

# 中微子及其家族

彭秋和

(南京大学天文系 江苏 210093)

2001年1月3日《科技日报》公布的“2000年国际十大科技新闻”之一：“科学家发现 $\tau$ 子中微子存在的证据”称，“2000年7月20日，美国费米实验室宣布，美国、日本、希腊和韩国的54位科学家经过3年的合作研究，首次发现了表明 $\tau$ 子中微子存在的直接证据。至此，粒子物理学标准模型中的12种基本粒子已经全部被直接或间接探测到。 $\tau$ 子中微子的发现对揭开物质构成之谜以及探索宇宙天体奥秘具有深远意义。”为了理解这项科学发现的意义，我们首先介绍原子核和放射性原子核。从不稳定原子核 $\beta$ 衰变的研究中，泡利预言了中微子。然后我们讲述物质世界中4种基本的相互作用和组成物质世界的12种基本的费米子。而后我们介绍中微子是造成物质世界左右不对称性质的根源以及中微子是导致巨大恒星灾难性塌坍和特大爆发的直接肇事者。

## 一、品种繁多的原子核只是由质子和中子堆成

在19世纪，人们普遍认为组成物质的最小基元是原子，它是不可能再分解的。20世纪初，英国著名物理学家卢瑟福发现原子是由位于中心的带正电的原子核和一些围绕它旋转运动的带负电的电子组成的。原子的绝大部分质量集中在原子核内。1932年英国物理学家查德威克发现中子，很快人们就认识到化学元素周期表中各种原子的原子核都是由适当数量的带正电的质子和不带电的中子组成。中子和质子的质量相近(中子质量略高一点)，质子质量约为电子质量的1840倍。原子核内质子的数量同核外绕转的电子数目相等，这使得原子呈现电中性。各种元素的原子核内质子数目就等于该化学元素在门捷列夫周期表内的原子序数，有时简称核电荷数(常用字母 $Z$ 表示)。例如碳元素，化学符号为 $C$ ，周期表内原子序数为6，其原子核外有6个电子在绕转，原子核内的质子数目与核外电子数目相等，也为6个( $Z=6$ )。但是自然界存在着含有6个或7个中子的两种不同的稳定的碳原子核。凡中子数目不同但质子数目相同的原子核(它们在元素周期表上的位置相同)称为同位素。我们可用符号 ${}^12_6C$ 、 ${}^13_6C$ ，或13卷4期(总76期)

简单地用 ${}^{12}C$ 来标记由6个质子和6个中子组成的碳原子核，用 ${}^{13}_6C$ 或 ${}^{13}C$ 来标记由6个质子和7个中子组成的碳原子核。其他原子核的符号是类似的：在元素符号的左上角(或右上角)的数字表示原子核内的核子(质子与中子的统称)总数，也称为原子核的原子量(常用字母 $A$ 标记)。在元素符号左下角的数字表示它的质子数目，也即元素周期表上的原子序数。例如 ${}^Z_X$ 表示元素 $X$ 的原子核，其质子数为 $Z$ ，原子量为 $A$ 。因为学术界总是熟悉元素周期表的，故左下标 $Z$ 常被略写。地球上各种矿石(例如煤，石油)和石灰岩洞中的碳，或是在组成有机物和生命的碳水化合物中的碳，99%都是 ${}^{12}C$ ，而 ${}^{13}C$ 只占1%左右。宇宙早期，经历过宇宙热大爆炸之后，宇宙物质基本上完全由 ${}^1H$ 和 ${}^4He$ 组成( ${}^4He$ 约只占23%左右)。我们常见的碳，氧，硅，铁，铅，铀等元素都是由宇宙中各类恒星内部热核燃烧冶炼出来的。地球上各种元素的不同稳定同位素这种相对丰度(指它们数量所占的百分比)以及不同元素之间的相对丰度必定是这些物质在银河系演化过程中由各类恒星热核燃烧和元素核合成的结果。这是天体物理学家正在研究的一个热门课题。

质子，中子和电子好像一个陀螺，不断地旋转，称为自旋。其自旋角动量非常小，其大小都等于 $\hbar$  ( $\hbar = h / 2\pi$ ,  $h$ 为普朗克常数)的一半，我们常说它们的自旋为 $1/2$ 。这类自旋等于半整数 $\hbar$ 的粒子称为费米子。自旋等于 $\hbar$ 整数倍的粒子称为玻色子，例如， $\pi$ 介子(有 $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  3种)和光子，它们的自旋分别为0和1。

在20世纪30年代初，人们普遍认为组成包括各种不同种类的原子在内的物质世界的3种最基本的组成元件就是质子、中子、电子这些费米子。光子和后来发现的 $\pi$ 介子这类玻色子则分别被认为是电磁相互作用和强相互作用(原子核内质子、中子之间存在很强的吸引力)的传递者。

1928年英国物理学家狄拉克天才地预言存在着一种带正电的“正电子”，它后来被实验所证实。

正电子在质量,带电量以及自旋角动量等各方面性质同电子几乎完全一样,其差别仅仅是电荷的符号相反。人们称它是电子的反粒子。后来发现质子,中子也都有相应的反粒子,称为反质子、反中子。我们宇宙中所观测到的星系、恒星、行星(包括地球在内)和星际物质的所有原子都是由质子、中子和电子组成。人们一直在猜测是否存在由反质子、反中子和正电子组成的反原子。由这种反原子组成的物质称为反物质。由它们组成的星体以及星系是否构成一种反宇宙?这是人们的一种有趣的猜想。最近,华裔物理学家丁肇中在美国、欧洲,包括中国大陆和台湾范围内组织了一个放置在航天飞机上的空间探测器“ $\alpha$ 磁谱仪”。其工程相当庞大,主要目的是在宇宙线中探测这种反原子核。极其大量的空间探测数据资料目前正在处理与分析之中(需要两三年的时间才能判断最后的结果)。

## 二、“能量守恒原理”导致了中微子的发现

组成物质的基本粒子是否真的就是上述这3种费米子和它们的反粒子呢?中微子的预言和发现以及最近30多年来粒子物理学的研究进展完全改变了这种观念。我们的故事还得从具有放射性的原子核的 $\beta$ 衰变说起。其实,早在19世纪末科学家就已经发现某些原子核具有放射性。用现在的语言来说,许多原子核是不稳定的,它们分别通过发射电子、正电子或 $\alpha$ 粒子(它由两个质子和两个中子组成),转变为不同的原子核。这种现象分别称为 $\beta^-$ 衰变、 $\beta^+$ 衰变和 $\alpha$ 衰变。例如,就碳原子核来说,除了前述的两种稳定同位素 $^{12}\text{C}$ 和 $^{13}\text{C}$ 之外,人们还发现它的一种放射性同位素 $^{14}\text{C}$ ,它由6个质子和8个中子组成。物理实验发现,一堆 $^{14}\text{C}$ 物质内, $^{14}\text{C}$ 原子的数量( $N$ )随着时间( $t$ )的推移而不断地按指数规律减少,即

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

其中 $N_0$ 表示初始( $t=0$ )时刻 $^{14}\text{C}$ 的原子数目。这个现象称为 $^{14}\text{C}$ 原子核的衰变。式中指数函数中的常数 $\tau$ 称为不稳定(原子)核的平均寿命。人们将放射性(原子)核数量减少一半所需的时间称为半衰期,常用 $\tau_{1/2}$ 标记。它同平均寿命的关系为: $\tau_{1/2} = \tau \ln 2$ 。 $^{14}\text{C}$ 的半衰期是5730年。考古学家常利用物质中 $^{14}\text{C}$ 含量多少的测量来推测古物的年代。人们自然要问,这些衰变的 $^{14}\text{C}$ 原子核变到哪儿去了?实验发现:原来那堆 $^{14}\text{C}$ 原子逐渐转变成为稳定的氮原子。即 $^{14}\text{C}$ 衰变成具有7个质子和7个中子的 $^{14}\text{N}$ 原子核。

也就是说, $^{14}\text{C}$ 中的一个中子转变成为质子。当然,实验还发现,每一次这种衰变过程同时伴随着放射一个电子( $e^-$ ),即



这正好使得物质保持电中性。这种衰变的(原子)核也称为放射性(原子)核。这种发射电子的衰变称为 $\beta^-$ 衰变。其实,自由的中子也是不稳定的,它也发生 $\beta^-$ 衰变。它放出电子的同时衰变为质子,其半衰期短于20分钟。但是,在原子核内和后面要介绍的中子星内部的中子却是稳定的。这是微观世界所遵从的量子力学和统计规律所确定的。

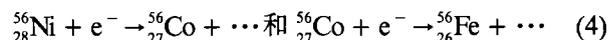
有些放射性核在衰变过程中发射的不是电子,而是正电子,称为 $\beta^+$ 衰变。在 $\beta^+$ 衰变过程中,不稳定原子核内的一个质子转变为中子。例如,铝元素只有一种稳定的同位素 $^{27}_{13}\text{Al}$ ,它有一种半衰期为 $7.2 \times 10^5$ 年的放射性同位素 $^{26}_{13}\text{Al}$ 。这种同位素的一个质子转变为中子的同时,会发射一个正电子( $e^+$ ),最后转变为镁的一个稳定同位素 $^{26}_{12}\text{Mg}$ 。即



这新生的 $^{26}_{12}\text{Mg}$ 原子核最先处于一种激发状态,当它跃迁回复到“平静的”基态时会伴随着发射一个能量为1.809MeV的 $\gamma$ 光子。这里MeV是百万电子伏特的英文缩写。1电子伏特(eV)相当于 $1.6 \times 10^{-17}$ 焦耳的能量。人们还用KeV,GeV分别表示千电子伏特和 $10^9$ eV。

早在20世纪50年代初人们就断定一些小行星核心处于较高温度下的熔融状态。这可能是由于在太阳系形成初期,这些小行星含有许多 $^{26}_{13}\text{Al}$ ,在它们不断地衰变为 $^{26}_{12}\text{Mg}$ 的过程中,释放出来的能量较高的 $\gamma$ 光子被物质吸收而使得小行星加热,核心变为熔融状态。这在当时仅仅是一种猜想。直到70年代,中国台湾留美博士研究生李太枫在对某种类型陨石的化学分析时发现了异常丰富的 $^{26}\text{Mg}$ ,证实了上述想法。1982—1984年间,宇宙飞船探测到星际空间中有较强的能量为1.809MeV的 $\gamma$ 射线,并推断银河系内弥散在星际物质中的放射性 $^{26}\text{Al}$ 总量大约有(2—3)倍太阳质量之多。它们是由什么样的星体核合成产生的?至今仍然是一个未解之谜。

有些 $\beta^+$ 放射性的不稳定核的转变过程与上述过程略有不同。它们是通过俘获原子核外面的电子,它同核内的一个质子结合,使其转化为中子。这种过程称为电子俘获过程。例如



现代物理知识

它们在超新星爆发(一颗质量巨大的恒星整体爆炸)中起着重要作用。

不同放射性核的半衰期是大不相同的,差别可以非常大。现在已知的超过 6000 种不同的原子核中,稳定的核素不足 1000 种。绝大多数不稳定核的半衰期短于 1 年,大多数短于 1 秒。用于制造原子弹的铀(它的核电荷数为 92,它没有稳定的同位素)是利用半衰期最长的两种放射性同位素 $^{238}\text{U}(\tau_{1/2} = 4.468 \times 10^9 \text{年})$ 和 $^{235}\text{U}(\tau_{1/2} = 7.038 \times 10^8 \text{年})$ 。

20 世纪 20 年代末,当人们测量 $\beta^-$ 衰变出射电子的能量后就出现了令人迷惑的难解之谜。为了说明这个问题,我们必须首先介绍爱因斯坦关于联系物体质量和能量的著名公式:一个静止质量为  $M$  的物体,如果它的运动速度为  $v$ ,则它的能量( $E$ )为

$$E = \frac{Mc^2}{1 - v^2/c^2} \quad (5)$$

其中  $c$  为真空中光速,为每秒 30 万千米。按照这个原理,任何静止的物体( $v = 0$ )也具有相应的能量,等于  $Mc^2$ ,称为它的静止能。我想强调指出,爱因斯坦的这个质量-能量关系式正是后来人们研制原子弹、氢弹,和平利用原子能以及太阳、恒星巨大的光和热的热核能源的理论原理。物理学家首先发现, $\beta^-$ 衰变时出射电子(或正电子)的动能在一定范围内具有连续变化的各种可能的大小。但是,当人们仔细测量放射性原子 $\beta^-$ 衰变前后原子的质量以及放出电子或正电子的能量后会惊讶地发现衰变前后物质能量仿佛不守恒。例如在(2)和(3)式所表达的反应式中,衰变前原子核的静止能量明显超过衰变后原子核的静止能量与电子(或正电子)能量。这里要说明的是,实验中的原子核要比电子重几万倍以上,衰变后原子核的反冲非常小,可以认为它仍然保持静止状态。而发射的高速电子的能量应按照(5)计算,它实际上包括静止能量和运动的动能。同样,在电子俘获反应式(4)式中,反应前原子的静止能量与入射电子的能量之和也明显超过了反应后原子的静止能量。这个矛盾在当时确实令人伤透了脑筋。同样,人们发现 $\beta^-$ 衰变, $\beta^+$ 衰变以及电子俘获反应过程似乎也明显违反了动量守恒原理。例如,通常 $\beta^-$ 衰变前的原子核是静止的,它的动量等于零。衰变时它要放出一个能量较高(可达几个 MeV)的电子,因而衰变后的原子核会获得一个反冲,其运动方向与电子相反。只要测定放出电子的速度和反冲原子核的速度就可以发现原子核的反冲

动量(等于它的质量乘以速度)太小,它抵消不了电子的动量,也就是说它们合成的动量并不为零。这完全违反了物理学界公认的动量守恒原理。

为了解释这两个矛盾而保持科学家们深信能量守恒和动量守恒原理的正确性,1930 年泡利大胆地预言:在 $\beta^+$ 衰变或 $\beta^-$ 衰变过程中,除了发射正电子或电子之外,还同时发射一种当时人们尚未知晓的极微小的粒子——中微子(常用希腊字母  $\nu$  表示)以及它的反粒子——反中微子(常用符号  $\bar{\nu}$  表示)。正是它们带走了上述多余的能量。在(2),(3)两式中右端的“...”就分别是反中微子和中微子。类似地,电子俘获反应中,(4)式右端的“...”就对应着发射中微子。

按照粒子物理学的标准模型,中微子(以及反中微子)是一种质量为零的不带电的粒子,它们以光速运动。它们是自旋为 1/2 的费米子。它们只参加弱相互作用,同物质的作用非常微弱。从太阳发射出来的中微子几乎无阻拦地穿过太阳和地球。如果我们幻想欲把太阳射出的中微子流完全挡住,即全部吸收掉,则需要放置非常厚的铅板,其厚度达到  $10^{12}$  千米以上,这等于地球到太阳的距离(1 亿 5 千万千米)的 1 万倍以上。正由于中微子同物质作用非常微弱,所以在长达 22 年内人们还难以从实验上确认泡利的预言。1941 年,我国物理学家王淦昌先生曾建议用原子核的 K 电子俘获测定原子核的反冲能量来证明中微子的存在。由于当时中国正处于抗日战争的困难时期,他只好将他的建议寄给美国《物理学评论》,文章于 1942 年发表。许多实验组采用王淦昌的建议,经历了 10 年,在 1952 年实验才获得初步成功,证明了中微子确实是一个客观存在的粒子。更有说服力的实验是:1956 年莱因斯(F. Reines)和柯万(C. Cowan)利用核反应堆作为中子源,产生反应 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 。采用二氯化镉和水作靶,中子慢化剂和吸收体,采用液体闪烁体作探测器,探测由这个反应产生的正电子和中子。由于上述实验的成功,莱因斯和后来发现  $\tau$  轻子的佩尔(Martin L. Perl)一起获得了 1995 年度诺贝尔物理学奖。

### 三、真正的“基本粒子”究竟是谁

20 世纪中叶,粒子物理学获得了很大的发展。除了前面提到的那些粒子之外,实验室发现了许多的粒子。它们种类繁多,性质五花八门。当时人们都把它们叫做基本粒子。除了质子、电子、中微子、光子及其反粒子以外,所有的粒子都是不稳定的。

除了中子之外,其他粒子的平均寿命都非常短。其中寿命最长的是 $\mu$ 子,为 $2.2 \times 10^{-6}$ 秒。其次为 $\pi$ 介子,平均寿命为 $2.56 \times 10^{-8}$ 秒。当时人们把它们分为4大类型:重子、轻子、介子和光子。1)重子是指包括质子、中子以及更重的一些自旋为 $1/2$ 的费米子和它们的反粒子。例如 $\Lambda$ 超子、 $\Sigma$ 超子(它们的平均寿命都只有 $10^{-10}$ 秒左右), $\Xi$ (它的寿命短于 $10^{-16}$ 秒)等等。2)轻子是一些质量较轻、自旋为 $1/2$ 的费米子。例如电子、正电子、中微子和反中微子, $\mu$ 轻子(包括 $\mu^+$ 和 $\mu^-$ ,它们互为反粒子),以及后来发现的 $\tau$ 轻子( $\tau^+$ 和 $\tau^-$ ,它们互为反粒子,它们的平均寿命只有 $0.3 \times 10^{-12}$ 秒)。3)介子是指自旋为零的一些玻色子,有 $\pi$ 介子和K介子(包括 $K^+$ , $K^-$ , $K_1^0$ , $K_2^0$ )。4)光子单独自属一类。它的质量为零,是自旋为1的玻色子。光子的反粒子就是它本身。

粒子之间碰撞引起的散射或反应以及不稳定粒子的衰变(衰变过程中总会放出中微子或反中微子)都是由基本粒子间的相互作用来决定的。这些相互作用按强度大小顺序分为强作用、电磁相互作用、弱相互作用和(万有)引力相互作用。通常,强相互作用主导的反应(例如核反应)要比电磁相互作用主导的原子间的化学反应过程猛烈几万倍,或反应速率要快几万倍。但是,强作用是短程力,它只能在非常近(约 $10^{-15}$ 米)的距离上才起作用。电磁力和万有引力都是长程力。例如,相距很远的两个天体之间也呈现牛顿万有引力。质子和电子之间的静电库仑吸引力与它们之间的牛顿万有引力都是同它们间的距离平方成反比地减小。但是,其间的静电库仑力要比牛顿引力强 $5 \times 10^{38}$ 倍。在包含大量粒子的大范围内,物质总的呈电中性,因而不呈现库仑电力,但在宇宙太空中,牛顿万有引力就成为主宰天体运动、恒星起源(它们由星云引力收缩而形成)、演化和超新星坍缩与爆发以及太阳系、星系和整个宇宙演化的惟一动力。

弱相互作用也是一种短程力,它表现在发射或吸收中微子的所有反应或 $\beta(\beta^-, \beta^+)$ 衰变中。它在短程内强度虽然远远超过牛顿万有引力,但是在通常参与弱作用粒子能量不太高(例如不超过几百MeV)情形下它远远弱于电磁相互作用。例如,通常,当电子一旦和正电子相撞,它们就会湮灭转化为一对光子。但实际上,它们也可能转化为一个中微子和一个反中微子(称为中微子对)。前者是由电磁相互作用支配的,后者是由弱作用支配的。后一反

应的强度要比前者弱 $10^{19}$ 倍,后者的速率要比前者慢 $10^{19}$ 倍。重子和介子参加强相互作用与弱作用,轻子参加电磁相互作用和弱作用。光子只参加电磁作用。

20世纪60年代初期人们对这些品种不断增加,名目繁多的“基本粒子”的“基本”表示怀疑。首先,不少实验都显示了质子和中子都有点状的内部结构。这启发了人们提出了“夸克模型”。按照这种模型,参加强相互作用的所有重子和介子都是由更为基本的夸克组成。按照这个模型,自然界存在6种夸克(称为6种“味”),分别用符号u, d, s, c, b和t表示。它们各自都有自己的反粒子。由于历史上的原因, s夸克常称为奇异夸克。这些夸克都是自旋为 $1/2$ 的费米子。其中u, d, s 3种夸克是轻夸克。u, d夸克的静止能量只有10MeV左右。s夸克的静止能量大约在(100—300)MeV之间。近年来物理实验室估计c, b, t这3种重夸克的质量分别在(1.0—1.6)GeV, (4.1—5.0)GeV和(160—180)GeV之间。

过去人们认为,在自然界中电子电荷的数值(e)是电量的最小单元,称为基本电荷。任何电离原子或荷电物体的电量都是电子电荷的整数倍。但是每个夸克的电荷却是电子电荷的分数倍。u, d, s, c, b, t夸克所带电荷分别为上述基本电荷的 $2/3$ ,  $-1/3$ ,  $-1/3$ ,  $2/3$ ,  $-1/3$ 和 $2/3$ 倍。

每一种夸克又含有红、绿、蓝3种不同“颜色”的夸克。前面提到的参加强作用的重子和介子都是由u, d, s 3种轻夸克组成:质子由两个不同颜色的u夸克和一个d夸克组成,中子由两个不同颜色的d夸克和一个u夸克组成,而介子则由一个夸克和一个反夸克组成。

与强作用的夸克模型获得成功的同时,人们开始探讨把电磁作用与弱作用联系起来,建立了一种称为“弱电统一”的理论。按照这个理论,只有当参与弱作用的粒子能量不太高时(例如远低于几十GeV),弱作用的强度才远弱于电磁作用。当粒子能量很高时(例如高于几十GeV),弱作用强度同电磁作用几乎相差不大。按照这种观点,电子和中微子主要差异只是它们的质量不同,带电性质不同。在某种意义上来说,电子和中微子具有一定的“平等”性质。电子、 $\mu$ 轻子和 $\tau$ 轻子各自都有一种中微子同它们对应,分别称为e中微子、 $\mu$ 中微子和 $\tau$ 中微子。每种中微子都有相应的反中微子。按现代粒子物理学“标准模型”,这3种中微子互相独立,“老死不相

现代物理知识

往来”。 $e$  中微子(和它的反中微子)只出现在电子或正电子参加的反应或 $\beta$ 衰变之中。同样, $\mu$  中微子和 $\tau$  中微子也都只是紧密地相联系。这些中微子都属于轻子类。轻子类总共也就包括电子、 $\mu$  轻子、 $\tau$  轻子、 $e$  中微子、 $\mu$  中微子和 $\tau$  中微子这 6 种粒子和它们的反粒子。在弱电统一模型中它们都是“平等”的,电子、 $\mu$  轻子、 $\tau$  轻子的差别主要就是质量上的不同。 $\mu$  轻子的质量约为电子的 206 倍, $\tau$  轻子的质量约为电子的 3477 倍。按照现代粒子物理学的看法,上述 6 种夸克和 6 种轻子以及它们的反粒子就是组成物质世界的 12 种最基本的粒子。它们都是费米子。以前我们讲过,光子是电磁相互作用的传递者,即两个荷电粒子之间的电磁相互作用是通过交换光子来实现的。按弱电统一理论,弱相互作用是通过交换被称为中间玻色子的粒子来实现的。有 3 种中间玻色子,其中两种带电(分别带正电和负电),一种呈电中性。它们的质量都非常大,约为质子质量的几十倍。至于夸克之间的强相互作用,则是通过交换叫做“胶子”的玻色子来进行的。

本文开头引述的报道的意思是说,在 $\tau$  子中微子被实验探测到的一个重要意义是表明粒子物理学标准模型基本上是正确的,它所预言的 12 种基本粒子已经全部被实验证实。

物理学的发展是无止境的。粒子物理学家又提出了大统一理论,力图把参加强作用、电磁作用和弱作用的各种粒子及其相互作用都统一在一个更为基本的理论中。此外,在一些非标准模型中,不仅中微子的质量不为零,而且 3 种中微子还可以互相转化,称为中微子振荡。

人们不禁要问:如此微小而且同物质作用如此微弱的中微子在客观宇宙中究竟有多大的作用?其实,30 多年前物理学家和天体物理学家就提出,如果中微子有质量,组成宇宙 85—90% 的所谓“暗物质”很可能就是中微子。因篇幅有限,我们在这里只介绍中微子的两个重要作用。

#### 四、中微子使得“上帝”变得畸形

50 年前,物理学家们从美学观念出发,普遍确信宇宙中的物质世界是谐美的,它在各个方面都是对称的。例如,在宇宙大尺度上星系的分布是各向同性的。微观世界中似乎也应有着左右对称性:粒子自旋既可以按右手螺旋方式旋转(称为右旋),也可以按左手螺旋方式旋转(称为左旋)。一个右旋的粒子如果从镜面中来看,它就变成了左旋,反之亦

然。人们称这种变化为空间反射变换(即空间位置矢量从 $\vec{r}$ 变为 $-\vec{r}$ )。物理学家用一种叫做“宇称”的物理量来描述在这种空间反射变换下粒子系统的左右对称性质:如果系统中的左旋粒子同右旋粒子数量相同,则在空间反射变换下它们的性质不变,我们说它具有正宇称。如果这群粒子全都是左旋的(或全是右旋的),则在空间反射变换下它们却全变为右旋(左旋)的,我们就说它具有负宇称。实验显示,所有的强相互作用以及电磁相互作用引起的反应过程中反应前后系统总的宇称性质不变。人们就说,在反应过程中宇称是守恒的。因此,在“世界是谐美对称的”观念指导下,50 年前人们从来没有怀疑过“宇称守恒”原理的正确性,认为这是天经地义的规律。但是,20 世纪 50 年代显示了某些有中微子参与的反应的实验现象显示了可能有一定程度的左右不对称性质。这使得当时两位年轻的留美中国物理学家李政道和杨振宁打破旧观念,在 1956 年大胆地提出在所有弱相互作用(它们都有中微子参与)过程中宇称是不守恒的,即真实的物质世界左右是不对称的。他们的预言立即被另一位留美的女物理学家吴健雄的实验所证实。这个结果使得人们对微观物理的认识在观念上有了一个突破性的转变,震惊了当时整个自然科学界以及在社会上也引起很大的影响。为此,很快在第二年,即 1957 年,李政道和杨振宁就被授予诺贝尔物理学奖。30 多年以后,著名实验物理学家吴健雄被推选为美国物理学会(第一位女)会长。

在探究弱作用过程中宇称不守恒的本质后人们认为,自然界本身就是不对称的,只存在左旋的中微子和右旋的反中微子。正是它们造成了在原子核衰变和其他弱作用过程的宇称不守恒现象。但是,已经发现的其他基本粒子,如质子、中子、电子、 $\mu$  子等费米子和光子、 $\pi$  介子等玻色子都有左旋和右旋,而且一般情形下这两种可能性机会均等。在它们之间的强作用(交换 $\pi$  介子)和电磁作用(交换光子)过程中宇称是守恒的。

#### 五、中微子是导致超新星爆发的元凶

中微子同物质相互作用虽然非常微弱,它们却是在大质量恒星热核演化最后时刻,其恒星生命结束的刹那间导致整个星体发生极其巨大的灾难性爆发——“超新星”事件的直接“罪魁祸首”。

天体物理学家告诉我们,太阳和恒星巨大的光和热来自其内部高温(超过 1000 万度)环境下的热

核燃烧。至少对于质量超过太阳的 12 倍的大质量恒星来说,它内部先后经历氢燃烧、氦燃烧、碳燃烧、氮燃烧、氧燃烧和硅燃烧。在硅燃烧结束后,恒星核心已经基本上被冶炼成为铁,中心温度达到四五十亿度,密度高达每 1 立方厘米超过 3000 吨。虽然如此高温,铁原子核不可能再通过热核燃烧冶炼变成更重的原子核。在如此高密度环境下,压强非常巨大,每一个铁原子的 26 个束缚电子全部被这强大的压强挤出而变为自由电子。它们处于一种称为很强的“费米简并”状态。其中相当比例数量的电子具有很高的能量,可以达到几个 MeV,超过了铁原子核电子俘获所需能量(称为能阈)。这些高能电子就能够迅速打进铁原子核内,与(4)式相类似的电子俘获过程就大量进行,这些电子俘获过程同时伴随产生较多的中微子。正是由于这种发射中微子的电子俘获过程的大量发生,引起恒星内这个致密的铁核心不稳定,在几毫秒的时间内整个致密铁核心向中心塌陷坠落。其后在不到 1 秒钟时间内,星体核心以外的物质(占恒星质量的大部分)全部猛烈地向外爆发,物质向外速度可达每秒 1 万千米以上。这就是被人们称为 II 型超新星的爆发。公元 1054 年宋仁宗年代中国古代天文学家详细记载了一颗超新星的爆发。在原来肉眼看不见星的天空位置上突然出现了一颗非常明亮的恒星,最亮时它比金星还要明亮。在长达 23 天的日期内,在白天都可以用肉眼观看它。在夜晚,它显得格外明亮。后来逐渐变暗,直到两年多以后,才完全消失在晴夜的星空中。中国古代天文学家关于这颗极明亮的超新星详细记载却是现代天体物理学研究的宝贵资料。19 世纪末人们用望远镜在天空的相应方向发现了一个形状类似于螃蟹的气体星云,称为蟹状星云。这正是当年那颗超新星爆发后遗留下的遗迹。1969 年人们还在它的中央区域发现了一颗脉冲星,它是一颗高速旋转的中子星。它的质量同太阳差不多,半径却只有 10 千米。它的主体基本上全由中子组成,具平均密度同原子核差不多,达到每 1 立方厘米 1 亿吨以上。它每秒钟要旋转 33 圈。这颗旋转的中子星是一个极其超强的磁体,其磁场达到  $10^{12}$  高斯。遗憾的是,天体物理学家虽然已经探明超新星核心坍缩的原因,但迄今仍不清楚其核心以外的部分为什么能够向外爆发。30 年前人们还以为当超新星核心物质坍缩达到原子核密度以上时,继续向内坠落的外围物质撞在非常坚硬的核心时会形成一个由内向外快速行

进的反弹激波(犹如冲向坚硬地面的高山瀑布的水向外四溅),它将吹爆坍缩核心以外的整个星体物质,造成超新星的爆发。这种观念称为超新星的瞬时爆发机制。但是人们很快就认识到,这种理论是失败的。原因在于,这个反弹激波后面的温度高达  $6 \times 10^{10}$  K。在如此高温下,铁原子核被能量较高的热  $\gamma$  光子而打碎,它会大量消耗反弹激波的能量。计算表明,对于较为可靠的星体模型来说,当这反弹激波尚未穿透星体整个铁核心时,它的能量就已全部耗尽。至于向外吹爆星幔和大气层而言,它再也无能为力了。此后,核心以外的星体物质仍然继续向中心坠落。

现在天体物理学家似乎可以接受观念是:中微子是导致超新星向外巨大爆发的主要肇事者。这是因为,超新星坍缩的核心被高度压缩而变为一个新生的中子星,原来体积庞大的恒星核心坍缩成为体积很小的中子星时,星体本身巨大的自引力势能转变为新生中子星的热能使得它的温度可高达  $10^{11}$  K。美国天体物理学家威尔逊猜测,如此高温的新生中子星会在 0.5 秒的很短时间内产生极其强大的中微子流,总能量达到  $10^{45}$  焦耳以上。其中,平均每个中微子的能量约为 10MeV。这强大的中微子流同核心外围的仍在向内坠落的致密恒星物质(密度高达  $10^7$  千克/厘米<sup>3</sup>以上)相互作用。虽然中微子同物质相互作用非常微弱,但由于超新星内这些坠落物质也非常致密,因而中微子流的一部分被物质所吸收。星体物质吸收中微子的同时,中微子动量造成的反冲压将会向外驱散整个星幔和外面很厚的浓密大气层。这就是超新星的爆发。只要上述中微子能量的 1% 能够被吸收而转化为物质向外运动的动能,就能够解释观测到的超新星物质以 1 万千米/秒的速度向外爆发。上述图象常被称为 II 型超新星的中微子延缓爆发机制。围绕威尔逊提出的上述猜测方案进行认真的计算与研究,已成为十多年来超新星爆发原因研究的主导方向。

威尔逊的猜测方案实际上存留两个关键问题尚未解决。a) 从超新星核心坍缩过程中诞生的高温中子星通过什么样的物理过程在如此短时间内产生如此强大的中微子流? 1995 年我们南京大学天文系研究小组曾从夸克相变出发提出了一个具体方案,后来印度德里大学等研究小组在此基础上进一步探讨研究。这似乎是有希望的方案。b) 即使从新生高温中子星在 0.5 秒内能够发射如此强大的中微子

现代物理知识

# 她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

## 欢迎订阅《现代物理知识》

当我们从 20 世纪物理学的辉煌背景下，迈步跨越崭新纪元的时候，科技形势的发展和知识创新体系的建立，对我国期刊出版事业尤其是科普工作提出了更高的要求。新世纪的《现代物理知识》，正以崭新的面貌同喜爱她的广大读者相见。新世纪的《现代物理知识》，继续设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流和科苑快讯这 7 个栏目，还增设科学随笔栏目，以供科技和教育工作者以及物理学爱好者抒发科学情怀、畅谈研习科学或欣赏科学的感受，也让大家介绍一些能展现科学风采的趣闻轶事，热烈欢迎各界作者为这些栏目尤其是新栏目撰稿，写出最新最美的文字。

改为大 16 开 64 页的《现代物理知识》，定价每期 7.00 元，全年 6 期 42.00 元。直接到《现代物理知识》编辑部订阅 2001 年杂志的读者，除了免去邮资之外，还赠送 1 本 2000 年增刊(或 1996 年增刊或 1994 年增刊，请在汇单上注明)。

在邮局漏订或需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部(100039, 北京 918 信箱现编部)补订。

1992 年合订本, 18 元; 1993 年合订本, 18 元; 1995 年合订本, 22 元; 1996 年合订本, 26 元; 1993 年增刊, 8 元; 1994 年增刊, 8 元; 1994 年附加增刊合订本, 36 元; 1996 年增刊, 15 元; 1997 年合订本, 30 元; 1998 年合订本, 32 元; 1999 年合订本已售完, 尚有 1、4、5、6 期单行本, 每本 3 元; 2000 年附加增刊合订本, 38 元; 2000 年增刊, 10 元, 特赠《高能物理》创刊号和 1976 年第 2 期; 《迷人的科学风采——费恩曼传》(江向东译, 2001 年 5 月获“第四届全国优秀科普作品奖”二等奖), 25 元; 《微观绝唱》(《诺贝尔奖百年鉴》丛书之一, 江向东、黄艳华著, 卞毓麟、匡志强责任编辑, 上海科技教育出版社 2001 年 6 月出版), 10 元。以上所列, 均含邮资或免邮资。

流, 这些中微子究竟能否吹爆超新星? 人们绞尽脑汁地考察了现在已知的所有各种可能出现的粒子同中微子相互作用。毕竟这种作用太微弱了, 人们至今仍然无法得出正是它们吹爆超新星的结论。也就是说, II 型超新星爆发原因仍然是当代科学界的一个大谜团。尽管如此, 天体物理学家仍然相信, 引起这类超新星爆发的元凶就是微不足道的中微子。这好比细小的白蚂蚁会使高楼大厦在某一瞬间倾倒一样。

天文学家还认为, 质量超过太阳三四十倍的更大的恒星生命最后时刻的(规模更加巨大)星体坍缩主要的致命原因还是中微子。其原因如下: 一个质量比太阳大三四十倍的大质量恒星, 一旦当它内部温度上升到高达  $5 \times 10^9 \text{K}$  以上时, 星体内部大量热光子相互碰撞转变为正负电子对, 它同前面正负电

子对湮灭成光子对的反应来回交迭, 平均每克物质内每 1 秒钟要来回发生  $10^{43}$  次以上。无论是光子还是正负电子, 它们都难以很快逃出星体内部。但是, 只要正负电子对湮灭转换成中微子对, 它们就立即携带着 1MeV 以上的能量逃离恒星。虽然我们讲过电子对湮灭成中微子对的反应速率要比转换成光子对慢  $10^{19}$  倍, 平均每克物质内每 1 秒钟这种反应也会发生  $10^{24}$  次以上。整个星体在 1 秒钟内会发生  $10^{58}$  次这类反应, 它产生的中微子在 1 秒内会带走  $10^{47}$  焦耳的能量。如此巨大的能量损失率表明, 中微子在 1 秒钟内几乎带走星体内全部热能。这巨大的恒星一瞬间就失去了支撑星体的热压强, 在它自身的强大引力作用下整个星体就立即坍缩变成一个质量较大的黑洞。也就是说, 更大质量恒星的死亡(变成黑洞)的直接罪犯也是中微子。