

从量子电动力学的创立历史看物理学思维的特色和价值

廖玮[†]

(华东理工大学物理学院 上海 200237)

2022-10-28收到

[†] email: liaow@ecust.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230308

物理学是在人类的技术、语言和思维的极限之处的极限运动。

——作者

人们常说20世纪有两大成功的物理理论，即相对论和量子力学，而量子场论是狭义相对论和量子力学结合的产物。虽说这样一个简单的说法大体上是没错的，量子电动力学作为第一个量子场论理论确实是作为狭义相对论和量子力学结合的产物而诞生的，但是这个简单的说法并不足以揭示量子场论所具有的巨大价值和魅力，反而好像是说可以由相对论和量子力学的原理自然地导出量子场论。这实际上掩盖了量子场论创立过程中人们所遇到的严重困难、物理学家在克服困难过程中展现出的巨大创造力以及物理学发展过程中的戏剧性。

量子场论取得了惊人的成功。一方面，这表现在其成功的广度，即量子场论被广泛地运用于粒子物理、核物理以及凝聚态物理的广泛现象之中并成功解释了极其广泛的现象，此外量子场论的思想和理论方法还被推广运用于临界现象等统计物理问题和复杂性科学等其他领域。另一方面，这一成功表现在其成功的深度。作为量子电动力学的最终建立者之一，戴森(Freeman Dyson)在谈及量子电动力学的成功时有一句精彩的总结，他说：“(量子电动力学)似乎是少数几个紧密地触及了真实的理论之一(one of the few theories that seems to be very closely in contact with reality)。”量

子电动力学在电子反常磁矩($g-2$)/2上的成功可以让人深入体会到这一物理理论如何深入地“触及真实”：

电子反常磁矩($g-2$)/2

实验值：0.00115965218073(± 28),
理论值：0.00115965218204(± 72).

在上述对比中，我们可以看到实验值和理论预言值一直到小数点之后11位都是吻合的。这是一个惊人的成功！物理学家一般把物理理论当作是描绘现实世界的模型，通常并不预期理论和实验会取得如此惊人的一致。这样一个在电子反常磁矩上取得的惊人成功甚至可以使人们怀疑，也许量子电动力学(或量子场论)不仅仅是对现实世界的模型，而是真正触及了真实。

如果对量子电动力学有更多了解之后，人们对其成功的印象将更加深刻。量子电动力学的物理预言是建立在微扰论的基础之上的。微扰论是处理实际物理问题的一种计算方法。例如，对于绝对值小于1的数 x ($|x| < 1$)， $1/(1-x)$ 也可以写成如下级数求和形式：

$$1/(1-x) = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots,$$

当 $|x| < 1$ 时，等式右边的无穷级数求和是收敛的；当 $|x| = 1$ 时，等式右边的无穷级数求和实际上是不收敛的，等式不成立；当 $|x| > 1$ 时，这一等式也不成立。这是一个很简单的例子，但是足以说明微扰论的使用范围一般是有限制的。如果级数求

和中级数的系数不再是1，而是其他数，则无穷级数求和成立的区间又会有所不同。特别是，如果系数很大，收敛区间可能很小，甚至没有。这个时候，我们就说无穷级数求和不成立。量子电动力学的微扰理论计算出的物理量实际上就具有这种级数求和的形式：

$$c_0 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + c_3\alpha^3 + \dots,$$

c_0 、 c_1 等是系数， α 是精细结构常数。量子电动力学的微扰理论的一大怪异之处是， c_1 、 c_2 和 c_3 系数以及所有的高阶系数实际上都是发散的无穷大。在这种情况下，级数求和的收敛性当然更加无从谈起。这说明，从严格数学的观点看来，这一级数求和应该是不能成立的，是不合法的。然而正是使用这种看起来非常不合理的微扰论方法，并在使用重正化方法处理发散、使这些系数变成有限的数之后，量子电动力学在可观测的物理量上重建起物理量之间的关系，依靠对少数一些物理量的测量获得了对许多其他物理量的预言，并且与实验取得了惊人的一致。

量子场论中的这种重正化做法常被人诟病为非法地以无限大加减无限大以及无限大乘除无限大，很难让人理解，然而正是这种荒唐的数学使量子场论获得了惊人的成功。可以公允地说，量子场论的这种成功可以说是触及了自然的真实

同时又挑战了最基本的数学规则。

伽利略曾经说数学是大自然的语言。借用这句话，我们可以说量子场论的这种不可思议的成功是触及到了人类所拥有的描绘自然的语言的极限。借助这种在语言的极限之处运作的物理理论，人类可能也达到了思维能力的现有边界。量子场论在思维和语言的极限之处描绘自然的现象，取得了惊人的成功，这不仅是巨大的科学成就，也是辉煌的智力成就。

考察量子场论的创立过程，特别是考察作为第一个成功的量子场论理论的量子电动力学的创立过程，我们可以品味到物理学前人如何作出极具开创性的贡献、如何克服困难达到这种不可思议的成功，并可以在其中学到很多。本文将对这一创立过程作较简略的回顾。

1 量子电动力学的早期历史

量子电动力学的最终创立者之一施温格(Julian Schwinger)在他1965年诺贝尔物理学奖的获奖演讲中说：“在狄拉克、海森伯、泡利以及其他人的慈父般的努力下，相对论性量子场论诞生于大约35年前。然而，这是一个有点迟钝的年轻人，17年后才进入青春期成熟。今天，我们聚集在这里庆祝这一事件。”

实际上在量子场论创立早期发挥过重要作用的物理学家不仅有狄拉克(Paul Dirac)、海森伯(Werner Heisenberg)和泡利(Wolfgang Pauli)，还有约当(Pascual Jordan)、费米(Enrico Fermi)等人^[1]，其中约当创造了把光子场和电子场量子化的方法。经过这批人的持续努力，到1930年初期，形成了以狄拉克的空穴理论为基础的空穴—量子电动力

学(hole theoretic QED)^[2]以及海森伯—泡利的量子场论理论。在空穴—量子电动力学中，光子波函数被当作场算符量子化而电子波函数实际上没有被场量子化，实际上这是一个半量子场理论(semi-quantum field theory)。而海森伯—泡利理论的精神是全部使用量子场论的方法处理光子和电子波函数，可以说是纯量子场论的理论(pure quantum field theory)。

安德森(Carl David Anderson)于1932年对正电子的发现使狄拉克的空穴理论获得了巨大的成功，同时也使空穴—量子电动力学获得了显著的地位。正电子的发现以及正负电子成对出现的现象说明电子的产生和湮灭确实在自然界中发生，量子场的概念可能有其必要之处。但是，半场论空穴—量子电动力学不但也可以解释正负电子对出现的现象，甚至在这方面要成功得多，因为空穴理论可以说是“预言”了正电子。至此可以说，以海森伯—泡利理论为代表的纯场论量子电动力学理论已经大体上被建立起来，但是还没有令人信服的证据表明量子场论引入的概念是完全必要的，量子场论还没有真正诞生。令人信服的证据来自一个全新的研究领域，即弱相互作用领域。

1930年，泡利提出了中微子假说，用以解释在 β 衰变实验中观测到的连续电子能谱。用现在的术语说，这一假说认为，原子核或中子在衰变过程中放出一个中微子和一个正电子或放出一个反中微子和一个电子。1933年，费米根据这一假说构造了成功解释 β 衰变现象的弱相互作用理论。这一理论的成功说明了两点：(1)因为弱相互作用太弱，无法使质子、电子以及反中微

子形成束缚态，在衰变发生之前反中微子不可能存在于中子或原子核之内，这说明中微子或反中微子是在衰变过程中被产生出来的；(2)在衰变过程中，只有单独的电子或者正电子伴随着反中微子或中微子出现，而没有正电子和电子的共同出现，狄拉克的空穴理论无法解释这一现象。这实质上说明了，半场论空穴—量子电动力学实际上是不对的，应该采取纯量子场论的观点。 β 衰变实验的现象、泡利的中微子假说以及费米的中微子弱作用理论的成功标志着量子场论的观念获得了胜利，很多人认为这标志着量子场论的真正诞生。

2 无限大疑难与重正化

量子场论带来了解决新问题的希望，同时也带来了严重的疑难，这个疑难是使用场的概念带来的。

在经典电动力学中，一个半径为 R 的球形带电体(例如金属球)中的部分电荷处于带电体中其他电荷产生的静电场之中，可以算出整个球形带电体的总势能大约为 Q^2/R ，其中 Q 是带电体的总电荷。这说明，球形带电体的电荷产生的电场可以反过来使这些电荷本身获得势能。这种效应被称作为逆作用(back-reaction)。已知电子就是一个带电体，如果电子是球形的，我们可以预期电子的自身电场的逆作用会使静止的电子获得一个大约为 e^2/R 的能量。至今的所有实验都没有发现电子的大小，也就是说，即便电子是有大小的，那也是非常小，小到以至于在现有的实验中都发现不了。这意味着，逆作用对电子能量的修改是非常大的一个量。甚至电子可能是没有大小的，即 R 为零，这也就意味着这一修改是无穷大。

如果电子有大小但不是球形，上述论证提供的基本信息仍然是大致成立的，即电子携带的场的逆作用会导致极大的自能(self-energy)修正。

量子场论继承了经典电磁场理论的这一问题，在量子场论中这一逆作用效应可以用图1表示。在图中，水平的直线代表一个电子，曲线代表一个光子，这个图相当于说一个电子发射出一个虚光子(产生一个电场)，然后又把这个虚光子吸收回来(受到这个电场的作用)。电子无时无刻不受到这种发射和吸收虚光子的作用的影响，以至于在任何量子电动力学的计算中，只要考虑到电子的传播效应，这种逆作用的效应都会出现。这也就是说，在所有高阶计算中都会出现这种严重的无穷大自能修正的问题。例如考虑图2中的康普顿散射，图中最左边的图代表领头阶的效果，即电子吸收一个光子，然后又发射出一个光子，右边的图表示的是一部分第一阶的修正，很明显可以看到自能发散会出现在右边这些图的贡献之中。这就造成了本文开头所说的，量子电动力学中以级数形式表示的物理量中的级数系数都是发散的无穷大量。任何一个受到过基本的数学训练的人都会立即说，这个理论肯定是不可靠的。这就是量子电动力学在1930年代遇到的严重困难。

鉴于量子电动力学遇到的严重困难，一些物理学家认为量子电动力学是不够的，或者根本是错的，需要引入更具革命性的思想。其后，许多物理学家努力寻求替代量子场论的理论。例如，海森伯建议了具有基本长度的修改量子场论，以避免局域相互作用导致的发散问题；温策尔(Gregor Wentzel)建议了他的修改局域相互作用的理论方法；

海森伯还建议了一种完全放弃场论概念而直接在物理量上建立关联的散射矩阵理论；狄拉克建议了一种不定度规量子力学，希望修改量子力学的一些基本假设，重建量子理论；此外，还有一些物理学家认为问题出在经典电动力学，建议修改电动力学的形式，在经典电动力学中就解决或回避逆作用和自能问题。这些激进的替代理论最后并没有取得成功，除了少数理论(例如散射矩阵理论)之外，这些理论基本被人们所遗忘。其原因是，量子电动力学的困难以十分出人意料的方式获得了解决，激进的方案被摒弃，留下来的是保守的、但是难以令人理解的方案，这就是重正化理论。

1937年，布洛赫(Felix Bloch)和诺德西克(Arnold Nordsieck)发现量子电动力学中的红外灾难问题是源于电子态的定义不合适所导致的。泡利和菲耳兹(Markus Fierz)受此启发，在1938年重新考虑了电子的电磁场的逆作用。他们在一个非相对论量子理论中计算了电子的电磁场产生的逆效应，发现这个逆效应的结果是对电子产生了一个电磁质量，他们把这个电磁质量与电子的机械质量相加，将两项之和等同于实验观测中得到的物理质量^[2]。如果假设机械质量中也有一个无穷大发散并且与电磁质量中的发散抵消，就可以得到有限的物理质量。这一机制就是质量重正化。与此同时，克拉默斯(Hendrik Kramers)也明确提出了类似的质量重正化思想^[2]，其不同之处在于克拉默斯试图修改经典电动力学，先在经典电动力学理论框架上构造重正化理论，而不是直接基于量子理论构造重正化理论。其后克拉默斯还带领一些学生在非相对论性量子理论中

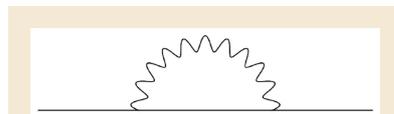


图1 电子自能图

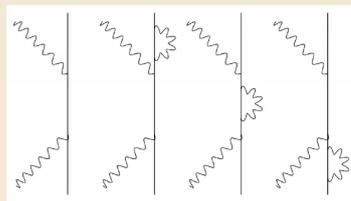


图2 电子光子散射过程以及其中的电子自能修正

继续研究这一机制^[2]。此外，在1930年代对真空极化的研究中也发现其中会有无穷大发散，狄拉克、海森伯和韦斯科普夫(Victor Weisskopf)等人发展出了电荷重正化的方法，发现可以使用这一方法解决这个问题^[2]。

奥本海默(Robert Oppenheimer)受到这些进展的鼓舞，建议他的学生丹科夫(Sidney Dancoff)在相对论性量子理论中计算电子与原子核的库仑散射的辐射修正。如果丹科夫的计算无误，他将发现除了被吸收到质量项中的自能修正的发散之外，辐射修正计算中出现的其他发散项将互相抵消，最后得到有限的结果。很不幸的是，他在计算中犯了一个错误，最后仍然得到了发散的結果，这使当时仍然对量子电动力学抱有一定希望的一些人非常失望。

总体而言，虽然有正负电子对产生、康普顿散射、电子-电子散射(Møller 散射)等实验对量子电动力学的支持证据，然而紫外灾难问题的存在使1930年代末的物理学家们处于巨大的谜团之中，而且这个谜团不局限于量子电动力学，也同样出现于描述其他相互作用的量子场论之中。在1930年代末期，朝永振一郎(Sin-Itiro Tomonaga)在德国

莱比锡访学，在海森伯的研究组里研究强相互作用的量子场论。他在此期间的日记中记述了同时代的物理学家共同感受到的这种迷茫，他写道^[1]：

“当我继续计算时，我发现积分是发散的——是无穷大的。午饭后我去散步。空气寒冷刺骨，约翰娜公园的池塘半结了冰，鸭子在没有冰的地方游水。我能看见一群鸟，花坛上覆盖着栗树叶以抵御霜冻。走在公园里，我对中子、中微子的存在不再感兴趣。”

他还记述与仁科芳雄(Yoshio Nishina)的通信，记述自己的沮丧以及仁科芳雄的鼓励^[3]：

“今天早上，我收到了仁科芳雄教授的回信，在去信中我用激动的话语向他抱怨我工作的惨淡。读完回信，我的眼里充满了泪水。——他说：‘只有运气决定你的成就。我们所有人都站在一条看不到未来的分界线上。我们不必太过焦虑，不必太担心结果，即使结果可能与你所期望的大不相同。不久以后你就会遇到新的成功机会。’”

3 量子场论的保守革命

在二战期间有许多杰出的物理学家加入了美国的辐射实验室(Radiation Laboratory)，从事与雷达相关的问题研究，其中包括拉比(Isidor Rabi)、施温格以及兰姆(Willis Lamb)。辐射实验室高强度的研发和投资使实验物理学家在电磁波的探测技术方面取得了飞速进展，其中就包括与氢原子精细结构研究相关的厘米波段电磁波的探测技术。在二战结束之后，拉比和兰姆把这些全新的实验技术运用于哥伦比亚大学的实验室中，开启了一段实验物理的高峰时代。在1947年，

拉比和兰姆与合作者分别完成了两个实验。兰姆的实验证实了氢原子的 $2S_{1/2}$ 能级高于 $2P_{1/2}$ 能级，他发现两能级的能量差相当于波长约为30 cm或频率大约为1000 megacycle/s (megacycle: 兆周)的光的能量^[4]。此外，测量精度也一跃达到了百分之十的水准。实际上，实验设计想要达到的测量精度是千分之一。在兰姆第一次发布结果后不久，测量精度很快就被推进到百分之一的量级，并在两三年内实现了设计的千分之一的设想。使用狄拉克方程可以预言，氢原子的 $2S_{1/2}$ 和 $2P_{1/2}$ 能级是简并的。兰姆的这一结果毫无争议地说明了狄拉克方程的预言只是大致正确的，对于更精细的氢原子结构其结果是不对的。

拉比的实验测量了氢原子和氘原子在磁场中的超精细结构，即由于电子磁矩与原子核磁矩耦合的效应产生的电子能级的劈裂，他们发现超精细结构与理论预言相比有大约千分之二的偏离。在1947年9月，布雷特(Gregory Breit)对拉比建议，这可能是因为电子的实际磁矩与狄拉克方程的预言结果相比有微小的偏离，这个建议很快说服了拉比^[2]。库施(Polykarp Kusch)是拉比在哥伦比亚大学的同事，他多年以前就从事过电子磁矩的精确测量实验，并且得到过非常精确的测量结果。在获知布雷特的建议之后，库施与合作者重做了电子磁矩的精确测量实验^[2]。他们使用铯和钠研究在磁场中的原子的能级劈裂结构，测量发现电子磁矩的 g 因子大约是^[5]：

对于铯， $g = 2.00229 \pm 0.00008$ ；

对于钠， $g = 2.00244 \pm 0.00006$ 。

拉比和库施的两个实验证实了电子具有反常磁矩，即电子磁矩中

的 g 因子不是使用狄拉克方程所预言的 $g = 2$ 。库施因为这一贡献与兰姆分享了1955年度的诺贝尔物理学奖。但是库施的这一结果是1947年下半年才得到的。在此之前，对兰姆的实验结果的思考占据了中心位置。

兰姆的实验结果是一个关键性的突破，它立即在量子电动力学的建立过程中给予物理学家以极大的启发。多年以后，拉比写信给兰姆谈起兰姆的贡献以及自己作为伯乐的骄傲^[5]：

“我奉承我自己是第一个以最实际的方式认识到你的天才的人，即给予你一个职位。这是我无怨无悔的行动之一。你来到哥伦比亚大学是物理学史上最伟大的事件之一。兰姆移动及其理论对于量子电动力学的发展是决定性的事件。你还使自己成为那一小群以费米的精神、既能做实验又能做理论研究的物理学家之一。”

在1947年6月于Shelter Island召开的会议上，兰姆和拉比分别报告了他们的实验结果，兰姆的实验引起了极大关注。对于兰姆的实验结果(即兰姆移动)，韦斯科普夫和施温格认为，量子电动力学的修正可以解释这一现象，他们在会上大致展示了如何使用重正化方法计算出有限的结果。在这次会议上，克拉默斯也介绍了他的对经典理论做重正化的方法。这一会议立即对贝特(Hans Bethe)产生了影响。在会后的旅行中，在一辆火车上，贝特根据韦斯科普夫和施温格演示的对量子电动力学作重正化的方法，在非相对论性理论中对氢原子 $2S_{1/2}$ 和 $2P_{1/2}$ 能级的劈裂做了一个简短的计算，他发现计算结果与实验结果吻合得很好。他在论文中写道^[6]：

“施温格、韦斯科普夫和奥本海默建议，能级移动的一个可能解释是因为电子与辐射场的相互作用。这个移动在现有的所有理论中都是发散的，所以一直被忽视。然而，能级移动中最强烈的发散(即线性部分)可以被辨识出是电磁质量的效应，这一项对于束缚态电子会出现，对于自由电子也会出现。这一效应可以认作是已经恰当地包括在电子的观测质量之中，所以在所有的理论表达式中必须把它减除掉……”

贝特的计算结果表明，氢原子的 $2S_{1/2}$ 和 $2P_{1/2}$ 能级的劈裂大约相当于1040 megacycle/s的能量，而兰姆的初步实验结果是1000 megacycle/s。贝特最后做出结论说^[6]：“这与观测到的1000 megacycle/s非常一致。”

贝特的这个计算结果显示了量子电动力学以及重正化方法确实可以解释氢原子的精细结构，使人们对量子电动力学重新树立起了信心。但是，贝特的计算是在非相对论性电子和光子相互作用的理论框架内做出的近似计算，而量子电动力学实质上是相对论性理论，需要在相对论性理论框架内做出计算，并检查其结果是否与实验一致。此外，静止质量是一个相对论不变的概念，如果质量重正化方法确实可行，还需要证明自能修正确实是一个相对论不变的结果。在量子电动力学的海森伯—泡利表述形式中，这两个问题都很难回答。这是因为，海森伯—泡利理论是一个哈密顿形式的理论，十分复杂，而且不具有明显的相对论协变性，因而这一理论形式在实际计算中很不方便。需要改写量子电动力学的理论形式，以便克服这些问题。

在Shelter Island会议三个月后，施温格开始思考并攻克这些问题。

在1947年11月的一个会议中，他简短地报告了他对兰姆移动和电子反常磁矩的一些计算结果。在1948年1月底召开的美国物理学会年会上，他做了更加详细的报告。他的报告引起了极大的轰动。因为涌入的听众太多，主办方被迫两次改换报告厅，最后报告被安排在一个剧场中进行，并被要求重复演讲一次^[2]。戴森当时作为一名学生听了这个报告，在1948年2月4日写给家人的信中记述说^[2]：

“重大的事件发生在周六的上午，那是施温格的一个小时的报告，他对正在建造中的新理论给了一个卓越的回顾，最后他还戏剧性地宣布了仍处于胚胎之中的、一个更新的和更强大的理论。这个演讲是如此精彩，以至于他被要求在下午的会议上重复讲一遍，……当他宣布关键的实验支持了他的理论时，全场一片欢呼。”

随后，在1948年3—4月召开的Pocono会议的第一天，施温格宣布了他的最新理论形式。根据惠勒(John Wheeler)的笔记，施温格在开头说到^[2]：

“为了在电动力学的目前形式中得到合理的答案，必须使用规范不变和相对论不变的减除方案。只有这样，人们才能以一种合理的方式辨识确定无穷大项。下面对量子化的电磁场和电子对的场的处理满足这个判据。”

根据惠勒的笔记，施温格在报告中间还强调^[2]：

“这些方程没有比海森伯—泡利理论形式包含更多东西。假如有人知道如何自恰地做海森伯—泡利的计算，就不需要这些方程。”

施温格的报告最后成了长达一天时间的马拉松报告，他的这个报

告被认作是标志着量子电动力学得到了成功建立，标志着保守的重正化方案获得了成功。施温格的成功在当时的美国物理学界和美国社会引起了极大的振奋。施温格被视作是美国的爱因斯坦，被视作是美国科学成功的标志。在1948年4月11日写给家人的信中，戴森记述了他当时所处的这种氛围^[5]：

“具有远见卓识的科学家们对美国科学界日益增长的民族主义危险感到担忧，对资助科学的政治家和实业家的担忧更是如此。在公众心目中，至少实验科学已是只有美国人知道如何去做的了，而美国不得不从欧洲引进一些理论家这一事实只是相当勉强地得到承认。在这种氛围下，新的施温格理论被称赞为一个证明，即即使在理论物理领域美国现在也没有什么可学的了，现在第一次美国产生了她自己的爱因斯坦。”

费曼在Pocono会议的第二天做了报告，演讲他的另一套具有相对论协变性的量子电动力学理论以及他对兰姆移动和电子反常磁矩的计算。他的演讲没有取得成功，反而成为了一个彻底的失败。他后来回忆说^[5, 7]：

“这些人每个人都有自己的想法，他们的表现就好像我应该知道他们在想什么。……我有一种可怕的逆来顺受的感觉。我对自己说，我必须把它全部写下来发表，这样他们就可以阅读和研究它，因为我知道它是正确的！就是这样。”

在Pocono会议几天之后，奥本海默收到朝永振一郎派专人送到其手中的信^[2]。在信中，朝永振一郎介绍了他们使用重正化方法和具有相对论协变性的量子电动力学理论对兰姆移动的研究。朝永振一郎早

在1943年就发展出了一个具有相对论协变性的量子电动力学的理论形式，先以日语发表，后于1946年以英语发表在日本的一个期刊之上。在获知了兰姆移动的实验结果和贝特关于兰姆移动的计算之后，朝永振一郎在相对论协变理论的框架下发展了贝特在其论文中演示的重正化方法，并带领他的学生做了一系列的研究工作，论证了重正化之后的量子电动力学确实十分有效。在获知此事后，奥本海默立即拍电报给朝永振一郎，要他写一个总结论文，并要他提供相关的其他论文。朝永振一郎写了一篇总结其工作的短文，并在奥本海默的安排下通过驻日美军空运快速寄给奥本海默，其后这篇短文被发表在《物理评论》期刊之上。此后，朝永振一郎的工作被广为人知。朝永振一郎的协变理论与施温格的协变理论十分相似，人们常把这一理论称作朝永振一郎—施温格理论。朝永振一郎也因为其对量子电动力学的贡献与施温格和费曼分享了1965年度的诺贝尔物理学奖。

值得一提的是，施温格和费曼的计算在是否有真空极化效应上发生了分歧^[5]。随着对兰姆移动测量精度的不断提高，实验结果表明只有加入真空极化效应的修正之后，理论计算的结果才能与实验结果精确的吻合，这一分歧最终因此得以解决。在施温格和费曼解决分歧之前，实际上是早已开始该项目研究的韦斯科普夫与其合作者使用老式量子电动力学理论首先得到了对于兰姆移动的正确理论计算结果^[2]。此外，在苏黎世泡利研究组里工作的拉廷格(Joaquin Luttinger)独立于施温格也得到了正确的电子反常磁矩结果^[2]。

4 费曼与戴森的理论形式

费曼在大学时代研读过狄拉克的量子力学教科书，他从其中获得的一个印象是，这一理论有严重的自能发散问题不能解决。费曼因此得到一个结论，即不用关心这些以前的理论在说什么。费曼认为自能发散的关键，即电子自己产生的电磁场会对自身发生影响，是一个愚蠢的想法。这当然是因为引入场的概念所导致的，所以费曼准备放弃场的概念。在他的诺贝尔物理学奖获奖演讲中，他回忆这段历史时说^[8]：

“在我看来，一个粒子作用于它自己的观点，即电场作用于产生它的同一粒子的观点，很明显并不是必要的，事实上这是一种愚蠢的观点。所以我告诉自己，电子不能作用于自己，它们只能作用于其他电子。这意味着根本没有场。你看，如果所有的电荷都贡献形成了一个公共的场，如果公共的场反过来作用于所有的电荷，那么每个电荷一定会反过来作用于自己。这就是错误所在，所以没有场。”

费曼的这个想法类似于散射矩阵理论的想法。这一思想的思路是，场的概念是通过实验现象推断出来的，但是并不是直接可观测的。例如，我们看见带电物体在空间中拐弯从而推断那里有电场，我们看见磁体互相吸引、磁针在地球上指向南北方向，从而推断有磁场。人们直接看见的是物体的运动、带电物体的运动等现象，而不是磁场和电场。正是通过带电物体和磁体的运动表现，我们推断有一个弥漫分布在空间中的场。费曼在上述引文中想说的实际上是建议抛弃电磁场的概念，直接在物体与物体运动的现象上建立关联，重新把

电磁现象表述为类似于牛顿引力那样的超距作用形式。

费曼在大学期间就想到了这一思路，并在其后的十多年间一直为实现这一思想奋斗不已。十分幸运的是，费曼的研究生导师惠勒与他抱有类似的想法。惠勒是散射矩阵概念的提出者之一，他甚至已经研究过如何把经典电动力学重新表述为超距作用的形式，在惠勒之前还有福克尔(Adriaan Fokker)等人在这方面开展过研究工作^[2]。费曼与惠勒的合作卓有成效，最终他们实现了把经典电动力学改写为超距作用的形式，并且论证这一理论与常规的电动力学在宏观上是等价的，虽然在微观上并不等价。费曼将这一研究收录在自己的博士学位论文之中。费曼理论的作用量采取了福克尔作用量的形式^[8]：

$$A = \sum_i m_i \int (\dot{X}_\mu^i \dot{X}_\mu^i)^{\frac{1}{2}} d\alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j \\ (i \neq j)}} e_i e_j \iint \delta(I_{ij}^2) \dot{X}_\mu^i(\alpha_i) \dot{X}_\mu^j(\alpha_j) d\alpha_i d\alpha_j .$$

这个公式中的第二项有对两个粒子的坐标的双重积分，可以明显看到，处于不同位置的两个粒子处于直接的相互作用之中，这也就是具有超距作用的形式。费曼不知道怎么把这个作用量改写成哈密顿量的形式，因而也就不知道如何使用当时的量子力学知识把这个系统量子化。他询问一位来自欧洲的访问学者是否有使用作用量做量子化的方案，这位访客告诉他狄拉克在1930年代初期有一篇文章讨论过类似问题。费曼找到这篇论文，发现可以使用这种方法对他的理论做初步的量子化，并最终发展出了量子力学的路径积分理论。

费曼花了很多年完善这一理论，并希望把其成功量子化。在贝特发

表关于兰姆移动的论文之后，问题的关键变为在相对论性理论中做出计算。费曼对贝特说他的理论可以胜任这一重任。然而，费曼实际上并不真正知道如何使用他的理论得到电子的量子电动力学。其原因在于，电子是费米子，满足泡利不相容原理的要求和费米—狄拉克统计，费曼实际上不知道怎么对费米子使用路径积分的方法严格地推导出结论，他转而通过半数学推导、半推测的办法导出一些计算规则，再使用这些计算规则计算一些已经得到了理解的物理量和物理过程，以检查自己的计算规则是否正确，如此反复矫正自己的计算规则。在这个过程中，费曼大量使用物理图像进行猜测，他不但没有完善的数学形式可以澄清问题，而且实际上引入了不少有待澄清的、容易引起争议的概念和技巧，例如他和惠勒引入的正电子是在时间方向上逆向行走的电子的概念。这也正是他无法像施温格那样在Pocono会议上做出优美炫目的演讲的真正原因。费曼在其诺贝尔奖获奖演讲中总结了自己的这种直观的、没有数学严格性的研究方法^[8]：

“通常，即使在物理学家的意义上，我也无法演示如何从传统的电动力学得到所有这些规则和方程。但是我从经验中知道，从摆弄中知道，事实上一切都是相当于通常的电动力学，同时我对许多片段也有部分证明。尽管如此，我从未真正坐下来，像希腊几何学家欧几里得那样，确保你能从一个简单的公理集得到所有一切。结果，这个工作受到了批评，我不知道是赞成还是不赞成，这个‘方法’被称为‘直觉方法’。然而，对于那些没有意识到这一点的人，我想强调的是，成

功地使用这个直觉方法需要做很多工作。由于没有对公式或思想本身的简单明确的证明，因此有必要通过与已知的其他类似的例子或极限情况等作比较，进行大量的检查和再检查，以确保一致性和正确性。在缺乏直接的数学证明的情况下，人们必须仔细而彻底地确定这一点，并且应该尽可能多地使用公式不断做出尝试。尽管如此，通过这种方法获知的真相要比能被证明的多得多。”

阅读这段文字，再回想费曼如何使用这种方法猜出了量子电动力学的成功理论形式，可以使我们领悟许多、回味无穷。虽然在猜想过程中费曼也犯了一些错误，但是总的来说，费曼还是猜对了。他不但得到了正确的结果，而且得到了成功的理论形式。这种理论形式还被推广到其他量子场论理论，以费曼传播子、费曼规则、费曼图的形式广泛存在于现在所有量子场论理论之中。费曼的这个成就不仅是一个伟大的科学成就，而且是一个极端了不起的、辉煌智力成就。

在费曼发展他的理论的时候，戴森作为一名从英国过来游学的研究生见证了费曼发展其理论的全过程。戴森在大学时候学的是数学，到了研究生阶段他转而研究物理。他先是向在剑桥大学任教的、温策尔和泡利曾经的一个学生学习了量子场论，然后转到康奈尔大学找

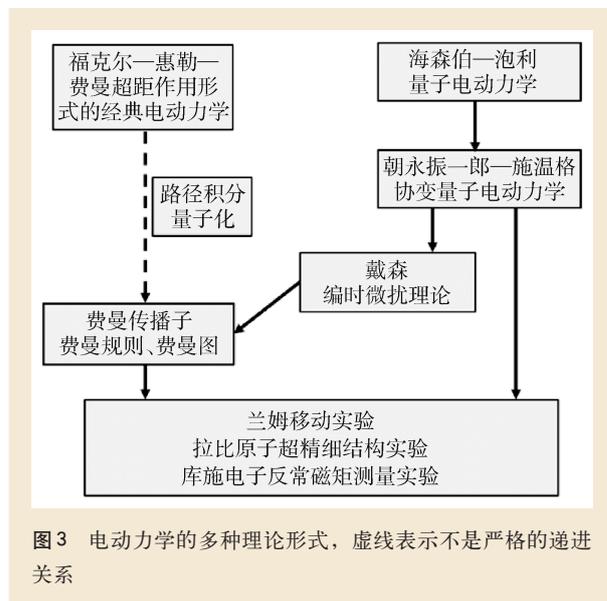


图3 电动力学的多种理论形式，虚线表示不是严格的递进关系

贝特学物理。贝特很高兴戴森来到他的研究组，因为他收到的一封信说戴森是英国最好的数学家^[2]。在康奈尔大学期间，戴森经常与费曼讨论费曼的新理论，对其要点非常熟悉。在1948年夏天，戴森参加了一个美国物理学会举办的暑期学校。在该学校里，施温格作为主讲花了三个星期讲授了他已经发展出的和还在发展中的量子电动力学的新理论形式。施温格的演讲非常眩目，其中有非常多的数学，同时又把其物理图像隐藏于数学公式之中，戴森很难从中抓到真正的要点。幸运的是，戴森在课后与施温格有很多交谈。在课后的交谈中，施温格告诉戴森很多他的理论形式所包含的物理图像，最终使戴森彻底地理解了施温格的工作^[2]。

不久之后，在从美国西海岸到东海岸的长途大巴车上，戴森经过长时间的思考拨开了谜团，想清楚了几乎所有关键问题^[2]。他使用朝永振一郎—施温格理论计算散射矩阵，把理论改写为编时乘积的形式，发展出了一套编时微扰理论。使用这套理论，戴森发现可以从朝

永振一郎—施温格理论推导得到费曼猜想的使用了费曼传播子、费曼规则和费曼图的理论，也就是说朝永振一郎—施温格理论与费曼理论的最后结果是等价的。戴森完成了费曼自己没有完成的事业，即从一些简单的原理出发推导得到费曼凭借猜想得到的所有结果。图3显示了这些理论之间的关系。戴森的论文很快就被发表，甚至在费曼的系列论文和施温格的系列论文全部发表之前就被发表。还没有获得博士学位的戴森立即站到了物理学舞台的最中心，当然在此之后戴森也不再需要获得博士学位。

戴森的贡献最终改写了量子场论教科书的内容，他以演绎的方式把费曼的理论介绍给了大众，使人们不用再去学习极其复杂的老式量子场论，转而可以迅速学会这种更加简洁、更有效率也更加直观的全新理论形式。这是量子场论在表述形式上的巨大进步。对这一全新理论形式的价值，布约肯(James Bjorken)做了一个极其生动的回顾^[9]：

“对我和其他许多人来说，理查德·费曼是一个特殊的英雄。当我在斯坦福大学的研究生院学习量子电动力学时，他成为了我的英雄。这门课碰巧是按历史顺序安排的，有几个月它采用了20世纪30年代的海特勒的经典教材的样式，使用老式的微扰理论和狄拉克矩阵 α 和 β （而不是 γ ）。在这个火的考验之后，出现了一大堆看似无穷无尽、阴郁而又浮夸的场量化形式。当费曼图到来时，这就是太阳冲破了云层，带来彩虹和金子。辉煌！物理并且深刻！这是转换为门徒身份的时刻。”

需要说明的一点是，在瑞士的斯图克尔伯格(Ernst Stueckelberg)一直在思考和试图解决量子电动力学

的问题。从1940年代初开始，他使用量子场论计算散射矩阵，初步得到了类似编时微扰理论的微扰理论，也得到了现在被称作费曼传播子的传播子形式^[2]。如果他完成这项研究，他就会是独自完成费曼和戴森两人完成的理论建构。可惜的是，一方面他的论文不太为人所知，只有同样在瑞士的泡利等人有所了解；另一方面，那个时候的欧洲已经不是实验科学的中心，他已经处于消息相对闭塞的地区，不能像施温格和费曼那样迅速抓住机会。

此外，值得注意到的另一要点是，费曼的最终结果虽然是对的，但是费曼的理论起点，即他猜想的原理，并不完全正确。在电子偶素被发现之后，费曼在1951年写信给惠勒，认为他们以前的猜想至少错了一个。他写道^[2]：

“我希望知道你关于我们的超距作用理论的观点。它根据的是以下两个假设：

- (1) 电子只作用于其他电子；
- (2) 它们通过超前势和推迟势的平均对其他电子产生作用。

第二个假设可能是对的，但是我要否定第一个的正确性。证据是两重的。第一个是氢原子中的兰姆移动，这被认作是来自电子对自身的作用。我们确实没有一个关于命题(1)的完整的量子理论，所以我们不能完全确定兰姆移动不能来自周围墙上的原子对原子的净作用……

第二个理由涉及正电子是在时间方向上逆行的电子的想法。假如这是真的，根据命题(1)，必定会互相湮灭的一个电子和一个正电子将不会发生相互作用，因为它们实际上是同一个电荷。所以，电子偶素必定不会形成然后又衰变……

最后，……实验证据显示电子

偶素可以形成一个稳定的态，然后衰变。

所以我认为我们在1941年猜错了。你同意吗？”

如果费曼后来的判断是对的，那他就是从错误的假设得到了正确的结论，他的成功看起来是一个奇迹。然而，这样的奇迹正是在物理学的历史上多次发生的事情，例如卡诺利用热质说构造卡诺循环导出卡诺定理、麦克斯韦借助以太推断电磁波的存在、狄拉克根据狄拉克海假设预言正电子。所以费曼的经历并不是不可思议的奇迹，而恰恰是物理学思维的一大特色^[10]。值得说明的重要一点是，物理学家之所以能够采用这样一种不合逻辑的思维方式获得正确的知识，不是因为物理学家特别聪明，而是因为物理学家学会了利用实验帮助思考^[10]。实验可以帮助我们检验结论是否正确，从而可以使我们不必局限于依赖正确的前提和严密的逻辑推理获得知识，而可以凭借不正确的猜想和不严格的推理得到一些正确的结论。

5 后话

对于重正化的成功，不可否认的是物理学家们对此有许多不满意的。泡利在1930年代末把这种处理方法称作减除物理(subtraction physics)^[11]，表达了他的不满。戴森在1948年10月4日写给其家人的信中解释量子电动力学理论的思想，他说^[2]：

“理论的中心思想是对实验事实给出正确的解释，同时有意地忽略当讨论无法直接测量的事物时的某些数学上的不一致。”

物理学理论的核心任务是解释现象，物理学家在解释现象的过程

中发展出描述现象的概念、语言和理论。在量子电动力学的发展过程中，在与实验的反复对比中，物理学家不得不接受了这样一种具有高奇数学的重正化理论。

对于重正化理论的成功，费曼后来评论说^[9]：

“我认为重正化理论只是一种把电动力学的发散困难扫到地毯之下隐藏的方法。当然，我对此并不确定。”

施温格更进一步，他认为重正化是当面对无知的时候人们应对现实而不得不采取的手段，但也是真正成功的手段。他说^[2]：

“(重正化)明确地把我们所不知道的——但它以非常有限的方式影响我们的实验——从我们所知道的和我们可以详细计算的地方分离了出来。事实上，我坚持所有的理论都是这样的。——人们可能不想面对它，(但是)总是有一个领域，在那个领域里理论要么不再成立，要么出现其他你不知道的现象。它们不会干扰你所能控制的区域的一切，你会把它们与之隔离开来：这就是重正化的真正意义。不是清扫无限大，而是孤立出未知的部分，认识到其有限的影响。”

不论采取哪种观点，不可怀疑的是，量子场论的重正化理论是工作在已知和未知的边界、语言的有效与无效的边界的成功科学理论，是一个科学奇迹。戴森在1984年的一番话表达了对量子电动力学成功的惊奇^[2]：

“我一直觉得这是一个奇迹，电子实际上表现得正如同理论所说的那样。这个微扰级数在某种程度上是真实的，而且微扰级数说的一切都是正确的，对我来说这一直是一个令人惊奇的实验事实。我从来没有觉得我们真正从哲学的意义上理

解了这个理论——我所说的理解是指拥有一个定义良好且一致的数学框架。(尽管如此)我总是觉得这显然是正确的，甚至是个大写的正确。对我来说，真理意味着同实验吻合……一个理论要正确，它就必须准确地描述实验中实际发生的事情。”

6 总结

许多接受教科书式的科学教育的人把科学当作是完成的系统理论，甚至会以为科学的发展是像教科书里讲授的顺序那样发展出的。实际上，科学很少是按照那些人想象的那样以教科书上的逻辑演绎的方式发展出来的。相反，在科学的实际发展过程中有大量的猜测和使用多种办法对猜测的检查，以及反复猜测和反复检查。科学家主要依靠这种方法积累大量知识，以逻辑演绎的方式把这些知识积累串联成完整的体系常常是很靠后才发生的事情。现在的量子场论教科书以戴森阐发的理论形式讲述量子场论，正是因为戴森的工作在很多人的贡献之后，所以他才有机会做出这样的系统性阐发。

科学研究的首要目标是追溯和发现可靠的原理，在已经发现的可靠原理的基础之上才可能建造起可靠的理论体系。爱因斯坦把科学家比作依靠少量线索就可以找到答案的侦探，说科学家像侦探那样寻找事件和事件之间的联系，然后创造性地运用想象力把它们联系起来^[1]。费曼也曾经说，最接近于物理学家的职业是侦探。量子电动力学的发展历史很明显地展现了科学发现的这种真实过程。在黑体辐射能谱、光的吸收和发射、正电子的发现和正负电子对产生、 β 衰变、康普顿散射、电子—电子散射、兰姆移

动、电子反常磁矩等诸多实验线索的指引下，许多物理学家做出了许多不同的猜测，通过反复与诸多实验结果进行比较并矫正猜想，物理学家们最终才对许多问题达成了一致，成功建立起了量子电动力学理论。费曼在其诺贝尔物理学奖获奖演讲中对其研究方法的阐明，不能仅仅视作其直观方法的说明，而应该视作为物理学家们追溯原理和发现原理的核心思维方法。实际上，这种思维方法也正是伽利略在其研究中所展现的思维方法^[10]，是物理学自诞生之日起就存在于物理学中的核心思维方法。

物理学家在追溯和发现原理的过程中不仅仅做出了发现。在另一方面，物理学家还需要创造出描述自然的合适概念和语言，并在此基础上创造出合适的理论形式，或改进理论形式。量子电动力学的发展过程以令人炫目的方式展示了物理学家的这种创造性。在短短的十几年间，约当、狄拉克、海森伯、泡利、费米、韦斯科普夫、克拉默斯、奥本海默、菲耳兹、贝特、斯图克尔伯格、朝永振一郎、施温格、费曼和戴森等人发展出了许多描述电子和光子相互作用的概念、语言和理论形式，例如产生和湮灭算符、反对易算符、场量子化、规范固定、真空极化、电荷重正化、质量重正化、正规化、自旋统计关系、相互作用表象、因果传播子(费曼传播子)、费曼规则和费曼图、半场论形式的空穴—量子电动力学、纯场论形式的量子电动力学、非协变形式的理论、协变形式的理论、路径积分理论等等。此外，在此期间物理学家还发展了很多可能的替代理论，例如海森伯的散射矩阵理论、狄拉克的不定度规量子力学、

克拉默斯和惠勒等人的多种版本的修改经典电动力学等等。这些被创造出来的语言和理论不一定是正确的。在前文中已经提及空穴理论实际上是不对的，费曼后来也认为自己的超距作用电动力学是不对的，但是这些理论是有效的，它们不仅可以启发人的思维，而且可以在一定范围内做出一些正确的物理预言。正是在许多这类理论的相互竞争之中，在与实验结果的反复比较之中，物理学家最终成功建立起了具有明显相对论协变性的重正化的量子电动力学理论。

在这个不断创造和不断改进的过程中，物理学家获得了越来越简明、越来越方便以及威力越来越强大的理论表述形式，同时也获得了强大的预言能力。费曼图形式的量子电动力学替代了老式的量子电动力学，正是因为其作为新的语言比旧的语言具有更加强大的能力。这个特色也不是量子电动力学所独有的。力学从伽利略、惠更斯和牛顿的力学形式发展到达朗贝尔、欧拉和拉格朗日等人的力学形式展现的同样是这样。通过发明新的概念、新的语言和新的数学，达朗贝尔、欧拉和拉格朗日等人把牛顿总结的力学发展成为具有强大能力的分析力学的形式，这是一次巨大的进步。在《科学思维的价值》一书的附录中，笔者举例

讨论了这种力学语言的进步所带来的价值^[10]。

物理学家不断创造和改进物理学语言的努力正说明物理学家在理解自然的道路上恰恰缺乏合适的语言。这种情况在物理学的诞生之日起就存在于物理学之中。伽利略研究运动学问题，但是他缺乏研究运动学所需的微积分知识，他不得使用初等几何学的知识来研究运动现象。正是在运动学研究的需求的驱动下，牛顿与莱布尼茨发明了微积分。后人在牛顿建立的基础上，又得以有机会更进一步改进力学的表述语言。量子电动力学的发展历史是说明物理学中这一常见状况的另一个很好的例子。

这些例子可以说明的重要一点是，物理学是在人类的语言能力的极限之处工作的科学。物理学一方面不断做出发现并积累知识，另一方面把发现推进到以人类的语言可以描述的极限之处。古老的运动学问题对伽利略时代的语言提出了挑战，电子与光子的相互作用的复杂现象对1920—1940年代的物理学家的语言提出了挑战，量子场论和重正化理论以及其不可思议的成功同样对当代人的语言提出了挑战。在回应挑战的过程中，物理学家依靠不断创造新的语言来描述自然，应对新的现象，并以这种方式丰富人类的知识和人类的科学语言，扩展

人类思维的边界。正是在回应挑战的过程中诞生了极其强大的微积分数学，诞生了量子场论这种极其强大的物理学语言。我们不知道量子场论和重正化理论的挑战会带来什么，但是仅仅作为一个挑战本身它就具有巨大的价值和魅力。

人们常常会感叹极限运动的魅力，感叹极限运动中非凡的运动技巧，这是在人类的体能和技巧的极限之处的运动。人们也常常感叹非同寻常的技术带给人的体验，实验科学常常追求和开发极端的技术以便做出全新的发现，这可以说是在人类技术的极限之处的活动。兰姆、拉比和库施等人正是因为开发出和掌握了当时最先进的实验技术，从而可以测量发现原子能级中极其精细的结构，为物理学的发展提供关键性线索。物理学家还需要在缺乏合适概念和语言的情况下工作，做出可靠的发现，并且需要创造出新语言和新理论形式以便描述自然世界。这样的努力也值得我们的赞叹，可以毫不夸张地说，物理学家的这种努力是在人类的语言和思维的极限之处的极限运动。这样一种在技术、语言和思维的极限之处工作并创造新技术和新语言的能力是物理学的创造力的表现，是物理学的魅力之所在。这也是物理学家的核心能力，是物理学家是否具有原创力的标志。

参考文献

- [1] Wentzel G. Quantum Theory of Fields (until 1947), In: Mehra J (eds). The Physicist's Conception of Nature. Springer, Dordrecht, 1973. pp 380—403
- [2] Schweber S S. QED and the Men Who Made It. Princeton University Press, 1994
- [3] Schwinger J. Lecture Notes in Physics. 2008, 746: 27
- [4] Lamb W E, Retherford R C. Physical Review, 1947, 72: 241
- [5] Mehra J, Rothenberg H. The Historical Development of Quantum Theory, Vol 6. Springer-Verlag New York, Inc, 2001
- [6] Bethe H A. Physical Review, 1947, 72: 339
- [7] 廖玮. 物理, 2021, 50: 703
- [8] Feynman R. Nobel lecture in Physics, 1965
- [9] Bjorken J D. Physics Today, 1989, 42: 2
- [10] 廖玮. 科学思维的价值: 物理学的兴起、科学方法与现代社会. 北京: 科学出版社, 2021
- [11] 爱因斯坦, 英费尔德 著, 周肇威 译. 物理学的进化. 长沙: 湖南教育出版社, 1999