

來自 SN1987A的中微子

方 励 之

1987年初，固体物理及材料科学界几乎每天都被超导转变温度的新记录所激动。与此同时，天体物理界也被一个罕见的天象所吸引，每天注视着它的变化。这个天象即1987A超新星(SN 1987A)。当笔者在写这篇文章时(1987年3月)，这个超新星爆发事件尚未完结，远不到全面总结的时候，尽管如此，它所带来的新信息，已经非常值得介绍了。

被命名为1987A的超新星，位于南天的大麦云中(见图1)，住在北天的我们是看不到它的。它的爆发

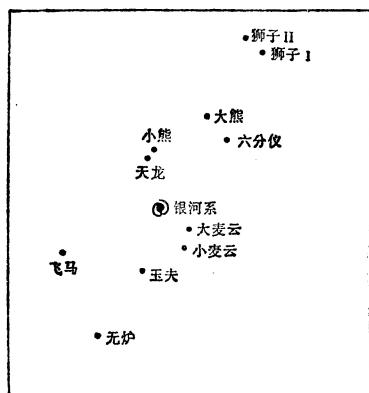


图1 银河及其周围的矮星系，SN 1987A就在大麦云中。

首先被加拿大的几位天文学家注意到。他们发现，在1987年2月24日，一颗5等星突然出现在大麦云中，精确的位置是：赤经 $5^{\text{h}}35^{\text{m}}50^{\text{s}}$ ；赤纬 $-69^{\circ}17'59''$ 。以前这里可能只是一颗12等的暗星。随后的两天，至少有九个望远镜指向这颗星，证实它的亮度继续增加成为4等星，是一个第II类超新星爆发。目前，许多天文

台取消了原订的观测项目转而跟踪这个爆发。国际天文紫外卫星日本银河X射线卫星，也在连续地监视超新星的发展。

也许，最使天体物理学家和粒子物理学家兴奋的是收到了SN 1987发来的中微子。在1987年2月28日的天文电讯上，意大利都灵的宇宙地球物理研究所所长C. Castagnoli宣布：

在世界时二月23.124，勃朗峰中微子观测站探测到中微子信号。信号由5个脉冲构成，能量都高于7MeV的阈能，前后经过7秒。

1987年3月6日，他在天文电讯上进一步说：

勃朗峰中微子观测站所探测到的5个中微子脉冲的时间及能量分别为：

二月23^d02^h52^m36^s.792, 7 MeV,
二月23^d02^h52^m40^s.649, 8 MeV,
二月23^d02^h52^m41.007, 11 MeV,
二月23^d02^h52^m42^s.696, 7 MeV.
二月23^d02^h52^m43^s.800, 9 MeV.

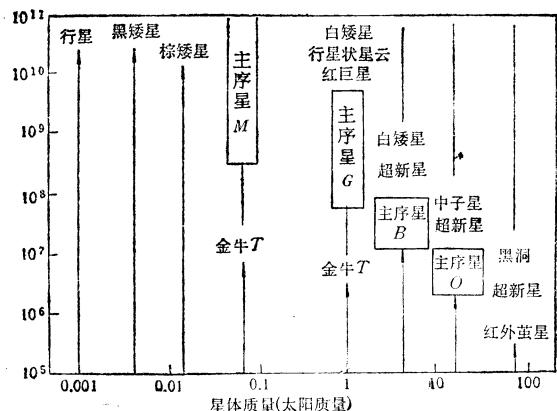


图2 各种质量的星体的演化

表 1 SN 1987 A 的中微子

中微子类型	能量 (MeV)	地面流量 ($10^{10}/\text{cm}^2$)
ν_e	4.7	1.6
$\bar{\nu}_e$	5.0	1.1
ν_μ	10.0	0.8
$\bar{\nu}_\mu$	10.0	0.8
ν_τ	10.0	0.8
$\bar{\nu}_\tau$	10.0	0.8

这五个中微子可能是人类首次直接确认的来自超新星的中微子。

超新星虽然是少见的天文现象，但是关于超新星的理论却讨论了多年了。通行的理论是，超新星爆发是恒星演化晚期的现象。图 2 表示各种质量的天体的演化过程。从中看到，质量大于 5 个太阳质量的恒星，都要经过超新星爆发阶段而形成致密的天体，即白矮星、中子星或黑洞。所以，超新星爆发实际是个大塌缩过程。恒星的晚期，中心的核能用尽之后，没有力量维持恒星的平衡，结果发生大塌缩。塌缩放出大量引力能，一部分能量变成光辐射，引起恒星的外壳向外爆发。总之，超新星爆发的关键是塌缩，塌缩形成致密星，塌缩引起爆发，爆发只是一个后果或表面现象。

这种观点最早由 W. Baade 和 F. Zwicky 在 1934 年提出，当时他们在一篇题为《超新星与宇宙线》的论文中说过：

在每个星系中每几百年要发生一次超新星爆发。一个超新星的寿命大约是二十天，当它们的绝对亮度为极大时…大约为我们太阳的辐射的 10^8 倍…我们还提出这样的观点：超新星是表示从普通星到中子星的过渡。所谓中子星，就是星的最终阶段，它完全由挤得极紧的中子构成。

五十年来，这种中子星形成说已经发展成为相当定量的理论，可是，这些理论全都没有检验过。原因是缺乏机会，“每个星系中每几百年要发生一次超新星爆发”，太稀少了。从西汉到现在的两千年历史中，由中国历代的文献证实，大概银河系中只发生过九次超新星爆发，自从十七世纪天文学开始使用望远镜以来，在银河系中还从来没有发生过超新星爆发。

当然，利用望远镜可以看到成千上万的星系，也可以看到其他星系中的超新星。根据这些观测也可以检验超新星理论。但是，这些超新星终归太远，只能进行光学观测，而光学方面只能看到超新星外部的爆发，而不能探知内部的塌缩。

探知星体内部的方法是利用中微子。探测太阳内部发射的中微子的工作已有二十多年了，已经证明它是研究星体内部现象的极有效的方法。建立勃朗峰中微子观测站的动机就是为了探测来自星体内部的中微子，特别是要探测来自超新星爆发时的中微子。

理论预言，当塌缩而形成致密星时，会放出大量的中微子。一个质量为 10—25 个太阳质量的恒星，在塌缩形成中子星时，将有 3×10^{53} 尔格的能量由中微子带走，总共会放出 10^{58} 个中微子，每个中微子的能量约在 10—15 MeV 范围。尽管中微子如此之多，它们的总能量与超新星放出的光的能量差不多，但是，一般不可能在地面探测到中微子，因为它们的截面太小了。

只有极近的超新星的中微子才有可能探测到。

SN 1987 A 是 383 年以来距离地球最近的一颗超新星，距离我们大约 15 万光年。自从 1604 年开普勒超新星之后，SN 1987 A 是第一颗可以用肉眼直接看到的超新星。真是百年不遇的事件！SN 1987 A 射到地球上的中微子，大约每平方厘米上有一百亿 (10^{10}) 个。更详细的数目列于表 1 中。普林斯顿的 J. Bahcall 估计，这些通过地球的中微子中，应当有三个会在勃朗峰观测站的 90 吨的闪烁液体中引起脉冲。这与 C. Castagnoli 宣布的结果 (5 个)，相当符合：它们的能量的确都在 10 MeV 左右。

此外，中微子脉冲发生的时间，正好在 SN 1987 A 的光学增亮之前数小时，说明是先塌缩而后爆发。5 个脉冲前后相差 7 秒，这正是致密天体塌缩的时间尺度。所有结果都与二十年来的定量预期大体一致。

当然也可以怀疑，勃朗峰观测站接收到的中微子不是来自 SN 1987 A，而是其他的宇宙线引起的，只是时间上偶然地与 SN 1987 A 发生的时间一样。Castagnoli 估计了这种偶然性的发生概率，它是每一万年才可能有一次。而勃朗峰观测站于 1984 年 10 月才开始工作，至今不到三年，因此，极不可能是偶然效应。

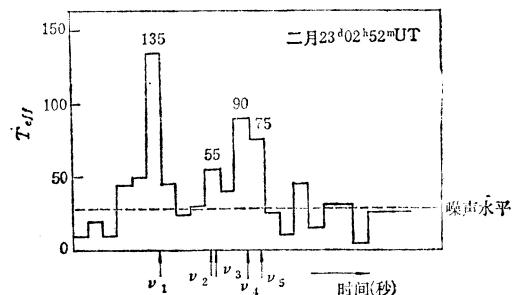


图 3 SN 1987 A 的引力波信号

进一步排除偶然效应的根据是引力波的观测。罗马大学的引力波实验室的 G. Pizzella 于 3 月 3 日宣布，他们的引力波天线接收到了来自 SN 1987 A 的引力波信号。他们的结果画在图 3 中，其中纵坐标表示天线的有效温度 T_{eff} ，横坐标是时间。这个天线的噪声温度是 29°K 。但是在中微子脉冲发生的时间 (即二

月 $23^d02^h52^M$ 里, T_{eff} 明显地高于 29°K , 第一个峰高达 135°K 。图3中的5个箭头分别表示5个中微子脉冲的发生时间, 它们与 T_{eff} 峰令人惊异地一致。偶然发生这种一致的概率, 是不大于十万分之一的。

对于引力波信号, 其可信度不像中微子那样高。因为, 按理论估计, SN 1987 A 所发射的引力波似还不足以被现有的引力波天线接收到。但是, 另一方面, 引力波强度很强地依赖于塌缩时天体的形状, 如果形状不对称性大, 发射的引力波就强。也不能排除以下的可能: 在 SN 1987 A 塌缩时, 形状相当不对称, 以致引力波较强而能被罗马大学的天线收到。可惜的是, 全世界的引力波天线, 包括中国的北京及广州两架引力波天线在2月23日, 除罗马的外, 都没有处在工作状态, 无法旁证罗马大学的结果。

无论如何, 已有相当高的置信度可以相信 Castagnoli 的5个中微子是来自SN 1987 A 的。仅从这个事实就可以得出几个有关中微子本身的结论:

1. 为了解释太阳中微子的短缺, 有人曾提出, 中微子可能会衰变导致太阳中微子的减少。如果真是这样, 不可能探测到来自 SN 1987 A 的中微子, 因为在15万光年的飞行途中, 应当衰变光了。所以, 勃朗峰的结果直接否定了衰变模型。

2. 解释太阳中微子短缺的最新模型是中微子振荡。由于 ν_e 在星体中运动时, 有效质量的变化会把全

部 ν_e 变成 ν_μ 以及全部 ν_μ 变成 ν_e 。在超新星内部同样可以发生这类过程, 即勃朗峰观测站记录到的 ν_e 脉冲, 实际都是原初的 ν_μ 或 ν_τ 变来的。由表1看到, ν_μ , ν_τ 的能量都大于 ν_e , 而能量越大反应截面越大。所以, 如果存在中微子振荡效应, 预期观测值应当大于 Bahcall 的估计(3个)。因此, Castagnoli 观测值(5个)大于 Bahcall 预期值(3个), 似乎支持这种中微子振荡模型。

3. 还有一种假定, 认为存在重的中微子, ν_H , 它的质量为数百 MeV, 而且会发生衰变

$$\nu_H \rightarrow \nu_e + e^+ + e^-$$

或 $\nu_H \rightarrow \nu_e + \gamma$ 。如果这是对的, 那么在 SN 1987 A 的中微子到达地球时, 还应同时看到 γ 射线, 它来自 e^+e^- 的湮没或者 ν_H 的直接的 γ 发射。但是, 并没观测到这类的 γ 射线, 因此说明 ν_H 是不存在的。

关于 SN 1987 A 的天体物理意义和粒子物理意义的研究, 正在展开之中。仅从目前已有的结果, 似乎可以说, 勃朗峰中微子观测站扮演着粒子物理与天体物理之间的一个接口, 粒子物理与宇宙学之间的一个接口。

SN 1987 A 的出现增加了建造新的粒子-天体接口的紧迫感。正在实施的方案中最重要的一个大萨索方案。大萨索是整个亚平宁山脉的高峰区, 2914米的最高峰科尔诺就在其中。从罗马向西经过大约两小

时的车程, 就进入大萨索山区, 从它山脚下的拉奎拉开始, 公路分成两条。一条盘旋直上顶峰, 一条进入隧道, 穿过整个大萨索山直趋意大利半岛的西岸。

大萨索山区人烟稀少, 不像阿尔卑斯的最高峰勃朗峰那样出名, 但在意大利却也是知名的。原来, 1943年夏天, 墨索里尼被废黜后就拘禁在山顶; 希特勒的滑翔机部队就是在山顶偷袭降落, 把墨索里尼抢走的。

现在的大萨索方案包括两部分, 一是山顶的天文观测站, 一是隧道中的中微子及引力波观测站。大萨

索山顶原来就有观测站, 是意大利本土的最高的观测站, 只要加以改造即可。山底的观测站是利用一段废弃的公路隧道, 加宽加大, 是目前工程的重点。

大萨索方案的基本构想是利用山顶的光学望远镜, 粒子探测器与山底的中微子及引力波探测器进行符合或反符合, 形成第一个把天文观测与粒子探测融于一身的联合体。所以, 它不仅可以做勃朗峰观测站所能做的一切, 而且有可能弄清由于 SN 1987 A 的中微子提出的新的问题。