



## 狄拉克谈理论物理研究方法

李 让 贤 见

编者按：P.A.M. 狄拉克 (1902.8.8—1984.10.20)，英国物理学家，量子力学的创始人之一，因对量子力学所做的贡献而与薛定谔合得 1933 年诺贝尔物理学奖。“理论物理研究方法”节译自世界科学出版社 1989 年出版的《From a Life of Physics》。为不失原文风格，下文仍采用狄拉克的第一人称表述。

我试图给你们一个概念，即理论物理学家如何工作—如何努力着手去研究，以便更好地了解自然规律。

人们可以追忆过去从事的研究，这样做，人们的思想深处总潜在着希望，可以从中得到启发，教训，前车之鉴，有利于当前研究工作，无论过去还是现在，人们所遇到的问题有许多根本上相同之处，温故知新，回顾成功之路，对今天的研究会有帮助。

对理论物理学家而言，主要有两种研究方式，其一是以实验为出发点，这就必须保持与实验物理学家紧密接触，获悉他们所得到的的一切结果，并试图将这些结果恰如其分地安排到令人满意，使人信服的物理框架中去。其二是以数学为基础，检验与批判现有的理论，准确找出并消除现有理论中的缺陷。这里困难在于，消除缺陷而不损坏现有理论的巨大成就。当然，这两种一般的研究方式的区分不是那样泾渭分明，在这两极端之间还存在着种种程度不同的方式。

采用那种方式主要取决于研究课题。对于知之甚少，刚刚开辟的领域，采用以实验为出发点的方式为佳，开始只需收集实验的事实，加以分类整理。例如：让我们回顾上世纪元素周期表是怎样建立的，最初，只是收集实验事实并加以整理，随着周期表的逐步建立，人们逐渐树立了信心。最后，元素周期表趋于完成，人们也足以预言：周期表中的空位，将被以后发现的新元素所占据，这些预言都被证实了。

在知之甚少的物理研究领域里，物理学家必须坚持以实验为基础，如果过于沉溺于异想天开的猜测性的思辨中，无疑会导致错误。我并不要一概地贬低猜测性的思辨，即使它的最后结果是错误的，还是受欢迎的，间接是有用的，物理学家应该经常不断地解放思想以接受新观念，所以不要全然反对猜测性的思辨，但必须当心不要沉溺于它之中。

### 宇宙学的猜测性的思辨

宇宙学就是有着太多的猜测性的思辨，面对寥寥

无几的确凿事实，理论工作者却基于种种能够想象到的假设一直忙于建立各种各样的宇宙模型。这些模型可能全然不对。通常人们以为自然规律总是一成不变的，这是没有根据的。自然规律也可能在变化之中，特别是，被视为自然界中的一些常量，却可能随着宇宙岁月流逝而改变。这样的改变会整个推翻模型构造者的结果。

随着某个课题知识的积累，人们藉以研究的基础大大扩大，就能越来越多地使用数学方式。这时追求数学的完美已成为基本的动机。理论物理学家把数学完美的要求作为一种信仰，没有强制的理由要这样，但以往的经验表明这是富有成效的目标，例如：相对论之所以被普遍接受，主要在于它的数学的优美。

数学方式有两个可用的主要方法：(1) 消除不一致性；(2) 把先前互不相关的理论统一起来。

### 成功之道

许多例子表明，方法(1)卓有成效。麦克斯韦研究了他那个时代的电磁方程的不一致性，从而引进了位移电流的概念，建立了电磁波理论。普朗克研究了黑体辐射理论中的困难，引进了量子概念。爱因斯坦注意到处在黑体辐射平衡态中单个原子的理论中的某个困难，从而引进了受激辐射这一概念，导致了现代激光，但是，最精采的例子还是爱因斯坦引力理论的创建，它来自于协调牛顿引力理论和狭义相对论的需要。

实践表明，方式(2)不太有效。人们以为，物理学中的两个长程作用场，即引力场和电磁场应该密切相关。爱因斯坦耗费了许多岁月试图把它们统一起来，但没有成功。看来，试图直接把不相关的理论统一起来，而又没有发现其中可以入手的不协调之处，一般来说，这太困难。如果成功最终果然来临，也将是通过某种间接的方式。

采用实验的还是数学的方式，虽然很大程度上取决于研究课题，但并非完全如此，这也取决于研究者本人。量子力学的发现就是一个例证。这里涉及两个人，海森伯和薛定谔。海森伯以实验为基础从事研究，使用了光谱学的成果。而到一九二五年这已累积了大量数据。其中很多是无用的，但有些是有用的，例如：多重谱线中谱线的相对强度。海森伯的天才在于，他

能够从浩如烟海的情报中挑选出重要的东西来，并把它们置于某个自然的模式中，就这样他得到了矩阵(力学)。薛定谔的研究是十分不同的，他以数学为基础，不象海森伯那样，清楚了解光谱学的最新成果。但是他思想深处认为，光谱频率应该由本征值方程所确定，这有些类似于本征值确定了弦振动的频率。他早已有了这种想法，最后得以间接地找到了正确的方程。

### 相对论的影响

为了解那个时代理论物理学家工作的气氛，必须知道相对论的巨大影响。在漫长和困难的战争年代结束时，相对论以其巨大的影响深入科学思想的世界中。每个人都想从战争的紧张中摆脱出来，热切地抓住新的思想模式和新哲学。那种激动的气氛在科学史上是史无前例的。在这种激动的背景下，物理学力图去解开原子稳定性的奥秘。薛定谔象其他人一样被新思想所吸引，企图在相对论的框架内建立起量子力学。一切的量都应表成时空中的矢量和张量。不幸的是，那时建立相对论量子力学还为时过早，薛定谔的发现被耽搁了。薛定谔的出发点是基于德布罗意把粒子和波以相对论方式联系起来的美妙想法。而德布罗意的想法仅适用于自由粒子。薛定谔试图把这个想法推广到原子中束缚电子的情形。他在相对论的框架内做成了。但当把他的理论应用到氢原子，他发现结果与实验不符。这种不符是因为没有考虑电子的自旋，这在当时是不知道的。薛定谔进而注意到，他的理论在非相对论近似下却是对的，他只好让步，发表了这个降格的非相对论理论，这已耽搁了几个月。

这个故事的经验教训在于人们不应要求一步做得太多，而应把物理学中的困难尽可能地逐个分开，然后一个一个地解决。

海森伯和薛定谔给了我们量子力学的两个形式，很快发现它们是等价的，这两种表象之间可以用某个数学变换相联系。

我在早期的量子力学工作中，用的是基于某个很抽象的观点的数学方式。我从海森伯的矩阵所提示的非对易代数入手，这是新的动力学的主要特点，并考察经典动力学如何能够与此相适应。当时其他人从不同观点致力于这个课题，我们几乎同时获得了等价的结果。

### 暇余的收获

我想提一下，我发现最好的想法通常不是产生于当人们正在积极地探索时，而往往出现在人们较松弛时。布洛赫教授曾告诉我们，他经常在火车上产生灵感，并常在旅途结束前得出结果。我的情形不同，通常周日我独自漫长散步，步行时悠闲地回想目前工作的状况，这时常有收获，即便(或许正因为)散步的主要目

的是休息，而不是思考问题。正是在这样的一次散步，我想到了对易子和泊松括号之间可能有着联系，当时我不大清楚泊松括号是什么，所以不能确认这种联系。回家后，我发现家里没有解释泊松括号的书籍，我只得耐心等待次日早晨图书馆开门，以证实这个想法对否。

随着量子力学的发展，理论物理出现了新的情况：基本方程，海森伯运动方程，对易关系和薛定谔波动方程被发现，它们的物理解释却不清楚。由于动力学变量不可对易，人们所习惯的经典力学的直接解释已不适用，这就需要找到这些新方程的准确含义和适用方式。这个问题不是直接地解决的。人们首先研究一些例子，例如非相对论的氢原子和康普顿散射，找到了求解这些例子的特殊方法。逐渐地推而广之，若干年后，随着海森伯测不准原理和波函数的一般统计解释的确立，人们对量子力学才有了象今天这样的完全理解。

量子力学早期的迅速进展，是在它的非相对论的形式中做出的，自然人们对此不会满意。单个电子的相对论理论，也就是薛定谔最初的方程已建立。这个方程又被克莱因和戈登再次发现，并以他们的名字命名。然而，对这个理论的解释却与量子力学的一般统计解释不一致。

### 从张量到旋量

按那时对相对论的理解，所有相对论性的理论必须能以张量形式来表达。在此基础上，不会有比克莱因-戈登理论更好的理论。大多数物理学家都满足于把克莱因-戈登理论当作可能的最好的单个电子的相对论量子理论。不过这个理论和一般原理之间的分歧使我始终不满，我一直为此担忧，直到找到解答。

张量已不再适用，必须摆脱它们，引进现在称之为旋量的双值量。过于习惯于张量的人们是不容易从张量中摆脱出来，去考虑某些更一般的东西的。我之所以能做到这点，只是因为与张量相比较，我更偏爱量子力学的一般原理。当爱丁登看到偏离张量的可能性后，他感到非常惊讶。人们应当经常警惕自己，不要过于偏爱某个特殊的思路。

旋量的引进给出了与量子力学的一般原理相一致的相对性理论。这也解释了电子的自旋，虽然这并非是该项工作的原先目的。这时又出现了一个新问题，即负能态问题。该理论显示出正能态和负能态之间的对称性，而在自然界中只存在着正能态。

正如以数学方式从事研究所经常遇到的，一个困难的解决引出了另一个困难。也许你会以为，那样就根本没有进展，但并非如此，因为第二个困难比第一个存在得更悠久。也许，第二个困难实际上始终存在着，只是当第一个困难解决后，它才突出起来。负能态困难就属这种情形。所有相对论的理论都有着正能态和负能态的对称性，只是先前这个困难一直被该理论中

的更大的缺陷所掩盖着。

只要假定真空中所有的负能态已被电子填满，负能态困难就可以消除。这在理论中，除了电子外还存在着正电子，我们的认识因而也达到了新阶段。然而，又有一个新困难出现了，这一次它与电子和电磁场的相互作用相联系。当写出并试图求解，人们相信能精确描述这个相互作用的方程时，发现一些本应有限的物理量却是发散的积分。这个困难实际上又是始终存在的，它潜伏在理论中，只是现在变为主要的了。

### 误入歧途？

如果人们用经典的方法处理点状电子与电磁场的相互作用，就会发现与场的奇点相联系的困难。人们早在洛伦兹所处的年代，就知道这个困难。洛伦兹最先解出了单个电子的运动方程。在海森伯和薛定谔的量子力学早期，人们以为这些困难会被新力学所消除。现在清楚了，这个希望不能实现。这困难再次以发散的形式出现在量子电动力学，即电子和电磁场相互作用的理论中。此困难变成与负能电子海相关的无穷大，并成为主要的问题。

发散困难是棘手的，二十年内无进展，然后有了发展，这来自于兰姆的发现和兰姆移位的解释，这个进展却根本地改变了理论物理的性质。这里涉及到把无穷大分离开的规则确立，这些规则是精确的，使得余留下的量是确定的，有限的，可以与实验相比较。但人们还只是在使用一些工作规则，而不是正规的数学。

今天，看来大多数理论物理学家满足于这种状况，但是，我并非如此。我相信，这样的发展使理论物理学误入歧途，人们不应对此满意，当前的情形类似于一九二七年，当时大部分物理学家满足于克莱因-戈登方程，却不介意该理论的负几率困难。

必须认识到当我们不得不从方程中抛弃无穷大时，就犯了根本性的错误，我们必须维护逻辑学中的基本观念，那怕付出巨大代价。对此的关切，可能会导致重要的进展。量子电动力学是物理学中知之最多的领域。可以设想，要使其其他的场论有根本的进展，必须先弄清量子电动力学，虽然这些场论本身还将在实验的基础上继续发展。

让我们看一看，为了把量子电动力学建立在逻辑基础上，能作些什么。我们必须按惯例行事，只有人们相信是小的量，才可以忽略，尽管这种相信所依赖的理由也许并不可靠。为了处理无穷大，我们必须使用某个截止的程序，在数学中，当某个级数或积分不是绝对收敛时，就必须使用这个程序。引进某个截止后，让它越来越大，就得到某个极限，这个极限依赖于截止的方法。或者，我们可以让这个截止有限，这就必须找到不怎么依赖于这个截止的物理量。

量子电动力学的发散来自于粒子和场相互作用的

高能项。因此，截止相当于引进某个能量  $\epsilon$ ，比这个能量更高的相互作用项将略去。结果发现让  $\epsilon$  趋于无穷大时，会破坏求解方程的逻辑性，这迫使我们采用某个有限大的截止。这时理论的相对论不变性破坏了，这很遗憾；但比起逻辑推理的破坏总要好些。由此得到的理论不再适用于比  $\epsilon$  更高能量的过程，但是我们还是可以期望这个理论对低能过程是个好的近似。

基于物理的考虑， $\epsilon$  应是数亿电子伏量级，当达到这个能区，量子电动力学不再自成一统，物理学中的其他粒子开始起重要作用。 $\epsilon$  的这个值对量子电动力学来说是合适的。由于截止是有限的，我们必须去寻找那样的物理量，它们不怎么依赖截止的数值和截止的精确方式。这时我们发现，薛定谔表象已不再适用，薛定谔方程的解，即使是真空态的解也极大地依赖于此截止。但是在海森伯表象计算的某些结果，却不怎么依赖于截止。用这种方法计算兰姆移位和电子的反常磁矩，所得的结果与二十年前运用抛弃无穷大的规则所得的是一样的。但是现在这个结果可以用逻辑方式获得，遵从标准的数学：小的量才能略去。

由于现在不能再使用薛定谔表象，量子力学中对波函数模的平方所作的一般物理解释也不再适用。我们必须去寻找适用于海森伯表象的新的物理解释。量子电动力学的这种情形很类似量子力学早期的情形，那时我们已经有了运动方程，但却没有一般的物理解释。

应注意到在上述的计算兰姆移位和反常磁矩时的一个特点。人们发现在初始方程中表示电子的质量和电荷的参数  $m$  和  $e$  并非这些量的实验测量值。如果我们以  $m$  和  $e$  表示实验测量值，就必须把初始方程中的  $m$  和  $e$  改为  $m + \delta m$  和  $e + \delta e$ ，这里的  $\delta m$  和  $\delta e$  是可以计算的小修正量。这个过程称为重整化。

### 量子电动力学中的困难

初始方程所做的这样的改变是允许的。我们可以选择所喜欢的任何方程作为初始方程，从这些方程出发进行推理，发展理论。也许你会以为，如果理论物理学家可以作他所喜欢的任何初始假设，那么他的工作是容易的。但是困难在于他必须在该理论的所有应用中使用同样的初始假设。这极大地限制了他的自由。当带电粒子和电磁场相互作用时，重整化总是允许的，因为它是对初始方程的一个简单和普适的改变。

量子电动力学中还存在着一个严重的困难，它与光子自能有关。解决这个困难就必须对初始方程作进一步的改变，这比重整化更为复杂。

我们的最终目标是要找到合适的初始方程，由此可以推导出整个原子物理。我们离这个目标还很远。达到这个目标的一条途径是，首先完善低能物理理论即量子电动力学，然后试图把它推广到越来越高的能

# 纪念钱三强老师

(1994.1.11 高能所纪念四位前辈会上的讲话)

杨 横

大会主席希望我谈谈钱三强先生。我想，关于钱先生的事迹，介绍的材料已不少；我还是按国际物理学界的老传统，在此场合，讲点先辈们的掌故轶事，用来表达我对他们的敬意和怀念之情！

我于1951年参加工作。如果把时针倒拨到那个时候，我们就会发现，如今的高能物理所、原子能科学院、兰州近代物理所、上海原子核所，乃至物理所、半导体所以及长春、安徽光机所等诸多庞大的科研机构，都将追溯到一个共同的起点：北京东皇城根甲51号，原“北平研究院”旧址。那里有两座灰砖楼，是当时“近代物理所”和“应用物理所”的所在地。另有一个小四合院，我们叫它“光学工厂”，当时厂长是王大珩。该厂是现在的长春和安徽光机所的前身。

钱三强先生当时任近代物理所所长。他主张的宗旨是：“我们不只是培养几个杰出的学者。我们的目的是建立一支科研队伍”。

在建国初期的困难条件下，近代物理所，“麻雀虽小，五脏俱全”，钱先生历尽艰辛，使今天浩大的近代物理大军在那里都有了“根”：高能物理方面，王淦昌先生带个学生开始了云雾室宇宙射线的研究，王先生还给我们开了“原子核物理”和“宇宙射线”两门课；肖健先生刚从美国回来，就马上用云雾室积累“V-粒子”事例；理论物理组，有朱洪元先生和彭桓武先生，还有在五十年代就不幸去世的郭挺章先生，而于敏、邓稼先和黄祖洽等后来为祖国的核事业做出重要贡献的人，当时都是这个组里的“小青年”。赵忠尧先生克服重重阻挠和困难一回到国内，就用他好不容易带回来的少量器材，领着叶铭汉（我们的团小组长）等几个青年，为我国的第一台加速器VDG“奠基”；按照钱先生“首先要建立探测设备”的要求，除了何泽慧先生研制乳胶之外，戴传曾、李德平先生和我这个“小毛头”在一个组，他们每人建了一套真空系统试制盖革-米勒计数器，而我则忙于调试钱先生从居里实验室带回来的“居里静电计”，用以试测放射性。钱先生承袭了居里实验室的优良传统，非常重视化学。在化学组里，从法国回来的杨承宗先生带着朱润生和林念芸等几个年轻人，开始

了最早的“摸老虎屁股”即铀化学的研究。就这样，在钱先生的精心组织和安排下，中国的近代物理：高能、基本粒子、核物理、原子能乃至放射化学的雏型，就在这小小的灰楼里得以形成。

建国和建所之初，物质条件之差是难以言喻的，当时还很贫穷落后的中国，更加帝国主义的严密封锁，真是要什么没有什么。正如钱先生当时所说的：“你想吃面包，就得从开荒做起”。整个所的器材供应，只有相当于现今住宅一小间居室那么大的房子，里面坐着顾功叙先生的夫人，我们尊称她“顾太太”。一开门，四壁货架上摆的几件东西一目了然。没有，就自己想办法到市面上，到卖破烂的地摊上去寻。李德平先生为他那一套准备作计数管的真空系统操尽了心。没有真空封腊，没有测量仪器，就连测定 $10^{-1}$ — $10^{-3}$ 这种低真空的设备也没有。李先生花了很多时间摆弄几个从北京灯泡厂弄来的装了钨丝尚未抽气的灯泡，设法把它们接到真空系统上，再用一个惠斯登电桥连接灯丝，想通过真空度、温度及电阻率间的关系来测定前级真空；而刻度它则用的是一种玻璃吹制的，靠水银面的高低来定真空的装置，今天的年轻人大概没有几个人见过。那年秋天，传来了美军准备在朝鲜战场上使用原子弹的消息。彭德怀司令员亲自到东皇城根向钱先生和赵先生请教有关问题。我军首先得有一些能探测放射性的设备，而困难的是，我们当时不仅盖革管还在试制阶段，就连盖革管淬灭电路上急需的阻值在 $10M\Omega$ 以上的淬灭电阻，竟然跑遍北京的无线电商店加旧货店也寻不着！没有办法，连这也得自己做：截取一段玻璃棒，两端绕上裸铜丝，用真空蒸发法在中间蒸上一层薄薄的金膜，再用石腊封上。连赵忠尧先生也亲自参与试制。真是“为了吃上面包，要从开荒做起”！值得回忆的是当时那种贯彻全国上下的团结奋斗精神。举个例子，我被推荐为留苏预备生，派到俄专学俄语。为保证留苏生能有健康体质，经得起紧张的国外学习生活，规定所有学员一律“小灶”待遇，每月伙食30元。当时0.8元就能买只鸡，我们学员整天牛奶鸡蛋大鱼大肉吃不完，可是为我们日夜操劳的全校的管理干部，上至

期望的，所以人们有理由相信，基本的观念还有待根本的改变。