

超新星中微子探测

黄明阳

1987年2月23日，天体物理学家目睹了400年来最亮的一次超新星爆发。该超新星位于大麦哲伦云内，是自1604年探测到开普勒超新星以来观测到的最明亮的超新星爆发，肉眼可见，由于这是1987年发现的第一颗超新星，因而被命名为“SN1987A”。图1给出了超新星SN1987A的遗迹。在SN1987A爆发的光线到达地球的3小时前，日本的神冈（Kamiokande II）探测器，美国的IMB探测器，俄罗斯的Baksan探测器分别探测到12个、8个、5个中微子。这是人类第一次在地球上探测到超新星中微子的信息，开创了中微子天体物理学，这也是日本神冈实验室领导人小柴昌俊获得2002年诺贝尔物理学奖的重要原因之一。



图1 超新星SN1987A的遗迹

一、中微子探测简介

标准粒子物理模型表明，构成物质世界的最基本粒子是费米子和玻色子，其中费米子包括有6种夸克和6种轻子，而6种轻子中就包含有3种中微子。1930年，奥地利物理学家泡利为解释 β 衰变中能量似乎不守恒，提出了中微子的概念，开创了中微子物理学。1956年，美国物理学家莱因斯和科万在反应堆中第一次探测到电子中微子，莱因斯因此而获得1995年的诺贝尔物理学奖。1962年，美国物理学家莱德曼和施瓦茨等人在布鲁克海文实验室（BNL）利用加速器第一次探测到 μ 中微子，莱德曼和施瓦茨也因此获得1988年的诺贝尔物

理学奖。1968年，美国布鲁克海文实验室物理学家戴维斯在一个废旧金矿中观测到来自太阳的中微子，他发现探测到的中微子个数只有理论预期的三分之一，这个现象被称为“太阳中微子失踪之谜”。戴维斯也由于发现太阳中微子而获得2002年的

诺贝尔物理学奖。1989年，欧洲核子研究中心（CERN）证实存在且只存在3种中微子。1998年，日本的超级神冈（Super-Kamiokande）探测器利用大气中微子发现中微子振荡现象，证实中微子具有微小质量。2000年，美国费米实验室（Fermilab）的DOUNT实验第一次探测到 τ 中微子。2001年，加拿大的SNO实验同时探测太阳中微子在探测器里面发生的三个过程，发现电子中微子确实丢失，但是中微子总数并没有改变，因而证实利用中微子振荡可以合理地解释太阳中微子失踪之谜。2002年，日本的KamLAND实验用反应堆中微子证实了太阳中微子振荡。2003年日本的K2K实验和2006年美国的MINOS实验分别利用加速器中微子证实了大气中微子振荡。2012年，中国的大亚湾中微子实验发现第3种中微子振荡模式。

现代中微子物理学研究表明：中微子可分为3种不同味道；它具有微小质量，几乎不受引力影响；不带电荷，不受电磁相互作用的影响；只参与弱相互作用；寿命几乎是无穷长；遥远高能天体产生的中微子在到达地球的漫长传播过程中，其路径不会因遍布宇宙的磁场而发生变化。按照味道

的不同,中微子可以分为电子中微子、 μ 中微子、 τ 中微子;按照产生中微子来源的不同,中微子可以分为大气中微子、加速器中微子、太阳中微子、反应堆中微子、超新星中微子、地球中微子、宇宙中微子等。中微子振荡实验证实中微子具有微小质量,不同味道中微子之间能够相互转换,其振荡规律可以由6个独立参数来描述,即中微子质量本征态之间的两个质量平方差, $\Delta m_{21}^2=m_2^2-m_1^2$, $\Delta m_{32}^2=m_3^2-m_2^2$,三个混合角 θ_{12} 、 θ_{13} 、 θ_{23} ,以及一个CP相位角 δ_{CP} ,其中 Δm_{21}^2 和 θ_{12} 可以由太阳中微子实验精确测量得到, Δm_{32}^2 和 θ_{23} 可以由大气中微子和加速器中微子实验精确测量得到, θ_{13} 可以由反应堆中微子和加速器中微子实验精确测量得到,而 δ_{CP} 可以由加速器中微子实验精确测量得到。对于6个不同的中微子混合参量,目前已精确测量得到的有四个半: $\sin^2 2\theta_{12}$, $\sin^2 2\theta_{23}$, $\sin^2 2\theta_{13}$, Δm_{21}^2 ,和 $|\Delta m_{32}^2|$;未知的包括: δ_{CP} 和 Δm_{32}^2 的符号。目前国际上正在运行的主要中微子实验有:太阳中微子实验有SNO、XMASS、GALLEX/SAGE、Borexino;大气中微子实验有超级神冈、Hyper-K/UNO、INO、TITAND;加速器中微子实验有K2K、MINOS、OPERA、MiniBooNE、T2K、Nova;反应堆中微子实验有大亚湾、KamLAND、Reno、Double CHOOZ等,其中大亚湾实验是我国目前唯一的中微子实验,用于精确测量混合角 θ_{13} ,并且已经取得

开创性成果。

中微子并非如粒子物理标准模型所描述的质量为零,而是具有微小质量,这是人们找到的标准粒子物理模型之外新物理的重要证据,为粒子物理研究注入了新的活力,进一步激发人们寻找标准模型之外的新物理,建立更加完善的粒子物理统一模型。同时,中微子的特殊属性使它与光子一起成为绝佳的天文学信息传播者,是正在崛起的中微子天体物理学发展的强劲原动力。目前中微子物理已成为高能物理、天体物理与宇宙学研究的共同热点。

二、超新星爆发和中微子效应

超新星爆发是指某些恒星在演化接近末期,亮度以十分惊人的速度增加着,直到突然地自我剧烈爆炸。这种爆炸的亮度极大,所爆发的辐射几乎能够照亮其所在的整个星系,并可持续几周至几个月才会逐渐衰减变为不可见。超新星爆发是宇宙中重要的物理事件,人类

历史中有很多关于它们的记录。早在公元185年,中国天文学家就已经观测到SN185,这是人类历史上最早的超新星记录。1604年10月,开普勒在天空中发现和记录一颗肉眼可见的超新星,这是地球上首次记录超新星爆发产生的高能宇宙云,这颗超新星后来被命名为开普勒超新星。19世纪,由于天文望远镜的发展,人们发现超新星的区域从银河系扩大到其他星系,如人们于1885年观测到仙女座星系中的SN1885A,这为宇宙距离的测量提供了新方法。1932年,朗道给出钱德拉塞卡极限的定性推导,提供有关超新星爆发的最初理论依据。20世纪30年代,天文学家巴德和兹维基给出超新星现代通用的科学学名。1941年,闵可夫斯基(Rudolph Minkowski)根据超新星光谱中是否存在氢吸收线,将超新星分成SN I和SN II两类。在这两种类型中,每种都可以依据存在于谱线中的其他元素或光度曲线的形状再进行细分。图2给出了超新星一般的分类法,其中SN II b

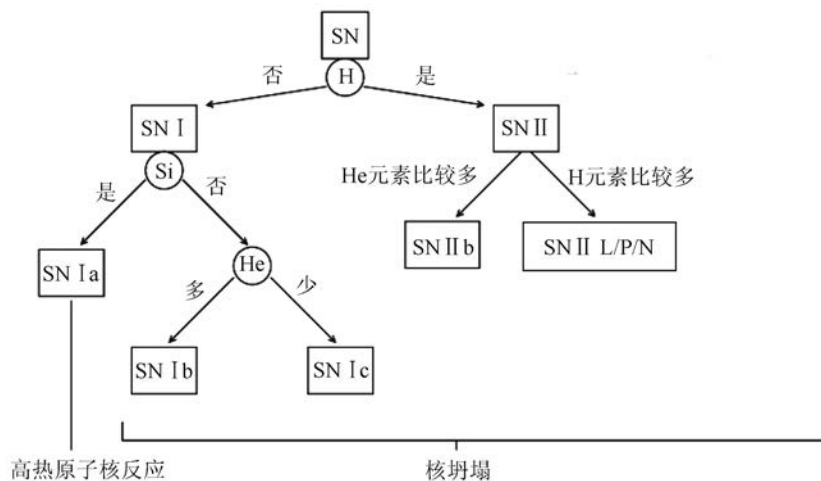


图2 超新星分类法

光谱最初有一条很弱的氢吸收线，但其频谱变化类似于 SN I b, SN II P/L/N 可根据光谱中是否存在窄线和光度曲线的形状再进行细分。最近几十年，物理学家发展了很多不同类型的超新星模型，同时关于超新星在恒星演化过程中的作用与影响的研究也在逐渐完善。

从中微子物理学角度来看，SN II, SN I b, SN I c 要比 SN I a 有趣得多，因为这些类型超新星是大于 8 个太阳质量的恒星在演化接近末期产生的，其核坍塌直至自我剧烈爆炸过程中会产生大量的各种味道的中微子和反中微子，最终会形成中子星或者黑洞。这些类型超新星爆发过程中产生的能量几乎就是内核的总引力能，其中产生的中微子带走大概其总能量的 99%，而超新星爆发消耗的能量大约只有 1%。如此多的中微子主要产生于两次爆炸中，第一次爆炸持续时间仅仅几毫秒，通过原子核俘获电子和反 β 衰变产生大量电子中微子；第二次爆炸持续时间较长，大约 10s，通过正负电子对湮灭，电子-核子韧致辐射，核子-核子韧致辐射，等离子体衰变，光子湮灭等 5 种类型的粒子核反应产生了大量各种味道的中微子。目前，超新星爆发机制和演化情况是天体物理学的研究热点，主要通过天体物理学观测和蒙特卡罗模拟两种手段相结合进行研究。对于超新星中微子流的模拟，国际上主要有两个小组正在进行研究：美国利弗莫尔 (Livermore) 的研究小组和德国加尔兴 (Garching) 的研究小组，

它们分别给出不同的超新星中微子流参数化形式，其正确性有待具体观测数据进一步的验证。

当中微子在超新星内核产生以后，需要经历与超新星物质的各种相互作用，才能传播到超新星表面。在这一过程中，中微子主要经历 3 种效应，导致不同味道的中微子相互转换（总的中微子数保持不变）。首先，中微子产生以后，中微子与中微子之间会有弱相互作用，虽然单对中微子-中微子相互作用很小，但是由于大量中微子的存在，它们之间的集体相互作用产生的效应就很大，这种效应被称为中微子集体效应，蒙特卡罗数值模拟结果已证实中微子的集体效应对不同味道的超新星中微子之间的相互转化可以产生不小的影响。其次，中微子在超新星内传播，与超新星物质之间会有相互作用，这也会对不同味道中微子之间相互转换产生影响。研究表明，当中微子经历的超新星物质处于某一密度时，中微子之间的转换会突然达到一个极大值，这种现象类似于物理学中常见的共振现象，这个效应被称为 MSW 效应，是由一位美国物理学

家沃芬斯坦和两位苏联物理学家米赫耶夫和斯米尔诺夫共同发现的。最后，由于超新星爆发时核力阻止核坍塌产生的冲击波在超新星内部的传播，会产生震荡效应，从而导致超新星的物质密度分布随时间变化而变化，而且其密度会出现不连续现象，这种效应也会对中微子的传播和不同味道之间的中微子相互转换造成影响，被称为超新星震荡效应。图 3 描述了超新星的震荡过程，其中 R_ν 为中微子球的半径（中微子逃离这个半径之后将变成自由的）， R_{ns} 为光中子星的半径， R_g 为收缩半径，而 R_s 为超新星震荡半径。总之，中微子在超新星内部传播时，上述的 3 种效应均需要考虑，它们都会对不同味道中微子之间的相互转换产生影响。

中微子传播到超新星表面之后，需要经历漫长宇宙空间的传播才能到达地球表面。由于宇宙空间近似于真空，而且中微子不带电荷，其路径不会因遍布宇宙的磁场而发生变化，因而这段漫长宇宙空间的传播几乎不会改变不同味道中微子流的分布。但是，在中微子从地球表面到达探测器这段传播过程中，

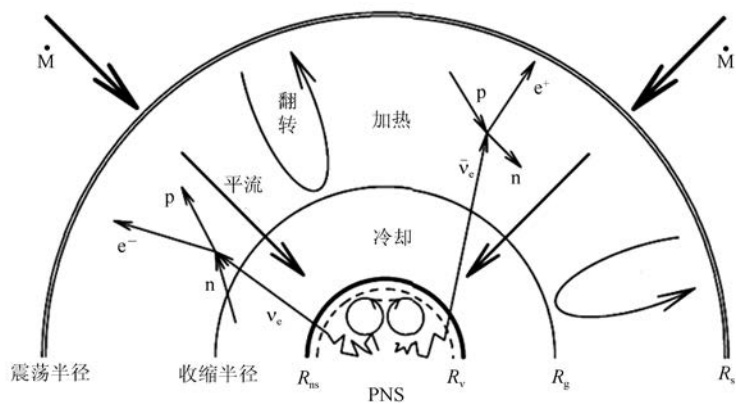


图 3 超新星震荡过程

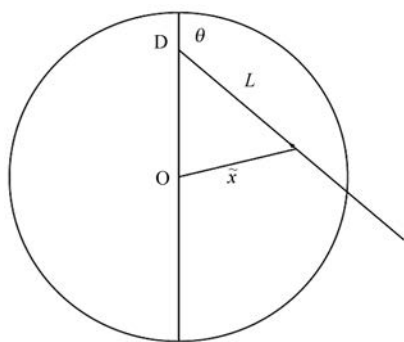


图4 超新星中微子经历地球物质到达探测器的路程图

中微子与地球的物质之间会有相互作用，不同味道中微子之间的相互转换会受到影响，这种效应被称为地球物质效应。图4给出了超新星中微子经历地球物质到达探测器的路程图，其中“D”为探测器的位置，“O”为地球球心位置，“ θ ”为超新星中微子到达探测器的方向角，而“ \bar{x} ”为中微子距离地球球心的距离。对于从不同方向到达探测器的中微子流，经历的地球物质不同，所受的地球物质效应也不同。研究表明，在研究超新星中微子探测时，需要考虑地球物质效应的影响。

总的来说，中微子从产生到逃离超新星，再经过漫长宇宙空间传播，到达地球被探测到的过程中，会受到4种效应的影响，分别为：中微子集体效应、MSW效应、超新星震荡效应和地球物质效应。虽然总的中微子数保持不变，但是不同味道中微子会相互转换，因而通过观测不同味道中微子事例数变化，可以得到一些中微子混合参量和超新星爆发的信息。同时，由于粒子物理标准模型中中微子质量为零，处理超新星中微子传播时常常

将中微子当成无质量粒子处理，认为它们以光速传播。但是，中微子实际上具有微小质量，并非以光速传播。因而通过探测不同味道中微子事例数，比较超新星爆发时候的光信号和不同味道中微子信号的到达时间，然后经过合理的计算和推理，有可能得到中微子绝对质量的相关信息。

三、在地球上探测超新星中微子

自从人类历史上第一次也是唯一的一次观测到超新星(SN1987A)中微子事例之后，越来越多的大型中微子实验装置配备有超新星中微子探测器。历史上比较著名的超新星中微子探测装置有：日本的神冈中微子探测器，美国的IMB中微子探测器，俄罗斯的Baksan和LSD中微子探测器等。近几年来正在运行且可以用于探测超新星中微子的探测装置有：日本的超级神冈和KamLAND中微子探测器，意大利的Borexino、ICARUS和LVD中微子探测器，加拿大的SNO中微子探测器等。我国大亚湾中微子实验也将建立超新星预警系统和配备超新星中微子探测装置，用做探测将来可能的超新星爆发的中微子。目前用于探测超新星中微子的媒介主要有：水、重水、碳氢化合物等。当超新星中微子到达探测器，经历探测器的媒介时，会与媒介中的电子、质子、氘离子、碳离子等粒子反应，产生相应的光信号和电信号，利用光电探测装置(光电倍增管)可以探测

到这些信号，经过分析和重建中微子反应过程，可以计算得到被探测到的超新星中微子的事例数。下面以大亚湾反应堆中微子探测装置为例，介绍探测超新星中微子情况。

大亚湾中微子实验是目前中美合作最大的基础研究项目，利用大亚湾反应堆的天然优势(功率很大，可以提供大量中微子；地理位置好，背面靠山，可以有效降低本底)精确测量中微子混合角 θ_{13} 的值。目前，大亚湾中微子实验已经取得突破性进展，精确测量了中微子混合角 θ_{13} ，发现了第3种中微子振荡模式，其成果已经发表在美国《物理评论快报》上，受到世界各国粒子物理学家们的广泛关注和赞誉，对基础粒子物理学理论做出重大的贡献，是近年来我国在基础物理学领域研究取得最重要的成果。

在大亚湾中微子实验设计与建设初期，部分物理学工作者提出在大亚湾附近建立中微子预警系统，用于观测将来可能的超新星爆发，他们模拟和计算利用大亚湾中微子探测器可能测量到的超新星中微子事例数的范围，并提出利用超新星中微子测量中微子混合参量的各种可能性方法。大亚湾中微子实验共有8个探测器，采用LAB作为液体闪烁器的主要成分，探测器总质量约有300吨。图5给出大亚湾中微子实验探测器分布图。所谓的LAB其实是一种混合物，其主要成分是碳氢化合物，因而用于探测超新星中微子可能的反应通道有：反 β 衰变，中微子-电子反应，



图5 大亚湾探测器分布图

中微子-碳反应（由于大亚湾中微子探测器自身的原因，目前能探测到中微子的通道只有反 β 衰变，其他国家有些探测器能做到3个通道都能探测中微子）。利用合理的超新星爆发模型，详细研究超新星中微子在传播过程中受到的各种效应，考虑超新星中微子探测过程中众多的不确定因素，经过适当的模拟和合理的计算可以得出，如果利用现有的大亚湾中微子探测器观测一颗距离地球约32616光年（1万秒差距）、释放总能量为 3×10^{53} 尔格（与SN1987A类似）的超新星爆发，在反 β 衰变通道上能探测到的超新星中微子事例数大约在60~250个之间，在中微子-碳反应通道上能探测到的超新星中微子事例数大约在10~100个之间，而在中微子-电子反应通道上能探测到的超新星中微子数目非常少，

低于5个。同时，通过比较探测到的不同味道中微子流的时间、数目、分布的不同，定义一些可测量的、几乎不受超新星中微子不确定因素影响参量，然后寻找这些参量与中微子的混合参量和绝对质量的关系，通过测量这些参量，进而得到中微子的混合参量和绝对质量的信息。经过部分物理学工作者的努力，终于寻找到一些比较好的参量，提出了一些利用探测超新星中微子得到中微子混合参量和绝对质量信息的可能性方法。

在江门中微子实验（大亚湾中微子实验二期）的计划中，探测超新星中微子被作为一个重要的实验目标，其探测器大小将是现有大亚湾中微子探测器的近百倍，因而能探测到的超新星中微子事例数也将提高近百倍，这不仅可能更加精确地探测到中微子混合参量的信息，

而且有助于人们更加深入研究超新星的构造和爆发机制，加深人们对超新星爆发和恒星演化的了解。

四、总结和展望

虽然迄今为止，人类在地球上仅有一次探测到超新星中微子，但是超新星爆发的研究意义重大，关系到恒星演化和宇宙的未来，物理学家对其探索从未失去过热情，该领域一直是粒子物理，天体物理和宇宙学共同的研究热点。目前，世界各地越来越多的大型中微子实验装置配备超新星预警系统和超新星中微子探测器，期待未来的某个时候能够有机会探测到来自遥远的超新星的信息，帮助人们不断深入了解未知的世界。

大亚湾中微子实验和江门中微子实验是以我国为主体的国际大型高能物理基础实验，虽然主要目标是用于探测反应堆中微子，但是由于反应堆中微子和超新星中微子能量范围差别在合理范围内，经过技术上的处理也可用于测量超新星中微子。基于如此绝好的机遇，我们希望提出合理的超新星中微子测量计划和可行性方案，建立符合要求的超新星的预警系统，探测未来可能的超新星爆发。这不仅可以帮助加深对超新星中微子物理的研究，得到超新星结构和中微子混合参量的信息，而且可以为基础物理学研究做出更大的贡献，促使我国基础物理学研究跻身世界前列。

（中国科学院高能物理研究所 100049）