

中微子与三十年代核结构理论

田卫东

(一)

中微子概念起源于二十年代末、三十年代初，它的提出者是奥地利物理学家泡利。关于这一概念的提出，人们已熟知它与 β 衰变能谱、能量守恒律等的关系，即：为裁决 β 电子具有确定的、单一的还是连续变化的出射能量，1927年埃利斯、伍斯特对RaE进行了量热实验，结果肯定为每一电子具有344 keV的能量，它与已知RaE β 谱的平均值390 keV相近，而与最大值1,050 keV相去甚远，说明 β 电子出射时就带着彼此不同的能量。这一结论1929年又得到迈特纳、奥尔特的实验验证。一般认为玻尔为解决这一实验事实与分立核能态间的矛盾，提出能量守恒破坏的设想，泡利正是因为不相信这一观点，提出了中微子概念。

本文不再讨论这些内容，尽管笔者认为这还是可以讨论的——例如玻尔是否仅因 β 衰变问题就放弃了能量守恒原理。我们将注意力放在中微子概念与早期核结构理论上。

目前公认的有关泡利提出中微子概念最早的、可靠的证据是1930年12月致蒂宾根物理会议的信，从这封信中我们可以感觉到问题的存在。这里，泡利首先谈及提出中微子概念的缘由：主要是“考虑到N-14和Li-6核的统计、错误，及连续的 β 谱，……以挽救统计‘交换理论’和能量原理。”接着泡利描写了独立于质子、电子和光子的这一新粒子的性质：“在原子核内可能存在一种我称为中子的电中性粒子。它具有自旋1/2，遵从不相容原理，另外不以光速运动，以此又同光子区别开来。中子质量一定是电子质量数量级，不管怎样不会大于质子质量的0.01倍。” β 衰变中这样的粒子随同核内电子一同出射，所以 β 电子具有彼此不同的能量。这样一个粒子在核内所受到的力，他认为磁相互作用，所以当时又常被称为“磁性中子”。

三十年代初人们认识的原子核结构与今天不同——它是由质子、电子组成的。事实上，当时核现象研究出现的困难，相当程度上与此有关，泡利提出中微子假说，根源在这个地方，目的也在于克服这一困难，为理解这一点，请注意泡利对他的中微子的描述，多么象今天我们认识的中子。只是在中子发现、中子-质子核结构模型建立以后，才为正确认识中微子铺平了道路，费米于此基础上，在 β 衰变理论中完善了对中微子的认识，也就很自然了。

(二)

二十年代末、三十年代初，人们认识的基本粒子有限，质子、电子、光子而已。物理学界普遍相信所有物质都是由电子、质子构成的并称为正负电子。卢瑟福虽然1920年已提出“中子”概念，但其内涵是氢核与电子的紧密结合体；至于 α 粒子，很早就清楚它是氦原子核，它们都是复合粒子。与此对应，关于原子核结构，自然的想法是由电子和质子所构成。如玻尔1930年在法拉第讲座上谈到：“关于这些原子核电荷和质量的实验证据，以及关于自发和受激核衰变的证据，导致了所有原子核由质子和电子组成的假想。”考虑到原子核的电荷和质量，人们进一步假定原子量 N ，原子序数 Z 的核由 N 个质子、 $N-Z$ 个电子组成，这一原子核与 Z 个轨道电子形成中性原子。

这一结构模型首先遇到的困难，是电子作为个体存在于核内的假设。原子核半径据估计为 $R=N^{1/3}r_0$ ，当 $N=238$ 时约为 8.7×10^{-13} cm，而电子经典半径为 2.8×10^{-13} cm。部分与整体相差无几。电子若确在核内，测不准关系指出，它们必须具有相当大的能量，描述这些电子必须应用相对论理论，但克莱因1929年的计算揭示了，这样的描述必然导致电子向负能态的跃迁，即“克莱因佯谬”。

与此同时，发现了这一结构模型与量子力学中多体统计和自旋理论的矛盾。1928年，克罗尼希研究了奥恩施泰因、范·维克的 N_2 分子光谱实验，对于界限为 $\lambda\lambda$ 3914, 3884, 4278的三条带光谱的强度关系，确定了电子跃迁类型和振动、转动量子数改变。按照洪德对分子光谱的分析，可断定氮核自旋为1。次年，海特勒和赫兹贝格分析了拉塞蒂对 N_2 拉曼效应的观察，结果表明， N_2 的统计性质“总是对称的，这意味着，氮核遵从玻色统计。”

按照质子、电子核结构理论，氮核应由14个质子、7个电子即21个费米子组成，氮核应具半整数自旋和玻色统计。而实验结果显然与理论预言相矛盾。正如海特勒、赫兹贝格所写道的：“这一事实的确令人惊异。”

这一困难后来被泡利称为“ N^{14} 反常”。类似的情况不久也出现在其它元素如Li⁶、D上。但人们没有直接对原子核的组成提出怀疑，倒是某些物理规律在核内的适用性发生了疑问。克罗尼希在论文中论证了

N核自旋为1后写道：“因此人们可能要被迫承认核内质子、电子在一定程度上不再保持它们的身份，”即认为它们不再具有通常的自旋、统计等自禀性质。海特勒、赫茨贝格也认为“如果拉塞蒂的观察是正确的话，这一规则在核内不再成立了。”玻尔在法拉第讲座中认为“这些问题似乎超出量子理论现有形式所及范围”，所以“当我们转向原子核组成这一问题时，这一情况必须谨记在心。”“只要我们稍深入地追究即使是最简单原子核的组成，量子力学目前的形式就基本失效了。”

(三)

泡利正是在这样的物理学背景下提出中微子假说的。如同本文开始指出的，泡利中微子概念不同于今天人们的认识，它并不完整和完全正确，但他大致抓住了问题的关键，指出人类未发现的粒子及核结构理论对摆脱困境的作用，而且，预言这样一个粒子的存在是要有胆有识的。

泡利大约与玻尔同时注意到核物理领域日益严重的困难。1929年2月18日在致克莱因信中，他首次提及 β 衰变能谱问题。对已发表的埃利斯、伍斯特量热实验，泡利同迈特纳一样，持明显的怀疑态度，并认为 β 连续谱的起因是贯穿性极强的 γ 辐射。

泡利真正相信埃利斯、伍斯特实验约在1929年6月前，这时柏林的迈特纳已令人信服地重复了卡文迪许实验室的实验。7月17日在致玻尔的信中，泡利写道，迈特纳“差不多使我相信了，人们不能以次级过程（诸如 γ 射线辐射等）来解释连续的 β 谱。”但他仍不相信能量守恒会破坏，这期间他收到了玻尔寄给他的论文手稿“ β 衰变谱与能量守恒”，在他看来玻尔的观点太不慎重，“你自己已经写了，札记的目的是强调指出我们具有的对 β 射线衰变问题理论处理的基础是多么微弱，但我这里必须提出一个问题，发表一篇短短的札记是否可以证明完全相反的目的！”

促使泡利迈出决定性一步的是所谓 N^{14} 统计反常。1957年讲演“中微子今昔谈”中，泡利以“中微子与核结构”为小标题，谈到1927年以后把发展了的量子力学观念和方法应用到原子核时的困难，“第一个反例是我们当时所称的‘氮反常’，接着同样的现象也发生在 Li^6 和 D 上，‘我那时研究了核自旋和统计的这些问题以及连续 β 能谱问题，并没有放弃能量定律，在核结构中引进了一个新的中性粒子的概念。’中微子概念于是产生了。”

(四)

1931年泡利前往美国，分别在伯克利、安阿伯和普林斯顿逗留了一段时间。夏季在安阿伯理论物理讨论班上他谈到中微子概念及起源。这引起卡尔森和奥

本海默的兴趣，除了泡利注意到的中微子与原子核物理的关系外，他们试图以具有确定磁矩的中微子说明宇宙射线现象，于是决定进行理论上的探索。

卡尔森、奥本海默论文的一个历史意义是，它从一个方面反映了这时泡利中微子作为原子核组成部分的性质：“这个粒子必然具有自旋，可能遵从不相容原理；它的存在是泡利尝试性提出的，其根据是满足量子力学和相对论所有要求的波函数可描写这样一个粒子。”

同样重要的是，他们的论文反映了这时人们以方程定量研究中微子的企图，而结果则是对“磁性中子”的否定。泡利在美国提出的中性粒子波动方程，是自旋 $1/2$ 粒子狄拉克方程的一种变式，含有“泡利反常磁矩”的一个附加项 $P = \kappa \sigma^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$ （ $F_{\mu\nu}$ 是场张量， κ 是联系中微子磁矩 μ 的常数， $\kappa = \mu/4c$ ），从相对论波动方程出发，他们导出了磁性中子碰撞截面的一般公式，由于高速“中子”不能产生云雾室径迹，卡尔森和奥本海默着重在小速度下检查结果。他们的最后结论是正确的：“我们相信这些计算证明，不会有存在着磁性中子这样粒子的任何实验证据。”由于他们的计算，作为粒子而存在的中微子依然为人们接受，而它与物质发生磁相互作用的观点被扬弃了。如泡利本人1933年在索尔维会议上谈到这一问题时说：“我们不清楚中微子与其它物质粒子及光子间的作用，我以前主张的它们具有磁矩的假设（狄拉克理论引导我们预言中性、磁性粒子的可能），在我看来根本不再是有道理的了。”

(五)

中子的发现和中子-质子核结构模型的确立为中微子及 β 电子性质的明确开辟了道路。如同光子是原子能态间跃迁产物一样，正确的观念是： β 电子和中微子在核态变化过程中产生出来。如所周知，这由费米1934年首先在理论上提出，中子-质子核结构则是这一理论的前提。

事实上，二十年代末的核结构理论，特别是电子作为独立个体存在于原子核内的观念与实验事实往往有抵触，已引起当时物理学家的注意。除去泡利特别注意的 N^{14} 反常、 β 能谱问题外，尺度数量级估计、与原子光谱超精细结构实验数据相冲突的很大的核内电子磁矩、“克莱因佯谬”等也令人不安。伽莫夫1931年出版的著作《原子核结构和放射性》中反映了他的疑虑，这里所有涉及核内电子的段落都曾标以骷髅又骨记号，以提醒读者。只是出版商觉得不雅，后来才改为星号。

玻尔注意到这些现象，也对核内电子的存在提出疑问，并首先提出电子作为动力学个体可能是在衰变时产生的。在法拉第讲演中他指出：“严格地讲，我们不

能肯定地说原子核包含确定数目的电子，只能说所荷负电为基本单位的整数倍，并在这个意义上， β 射线从核中的出射应视为作为力学实体的电子的产生。”

只是由于人们认识的微观粒子有限，限制了对核结构的了解。中子发现以后，人们才正确地认识了 β 衰变、核内统计、自旋等问题，中微子才可能看作核态跃迁的产物。

(六)

中子概念最早由卢瑟福提出。虽然卢瑟福的中子是质子和电子的复合体，他的功劳却充分体现在热情支持和鼓励同事们用实验方法寻找它。在他的影响下，卡文迪许实验室深信自然界中存在中子，所以1·居里和约里奥关于铍的实验刚一发表，就引起了他们的注意，经过紧张的工作，1932年2月查德威克在《自然界》(Nature)发表了实验上发现中子的报道“中子存在的可能性”，确认了中子的存在。

诚如卢瑟福所言，中子的发现将使物理学家重新考虑核的组成。伊凡宁柯很快提出了中子-质子核模型。他的中子作为基本的和复合的双重粒子是在意料之中的，一方面他认为“在原子核结构中，中子也占重要地位，而原子核电子都是包藏在 α 粒子和中子之内”，同时又在踌躇“问题的关键是在多大程度上可以把中子当作基本粒子(好象质子或电子一类的东西)”。独立于伊凡宁柯，海森堡同年也提出了这一模型，并在量子力学框架内借助于同位旋概念，引入核交换力，发展为数学形式，解释了放射性系列等一些实验事实。与伊凡宁柯一样，海森堡理论的中子仍具基本的和复合的双重性质。1970年海森堡回忆说：“在那时我们有个模糊的感觉：中子似乎可被视为质子和电子的组合，但又似乎不是，因为中子看上去毕竟很象于质子。”

如果罗马物理学家的争辩是正确的话，费米应比海森堡更清楚地意识到中子的基本性。按他们的说法，马亚拉那独立地提出中子(作为基本粒子)概念和中子-质子核模型。塞格雷与马亚拉那曾一起看到居里和约里奥的论文，据他回忆，马亚拉那立即断定他们所发现的是“中性质子”，“这是重要的，因为肯定了居里和约里奥发现的很快由查德威克证实的中性质子，马亚拉那发展了核的中子-质子模型。”马亚拉那与费米和罗马的其它物理学家进行了讨论，费米立即认识到重要性，劝他马上发表。

1931年到1933年关于核物理共有三次重要的国际性会议，即1931年10月的罗马会议，1932年7月的巴黎会议和1933年10月的索尔维会议。泡利认为罗马会议对中微子概念的发展具重大意义。“这里我特别遇到了费米，他立即对我的想法有了强烈的兴趣，并对我的新的、中性粒子持肯定态度。”1932年巴黎会议上

费米作了关于核物理的报告，尽管有关中子问题尚有不不确定性，1933年索尔维会议上，他已能清楚地解释中子与中微子的区别。海森堡当时一定了解中微子假说，然而不相信它。如他的1932年核结构论文，仍把 β 衰变视为中子分裂成质子和电子。这一点上费米与海森堡表现了差别，中子、中微子观念上的差异，使他可能一举解决当时的困难。索尔维会议后仅两个月，他就在中子-质子模型基础上发表了 β 衰变理论。

(七)

费米对中微子概念的澄清还原于他在理论物理学上的突破。例如(一)进一步明确核结构理论，明确了中子与中微子的区别，从而把泡利的中微子从原子核中排除出来；(二)拓广了量子电动力学的处理方法，将光子产生湮灭过程推广到实物粒子，把 β 电子和中微子视为核态间跃迁的产物；(三)类比于电磁相互作用，提出弱作用假说等。

现已成为经典文献的费米的这篇论文，1934年初以意大利文发表于《新试验》(Nuovo Cimento)上。这里，“假设中微子的存在，提出了 β 衰变的定量理论。”费米继承了海森堡的中子-质子核结构模型，但把中子、质子平等对待，类似于辐射过程受激原子发射光子理论，建立从核中发射轻粒子的理论。如同他自己所述，这一理论建立于三个基本假设上，“(a)电子总数及中微子总数没有必要守恒，电子(或中微子)可产生或湮灭”，“(b)两种重粒子(中子、质子)可作为重粒子的两个内部量子态来处理(象海森堡一样)”，“(c)包含重粒子和轻粒子的体系的哈密顿函数必须如此选择，使得中子到质子每一跃迁与一个电子和一个中微子的产生相联系，相反的过程(质子变为中子)必须与一个电子和一个中微子的湮灭相联系。”

接着费米以狄拉克的相对论量子论描写费米子(质子、中子、电子和中微子)，利用狄拉克辐射理论的产生、湮灭算符，遵从二次量子化方法，“导出了寿命公式和 β 射线连续发射谱的形式公式，并与实验进行了比较。”回到中微子概念本身，毫无疑问，费米的论文进一步阐明了它的性质，完善了人们对它的认识。

费米对中微子的新认识，逐渐为物理学界所接受。1934年春，博特和派尔斯写给《自然界》的文章谈及 β 衰变粒子和泡利中微子“可以这样描述，(a)事先存在于原子核中，或(b)在发射时产生。费米最近一篇文章提出了利用(b)的 β 衰变模型，看上去与实验相符。”按照(b)的描写方式，他们继续写道：“中子和质子的作用将是对称的，并且可以期望有时正电子也能与中微子一起在核跃迁时产生，因此居里和约里奥关于人工正 β 衰变的实验强烈支持方法(b)因为人们很难设想正电子存在于核中。”不久，威克发表论文，把费米

理论推广到包括正电子的情形。

费米的 β 衰变理论及它的实验验证——而不是实验上对中微子存在的验证——在早期奠定了泡利中微子作为基本粒子存在于粒子家族的基础。实际上大部分物理学家远在1956年探测到中微子之前，已普遍接受了泡利的假设。玻尔本人1936年致函《自然界》，放弃了能量统计守恒假说，“……迅速增长的 β 射线现象的实验事实与泡利中微子假说结果的富有启发性的吻合，在费米理论中如此出众地得到发展，所以原子核 β 射线辐射问题中能量守恒定律是否严格守恒，怀疑的基础现已很大程度上消除了。”

这样，20年代末的 N^{14} 反常、 β 能谱、克莱因佯谬等原子核物理领域的问题，由伊凡宁柯-海森堡-马亚拉纳核结构理论、泡利-费米中微子假说及费米 β 衰变理论等得到基本解决。基本粒子作为粒子及它们的性质的发现对此起了直接的作用，而中微子如果不是第一个的话，一定是建成三十年代新物理学的这些最早的新粒子之一。