

# 发现超新星遗迹中微子 ——中微子天文学的下一个里程碑\*

张洋<sup>1,†</sup> 陈少敏<sup>2,††</sup>

(1 山东大学前沿交叉科学青岛研究院 粒子科学技术研究中心 青岛 266237)

(2 清华大学工程物理系 高能物理研究中心 北京 100084)

## Discovery of supernova relic neutrinos ——the next milestone of neutrino astronomy

ZHANG Yang<sup>1,†</sup> CHEN Shao-Min<sup>2,††</sup>

(1 Research Center for Particle Science and Technology, Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao 266237, China)

(2 Center for High Energy Physics, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2023-03-05收到

† email: yangzhangsdu@email.sdu.edu.cn

†† email: chenshaomin@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230604

**摘要** 超新星对于研究恒星演化以及元素、中子星、黑洞与引力波的产生至关重要。观测超新星的手段有很多种，而中微子因具有与物质相互作用极其微弱的特性，为观测提供了一个不同的视角，尤其是对超新星内部的物理机制研究。探测银河系内超新星爆发中微子，因其每世纪几次的低爆发率而变得非常困难。相比之下，距离银河系较远的周边星系超新星总爆发率每十年超过一次。正在建设的大型中微子实验已经开始能够探测宇宙大爆炸至今，包括银河系附近星系在内的所有星系中超新星爆发累积形成的各向同性中微子背景，称为超新星遗迹中微子。如果实验能发现这些中微子，将是中微子天文学的一个里程碑。文章将介绍目前和未来相关实验的主要探测原理、实验挑战和展望。

**关键词** 超新星遗迹中微子，中微子振荡，中微子探测，中微子实验

**Abstract** Understanding supernovae plays a crucial role in the study of the evolution of stars, the generation of elements, neutron stars, black holes, and gravitational waves. There are many measures to observe supernovae explosions, and the extremely weak interaction between neutrinos and matter provides a unique perspective, especially for the study of the physical mechanism inside supernovae. It is very difficult to detect neutrinos from the supernovae in the Milky Way because of their low burst rate of less than three per century. In contrast, the total supernova burst rate of neighboring galaxies far from the Milky Way exceeds one every decade. Experiments have begun that will be able to detect neutrinos from all galaxies including those near our Milky Way since the Big Bang of the universe; these constitute the isotropic background flux of neutrinos and are referred to as supernova relic neutrinos. If these are discovered, it would be a milestone in neutrino astronomy. This article will review the detection, challenges, and hopes of current and future relevant experiments.

**Keywords** supernova relic neutrinos, neutrino oscillation, neutrino detection, neutrino experiment

\* 国家自然科学基金(批准号: 12127808)资助项目

## 1 引言

大质量恒星的宿命是超新星爆发。超新星爆发会向外喷射大量物质，是星际间氧到铷元素的重要源头，也是宇宙线和可能的引力波的重要源头。超新星爆发后最终会形成中子星或者黑洞。因此，超新星对于研究恒星演化以及元素、中子星、黑洞与引力波的产生等至关重要。人类最早关于超新星爆发的记录可以追溯到公元185年，中国天文学家在天空中发现一颗十分璀璨耀眼的亮星(SN185)，持续达八个月之久才暗去。银河系内观测到的最后一颗超新星爆发是SN1604。这些超新星的爆发只有光学记载，直到SN1987A的爆发人类才有了首次关于超新星中微子的记录数据。超新星SN1987A位于银河系附近的大麦哲伦星系，距离地球约50 kpc，其爆发所释放的能量相当于太阳100亿年寿命中所释放能量的300倍<sup>[1]</sup>。图1显示了SN1987A爆发前后的光学观测照片，肉眼可见爆发时特别明亮。由于距离适中和当时大型中微子探测器的建立，科学家们观测到了超新星爆发的中微子，其中，日本的Kamiokande-II探测器观测到11个中微子事例<sup>[2]</sup>，美国的IMB探测器观测到8个中微子事例<sup>[3]</sup>，前苏联的Baksan探测器观测到5个中微子事例<sup>[4]</sup>。这些中微子事例的特点是能量在几十个MeV范围，时间集中在10 s之内。中微子与物质只发生弱相互作用(引力相互作用可忽略)，与物质发生反应的概率非常低，在超新星爆发时出来较早，因此比光学观测要早几个小时。由于中微子的这些不寻常的特征，它可以作为一个独特的探针，窥视星体内部的信息，因此，探测到的SN1987A中微子为超新星爆发机制的研究提供了宝贵数据。日本的小柴昌俊由此荣获了2002年的诺贝尔物理学奖。

单个超新星爆发的中微子观测信号反比于距离的平方，因此地球上的中微子探测器只能对银河系及其附近的超新星爆发加以探测，否则会因距离太远使得探测器敏感度大为减弱而无法观测。此外，银河系内的超新星爆发率非常低，一般认

为每百年发生1—3次。因此，在等待的同时，人们还常常把目光投向广袤宇宙中更为稳定的中微子源，即超新星遗迹中微子。超新星遗迹中微子是自宇宙诞生以来所有星系中超新星爆发形成的可观测的各向同性的中微子背景，如图2所示<sup>[5]</sup>。一些文献为了避免与大爆炸遗迹中微子混淆，将其称为漫射超新星中微子背景<sup>[6]</sup>。本文认为超新星遗迹中微子的定义更加贴切，因其体现了大爆炸至今的宇宙演化，也利于读者对其的理解。一般认为，宇宙中的超新星爆发和银河系内或附近的超新星爆发(比如超新星SN1987A)所释放的能量和发射的中微子能谱是一样的。因此，超新星遗迹中微子的流强，可以从超新星SN1987A的观测数据加以预测<sup>[6]</sup>。



图1 超新星SN1987A爆发前(左)后(右)的光学照片(图片由英澳观测站提供)

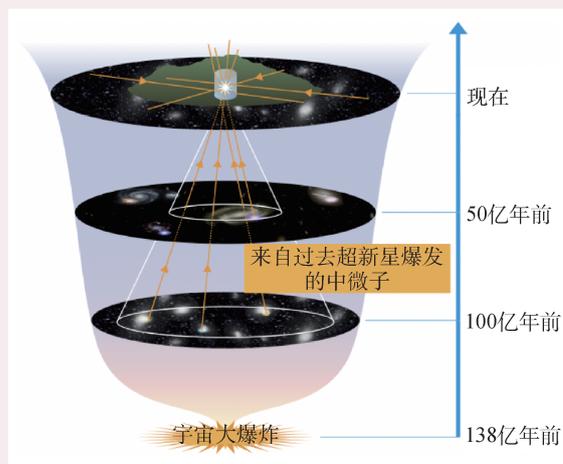


图2 超新星遗迹中微子的来源<sup>[5]</sup>

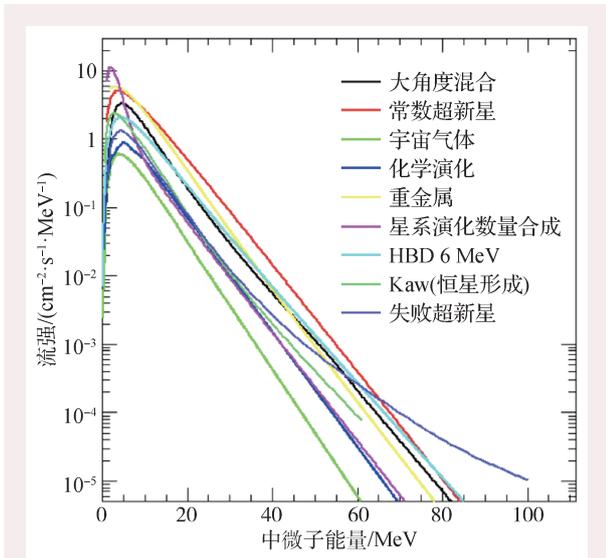


图3 各种理论模型对超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_e$  的能谱和流强预期

$$\left[ \frac{dN_\nu}{dt} \right]_{\text{SRN}} = \left[ \frac{dN_\nu}{dt} \right]_{\text{SN1987A}} \left[ \frac{N_{\text{SN}}}{4\pi D^2} \right]_{\text{SRN}} \left[ \frac{N_{\text{SN}}}{4\pi D^2} \right]_{\text{SN1987A}}^{-1},$$

其中,  $\left[ \frac{dN_\nu}{dt} \right]_{\text{SN1987A}}$  是 SN1987A 爆发时 Kamiokande-

II 观测到的基于反  $\beta$  衰变 ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ) 的中微子事例率, 约为 1 秒钟一个中微子,

$$\left[ \frac{N_{\text{SN}}}{4\pi D^2} \right]_{\text{SN1987A}}^{-1} = \left[ \frac{1}{4\pi (50 \text{ kpc})^2} \right]_{\text{SN1987A}}^{-1}$$

代入了 SN1987A 爆发时的超新星数目 (1 个) 和距离 (50 kpc),

$$\left[ \frac{N_{\text{SN}}}{4\pi D^2} \right]_{\text{SRN}} = \left[ \frac{100}{4\pi (4000 \text{ Mpc})^2} \right]_{\text{SRN}}$$

代入了基于天文观测的宇宙中超新星爆发率 (任意 10 s 内为 100 个) 和超新星在宇宙中的典型距离 (红移  $z$  约为 1, 即距离  $= c/H_0$ ,  $c$  为光速,  $H_0$  为哈勃常数), SRN 是超新星遗迹中微子 (supernova relic neutrinos) 的英文缩写。可以得到, 在 Kamiokande-II 的 2 千吨探测器内, 超新星遗迹中微子的数目为

$$\left[ \frac{dN_\nu}{dt} \right]_{\text{SRN}} = 0.3/\text{年}.$$

考虑反  $\beta$  衰变的反应截面 ( $9.52 \times 10^{-44} E_\nu^2 \text{ cm}^2$ )、典型中微子能量 (10 MeV 量级) 和质子数 (约为  $10^{32}$  个/千吨), 可以得到超新星遗迹中微子的流强为  $10 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  量级左右。

理论上, 有很多模型对超新星遗迹中微子的能谱和流强进行了预测<sup>[7-16]</sup>。超新星遗迹中微子可以用来研究整个宇宙演化过程中超新星爆发的平均效应, 恒星诞生和死亡的历史, 化学元素、中子星、黑洞、宇宙线和引力波的产生, 同时还可以研究极端条件下的中微子性质, 比研究单个超新星爆发更具广泛的科学意义。这也是超级神冈实验在继发现大气中微子振荡之后, 愿意投入巨资和十几年的时间来建立掺钆超级神冈 (SuperK-Gd) 的重要原因。

宇宙中, 来自超新星爆发所产生的中微子能量密度约为  $0.01 \text{ eV/cm}^3$ , 这和由星体发光产生的光子能量密度基本可以比拟。它们分别比宇宙大爆炸导致的中微子背景辐射和微波背景辐射的能量密度小一个数量级。超新星遗迹中微子含所有 6 种味道中微子, 即  $\bar{\nu}_e, \nu_e, \bar{\nu}_\mu, \nu_\mu, \bar{\nu}_\tau, \nu_\tau$ 。每种味道中微子的实验观测, 对理解宇宙中的核坍缩超新星爆发的机理都至关重要。理论上认为, 这 6 种中微子约为等量发射, 能量范围在 1—100 MeV。但至今尚未观测到任何一种这样的中微子信号。超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_e$  的理论能谱如图 3 所示, 目前最好的实验观测限制来自日本的超级神冈和 KamLAND 实验。在中微子能量  $E_{\bar{\nu}_e} > 17.3 \text{ MeV}$  区间的流强上限为  $2.7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[17-19]</sup>, 已经非常接近理论预言。在 10—17 MeV 之间, 超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_e$  的上限为 60—110  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[19, 20]</sup>。对于  $\nu_e$  的观测, 目前最好的实验限制来自加拿大的 SNO 实验, 在中微子能量区间  $22.9 \text{ MeV} < E_{\nu_e} < 36.9 \text{ MeV}$  的流强上限为  $19 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[21]</sup>。对于  $\bar{\nu}_\mu, \nu_\mu, \bar{\nu}_\tau, \nu_\tau$  的观测, 目前的实验限制要差几个量级, 约为  $1000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[22]</sup>。

随着中微子探测器靶质量的不断增大, 从过去的千吨级到当今的万吨级, 甚至到未来的近百万吨级, 中微子与物质极低的反应概率得到了弥补, 实验已经开始具备探测超新星遗迹中微子的能力。下面, 我们挑选了国际上主要的一些中微子实验, 对其进行阐述。

## 2 超新星遗迹中微子的实验探测

### 2.1 超级神冈实验(Super-K)

坐落在日本富山市神冈町的超级神冈实验(Super-K), 拥有一个大型的水切连科夫探测器, 含水5万吨, 可以通过确定反 $\beta$ 衰变链来测量超新星遗迹中微子中的反电子中微子, 但对其他类型的中微子则相对不敏感。比如, 对于电子中微子和电子的弹性散射, 反应截面要比反 $\beta$ 衰变小两个数量级; 对于 $\bar{\nu}_\mu, \nu_\mu, \bar{\nu}_\tau, \nu_\tau$ 和电子的弹性散射, 反应截面比电子中微子和电子的弹性散射截面小6倍。如果有兆电子伏特能量的中微子入射和质子发生了反 $\beta$ 衰变, 其末态的正电子会发出切连科夫光, 并会被装在探测器四周的光电倍增管(PMT)探测到。根据PMT记录的时间与电荷可以重建出正电子的能量和位置, 进而直接确定入射中微子的能量和位置。中微子能量和正电子动能之间满足 $E_{\bar{\nu}_e} = E_{e^+} + 1.8 \text{ MeV}$ , 正电子产生的位置就是中微子消失的位置。长期以来, 超级神冈实验只通过探测单正电子来探测超新星遗迹中微子, 无法区分正反中微子。对于末态中子的测量, 超级神冈经历了漫长的摸索。末态中子在水中迅速慢化并被氢俘获, 发出2.2 MeV的 $\gamma$ 光子( $n + p \rightarrow d + \gamma$ )。超级神冈的正常触发阈值为3.5 MeV, 因此, 中子事例无法通过正常触发被取数系统记录。直到2008年, 清华大学研制出强制触发系统, 即当正电子能量超过一定阈值时, 强制打开500  $\mu\text{s}$ 的时间窗口取数, 用以记录未能通过正常触发阈值的2.2 MeV  $\gamma$ 光子导致的康普顿散射电子信号( $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$ )。这种方法首次实现了在大型纯水装置中的中子测量, 不足之处在于中子测量效率较低, 只有20%左右。为了弥补这个不足, 一种掺钆技术也同时提出, 如图4所示, 中子俘获时间比氢俘获小一个数量级, 俘获后产生的 $\gamma$ 光子串能量也更高(约8 MeV), 它能使中子测量效率高达80%左右。同时探测正电子和中子的方法称为符合测量, 可以拓宽超新星遗迹

中微子 $\bar{\nu}_e$ 研究的能区, 极大地提高实验灵敏度。

神冈实验对超新星遗迹中微子的研究, 最早可以追溯至1988年, 那时Kamiokande-II基于单正电子的搜寻对 $\bar{\nu}_e$ 流强的实验限制为 $226 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $19 \text{ MeV} < E_{\bar{\nu}_e} < 35 \text{ MeV}$ )<sup>[23]</sup>。其低能端的阈值受到太阳中微子和散裂本底的限制, 进一步降低阈值非常困难。即便如此, 经过探测器的不断升级、多年的数据积累和分析方法的不断改进, 该上限值已经提高2个数量级, 直逼理论预言, 同时阈值也降低到17 MeV。利用氢俘获的符合测量, 大幅降低了太阳中微子和散裂本底, 并成功地把阈值推到了10 MeV附近, 增大了发现超新星遗迹中微子信号的可能性。

超新星遗迹中微子研究的本底主要来自其他源的中微子本底和宇宙线缪子( $\mu$ )散裂导致的放射性同位素本底。在小于10 MeV的低能端, 商业核反应堆中微子是主要的本底。太阳由于聚变反应产生的 $^8\text{B}$ 和太阳氦质子(hep)中微子的能量可以高达20 MeV, 是寻找单独正电子信号时无法避免的本底, 但是可以通过正电子和中子的符合测量降低到可以忽略的水平。在大于30 MeV的高能端, 则为大气中微子本底占主导。因此, 探测超新星遗迹中微子的黄金能量窗口为10—30 MeV(图5)<sup>[24]</sup>。考虑反应截面后发现, 在黄金能量窗口, 能量越低, 信号相空间越大。然而, 宇宙线缪子打碎原子核(即散裂)导致的放射性同

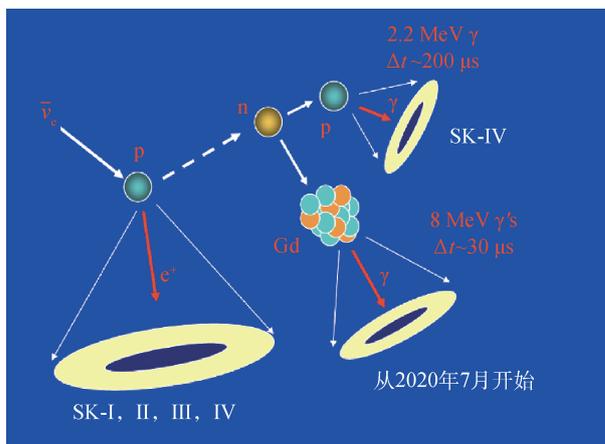


图4 超级神冈测量中子的两种方案: 氢俘获和钆俘获。其中, SK是Super-K的缩写, 右边SK-IV实现了氢俘获的测量, 中间是钆(Gd)俘获

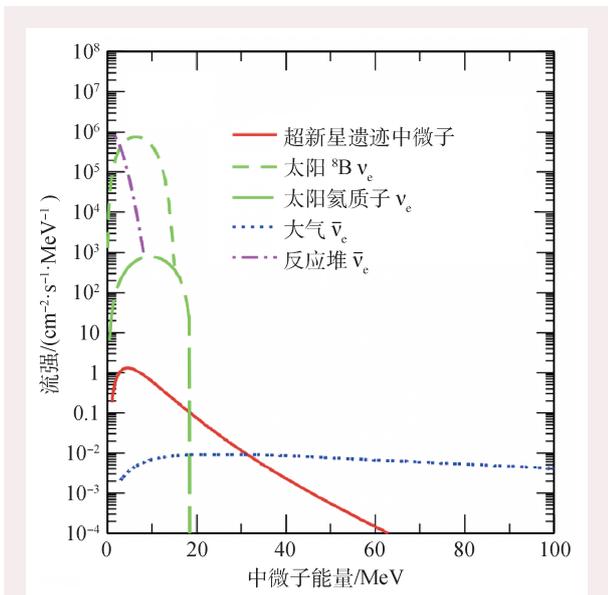


图5 预期的各种中微子能谱<sup>[24]</sup>

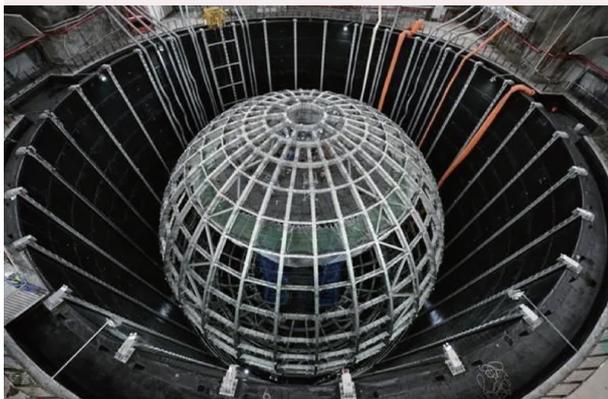


图6 JUNO 中心探测器不锈钢主结构安装完毕(图片由 JUNO 提供)

位素产生的 $\beta$ 、 $\gamma$ 衰变事例在10—20 MeV 范围非常显著,比超新星遗迹中微子信号高出4个量级,它们随着能量的降低指数增加,成为信号观测的主要挑战<sup>[17-19, 25]</sup>。超级神冈宇宙线缪子事例率约为2 Hz,根据缪子径迹和散裂本底的时间位置关联特征等,可以去除大部分散裂本底,而对于长寿命的散裂本底(比如 $^{16}\text{N}$ ,寿命约为10 s),则必须通过符合测量予以压低。值得指出的是,在17.3—61.3 MeV 范围,有种称为不可见缪子类型的本底将成为无法去除的本底。它通过大气中微子的带电流产生低能缪子,这种低能缪子由于在切连科夫阈值以下无法观测,并且其衰变出的米歇尔电子因为和信号特征一致而无法区分。

超级神冈实验基于氢俘获的方法取数十年,虽然没有发现超新星遗迹中微子,但是为 Super-Gd 实验提供了物理研究先导。超级神冈于2020年夏天正式开始掺钆(Gd)<sup>[5]</sup>。钆是目前已知中子俘获截面最大的元素,俘获中子后发出的8 MeV 光子串非常容易测量。2022年夏天,探测器内钆的浓度达到0.03%<sup>[26]</sup>。这意味着 Super-K 逐渐进入了崭新的 SuperK-Gd 时期,将开启探测超新星遗迹中微子的新阶段。曾经作为主导本底的散裂同位素的单事例本底(或者散裂事例和天然放射性事例组成的偶然符合本底)将进一步大幅降低,而曾经隐藏的本底将凸显出来,譬如散裂 $^9\text{Li}$ 事例、大气中微子中性流事例等。根据不同的理论模型, SuperK-Gd 预计每年看到1—5个超新星遗迹中微子信号事例,5—10年内或有很大希望首次观测到超新星遗迹中微子 $\bar{\nu}_e$ 。

此外,靶体积比 Super-K 大5倍的 Hyper-K (即顶级神冈)将从体量优势上研究超新星遗迹中微子 $\bar{\nu}_e$ ,在掺杂钆条件下,预期可以大统计量地观测到超新星遗迹中微子的能谱<sup>[27]</sup>。

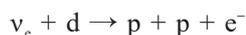
## 2.2 江门中微子实验观测站(JUNO)

坐落在广东江门的江门中微子实验观测站(Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO),具有大体积量、高分辨率、高中子探测效率等特性,是探测超新星遗迹中微子的理想场所之一。它是我国自己主导的万吨级液体闪烁体实验,计划于2023年后取数。如图6所示,其中心探测器不锈钢主结构已于2022年6月安装完毕。液体闪烁体(液闪)也是富含氢的靶材,通过反 $\beta$ 衰变来测量超新星遗迹中微子 $\bar{\nu}_e$ 。与水切连科夫技术探测原理不同,液闪是通过被带电粒子电离或激发出各向同性的荧光来进行粒子测量的,光产额约为水切连科夫探测器的50倍。其中,液闪光的原始波长需要人为加长,到达PMT的敏感探测区间。譬如,在拟使用的LAB+PPO+Bis-MSB探测介质方案中(LAB, PPO和Bis-MSB都是带有苯环的有机物),LAB与PPO之间通过偶极—偶极

非辐射相互作用的福斯特共振能量转移实现波长加长，而波长位移剂 Bis-MSB 能进一步把波长移位到 PMT 敏感区，同时减少材料的自吸收效应。由于液闪中较好的能量和位置分辨率，通过反  $\beta$  衰变能很好地识别超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_e$ 。千吨级的 KamLAND 的实验结果<sup>[20, 28]</sup>可以很好地为实验提供借鉴和未来预期。由于 JUNO 的靶体积比 KamLAND 要大 1 个量级，即信号接收度增加 1 个量级，虽然反应堆中微子、宇宙线缪子散裂同位素和大气中微子中性流本底等不可避免，同时偶然符合本底也会相应增大，但是预期积累 10 年数据后，可以在 3 倍统计显著度以上观测到超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_e$ <sup>[29]</sup>。

### 2.3 萨德伯里中微子观测站(SNO和SNO+)

坐落在加拿大安大略省萨德伯里，位于地下两公里矿井中的萨德伯里中微子观测站(SNO)，以及将探测介质重水先后换成水和液体闪烁体的 SNO+ 实验，它们所受到的宇宙线本底几乎可以忽略，给探测超新星遗迹中微子提供了新的机会。千吨级的 SNO 实验采用水切连科夫技术，测量中微子与物质相互作用产生的带电粒子，和超级神冈所用的轻水不同，SNO 实验用的是非常昂贵的重水。在 SNO 中，超新星遗迹中微子  $\nu_e$  通过



来测量，这个反应的截面比中微子—电子弹性散射的截面要大 2 个数量级，如图 7 所示<sup>[30]</sup>。SNO 的首个实验结果发表于 2006 年，为小于  $70 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $22.9 \text{ MeV} < E_{\nu_e} < 36.9 \text{ MeV}$ )<sup>[31]</sup>，比 Mont Blanc 液闪探测器提供的上限(此前最好的上限)要高 2 个数量级<sup>[32]</sup>。此后，SNO 在 2020 年利用所有累积数据 2.47 千吨·年更新了实验上限，改进至  $19 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $22.9 \text{ MeV} < E_{\nu_e} < 36.9 \text{ MeV}$ )。

SNO 实验的继承者 SNO+ 在 2017—2019 年作为水切连科夫探测器运行了两年时间，并于 2022 年正式进入液闪阶段的取数。由于实验极低的宇宙线本底、较高的分辨率和千吨级的靶材，在运行 5—10 年后，有希望在 10—17 MeV 范围对超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_e$  做出比当前 Super-K 更好的限制。

### 2.4 XENON, LUX-ZEPLIN 和 PandaX 实验

坐落在意大利格兰萨索地下实验室的 XENON，美国桑福德地下实验室的 LUX-ZEPLIN 和中国锦屏地下实验室的 PandaX 实验均采用基于气液两相型的液氙时间投影室(TPC)技术。这些实验的主要物理目标是寻找暗物质，但是，由于探测器具有很好的灵敏度，也可以开展中微子研究。接下来以我国的 PandaX 实验为例(图 8)展开相关讨论。当暗物质或中微子与氙原子核或核外电子发生相互作用时，反冲的原子核或电子在液氙中会产生退激光子和电离电子，前者被 PMT 记录时间为  $t_1$ ，信号记为 S1，后者则在漂移电场的作用下漂移到气液两相区，并在加速电场的作用下于气相区雪崩正比放大产生电致发光，时间记为  $t_2$ ，信号记为 S2。两者的时间差  $\Delta t = t_2 - t_1$  用来重建纵向方向的位置，而 PMT 记录的 S2 图样则用来重建水平方向的位置，从而实现三维重建的目标，分辨率达到毫米量级。除了具有较好的位置分辨率，液氙 TPC 还具有很好的粒子鉴别能力。通过 S2/S1 比值的不同，可以高效率地区分电子反冲和核反冲事例。

PandaX 实验最早从 2009 年开始运行，经历了从百公斤到吨级的历史沿革。实验早期的设计主要是为了研究占宇宙 1/3 左右的暗物质，进入吨级以后，实验范围便扩展至中微子的研究。中微子

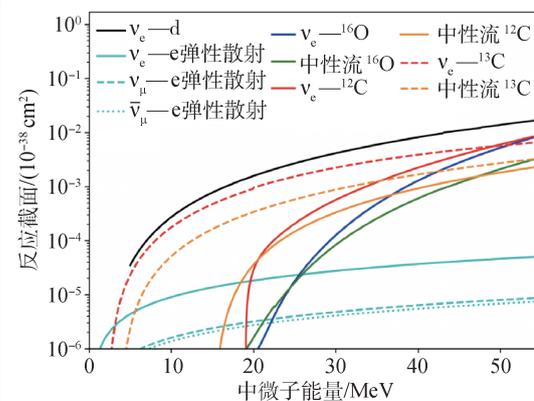


图 7  $\nu_e-d$  反应截面(黑色实线)和  $\nu_e-e$  弹性散射截面(浅蓝色实线)的比较<sup>[30]</sup>

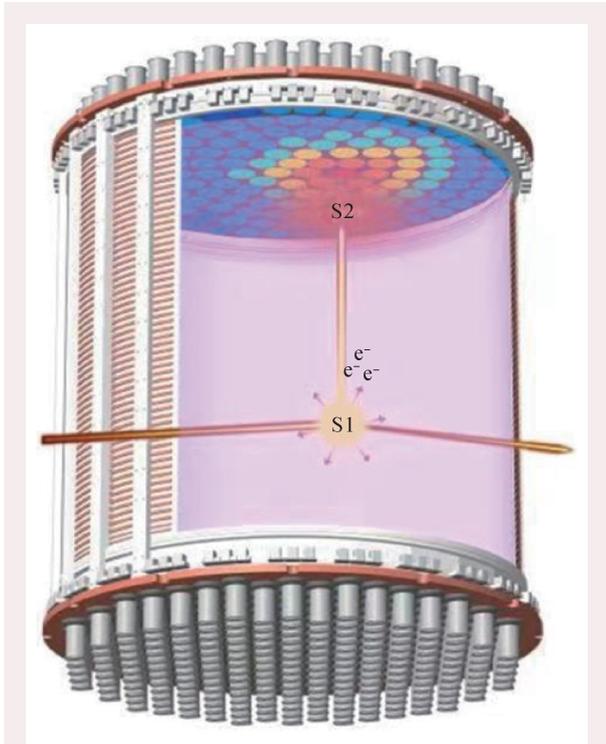


图8 液氩TPC测量原理示意图(图片由PandaX提供)

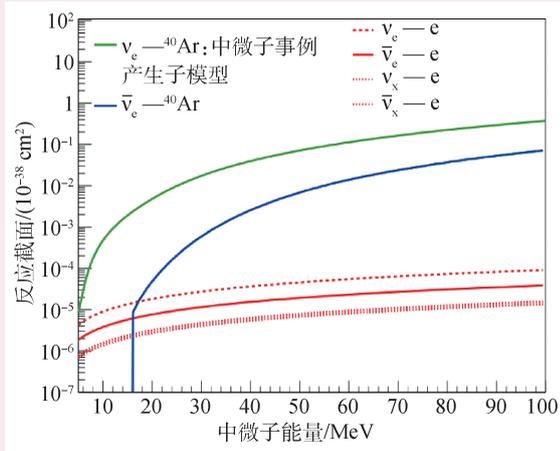


图9 中微子与Ar的反应截面<sup>[36]</sup>, 其中绿线(蓝线)代表中微子ν<sub>e</sub>(ν̄<sub>e</sub>)和Ar的带电流反应截面, 各红色线条代表不同中微子与电子的弹性散射截面

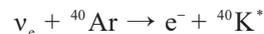
与核的相干散射已经在2017年被证实<sup>[33]</sup>, 截面为  $0.42 \times 10^{-44} N^2 E_\nu^2 \text{ cm}^2$ , 其中  $N$  为原子核的中子数,  $E_\nu$  为中微子能量, 单位为 MeV。与反β衰变的截面相比, 要高出2—3个数量级, 因此, 科学家们希望能通过相干核散射技术(CEvNS)来实现中微子探测器的小型化。然而, 原子核受到中微子相干散射后, 其反冲动能最大为  $E_r^{\text{max}} = 2E_\nu^2 / (m_A + 2E_\nu)$ ,

其中  $m_A$  是原子核质量。假设一个 15 MeV 的超新星遗迹中微子和氩核发生相干散射, 其反冲的最大动能只有 3 keV 左右, 且其能谱主要往低能方向偏移。这大大增加了超新星遗迹中微子探测的难度。由于 CEvNS 对所有味道的中微子都一视同仁, 因此可以用来研究超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_\mu, \nu_\mu, \bar{\nu}_\tau, \nu_\tau$ , 尤其是当前正在规划的 PandaX-30T 实验。对  $\bar{\nu}_e, \nu_e$ , 由于此类实验目前尚不能达到世界最佳灵敏度, 故不予以详述。相干核散射没有像反β衰变的符合测量, 因此太阳中微子  $^8\text{B}$ 、hep 中微子和大气中微子将会是超新星遗迹中微子信号研究无法避免的本底。除此之外, 中子核反冲事例也是一个主要的本底。

在 1 吨·年的取数下, 预计能对超新星遗迹中微子  $\bar{\nu}_\mu, \nu_\mu, \bar{\nu}_\tau, \nu_\tau$  的限制达到  $1000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在百吨·年的取数下, 则能改进 1—2 个数量级。顺便提一下, 基于铅的 CEvNS 技术的 RES-NOVA 实验正在筹措之中<sup>[34]</sup>, 尤其是 RES-NOVA-3, 将采用 456 吨铅, 或能将结果改进至  $1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  范围。

## 2.5 深地中微子实验(DUNE)

坐落在美国南达科他州桑福德地下实验室的加速器中微子实验(DUNE), 其远端探测器采用先进的低温液氩时间投影室技术, 计划于2030年建成运行。该探测器具有大体积量、大的  $\nu_e$ -Ar 相互作用截面, 并且对 10 MeV 量级电子留下的径迹具有较高的观测灵敏度, 因此或有可能在研究超新星遗迹中微子  $\nu_e$  上能有所突破。从探测原理来说, 它和液氩时间投影室技术一样, 都是通过收集光信号和电信号实现测量带电粒子的目的<sup>[35]</sup>。从中微子和氩的反应截面可以看出(图9)<sup>[36]</sup>, DUNE 对超新星遗迹中微子  $\nu_e$  最为敏感, 可通过



来测量超新星遗迹中微子  $\nu_e$ 。图 10 显示了 DUNE 实验中超新星遗迹中微子  $\nu_e$  和主要本底的能谱分布, 由于太阳中微子本底的存在, 低能端阈值只能设在 17 MeV 左右。对于超新星中微子平均温度 4、5、6 MeV 模型, 在 100 千吨·年能测到的超

新星遗迹中微子 $\nu_e$ 数目分别为1、2、5个事例。因此，在DUNE要发现超新星遗迹中微子 $\nu_e$ 还是非常具有挑战性的。

## 2.6 锦屏中微子实验(JNE)

坐落在四川西昌锦屏山下的中国锦屏地下中微子实验室(JNE)位于地下2400 m，垂直埋深是目前国际地下实验室最深的一个，宇宙线本底几乎可以忽略，这增强了发现超新星遗迹中微子信号的显著性。JNE是基于慢时间特性的液体闪烁体(简称“慢液闪”)技术的深地兆电子伏特中微子实验，既可以开展太阳中微子和无中微子双 $\beta$ 衰变实验，也可以用来研究超新星遗迹中微子 $\bar{\nu}_e$ 。锦屏中微子实验采用的慢液闪配方为LAB+0.07 g/L PPO，LAB本身具有几十纳秒量级的衰变常数，和瞬时的切连科夫光形成一个时间差，因此，不仅可以利用快时间分量的切连科夫光测量带电粒子的方向，也可以通过慢时间分量的闪烁光保持较高的能量分辨率。LAB和PPO之间的能量转移，通过福斯特共振能量转移进行。PPO浓度越高，福斯特转移效率越高，光产额会越高，但也会导致衰变常数变小，不利于切连科夫光和闪烁光的分离。因此，锦屏中微子实验采用较小的PPO浓度，同时加入少量的(13 mg/L)波长位移剂Bis-MSB，达到光产额和光分离的最佳配置。相比于水切连科夫技术和液闪技术，慢液闪技术融合了两种技术的优势。与此同时，慢液闪还具备较高的粒子鉴别能力。比如在超级神冈实验中无法鉴别的不可见缪子，在慢液闪中可以很好地识别；再比如一些在液闪中无法识别的质子反冲本底，也可在慢液闪中更好地识别。慢液闪的粒子鉴别能力将会显著降低在超新星遗迹中微子寻找过程中，因大气中微子通过中性流过程，以及其中的缪子型中微子通过带电流过程而产生的本底<sup>[38]</sup>。

目前锦屏中微子实验探测器已经开始开工建设，预期2026年左右开始运行，如图11所示，假设实验是千吨级的，那么预期在5—10年取数内，可以获得在10—17 MeV范围对超新星遗迹中微

子 $\bar{\nu}_e$ 的最佳实验结果。

与慢液闪探测原理类似的，还有基于水基液闪技术的美国Theia实验，探测器初步计划也放置在美国桑福德地下实验室中，作为DUNE实验的另一个远端探测器，目前处在研究与开发中。

## 2.7 未来展望

超新星SN1987A爆发中微子的观测给我们估计超新星遗迹中微子的流强提供了基于事实的大致判断。伴随着中微子探测技术的不断发展，中微子探测器向着更大、更深的目标前进，超新星遗迹中微子的发现指日可待。

大气中微子将是超新星遗迹中微子探测的主要本底。比如水中，大气中微子导致的不可见缪子本底是无法避免的本底；液闪中，大气中微子

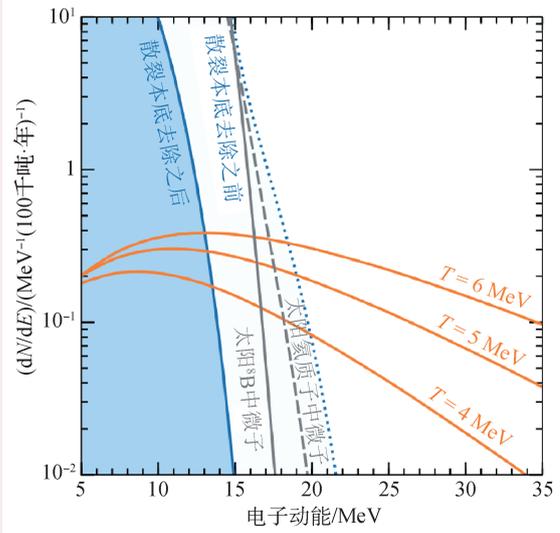


图10 DUNE实验中，超新星遗迹中微子 $\nu_e$ 和主要本底的能谱分布<sup>[37]</sup>

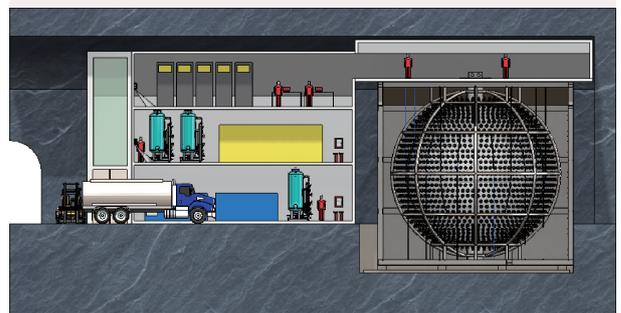


图11 锦屏中微子探测器(图片由锦屏中微子实验室提供)

中性流导致的本底是否可以有效甄别去除，有待于新实验技术的突破；基于相干核散射的技术，核反冲能谱向低能端靠拢，信号完全被大气中微子淹没。

如果超新星遗迹中微子的实验限制远低于基于SN1987A爆发中微子数据的预测，那么这将预示着新物理的产生，或将引起天文物理和粒子物理的巨变。

### 3 结束语

目前已经探测到地球以外的中微子源，这为研究天文物理和中微子物理做出了突出的贡献。

#### 参考文献

- [1] Arnett W D, Bahcall J N, Kirshner R P *et al.* *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1989, 27: 629
- [2] Hirata K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 1490
- [3] Bionta R M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 1494
- [4] Alexeyev E, Alexeyeva L, Krivosheina I *et al.* *Phys. Lett. B*, 1988, 205: 209
- [5] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/news/detail/309>
- [6] John F. Beacom. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 2010. 60: 439
- [7] Ando S, Sato K, Totani T. *Astropart. Phys.*, 2003, 18: 307
- [8] Totani T, Sato K. *Astropart. Phys.*, 1995, 3: 367
- [9] Malaney R. *Astropart. Phys.*, 1997, 7: 125
- [10] Hartmann D, Woosley S. *Astropart. Phys.*, 1997, 7: 137
- [11] Kaplinghat M, Steigman G, Walker T. *Phys. Rev. D*, 2000, 62: 043001
- [12] Strigari L E, Kaplinghat M, Steigman G *et al.* *JCAP*, 2004, 0403: 007
- [13] Totani T, Sato K, Yoshii Y. *Astrophys. J.*, 1996, 460: 303
- [14] Horiuchi S, Beacom J F, Dwek E. *Phys. Rev. D*, 2009, 79: 083013
- [15] Fukugita M, Kawasaki M. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 2003, 340: L7
- [16] Lunardini C. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102: 231101
- [17] Bays K *et al.* (Super-Kamiokande). *Phys. Rev. D*, 2012, 85: 052007
- [18] Zhang H *et al.* (Super-Kamiokande). *Astropart. Phys.*, 2015, 60: 41
- [19] Abe K *et al.* (Super-Kamiokande). *Phys. Rev. D*, 2021, 104: 122002
- [20] Abe S *et al.* (KamLAND Collaboration). *Astrophys. J.*, 2022, 925: 14
- [21] Aharmim B *et al.* (SNO). *Phys. Rev. D*, 2020, 102: 062006
- [22] Lunardini C, Peres O L. *JCAP*, 2008, 08: 033
- [23] Zhang W *et al.* (Kamiokande Collaboration). *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 61: 385
- [24] Ando S, Sato K. *New J. Phys.*, 2004, 6: 170
- [25] Zhang Y *et al.* (Super-Kamiokande). *Phys. Rev. D*, 2016, 93: 012004
- [26] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/news/detail/574>
- [27] Abe K, Abe T, Aihara H *et al.* 2011, arXiv: 1109.3262
- [28] Gando A *et al.* (KamLAND Collaboration). *Astrophys. J.*, 2012, 745: 193
- [29] Adam T, An F, An G *et al.* 2015, arXiv: 1508.07166
- [30] Akimov D (COHERENT Collaboration). *JINST*, 2021, 16: 08
- [31] Aharmin B *et al.* (SNO). *ApJ*, 2006, 653: 1545
- [32] Aglietta M *et al.* *Astropart. Phys.*, 1992, 1: 1
- [33] Akimov D *et al.* (COHERENT Collaboration). *Science*, 2017, 357: 1123
- [34] Pattavina L, Ferreirolachellini N, Tamborra I. *Phys. Rev. D*, 2020, 102: 063001
- [35] Acciarri R, Acero M A, Adamowski M *et al.* 2016, arXiv: 1601.02984
- [36] Abi B *et al.* (DUNE Collaboration). *Eur. Phys. J. C*, 2021, 81: 423
- [37] Zhu G Y *et al.* *Phys. Rev. C*, 2019, 99: 055810
- [38] Wei H, Wang Z, Chen S. *Phys. Lett. B*, 2017, 769: 255