者，也许他们已经学会了解薛定谔方程，但对标准的量子力学观点仍不甚了了。费曼的追踪电子实验对初学者理解这一问题，大有帮助。我对费曼的追踪电子实验特别欣赏，在编写《新概念物理教程—量子物理》^[5] 卷时把它引入第 1 章。这个实验不仅寓意深刻，而且兴趣盎然，引人入胜。2000 年我为清华大学的学生开过一次量子物理课，上课时间是晚上，地点在教室楼里的阶梯教室。当讲到费曼的追踪电子实验时，我发现教室阶梯顶层的后门外有两名过路学生驻足下来倚门旁听，后来索性进入教室在后排坐下。我的口才远不如费曼，尚能吸引学生，可以想见他当年的讲座会是怎样的轰动！后来我还发现，美籍华裔教授徐一鸿(Anthony Zee)在他的《果壳里的量子场论》^[6] 中将这个电子双缝实验铺陈开来，形象地解说了费曼发明路径积分理论的思路。让我们把这个故事简述如下：

很久以前，在一次讲授量子力学的课堂上，教授讲着电子双缝干涉实验的标准处理方法：将



加州理工学院书店费曼专柜

从电子源 S 出发穿过每个洞 A_1 和 A_2 达到接收屏上 O 点的概率幅叠加起来，得到电子到达 O 点的概率幅。突然有学生问道：若再钻第 3 个洞 A_3 呢？教授回答说，显然还要加上通过 A_3 的概率幅。教授刚要继续讲下去，学生又问：再钻第 4 个洞呢？教授不耐烦了，说：“聪明的小伙子，我想全班的人都知道，应该把通过所有的洞的路径都加起来。”小伙子继续纠缠：“如果在钻洞的屏风后再加一个也有许多洞的屏风呢？……如果在这些屏风上钻了无穷多个洞呢？……如果这些屏风根本就不存在呢？……”教授火了，摆手说：“我往下继续，还有许多材料要讲呢。”

其实小伙子问的正是路径积分理论的思路：把所有可能路径的概率幅叠加起来就能得到正确的结果。徐一鸿把上述故事里的小伙子取名“费曼”。

费曼 1964 年在康奈尔大学为学生作的通俗演讲《物理定律的特性》^[7]，对物理与数学的关

参考文献

- [1] Feynman R P et al. The Feynman Lectures on Physics, Vol. I, II, III
- [2] Feynman R P, Davies P. Six Easy Pieces: Essential of Physics Explained by the Most Brilliant Teacher. 1994; 费曼讲物理—入门. 秦克诚译. 湖南:湖南科学技术出版社,2004
- [3] Feynman R P. Six Not-So-Easy Pieces: Einstein's Relativity, Symmetry and Spacetime. 1994; 费曼讲物理—相对论. 周国荣译. 湖南:湖南科学技术出版社,2004
- [4] 赵凯华,罗蔚茵. 新概念物理教程—力学,第二版. 北京:高等教育出版社,2004
- [5] 赵凯华,罗蔚茵. 新概念物理教程—量子物理,第二版. 北京:高等教育出版社,2008

系, 对称性、守恒律、不确定性与概率等问题作了极富有哲理的分析, 也是一本不可不读的好书。费曼 1983 年在加州大学洛杉矶分校的演讲《QED—光和物质的奇特理论》^[8], 由好友整理出版, 这是他给外行人讲概率幅叠加的一本详细解说。一位出版他讲稿的编辑对费曼的演讲评论道: “在整个演讲中, 他驾驭着听众的注意力, 但决不会偏离演讲的目的, 那就是对自然法则原汁原味的、深刻理解的表述。通过笑声, 他的听众得以放松而无拘无束, 不会因为那些有点吓人的数学表达式和高深的物理概念而感到沮丧。还有, 他乐于处身于公共场所, 表现得像一位杂耍演员, 但这不是他的目的。他的目的是向公众传播基本的物理概念。”

1986 年 1 月 28 日美国航天飞机“挑战者号”失事, 国务卿 Rogers 邀请费曼参加事故调查。电视里播放了恩曼的冰水实验, 引起了社会的轰动。事后费曼写过 2 篇回忆文章, 一篇登在《今日物理》杂志^[9], 长达 12 页; 另一篇是《你干吗在乎别人怎么想?》^[10]的后半本。30 年前我刚读到第一篇时就激动不已, 立即与好友们分享了我的感受。事实远没有一杯冰水实验那么简单, 读那篇文章就像读福尔摩斯的侦探小说, 太精彩了, 深为这位科学家的正直和智慧所感动。上述费曼的两部著作是 1988 年出版的, 那时费曼刚刚过世。他知道自己患癌症已十多年。在过世的一年前他与好友用科学的眼光客观地分析自己的病情, 最多还能活一年, 他像说别人的事那样冷静, 听的人都要哭了。一位科学家心境如此豁达, 令人钦佩。

- [6] Zee A. Quantum Field Theory in a Nutshell. Princeton University Press, 2003
- [7] Feynman R P. The Character of Physics Law. MIT Press, 1965
- [8] Feynman R P. QED: Strange Theory of Light and Matter. 1985; QED:光和物质的奇妙理论. 张钟静译. 湖南:湖南科学技术出版社,2013
- [9] Feynman R P. An Outsider's Inside View of the Challenger Inquiry. Physics Today, Feb. 1988
- [10] Feynman R P. What Do You Care What Other People Think? W W Norton & Company, 1988; 你干吗在乎别人怎么想? 李沉简, 徐扬译. 北京:中国社会科学出版社, 1999