

超新星中微子

黄明阳^{1, 2} 胡立军³ 郭新恒⁴

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 东莞中子科学中心 523803;
3 沧州师范学院机械与电气工程学院 061199; 4 北京师范大学核科学与技术学院 100875)

一、超新星中微子发展史

根据中外天文学史专家对东方、阿拉伯和欧洲大量古代记载的分析,在望远镜发明之前,人类历史上记录可靠的超新星共有七颗,它们出现的时间和星座分别为:185年在半人马座、393年在天蝎座、1006年在豺狼座、1054年在金牛座、1181年在仙后座、1572年在仙后座、1604年在蛇夫座。这七颗超新星在我国均有记载。公元185年超新星(SN185)是人类历史上记载最早的超新星,全世界唯一的资料记录在我国的《后汉书·天文志》中。公元393年超新星出现在东晋孝武帝太元年间,也只有在我国有记载。公元1006年超新星是历史上记载最明亮的一颗,在我国、日本、朝鲜、阿拉伯和欧洲均有记载。公元1572年超新星是由著名天文学家第谷在欧洲观测到的,他做了大量精细的相关研究,因而这颗超新星后来被命名为第谷超新星。公元1604年,著名天文学家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,人们发现超新星区域从银河系扩大到其他星系,这为宇宙距离的测量提供了新方法。

20世纪上半叶,随着天体物理学家在理论与探测实验方法上的不断推进,超新星天体物理学取得长足的进展。1930年,天体物理学家钱德拉塞卡(S. Chandrasekhar)经过精确的计算得到白矮星质量的钱德拉塞卡极限。1932年,理论物理学家朗道(L. Landau)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世纪三四十年代,天文学家巴德(W. Baade)和兹维基(F. Zwicky)给出超新星这一现代通用的科学学名。1941年,天文学家闵可夫斯基(R. Minkowski)根据超新星光谱中是否存在氢吸收线,将

超新星分成I类和II类。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。

1966年,天体物理学家柯盖德(S. Colgate)和怀特(R. White)发现中微子可能在超新星的核坍塌爆炸中起着关键作用,它们带走绝大部分超新星的引力束缚能,剩余能量则储存在恒星的剩余部分。1985年,天体物理学家威尔逊和核物理学家贝特提出超新星震荡波机制,在这个机制中,由于中微子加热,使震荡波在延迟几百毫秒后有足够的能量,重启向外延伸的震荡,最终使得超新星得以爆炸。1995年,天体物理学家乌斯里和韦弗利用计算机模拟给出了不同质量恒星结构的详细物质分布,这对研究超新星结构有促进作用。进入21世纪,随着大型计算机的发展,很多研究小组正在对超新星的结构、爆发机制及中微子的产生进行二维和三维的蒙特卡罗模拟,这不但加深了人们对超新星结构的理解,也从中发现更多的超新星中微子效应,对于超新星中微子的研究具有深刻的意义。

1987年2月23日,一位加拿大天文学家在大麦哲伦星云中发现了一颗5等星,它很快就被证实是一颗超新星,立即在国际天文界引起了轰动。这颗超新星很快被命名为1987A,它是400年来最亮的一次超新星爆发,是20世纪最大的天体物理事件之一。图1为哈勃

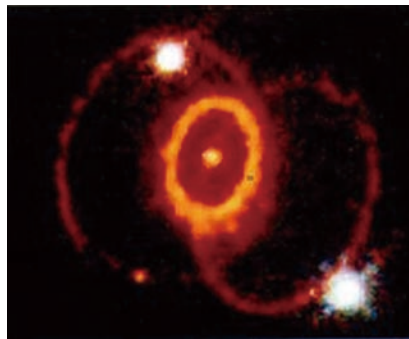


图1 SN1987A 遗迹

太空望远镜在 2006 年 12 月拍摄到的超新星 SN1987A 的遗迹。超新星 SN1987A 爆发后，日本的神冈探测器和美国的 IMB 探测器分别探测到 12 个和 8 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。

粒子物理标准模型表明，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。根据现代中微子物理学理论，中微子可分为三种不同味；它们具有微小质量，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。中微子具有这些不同于其他粒子的特殊属性，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、超新星爆发与中微子产生

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，这个过程称为超新星爆发，如图 2 所示。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。在这段时间内一颗超新星所辐射的能量可以与太阳在其一生中辐射能量的总和相比。超新星爆发是宇宙中既重要而又壮观的物理事件，通过探测超新星爆发及产物，天体物理学家和粒子物理学家可以得到很多新的物理学和天文学方面的信息。

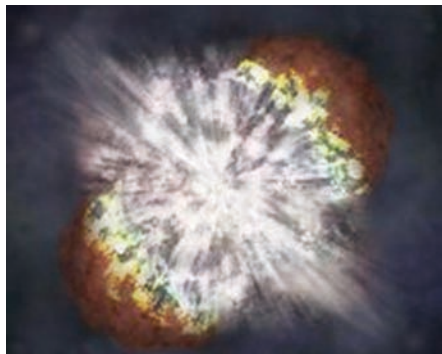


图 2 超新星爆发

根据超新星光谱中是否存在氢吸收线，可以将超新星分成 I 类和 II 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 3 给出了超新星一般的分类方法。I 类超新星质量相对比较小，II 类超新星是大质量恒星（大于 8 个太阳质量）由内部塌缩引发剧烈爆炸的结果。大质量恒星在其核物质燃烧末期，会形成一系列同心壳层，分别是氢、氦、碳、氖、氧和硅壳层，然后由于核聚变燃烧，会形成铁壳层。在形成铁壳层的核聚变过程中，不但不产生能量，反而吸收能量。当铁核的质量大于钱德拉塞卡极限时，电子的简并压小于物质引力的作用，星体内部平衡态会被打破，超新星所有的物质会向它的铁质核坍塌，从而形成新的平衡态，这就是所谓的核坍塌超新星的开始。到坍塌的末期，核会突然爆炸，部分重元素的壳层及它以外的物质会被抛射到宇宙中，形成星际物质。

II 类超新星在其核坍塌直至自我剧烈爆炸过程中会产生大量的各种不同味的中微子和反中微子，最终会形成中子星或者黑洞。这种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贝塔衰变产生大量电子中微子；第二次爆炸持续时间较长，大约 10 秒，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

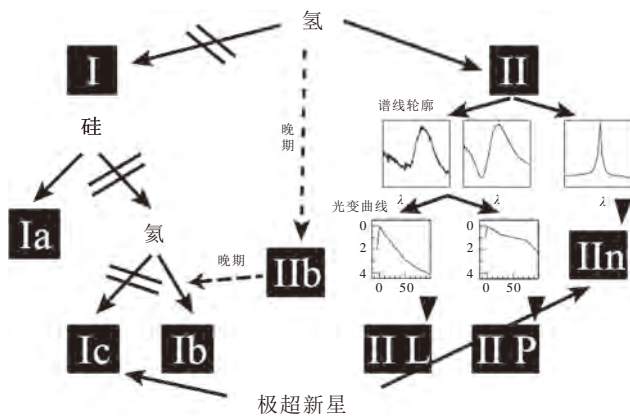


图 3 超新星的分类方法

生大量各种不同味的中微子。

根据超新星中微子研究可知，超新星爆发后产生的各种类型中微子的亮度随时间呈指数衰减，所以中微子产生持续时间短，但亮度大。对于超新星中微子能谱的研究，现阶段主要采取蒙特卡罗方法进行模拟。国际上主要有两个研究小组给出不同的中微子能谱形式，分别称为利弗莫尔模型和加尔兴模型。研究表明，不同味超新星中微子的温度和能量有所不同，这反应了超新星核心处的温度变化情况，因而探测超新星中微子对理解超新星核心处的物理演化有重要意义。目前，超新星爆发机制、演化过程、中微子产生机制都是天体物理学研究热点，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。

三、超新星中微子效应

从超新星中微子产生到被地球上的探测器观测到，它们会受到多种中微子效应的影响，从而改变不同味中微子的粒子数及相应能谱。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。图 4 描述了中微子从超新星内部到外表面的相互作用与传播过程。在这一过程中，中微子主要经历三种效应，造成不同味中微子相互转换。首先，中微子产生后，中微子与中微子之间会有弱相互作用，虽然单对中微子与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。图 5 是一个典型的超新星中微子集体效应示意图，它形象地展示了距离超新星中心 1500~2000 千米的区域和中微子球（NS，10 千米）处不同味中微子的能流曲线。通过对比可以发现，由于中微子集体效应的影响，不同味超新星中微子之间会出现两次能谱交换，并且在中微子能谱交换的能量区间中微子流的振荡幅度相较过去在数值模拟中常使用的小混合角更大。数值计算和理论研究表明，通过探测超新星中微子集体效应的不同振荡模式，有可能最终判定中微子的质量排序。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，这也会在不同味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

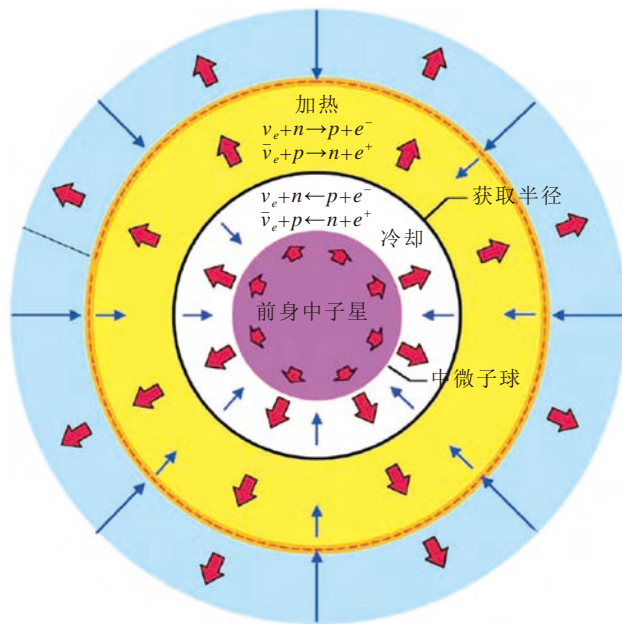


图 4 中微子在超新星内部各种相互作用

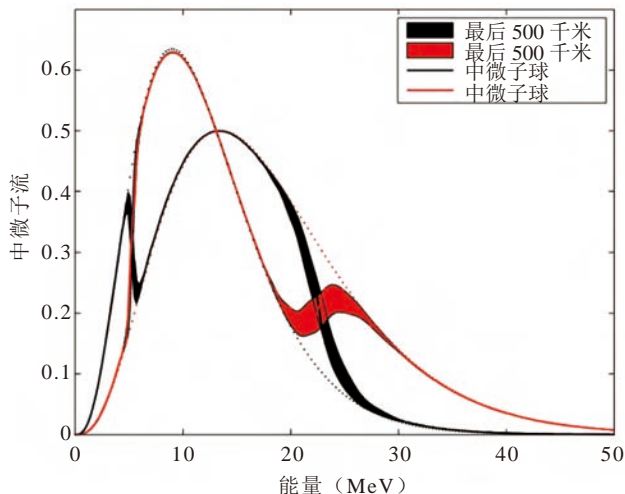


图 5 中微子集体效应

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，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，因而被称为 MSW 效应。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传播，会产生震荡波效应，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之间的中微子相互转换造成影响，被称为超新星震荡波效应。

中微子研究与进展

因而，中微子从超新星内部传播到外表面过程中，需要经历上述三种效应，它们都会对不同味中微子之间的相互转换产生影响。

中微子逃离超新星束缚之后，需要经历漫长宇宙空间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，其路径不受遍布宇宙的磁场影响，因而这段漫长宇宙空间传播几乎不会改变不同味中微子的粒子数和能量分布。但是，在中微子从地球表面到达探测器这段传播过程中，中微子与地球的物质之间会发生相互作用，不同味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。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。研究结果表明，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，会受到四种效应的影响，分别为：中微子集体效应、MSW 效应、超新星震荡波效应以及地球物质效应。虽然中微子的总粒子数保持不变，但是不同味中微子会相互转换，因而通过观测不同味中微子的事例数变化，可以得到一些中微子混合参量和超新星爆发的信息。另一方面，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中微子的事例数，比较超新星爆发时候的光信号和不同味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，同时，由于中微子参与的弱相互作用比光子参与的电磁相互作用力要小很多，中微子最早离开超新星，比光信号到达地球要早，因而超新星中微子的探测对超新星预警系统有重要意义。

四、超新星中微子探测

自从 1987 年人类历史上第一次也是唯一的一次观测到超新星中微子事例之后，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装置。过去几十年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。我国的大亚湾中微子实验和江门中微子实验也有可能建立超新星预警系统和配备超新星中微子探测装置，用于探测将来可能的超新星爆发的中微子。图 6 给出了大亚湾中微子实验与江门中微子实验的地理分布图。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，通过探测器的媒介时，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。

在大亚湾中微子实验设计与建设过程中，部分物理学工作者研究了利用大亚湾实验装置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

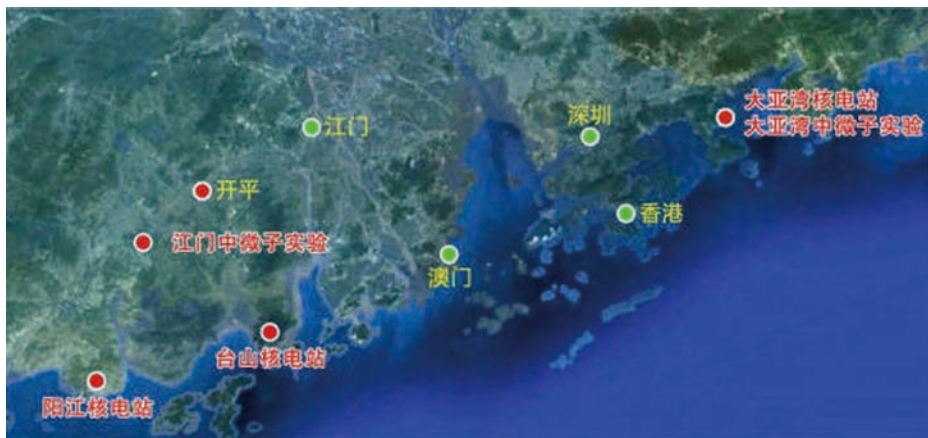


图 6 大亚湾中微子与江门中微子实验分布图

LAB 作为液体闪烁器的主要成分，探测器总质量约有 300 吨。LAB 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：反贝塔衰变、中微子与电子反应、中微子与碳反应。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作用，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（10 千秒差距）、释放与 SN1987A 相近的总能量的超新星爆发，在反贝塔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，在中微子与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，而在中微子与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。通过比较探测到的不同味中微子流的时间、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的参量，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，进而有可能得到中微子的混合参量和绝对质量的信息。

在江门中微子实验计划中，探测超新星中微子被作为一个重要的实验目标。江门中微子实验探测器类似于大亚湾中微子实验，江门中微子实验采用 LAB 作为液体闪烁器的主要成分，但是其探测器总质量约 2 万吨，远大于大亚湾中微子实验探测器，能探测到

不同味的超新星中微子事例数也将提高 60 多倍。因而，利用江门中微子实验装置探测超新星中微子，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地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，同时，这对于判别当前几种主流的超新星理论模型具有重要的意义。

五、总结和展望

中微子是构造我们这个物质世界的“砖块”之一，也是我们认识宏观和微观世界的探针。超新星中微子的研究与探测对于了解超新星爆发机制意义重大，关系到恒星演化和宇宙的未来，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中微子的信息，帮助人们不断深入了解未知的世界。

江门中微子实验是我国正在建设的大型中微子实验，计划建立超新星预警系统和配备超新星中微子探测装置，用于探测将来可能的超新星爆发产生的中微子，这对于我国超新星中微子研究是一个很好的机遇。这不仅可以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，促进我国基础物理学研究跻身世界前列。



封底照片说明

我们人类在沙漠和森林中之所以不会迷失方向，是因为我们有指南针帮助定向，而鸽子飞行上千里回到巢中，北极燕鸥、灰鲸、帝王蝶每年迁徙行程达数千至数万千米，它们又是怎样做到的？它们是如何感应地球磁场的呢？我们人类可以使用指南针来进行导航，而动物们用来导航的“指南针”是什么呢？前不久在国外权威刊物《自然·材料》发表了一篇由中国科研工作者撰写的名为《一个磁性蛋白生物指南针》的论文解答了这个问题。这次研究

者在实验室发现了一个磁感应受体蛋白，叫磁感应分子 MagR，这是由一个蛋白质组成的分子尺度的短棒，它能够顺着地球磁场的方向排列，跟磁铁一样，并随着磁场的变化而转动，就像是指南针，这是首个在分子尺度表现出磁铁特性的蛋白复合体，这使得像鲸鱼、帝王蝶等动物以此作为“指南针”来进行长距离迁徙。这个研究发现是揭开磁感应分子机制上的一个巨大进步，有关研究还在继续进行。

（李博文 / 文）