

# 中微子与天文学

卞毓麟

“不幸的中微子！但不会永远如此。我确信，在不久的将来，中微子必将获得应有的荣誉，甚至进入人类的生活。”

——布鲁诺·庞特科尔沃

庞特科尔沃是费米的好朋友，也是著名的意大利物理学家。文首引用的他这段话，寓意甚深。欲知详情者，可阅读他的原著《在探索的道路上》（1963年）。我想提示的只是：人不知道自己的生日是不幸的，而诞生日期不确的粒子——中微子便属此列——其“不幸”或许也不亚于此。那么，人类究竟在哪一天发现了中微子呢？

对此有两种截然不同的回答：（1）是1930年12月4日，从理论上发现的。证据是奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利的一封信；（2）是长达四分之一世纪的时间内陆续发现的，证据则是世界各国许多物理学家的一系列论文、演说、实验……

## β衰变之谜

中微子的发现史，肇始于β衰变之谜。一种放射性原子核衰变成另一种原子核、同时发射一个电子的过程称为β衰变。自不待言，该电子会带走一部分能量。这些能量的来源也是清楚的：它由原子核中的一小部分质量转化而来。

然而，使物理学家惊愕的是：β衰变中发射的电子携带的能量似乎不够多，它与原子核的质量损失不相称。而且，在β衰变中发射的电子并不具有确定的能量，而是具有“连续的能谱”。

β衰变中丢失的能量到哪里去了？本世纪二十年代，在物理学家眼中这个问题已变得十分严峻。及至1930年，声望卓越的物理学巨匠厄内斯特·玻尔认为也许不得不放弃久经考验的能量守恒定律了。他推测：能量守恒定律也许仅在许多衰变过程中在平均意义上成立，但并不保证每一次衰变都遵守。物理学大厦的一块巨大基石仿佛已在动摇之中！

玻尔的智慧 and 勇气素称超凡。他的氢原子量子化轨道早为整个物理学界深深叹服。现在，他似乎有意向“能量守恒”发难了。但是，这行吗？

在这件事上，玻尔昔日的学生、比他年轻15岁的泡利表现出了更加令人赞叹的才气。

1930年12月4日

泡利于1900年诞生在维也纳。他十几岁时就能以清晰的条理撰文阐释相对论了。1925年，他提出了著名的“泡利不相容原理”，并因此而荣获了1945年度

的诺贝尔物理学奖金。

1930年12月4日，泡利寄了一封信给聚会于图宾根的“从事放射性工作的女士们和先生们”。他在这封著名的信中表述了如下的观念：β衰变之谜与“氮的危机”（氮核的原子量为14，核电荷为7。所以，按当时物理学界的想法，氮核应含14个质子和7个电子，故氮核的自旋必为半整数。危机在于，实验明白无误地证明氮核的自旋是整数），这两大难题有可能用某种很自然的方式统一地解决。那就是设想：原子核中还可能存在一种自旋为1/2的中性粒子，泡利称它为“中子”。有了它，氮核中的粒子总数便是偶数，因而可以具有整数自旋。而且，在β衰变时，原子核同时释放出电子和“中子”，失踪的能量正是被这个“中子”带走了。

泡利还想到：“中子”与物质的相互作用一定很弱，能够几乎不受任何阻碍地穿透很厚的物质，以致于实验家们始终未能发现它。于是，他在信中写道：

“我谨以信任的心情向诸位”“提出一个问题：如果中子具有和γ量子大致相同的或者大10倍的穿透能力，能否用实验的方法证明确实有中子存在？”

这封出自年轻人的口气谐谑的信，结尾轻快而热情：

“总之，从事放射性研究的女士们和先生们，请检验和判断吧！可惜我自己不能来图宾根，因为12月6日夜至7日苏黎士将有舞会……”

你们最忠实的仆人泡利”

不过，预言存在一种无法用实验证实的粒子看来是不幸的。所以，泡利在发信的当晚——1930年12月4日晚，说了这么一段话：

“我今天做了一件很糟糕的事。一个物理学家无论什么时候也不应该这么做的。我提出了一个在实验上永远检验不了的东西。”

费米：“就叫它中微子吧！”

泡利的想法在深化。不久以后，他就不再认为β衰变中出现的那种穿透力极强的粒子是原子核的组成部分，并且不再称它为“中子”了。

诚然，中子倒真是存在的——存在于原子核内。它也确实解决了“氮的危机”。1932年，英国物理学家

詹姆斯·查德威克的实验毋庸置疑地证实了中子的存在，并证明其质量与质子相仿，但不带电。为此，他荣获了1935年的诺贝尔物理学奖金。

$\beta$ 衰变中出现的粒子不是中子。1931年6月，在美国物理学会的一次会议上，泡利报导了自己的新想法。他没有给这种想象中的粒子起任何独特的名字，但是费米却激动地打断了他的讲话，高声嚷道：“就叫它中微子吧！”

这个名称简明而贴切，它的意大利语原文是 neutrino，意思是“中性的东西”。渐渐地，全世界的科学家都接受了这个新的科学术语。我们把它译成“中微子”，台湾省的物理学家则译成“微中子”。细细揣摩起来，似乎“中微子”这个译名更为妥当。

也有人对泡利的想法不以为然。他们认为这种假定只是要了一点“小花招”，是为了维持能量收支的“账面平衡”而搞的小动作。

然而， $\beta$ 衰变中这位电子的“神秘旅伴”不仅挽救了能量守恒，而且还稳住了物理学大厦的另外两块基石：“动量守恒”和“角动量守恒”。一种粒子同时解脱了三大守恒定律的困境，谁还能长久地不为之动心呢？

费米认为， $\beta$ 衰变实际上是原子核内的一个中子转变成一个质子，并放射出一个电子和一个中微子的过程。在能量合适的条件下，原子核内的质子也能转变成中子，并放出正电子和中微子。在此基础上，他建立了 $\beta$ 衰变的基本理论。由此得出的结论与实验结果相对照就可以推论出中微子的完整特性：

不带电荷，没有磁矩，自旋为 $1/2$ ，质量为零（或近乎为零），以光速（或近乎光速）行进。

后来，人们从“总粒子数守恒”出发，又将 $\beta$ 衰变中出现的粒子确定为“反中微子”。也就是说，一个中子变成了两个粒子（质子和电子）与一个反粒子（反中微子）。衰变后的总粒子数为 $2+(-1)=1$ ，与衰变前相等。

对于中微子，人们所需的只剩下了一条：切实地抓到它！

### 搜捕中微子

中微子的质量为零，不会参与引力相互作用；它的电荷为零，也不参与电磁相互作用；它不是强子，与强相互作用无缘；但是，中微子毕竟不是绝对不与其它物质发生作用的。它参与弱相互作用，因此人们可望在某些弱相互作用中找到它——只是由于它与其它物质发生相互作用的几率（或者说“截面”）极小，因而很难抓住它。

1953年，美国洛斯阿拉莫斯实验室的两位物理学

家，小克赖德·柯恩和弗雷德里克·雷因斯，领导一个小组开始了艰难的搜捕工作。他们看中了美国原子能委员会在佐治亚州的一个大型裂变反应堆。这个反应堆可以提供很强的中子流，它们理应释放出大量的反中微子。让这些反中微子轰击水中的质子（氢核），应能重新得到中子和正电子。人们可以用一种镅化合物的水溶液来探测这些中子，因为镅吸收中子时会发射某一特定能量的 $\gamma$ 射线。正电子则会与电子湮灭而产生 $\gamma$ 射线。倘若能够探测到上述两种不同能量的 $\gamma$ 射线，而且它们出现的时间间隔又恰如理论所料，那么实验家们便可以满有把握地宣称：自己真的已经抓住了反中微子。

柯恩和雷因斯知道：必须把这些中子和正电子与宇宙线造成的同类粒子区分开来。为此，他们用了5000个液体闪烁计数器把自己的探测器包围起来，并辅之以复杂的电子装置来分析探测器中发生的反应。

他们耐心地等待着。最后，终于在1956年成功地找到了反中微子。对此，雷因斯写道：

“这项直接的观测结果消除了对于存在中微子的全部怀疑。与任何别的基本粒子一样，中微子业已成为现实的粒子。”

这时，从泡利向图宾根发出那封具有历史意义的信算起，恰恰经历了四分之一世纪。两年之后，泡利便去世了。但他毕竟是幸福的，在有生之年目睹自己的预言变成了现实。

反中微子就范了。它的反粒子——中微子本身又如何呢？

为了探测，首先需要强大的中微子源。偏巧，天文学家们很清楚，大自然已经为我们提供了理想的目标，那就是太阳。

### 太阳中微子失踪案

太阳也象绝大多数恒星一样，在其核心部分进行着热核聚变：每4个氢核（质子）聚变为一个氦核（ ${}^4_2\text{He}$ ），并释放出巨额的能量。在这一过程中，太阳每秒大约会产生 $1.8 \times 10^{38}$ 个中微子。

这些中微子从太阳的核心畅行无阻地飞奔出来。2.5秒钟之后，它们便越出太阳表面冲向太空；8分钟之后便抵达地球，并在 $1/25$ 秒钟内穿透整个地球，继续狂奔而去。

探测来自太阳的中微子对于粒子物理学家固然重要，但是对于天文学家更是津津乐道。至今这仍是人们直接洞察太阳中心正在发生什么事情的唯一途径。

庞特科尔沃首次提出了一种方法，可用以探测极微量的中微子。其依据的原理是： ${}^{37}\text{Cl}$ 吸收一个中微子就会变成 ${}^{37}\text{Ar}$ ，并且发射出一个电子。为了形成巨大的氯靶，可以使用含氯的液态有机化合物，例如通

常作为干洗液的四氯乙烯就很适用。

将四氯乙烯注入一个大筒，并暴露于来自太阳的中微子流中，慢慢地就会聚集起极微量的氩 37。然后，再在容器中通以氦气，把这微量的氩冲刷出来。最后，测定氦气中的氩 37 含量（它是放射性的，因而可用计数器记录），便可以反过来推算出太阳中微子的流量。

美国物理学家雷蒙德·R·戴维斯等人从 1956 年开始就率先进行了这方面的尝试。但是，直到 1968 年才真正取得了不容忽视的惊人结果。那一年，他把 610 吨四氯乙烯注入一个直径 6 米、长达 15 米的大筒，构成一架“中微子望远镜”，并把它安装在南达科他州一个很深的金矿中。这样，上面厚厚的岩层便可将所有的粒子都屏蔽掉——唯独中微子除外。

戴维斯等人确实捕获到了来自太阳的中微子。他们仿佛在地下“看见”了太阳中心发生的一些情况。然而，探测到的中微子却比理论预期的少得多——要少一半以上。

这就是著名的“太阳中微子失踪案”。它向人们提出了一系列问题：难道太阳的内部结构根本不是人们预料的那样？难道太阳和绝大多数恒星的能源并不是人们长期以来所确认的氢核聚变？

七十年代、八十年代，技术在不断改进，实验在继续进行。但是，失踪的太阳中微子依然毫无着落：实测结果只是理论预言值的三分之一！

### 静止质量不为零？

不言而喻，作为弱相互作用的骄子，中微子在宇称守恒之失效中扮演的角色是很重要的。弱相互作用不遵循宇称守恒的问题，本期第 1 页周光召的文章已作了出色的回顾和评论。有趣的是，泡利曾对此作了明确的否定性预言。而且，这一回他又是发了一封信。发信的时间是 1957 年 1 月，收信人是著名的美国物理学家韦斯科夫。信中写道：

“我不相信上帝是一个无能的左撇子，我愿意出大价和人打赌，我相信实验必将给出宇称守恒的结果。

您真挚的朋友 泡利”

就在收到这封信之后两天，韦斯科夫获悉了吴健雄那项具有判决意义的实验结果。

人们原谅了泡利。他在四分之一世纪之前用中微子挽救了能量守恒、动量守恒、角动量守恒，今天同一个人又怎能想到同一种粒子竟会破坏另一项守恒定律呢？

五十年代中期，在李政道和杨振宁那个导出宇称不守恒的弱相互作用模型中，中微子的自旋是“不可逆转”的，这严格地规定了中微子的静止质量等于零，因

而它必然永远以光速运动。

五十年代后期，人们开始意识到中微子可能有两种：在  $\beta$  衰变及其逆过程中与电子或正电子结伴出现的正、反“电子型中微子”  $\nu_e$  和  $\bar{\nu}_e$ ，以及在另一些过程中与  $\mu$  子相伴出现的正反“ $\mu$  子型中微子”  $\nu_\mu$  和  $\bar{\nu}_\mu$ 。七十年代，人们又发现了第三种轻子： $\tau$  子，与之结伴的则是正反“ $\tau$  子型中微子”  $\nu_\tau$  和  $\bar{\nu}_\tau$ 。问题是：能不能用实验确定这些中微子的静止质量当真为零呢？

人们作出了很大努力，但所有的结果都只能不断地改进中微子质量的上限。例如，及至七十年代后期，人们大体确定了  $\nu_e$  的质量必小于 60 eV， $\nu_\mu$  的质量必小于 0.57 MeV， $\nu_\tau$  的质量则必小于 250 MeV。

多少有些出乎意外的是，从七十年代末开始，苏联和美国各有一些实验小组宣布，他们的实验结果似乎表明中微子的静止质量并不为零。例如，苏联物理学家柳比莫夫曾宣称，他们测量  $\beta$  衰变中  $\beta$  粒子谱型的实验表明， $\nu_e$  的质量下限为 14 eV，质量的最可几值则约为 34 eV。不过，这类实验是很难做的，很难具备理想的实验条件，结果则大有可商榷的余地。

最近几年的实验似乎又使天平摆了回来。它们重又倾向于中微子未必具有非零静止质量。显然，问题还远未彻底解决。实验在继续着，人们在思索着……

### 又一个谜：短缺质量

倘若  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  三种中微子的静止质量互有差异，那么就可以从理论上推知应该存在一种与此密切相关的现象——中微子振荡。也就是说， $\nu_e$  过了一段时间有可能变成  $\nu_\mu$  或  $\nu_\tau$ ，而且也可以再变回来，即三种中微子可以循环往复地互变。反之，倘若人们果真证实了中微子具有振荡现象，那么也就可以推断，它们的静止质量不为零。

人们目前仍未找到中微子振荡的可靠证据。不过，要是中微子当真振荡的话，对于解开太阳中微子失踪之谜倒是很有利的。情况很可能是：太阳发出的中微子都是  $\nu_e$ ，但是在抵达地球的途中，它们有 2/3 变成了  $\nu_\mu$  和  $\nu_\tau$ ，因而地球上探测到的电子型中微子流量就只有从太阳出发时的 1/3 了。

具有非零静止质量的中微子还将为解开由来已久的星系“短缺质量”之谜带来希望。我们的太阳与另外一、二千亿颗恒星一起，构成了庞大的银河系。而银河系本身又只是一个很普通的星系。在目前天文观测所及的整个范围内，象银河系这样的星系为数需以十亿计。天文学家早已发现，星系有聚集成团的普遍倾向。两个星系配对的称为“双星系”；几个星系聚在一起的，称为“多重星系”；更多星系的集合体则称为“星系群”或者“星系团”。有些巨大的星系团所包含的成员星系可多至成千上万。

星系团内的星系各以不同的速度朝不同的方向运

动。按理说，久而久之这些星系似乎应该彼此越离越远，从而使整个星系团逐渐瓦解。但事实上，星系团却并未因此而崩离析。这表明星系团内存在着强大的引力，把诸成员星系维系在一起。由此不难推算，星系团必须拥有多大的质量，才能产生足以与其成员星系的弥散运动相抗衡的引力。

天文学家们通过计算得知：星系团中全部星系的质量加在一起，仍远远不能满足团聚的需求。因此必有大量的质量未为我们所知。问题是：这些“短缺质量”究竟在何处？

人们提出了种种设想，可惜都未能被普遍接受。要是中微子静止质量当真不为零的话，事情也许就会简单得多。短缺的质量可能就是以中微子的形式隐藏起来了。由于中微子为数极巨，在星系团中中微子所占的质量，甚至可以超过我们业已探测到的全部可见物质！

### 决定着宇宙的命运吗？

事情还不止于此。中微子的静止质量如果不为零，它就会大大影响整个宇宙的结构与演化。说来奇怪，煌煌宇宙的命运竟仿佛操于小小的中微子之手。

当代天文学早已证实，人类观测所及的整个宇宙正处于一种极其宏伟的膨胀之中。在某种意义上，这很象一个正在吹胀起来的气球，球上任意两个点都在彼此远离。那些最遥远的星系和类星体，远离我们而去的速度竟达光速的百分之九十以上！这究竟该作何解释呢？

当前最流行、且为众多的天文观测事实所支持的理论“热大爆炸模型”认为，大约在 150 亿年前，可观测宇宙中所有的一切全都拥挤在一个极小的体积中，其温度和密度高得不可思议。“大爆炸”使整个时空和物质极其迅猛地向四处猛冲，温度和密度则随之迅速下降。后来，爆炸的“碎屑”逐渐形成了各种各样的星系和星系团，它们至今依然拥有巨大的分离速度。然而，可观测宇宙的膨胀难道是永恒的吗？

这就是宇宙学中长期悬而未决的宇宙开闭问题。所谓“开放宇宙”，是指宇宙将无限地膨胀下去；“封闭宇宙”则指宇宙将交替地经历膨胀—收缩—膨胀……的无限过程，因而亦称“振荡宇宙”。不难理解，宇宙之开闭与其平均物质密度有关。通常，人们把宇宙平均物质密度值记为  $\rho_0$ ，倘若  $\rho_0$  大于某个临界值  $\rho_c$ （它称为临界密度，数量级为  $10^{-29}$  克/厘米<sup>3</sup>），则宇宙是封闭的，否则就是开放的。

天文学家们有许多方法可以测定星系的质量，并且可以通过星系计数直接推算出星系的分布，以及估算出宇宙物质平均密度  $\rho_0$ 。结果是  $\rho_0$  约为  $10^{-31} \sim 10^{-30}$  克/厘米<sup>3</sup>，即比宇宙封闭所要求的临界密度  $\rho_c$  小得多。即使计入星系团中的短缺质量， $\rho_0$  还

是远小于  $\rho_c$ 。

当然，这未必就说明宇宙一定是开放的。来自其它方面的一些证据表明，宇宙可能是闭合的。换句话说，真正的  $\rho_0$  也许比  $\rho_c$  大，或者至少与其相等。因此，寻找这些隐匿的质量便成了当代天文学中很重要的课题。人们曾经设想，也许可以在星系际介质、宇宙线以及其它物质或辐射中找到“隐匿质量”的线索，但结果并不乐观。有人甚至设想宇宙间也许存在着众多的黑洞，从而有效地提供了所需的质量。但是，这也缺乏言之成理的证据，因而难以令人信服。

于是，人们又想到了具有静止质量的中微子。根据热大爆炸宇宙模型，宇宙中不仅存在着众所周知的 3K 微波背景辐射，而且还存在着现今温度为 1.9 K 的中微子背景辐射。与此相应的  $\nu_e$  数密度约为每立方厘米 54 个。再加上  $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$ ，以及所有这三种中微子的反粒子，那么即使每一个中微子的静止质量微乎其微，它们对宇宙物质平均密度的总体贡献却依然相当可观。甚至可以设想，我们生活于其中的这个宇宙，有百分之九十以上的质量都寓于中微子内。也许，渺小得简直不值一提的中微子最终竟会使整个宇宙的膨胀停止下来，并进而转变为收缩！当然，我们不应忘记“也许”这两个字。

### 结 束 语

看来，现在是应该彻底修正文首引用的庞特科尔沃那一段话的时候了。我想，能不能这样说：

**幸运的中微子啊！关心自然法则的物理学家和关心宇宙命运的天文学家都倾心于你，你必将获得永恒的荣誉，并将深深介入人类的生活。**

亲爱的读者，您说呢？（题字：吴勉）