

中微子在其他学科研究中的应用

Michael F. Altmann 撰文 辛 标 选译

目前宇宙学研究认为,中微子生成于137亿年前宇宙诞生后持续扩张、冷却的过程中。理论认为,这些中微子形成了绝对温度为1.9K(-271.2℃)的宇宙背景辐射(有别于另一种宇宙大爆炸理论所预言的“微波背景辐射”,其温度为2.7K)。宇宙中其他能量的中微子源于星体活动和超新星爆发的过程。因此,随着宇宙的诞生,便有了中微子的存在。

然而,一直到20世纪30年代,中微子才为人所知。那时,科学家们被 β 衰变过程中发射的电子具有连续能量的现象所困扰。1930年,泡利提出, β 衰变似乎明显违背了能量守恒原理这件事,可以用假设在 β 衰变过程中发射电子的同时还释放了一种质量几乎为零的、只与物质有很弱相互作用的粒子来弥补。费米(Enrico Fermi)后来把这种粒子命名为“中微子(Neutrino,意大利语,微小的中子之意)”。1933年底,费米成功地解决了 β 衰变的基本理论问题,指出中微子以一种新的方式与物质发生作用,即弱相互作用。基于费米的理论,人们开始通过实验来寻找中微子。

按照费米的理论预言,中微子与物质发生相互作用的概率太小,要想直接测量中微子,就需要有非常强的中微子源及高度灵敏的大型探测器。当时的技术还无法满足这些条件。从1930年泡利提出中微子假说开始,到20世纪40年代末,物理学家试图通过实验测量 β 衰变的核反冲来探测中微子。我国已故的王淦昌院士在1942年曾指出,可以利用电子俘获的两体过程,间接测量中微子的存在。这个想法由戴维斯(R. Davis)在1952年实现。随着核能技术的发展,直接测量中微子的方法也逐渐可行。在1956年,莱因斯(Federick Reines)和柯万(Clyde Cowan)第一次通过实验测量到了中微子。莱因斯为此获得了1995年诺贝尔物理学奖。此后又连续发现了与 μ 子对应的中微子 ν_μ 和与 τ 子对应的中微子 ν_τ 。

中微子作为一种被实验证实存在的新粒子,只用了很短的时间便发展成为广泛应用于高能物理和天体物理的标准实验工具。原因在于,中微子不带电荷,

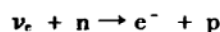
而且只与物质发生弱相互作用(在微观粒子物理世界,重力的影响可完全忽略不计),不参与强相互作用和电磁相互作用。在粒子散射实验中有着独到的优势。特别是在天体物理研究领域,中微子可以轻易穿透高密度大体积物质,这更是其他放射性所无法比拟的。现将中微子在某些领域中的应用介绍如下:

中微子在核子结构研究中的应用

中微子已经成功地应用于对核子内部结构的研究中。通过中微子与核子散射实验发现,反应截面与人射能量相关,这说明核子(中子、质子)并非人们先前所想像的那样是最基本的粒子,它们由更基本的粒子——夸克所组成。这已经为实验所证实:用高能 ν_e 撞击质子,在反应生成粒子中观察到了有带电的 μ 子和强子存在。尽管上述实验的物理过程很复杂,但是,反应截面却只简单地与人射中微子的能量成正比关系,如果将这一物理过程描述为中微子与夸克的弹性散射,则得到与期望值完全一致的结果。因此证明,质子具有亚结构。将中微子-质子散射实验同电子-质子散射实验相比较后,便可得知夸克所带的电荷量。这是因为,中微子和电子都可以用来作为核子结构的探针,由于中微子不带电,其与夸克散射结果与夸克所带电荷无关。而电子-夸克散射末态波函数则与夸克电荷成正比。实验发现,夸克所带电量的单位为电子电量的1/3。理论预言,在核子内的夸克数目为3,这也和实验结果符合得很好。中微子-核子散射还提供了核子内的平均反夸克的密度:大约为夸克密度的10%。

中微子在粒子物理标准模型建立中的应用

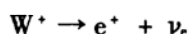
大多数中微子探测的原理都基于观察与中微子相对应的轻子。如:



式中,与 ν_e 相对应的轻子是 e^- 。由于这类反应存在轻子流和强子流之间的电荷传递,因而被称为电荷流反应(Charged Current reactions),即CC过程。理论上对这种过程描述为中微子和反应对象间交换一个带电的矢量玻色子 W^+ 。1983年,在欧洲核子研究中心(CERN)通过质子-反质子对撞,观察到了这种中

现代物理知识

间玻色子 W^+ 的存在。发现了 W^+ 的衰变过程：



这种基本粒子间通过交换中间玻色子而进行反应的思想，在量子电动力学中已经获得了成功的应用，其中交换的粒子是光子。有质量的 W^+ 与基本粒子的固有耦合强度和零质量的光子有着可比性；问题随之而来，电磁相互作用和弱相互作用是否在根本上属于同一种作用？这两种相互作用可以用一种统一的方式描述吗？如果确实如此，则还应该另外有一种中间玻色子 Z^0 存在， Z^0 应和光子一样不带电荷，并且具有和 W^+ 相当的质量。存在 Z^0 粒子的设想是温伯格于 1967 年建议建立统一的电弱相互作用理论时提出的。1983 年，中微子与物质通过交换 Z^0 粒子的反应方式在 CERN 被观察到，这种反应方式就是中性流反应 (Neutral Currents reactions, NC)。观察到中性流反应的物理过程是： $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + X$ ；其中， N 和 X 分别是强子的初态和末态。同样在 1983 年，利用 CERN 的对撞机产生了 Z^0 粒子，并观察到了随后发生的衰变过程： $Z^0 \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ 。测得 Z^0 粒子的质量为 $91.2 \text{ GeV}/c^2$ ，与 W^+ 粒子的质量很接近 (W^+ 粒子的质量为 $80.4 \text{ GeV}/c^2$)。这一发现成为证实电弱统一理论的一个里程碑式的标志，并指引现代粒子物理进一步向前发展。

中微子在研究太阳性质中的应用

中微子不仅在高能物理研究领域起着至关重要的作用，而且在现代天体物理领域也成为越来越重要的研究工具。相对地球的芸芸众生，最重要的天体就是太阳。但对天体物理学家而言，太阳也只不过是众多恒星中的一个：太阳是一个普通的主序星，通过氢核聚变而辐射能量，年龄约 4.55×10^9 年。这里，有一系列的疑问：我们怎么能确定太阳所辐射的能量是源于氢核的聚变而非其他？人们如何知道发生在太阳内部的事情？天体物理学家怎样通过实验验证有关恒星结构的理论模型、内部动力学及演化规律？

通过测量太阳发光度，可以确切得知太阳向太空所释放的平均能量为 $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ ，相当于等量的电磁辐射为 $2.4 \times 10^{43} \text{ eV/s}$ 。如此巨大的能量只能用质子聚变为 He 的核反应来解释： $4p \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ 。这一物理过程发生在太阳的核心，而且不是一步完成的，整个核聚变包括一系列的轻核反应。相对电磁辐射而言，太阳是高度不透明的星体，在太阳核心生成的光子，传播到太阳表面所需要的时间约为 10^8 年，

而且在传播过程中，光子不断地经历被吸收、再发射、散射等过程，具有黑体辐射的特征。到达太阳表面时，有关太阳核心的信息已全部丢失。但在太阳核心由轻核聚变而生成的中微子则与之不同。由于中微子只与物质发生弱相互作用，太阳星体对中微子而言几乎是个透明体 (理论计算表明，假设一面有质量的墙，它能够把具有典型太阳中微子或反应堆中微子能量的中微子吸收掉 50%，则这道墙的厚度必须达到几个光年的量级)。因此，在太阳中心产生的中微子，经过 8.3 分钟后到达地球，仍然携带有它们当初生成时的信息：能量和时间。中微子也因此成为探索太阳内部物理过程的唯一工具。实际上，这正是人们最早进行太阳中微子实验的目的。但随着研究的进一步深入，太阳中微子实验研究的重点转向对中微子本质属性的探索，亦即 20 世纪在物理学领域的三大谜团之一——中微子振荡 (另两个谜团为极高能宇宙射线之谜及暗物质之谜)。而原本通过中微子对太阳内部物理性质的研究逐渐退居次席。

早在 1967 年，戴维斯及其合作者便开始通过实验测量太阳中微子。但只测到了少数几个能量很高的中微子，这些具有较高能量的中微子被认为不可能产生自 pp 聚变的主要分支过程。pp 链中中微子约占太阳中微子总通量的 90%。pp 聚变的物理过程可表示为： $2p \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ 。到 1992 年，太阳内部 pp 聚变生成的中微子首次在实验上被清楚地测得。测量所使用的探测器用镓作为靶核。这一突破性发现有力地证明了太阳的能量确实来源于其内部所发生的 pp 聚变。自此，太阳中微子能谱学与太阳地震学一道成为研究恒星的标准工具，应用于对恒星模型的理论计算——星体组成成分和结构、内部动力学及主序星的演化。太阳地震学技术用于探查太阳等离子体层的震动模式，提供自太阳表面向内距离约为 5% 半径处的太阳密度分布的信息，可作为太阳中微子测量的补充。太阳中微子物理研究的下一步目标是测得完整的、高精度的太阳中微子能谱，以更细致地了解有关星体的物理演化规律。尤为重要的是，去揭示中微子所固有的一些迄今为止仍然未知的属性。

在研究超新星爆发中的应用

一个质量为太阳质量 8 倍的星体，当其内部热核聚变趋于停止的时候，将会塌缩。塌缩过程在不到 1 秒的时间内完成，约 $3 \times 10^{46} \text{ J}$ 的重力束缚能 E_b 顷刻间转化为中微子辐射出来，这就是超新星 (Supernova)

爆发。人类唯一一次观察到超新星爆发中微子是在1987年2月23日,大麦哲伦星团的一颗蓝巨星(blue supergiant,质量约为太阳质量的15~18倍)爆发,此即著名的超新星SN 1987A。在爆发前一刻,恒星中心主要由铁族元素所组成。由于这些中重核的比结合能较高,不能进一步发生聚变反应,恒星的能量来源——核聚变过程最终停止下来。在钱德拉塞卡极限条件下,质量为1.5倍太阳质量的电子以相对论速度运动,这些电子被质子所俘获: $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$,经由这样的过程,原来的恒星演化成为中子星。这一电子俘获过程由降低星体内部热压力的铁元素的光解作用(photodissociation)所维持。中微子 ν_e 便在恒星的中子化过程中发射出来。当星体中心的密度高到一定程度时,即便是中微子也被束缚在核心内部区域而无法自由运动,这时,星体就会以绝热过程产生塌缩,温度约在几个MeV的量级,所有不同味(flavor)的中微子都会在星体的塌缩过程中产生。由于星体外部以超音速进行自由塌缩,从而在星体内部产生冲击波,冲击波使星体内部核素产生散裂(spallation)反应,重核结构被破坏,被束缚的中微子因而得以从内部区域逃脱。这些逃脱出来的中微子便携带有超新星内部(较典型的尺度约为10~20km)的信息。

美国的IMB和日本的神冈(Kamiokande)利用水作为探测器对中微子进行探测,原理是测量中微子所引起的次级带电粒子在水中发出的切连科夫光。建在高加索山脉的Baksan闪烁体望远镜(BST)也是测量这种次级带电粒子在探测器中引起的发光。在测得SN 1987A超新星中微子的实验中,大部分都是通过观察反 β 衰变: $p + \nu_e \rightarrow n + e^+$ 进行测量。超新星中微子的靶核——质子,由水或探测器材料提供。1987年2月23日那天,在同一时间,神冈、IMB和BST分别记录到了11个、8个和5个中微子事件,这些事件持续约10秒钟,明显地有别于本底。测得 ν_e 的平均能量为9MeV,假设超新星爆发时能量在3种不同味中微子及其反粒子间均匀分布,可推出SN 1987A中微子的总能量为 0.84×10^{46} J,很好地与中子星 5.0×10^{46} J的总束缚能相一致。由实验数据还可进一步推出SN 1987A的其他信息。(例如发光度衰减时间、光源的尺度等)所有这些信息都证实了天体物理学关于超新星塌缩的理论。

通过观测SN 1987A超新星爆发的中微子,星

体核心塌缩而发射中微子的物理图像被实验所证实。但是,由于数据太少,不足以在细节上区分各种不同的有关超新星机制的理论模型。人们希望能够测得更多的超新星中微子以提高统计精度。目前已有数家大型地下实验可以测量下次超新星爆发时所发出的中微子。日本超神冈中微子探测器于1996年4月投入使用(在2001年11月,由于数千个光电倍增管爆裂而停止运行,于2002年底完成修复工作,目前已开始SK-II数据获取),探测器的有效体积为32000吨,是原神冈探测器的15倍。它可以观察距离远达200kpc的超新星爆发所发射的中微子,这个距离包括了整个银河系及大、小麦哲伦云团。尽管人类至今无法预知超新星爆发的时间,但10年在我们所处的星系发生一次超新星爆发,也是不可能的。假设距离地球10kpc处(相当于太阳到银河系中心的距离)有一颗超新星爆发,超神冈探测器所能测得的超新星中微子期望值为4000例。这就可以提供足够高统计精度的超新星中微子能量及时间谱,物理学家也因此可以对发生在恒星核心的塌缩过程进行更细致的研究。

超神冈、IMB和Baksan的测量对象都是电子中微子 ν_e ,而OMNIS是一个原理上只对超新星中微子中的 ν_μ 、 ν_τ 灵敏的探测器,探测机制基于中性流核激发而导致的中子发射过程,在这一过程中所发出的中子可以被Gd或含Li闪烁体所吸收。天然岩石、铁、铅都可以用来作为与中微子进行反应的靶核。铁和铅可提供较高的中子生成产额,铅还可以测量中微子与靶核相互作用的电荷流激发模式。岩石、铁、铅这种中微子计数率的差别可以用来研究不同味中微子 ν_e 、 ν_μ 及 ν_τ 之间的混合。假设靶核总质量为16000吨,闪烁探测器的有效体积为200m³,对于发生在银河系中心位置的超新星爆发,OMNIS所能记录的超新星中微子事件期望值为2000个 ν_μ 、300个 ν_e 。由于超新星中微子的质量会改变其到达地球的时间分布,因此可以通过对至少某一味中微子直接进行飞行时间测量而获得中微子的质量信息。这样,OMNIS就不单是对只能测量 ν_e 的超神冈起一个补充作用的探测器,还可以对范围在10~100eV的中微子质量进行直接观测,这在宇宙学中有着重大的意义:整个宇宙的质量就几乎由这些中微子的质量所主宰。

可用于下次超新星爆发中微子测量的实验如表1所列。

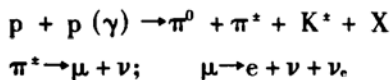
表 1 已建成或计划中的用于下次超新星中微子测量的实验一览表

实验名称	地点	探测器类别	阈值 (MeV)	预期事件	起始时间
Homestake	美国	放射化学	0.8	6	1970
SAGE	俄罗斯	放射化学	0.233	1	1990
Gallex	意大利	放射化学	0.233	1	1990 ~ 1997
GNO	意大利	放射化学	0.233	1	1998 ~
SuperKamiokande	日本	水切连科夫光	5	4000	1996 ~
SNO	加拿大	水切连科夫光	5	800	1999
Borexino	意大利	液闪	0.25	20	2000
LVD	意大利	液闪	5 ~ 7	300 ~ 700	1991
Macro	意大利	液闪	7	150	1989
ICARUS	意大利	液氩	5	10	1999(?)
Amanda	南极	冰切连科夫光	0.5	20000	1995
Baksan	俄罗斯	液闪	8	50	1980
LSND	美国	液闪	5	70	待定
Iodine	美国	放射化学	0.664	25	待定

在 高能天文学研究中的应用

除恒星内部的热核聚变及超新星爆发之外,还有一些天体也可以发射中微子,与前两者所发出的中微子不同的是,这种中微子具有非常高的能量: $E_\nu > 50\text{GeV}$ 。电中性的中微子在宇宙间穿行时,不受星系内及星系间磁场的偏转,因此容易判断其来源所在的方向。尽管在地球上还未能通过实验测得这种高能中微子,但在大气簇射实验中已经测得了它的伴生光子,普遍认为,确实存在这种高能中微子。

高能中微子产生于带电的 π 介子和 μ 子的衰变过程,而 π 介子和 μ 子又分别产生于高能质子或光子与核子的碰撞过程,物理过程可表示为:



式中的 X 表示其他粒子。pp 反应可生成很高能量的中微子,叫 VHE(very high energy) 中微子, $E_\nu > 50\text{GeV}$; 而 $p\gamma$ 反应可生成超高能中微子,叫 UHE(ultra high energy) 中微子, $E_\nu > 10^6\text{GeV}$; 尽管实验和理论物理学家都付出了巨大的努力,但如此之高能宇宙辐射的来源仍然是一个未解之谜(前文所提三大谜团之二)。人们希望通过高能中微子天文学的研究解开这一谜团,利用高能中微子作为探针,对质子的宇宙加速方式进行检验。可能的天体物理加速器有以下 3 种:

早期超新星残余体 在扩张的超新星星云内的质子被中心黑洞或脉冲星的强磁场的快速旋转所加速,或者,因两个冲击波相撞而加速。

双星系统 在双星系统(例如,天鹅座 X-3 和武仙座 X-1)中,诸如红巨星的一个大伴随星的物质能

够移向中子星或黑洞这样的致密天体,这些物质形成一个旋转吸积体(因重力吸引星际间物质而不断增大的天体),相当于在致密天体强磁场内的一个发电机,产生很强的电场,使带电粒子加速。伴随星物质便成为产生中微子的靶物质。

活动星系核子 (AGNs, active galactic nuclei) 在宇宙中,强度最高、最遥远的辐射源就是活动星系核子。AGNs 的发光强度相当于 10^{14} 个太阳,或 100 个大型星系的发光度。但它的尺度却和普通星系一样。一般认为,AGNs 是一个中心存在超重黑洞的年轻活动星系。整个星系中的物质经由一个厚的吸积盘流向黑洞,在这一过程中,流向黑洞的物质被加速而形成高温致密等离子体。一些等离子体掉进黑洞,而另外一些则被强磁场反射向两个相反的方向。无论等离子体掉进黑洞还是被反射,都会产生极高能的质子。这些高能质子与吸积体内物质或其他宇宙物质相互作用,进而产生高能中微子。

除上述加速过程之外,还有一些迄今未知的粒子在湮灭或衰变时也会发出高能中微子。在众多的候选者中,最为可能的一种就是通常所说的 WIMPs (weakly interacting massive particles), WIMPs 被认为有可能是宇宙暗物质的组成之一。WIMPs 受重力作用而聚集在星体中心,在散射过程中损失能量,最终湮灭,发出 VHE 中微子。

要测量 VHE 中微子,可以通过测量电荷流反应: $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$ 来实现。其中 N 是探测器靶物质中的核子,观测到的对象是带电的 μ 子。为避免大量来自大气层 μ 子所造成的本底,这样的实验大都在很深的地下进行。对 UHE 中微子的测量主要通过 $\nu_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow$ 强子的物理过程,这是因为,当实验室系的 UHE 中微子能量为 $E_\nu = 5.3 \times 10^6\text{GeV}$ 时,在质心系,这一能量与 W 玻色子的质量相当,反应会由于共振而加强。对于 VHE 中微子测量而言,由于高通量的大气中微子将形成很强的本底,因此,在这一能量范围内只能测得来自点源的 VHE 中微子。对 UHE 中微子的测量则不受此限制,显然,这是因为在如此高的能量区域,任何大气中微子所造成的影响都可以忽略不计。因此,人们希望可以测得弥散通量的 UHE 中微子。确实有可能存在这种弥散形式的 UHE 中微子,比如来自“大爆炸”的宇宙微波背景辐射的光子广泛地存在于宇宙之中,当源于 AGNs 的高能质子与宇宙微波背景辐射的光子发生碰撞时,会产生 UHE 中微子,这

样,就会形成弥散通量的 UHE 中微子。

人们通常将大型切连科夫探测器称为中微子望远镜,在探测 VHE 和 UHE 中微子时,为获得足够的统计精度,这些中微子望远镜的有效面积需要达到 1km^2 的量级。为降低本底,中微子望远镜都建造在海洋或者南极冰层的下面,纯净的南极冰层还可以作为待测中微子的靶物质。例如,建于地中海水下的 Antares 和位于南极的 Amanda。这两种探测器都通过测量在探测器下方中微子-核子反应所生成的向上运动的 μ 子来观测中微子。这两家实验互为补充——Antares 探寻来自南半球方向的宇宙中微子,而 Amanda 则测量相反方向的点源中微子。

利用中微子望远镜测量 UHE 中微子时,还有两种方法可供选择,探测连续的无线电式切连科夫辐射 (radio-Cherenkov radiation) 及纵波测量。这两种辐射都源于中微子引起的电磁簇射——中微子与物质反应生成 π^0 , π^0 衰变为两个光子,随后通过光子产生电子-正电子对及其湮灭的过程发生电磁簇射。在微波频率范围 ($100\text{MHz} \sim 1\text{GHz}$) 内,会发生连续切连科夫辐射,这会对待测信号起放大作用。一般来说,在南极冰层引起簇射的 UHE 中微子,足以产生超出本底噪声水平的无线电信号。由于冰层对无线电信号的阻尼很小,因此可以建造很大体积的探测器。簇射粒子主要以电离方式损失其能量,电离损失的能量转变为周围介质的热能,引起介质密度变化,产生沿介质传播的纵波。通过压力传感器等对压力变化灵敏的设备,就可以实现对这些纵波的测量。

在宇宙大爆炸研究中的应用

按照当前的宇宙学理论,我们的宇宙诞生于大约 1.37×10^{10} 年前的一次大爆炸过程,之后不断扩张演化至今。这一理论模型被以下 3 项实验现象所验证:

遥远星体所发出的特征光谱线相对其原始波长产生红移,这表明我们的宇宙正处在扩张过程中。地球上轻核素 ^2H 、 ^3He 、 ^4He 和 ^7Li 的富集度与大爆炸理论原始核合成所计算的结果一致;按照原始核合成理论,这些轻核的合成发生在宇宙“大爆炸”之后的 3 分钟内。1957 年,彭齐亚斯和威尔逊发现了宇宙微波背景辐射,这是一种电磁辐射,理论指出它是宇宙“大爆炸”的残余辐射,各向同性地分布在整个宇宙,表现为完美的普朗克黑体辐射谱: $T_r = 2.7\text{K}$ 。但是,“大爆炸”理论还有关于中微子的预言:应该存在另一种背景辐射,有着与背景光子相类似的分光学特征:遗余中微子

(relic neutrinos)。设 T_ν 为这种中微子的普朗克能谱的特征温度, T_ν 与 T_r 的关系可以表示为: $T_\nu = (4/11)^{1/3}T_r$, 即, $T_\nu = 1.9\text{K}$, 相对应的中微子能量为 $E_\nu = 0.2\text{MeV}$ 。可见,遗余中微子的能量比宇宙微波背景光子的能量还要低。对于每一味遗余中微子,在宇宙中平均密度的期望值为 100个 cm^{-3} , 亦即,对于已知的三味中微子,每立方厘米内的个数为 300 个。

假如能够测得这些遗余中微子,无疑将对描述宇宙诞生后第一秒内物理过程的“大爆炸”理论给予强有力的支持。但是,迄今为止,人类还未能找到能够测量这么低能量中微子的实验方法。

在地球物理学中的应用

由于中微子只与物质发生弱相互作用,这一特性也被应用到地球物理领域。地球中的放射性核素在 β 衰变时发射出电子反中微子 $\bar{\nu}_e$, 通过研究这些电子反中微子的连续能谱,可以得知一些地理特性。众所周知,当今的地球并非处在热平衡状态,它辐射的能量多于从太阳吸收的能量。其中,以天然放射性形式所释放的能量功率约为 16TW , 这些天然放射性主要是存在于地壳和地幔中的铀系、钍系以及其他放射性核素的 β 衰变。按照有关的地球物理模型,约占总量 50% 的铀、钍元素散布在地幔中(地幔的厚度约为 2900km),其他 50% 则集中在陆地下面约 35km 厚的地壳之中。位于海洋下面的地壳要薄得多,其中铀、钍的富集度也较低。测量铀、钍同位素 β 衰变时所发出的电子反中微子能谱,可以提供地球内部组成及其热量变化的信息。意大利的 Borexino 和日本的神冈原本是为测量太阳和反应堆中微子而建造的探测器,近来转向应用于地球物理的中微子测量。二者研究重点有所不同: Borexino 主要测量来自陆地下较厚地壳层中的中微子,而神冈所观察的对象是海洋地壳中微子。

对中微子的研究方兴未艾,两年前,中日美科学家通过对核电站反应堆产生的中微子的实验发现中微子振荡现象,即部分反电子中微子变为目前技术还测量不到的其他中微子,从而可以解释太阳中微子丢失之谜。最近来自 10 个国家的科学家在对日本 KEK 加速器产生的中微子的研究结果证实中微子具有质量的可信度为 99.99%。对中微子及其应用的研究定将不断带给我们激动人心的发现。

(本文部分选自 Michael F. Altmann 发表在 *Naturwissenschaften* 86, 571 - 583(1999)上的文章)

(中国原子能科学研究院 46 分箱 102413)