

# 李政道先生和现代 中微子物理

何小刚

(上海交通大学 200240)

## 一、引言

本文是应《现代物理知识》编辑部邀请为纪念李政道先生95寿辰所编辑的特刊中关于介绍李先生对中微子物理的开拓性杰出贡献而撰写。作为中国科学技术大学大七七级在校生于1981年入选李政道先生倡导和促成的中美联合物理研究生项目(CUSPEA)的学生,这是一极为荣幸的机会。我非常高兴能为此特刊撰文纪念李政道先生95寿辰。

入选1981年CUSPEA项目后,我于1982年到美国夏威夷大学攻读物理博士学位。经过一番从基本粒子高能实验到基本粒子理论研究选择的纠结,最终进入基本粒子理论研究,一直历练到现在。我在中学时就听闻过关于李政道先生和杨振宁先生由于推翻物理领域传统的宇称守恒法则,从而引发了一场物理学革命,并因此获得1957年诺贝尔物理学奖的故事。因此一直对粒子物理研究非常感兴趣。从博士生开始研究生涯到现在,我在弱相互作用以及由此延伸的新物理相关领域研究已有超过35年的研究积累,其中很大一部分工作与中微子物理相关。在不同时期和不同研究方向,我都深切体会到李先生在中微子物理研究中的开拓性贡献对现代粒子物理非常巨大和深远的影响。

李政道先生是深受世人敬仰的国际著名科学家,他的研究领域涵盖量子场论、基本粒子物理、核物理、统计力学、流体力学和天体物理等诸多领域,并作出了许多开创性和具有里程碑意义的杰出贡献。本文着重介绍的是李政道先生在现代中微子

物理研究中的先驱开拓性贡献。这些贡献与李先生1957年获得诺贝尔物理学奖的空间宇称在弱相互作用中不守恒的划时代的贡献密切相关。其实在李政道和杨振宁发现宇称不守恒的历史性论文<sup>①</sup>里建议的几个实验验证中,最先获得肯定证据的由吴健雄先生领导的钴 $60(\text{Co}^{60})$ 的贝塔( $\beta$ )衰变实验<sup>②</sup>以及随后另外两个研究组完成的 $\pi$ 介子衰变到一个缪子( $\mu$ )加上一个反中微子( $\bar{\nu}$ )的实验<sup>③④</sup>都与中微子物理密切相关。

中微子物理的研究从一开始就充满传奇,引发了许多重大发现。中微子是自然界中已知的最轻但具有非零质量的基本粒子,仅主要参与自然界已知电磁、强、弱和引力四种基本相互作用中的后两种。在粒子物理对基本粒子特性研究中,引力作用非常小,很难在实验室中通过引力直接观测了解中微子。因此弱相互作用是研究中微子最重要的途径,而中微子也为人们了解弱相互作用提供了绝佳的舞台。李政道先生2001年在纪念克莱因(O. Klein)演讲中将弱相互作用的发展分为三个重要阶段<sup>⑤</sup>: (1) 1898年到1949年的经典阶段(classical period)。这是弱相互作用的贝塔衰变的发现,到通过贝塔能谱研究,再到泡利认识到中微子存在的必要性,进而由费米建立贝塔衰变理论的经典时期。(2) 1949年到1956年的过渡阶段(transition period)。在这期间人们对弱相互作用研究逐步深入,特别是对中微子以及其他新发现的粒子如何与已知基本粒子相互作用开始有了新的认识,建立了费米理论的普适性概念。当然非常重要是由李政道和杨振宁引

领的推翻物理领域传统的宇称守恒法则革命性突破,为如何研究弱相互作用,了解大自然开启了新的篇章。(3) 1956年开始到现在的近代阶段(modern period)。这是粒子物理发展的黄金时期。在此阶段,弱相互作用中宇称破缺得到验证,中微子在实验中被测量到,对中微子相互作用的研究建立了弱相互作用的V-A理论,提出弱电作用的统一模型,强子的夸克模型被提出,发现CP破缺,发现与电子及其中微子不同的类似的粒子和参与强相互作用的不同种类的夸克,发现中微子振荡等。在此期间,强相互作用的色动力学理论也被提出。弱电统一模型预言的希格斯粒子在2012年被实验证实等。到现在描述自然界电磁、弱及强相互作用的标准模型已完美地建立起来,从而踏入探索自然规律的新征程。在各个阶段里中微子物理的研究都扮演着重要角色。而李先生从1949年发表第一篇科学论文开始<sup>⑥</sup>,对弱相互作用和中微子研究的后两个阶段都做出了杰出的开拓性贡献。

## 二、中微子和弱相互作用研究的诞生

1898年卢瑟福(E. Rutherford)通过研究发现贝克勒尔(A. Becquerel) 1896年发现的放射线中含有两种非常不同的成分<sup>⑦</sup>,其一种被卢瑟福称为阿尔法(alpha- $\alpha$ )射线,另一种更具穿透性的射线被称为贝塔(beta- $\beta$ )射线。紧接着在1900年,居里夫妇(M.P. Curie)发现贝塔射线粒子带有负电荷<sup>⑧</sup>。这些对贝塔这一新粒子特性的研究悄然拉开了人类研究弱相互作用的历史序幕。

后来发现贝塔粒子就是电子。接下来二十几年里,人们围绕贝塔衰变的能量特性展开了很多的研究。贝塔射线到底具有分立的固定能量还是具有连续分布谱<sup>⑨</sup>,是当时最热门的研究课题。到1927年,埃利斯(E. Ellis)通过一系列实验<sup>⑩</sup>,最终确定贝塔谱线是连续的,而且贝塔射线的最大能量与母原子核衰变后的原子核能量差刚好相等。然而连续贝塔谱的确认却引来了更深层次的问题。为

什么贝塔射线的能量不刚好是母原子核与衰变后的原子核能量差?难道能量在贝塔衰变过程中不守恒?当时很多研究人员,包括大名鼎鼎的玻耳(N. Bohr),对能量守恒产生了怀疑<sup>⑪</sup>。在此背景下,传奇的中微子横空出世的时刻到来了。

1930年,泡利(W. Pauli)在给一个放射线会议参会者写信时提出了挽救贝塔衰变过程能量守恒定律的想法(见图1)。他指出在贝塔衰变中,存在一电中性的,他称为中子(neutron)的粒子带走了部分能量,但是这个中性粒子加上电子的能量刚好等于母原子核与衰变后的原子核能量差,因此能量总是守恒的。由于这一粒子是中性的,而且与其他物质作用很小,因而难以被测量到。当时他说还不敢轻易发表论文,但也认为没有大胆的假设,也得不到更多的回报,并请求大家认真严肃考虑他的建议。中微子就这样戏剧性地由一封信函的形式进入了人们的视线。后来当查德威克(J. Chadwick)1932年发现中性的与质子质量差不多的核子时,该粒子被命名为中子。但它太重,不可能是泡利建议的中性粒子。

费米(E. Fermi)随后在1934年根据泡利的建

Physics Institute of  
the ETH Zürich  
Zürich, Dec. 4, 1930

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, because of the "wrong" statistics of the N- and Li-6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin 1/2 and obey the exclusion principle and that further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton mass. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

Now it is also a question of which forces act upon neutrons. For me, the most likely model for the neutron seems to be, for wave-mechanical reasons (the bearer of these lines knows more), that the neutron at rest is a magnetic dipole with a certain moment  $\mu$ . The experiments seem to require that the ionizing effect of such a neutron can not be bigger than the one of a gamma-ray, and then  $\mu$  is probably not allowed to be larger than  $e \cdot (10^{-13} \text{cm})$ .

But so far I do not dare to publish anything about this idea, and trustfully turn first to you, dear radioactive people, with the question of how likely it is to find experimental evidence for such a neutron if it would have the same or perhaps a 10 times larger ability to get through [material] than a gamma-ray.

I admit that my remedy may seem almost improbable because one probably would have seen those neutrons, if they exist, for a long time. But nothing ventured, nothing gained, and the seriousness of the situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is illuminated by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's better not to think about this at all, like new taxes." Therefore one should seriously discuss every way of rescue. Thus, dear radioactive people, scrutinize and judge. - Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. With my best regards to you, and also to Mr. Back, your humble servant

signed W. Pauli

[Translation: Kurt Riesselmann]

图1 泡利建议存在中微子的原德文信函的英文翻译

议,提出了他的著名的核的贝塔衰变是由母核中的一个中子(n)衰变到质子(p)加上一个电子(e)和一个反中微子 $\bar{\nu}$ ,  $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ 的四费米子理论(见图2)。之后泡利建议的中性粒子被称为中微子(neutrino)。费米的论文先被自然杂志以很不现实为由拒绝发表,然后费米将论文发表在意大利和德国的两个期刊上<sup>⑧</sup>。当时费米写出如下的中子到质子加上一个电子和一个反中微子的相互作用,

$$G(\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n)(\bar{\psi}_e \gamma^\mu \gamma_5 \psi_\nu)$$

这里 $\psi_i$ 是*i*类粒子的场。 $G$ 是费米由万有引力常数得到的灵感而写下的相互作用耦合常数。李先生在上面提到的演讲中回忆到,他在1956年注意到在费米写下的相互作用中,轻子流 $(\bar{\psi}_e \gamma^\mu \gamma_5 \psi_\nu)$ 和强子流 $(\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n)$ 的形式相差一个 $\gamma_5$ 。但已为时过晚未能亲自请教费米为什么作这样的选择。如果就只是上面单独的一个 $\gamma_5$ 的不同,没有特别的物理意义,因为可以吸收到场的定义里。但是如果在强子和轻子流中具有 $\gamma_\mu$ 和 $\gamma_\mu \gamma_5$ 两种形式,物理规律将会很不一样。到底准确的形式是什么关系到弱相互作用中宇称是否守恒,以及如果不守恒那么宇称又是怎样被破坏的?后面会再回到这一问题。

紧接着人们对费米理论预言的电子能量谱是否与实验观测相符进行了仔细的比较,经过多年的努力,最终在二战结束后,1949年由吴健雄和阿尔伯特(C.S. Wu and D. Albert)实验组对费米理论预言作出了肯定的结论<sup>⑨</sup>。弱作用引起的贝塔衰变结束了经典的探索时期。人们对弱相互作用有了较深入的了解,尽管中微子直到1956年才被莱因斯(F. Reines)和科万(C. Cowan)完成的核反应堆实验直接测量到<sup>⑩</sup>,中微子物理的研究也从此开启了新

的征程。李政道先生在如此的大环境下,开始了他的不同凡响的研究生涯。

### 三、李政道先生与中微子物理

李政道先生1946年进入美国芝加哥大学师随当时在那里执教的大名鼎鼎的费米教授。那时正是弱相互作用经典发展的后期。人们对贝塔衰变认识逐步加深,费米的理论开始成为描述贝塔衰变的主流理论。因此李先生自然很快进入了相关的研究。1949年开始中微子研究时李先生还在攻读博士,然而就领衔提出了统一的由同一中间玻色子传递费米相互作用力(Universal Fermi Interaction)的构想,尔后提出了新方法研究费米理论中中微子的作用形式,提出二分量中微子理论,为建立V-A弱作用理论,以及后来标准模型建立都作出了引领性贡献。李先生历来重视实验和理论结合的重要性。他在1960年论文中建议的可能的高能中微子实验涵盖相当广泛研究方向,包括怎么区分不同中微子及中性流的可能性等,从提出到现在一直引领相关研究。李先生对中微子的研究一直持续到2010年。可以说,中微子研究是李政道先生一生中重要的领域。当时他已84高龄,但是仍然工作在前沿研究的第一线。当时三代中微子及他们的振荡现象已被观测到。但是它们到底怎么混合,相互振荡,特别是第三代中微子怎么振荡,到底第三个混合角是不是为零,是人们最关心的问题。李先生从平移对称性出发开展研究,提出了指导性的建议。直到2012年第三个不为零的中微子混合角才被中国大亚湾实验发现。这里就不对李先生的每个工作细节进行描述,我将着重介绍几个他在中微子领

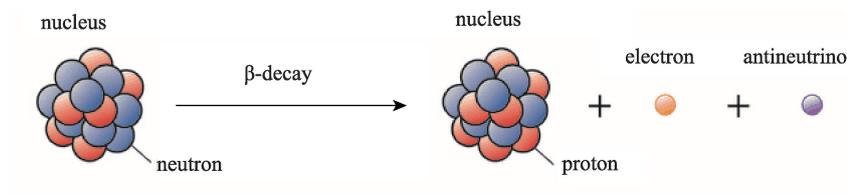


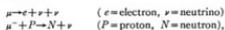
图2 贝塔衰变示意图

Interaction of Mesons with Nucleons and Light Particles

T. D. LEE, M. ROSENBLUTH, AND C. N. YANG  
*Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois*  
 January 7, 1949

WE have been making a phenomenological study of the various experiments which have been done in recent years on the interaction between the various types of particles. In the course of this investigation two interesting points have come to light.

First, we found that if the decay of the  $\mu$ -mesons and the capture of the  $\mu^-$ -mesons by nuclei are described by the reactions<sup>1</sup>



and that the Fermi type interactions are assumed to be responsible for these processes, the coupling constants would have the values

$$G_{\mu e} \sim 3 \times 10^{-49} \text{ erg cm}^2$$

and

$$G_{\mu N} \sim 2 \times 10^{-49} \text{ erg cm}^2,$$

respectively. These values are so determined as to fit the experimental lifetime<sup>2</sup> of the  $\mu$ -mesons and the capture probability of the  $\mu^-$ -mesons by nuclei.<sup>3</sup> It is remarkable that the three independent experiments: the  $\beta$ -decay of the nucleons and the  $\mu$ -mesons and the interaction of the nucleons with the  $\mu$ -mesons lead to coupling constants of the same order of magnitude.

One can perhaps attempt to explain the equality of these interactions in a manner analogous to that used for the Coulomb interactions, i.e. by assuming these interactions to be transmitted through an intermediate field with respect to which all particles have the same "charge." The "quanta" of such a field would have a very short lifetime and would have escaped detection.

Second, if we assume the  $\nu$ -mesons to have integral spin and assume direct couplings for the processes



with coupling constants determined from the lifetime of the  $\nu$ -mesons<sup>4</sup> and the strength of nuclear forces,<sup>5</sup> the interaction between the  $\mu$ -mesons and the nucleons can be quantitatively explained as a second-order interaction through the virtual creation and annihilation of  $\nu$ -mesons. After the completion of our work Mr. A. Ore has kindly informed us that similar considerations have been carried out by J. A. Wheeler and J. Tiomno.

<sup>1</sup> The masses of the  $\nu$ - and  $\mu$ -mesons are taken to be

$$m_{\nu} = 260m_e, \quad m_{\mu} = 212m_e.$$

<sup>2</sup> B. Rossi, *Rev. Mod. Phys.* 20, 537 (1948).  
<sup>3</sup> B. Rossi, *Rev. Mod. Phys.* 20, 537 (1948). In the calculation for the capture process the Fermi model for the nucleus is assumed and only single particle excitations are considered. See M. Rosenbluth, *Phys. Rev.* 75, 532 (1949).  
<sup>4</sup> E. Richardson, *Phys. Rev.* 94, 1720 (1948).  
<sup>5</sup> H. Beke, *Phys. Rev.* 57, 390 (1940).

图3 李政道1949年发表在Phys. Rev. 75 (1949) 905的第一篇论文<sup>5</sup>

域的重要工作。

### 四、中微子与统一费米理论以及中间玻色子传递相互作用构想

李先生的第一篇学术论文是在攻读博士期间与罗森布鲁斯(M. Rosenbluth)和杨振宁一起完成的一篇不到一页的短文<sup>5</sup>，如图3所示。在这篇论文中通过当时已比较精准测量到的有中微子参与的弱相互作用过程，核的贝塔衰变，缪( $\mu$ )俘获过程  $\mu + p \rightarrow n + \nu$  散射，以及缪轻子  $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$  衰变寿命的系统分析后，他们发现这些过程的相互作用耦合常数基本相等。相同的结论在当时也独立地由克莱因(O. Klein)<sup>15</sup>，普丕(G. Puppi)<sup>16</sup>，蒂姆诺(J. Tiomno)和惠勒(J. Wheeler)<sup>17</sup>得到。现在看起来觉得是比较简单的系统分析。但是把几个不同的过程联系起来，并提出统一的费米相互作用是一个非常大胆的突破性步骤。李先生他们进一步寻找更深层的原因，提出了这一现象是因为基本的弱相互作用可能是由同一个重的中间玻色子传播而引起的构想。为弱相互作用模型的建构开辟了新方向。李先生具有非同凡响的物理洞察力，初出茅庐就挤进大师行列。

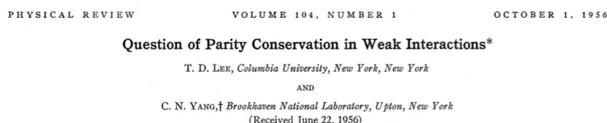
后来李先生把这一中间玻色子粒子叫作W粒子，也就是现在标准模型中的W粒子。多年后，在1971年他还通过理论和精确的缪子寿命估计W粒

子的质量<sup>18</sup>。这一基本弱作用传播粒子于1983年分别由卢比亚(C. Rubbia)和达里拉特(P. Darriulat)领导的UA1和UA2实验小组在日内瓦欧洲粒子物理中心(CERN)测量到。

### 五、中微子物理与宇称不守恒

介绍李政道先生对中微子物理的贡献，必然会提及李政道和杨振宁发现宇称不守恒的历史性论文<sup>1</sup>(图4)。当时实验数据显示，可能存在两个质量和寿命都一样的粒子，称为 $\theta$ 和 $\tau$ 粒子。之所以认为是两个不同粒子是因为他们分别衰变为两个派( $\pi$ )介子和三个派介子而具有不同的宇称。但是它们为什么有一样的质量和寿命。这是著名的 $\theta$ - $\tau$ 之谜。李先生他们在分析了贝塔、超子和介子衰变等弱相互作用过程后指出在这些衰变中并没有宇称守恒的证据。并且指出如果宇称在弱作用中不守恒， $\theta$ 与 $\tau$ 其实就可以是同一个粒子，它们具有同样质量和寿命是必然的结果，因此 $\theta$ - $\tau$ 之谜就迎刃而解。

为了进一步检验弱作用中宇称不守恒的假设，他们在论文里建议了几个实验来验证他们的想法。其中最先获得肯定证据的由吴健雄先生领导的钴60的贝塔衰变实验<sup>2</sup>以及随后另外两个研究组完成的 $\pi$ 介子衰变到一个缪子( $\mu$ )加上一个反中微子( $\bar{\nu}$ )的实验<sup>3,4</sup>都与中微子物理密切相关。李先生他们指出如果宇称不守恒，钴60贝塔衰变观测到的从极化方向上下出来的贝塔电子有不对称性。在 $\pi \rightarrow \mu + \bar{\nu}$ 衰变过程中，因为 $\pi$ 是自旋为零的粒子，总角动量守恒要求 $\mu$ 和 $\bar{\nu}$ 的自旋方向相反。如果宇称不守恒，这一过程衰变出来的 $\mu$ 粒子具有左旋和右旋极化的几率会不一样。实验观测到钴60贝塔衰变观测到了从极化方向上下出来的贝塔电子有很大



The question of parity conservation in  $\beta$  decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

图4 李政道和杨振宁发现宇称不守恒论文摘要<sup>1</sup>

的不对称性,而且很接近-1。而且从 $\pi \rightarrow \mu + \bar{\nu}$ 衰变出来的 $\mu$ 都是左旋的。宇称确实这些过程中被破坏了。他们另外建议的检验宇称破缺的超子散射和衰变过程, $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \theta^0$ 和 $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$ ,也被后来的实验验证。在那时李先生对中微子特性已有很多精辟的了解,因而能够绝妙地运用它们来解决问题和不断地深化推进对弱相互作用的了解过程。

在完成上述论文后,李政道和杨振宁又向前推进了对中微子参与的相互作用的研究。吴健雄先生回忆道<sup>④</sup>,1956年圣诞夜她从华盛顿特区做完实验乘坐最后一班火车回纽约。那时她告诉李先生,她的钴60贝塔衰变观测到了从极化方向上下出来的贝塔电子有很大的不对称性,而且很接近-1。李教授随即告诉她这是很好的结果。这正是二分量中微子理论预期的结果。原来那时李先生他们已投入了对费米贝塔衰变理论更为深入的研究。并且在1957年发表了著名的二分量中微子理论的论文<sup>⑤</sup>(图5)。

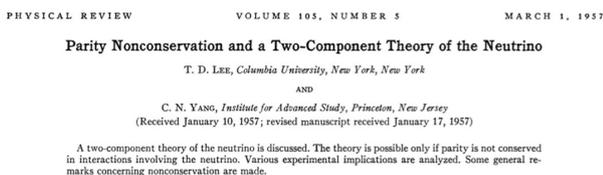


图5 李政道和杨振宁二分量中微子论文摘要<sup>④</sup>

## 六、二分量中微子与弱相互作用的V-A理论

前面提到,费米贝塔衰变理论的强子和轻子流分别具有 $\gamma_\mu$ 和 $\gamma_\mu \gamma_5$ 两种形式,会有其他可能的形式吗?当时李政道和杨振宁分析了场论允许的各种可能的双费米子流形式, $1, \gamma_5, \gamma_\mu, \gamma_\mu \gamma_5, \sigma_{\mu\nu}$ (它们分别被称为S, P, V, A, T类)。并且认识到如果中微子质量为零,中微子场 $\psi_\nu$ 可以用满足 $\gamma_5 \psi_\nu = -\psi_\nu$ 的二分量场来描述。这样的中微子相互作用必然破坏宇称对称性。在弱相互作用中,中微子可用二分量中微子理论表述。这一理论预言钴60贝塔衰变观测到的从极化方向上下贝塔电子有很大的不对称

性,而且很接近-1。因此非常自然解释吴先生他们的实验结果。

李先生他们进而系统分析一系列过程,比如 $\pi^- \rightarrow \mu \bar{\nu}, \mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}, \nu \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 由各种形式的流产生的电子能谱的形式和带电轻子极化状态。指出通过测量能谱以及粒子的极化能最终确定弱相互作用的形式。二分量中微子理论预言对 $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$ 过程,V-A类型是很自然的。并且,衰变的电子能谱具有特征性的形状,预言描述这一能谱的米歇尔(L. Michel)参数 $\rho$ 等于3/4。如图6所示,不同的理论预言的电子能谱形状和不同的 $\rho$ 值是不同的。他们建议的方法引领探索弱相互作用的规律和中微子的特性。同年,李先生、黄克孙和杨振宁又用二分量中微子理论计算了缪子的捕获和辐射捕获率,为检验理论提供可能的方法<sup>⑥</sup>。

早期,实验得到的米歇尔参数 $\rho$ 的中心值低于3/4,更像S, T类的弱相互作用理论的预言。在一段时间里,李先生对相关的发展比较不乐观<sup>⑤</sup>。为此,他和杨振宁还探讨了可能的其他理论对 $\rho = 3/4$ 修正的可能性<sup>⑥</sup>。但是很快更高精度确定的实验确认了二分量中微子预期的V-A理论的预言。同时他们建议的其他关于轻子极化的相关研究也支持二分量中微子预言的结果。

在李先生他们二分量中微子理论论文发表八个月,费曼(R. Feynman)和盖尔曼(M. Gell-Mann)<sup>⑦</sup>,以及稍后马夏克(R. Marshak)和苏达山(G. Sudarshan)<sup>⑧</sup>建立起了弱相互作用的V-A理论。在费曼和盖尔曼的论文里他们特别强调了李先生他们的工作。这一理论不仅确定了弱相互作用流的形式,而且也为后来建构弱电统一理论提供了新的思维

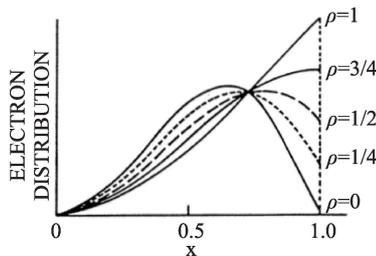


图6  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$  电子能谱示意图。  
 $x = \text{电子能量/最大电子能量}$

和手段。因为 $\gamma_5 \psi_V = -\psi_V$ ,也就是说 $\psi_V$ 必须是 $\psi_L = (1/2)(1-\gamma_5)\psi$ 左手手征态。对于一个狄拉克粒子,也会有右手手征态 $\gamma_5 \psi_R = \psi_R$ ,  $\psi_R = (1/2)(1+\gamma_5)\psi$ 。 $\psi_L$ 和 $\psi_R$ 是建构弱相互的基本元素。而且人们也认识到,这样的分类其实不需要假设粒子的质量为零。V-A理论的建立是弱相互作用发展的又一重大突破。它是之后格拉肖(S. Glashow)<sup>⑤</sup>、温伯格(S. Weinberg)<sup>⑥</sup>和萨拉姆(A. Salam)<sup>⑦</sup>建立弱电统一标准模型关键性的一步,为建构弱作用模型指出了方向<sup>⑧</sup>。

## 七、高能加速器中微子研究新方向

随着人们对弱相互作用的深入了解以及实验手段的不断提高,20世纪50年代末粒子物理发展的黄金期已来临。从李政道先生发表第一篇论文起,他一路引领弱相互作用的研究到达黄金矿区。刚进入60年代时,他和杨振宁又一次在中微子研究中作出杰出的里程碑性贡献<sup>⑨</sup>。那时他们对中微子的了解以及如何用中微子研究粒子物理的基本规律,不管从理论和实验的角度都有了更深入和前瞻的革命性思想,在这篇论文中他们提出了高能加速器中微子实验原理。在同一期的《物理评论快报》(Phys. Rev. Lett.)李先生的同事,施瓦兹(M. Schwartz)也提出了高能加速器中微子实验的构想<sup>⑩</sup>。这是一个非常革命性的思想,一直在有力地推动着包括中微子在内的粒子物理不断向前发展,并取得了丰硕成果。

1959年11月24日,在哥伦比亚大学物理系每天下午的咖啡时间,李政道先生与以往一样是交谈的中心,引导众人探讨在高能量探测弱相互作用的实验方法。当时的弱相互作用V-A理论已广泛被接受。然而,由于费米理论是四费米子相互作用无法重整,在高能时会出现无穷大的发散。这意味着四费米子相互作用只是低能量条件下的有效算符,是高能完整理论的近似。要想进一步探究弱相互作用的完整面貌,必须寻找更高能量的实验探测方法。使用包括质子、电子、派介子、缪子等作为研究手段都因为会涉及电磁相互作用或强相互作用,无

法避免对探测弱相互作用产生干扰,从而一一被否决。虽然下午的讨论无果而终,但引起了施瓦兹对这个问题的强烈兴趣。当天晚上施瓦兹意识到,中微子只参与弱相互作用,可以天然地避免电磁或强相互作用的干扰,是探测弱相互作用的理想探针。虽然中微子参与的相互作用非常弱,但探测中微子也不是完全不可能。难以抑制兴奋的施瓦兹连夜拨通了李政道家的电话,而李政道听了这个想法后也非常激动,很快便着手通过计算验证施瓦兹的想法<sup>⑪</sup>。不久之后的1960年3月15日,施瓦兹<sup>⑫</sup>、李政道和杨振宁就发表了他们的重要论文<sup>⑬</sup>。

FEASIBILITY OF USING HIGH-ENERGY NEUTRINOS TO STUDY THE WEAK INTERACTIONS

M. Schwartz\*  
Columbia University, New York, New York  
(Received February 23, 1960)

THEORETICAL DISCUSSIONS ON POSSIBLE HIGH-ENERGY NEUTRINO EXPERIMENTS\*

T. D. Lee  
Columbia University, New York, New York  
and  
C. N. Yang  
Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey  
(Received February 23, 1960)

图7 施瓦兹<sup>⑫</sup>、李政道和杨振宁<sup>⑬</sup>论文题目

施瓦兹的论文<sup>⑫</sup>提出,用高能质子束打靶,可以产生大量的派介子,这些高能派介子随后衰变,产生高能中微子束流。他同时估计,从派介子衰变出来的中微子,最多大概能携带派介子一半的能量。施瓦兹给出了实验的基本概念设计和信号事例数的估算,并在此基础上提出了高能中微子实验的可行性和基本设计要求。在文章末尾,施瓦兹特别感谢了与李政道和杨振宁丰硕的讨论。

李政道和杨振宁的论文<sup>⑬</sup>,则广泛探讨了高能加速器中微子束流的可能应用,非常前瞻性地提出了九大方向:

- 1) 区分电子相关的中微子和缪子相关的中微子是否是两种不同的中微子;
- 2) 检验轻子数守恒;
- 3) 检验轻子是否参与电磁相互作用之外的中性流相互作用;
- 4) 检验轻子是否是点粒子;
- 5) 检验电子和缪子参与的相互作用是否完全一致;

6) 检验中微子和反中微子之间是否存在 S-对称性;

7) 检验矢量流守恒;

8) 检验是否存在带电的 W 规范粒子;

9) 探测大动量转移的相互作用。

文章最后也感谢了与施瓦兹的讨论。

这两篇文章建立了高能加速器中微子实验这一开创性的思想,为之后的中微子实验研究指明了方向。莱德曼(L. Lederman)、施瓦兹、斯坦伯格(J. Steinberger)按照李先生他们理论文章的建议,于1962年用高能加速器产生的中微子验证了存在电子和缪子相关的两种不同中微子,并因此获得1988年的诺贝尔物理学奖。莱德曼在诺贝尔授奖晚宴中代表三人<sup>⑧</sup>特别感谢了李政道先生:“我们还要感谢很多人,特别要提到我们哥伦比亚大学的同事——李政道教授,感谢他的指导和灵感。”这项工作理论和实验物理学学家紧密合作的光辉典范<sup>⑨</sup>。

60多年来,这项工作引领了很多成功的探索。前面提到的电子和缪子中微子不同中微子的验证,之后弱中性流的验证,陶中微子的发现,利用加速器和反应堆中微子测量中微子振荡,由此引申的利用太阳中微子,超新星中微子以及宇宙线中微子等开展的粒子物理研究都能看到这项工作的影响。今天还在为粒子物理研究指引着进一步向前探索的方向。

接下来的一段时间,李先生在中微子物理方面致力于比较细致的关于中微子特性研究。李先生与合作者展开了一些相关的计算,包括高能中微子碰撞核产生 W 玻色子的截面<sup>⑩</sup>,检验矢量流守恒<sup>⑪</sup>,中微子的电荷形状因子<sup>⑫</sup>,并且也与合作者用二分量中微子理论计算了中微子穿过地球产生的缪子通量强度<sup>⑬</sup>,为大气宇宙线中微子物理打响了前哨战。

## 八、中微子物理研究,一生的探索

20世纪60年代后期到2006年前,李政道先生主要精力放在了中微子物理外的研究领域。但是

中微子物理还是在2006年再次成为他比较密集的研究课题。2006年时李先生已80高龄,但思路清晰,仍然走在研究的前沿。这段时间他关于中微子研究的第一篇论文是与弗里德伯格(R. Friedberg)合作在2006年发表的<sup>⑭</sup>。这篇文章简单清晰,直指问题要害。当时中微子物理中人们很关心的一个重要问题是不同种类中微子混合模式。到2006年,三种不同代的中微子:电子—、缪—和陶—三种中微子都已经发现,而且中微子振荡现象已被观测到,表明不同中微子有混合,而且至少有两种中微子质量不为零。三代粒子的混合可用一个 $3 \times 3$ 的幺正矩阵描述,如图8(a)所示。它有三个混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 和一个破坏时间反演 T 对称性的相位 $\delta$ 。如果中微子是马约拉纳粒子,还可能有另外两个相位。但是如果只关心通过中微子振荡研究混合,这两个额外的相位不起作用。实验结果需要标准模型外新物理来解释中微子质量的成因与混合机制。

当时数据表明中微子之间的混合与已知三代夸克混合模式非常不一样。三代夸克的混合矩阵混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 都比较小,然而中微子的混合矩阵要求第一和二代以及第二和三代的混合的混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}$ 比较大。是否存在第一和第三代不为零的混合角 $\theta_{13}$ 还很不清楚。当时在这方面的研究中比较集中讨论的理论模式有如图8(b)显示的有哈里森(P. Harrison)和斯科特(W. Scott)首先<sup>⑮</sup>,以及稍后高能所的邢志忠<sup>⑯</sup>以及我和徐一鸿(A. Zee)<sup>⑰</sup>都各自研究的三重双极(Tri-bimaximal)混合模式(图8(b))以及它的修正模式(图8(c))。如果 CP 破缺存在,修正模式会更复杂,而且部分矩阵元将会是复数。

但是如何从理论上建构出这样的混合模式是理论工作者们要回答的问题。李政道和弗里德伯格2006的论文<sup>⑱</sup>关注到哈里森和斯科特<sup>⑲</sup>、邢志忠<sup>⑳</sup>以及我和徐一鸿<sup>㉑</sup>的工作。李先生他们从对称性角度出发讨论问题。首先假设三代中微子质量矩阵的对角元素具有共同的值 $m_0$ ,而非对角元素的产生是由第*i*个中微子 $\nu_i$ 作平移变换 $\nu_i + z$ 不变而得到。他们考虑了以下两种可能的质量项形式

$$\begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & 0 \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}}\cos\frac{\theta}{2} & \sqrt{\frac{1}{3}} & -\sqrt{\frac{2}{3}}\sin\frac{\theta}{2} \\ -\sqrt{\frac{1}{6}}\cos\frac{\theta}{2} + \sqrt{\frac{1}{2}}\sin\frac{\theta}{2} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{6}}\sin\frac{\theta}{2} + \sqrt{\frac{1}{2}}\cos\frac{\theta}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{6}}\cos\frac{\theta}{2} + \sqrt{\frac{1}{2}}\sin\frac{\theta}{2} & -\sqrt{\frac{1}{3}} & -\sqrt{\frac{1}{6}}\sin\frac{\theta}{2} + \sqrt{\frac{1}{2}}\cos\frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$$

图8 (a) 标准参数化混合, (b)三重双极 和 (c) 修正的混合。S<sub>ij</sub>=Sinθ<sub>ij</sub>, C<sub>ij</sub>=Cosθ<sub>ij</sub>

$$\begin{aligned}
 \text{I: } & m_0(\bar{\nu}_e\nu_e + \bar{\nu}_\mu\nu_\mu + \bar{\nu}_\tau\nu_\tau) + \alpha(\bar{\nu}_\tau - \bar{\nu}_\mu)(\nu_\tau - \nu_\mu) + \beta(\bar{\nu}_\mu - \bar{\nu}_e)(\nu_\mu - \nu_e) \\
 \text{II: } & m_0(\bar{\nu}_e\nu_e + \bar{\nu}_\mu\nu_\mu + \bar{\nu}_\tau\nu_\tau) + a(\bar{\nu}_\tau - \bar{\nu}_\mu)(\nu_\tau - \nu_\mu) + b(\bar{\nu}_\mu - \bar{\nu}_e)(\nu_\mu - \nu_e) + c(\bar{\nu}_e - \bar{\nu}_\tau)(\nu_e - \nu_\tau)
 \end{aligned}$$

第一种情况就会给出图8(b)的三重双极混合矩阵。然而第二种形式就会得到图8(c)的修正形式。这样从简单的对称性的考虑就得到了人们期待的混合模式。在这里值得一提的是,当人们还在满足于得到三重双极混合模式时,李先生已经考虑到了可能的修正形式。这一点很重要。因为当时实验数据的误差,三重双极混合模式与实验数据没有矛盾,形式极为简单,而深受人们喜欢。它预言第三个混合角θ<sub>13</sub>为零。当时中国的大亚湾中微子实验和世界上其他几个实验正在准备更精准测量θ<sub>13</sub>。如果得到不为零的值,三重双极混合模式必须修改。李先生他们得到的修正模型提供了θ<sub>13</sub>不为零的可能性。所以2012年大亚湾中微子实验测量到不为零的θ<sub>13</sub>后<sup>⑧</sup>,李先生他们的理论仍然还能继续作为讨论中微子混合模型的架构。如果在平移变换中也引进相位,他们的模型也会存在CP破缺现象。之后几年中从各种对称性出发研究三重双极混合及其修正成为主流。现在实验还不能确定中微子混合中CP破坏的大小。将来一旦有实验值,所有相关模型将会被重新检验。希望在不久的将来,中微子的混合形式能够被精准地确定。

接下来的几年里李政道先生较密集关注中微子物理研究,又发表了五篇更广泛探讨中微子的混合模式,与夸克混合的联系以及相关的CP破缺现象等<sup>⑨-⑪</sup>。李先生这段时间发表的最后一篇中微子物理研究的论文是在2010年<sup>⑩</sup>。之后他仍然非常活跃地穿梭于世界各地作相关学术报告,直到2011年

85岁时从哥伦比亚大学荣退。

通过前面的介绍,我们可以清楚地看到中微子物理是李先生一生喜爱的研究方向之一。在不同时期和不同研究方向,李先生在中微子物理研究中的开拓性贡献对现代粒子物理有非常巨大和深远的影响。感谢李先生为中微子物理、粒子物理和人类科学事业做出的卓越贡献。

## 九、感谢与祝福

在此我借用这一机会,感谢李政道先生,感谢他倡导和促成的为培养中国青年科技人才的CUSPEA项目。这一项目从1979年到1989年给予了900多名中国青年学生到美国深造的机会,培养了许多优秀人才。我常想起小时候我外公李季伟(在法国勤工俭学时用名——李嘉秀)给我讲过的他于20世纪早期,1919年从四川到法国勤工俭学的艰辛历程。当时从四川到法国勤工俭学的有邓小平、陈毅、聂荣臻等老一辈革命家。可是到法国后,当时法国经济状况恶化和不稳定以及当时中国政府的不作为,使得留法学生们,工不能勤,学不能俭,连生活都不能维持,还不得不向国内父老乡亲募款维持生计。因而在1921年爆发了勤工俭学留法学生的“反饥饿运动”<sup>⑫</sup>。相比之下,CUSPEA学生到美国学习,不管从生活到学业都得到李先生的关怀,CUSPEA学生都有奖学金,生活无后顾之忧,能专注学业。

我很幸运有机会成为一位CUSPEA学生,能获得奖学金,得到前沿科学教育,获得博士学位。之后



图9 作者1984年7月参加第12届SLAC暑期学校期间，与李政道先生交谈

有机会在基本粒子物理方面在李先生开创的一些领域里工作推进人类对自然界基本规律不断的探索，而且现在能在上海交通大学李政道研究所作为李政道讲习教授继续做出努力。为这一切，我从内心非常感激李政道先生，并以此文祝福先生95生日快乐。

### 参考文献

- ① T. D. Lee and C-N. Yang, Question of Parity Conservation in Weak Interactions, Phys. Rev. 104 (1956) 245.
- ② C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D.D. Hoppes and R. P. Hudson, Phys. Rev. 105 (1957) 1413.
- ③ R. L. Garvin, L. M. Lederman and M. Weinrich, Phys. Rev. 105 (1957) 1415.
- ④ J. I Friedman and V. L. Teldgi, Phys. Rev. 105(1957) 1681.
- ⑤ Tsung-Dao Lee, The weak interaction: Its history and impact on physics. Int. J. Mod. Phys A, 16 (2001) 3633.
- ⑥ T. D. Lee, M. Rosenbluth and C. N. Yang, Phys. Rev. 75 (1949) 905.
- ⑦ E. Rutherford, Philos. Mag. 42 (1898) 392.
- ⑧ M. P. Curie, C. R. Acad. Sci. 130 (1900) 647.
- ⑨ O. Hahn and L. Meitner, Phys. Z 9(1908) 697; W. Wilson, Proc. Roy. Soc. A82 (1909) 612; O. von Baeyer and O. Hahn, Phys. Z. 11 (1910) 488; J. Chadwick, Verh. Dtsch. Phys. Ges. 16 (1914) 383; L. Meitner, Z. Phys. 9 (1922) 145.
- ⑩ E. D. Ellis, Pro. Cambridge Philos. Soc. 21 (1922) 121.
- ⑪ N. Bohr, J. Chem. Soc. 135 (1932) 349.
- ⑫ E. Fermi, Ric. Scient. 4(1934)491; Nuovo Cimento 11 (1934) 1; Z. Phys. 88(1934) 161.
- ⑬ C.S. Wu and R. D. Albert, Phys. Rev. 75 (1949) 315.
- ⑭ C. Cowan, F. Reines, F. Harrison, H. Kruse and A. McGuire, Science 124 (1956) 103.
- ⑮ O. Klein, Nature 161 (1948) 897.
- ⑯ G. Puppi, Nuovo Cimento 6 (1949) 194.
- ⑰ J. Tiomno and J. Wheeler, Rev. Mod. Phys. 21 (1949) 153.
- ⑱ T. D. Lee, Phys. Rev. Lett. 26 (1971) 801.
- ⑲ C.S. Wu, Adventures in ("Gamma" volume), Ed. B. Maglich, Princeton, World Science Communications, 1972, p102.
- ⑳ T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. 105 (1957) 1671.
- ㉑ Kerson Huang, C N. Yang and T. D. Lee, Phys. Rev. 108 (1957) 1340.
- ㉒ T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. 108 (1967) 1611
- ㉓ R. Feynman and M. Gell-Mann, Phys. Rev. 109 (1957) 193.
- ㉔ R. Marshak and G. Sudarshan, Phys. Rev. 109 (1958) 1860.
- ㉕ S. Glashow, Nucl. Phys. 22 (1961) 579.
- ㉖ S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264.
- ㉗ A. Salam, Conf. Proc. C680519 (1968) 376.
- ㉘ S. Weinberg, J. Phys.: conference Series 196 (2009) 012002.
- ㉙ T.D. Lee and C.N. Yang, Phys. Rev. Lett. 4 (1960) 307.
- ㉚ M. Schwartz, Phys. Rev. Lett. 4 (1960) 306.
- ㉛ For more details, see Shao-Feng Ge, <https://tdli.sjtu.edu.cn/EN/customize/435?columnId=61>
- ㉜ L. Ledeman, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1988/lederman/speech/>
- ㉝ T. D. Lee, P. Markstein and C. N. Yang, Phys. Rev. Lett. 7 (1961) 429.
- ㉞ G. Danby, J. M. Gallard, K. Goulianos, L M Lederman, T. D. Lee, Phys. Rev. Lett. 10 (1063) 260.
- ㉟ J. Bernstein and T. D. Lee, Phys. Rev. Lett. 11 (1963) 512.
- ㊱ T. D. Lee and A. Sirlin, Rev. Mod. Phys. 36 (1964) 666.
- ㊲ T. D. Lee, H. Robinson, M. Schwartz and R. Cool, Phys. Rev. 132 (1963) 1297.
- ㊳ R. Friedberg and T. D. Lee, HEPNP30(2006)591.
- ㊴ P. Harrison and W. Scott, Phys. Lett. B535 (2002) 163.
- ㊵ Z.-Z. Xing, Phys. Lett. B533 (2002) 85.
- ㊶ X.-G. He and A. Zee, Phys. Lett. B560 (2003) 87.
- ㊷ F. P. An et al, Daya Bay Collaboration, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 171803.
- ㊸ R. Friedberg and T. D. Lee, Annal. Phys. 323 (2008) 1087.
- ㊹ R. Friedberg and T-D Lee, Annal. Phys. 323 (2008) 1677.
- ㊺ R. Friedberg and T-D Lee, Chin. Phys. C 32 (2008) 939.
- ㊻ R. Friedberg and T-D Lee, Annal. Phys. 324 (2009) 2196.
- ㊼ R. Friedberg and T-D Lee, Chin. Phys. C 34 (2010) 1547.
- ㊽ 四川文史资料选辑, 第二十三辑, 中国人民政治协商会议四川省委员会, 文史资料研究委员会编, 1980年, 成都。

作者简介: 何小刚, 李政道研究所粒子和核物理部主任, 李政道讲习教授, 上海交通大学讲习教授。曾任台湾大学物理系特聘教授, 台湾理论科学中心物理部主任。美国物理学会会士。1981年入选CUSPEA计划。