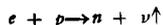


(续前)

### 3 崩塌过程

电子简并态的崩溃乃是触发星体剧变的最直接原因。

前面已经提到，“电子简并态”的物理意义乃是电子由于“泡利不相容原理”永远具有一定的动能，因而能担负起顶住压力的功能，但我们不能忽略，在这种物态下，电子的平均速度将随着外加压力的增加、电子活动空间的减小而不断增大。当物体被压缩到密度超过了约  $4 \times 10^{11}$  克/立方厘米之后，电子的平均速度已接近光速；如果压力再增加，电子便有可能穿入原子核而与核中的质子产生逆  $\beta$  衰变反应：



这时电子将和质子结合成一个中子，同时释放出一个中微子。对这一过程也可以这样形象地说：高压终于把电子“压”进原子核里面去了。

这个“电子简并态崩塌”引来的第一个后果是一场空前的中微子大闪发。计算表明，在不到半秒之内，可以有大约  $\frac{1}{2} M_{\odot}$  的物质崩

塌。由此产生的中微子将带走高达  $10^{53}$  尔格的巨大能量，形成了一个强大无比的中微子脉冲波向四周空间射出。就像电磁脉冲是原子弹起爆的前兆一样，中微子大闪发乃是超新星将要起爆的第一个讯号。

崩塌极为迅速；这不仅在于中微子带走大量热能，也由于电子迅速消失。在此前，电子曾是顶住压力的主角。电子的消失使核心部分耐压骤减，原子核的半径又比原子半径小得多；这样，大约在不到一秒的时间里，在这颗巨星的核心深处约有总质量约  $1.4 M_{\odot}$  的超密物质从半径约 4000 公里一下子缩到小于 100 公里，

由电子简并态转化为中子简并态。

就其物理意义而言，中子简并态可以与电子简并态相比较：中子自旋为  $\frac{1}{2}$ ，与电子同属于费米粒子，

因而也和电子一样可以处于简并状态，只不过它的密度 ( $2.7 \times 10^{14}$ ，即每立方厘米重 2.7 亿吨) 比电子简并态大得多而已。我们也可以说这时在星体的中心形成了一个以中子为主的、极为巨大的“原子核”，只不过使这个核中的粒子聚在一起的不是核力，而是巨大的引力而已。这，也就是原始的“中子星”的形成过程。

这里还要说明两点。第一，上面讲的只是一个极为简略的总过程，实际细节要复杂得多，例如崩塌起始阶段各种重乃至超重元素的形成（也就是我们地球上铀等元素的来源）等等，这里就略去了；第二，任何物质，不管密度有多大，总是可以压缩的，这就意味着，如果星体总质量够大的话，中子简并态也会给压垮（这一点通称昌德拉塞卡第二崩溃点）。一旦超过了这个点，就没有什么物态还能抵挡了。可怕的引力将把一切吞噬。其结果就是虽然离奇但还可以推算的“黑洞”。我们不在此处介绍“黑洞”了，只需要知道中子星并不是唯一可能的结局就行了。

现在再回到崩塌过程的描述。崩塌是动态的，约有  $1.4 M_{\odot}$  的巨大质量垮下去，达到原子核密度之后，还将因巨大的惯性向中心冲去，一直压到它的“最大压缩点”（其密度约为核密度的 1.5 倍）之后再剧烈地反弹，与正以接近四分之一光速向中心落下的大量外层物质对面相撞。

在这里，我们又必须向读者介绍一个超乎寻常的“引力释能”概念。引力释能，例如石头落下了砸伤了脚，这是我们很熟悉的概念。但如果这发生在一个质量大到  $\sim 1.4 M_{\odot}$ ，而半径仅约 100 公里的超密态星体“核”上，情形就会很不一样了，因为这时引力释出的能量是极为可观的。一般可以达到落体质量的 1/10。作为对比，原子弹只能释放 1/1000 的质量能，氢弹也只能释放 1/100 的质量能，由此可见其“厉害”了。更形象地说，若有 10 克物质，算是一朵玫瑰花儿吧，让它落到这个“核”上，它所释放的能量将等于扔到广岛上的那颗原子弹！而现在，在崩塌过程中，不是 10 克，而是成亿亿吨的星体物质以每秒八万公里的速度向中心落下，而且还要和几乎以同一速度从中心反弹回来的超密态物质对头撞上（见图 2）。对于在地球上千辛万苦地制造比普通真空还稀薄的“粒子对撞加速器”的物理学家而言，这是一个多么巨大、厉害的“超级对撞机”啊！

有了这种引力释能的概念，我们就易于理解塌缩引起的、在星体最深处的释能过程了。释放的总能为  $10^{50}$  尔格量级并且集中在极短的时间之内。星体“起爆”了。

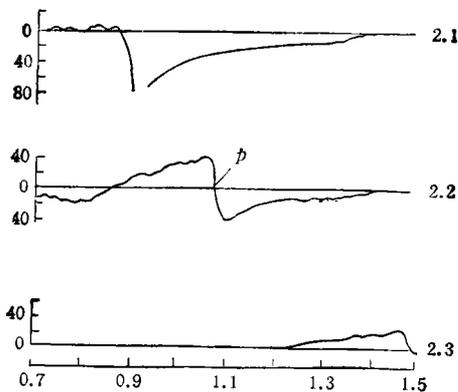


图2 用计算机模拟的、巨星发生崩塌时其核心部分物质的运动状况

图中纵坐标表示物质运动的速度(单位: 公里/秒), 向下的标度代表向中心落下, 向上则表示抛出。横坐标表示在此星体半径(星体中心在左侧)以内所包含的物质总质量(单位:  $M_{\odot}$ )。

2.1: 当核心部分已达到原子核密度时, 外层物质仍以约每秒9万公里的高速冲进;

2.2: 2毫秒之后, 核心部分被冲继续向中心压缩, 但大部物质以高速反弹, 与正在落下的物质对头相撞(p点);

2.3: 20毫秒之后, 产生的冲击波已到达星核的外缘。

用物理概念描述爆炸就是: 释放的巨大能量以一个巨大的冲击波形式向外扩散。冲击波和声波不同在于, 第一, 对声波而言的传导媒介在这里已不仅是传导能量的介质, 而是能量的接受者, 或者用“行话”说, 它不再是弹性波而是非弹性波; 第二, 一般讲来冲击波的速度都大于声波。

初发的冲击波以大约每秒3000—5000公里的速度向前推进并沿途沉积能量, 在原有的Si及其他层中又触发了一系列新的核反应, 造成了相当量的铁族及其他重元素, 并将外层推出。模拟计算(见图3)表明, 星体“内塌”和“外炸”的分离界面大约在距离中心1500公里处。但是, 即使这样巨大的爆炸能量, 也还不足以将重达十几个太阳质量的外层全部炸飞。实际上还有一个重要的因素增大了爆炸力, 那就是闪发的中微子。中微子本来该是“与世无涉”自由逸走的, 但是, 在星体最深处那样高的密度、穿透一厘米物质约相当于穿过好几个地球的情况下, 中微子也不能那么“自由”了; 在逸出的同时, 中微子脉冲将把一部分能量转移到星体物质上, 助长并恢复了冲击波的威力, 这个过程反映在图3中冲击波的运动轨迹中出现的那个“折点”上。

总之, 由于重星核心部分电子简并态的突然崩溃, 使其中心约 $1.8M_{\odot}$ 的部分塌缩成为中子星, 而外层则被塌缩释放的能量全部炸飞, 带着各种重元素抛散到漫漫的空间里。我们现在看到的1054年超新星遗迹:

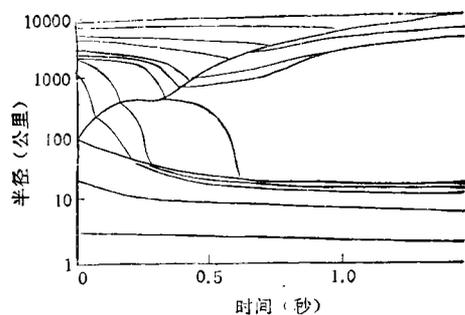


图3 超新星的起爆过程

图中纵坐标(对数)表示星体沿半径(核心在下方)的不同位置; 横坐标为时间, 上面一根黑粗线为冲击波前随时间变化的轨迹, 下面粗线是形成的原始中子星表面的变化轨迹, 细线为距离星体中心不同距离的物质随时间的运动轨迹。可以看出在冲击波形成后约半秒之内, 星体已经明显地分为两部分: 在 $R \sim 1500$ 公里以内的物质最后落入核心, 成为中子星的一部分; 而在此半径以外的物质则被冲击波推出, 冲击波波前的折点反映了中微子的作用, 若没有中微子的能量沉积, 冲击波将无法推出外壳, 整个星体将演化为黑洞。以上是美国Livermore实验室计算结果。

弥散的蟹状星云和其中的中子星正是当年一颗重星“暴烈地死亡”之后留下的东西。

### 对SN1987A超新星事件的观测

请注意, 直到现在为止, 前面叙述的那些生动的星体演化过程都还只是“理论”, 也就是说, 它是从过去的和从其他遥远星系中观察到的很不完整的一些超新星事件再综合了近代物理各方面的知识推算出来的, 它虽然凝聚着无数人类智慧和劳动的结晶, 有着极高的可信度, 但是, 在获得明确的验证之前, 它终究还是一个假设。一些重要的论点例如起爆前的中微子闪发, 爆炸后重元素的抛散……等等, 都期待着有一天能得到证明。

这一天终于来到了。

1987年2月23日格林威治标准时间上午7时36分, 一阵空前强大的中微子流扫过地球。它起源于南半球星空的大麦哲伦星云之中, 发生在人类还在茹毛饮血的16万年以前, 经历了无比漫长的时空, 从诞生地扩张成了一个直径为32万光年的大球壳, 然而, 当它扫过地球时仍那样强大, 以至于地球上刚设立不久的两个中微子探测站: 日本的神岗(Icamjokande)二号和美国的IMB同时记录下了它的讯号。中微子是极难探测的。讯号的清晰说明了脉冲是多么强大。它, 带来了在宇宙中某个“近处”发生了超新星爆发的最早讯号(图4B)。

它具有三个意义:

第一, 它不但出色地证明了超新星起爆之前将闪

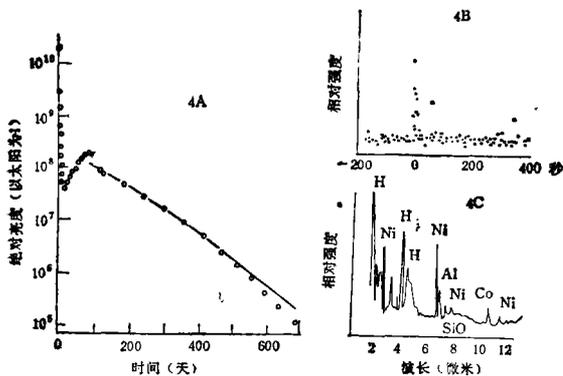


图4 SN1987A的一些观测资料

4A: SN1987A 绝对光度随时间的变化。圆点为测得结果，黑线为总量 $\sim 0.08M_{\odot}$ 的 $Co^{56}$ 的衰变释能曲线，500天之后的偏离是由于 $Co^{56}$ 能量开始直接泄出，不再转为光能；

4B: SN1987A 闪发时(1987年2月23日-160,000年)日本“神岗”中微子探测器接收到的中微子脉冲信号；

4C: 1987年11月，爆发约250天以后开始被測到的，从星体内部抛出的重元素的红外谱线(NASA 机载摄谱仪摄得)。

发中微子的预言，而且从测得的信号强度可以算出SN1987A 释放的中微子总能量为 $3 \times 10^{53}$  尔格，恰相当于一颗质量为 $1.6M_{\odot}$ 的中子星的结合能。

第二，它在宇宙中走了16万光年之后，仍超前于光讯号这一点，给中微子的质量(如果它具有质量的话)定了一个上限： $m_{\nu} < 16eV$ 。这对基本粒子理论、宇宙论以及争论不休的“宇宙物质缺失”等问题，都给出了重要的参考。

第三，它的时间和能量分布也对超新星爆发时的温度和前面讲的、在星核内的扩散过程给出了重要信息。

遗憾的是，中微子讯号并不能给出超新星在天空的方位。

同日上午9时左右，一位新西兰的天文爱好者曾偶然地观察过SN1987A 应出现的位置，但还未见异常。又过一个小时，在一张澳大利亚天文学家所拍的底片上，才看到最初的增亮。真正有幸第一个用肉眼看到它的是一位在智利天文台工作的加拿大天文学家谢尔顿，当他对照两张大麦哲伦星云的例行照片时，发现刚拍的一张上多一个白点。他曾疑为底片上的尘埃；但当他走出暗室向天空望去时，他就成为自1604年以来第一个用肉眼看到超新星爆发的人。

在大麦哲伦星云中终于出现了百年不一遇的超新星了！电波飞向世界各个角落。不到一天，南半球几乎所有的天文设备都指向这个位置。在此后不到一年之间，人类使上了所有的手段：卫星、火箭、汽球、高空飞机……对它进行了极为详细的、全面的观测，一直

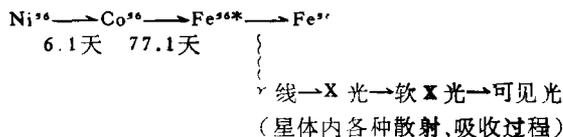
延续到现在的大量观测获得的结果既验证和增加了我们对这一宏伟的天文事件的知识，也给我们带来了不少希奇的、尚无法弄清的疑问。

人们看到了什么呢？这里只能讲些最主要的。

首先是紫外光闪发：它应该是冲击波到达星体表面、星体爆炸的起点。遗憾的是，由于大气层透不过紫外线，而卫星取向又迟了点，错过了时机，只摄下了紫外光的“余辉”。从所得到的光谱和此后获得的间接反射信号综合分析，大体结果为：(一)紫外闪发大约发生在中微子闪发的两小时之后，也就是那位新西兰天文爱好者观察这个方位的前后；(二)闪发发出的波长很短，表明冲击波到达表面时温度仍然很高，约在 $10^6K$ 左右；(三)巨大的多普勒频移说明星体表面起爆的速度不小，约为3万公里/每秒。这一切，又和它的前身不是红巨星而是兰巨星相一致，兰巨星比红巨星小得多。如果它是红巨星，则冲击波穿透星体所需的时间要长得多，自中微子闪发到表面起爆应相隔一到两天，表面的温度和飞散速度也不会这么大。

紫外闪发之后最直接的信息便是星体光度的变化。它如图4A所示，最初的光能来自冲击波；它的变光曲线虽然很典型，但其绝对亮度比标准的II型超新星要低，这也和它的原始体积较小相一致。

在约一个月之后，由冲击波能量提供的光慢慢减少了，但在可见光谱段中星体反而越来越亮，在5月20日左右达到又一个极大。这一极大是由星体内部放射性衰变引起的，其中最主要的是 $Ni^{56}$ ， $Ni^{56}$ 是冲击波引发的核反应造成的；它以下列衰变形式把能量转化为光：



6月到8月之间，星体的光度精确地按照 $Ni^{56}$ 衰变的规律变化，但是，不要忘记这时星体正在炸开，所以，可以预期，它深层的各种物质和辐射将慢慢地暴露。果然，8月间，日本的“银河”和苏联的“和平”人造卫星都检测到了衰变图中由 $Fe^{56}$ 的 $\gamma$ 射线转化的X光；它的谱形和理论推算值符合得很好。到12月，“太阳丰年”卫星最后看到了“主人翁”的出场：它上面的 $\gamma$ 谱仪直接测出了 $Co^{56}$ 的核辐射，这表示在星体最深处东西已经“翻出来”了。由亮度变化计算得出： $Ni^{56}$ 的总量约 $0.08M_{\odot}$ ，也与原模型的推算值一致。

从超新星内部抛出来的其他各种重元素不易直接测到，因为它们所发的光经过外层物质的强烈吸收后特徵谱线已难以辨认；有幸的是它们的红外谱受影响不大。大气层吸收红外谱强烈；但是，从11月起，美国宇航局的机载红外望远镜从12000米高空上对它摄取的红外谱上找到了大群的元素谱线： $Fe, Ni, Co, Ne,$



# 我是怎样喜欢上物理的

22届国际物理奥林匹克  
竞赛金牌获得者 夏磊

我从小学起,就比较喜欢数学,上初中以后,有了物理课,也就自然而然地对物理产生了浓厚的兴趣。

而我真正迷上物理,还是高二的事。高二时,我们开设了选修课,我选学了物理实验。虽然每周只有一个下午的选修课,但它却使我一下发现了一个新天地。主持选修课的刘连生老师很重视对实验设计的训练,特别突出了实验中严谨、细致作风的培养。也许正是这种严谨、细致的要求,恰恰与我沉稳、耐心的性格相符。因此,我在实验中能够比较得心应手,从中获得了很大的乐趣。这时,我才真正领会到了学物理的快乐。

然而,要学好物理,就像学好其它学科一样,也是要付出艰苦劳动的。能有这一点认识,我要特别感谢我的数学老师史连生老师。史老师反复教导我们:“人之初,性本惰”。人总是贪图安逸,不愿进行艰辛的劳动。只有树立远大的目标,才能从主观上克服懒惰的

Na, Al, Ar, S, Mg, S, Cl, K, Ca.....这些在超新星里面合成的重元素,现在正以每秒几千公里的速度被抛入太空.....(图4C)

随着星体的飞散,人们正以急切的心情等待着那最后、也是最精采的一幕:中子星的出现。然而,直到目前为止,还没有得到关于中子星的直接观测结果。星体物质虽已扩散,但对于观察中子星——射电脉冲所在的频段仍是相当不透明。1989年的一则报道后来被证明是错的。所以,目前暂时只能寄希望于最容易看到的间接信息:由于中子星输出能量引起的光度变化“拉平”。当然,人们并没有放弃直接观察的努力,但,也许还要再等一段时间。这就算是一个待解决的“谜”吧。当然,还有很多观察到的、令人迷惑不解的现象,就不再在此列举了。

\* \* \* \*

正如本文开头所写,与宇宙相比,人类是极其“渺小”的:他的一生只及星的一生的十亿分之一;他又是那么脆弱,宇宙尺度的温度只要变化  $10^{-10}$ ,他就会化为乌有。然而,人类又是极其伟大的:就在这短如电光石火的生命区间,居住在这与宇宙尺度相比只有  $10^{-16}$  的“微尘”之上,他所掌握的科学知识却能伸向那无限广阔的时空,对那远在几百万光年之外,长到亿万年的时间、高到几千万度的星体深处进行探索,把那相对“无知”,完全按自然规律演化的现象了解得瞭如指

思想.要取得出众的成绩,必须付出超人的努力.在科学研究中,“容易”获得的成果早已被取得,要想再取得进步就必须付出更多的汗水,去挖掘更深层次的内容.学习同样是这样,要取得平平的成绩并不难,要想学得比别人好,就必须付出多于别人的劳动,克服更多的艰苦和困难。

喜欢物理的同学不少,但并不是每个喜欢物理的人都能学好的。不少同学在学习中不肯付出更多的努力,遇到困难时,没有足够的毅力去克服,这样怎么能获得好的成绩呢?我在学习过程中也不可避免地遇到过“困难期”。在这段时期,平时觉得很有趣的物理似乎不具那么大的吸引力了,心中总想多休息休息。这期间,确实尝到了学习的“苦”。但是,我用史老师的话来鼓励自己,努力克服懒惰的思想,终于越过了这段艰苦时期,物理学习有了较大的进步。对一般的题目能比较得心应手了,而对于比较难的题目也有了进行钻研的基础。在钻研的过程中,我往往又获得了更大的乐趣,这激励着我去学习更多的物理知识。虽然要取得每一点进步都必须付出艰苦的努力,但总有一股力量鼓励我前进,那就是我对物理越来越深的热爱。物理学是一个极具魅力的世界。我们每一个热爱它的人都应当努力奋斗,为物理世界添砖加瓦。

掌。仅这一点,能不使我们作为人类之一员而感到骄傲,使我们更加珍惜这个使人类有异于物类的无价之宝——良知和科学,而为它去奋斗吗?

[注1] I型超新星和II型超新星性质完全不同。目前普遍认为I型超新星原来是双星系统中的一颗已燃到C→O并已“死亡”的白矮星由于不断聚集其伴星的物质,最后使得总质量超过3C→O的“燃点”而引起的爆燃(deflagration,不是爆炸denotation)所致。爆燃所释的能量约  $2 \times 10^{51}$  尔格,超过了星体的结合能,因而导致星体飞散。

[注2] 电子简并态并不一定要求绝对零度,只要介质的环境满足  $KT \ll \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{N}{V}\right)^{2/3}$  条件,简并态即可实现,式中K为波尔兹曼常数,N及V分别为粒子的总数和总体积。因而,在星体内部的高压下,只要V够小,即可在高温下进入简并态。

[注3] 关于物质是永远可以被压缩的这点,有一个很简单的证明。我们知道声波在介质内传播的速度为  $V_s = \left(\frac{dP}{d\rho}\right)^{1/2}$  式中P及ρ为压力和密度,故  $\frac{dP}{d\rho}$  就是介质的压缩系数,根据相对论的一般原理,声速  $V_s$  不能超过光速c。  $V_s = \left(\frac{dP}{d\rho}\right)^{1/2} < c$

故  $\frac{dP}{d\rho} < c^2$ 。其物理意义就是物体永远可被压缩,实际上还可进一步证明  $\frac{dP}{d\rho}$  上限不能超过  $c^2/3$ ,这里不赘述了。