

理查德·费恩曼——

现代史上最具原创性的科学大师之一

王野奇

理查德·费恩曼(Richard Feynman)是现代乃至有史以来最受爱戴的科学家之一，他对科学有着异乎寻常的“感觉”，能够用洞察事物内在本质的方式来理解物理学。他具有别具一格的思维风格，这种风格为科学研究注入了无以伦比的活力。他不仅在量子电动力学领域以最卓越的科学贡献赢得了诺贝尔物理学奖，同时在液氮、弱相互作用理论、部分子模型等许多方面取得举世瞩目的成就。维格纳(Wigner)称他是“第二个狄拉克。”他生来具有十分可爱的品格和个性，不仅是极其卓越的理论家，而且是才华横溢的教师，并以极为罕见的天赋和热情进行物理教学。通过他那著名的《物理学讲演录》，来向世界展示一位顶尖科学大师的思维方式；正是他鼓励了好几代大学生从一种全新的角度去重新思考物理学。

天才之路

1918年5月11日，费恩曼生于美国纽约郊区一个犹太商人的家庭，当费恩曼还在坐高脚童椅时，父亲梅尔维尔·费恩曼(Melville Feynman)就设法引导儿子用“科学”的方式去思考问题。他用收集到的彩色浴室花瓷片和费恩曼一起做游戏，

课的每一过程。时时拓展，处处恰到好处地引申。这样，才能在全国奥赛中大面积丰收。

六、教给学生物理思维

物理学是一门抽象的科学，要想使学生学好物理，必须提高他们的物理思维能力。平时我们授课时应注重培养学生的思维能力，教给学生科学的思维方法。练习题时，不是仅仅教会学生做某道题，而是应启迪学生的思维，做一道题，举一反三，争取弄懂一类问题。中学物理，基本知识点是一定的，基本思路也是一定的。授课时应使学生知识点融会贯通，时时注意理顺学生的思路，使他们的思路顺畅开阔。针对较抽象、较复杂的问题，最好能教会学生自己建构物理模型，把握住事物的主要矛盾，忽略次要因素，使问题的解决大大简化。良

通过这些游戏，有意识地开始尝试让费恩曼思考图形及其基本的数学关系。梅尔维尔有时和费恩曼一起查阅《不列颠百科全书》，带他去参观自然史博物馆，用各种浅显的方法鼓励他对科学的兴趣，正是运用普通知识来源作为推断的起始点，使枯燥的材料变得生动有趣，从而使费恩曼清楚地意识到科学的神奇和魅力。母亲露西尔·菲利普斯(Lucille Phillips)以她的幽默、温和与同情给了他很大影响，这种明智见解和科学的结合，才使得费恩曼成年后如此独特。

在中学时代，费恩曼靠自己推导出了欧几里得几何学的绝大多数规则，并用自己的方式来解决这些几何难题以及所有其他问题。依靠自己的自觉和父亲对他的指导使他对任何事情，不管告诉你的人多么有名，不要仅仅因为别人告诉你是这样，你就相信的确就是这样，这种态度贯穿费恩曼科学生活的始终。

1935年，费恩曼进入麻省理工学院，起初准备攻读数学，后转选物理学；当他作为一名大学生时，就和导师瓦利亚塔(Vallarta)一起联名在《物理学评论》上发表了宇宙线方面的论文。通过模型证

好的物理思维习惯的形成，并非一朝一夕。在日常生活中，应激励学生多观察、多思考，力争通过现象分析本质，能运用物理思维模式进行分析，结合实际情况，指导学生多看看物理科技杂志，多思考《十万个为什么》中的物理问题等等。想必通过我们的训练，学生的思维能力会大大提高，知识面大大拓宽。针对悟性较高的学生，足可以在全国奥赛中取得较好的成绩。

总之，启迪学生冲击全国物理奥林匹克竞赛金牌，要注重激发学生为之奋斗不止的兴趣，不畏艰辛的自学、钻研精神，灵活多变开拓创新的思维，孜孜不倦勤学好问的作风。这样，他们通过循序渐进的学习，自己的综合素质大大提高，将无往而不胜。

(安徽省阜阳市第三中学 236006)

明，整个宇宙的宇宙线确实各向同性地进入我们的银河系并到达地球。接着在导师斯莱特 (Slater) 的鼓励下，费恩曼着手研究晶体中原子间力的作用方式，并以《分子中的力》为题完成一篇论文发表于 1939 年的《物理学评论》上；它大大地简化了化学家计算分子和晶体中原子的行为。同时这一方法也被另一研究者赫尔曼 (Hellman) 独立发现，现被称为赫尔曼 - 费恩曼定理。这篇论文最动人之处，乃是作者用清晰、精练而又不拘泥术语的文字来表现解方程的优美技巧，从而传送出可信赖的费恩曼的“声音”，读起来几乎像与作者讲话一样。费恩曼不仅清楚地知道如何搞物理，更知道如何去讲解物理。

1939 年，21 岁的费恩曼从麻省理工学院毕业后去了普林斯顿大学。年仅 28 岁的第一流科学家惠勒 (Wheeler) 成为费恩曼的指导老师。从外表上看，惠勒总像是相当严肃的那种人，他西装革履，沉着稳重而令人尊敬。可在这种外表下面却深藏着最佳思维，他是研究诸如黑洞之类的奇异事物的专家。费恩曼和惠勒的相遇为这两位科学家之间的硕果累累的合作提供了机会。他们两位对物理学中的新思想都同样开放，尽管它们是多么地“疯狂”。费恩曼显而易见的奇特天赋，使惠勒意识到他确实遇到了一位难得的天才。1942 年 6 月 3 日，费恩曼以评语为“罕见的原创性”通过校方论文答辩而正式获得博士学位。

费恩曼于 40 年代初发展了用路径积分表述量子振幅的方法；由于太平洋战争的爆发使他的科研工作一度中断，他参加了美国的曼哈顿工程，年仅 26 岁的费恩曼被著名核物理学家贝特 (Hans Bethe) 一眼看中，马上成为这一计划的计算机组组长；他深谙领导统御的艺术，知道如何使他的组员全心全力投入工作，以高速、准确地完成 1945 年 7 月试爆的第一颗原子弹的所有计算。这一计划结束后，他追随贝特成为康奈尔大学的首席理论物理学家，并于 1948 年提出量子电动力学新的理论形式的计算方法和重整化方法，从而避免了量子电动力学中的发散困难。由于这一贡献他和施温格 (Schwinger)、朝永振一郎 (Sinitiro Tomonaga) 共同获得 1965 年诺贝尔物理学奖。同时在量子场论中“费恩曼图”、“费恩曼振幅”、“费恩曼传播子”、“费恩曼规则”等均以他的姓氏命名。1950 年，

费恩曼转入加州理工学院，50 年代前期，他发展了液氦微观理论的研究工作，1958 年他又和盖尔曼 (Murray Gell - Mann) 合作，提出了弱相互作用的矢量 - 腊矢量型理论 (即 V - A 理论)；这是经过 20 余年曲折发展以后，所达到的关于弱相互作用的正确的唯象理论。60 年代末期，在高能电子和核子的深度非弹性碰撞的实验基础上，他提出了强子结构的“部分子模型”。1986 年 1 月，作为震惊世界的“挑战者号”太空飞船失事原因调查组成员，他很快发现飞船上一个橡皮垫圈 (O 型圈) 在摄氏零度以下失去了弹性是导致事故的症结所在。为了在听证会上向全世界电视观众阐明这个问题，他亲手演示了一个实验，把橡皮圈放入冰水中用手挤压它，在几秒钟内橡皮圈拒绝恢复原型。这使他一举成为公众心目中的英雄。1988 年 2 月 15 日，费恩曼因癌症在洛杉矶逝世。

费恩曼路径积分

1927 年之前，量子力学的创立工作基本完成，它已很好地说明了原子和分子的结构，但在处理原子中光的自发辐射和吸收这类十分重要的现象时，却遇到了困难。为了克服这一困难，1927 年，狄拉克 (Dirac) 首先提出将电磁场作为一个具有无穷维自由度的系统，进行二次量子化的方案；1928 年约尔丹 (Joaden) 和维格纳提出了对于非相对论性多电子系统符合于这个要求的正则量子化形式。1929 年海森伯 (Heisenberg) 和泡利 (Pauli) 把电磁场与电子场的相互作用理论推广到更为普遍的形式，从而建立了量子电动力学。

到 20 世纪 30 年代，人们对量子理论的理解既不彻底也不完美，而且需要新的思想。费恩曼从在麻省理工学院做学生以来一直被一个想法所困扰。即一个诸如电子那样的带电粒子，被认为是通过围绕它的力场而与其他带电粒子相互作用的。量子理论的最大困难就在于计算出来的电子自身能量和电磁场真空能量为无穷大。在用量子理论的微扰方法处理一些物理过程时，最低次近似往往都可得到与实验一致的结果；但如果要求做更高次的精确微扰计算时，得到的结果却常常是无穷大；无穷大的结果当然是没有物理意义的，这就是量子场论的发散困难。1935 年，狄拉克出版的《论量子物理学》的书中的说道：“看来这里需要全新的物理思想。”这句话成了费恩曼以后生活的一

个信条，没有任何地方对于新思想的需要比在这个称为电子“自能”的谜题中更为明显。这个想法在麻省理工学院就已经深深地在他头脑中扎根，随后在普林斯顿开花结果；并对在康奈尔大学时期的学术生涯产生意义深远的影响。

1940年秋的一天，费恩曼接到惠勒打来的电话；惠勒告诉他说：“他已知道为什么所有的电子都有相同的电荷和相同的质量。原因是它们都是同一个电子！”他解释了他最新的光辉思想：一个正电子可以被简单地看做一个电子在时间上往回运动，即由将来返回到过去，而宇宙中所有的电子和所有的正电子其实都对应于某种被切开的世界线线结的截面，在某个截面里，单个粒子通过一个复杂的扭结穿越时空，通过宇宙。惠勒的光辉思想中包含了一个重要概念的萌芽，即改变某个电子在时间上的运动方向等价于改变它所带电荷的符号，费恩曼后来用另一种方式发展了这一概念，即一个电子在时间上向前运动就是一个正电子在时间上往回运动。这就是惠勒-费恩曼的辐射理论。1941年春天，惠勒要求费恩曼就这一问题做一次专门演讲，演讲的听众有物理学家维格纳、天文学家罗素（Russell）、数学家冯·诺依曼（von Neumann）、量子理论的先驱者泡利（Pauli），还有爱因斯坦。报告结束之后，爱因斯坦认为惠勒-费恩曼理论尚有发展的可能。

在爱因斯坦想法的激励下，费恩曼正为这一难题而奋斗，有一天，他正和一位刚从欧洲来的物理学家耶勒（Herber Jehle）交谈，费恩曼问道：“你知道有什么方法能从作用量出发来构造量子力学吗？”耶勒告诉费恩曼说，8年前狄拉克曾发表过一篇相关的论文，费恩曼马上找到了这篇题为《量子力学中的拉格朗日量》的论文。狄拉克在论文中指出：拉格朗日方法之于量子力学类似于哈密顿方法之于经典力学——这恰恰是费恩曼求之不得的。费恩曼从直觉看出狄拉克这两种表达方式彼此等价；当他在两表达式之间放上一个比例常数使得这两个表达式彼此成比例时，计算的结果使他最后得到了人们在量子力学中熟知的薛定谔方程。

在读完狄拉克的那篇论文不久之后的一天，费恩曼躺在床上难以入睡，“他的这个想法使你不得不考虑一个粒子能从A走到B的每一条可能的

路径，即每一种可能的‘历史’；A与B之间的相互作用，可以表示成联系这两个事件的所有可能路径的贡献之和。”理由很明显，这就成了人们所知的量子力学的“历史累加”或者“路径积分”的方法。最小作用量原理是沿着单一轨道积分（或说累加），而路径积分方法是扩展到它所包含的一切可能的轨迹，把所有这些路径累加（积分）在一起，而不只是沿一条路径积分。粒子从时空中的一点运动到另一点的每一条可能的路径对应于一个数，费恩曼称之为振幅，并写下了他的量子力学新方法的普遍原则。就这样，费恩曼用拉格朗日量解决了涉及复合时空中事件的路径问题；并以《量子力学中的一个最小作用量原理》完成了他的博士论文。

到1942年春天，他的论文写完之时由于有关战争事务的打断，直到1948年这篇量子力学的路径积分方法的博士论文，才在《现代物理学评论》月刊上发表，这种新方法在解决量子电动力学问题中取得了可喜的成功。此时量子世界已经有两种截然不同的描述：一种是薛定谔的方法，基于波；另一种是海森伯的方法，基于粒子。量子力学的这两种形式已被证明彼此完全等价。现在，费恩曼找到了量子力学的第三种方法：基于作用量；路径积分的思想对事件的行为给出了一种物理直觉，并提供了一个华丽的智力图像。可以证明，仅此一项就足以将费恩曼与薛定谔、海森伯和狄拉克这些物理学巨匠相提并论。在所有能够做比较的方面，这种方法能得出与其他两种形式的理论相同的答案，它甚至还能用来处理用波函数的方法所不能解决的问题，应用起来极为简便；而且，通过拉格朗日量，对于理解从牛顿时代发展而来的经典力学，有着清晰的衔接。惠勒甚至称费恩曼的博士论文，标志着“量子理论变得比经典理论更简单”那一刻的到来。戴森（Dyson）在他那极富人文关怀的《宇宙波澜》中说道：“费恩曼的路径积分法的精神，给人看到的正是早年英气焕发的爱因斯坦……”

量子电动力学的费恩曼形式

1947年6月21日，在长岛顶端的谢尔特岛拉姆斯赫德酒店，举行的主题是“量子力学和电子问题”的会议，后来被称为“谢尔特岛会议”，在这次大人物的集会中，除了费恩曼，还有一位聪明的年

轻人施温格，他是哈佛大学的教授。施温格和费恩曼同年出生，而且他也是个有名的天才。

在谢尔特岛会议上的讨论热点乃是几周前，由兰姆(Lamb)及其同事拉瑟福德(Rutherford)在哥伦比亚大学的实验中发现的，他们所用的微波束探测技术来测量氢原子中电子的能级。实际上，他们测量了各个能级之间的能量差。按照狄拉克的理论，氢原子的一个电子可以有能量完全相同的两种量子态，类似于在同一个梯级上有一个双重的台阶。但兰姆发现，在这两个能级间有个微小的能级分裂，好比梯级中这对本应一般高的台阶却有一个比另一个稍微高了一点。后来称这个现象为兰姆移位。兰姆的工作表明狄拉克的理论偏差，对应于非常小的能级移位的很小的数，但它暗示了狄拉克理论不够完善。几乎同样富于戏剧性的发现，即电子磁矩的精确测量，由拉比(Rabi)向会议做了报告，但由于兰姆的工作而显得有些黯淡，不久后它将在量子电动力学的发展中扮演重要的角色。

既然狄拉克理论有不足之处，那么量子理论是否能预言能级改变的正确数量呢？核物理学家贝特在这次会议后，做了氢原子中电子能量的兰姆移位的第一次“重整化”计算。所谓“重整化”计算，就是把理论上能够通过重新定义电子的电荷 e_0 、质量 m_0 和场量 ψ 这些发散量吸收进去。例如可以重新定义电子质量（称为重整化质量） $m_r = m_0 + \delta m$ ，此处 δm 是各级修正中的发散量。然后把 m_r 解释为实验观测的电子质量。至于 m_0 ，它是不可观测的，因为它代表磁场不存在时的电子质量，而不和电磁场相互作用的电子是根本不存在的。经过重整化的处理后，各阶修正的结果都不再包含发散，计算的各阶辐射修正可和实验进行比较；这一方法给出了兰姆移位的正确答案。“重整化”方法是贝特在物理学研究方面惯常所用的点睛之笔；在多数物理学家看来，这是贝特对这个世界运作方式的一个基本发现。

1947年夏秋几个月，费恩曼一直是钻研如何计算自能和所有那些被忽视的问题，然后再来解决兰姆移位的问题。终于有一天在计算结果中发现无穷大消失了，方程是收敛的，而用的就是正确的“重整化”方法。1948年4月召开第二次重要会议——“波科诺会议”。在这次会议上，费恩曼公布了他已做完了他荣获诺贝尔奖的那项工作的全部

事情，其中包括把正电子看做在时间上往回走的电子的最新讨论。费恩曼用他自己的新的量子力学，能解决贝特用重整化方法所能解决的每一个问题，而且都得到相同的答案。他还能解决用旧的量子力学无法处理的许多问题。费恩曼是以形象化的方式来思考，对习惯于用哈密顿方法和薛定谔方程来思考问题的普通物理学家，要想抓住费恩曼的思路是颇为困难的。他那形象化的方式使他对世界如何运作，有一个鲜明的物理绘景，这种绘景给予他新的见解，从而用很少方程就能解决复杂的问题。在这次会议上，施温格借助于高超的数学技巧，用数以百计的方程准确地推导出他的量子电动力学另一种形式。

此时的费恩曼正处在他的能力的顶点，快乐地用他的新理论解决问题；1949年1月，美国物理学会的会议上一位叫斯洛特尼克(Slotnick)的物理学家用老方法花了好几个月时间算出了描述电子从中子上反弹的方式的一些新结果。费恩曼用他的理论花一个晚上就得到相同的结果。斯洛特尼克还发现费恩曼不仅是得到了和他相同的特解，而且还得到了这个问题一种普遍形式的通解，因为他考虑了电子与中子两者之间的动量转换（被电子击中时中子的反作用）；而斯洛特尼克只解决了零动量转换（没有反作用）情况下的问题。戴森后来描绘道：“这是我所见过的费恩曼能力的最令人眼花缭乱的表演，这些问题曾花费了大物理学家们几个月的时间而他却用两三个小时就解决了……用的是这种非常经济的方式……甚至在把方程写下来之前就把一些答案串起来了，并且直接从图形中得出结果。”

1949年4月11日至14日，在纽约州的欧德斯通，召开了科学史上第三次重要会议——“欧德斯通会议”；此刻费恩曼意识到：“这终于使我确信，我确实有了某种方法和技巧，懂得如何去做其他人还不知道该怎么做的事，这是我的胜利的时刻。”这次会议，量子电动力学的费恩曼方法居于舞台的中心，他告诉人们：量子电动力学是有效的，它能计算关于电子和光子的每一件事情。一个未满31岁的年轻人，成了他那一代领头的物理学家，用他的新思想在前面指路。随后，人们用同样的思想去弄懂包括弱相互作用、引力、核力等物理学的其余方面，费恩曼的研究方式对20世纪后半

叶的整个理论物理学起到了核心作用。

量子电动力学是描述包含光(光子)和带电粒子,特别是光子和电子的所有相互作用的理论。由于原子之间的相互作用取决于电子在原子核周围的电子云中的分布;这就意味着除了别的学科之外,量子电动力学是所有化学过程的基础。它解释了弹性是如何消长、甘油炸药是如何爆炸、眼睛是如何工作以及草为何是绿色的等问题;它还能解释引力未能解释的所有其他现象。量子电动力学是一个非常准确而又易于理解的理论,从在地球上实际完成的实验角度看,它是成功理论的范例,因为它非常精确地预言了实验的结果,电子磁矩的性质和兰姆移位是新理论取得如此成功的典型例子,它们全都能用费恩曼的技巧来简洁地解释。利用狄拉克的电子理论,你可以择定单位,使电子磁矩的值精确地为1。量子电动力学计算的磁矩值由于高阶修正偏离一个玻尔磁子 $\mu_B = e\eta/2m_e$ 。1981年有人计算了 α 四阶修正,得出 $\mu_e = 1.001159652460(148) \mu_B$,而实验值是 $\mu_e = 1.001159652209(31) \mu_B$;可见,量子电动力学理论和实验的一致性精确到小数点后第10位上为2,或者说是0.00000002%。费恩曼比喻这个精确度,相当于从洛杉矶到纽约的距离与人的头发丝的粗细之比。至今量子电动力学通过了在很高的精度上与电子和 μ 子的反常磁距及原子能级的兰姆移位(有人已计算出兰姆移位的理论值是: $\Delta\nu(2S_{1/2} - 2P_{1/2}) = 1057.884 \pm 0.013$ 兆赫,而实验值是: 1057.862 ± 0.020 兆赫)的所有实验的考验,这些实验表明量子电动力学在大于 10^{-16} cm 处是正确的。

费恩曼图

40年代末期,当费恩曼在康奈尔完成了量子电动力学的创建工作时,他开始考虑每个对应的都是光子和电子—正电子对的一特定发射与吸收的序列相互作用的简单表述方式,从而发明了“费恩曼图”。赛格雷(Segrè)说道:“它不但能以直观的方式表达了客观现象,同时也可以对数学公式进行分析和推导,它把很长很费力的、而且很容易产生代数差错的运算加以概括,并把它们按照一定的规则转换成很简单的过程。”

在量子电动力学中,用哈密顿量 H 所构成的 S 矩阵元来描述微观粒子所组成的系统散射或反应过程;在 S 矩阵元中,提出一个反映由初态向末

态转化过程中能量动量守恒的因子 $\delta^4(\Sigma p)$ 后,便得到 M 矩阵元,具体物理过程的跃迁几率直接与 $|M|^2$ 成正比。一个重要而又困难的问题如何具体计算各种反应的 M 矩阵元,“费恩曼图”就是给出如何计算 M 矩阵的图解方法。

把 M 矩阵的每一项都与一定的费恩曼图联系起来,由确定的图,可以根据“费恩曼规则”,很快地写出相应矩阵元的表达式,而且由费恩曼图可以清楚地得出这些过程的物理解释。费恩曼图里是用一根带箭头的实线代表电子,带反箭头的实线代表正电子,波浪线代表光子;电子、正电子和光子的每一次相互作用,都用交于一点的两根实线(箭头分别指向和指离支点)和一根波浪线来描写,这支撑点称为作用顶点。代表初态或末态的线只有一头连接顶点,称为外线,而介于两个顶点之间的线称为内线,内线描写传递相互作用的中间过程的粒子,称为虚粒子。在任一费恩曼图中,沿实线箭头方向移动,实线或者连成圈,或者由外线引向另一外线,它不会在任一顶点终止,这反映了在反应过程中电子数是守恒的。在任何一个图上多增加一条内线,都会使该图的贡献降低一个系数,该系数大致等于大自然的一个基本常数,称为“精细结构常数”,这一常数很小,约为 $1/137.036$ 。因此,复杂图的贡献也很小,我们可通过将几个简单图的贡献相加,计算出散射过程的比率的充分近似值。费恩曼图的顶点数称为费恩曼图的级数, n 级费恩曼图代表 M 矩阵展开式中 M_n 的一项。例如两个电子的散射过程,它的二级费恩曼图(如图1所示);它描写一个电子先放出一个光子,这带有一定能量动量的光子传递到另一电子,并被后一电子所吸收,这样,两个电子的电磁散射,不是它们的直接作用,也不是超距作用,而是由电子场与电磁场的相互作用,透过发射和吸收光子的过程

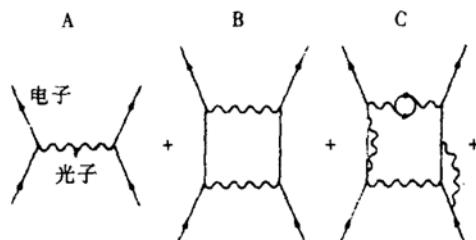


图1 根据费恩曼规则,当两个电子(以直线表示)碰撞时,它们交换光子(以波浪线表示),在图A中,碰撞的电子交换一个光子;在图B中,它们交换两个光子;在图C中,它们交换许多光子。

来实现的。作为中间过程的光子，它被发射以后很快被第二个电子所吸收，它与可以被实验仪器直接观测到的物理光子不同，称为虚光子。利用费恩曼发展起来的这套方法，可以系统而方便地计算各种电磁过程的几率，而且物理意义十分明确。

戴森说道：“费恩曼主要是依靠突发的直觉所冒出的一些想法，再用他们做为游戏规则，然后以此类推。”费恩曼图是费恩曼对自然的所有发现中最富有弹性的通则，量子电动力学非常精确地预测了当时所做的一切实验结果，但在粒子物理学领域却显得英雄无用武之地。而时空轨迹、路径积分方法等通则的适用范围比量子电动力学更宽广。费恩曼图却在每一位理论家手上成为研究微观粒子行为第一套派上用场的工具。古德斯坦(Goodstein)说：“费恩曼的科学贡献既不平凡而又意义深远，它们与其他人的贡献没有相似之处，他用他的人格和观点来影响科学世界；他重新系统地阐述了量子力学，而实际上是重新发明了它。而且他是以一种如今仍在整个理论物理的每一领域广为应用的形式提供给我们的。”

超流和弱相互作用

在 20 世纪 50 年代，费恩曼在 5 年中写了 10 篇系列论文来解释液氦的超流行为。和往常一样，他总是从第一性原理做起，考虑流体中单个原子的行为，即它们振动或彼此滑动或相互碰撞的方式。费恩曼从液氦是玻色-爱因斯坦凝结这一点出发，借助于量子电动力学或经典光学中都有效的路径积分方法，通过“一系列严密的推理论证”，就得出有关液氦行为的漂亮的理论。这一理论被物理学家派斯(Pines)描述为“那种不可思议的想法，是费恩曼式的新颖别致的数学和见解独到的物理学的融合。”

1956 年，费恩曼一直在思考宇宙射线中刚刚发现的 θ 粒子和 τ 粒子的奇异性问题，这两种粒子几乎各个方面都相同，仅有一点不同：当它们衰变时 θ 粒子衰变为两个 π 介子，而 τ 粒子衰变成 3 个 π 介子。而两个 π 介子的宇称为 +1，3 个 π 介子的宇称为 -1。假定衰变过程中宇称不变，那么意味着 θ 粒子和 τ 粒子本身就具有不同的宇称，因此它们必定是不同的粒子。“宇称守恒”的概念是物理学家们极力维护的信念，因为它和事物的镜像反演的方式相联系。如果宇称是守恒的，这意味着从根本上讲，自然界不区分左和右。如果宇称不

守恒，这将意味着在艾丽斯的镜中世界里物理学的定律将有所不同。在 1956 年罗切斯特会议中，布洛克(Block)问费恩曼：如果 θ 粒子和 τ 粒子是同一种粒子，宇称守恒就会被破坏，那么是不是真的很糟糕？费恩曼认为这是一个很好的问题；1957 年 4 月，费恩曼经过成熟的思考后，以典型的闪电式方式解决了这个困扰已久的问题；他很快找到一种全新的方法来系统阐述 $V-A$ 理论。

所谓 $V-A$ 理论，是一种适用于部分低能弱相互作用现象的唯象理论；1934 年，费米(Fermi)基于当时的实验事实推测：基本的弱相互作用是费米子之间的作用，费米子场算符可由下列包含四个哈密顿算符和一个张量来描写，即标量(S)、赝标量(P)、矢量(V)、赝矢量(A)和张量(T)五种类型。1957—1958 年，随着弱作用实验和理论分析的进展，马夏克和苏达香提出基本的弱相互作用可以归结为矢量型(V)和赝矢量型(A)两种，这就是普适费米弱作用理论，通常又称 $V-A$ 理论。费恩曼通过 $V-A$ 理论建立的 β 衰变方程成了最让他心动的一个发现，并意识到“现在我自己终于实现了自我；”且准备写下他的发现立刻发表。几乎同时，盖尔曼也得到了与费恩曼相似形式的理论；1957 年 9 月，费恩曼和盖尔曼在《物理学评论》上联名发表一篇以狄拉克提出“电子方程”的方式给出了“中微子方程”论文，这就是著名的费恩曼—盖尔曼弱相互作用理论。超流理论和弱相互作用理论，是 20 世纪 50 年代费恩曼对物理学的两大贡献，其中任何一项都足以使普通物理学家在其专业上树立起名家形象。

部分子模型

20 世纪 60 年代中晚期的粒子物理学状况确实混乱。大多数人把夸克模型看做是一种疯狂的思想；就是盖尔曼本人看来最多也不过是半信半疑。虽然盖尔曼继续发展这一思想，但由于高能加速器实验从未真正找到存在带有分数电荷的自由粒子的任何证据，所以许多物理学家觉得很难相信夸克的现实性。在芝加哥的费恩曼，无视其他人正在做的事情，且把每个强子看做点状粒子的云来描述在高能碰撞中发生的现象，从而建立了“部分子模型”；费恩曼对这一问题的解决，具有典型的费恩曼研究所具有的所有特点，其中包括他惯用的解决问题的数学工具。

所谓部分子模型，是根据电子对核子的深度非弹性散射实验所提出，描述高能碰撞现象的强子结构模型；高能电子 - 核子深度非弹性散射实验，显示出在核子内部电荷的分布不是连续分布而是集中在一些点上。这表明从电荷结构来看，核子内部存在一些带电的点粒子。费恩曼把他未对强子内部组分的本质做出推测而假想出来的这些组分，命名为“部分子(parton)”。费恩曼认为，强子是由许多带电的点粒子构成，这些点粒子在高能电磁相互作用和弱相互作用过程中可以近似作为相互独立的粒子，并在一个大致是球体的空间中运动。当费恩曼于 1968 年上半年完成这些工作后，一台新的粒子加速器在加利福尼亚北部的斯坦福大学建成，它被称为斯坦福直线加速器中心(SLAC)，直线加速器从靶上发射电子束与静止的质子碰撞，并从碰撞点产生粒子流形式的碎片。通过监视以这种方式产生的粒子簇射，研究者可望弄清质子内部的状况；由于电子和质子碰撞是小距离散射，而且电子可以被看作是点状粒子，所以可望通过电子被质子散射的实验来揭示质子内部的某种结构。这些实验当时正由来自麻省理工学院和 SLAC 的研究人员组成的联合小组承担，领头人是弗里德曼(Jerome Friedlnan)、肯德尔(Hemp Kendall)和泰勒(Richard Taylor)。后来他们因核子深度非弹性散射而获得 1990 年诺贝尔物理学奖。

当时还有一位物理学家叫比约肯(James Bjorken)，他在 SLAC 研究一种描述电子 - 质子碰撞现象的理论，用的是一种称为流代数的高度数学化的形式。比约肯绘出了在不同能量时有关碰撞现象的曲线。1968 年 8 月，费恩曼碰巧路过 SLAC，比约肯当时不在那儿，但实验人员和其他理论物理学家给费恩曼看了比约肯关于电子 - 质子碰撞所得出的结果，其中包括原始数据。这项工作的主要特点是，不管相互作用的能量如何，实验曲线都有相同的形状，这叫做比约肯标度不变性。费恩曼意识到，可以仿效他自己在部分子方面的工作来描述粒子的相互作用。比约肯描述到：“费恩曼只花了一个晚上来计算，就用部分子解释了所发生的现象”，那是一种简单明了、富有魅力、让每个人都能够理解的语言，使得所有人都可以理解粒子物理学理论。1968 年 10 月，费恩曼回到 SLAC 报告了他的这一思想。费恩曼初期对部分子的性

质并不能完全确定，由于在解释电子 - 质子碰撞现象中取得了一系列成功，从而增强了这一模型的明晰性。随后，在电子深度非弹性散射中，物理学家们探测到的带电部分子具有 $1/2$ 自旋；后来人们对费恩曼的理论进行了推广，把夸克或反夸克这种部分子模型和夸克模型结合起来就构成了夸克 - 部分子模型；这一模型认为：由于强子是由夸克通过色相互作用结合成的复合粒子，强子内的部分子可以由三类粒子组成：一类称为价夸克，它们的数目和味是确定的并随不同强子而不同，价夸克决定强子的性质；一类称为海夸克，它们的数目和味是不确定的，但其总和的味性质和真空相同；一类称为胶子，它们的数目不定，其味性质和真空相同，起传递色相互作用的作用。这个模型认为决定强子内部结构的动力学机制是量子色动力学，并充分利用部分子模型中发展的方法来进行处理，这个模型已成为分析研究高能碰撞现象的重要理论工具。费恩曼是在年近花甲之际做出重要的工作，他不仅把 30 年前发展的量子电动力学理论为量子色动力学提供了一个样板，而且也积极参加了量子色动力学的建立。

以诚实对待自然 用消遣玩味物理

费恩曼具有原创精神，总是坚持用尽可能少的先入之见和最普通的形式来解决问题，这是他的人生观的一部分，也是他能够保持诚实的一种方法。费恩曼在他那著名的演讲中说道：“在科学上绝对诚实是何等重要；第一个原则是，你一定不要欺骗你自己——况且你是最容易被欺骗的人……只有做到不欺骗自己之后，才能做到不去欺骗其他科学家。”这就是一种科学上的诚实。当他有疑问时会毫不犹豫地发问，甚至对爱因斯坦也是如此；当爱因斯坦正在普林斯顿大学的高等研究院作一个学术报告时，费恩曼提问时根本就把名誉和声望放置一边。当听一些年轻科学家的演讲时，如果听起来有什么不对头的地方，费恩曼就会毫无顾及地质疑，直到讲明白了为止。

他告诫人们说：如果你正在做一个实验，就应该报告所有可能使之无效的事情——而不仅仅是那些你认为是正确的，而且还有你所考虑过的已为其他某些实验所排除的东西，以及那些实验是怎样做的——总之要让别人相信它们。如果在你的解释中有某些可能引起怀疑的细节，一定要说

出来；也就是说，你一定要尽你所能——只要你知道有什么可能的错误都要解释它。如果你提出一种理论，大肆宣传它或是发表它，那么你一定要像记下所有与它相符的事实那样，把与它不一致的事实也记录下来。

1957年，费恩曼在对超导这个课题的研究中恰恰显示了他在科学上的极其诚实，在这一问题上他的才识当时未能做出满意结果；就在此时，巴丁(Bardeen)、库珀(Cooper)和施里弗(Schrieffer)建立了超导理论，费恩曼属于认识他们理论(称为BCS理论)真正能够解决这一问题的第一批物理学家。他马上放弃了自己解释超导体方面的努力，并且在每一个适当的场合歌颂BCS理论，同时还热心地描述自己失败理论的种种细节。他的天性真诚使他在危险区域做上标记，以免他人重蹈覆辙。

科学家很难做到这种完全的诚实，即使是最诚实的科学家也会下意识地去掉那奇怪的角落，或是忽略掉所有那些与他们得意的理论相冲突的证据，但费恩曼从不屈从于自己的如意算盘。用福勒的话说：“费恩曼是个非常明智的人，他为每个人确立了很高的标准；他激励你去达到它，就因为他在加州理工学院这一事实，所有我们在那儿的人都认为我们必须达到他的标准，他就是以这种方式影响了我们所有的人。”

1964年他接受了到康奈尔做梅-辛杰(Messenger)系列讲座的邀请，选题为“物理法则的特征”。他用他那响亮的声音，不仅表明了物理学的地位，而且也深藏着他对自然的敬畏：“我们通过以下过程来找到某种新的法则；首先我们猜测它，接着把猜测的结果计算出来，如果我们猜测的法则是正确的，它的含义会是什么。然后把计算结果同实验或经验作比较，看看它是否有效，若与实验不符那就是错的。”这样简单的词语乃是科学的关键。不论你的猜测是多么美妙，也不论做出这一猜测的人有多么精明，他是谁，都不会有任何区别——“若与实验不符那就是错的。”这些演讲被英国广播公司(BBC)在电视中播出，使费恩曼在广大民众的心目中建立了一个朴素的科学哲学家的形象。

费恩曼虽然从事物理学研究但“一如常人”，他把他的玩笑的内在意义、不敬言行以及对冒险和意外奇遇的爱好带进了科学世界。对费恩曼来讲，爱比科学重要得多；不过他既爱人们也爱物理

学。科学对费恩曼至为重要，谁对它没有起码的了解，就不可能了解费恩曼是什么样的人。像费恩曼这种爱开玩笑、喜欢冒险的人之所以被物理学所吸引，是因为物理学就是玩笑，还能提供冒险的机会。“他是多么喜欢搞物理，那纯粹是一种消遣而没有不合意的时候。它是一份舒适的工作，生活有保障，又能教他喜欢的课程，为了消遣而玩赏物理。”有一次在康奈尔大学的餐厅，当一个学生与周围的人逗乐，把上面有红色的康奈尔校徽的盘子抛到空中，像现代的塑料飞碟那样旋转。费恩曼被这一玩笑吸引了，他注意到当盘子一边晃动一边旋转时，校徽旋转的速度和晃动的速度不同；他就开始着手计算晃动和旋转的关系，从一个复杂的方程中立即发现其中有一个准确的简单比值2:1；这一件事使他的潜意识中意识到，这正是推进他的论文工作中受阻的“计算电子自旋效应”的大问题；费恩曼立即用计算旋转盘子的振动方程轻而易举地给老问题赋予新创意。他后来说道：“我获得诺贝尔奖的整个工作都得益于那个晃动的盘子之类的小玩意。”

费恩曼的物理学成就大多是极富个性化的，他对科学的看法和常人总是南辕北辙，世界在他眼中只是一些经纬交织的作品展布在时空之间，所有的东西都可以自由移动，只要把各种可能的历史统统加起来，就可描绘最后的结果。并且认为他那种所谓“路径积分(历史累加)法”是大自然共通的法则。费恩曼认为：爱因斯坦早年的伟大成就都是建立在对物理的直觉，晚年的失败全系因为他停止思考紧密的物理图像，舍本逐末去玩弄方程式所致。但不管如何，爱因斯坦是以繁琐的数学明辨真理，而费恩曼却借助于非凡的直觉洞察真理。戴森赞叹道：“科学特殊的美感就是这样，有些看来恰呈两极化的论点，如果退一步，以更宏观的视野来看时，却可能并行不悖。”

波兰出生的美籍数学家马克·卡克(Mark Kac)曾经说过，天才有两类：一类天才，在他们的思维中并没有什么神秘之处，一旦把他们所做的事情讲给我们听，我们会觉得如果我们足够聪明也一样能做；然而另一类才是真正的魔术师，即使把他们所做的事情讲给我们听，我们也弄不明白他们究竟是怎么做的。卡克赞叹道，理查德·费恩曼“正是能力最强的魔术师。”

作为一位伟大的教师

费恩曼和爱因斯坦一脉相承，是物理学家中物理学家，他讨厌繁文缛礼，因为美国国家科学院花费大部分时间来决定其他科学家中何人应选为院士，所以他就辞去院士位置，这是他独特的做人准则。费恩曼除了依靠显赫的成就使他闻名于世外，还通过他的教学以另一种方式对现代物理学产生影响。20世纪60年代初，美国大学生们仍按40年代设置的陈旧的课程接受教育，一位有志于教学改革的教授忽发奇想：为什么不可以让费恩曼来试试呢？没有任何别的大物理学家教过大学新生的物理课，作为美国加州理工学院年薪最高的理论物理学教授的费恩曼，却被这一挑战和机遇所吸引，这使他得以向世界上更广泛的听众表明他的思想方法。从1961年秋天起，费恩曼就开始了物理学导论的系列演讲，前后跨越了两学年；由于意识到这将是一件不寻常的事情，加州理工学院小心保存了这些演讲，以保证留传后代。

费恩曼是一位伟大的导师，不论听众是什么样的人，他都真正能做到谈吐自如。费恩曼的演讲达到了如此理想的地步，每个演讲都自成一体，演讲并非只是新生的物理学入门课，而是成了物理学的指南。他自己对物理学的理解，思考事物的方法以及解决问题的哲理等，都被囊括其中。演讲的整个内容对物理学的学子以及全世界物理学家都产生了巨大的影响。如费恩曼自己所述，他的目标是“引导他们在课堂上达到最好的理解”。费恩曼的《物理学讲演录》的突出特点是“将基础物理学中公认为困难的概念变为能让广大听众所接受的东西”，对任何热爱物理学的人，都为他们提供了信息的宝库和超出常规教学的机会。任何有足够动力的人都可以从这些书中真正地学到物理，而如果你已经知晓其中的一些东西，那这些书的作用就会更大。

作为加州理工学院的副院长的古德斯坦说道：“费恩曼的伟大成就，丝毫不逊色于以全新的视角来看待物理学的一切，他远不仅仅是个伟大的老师，他的永恒的纪念碑文是：他是一位伟大的老师的老师。”费恩曼自己也曾对古德斯坦说过，从长远来看，他对物理学所作的最大的贡献并不是量子电动力学或者其他理论工作，而恰恰是他的《物理学讲演录》。因为其中讲了他对待物理学的方法和对自然的态度。它教导人们如何去思

考，坚持审慎的诚实与正直，激发对自然的敬畏与欣赏以及对科学的热爱。他明确地提出的观点是：科学理论可以来了又去，被更好的理论所取代，但科学的方法及其书中他所热情描述的发现事物的那种快乐，却是所有科学赖以建立的基本原则。费恩曼对自己的评价一语道破了大学者做基础教育的意义；一个显而易见的事实是，一个学者对某一学科的研究越深，就越是接近这门学科的精髓，《费恩曼物理学讲义》只用9个方程就概括了从牛顿经麦克斯韦直至爱因斯坦的物理学的所有内容！这种简洁和清晰，对初涉此道的年轻学子尽快把握学科精神是无价之宝。费恩曼的演讲能把人们的理解力提高到他们未曾达到过的高度，听过费恩曼演讲的人说，他们像被施加了魔法，简直被迷住了，见过他的人也有同样的特异感觉，却不能十分明确地道出原委，只能凭借体验来领悟其中的奥妙；例如，在一次有关广义相对论的讲课中提到了星系：他说，银河系中约有 10^{11} 颗星，这通常被看成一个巨大的数字；其实呢，这不过是一千个亿，比美国的财政赤字还小一些，我们常常把这种数字叫做“天文”数字，现在都应该把它叫做“经济”数字了。费恩曼也是个喜欢讲故事的表演者，他把发生在自己身上真实的故事以不同的方式和不同的侧重点来讲述它们，以达到最佳的效果，这些故事就像寓言一样给人以教益，教你以正确方式去生活和如何与这个世界融洽相处。戴森在《从爱神到大地女神》中写道：“费恩曼是个伟大的传播者，在他所做的任何一个演讲中，我从没见过听众不开怀大笑的。”从未见过费恩曼的人也亲切地感受到了费恩曼这个榜样的鼓舞，作为“智者”的他将更多地以这种方式而不是由于他参与科学的特殊缘故受到怀念。在世界各地，甚至许多未曾见过费恩曼的人都为他的逝世而怀有故人已去的感觉。世界各国的下一代物理学家都曾是费恩曼的三卷本《物理学讲演录》中受益者。这套书在过去几十年中从未绝版，这对费恩曼本人也同样是一种鼓舞。那些明晰的讲义帮助人们确定了职业，即使是研究水平上的科学，也依然使他们感到颇为有趣。正如布朗(Brown)和里格登(Rigdon)所说的那样：“我们有种强烈的感觉——所有现代物理学家都是费恩曼的学生。”

(江苏淮阴师范学院物理系 223000)