

# 费因曼和量子场论

## 一、通向量子电动力学之路

1965年10月10日,瑞典国王向费因曼和朝永振一郎、施温格三位教授颁发了诺贝尔奖金物理学奖,以表彰他们对发展量子电动力学所做的奠基性工作。这些工作中,特别值得称颂的是由费因曼创造的并以他的名字命名的费因曼图方法,它对现代物理学的发展起了极其重要的作用。

本世纪三十年代,现代物理学基石之一的量子力学正处在蓬勃发展的时期,费因曼作为麻省理工学院的一位大学生,他深深感到“电和磁的量子理论完全不能令人满意”是当时理论物理学的一个基本问题。他对海特勒(Heiter)和狄喇克的两本著名的量子力学经典著作给出了这样的评论:“是这些书中的那些注释而不是那些一切都已得到证明的正文深深地启发了我”。“我仍然记得狄喇克书中最后的一句话:‘看来,这里需要某些本质上全新的物理思想’。我把它看成是一种挑战。我认为,既然他们没有得到我想解决的问题的满意的答案,我也就不必过多地去注意他们已经完成的那些工作”。

然而,费因曼还是认真地读了他们的书,从中他概括出量子电动力学理论困难的来源有两点:第一是电子自相互作用能量是无穷大,这个困难即使是在经典电动力学中也是存在的。第二是由于电磁场有无穷多个自由度,因而真空的能量是无穷大。

当时,费因曼把事情看得过于简单了。对于第一困难,他认为,电子实际上不能对自己产生作用,只能作用在其它电子。这样一来,根本就不存在场,无穷多个自由度也就没有了,第二个困难也就解决了。费因曼说:“这样的想法看来如此之自然,我深深地爱上了它”。在谈到

他的认识过程时,费因曼说:“后来,我进了研究生院。继续就此深入钻研之后,我明白了电子不能作用于自身的这一想法错在哪里。当你加速电子时,它要辐射能量,因而你必须做额外的功,提供这些能量。做功过程中所克服的额外的力,称为辐射阻尼力。人们当时认为,这个力起源于电子对自身的作用”。它“对于能量守恒是绝对必需的。假如我们认为一个电荷不能作用于自身,那么辐射阻尼就不应该存在了”。

1940年至1941年,费因曼做了惠勒的研究助理。他们一起把只有推迟作用的超距电动力学改造成有一半推迟、一半超前的超距作用理论,它显然破坏了通常的因果性。但是,只要假定发出的任何辐射全部为整个电荷系统所吸收,则这个理论就等价于推迟作用理论而且包含有辐射阻尼力。由于这种理论对超前和推迟这两种作用是对称的,它使得作用量原理可以应用。对于这种理论费因曼说:“我确信,由于我们现在已经解决了经典力学中的这个问题,其它的一切肯定都会有了正确的答案。我相信下一步我必须做的就是构造一个与这种经典理论类似的量子理论,一切问题也都会得到解决”。

惠勒极力主张费因曼就他们的经典理论做一个报告,并且答应与此同时他将搞出一个量子理论,不久也将做一个报告。费因曼以此作为他的就职演说,吸引了如冯·诺依曼,泡利和爱因斯坦等名人出席。泡利预言惠勒永远不会给出他所答应关于量子理论的报告,事实果然如此。

费因曼决心寻找他自己的通向量子力学之路。他所持有的物理观点常常与流行的观点不同。例如,通常人们在已知某一时刻的场之后,由微分方程来确定下一时刻的场,这种方法费因曼称之为哈密顿方法。费因曼自己采用的是

作用量,它描写的是穿过全部时间、空间的路径的特征。著名的费因曼路径积分量子化方法正是在这一观念指导下发展起来的。而狄喇克在1933年发表的“量子力学中的拉格朗日量”一文对于经典电动力学的这种量子化理论的发展起了关键性的作用。

狄喇克在这篇文章中首先指出:“量子力学是在与经典力学中的哈密顿理论类比的基础上建立起来的。这是因为人们发现正则坐标和正则动量这样的经典概念有最简单的量子类比”。但有理由认为,经典力学的另一种表述形式,即拉格朗日形式更为基本。在这种形式中,运动方程由作用量原理所决定,且很容易推广到相对论情况。正因为如此,人们自然希望弄清楚在量子理论中与拉格朗日形式相对应的是什么。

其次,狄喇克指出,在量子理论中, $t_1$ 和 $t_2$ 两个固定时刻物理系统的状态由一个时间变换函数联系起来,它又可以由与一系列中间时刻相应的变换函数构成。在极限情况下,这些相继的中间时刻相距无穷小,总的变换函数化成无穷多个对坐标的独立的积分,每一个积分与一个中间时刻相对应。积分表达式是所有这些相距无穷小的时间间隔的变换函数之积。每一个这样的变换函数的形式为 $\exp\left[\left(\frac{i}{\hbar}L\right)dt\right]$ ,其中 $L$ 是经典拉格朗日量。总的被积表达式的形式为 $\exp\left[\left(\frac{i}{\hbar}W\right)\right]$ ,其中 $W = \int_{t_1}^{t_2} dt L$ ,就是经典作用量。当 $\hbar \rightarrow 0$ 时,只有符合经典作用量原理的 $W$ 取稳定值的路径才能对积分作出主要贡献,相应的量子理论过渡到经典极限。

狄喇克没有给出这个积分的实际计算方法,因为他只对一般的理论形式感兴趣。十年之后,在普林斯顿的一次酒宴上,刚从欧洲来的杰勒(Jehle)问费因曼最近在做些什么,费因曼回答说正在研究电动力学。费因曼问杰勒:“你知道有什么办法从作用量出发讨论量子力学吗?”杰勒恰好知道狄喇克的这篇文章,他把它介绍给了费因曼。费因曼果然从中发现了他

正想找的东西。他很快就把这种量子化形式应用到了他的经典超距电动力学中。由于这种方法是对初始与终了的坐标之间的每条路径计算出相应的作用量 $W$ ,然后把所有的可能的 $\exp\left[\frac{i}{\hbar}W\right]$ 叠加起来,所以费因曼称之为路径

积分量子化形式。费因曼用它研究了电子和光子的相互作用,讨论了能量和动量的表达方法,在各种过程和边界条件下,所得结果都是正确的。他相信他成功地建立的电动力学的量子理论,并把它作为自己的博士论文公布于众。

第二次大战期间,费因曼投身于曼哈顿工程。只有在乘车的空隙,用一些小纸片,才能继续他在这方面的研究工作。他发现了一些错误,甚至严重的错误。例如,当推广拉格朗日形式时,定态的能量竟会变成复数,事件的几率不能归一。在1947年一次会议上他指出,尽管这种形式有很多优点,但从来没有被用来解决一个相对论问题,甚至连电子的自能也算不出来。除了讨论了一些一般性质外,他没有找到这个理论的任何实际的应用。

兰姆位移的测量以及贝特(Bethe)为解释一部分测量结果所进行的非相对论计算表明,非常迫切地需要一种有效的相对论量子电动力学。贝特建议,一个理论只要给出有限的结果,哪怕它破坏了某些物理原理,对于确定感兴趣的物理量也是有用的。费因曼自信可以解决这个问题。试了试之后他承认,他“必须学会如何做计算”。首先,他学会了如何计算电子的自能。然后,按照贝特教授的方法去做,他计算了电子在原子上的散射,能级的移动等等,学会了籍助实验质量计算一切东西。

“我的工作的其余部分”,费因曼说道:“只不过是改进计算技巧。我做了一些图帮助更快地进行微扰论分析。这类技巧中很多在开始时是凭猜测得到的,正如你们所看到的,我并没有一种关于物质的相对论理论”。“我是从非相对论路径积分得到的一些公式中猜测相对论公式的。由此很容易导出一些规则。此外,我引进了一些图,改进了符号,找到了容易计算积分的

方法，而且编了一本关于如何用量子电动力学的手册”。

在这一发展过程中，狄喇克负能海的处理是重要的一步，它曾经给费因曼带来很多逻辑上的困难。他回忆起惠勒关于正电子是一个时间轴指向相反方向运动的电子的建议，在含时微扰论中允许这种时间反转的运动。这样做的结果与通常采用空穴理论完全一致。

费因曼靠经验和直觉发明了很多技巧，为了绝对地证实它们的正确性，他用多种方法反复地检验。人们喜欢费因曼的这些简易计算方法，而且想学会它们。在大家的迫切要求下，费因曼发表了著名的文章：“量子电动力学的时空观点”。费因曼认为该文有两点遗漏。其一是没有对该文中的每个论点都给予数学意义上的严格证明。其实，关于如何得到这些规则，费因曼就连通常物理意义上的证明也常常不知道。但是，从经验上他知道这一切与正规的电动力学完全等价。由于这个原因，费因曼的这一工作曾经受到批评，称他的方法为“直观方法”。对此，费因曼的回答是：“我想强调指出的是，有许多工作正是用了直观方法而取得成功的。正因为所提出的一些想法和公式没有简单、清晰的证明，必然要借助已知的结果进行大量的、反复的检验，以确定其自洽性和正确性。”

遗漏的第二点涉及一个未能解决的困难。在计算过程中费因曼为了消除发散，用了一个普遍函数  $f$  代替了其中的一个  $\delta$  函数。但是，结果导致几率总和不等于一。对于这种所谓的重整化方法，费因曼一直是极不满意的。他认为这是因为还没有能建立起真正令人满意的量子电动力学。重整化理论只不过是“把电动力学中的发散困难藏在一块地毯下面”。20多年以后，费因曼的这个观点仍没有真正改变。他仍认为重整化是一个“骗局”，它“妨碍了我们去证明量子电动力学是数学上自洽的理论”。他对重整化在数学上是否合法仍表怀疑，说：“可以肯定地说，我们还没有一个好的数学方法描写量子电动力学理论”。

费因曼极重视物理的推理方法，尽管这种

方法似乎效率很低，猜测也常常不成功，但在发展一个新的理论时，物理思想是极有价值的。因为要得到一种新的发现，面临的问题不是去寻找最好的或最有效的方法，而是在根本没有什么方法的情况下找到一种方法。“物理的推理方法的确可以帮助人们产生一些想法，使你能把未知的同已知的联系起来。”

费因曼认为，一个好的理论物理学家应当掌握同一个理论的广泛的物理观点和数学表达方式，这是很有用的。对一个人这样要求似乎太高，但年轻的学生们应当成为这样的人。倘若每个学生都以相同的流行方式去思考和表述，那末对尚未解决的那些问题产生的假说的种类将会受到很大限制。当然，真理就存在于最流行的趋势中，这种概率是最大的。“但是，如果它恰好是在其它方向上，谁去发现它呢？”

## 二、费因曼和分子模型

60年代夸克模型的建立使基本粒子结构的研究取得了突破性的进展。由斯坦福直线加速器中心(SLAC)和麻省理工学院的研究人员合作所进行的电子与质子非弹性散射实验，在这一历史进展中起了重要的作用。实验表明，质子内部存在着类点粒子，人们称之为部分子，它们正是质子的组分。实验还详细地研究了部分子之间的相互作用，确立了由布约肯(Bjorken)最早提出的标度规律。从而为描写强相互作用、具有渐近自由特征的量子色动力学的发展奠定了基础。费因曼的洞察力和直觉，极大地推动了为解释这些实验而进行的理论研究工作。

当斯坦福直线加速器中心计划还处在初始阶段时，费因曼正在从事高能强子-强子碰撞的理论研究。他给出了一种直观图象来描写这一典型反应过程，认为这一反应是在两束高速运动的粒子之间通过组分的交换而发生的。费因曼把这些组分称为部分子。这个概念的原始基础完全是凭经验产生的。它的重要证据是散射产生的次级粒子的横向动量分布呈指数型而且有界。这表明，“软”相互作用占优势。也就是

说,起重要作用的动力学过程是在质子大小的范围内进行的.组分的交换可以很好地满足这些“软性”要求.

当时是雷吉(Regge)极点理论昌盛的时期,用局域场论描写强相互作用还很不流行.人们普遍认为,只有终态粒子不超过两个的过程才是必须详细研究的重要过程.它们的截面的高能极限,是雷吉极点理论的自然适用范围,因而不必过多地关心细节问题.费因曼提出的部分子模型除了可以对雷吉极点图象给出新颖的解释以外,更重要的是引进了一种新的语言,能够描写产生两个以上粒子的非弹性散射过程.

当时的理论家们都极力回避多粒子的碰撞问题.遇到这类问题时,他们也只愿意研究那些所有的终态粒子都被观测,所有的动量都被测量的过程,费因曼称这种过程为“遍举过程”.与之相反,费因曼强调“单举过程”.在这些过程中,仅识别一种或很少几种粒子,测定它们的动量,并把所有其它的可能性都通过求和去掉.这样的过程对理论家们非常陌生,实验家们虽知道测量方法,但也存在一些困难问题.费因曼认为这种单举分布是值得理论研究加以注意的.他还提出了一种标度规律,强调指出“快度”是一种特别有用的变量.高能碰撞中产生的粒子对这个变量实际上是均匀分布的.

不久,由于一次偶然的机,费因曼的部分子模型产生了强烈的影响.那是在费因曼去旧金山探亲途中在斯坦福直线加速器中心作短暂停留时发生的.他看了最新的电子-质子散射数据.实验家们按照布约肯建议的标度规律处理了这些数据.关于这个标度规律究竟来自流代数、求和规则还是雷吉理论,由于布约肯不在,充满疑团的费因曼从实验家们那里得不到明确的回答.

费因曼只用了一个晚上进行计算,用他的部分子模型成功地解释了观测到的实验现象.他选取了一个把靶质子看作是极相对论粒子的参考系,来研究这个过程.象以前的计算方法一样,他把质子用它的组分或部分子的束流来代替,这些部分子都是类点粒子,彼此之间没有相

互作用.假定了电子与部分子发生弹性的、不相干的散射,他重新得到了布约肯标度规律.

布约肯回到实验室时,费因曼还没有离开,正在报告他的工作.理论组的人都很激动.回忆当时的情景,布约肯写道:“费因曼在人群中发现了,连珠炮似地对我发问:‘当然,你应该知道这一点,……当然,你应该知道这一点,…….’费因曼提到的一些是我知道的,有一些我并不知道.也有一些是我知道的,当时费因曼并不知道.我印象最深的是他所使用的语言,虽然并不陌生,但又确实与众不同.它自然、流畅而又富有魅力,使每个人都可以理解.根本就没有用多少时间,部分子模型的热潮就给鼓动起来了”.很快,电子-质子散射截面的费因曼计算方法就推广到了很多电磁相互作用和弱相互作用过程.发展了很多新的想法和模型来确定部分子的自旋、电荷和弱相互作用性质.接着确认了带电部分子就是夸克.在这一进程中起中心作用的是斯坦福直线加速器中心与麻省理工学院合作小组对电子-质子散射的漂亮的测量结果和欧洲核子研究中心以及费米实验室的中微子实验数据.

正象量子电动力学的发展过程一样,部分子模型的提出也体现了费因曼独特的创造能力.在关于部分子模型的第一篇文章中,费因曼写道:“这些想法实际上来自不同的方向,不能看成只考虑任何一种模型所得的结果.它们是从相对论、量子力学以及某些经验事实中包含的各种特色中精选出来的,几乎不依赖于任何模型.写这篇文章,我觉得难以下笔.这不是一篇演绎的文章,而是一篇归纳的文章.由综合而得到的结论远比任何单独论证使我确信不疑,因为它们具有惊人的内部自洽性.它远远超过我在各个单独的演绎过程中得到的自洽性.”部分子模型正在于它不是来源于象一台计算机那样直线的、演绎的推理,而是来源于象人脑那样的多维逻辑网络.相比之下,后者要难得多.

(丁亦兵根据 Physics Today 1989 年第 2 期第 42—48 页和第 56—59 页编译)