

恒星炼金房

□ 文 何锐思 (Richard de Grijs) / 翻译 程思淼



何锐思
(Richard de Grijs)

北京大学科维理天文与天体物理研究所 (KIAA) 教授, 国际天文学联合会天文发展办公室东亚分站负责人。

对于质量比太阳大很多的恒星来说, 它们会在一场壮观的爆炸——超新星爆发——中结束自己的生命。最近, 在绕日轨道上运行的开普勒望远镜第一次通过可见光捕捉到了这场辉煌焰火开始的一刹那 (内部爆炸的激波在这一刻穿过恒星表面), 也就是天文学家称之为“激波突破” (shock breakout) 的时刻。一个国际科研团队分析了“开普勒”三年多来每隔30分钟拍摄的500个遥远星系中50万亿颗恒星的星光, 最终找到了这一决定性的时刻。

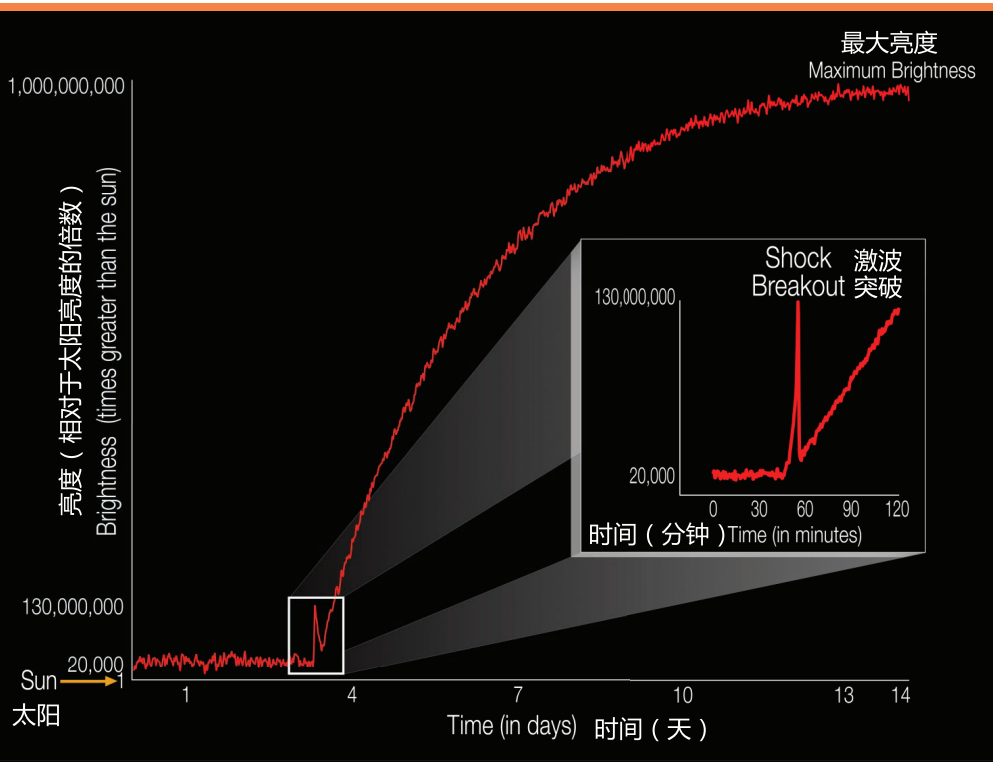
2011年, 两颗大质量红超巨型星在“开普勒”的视野中爆发。其中第一颗编号为KSN2011a, 约是300倍的太阳大小, 距我们7亿光年远。第二颗编号为KSN2011d, 大约是500倍的太阳大小, 距离我们12亿光年左右。

“这样说也许能让大家对它们的大小

有个更直观的概念: 把地球绕太阳公转的轨道放进这两个庞然大物的肚子里, 都还绰绰有余。”美国圣母大学天体物理学教授、领导本次分析工作的彼得·加尔纳维奇 (Peter Garnavich) 说。

无论是空难、车祸还是超新星爆发, 要捕捉事件突然发生的一瞬间都是十分困难的, 然而一旦成功, 它将极大地帮助我们理解事件发生的根本原因。由于长期稳定地监视同一块天区, “开普勒”终于等到了这样一个机会, 让天文学家看见了超新星激波到达恒星表面的那一瞬间。这一激波突破过程只持续了短短的20分钟, 因此, 抓住这闪光的一瞬, 对天文学家来说, 实在是研究上的一个重要的里程碑。

“就像警察在某些事件发生后调取罪犯的监视记录一样, ‘开普勒’也把每颗恒星的亮度变化记录在案, 这样我们就能够查明, 在来自星核的激波到达恒星表



▲ 一次超新星事件的亮度（随着超新星解体膨胀）随时间的变化示意图，以太阳为参照。这是激波突破（即，超新星爆发的激波从星核到达恒星表面的那一刻）首次在可见光波段被观测到。超新星KSN2011d的这次爆发式的死亡共花了14天达到它的最大亮度。而它的激波突破过程只持续了20分钟（小图）。[来源：NASA Ames/W. Stenzel]

其中半径较小的超巨星那里，并没有看到激波突破的现象。科学家认为，这可能是由于该星周围包裹着大量气体——激波到达恒星表面时被它们遮住了。

“这些结果让人摸不着头脑，”加尔纳维奇说，“你观察两颗超新星，却看见不同的事情。这是最离奇的。”

这支来自澳大利亚国立大学与美国圣母大学、太空望远镜研究所(STScI)、加州大学伯克利分校和马里兰大学的国际研究团队仅在490倍太阳半径的那颗较大的恒星上看到了冲破恒星表面的激波：在爆发的最初几天亮度出现了一个小的峰值。而在280倍太阳半径的较小的超巨星那里，却看不到激波的迹象，虽然激波肯定是存在的，布拉德·塔克尔说。

根据他们的研究，这颗280倍太阳半径的较小的超巨星有着强烈而且不是很透光恒星风，因此，激波在到达恒星表面之后，在厚重的星风中继续将它的机械能转化为光能，而使光变曲线形成了一个比激波突破造成的尖峰要宽得多的微小隆起（见下图）。

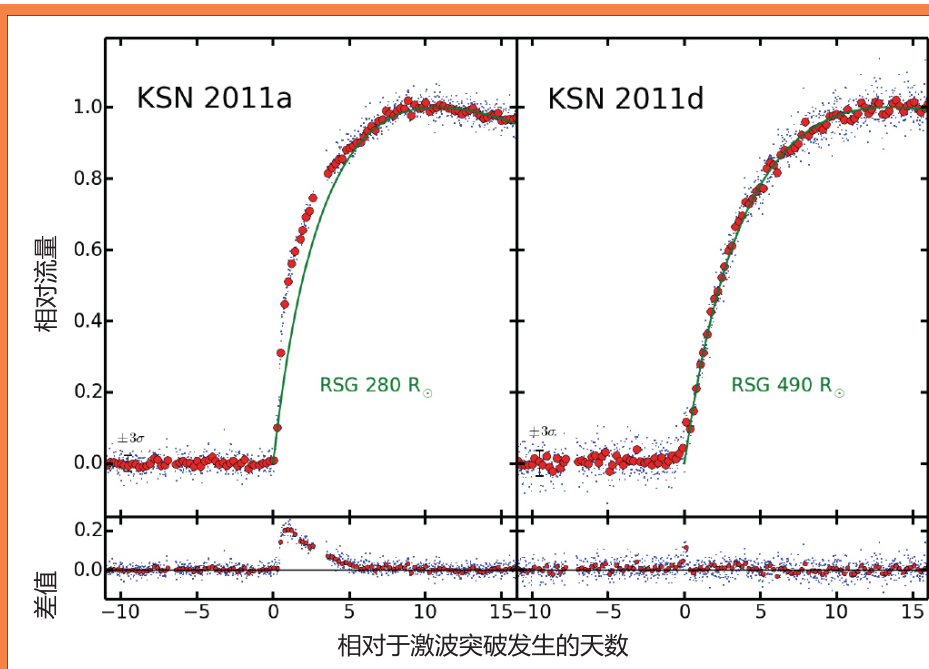
面的那一个小时里到底发生了什么。”美国马里兰大学助理研究员、本次研究的合作作者爱德华·沙雅(Edward Shaya)说。“这些事件(指超新星爆发)太明亮了，整个星系的亮度都因此发生了可观的改变。”

这一类的超新星被称为II型超新星。它们是当恒星内部的熔炉耗尽了核燃料，于是在引力的作用下，星核向内塌缩的结果。当恒星的星核塌缩成一颗中子星之后，就会形成从星核向外反弹的激波。激波携带了大量的能量向外扩散，速度高达3万至4万千米/秒。激波引发的核聚变反应能够合成出诸如金、银、铀等重元素。

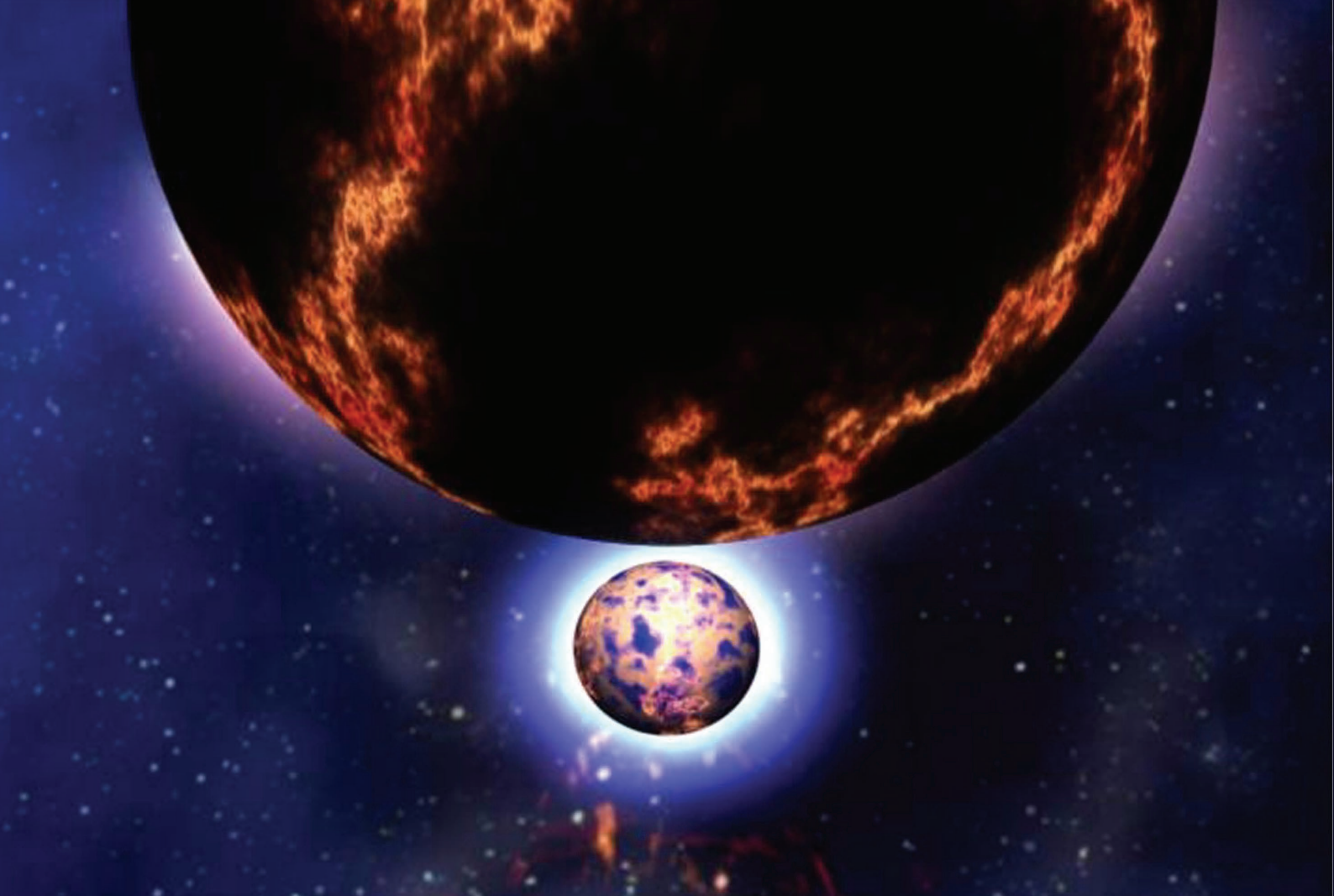
“这就好像一颗核弹产生的激波(冲击波)，只不过要强大得多，也不会炸到任何人。”来自澳大利亚国立大学天文学与天体物理研究院的布拉德·塔克尔(Brad Tucker)说。

“开普勒”这次观测到的两颗超新星与II型超新星爆发的数学模型吻合得相当好，为现有模型提供了有力支持。不过，这两颗超新星还是显示出了超新

星爆发过程中出人意料的差异性：虽然这两次爆发释放的总能量差不多，但在



▲ 上图为“开普勒”对两颗超新星亮度变化的观测结果(红点)和理论预测的曲线(绿色)，已做归一化处理。下图是两者的差值。右下图0时刻突起的点即是KSN2011d的激波突破。而在左图中，KSN2011a的激波突破被掩盖了，取而代之的是超新星膨胀前期的亮度曲线比理论预测要多出一个较宽的隆起，在左下图中十分清楚。科学家推测，这是由于在KSN2011a光球层的外面有着较为致密的恒星风气体的缘故。这些气体部分地相当于“更厚但更稀薄的光球层”，而在激波突破光球层时只一瞬间的闪光，在星风中就表现为一个缓慢的隆起。[来源：arXiv:1603.05657v1]



▲ 像金、铀和钚这样的重元素，它们是从哪里来的？目前这个问题有两个备选答案：超新星或是中子星融合。研究者通过模拟超新星和中子星融合两种情况下的重元素产出情况，使我们对原子核理论的勾画更加精确。本图是中子星融合的示意图，目前研究表明这类事件的发生极其罕见。[来源：APOD]

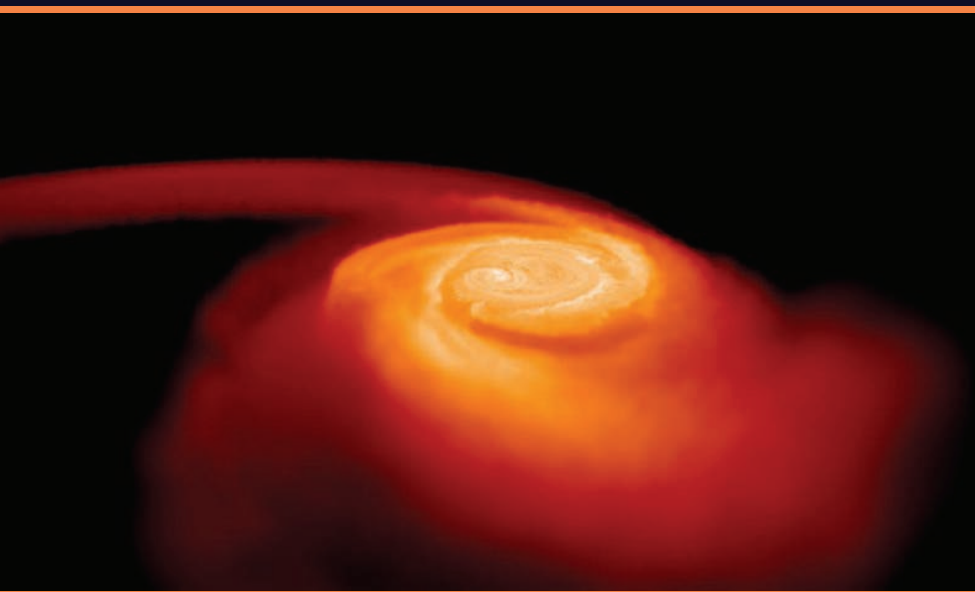
研究这类剧烈事件背后的物理过程，有助于科学家理解化学复杂性和生命的种子是如何撒播到我们的银河

系的。
“宇宙中所有的重元素都来自超新星爆发。比如，地球上乃至我们

身体里所有的银、镍、和铬就都是源于这种恒星爆发性的、壮烈的死亡。”“开普勒”及其后续任务K2的项目科学家斯蒂夫·霍威尔（Steve Howell）说。该任务由位于加州硅谷的美国宇航局艾姆斯研究中心负责。“生命因超新星而得以存在。”

“我们真实地看到了爆发的过程。”布拉德·塔克尔说，“超新星制造了我们赖以生存的重元素如铁、锌和碘，因此，我们实际上是在了解自己是如何诞生的。”

加尔纳维奇、沙雅和他们的合作作者都属于一个称作“开普勒系外巡天”（KEGS）的研究团队。目前，对于原计划开普勒项目（于2013年结束）的数据挖掘工作，他们已经快完成了。不过，随着开普勒望远镜启动新的K2任务，他们又开始在其他更遥远的星系中搜寻超新星了。



▲ 两颗中子星相撞融合时，会以0.1至0.5倍光速的速度抛射出物质。科学家认为，中子星融合是宇宙中的金等重金属的诞生地。[来源：Stephan Rosswog, Jacobs University Bremen]



▲ 核素图，其中标注了各种核素的放射性质。[来源：iStockphoto]

“能够参与到见证理论预言成为观测现象的过程中来，我感到非常激动。”沙雅说，“现在，关于激波穿过一颗超新星的表面、恒星彻底解体的这个时刻，我们有的不仅仅是理论上的解释了。”

上个月，重元素的起源成了热门的研究主题——至少在新闻媒体的报道上是如此。据报道，密歇根州立大学 (MSU) 的研究者，与来自德国达姆施塔特工业大学的同事一道，也瞄准了这样一个问题：重元素，如金、铀和钷，它们是从哪里来的？目前这个问题有两个备选答案：超新星或是中子星融合。所谓中子星融合，是指两颗体积小、质量却很大的恒星残骸（中子星）相互合并，同时抛射出大量恒星碎片。

在最近发表在《物理评论快报》(Physical Review Letters) 的一篇论文中，研究者详细描述了他们如何通过计算机模型试图给出一个答案。

“现在还没人知道答案，”维托德·纳扎列维茨 (Witold Nazarewicz) 说。他是密歇根州立大学负责“稀有同位素束流装置” (FRIB) 项目的教授，也是本次研究的合作作者之一。“但是这项工作将引导未来的实验和理论的发展。”

运用现有的数据，加上高性能计算的手段，研究者得以模拟超新星和中子星融合两种情况下的重元素产出情况。

“我们的工作显示了现有模型能

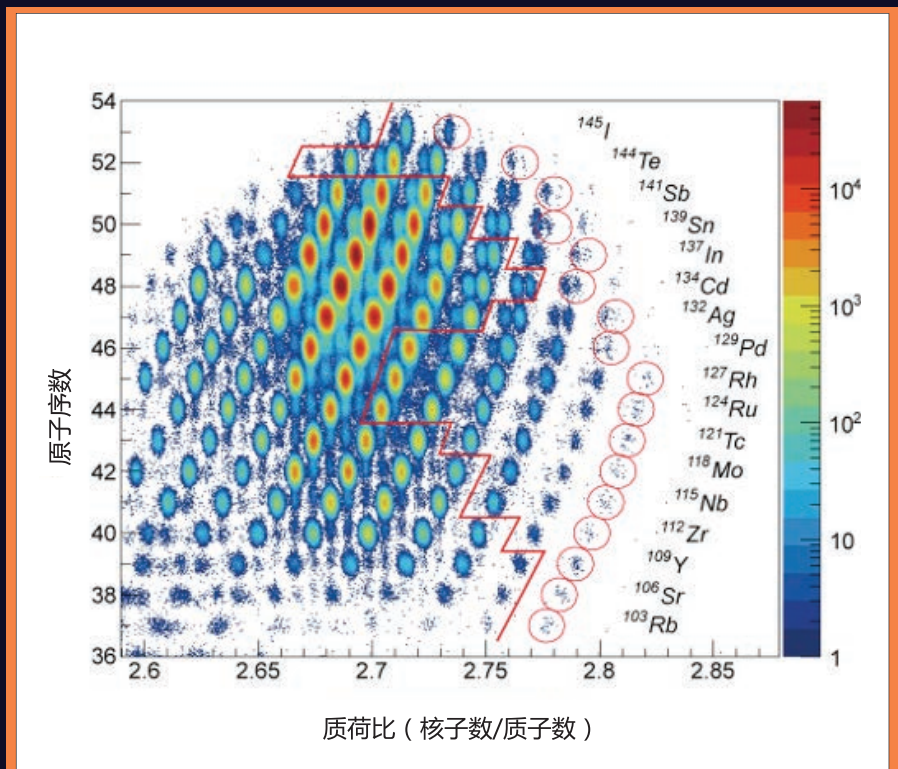
够做出良好预测的元素范围，”纳扎列维茨说，“我们能做的就是找出临界区，未来在这些临界区进行的实验，将使我们的原子核理论更加精确。”

同时，在另一篇最近发表在《自然 (物理)》杂志上的快报中，来自以色列耶路撒冷希伯来大学的科研团队得出了一个与“银河系放射性钷之谜”紧密相关的结论。地球上使用的所有的钷都是通过核反应人工制造出

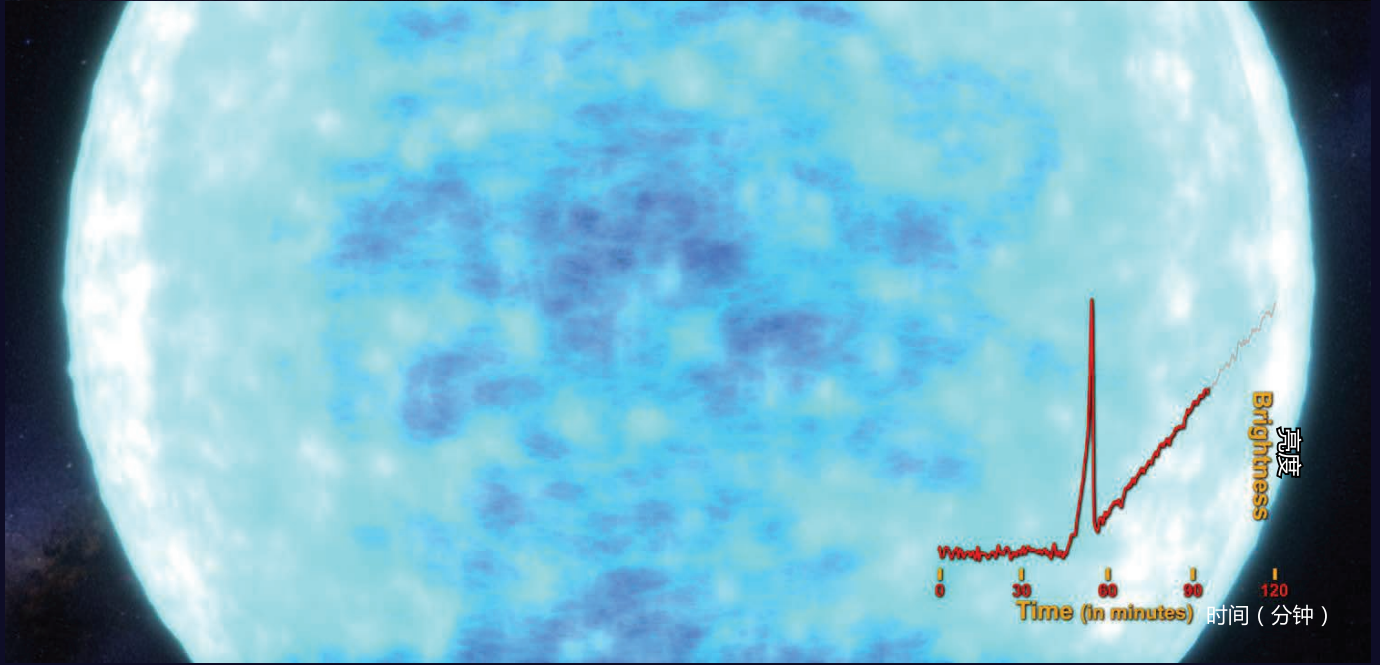
来的。不过，他们的研究表明，自然界当中也会产生钷。

“在自然界中，由基核通过‘快中子过程’ (r-过程) 产生重元素的这一过程到底是在哪里发生、怎么发生的，这是目前核合成研究的谜团之一。”耶路撒冷希伯来大学拉卡物理研究所 (Racah Institute of Physics) 的肯塔·霍托开扎卡 (Kenta Hotokezaka)、茨维·皮兰 (Tsvi Piran) 和米夏埃尔·保罗 (Michael Paul) 在他们的快报中写道。

钷是一种放射性元素。它的最稳定的同位素是钷-244，寿命为1.2亿年（寿命指衰变至剩余1/e即约36%所需的时间，不是半衰期）。在自然界中探测到钷-244，意味着这些元素是在不太早——至少相对银河系的时间尺度来说——发生的天体物理事件中合成出来的，因此，它们的诞生地离我们也不会太远。几年前科学家发现，太阳系在早期曾经有过相当丰富



▲ 核素图。图中横轴是质荷比（核子数/质子数），纵轴是原子序数。红线右边是新测量了半衰期的核素。每种元素中能够测出半衰期的最重的同位素用红圈标出。这次测量半衰期的元素范围是从铷 (Rb) 到碘 (I)。



◀ 三张示意图分别给出了激波突破之前、激波突破时与激波突破之后（超新星已经解体，开始膨胀）。由于尚未开始膨胀，当来自超新星内部的激波穿过恒星表面时，在激波强烈的冲击下，恒星的亮度会达到一个短暂的峰值。之后恒星解体并开始（相对缓慢地）膨胀增亮。

的钚-244。考虑到它短暂的生命，这些在40多亿年前地球形成之初存在过的钚-244，现在早就都衰变完了，不过科学家通过探测它衰变后产生的元素，间接得知了它曾经的存在。

但是，最近科学家对地球上沉积的钚-244含量的测量——包括对积累在地表和海底的星际碎屑的分析——却表明，近1亿年以来，从外太空落到地球上的钚非常之少。这就和太阳系诞生之初存在大量钚的观测结果相矛盾了。于是，银河系放射性钚的含量和起源便成了一个谜。

这支希伯来大学的团队的研究表明，如果放射性钚（以及其他稀有元素，如金和铀）的起源是双中子星融合，这一观测上的矛盾便可得到化解。这种融合事件极其罕见，但该研究认为，它们能产生大量的重元素。据他们建立的模型推测，大约在太阳系形成之前1亿年，太阳系附近碰巧发生了一次这样的融合事件。这使得太阳系早期的钚-244含量相对较高。另一方面，今天从太空中降落到地球上的钚-244较少，只是因为这样的融合事件太罕见罢了：最近1亿年太阳系附近没再发生过类似的事件。

差不多在同时，去年，日本最大的综合研究所“理化学研究所”（简称“理研”，即RIKEN）通过下辖的RIBF加速器精确测量了110种核素的半衰期——其中有40种是之

前从未被测量过的（RIBF是目前世界上产生奇异原子核最有力的设备之一）。这些核素位于目前已知核素图的边缘，虽然寿命很短（只有毫秒量级），但它们还是在宇宙的化学组成上留下了自己的印记。

这项去年发表在《物理评论快报》上的研究，在为神秘的天体物理“r-过程”的理论模型提供实验基础方面，迈出了一大步。科学家认为，正是“r-过程”制造了宇宙中重于铁的很多元素。事实上，天体物理学上的“慢中子过程”（s-过程）已经很好地解释了宇宙中大约一半的重元素的产生。慢中子过程是指捕获慢速中子而产生更重原子核的核合成过程。当被捕获的中子通过 β -衰变变成一个质子，同时放出一个电子，一种新元素就诞生了。

而r-过程则只能在极端的条件下发生，如超新星核塌缩成中子星，释放出巨大的能量之时。在这一富中子的环境下，原子核吸收中子而变得越来越重，然后经过一次 β -衰变成为元素周期表上下一位的元素。就这样，原子核在周期表上不断前进，产生出越来越多的新元素。

在极短的时间里，参与这一过程的核素有数百种。如果不知道每种核素的精确的半衰期（也就是它们多快释放出一个电子），就很难建立精确的模型，来刻画这个制造了我们今天看到的各种元素的极端

过程。

尽管我们对这一复杂过程的认识已经有了相当的进步，但是现在的理论仍然无法圆满地解释在恒星中发现的各种元素的丰度，创造更好理论的工作依然在进行。

据领导此项研究的理研（RIKEN）博士后研究员朱塞佩·鲁索（Giuseppe Lorusso）说，“探索核素图的未知区域、发现之前从未有人测量过的核素的半衰期，这非常令人兴奋。这些数据使我们能够更加接近核合成的真相。有了这些新的实验数据，r-过程产生的元素丰度的计算结果与观测结果之间一些长期以来的不一致消除了，这表明最新的模型也许真的抓住了r-过程中关键的物理。”

这一发现也带来了一个惊喜。

“我们发现，”他继续说道，“用我们的测量提高了核物理理论的精确度之后，在宇宙早期诞生的那些非常年老的恒星中，诸如锡、铟、碘、铯这些元素之间丰度的不同，就可以看作是由r-过程条件的不同造成的。这就打开了这样一种可能性：我们可以通过观测元素在这些恒星中的分布，来了解当时发生r-过程的确切环境。”

对于宇宙中最大质量的恒星内部发生的这种剧烈的物理过程，通过结合天文观测和实验室的实验，我们可以产生相当有用的新见解。这尤其让我着迷！■

（责任编辑 冯翀）