

# 李政道与量子场论

黄涛

(中国科学院高能物理研究所 100049)

应《现代物理知识》邀请撰写李政道与量子场论一文祝贺李政道先生九十五华诞。

1979年4月和1981年12月李政道先生利用假期回国在中国科学院研究生院开设每天三小时的“粒子物理与场论”和“统计力学”课程,全国各高等院校和研究所近千名师生赴京听课,极为有助于国内恢复教学和科学研究工作。李先生在“粒子物理与场论”讲课中系统讲授了量子场论基础和最新进展,1981年李先生在讲稿基础上出版了 *Particle Physics and Introduction to Field Theory* 英文版(1984年译为中文版《粒子物理与场论简引》分为上、下两册)。此书很有特色,也包括了李政道对量子场论发展贡献的内容。

量子场论是在量子力学和相对论基础上发展起来的描述高速微观粒子现象和规律的理论,它成为描述粒子物理学各种物理现象和规律的有力工具。历史上粒子物理学发展大致经历了三个阶段。第一阶段(1897~1937)基本粒子概念形成。1897年发现电子开启了粒子物理学新时代,20世纪30年代逐渐地认识到物质结构的最小基本成分是电子、质子、中子和光子等基本粒子。量子力学成为原子物理和原子核物理的基本规律。面对高速微观粒子运动新现象,如原子中光的自发辐射和吸收以及电子和光子的各种物理过程相互转化,产生和湮灭现象,1927年狄拉克(P. A. M. Dirac)提出将电磁场作为一个具有无穷维自由度的系统进行量子化的方案。同时开启了对高速微观粒子运动规律的探讨,1929年海森堡(W.K.Heisenberg)和泡利(W.Pauli)在相对论和量子力学的基础上,建立了量子场论的普遍形式,每种微观粒子对应着一种经典场,量子场的激发代表粒子的产生,量子场激发的消失代表

粒子的湮灭,这样建立的相互作用量子场论可描述原子中光的自发辐射和吸收以及电子和光子的各种电磁相互作用现象。第二阶段(1937~1964)基本粒子大发现时期。1937年在宇宙线中发现 $\mu$ 子开始了粒子物理学蓬勃发展时期,这就促使人们将量子场的概念推广应用到自然界所有粒子场以及它们所参与的相互作用物理过程,特别是1949年量子电动力学成为电磁相互作用的基本理论。自然界中除了电磁相互作用还存在两种相互作用——强相互作用和弱相互作用,量子场论对于这两种相互作用的探讨尚处于唯象的有效理论阶段。第三阶段(1964至今)1964年以夸克模型为标志,人类认识物质结构深入到夸克和轻子新层次,相应地20世纪60~70年代量子场论发展为粒子物理标准模型理论,它成为这一层次电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用的基本理论。夸克和轻子所遵从的标准模型理论由两部分组成:电磁相互作用和弱相互作用统一理论以及量子色动力学(强相互作用基本理论)。标准模型理论出色地描述了由夸克和轻子演变而产生的各种实验现象,经受了50年的实验检验。

本文仅就李政道对量子场论的贡献谈谈自己的见解。

## 一、发现宇称不守恒对量子场论发展的深远影响

首先简单介绍一下认识弱相互作用规律发展过程。弱相互作用过程最早是在原子核中的 $\beta$ 衰变现象发现的,是短力程的相互作用。20世纪初,人们已经观测到许多放射性核素都会发射出电子,并将这种方式发射出来的电子命名为 $\beta$ 粒子,相应的过程称为原子核 $\beta$ 衰变。

1914年,查德威克(J.Chadwick)发现在 $\beta$ 衰变中放射出来的电子不具有确定的能量值,这意味着电子丢失能量,丢失的能量到哪里去了,表明在 $\beta$ 衰变中存在“能量危机”。经过多次测量衰变的电子的能量发现它在一定的范围内有一个能谱分布,这个分布的最大值正等同于衰变后的原子核的能量。因此核物理学家面临是否应放弃自然界能量守恒定律的疑难。当时,对于这一疑难科学家们有两种态度:一是放弃能量守恒定律,另一种是相信能量守恒定律。1930年12月4日泡利给当时正在德国图宾根参加放射性会议的科学家们写了一封信,信中提出了他的猜想: $\beta$ 衰变中能量可能被一种看不见的中微子带走了,从而挽救了能量守恒的危机。1931年6月泡利在美国加州召开的美国物理学学会上公开表达了他的建议,在原子核 $\beta$ 衰变中能量还是守恒的,只不过放射出来的除了电子还伴随有一个观测不到的粒子,它不带电荷,中性,质量很微小,很难与别的物质发生作用,却带走了部分能量。只要假定中微子存在,一切对自然界能量守恒定律的疑难迎刃而解。那时,泡利将这种粒子命名为“Neutron(中子)”。1932年真正的中子被发现后,费米(E. Fermi)将泡利的“中子”正名为“Neutrino(中微子)”。1934年费米提出了四费米子相互作用理论<sup>①</sup>,即原子核的 $\beta$ 衰变过程的终态是衰变后的原子核加电子再加中微子,其基本过程为原子核内中子衰变为质子加电子再加中微子,即 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 。1934年费米(图1)首先提出4个费

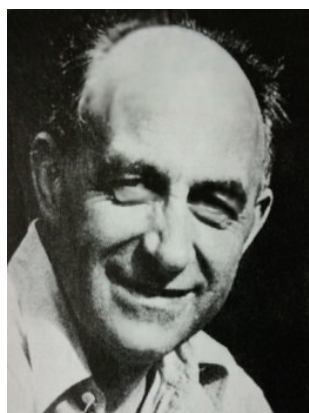


图1 费米

米子(n, p, e,  $\nu_e$ )的直接相互作用机制描述原子核中 $\beta$ 衰变弱相互作用过程<sup>①</sup>(图2),奠定了弱相互作用理论的基础。弱相互作用过程中四个费米子分为两组,不参与强相互作用的轻子,如电子和中微子为一组,参与强相互作用的强子,如质子和中子为一组。正像二阶电磁相互作用中四个费米子耦合一样,因为弱相互作用仅发生在原子核大小范围内,它与电磁相互作用不同,是短程力,因此所有过程都是由两两一组的四个费米子取在同一点上直接耦合形成。

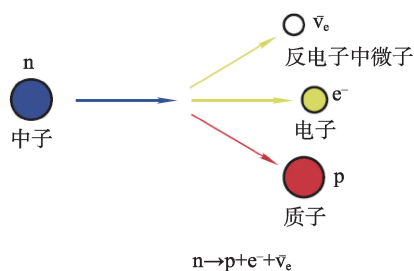


图2 原子核中 $\beta$ 衰变基本过程

李政道1946年进入芝加哥大学师从著名物理学大师费米教授。那时正值弱相互作用理论建立和发展时期,在费米的指导下很快进入利用四费米子相互作用研究弱相互作用物理过程。1949年,李政道是博士生时,他与罗森布鲁斯(M. Rusebluth)和杨振宁发表了关于弱相互作用一篇不到一页纸的短文<sup>②</sup>。这篇论文的历史意义在于它首先指出三种不同的弱相互作用过程的耦合常数相近以及弱相互作用很可能是由一种寿命非常短质量很大的粒子作为媒介。正是这两创新点成为18年后建立弱相互作用基本理论的开端。

1956年,实验上发现了两种强子命名为“ $\theta$ ”和“ $\tau$ ”,它们分别经弱相互作用衰变为两个 $\pi$ 介子和三个 $\pi$ 介子,但它们的质量和寿命在实验误差范围内相等,若把它们当成同一种粒子就有宇称不守恒的问题,这便是当时引人注目的“ $\theta$ - $\tau$ 疑难”。李政道和杨振宁(图3(a)(b))发表论文“Question of Parity Conservation in weak Interaction”<sup>③</sup>打破传统宇称守恒观念提出在弱相互作用过程中宇称不守恒,1957年,吴健雄(图3(c))等用钴核衰变实验证明了宇称在弱相互作用中确实不守恒<sup>④</sup>。吴健雄的实验结果

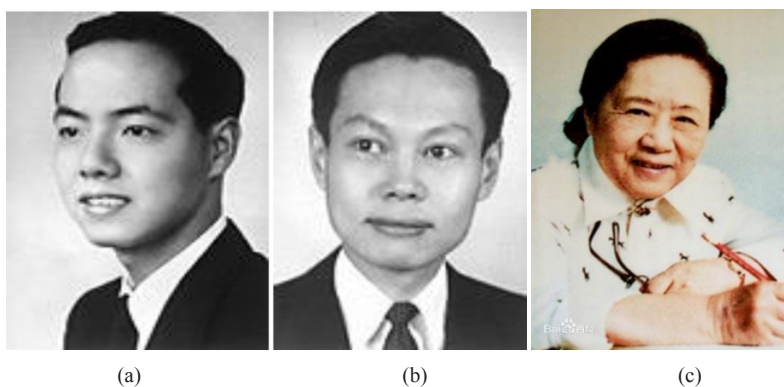


图3 (a)李政道 (b)杨振宁 (c)吴健雄

是推翻宇称守恒定律决定性实验,李政道和杨振宁获得了1957年的诺贝尔物理学奖。

这一成就对量子场论中建立弱相互作用理论的发展有重大影响。以描述 $\beta$ 衰变的四费米子弱相互作用理论为例,比较普遍的四费米子拉氏函数应包括所有可能的双线性型协变量 $\bar{\psi}\Gamma^a\psi$ 构成的Lorentz不变量,

$$\begin{aligned}
 & C_s(\bar{p}n)(\bar{e}v) + C_s'(\bar{p}n)(\bar{e}\gamma_5v) \\
 & + C_V(\bar{p}\gamma_\mu n)(\bar{e}\gamma^\mu v) + C_V'(\bar{p}\gamma_\mu n)(\bar{e}\gamma_5\gamma^\mu v) + \\
 & + C_T(\bar{p}\sigma_{\mu\nu}n)(\bar{e}\sigma^{\mu\nu}v) + C_T'(\bar{p}\sigma_{\mu\nu}n)(\bar{e}\gamma_5\sigma^{\mu\nu}v) + \\
 & + C_A(\bar{p}\gamma_5\gamma_\mu n)(\bar{e}\gamma_5\gamma^\mu v) + C_A'(\bar{p}\gamma_5\gamma_\mu n)(\bar{e}\gamma^\mu v) + \\
 & + C_P(\bar{p}\gamma_5n)(\bar{e}\gamma_5v) + C_P'(\bar{p}\gamma_5n)(\bar{e}v) + h.c. \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中  $h.c.$  代表以前各项的厄米共轭,  $\sigma_{\mu\nu} = \frac{i}{2}(\gamma_\mu\gamma_\nu - \gamma_\nu\gamma_\mu)$ 。这里包括了旋量空间中16个独立基矩阵构造的双线性型协变量 $\bar{\psi}\Gamma^a\psi$ ,通常称它们为  $S, V, T, A, P$  五种相互作用形式。如果要求弱相互作用用拉氏函数式在空间反射下不变,那么(1)式中  $C_a'(a=S, V, T, A, P) = 0$ , 亦即宇称守恒将要求在(1)式中所有带“撇”的项为零。李、杨、吴在弱相互作用中宇称不守恒的理论和实验使得形式(1)是四费米子弱相互作用的最普遍形式。故而人们尝试以(1)式的普遍表述或实验分析所有的 $\beta$ 衰变现象以确定这十个参量。

1957年李政道和杨振宁发表了中微子二分量子理论(Parity Nonconservation and a Two Component Theory of the Neutrino)<sup>⑤</sup>。 $\beta$ 衰变中轻子极化行为实验确认了中微子二分量子特性,这一特性直接导致四个费米子发生相互作用为V-A型流-流耦合的普适理论。1958年, Feynman, Gell-Mann<sup>⑥</sup>, Marshak 和 Sundarshan<sup>⑦</sup>的分析表明, S, V 相互作用的贡献相当于原子核发生 $\beta$ 衰变时是费米选择定则的情况,其核子自旋在衰变过程中不改变; T, A 相互作用的贡献相当于原子核发生 $\beta$ 衰变时满足 Gamow-Teller 选择定则的情况,其核子自旋在衰变过程中改变。P 型相互作用的贡献可忽略。对于大多数进行 $\beta$ 衰变的原子核,或者遵从 Fermi 选择规则,或者遵从 Gamow-Teller 选择规则。这就是说 S 型和 V 型不可能同时不等于零; T 型和 A 型也不可能同时不等于零,将由实验来确定。实验表明:

- i) 电子衰变能谱: 要求 S 型和 V 型中必须有一个为零, T 型和 A 型中也必须有一个为零
- ii) 角关联实验: 要求 S 型和 T 型为零
- iii) 电子的上、下不对称分布: 要求  $C_A' = -C_A = C_V' = -C_V$

这样,为了很好地解释原子核 $\beta$ 衰变现象,上述拉氏函数(1)变为

$$\begin{aligned}
 L_w = \frac{G}{\sqrt{2}} \{ & [\bar{p}(1-\gamma_5)\gamma_\mu n][\bar{e}(1-\gamma_5)\gamma^\mu v] + \\
 & + [\bar{n}(1-\gamma_5)\gamma_\mu p][\bar{v}(1-\gamma_5)\gamma^\mu e] \} \quad (2)
 \end{aligned}$$

即弱相互作用过程中四个费米子通过两两一组的V-A型流(V是矢量流,A是轴矢量流)直接耦合能很好地解释原子核β衰变现象。进一步他们还发现 $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ 弱衰变过程也可以通过类似的拉氏函数来描述

$$L_w = \frac{G}{\sqrt{2}} \{ [\bar{\mu}(1-\gamma_5)\gamma^\mu\nu_\mu][\bar{\nu}_e(1-\gamma_5)\gamma_\mu e] + [\bar{e}(1-\gamma_5)\gamma^\mu\nu_e][\bar{\nu}_\mu(1-\gamma_5)\gamma_\mu\mu] \} \quad (3)$$

式(2)和(3)不仅在形式上一样,而且实验结果表明是同一个耦合常数

$$GM_N^2 = 1.0246 \times 10^{-5}$$

一系列的实验事实与理论计算相一致证实了普适的弱相互作用理论:任何四个费米子(轻子或强子)的弱相互作用都可以用V-A型形式描述,只要满足轻子数守恒、重子数守恒、电荷守恒,以及 $\Delta Q = \Delta S$ 等规则。通常也称这种类型的四个费米子直接发生相互作用为V-A型流-流耦合理论,适用于所有的弱作用过程,被称为普适费米型弱相互作用理论。这一有效理论是9年后建立弱电统一理论的基础。

前面提到1949年,李政道与罗森布鲁斯和杨振宁发表的一篇短文<sup>②</sup>中就注意到中子的β衰变和 $\mu$ 子俘获或衰变过程中弱相互作用耦合常数近似相等,由此事实猜想这些弱作用过程中四个费米子(轻子或强子)的弱相互作用过程可能是由同一个重的中间玻色子传播引起的。1960年他在欧洲核子研究中心(CERN)称此重的中间玻色子为W(取

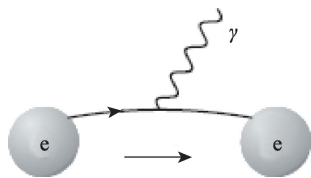


图4 Yukawa型相互作用 $e \rightarrow e + \gamma$

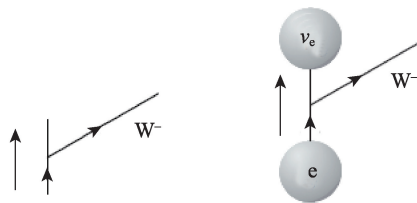


图5 Yukawa型相互作用 $n \rightarrow p + W^-$

weak的第一个字母)中间玻色子<sup>③</sup>。正如量子电动力学中电磁相互作用包含了两个电子或正电子(费米)场和一个媒介光子(玻色)场,通常称为Yukawa型相互作用(图4)。电磁相互作用是长程力相应传递相互作用的媒介光子质量为零。

$$e \rightarrow e + \gamma$$

弱相互作用的四个费米子相互作用可以设想两组流之间通过自旋为1的媒介中间玻色子W传递(图5),W是矢量型大质量媒介玻色子,非常类似于光子。也是一种为某种Yukawa型相互作用,前面所述的β衰变基本过程,

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

可以看作是由发射或吸收一个有质量的带电中间玻色子W引起的, $n \rightarrow p + W^-$ ,  $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ ,

1961年李政道强调高能中微子实验的重要性<sup>④</sup>,计算了W粒子在高能中微子束实验中的产生截面并在理论么正极限给出中间玻色子W质量 $m_w$ 的上下限。

$$30 \text{ GeV} < m_w < 300 \text{ GeV}$$

为寻找中间玻色子W提供了有效的质量范围。

1967年温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆(A. Salam)将电磁相互作用和弱相互作用统一在一起的模型引入中间玻色子W和Z作用传播弱相互作用的媒介子并准确地预言了它们的质量<sup>⑤</sup>。1983年,欧洲核子研究中心(CERN)发现了中间玻色子W和Z,其质量惊人地与电磁相互作用和弱相互作用统一理论预言一致。

2021年是发现宇称不守恒规律65周年,恰逢李先生95华诞,共庆物理学历史上这一重大成就更具有重要意义。记得1985年中有一天,周光召副院长让我到三里河院部他的办公室谈及1986年是李先生和杨先生发现宇称不守恒规律30周年,请我收集相关资料并与世界图书出版社社长潘国驹联系。我接到任务后与李先生和杨先生分别联系并很快收到两位大师寄来的资料。由于技术上的原因,我们仅将二位诺贝尔授奖时的讲演译成中文以特刊形式刊登在1986年第三期《高能物理》(《现代物理知识》的前身)杂志,周光召特撰文“纪念弱

作用宇称不守恒规律发现卅年”刊登在首页。为此,我也有机会回顾这一重大发现在粒子物理发展史上产生的深远影响。事实表明历史上这一发现对认识弱相互作用规律极为重要,它不仅直接导致了1958年普适V-A弱相互作用理论的建立,而且对10年后弱相互作用和电磁相互作用统一理论的诞生起了引领作用。

## 二、物理系统的对称性,对称性破缺和恢复

对称性和守恒律是物理学,特别是量子场论中一个非常重要的概念。对称性存在于自然界许多客观物体的几何形状之中,例如物体和镜中的像有镜像对称性,一个球形物体对它的轴有转动对称性,对称性也存在于周围物体和各种建筑图案等。对称性和对称性破缺是物理系统很重要的性质,而且一个物理系统在一种对称变换下保持不变,必将对应着一种守恒量。又如相应于宏观物体的镜像对称性有微观粒子的空间坐标反射对称性,还有时间坐标反演对称性,空间转动对称性等。物理系统的对称性是和物理量的守恒律紧密相关的。例如时间-空间的各向同性意味着物理系统在时间-空间平移变换和转动变换下是不变的,这相应于能量-动量守恒律和角动量守恒律,其守恒量是能量、动量、角动量。与空间坐标反射对称性相关的是宇称守恒律,其守恒量是宇称(以P标记)。随后不久,宇称不守恒在其他的弱作用过程的实验中也得到了证实。这就打破了人们在历史上一贯认为的运动中对称性守恒是基本规律的传统观念。

自从1956年李政道和杨振宁提出宇称(左、右)对称性在弱相互作用下破坏,即宇称不守恒规律,人们逐渐认识到对称性和对称性破缺是自然界中的基本规律。在微观物理研究领域,每个粒子都存在着一个反粒子,例如电子的反粒子是正电子,质子的反粒子是反质子。粒子与反粒子的质量相同但守恒量子数相反,两者相遇会发生剧烈的湮灭反应生成光子。正、反粒子间电荷共轭对称性,与

此对称性相关的是电荷共轭守恒量(以C标记)。与时间反演对称性相关的守恒量是时间反演宇称(以T标记)。1964年Cronin和Fitch实验上首先从K介子系统中又发现弱相互作用过程中宇称(P)和电荷共轭(C)的联合(CP)也是对称性破缺的。他们由于此发现获得1980年诺贝尔物理学奖。由物理学普遍原理知微观世界遵从空间反射、时间反演、电荷共轭三者联合变换下是不变的,即所谓的CPT定理。那么,自然界中电荷共轭、空间反射和时间反演联合对称性(CPT)是守恒的,CP不守恒就意味着时间反演(T)不守恒。

对称性破缺又分为明显破缺和自发破缺,对称性破缺明显地包含在相互作用中,人们称为对称性明显破缺。1960年南部首先认识到还有一种对称性自发破缺,对称性在相互作用中明显地保持,在某种相互作用形式下真空态可能不是唯一的,存在多个最低能量态,物理上称为简并真空态,此时可能发生真空对称性自发破缺,即物理真空只选取了多个简并真空的一个态。

举个例子说明对称性自发破缺,在一个圆盘中心有一支铅笔不停地转动,铅笔对圆盘的任一方向都是对称的,然而不稳定转动着的铅笔一定会倒下,当铅笔停止转动倒在一个方向时从而选择了一个最低能态不再具有各个方向对称状态(图6)。或者说对称性存在于铅笔倒下之前,铅笔倒下之后对称性发生了自发破缺。在微观世界情况要比这个例子复杂得多,在此不做更多解释。弱、电统一模型中引入自发对称性破缺之后,三个传递弱相互作用的中间玻色子会获得质量并准确预言了它们质量值的大小。

1974年李政道和G.C.Wick<sup>⑬⑭</sup>研究了CP自发破

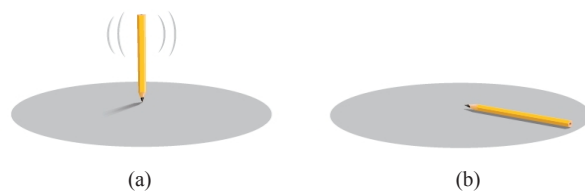


图6 (a)图为一支铅笔不停地转动在圆盘中心, (b)图为铅笔停止转动倒在一个方向



图7 当年的中关村原子能研究所大楼(已拆迁)

缺的问题和自发破缺的真空是否可能在一定条件下恢复破缺对称性,他们发现,重离子碰撞中,在原子核大小的尺度上可以局部恢复对称性,而且造成可观测效果,提出了“反常核态”概念,深化了人们对真空的认识。预言通过高能核-核碰撞能改变真空的性质,有可能在一定的空间区域内形成高温高密系统,使能量密度达到产生夸克解禁闭的阈值,从而形成一种新的物质形态——夸克胶子等离子体(Quark Gluon Plasma—QGP)。这一预言极大地推动了重离子碰撞理论和实验的发展,使其成为物理学的一个主流研究方向。20世纪70年代初,李政道多次回国访问和讲学,记得有一次,那是在中关村原子能研究所大楼(图7)三楼阶梯教室听李先生

的学术报告,当时他介绍了他和Wick关于自然界破缺对称性通过标量场的非零真空平均值恢复的机制。李先生的讲解和回答问题至今仍在我的脑海中,特别是他对物理的精通和诠释给我留下了深刻的印象,当时身处与世界科学隔绝的年轻科研人员亲身感受到世界级物理大师的风采。

在李政道的大力推动下,自20世纪70年代末以来,相对论重离子碰撞的理论和实验研究成为粒子物理中最重要的研究领域。并促成了美国布鲁克海文国家实验室建造了相对论重离子对撞(RHIC),开辟了相对论重离子碰撞的理论和实验研究领域。为了给在北京召开的“相对论性重离子碰撞”国际学术研讨会设计海报,1986年李政道特别会见了中国著名的水墨画画家李可染,为他解释了这次研讨会的内容、目的和意义。李可染大师为科学所感动,特别地为“相对论性重离子碰撞”国际学术研讨会创作了主题画《核子重如牛对撞生新态》(图8)。

2000年相对论重离子对撞机(RHIC)在BNL的建成运行,至今已经积累了大量实验数据。通过对这些实验数据的分析和计算表明:在RHIC的Au+Au对心碰撞实验中已经产生了一种非常粘稠的不

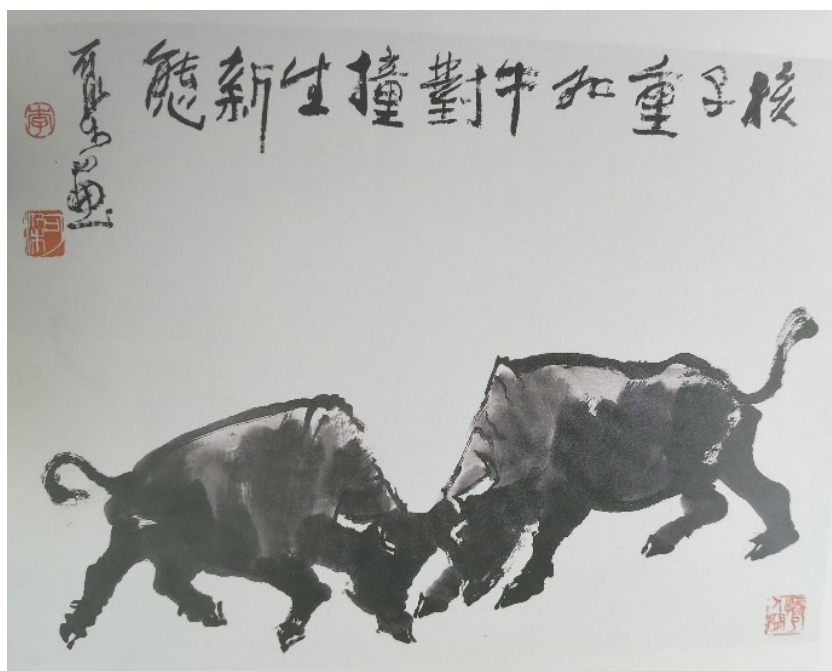


图8 李可染主题画《核子重如牛对撞生新态》

能用强子自由度来描述的部分子物质,而这种部分子极有可能是一种强耦合的夸克胶子等离子体(strongly coupled Quark Gluon Plasma—sQGP)。目前已经在CERN运行的大型强子对撞机(LHC)将产生寿命更长的QGP物质,这为寻找QGP及研究这种新的物质形态提供了前所未有的机会。

### 三、量子场论中非微扰理论

1946~1949年Tomonaga、Schwinger和Feynman发展了一套微扰论计算和重整化方法,奠定了量子电动力学基础。这种微扰论方法具有形式简单、便于计算且明显保持相对论协变性的优点。特别是,Feynman引入了直观图形表示法(称为费曼图规则)和相应的物理图像,提供了写出微扰论任意阶项的系统的方法。然而人们发现在应用量子电动力学计算任何物理过程时,尽管微扰论最低级近似的计算结果和实验是近似符合的,但进一步计算单圈和高阶修正时却都得到无穷大的结果。同样的问题也存在于其他的相对论性量子场论中,这就是量子场论中著名的发散困难。这种高阶修正无穷大使得微扰展开变得无意义,人们对这个理论中的发散困难做了深入的分析,如何从中抽出有限修正的物理结果使得微扰展开的每一阶计算是可操作和具有精确的理论预言值,这就是重整化理论。它不但解决了量子电动力学中出现的发散困难,重新定义物理电荷和质量等物理量以得到有限的高阶修正等,使量子电动力学的计算有了简单可靠的、具有相对论协变性质的基础。1947年Kusch和Foley发现了电子反常磁矩,Lamb等发现了氢原子的 $2^2S_{1/2}$ 和 $2^2P_{1/2}$ 能级的分裂,只有通过量子电动力学的重整化理论计算,才能在很高的精度上与电子和 $\mu$ 子的反常磁矩及原子能级的Lamb移位的实验符合,得到正确的解释。

由于量子场论的非线性特性很难找出精确解,处理量子场论的微扰论方法有它的局限性,它要求耦合常数很小,即属于弱耦合的情况。微扰理论是

量子场论应用到具体物理过程的一个行之有效的办法。考虑到电子场和电磁场相互作用的耦合常数 $e$ 是一个小量, $a = \frac{e^2}{4p} = \frac{1}{137}$ ,逐阶计算级数的展开系数方法。耦合强到一定程度后微扰论展开式的头几项就不再是好的近似。因此,在量子场论的发展过程中针对不同问题的需要发展非微扰理论和方法。

为了寻找量子场论的非微扰理论解,早在1954年,李政道提出一个可解量子场论模型,称为李模型<sup>⑤</sup>,这项工作对以后的场论和重整化研究产生了很大的影响。1964年与诺恩伯格(M. Nauenberg)合作,研究了无(静止)质量的粒子所参与的过程中,红外发散可以全部抵消问题,这项工作与T.Kinoshita的文章合称为“KLN定理”<sup>⑥⑦</sup>。这是目前强相互作用实验中不可缺少的定理,也是用高能喷注去发现夸克和胶子的理论基础。1976年,又发现和研究了非拓扑性孤立子,建立了强子结构的孤立子袋模型理论,具有经典意义。1986年详细研究了孤子星的特有性质,孤子星是非拓扑孤子和广义相对论结合的产物,认为是暗物质、类星体等的理论模型之一。

格点规范理论是量子场论中非微扰理论的一个重要进展,它的出发点是:用定义于有限点阵上的有定域对称性的系统逼近连续时空中的规范场,利用电子计算机作蒙特卡罗模拟计算。格点提供了量子场论在小距离处的一种正规化。虽然这不再是一个无穷维自由度的系统,只要格点的数目足够多,仍是一种合理的近似。李政道和R.Friedberg<sup>⑧</sup>用随机格点的方法研究量子场论的非微扰效应,并建立离散时空上的力学,理论上受到广泛重视。

1986年10月李先生在北京创立了中国高等科学技术中心(简称CCAST)并担任主任。中心设立学术顾问委员会,每年开两次会,建议和讨论下一年度举办的国际、国内研讨会的题目。每年李先生亲自主持会议并报告他的最新研究成果以及国际最新动态。例如,在路径积分问题、格点规范问题和时间为动力学变量和中微子振荡等方面开展工

作。进入21世纪,仍在挑战物理学中的疑难问题,为研究简并的物理真空,求解薛定谔方程式,探讨暗物质的本质,中微子质量本征态的转换矩阵和非微扰问题等方面做了一系列工作。

以上从我个人认识上写了李政道先生对量子场论的重要贡献,由于水平有限不能深刻理解李先生的贡献。实际上李先生对物理学的贡献不仅限于高能物理,他在统计物理、核物理、天体物理、广义相对论和凝聚态物理都做出了重要贡献。正如曾任美国物理学会主席的S.Drell教授指出:“综观物理学的各个不同领域,很难找到一处没有留下李政道的足迹,他犀利的物理直观和高超的解答难题的能力,为物理学的发展做出了持久而明确的贡献。”我记得李先生曾在会上讲解他十分喜欢杜甫

细推物理须行乐  
何用浮名绊此身

杜甫 曲江二首  
公元七五八年

图9 李政道题杜甫诗句

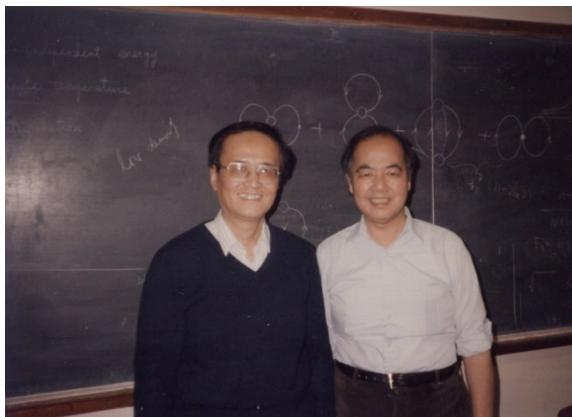


图10 黄涛与李政道合影

的诗句:“细推物理须行乐,何用浮名绊此身。”图9是他讲解时手书的诗句并注明了出处。

我非常荣幸认识李先生40多年,曾经在20世纪90年代接触更多,有时一年能有幸多次见到李先生,聆听物理学大师的报告和见解。图10是90年代初访问哥伦比亚大学在李先生办公室的合影。

衷心祝愿李先生健康长寿,对物理学和祖国科学事业发展做出新的贡献。

### 参考文献

- ① E.Fermi,Ric. Scient.4(1934)491;NuovoCimento11(1934);Z.Phys.88(1934)161
- ② T.D. Lee,M.Rosenbluth and C.N.Yang,Phys.Rev.75(1949)905
- ③ T.D. Lee and C.N.Yang, Phys.Rev.104(1956)245
- ④ C.S.Wu, E.Ambler, R.W.Hayward,D.D.Hoppes and R.P.Hudson, Phys. Rev.105(1957)1413
- ⑤ T.D. Lee and C.N.Yang, Phys.Rev.105(1957)1671; T.D. Lee and C. N.Yang, Phys.Rev.108(1957)1611
- ⑥ R.Feynman and M.Gell-Mann,Phys.Rev.109(1957)193
- ⑦ R.Marshak and G.Sudarshan,Phys.Rev.109(1958)1860
- ⑧ T.D. Lee, CERN Report 61-30,(1961)
- ⑨ T.D. Lee and Chen-Ning Yang, Phys.Rev.Lett.4:307-311,1960
- ⑩ S.Glashow,Nucl.Phys.22(1961)579
- ⑪ S.Weinberg,Phys.Rev.Lett.19(1967)1264
- ⑫ A.Salam,Conf.Proc.C680519(1968)376
- ⑬ T.D.Lee and G.C.Wick, Phys.Rev.D9,2291(1974)
- ⑭ T.D.Lee, Physics Reports,9C,(1974)
- ⑮ T.D.Lee, Phys.Rev.95,1329(1954)
- ⑯ T.Kinoshita, J.Math.Phys.3,650(1962)
- ⑰ T.D.Lee & M. Nauenberg, Phys.Rev.133B1549(1964)
- ⑱ R.Friedberg,T.D.Lee,and A.Sirlin,Phys.Rev.D13,2739(1976), Nucl.Phys.B115,32(1976)

作者简介:黄涛,中国科学院高能物理研究所研究员、博士生导师。从事理论物理和高能物理研究数十年。曾任高能所学术委员会主任,理论物理室主任,中国物理学会高能物理分会副理事长,《现代物理知识》主编,《中国物理快报》副主编等职。