

的分子机器。从70年代起,基因工程或重组DNA技术问世,并发展成为蛋白工程。从1985年以来,又开创了催化性抗体或抗体酶和聚合酶链反应两种很有前景的合成技术。

今天,化学家如要在分子水平上从事生命科学的研究时,切忌回避生物大分子的作用。在加强功能意识的基础上,化学家从事结构生物学是有优势的。化学必须积极对待分子生物学中开拓出来的各种合成技术。

材料的门类很多,物质类型的跨度也大,材料的用途更是五花八门。因此,材料科学的范围很广,方面很多,又各具特点,从而对其整体性不可苛求。值得重视的是,比起化学家对待一个化合物来,材料科学家看待一个材料时的功能意识要强得多。在化学学科内从事高分子材料和精细功能体系是很有优势的。

六、关于化学发展道路感想

化学学科的传统工作是从整理天然产物和耕耘周期系来发现和合成新化合物,并弄清它们的结构和性能以及有关的反应条件等。化学的学科系统就是这样逐步建设起来的。这样的学科系统离建成还差得很远,这个模式肯定还

需要继续下去。已知化合物越积越多,肯定也会筛选出一些有用的新物质,而且这样做也会带动联系制备和结构之间关系的理论,工作的成效也会跟着提高。

从另一方面来说,当前化学学科的发展水平已有较大提高,同时也面临着新的需求,化学学科的建设工作如果局限在这种模式上,未免有点作茧自缚。首先,能否逆向而行,即根据所需性能来设计结构,并进行制备?这种做法好处很明显,并体现了较强的功能意识。其次,目光不要盯在单个化合物上,而要把着重点放在复杂一些的体系上,就凭在这两点上变通一下,就会对化学的发展道路产生较大的影响。化学会更多地致力于贯通性能、结构和制备三者之间关系的理论。化学也会注意生物或工程技术性能,而不会只考虑分离和表征组分的性能了;它就会更多地关心分子结构以外的结构类型和层次;它也不会把制备工作过多地局限在合成单个化合物上了。

我曾在其他场合谈过分子工程学的学科建设问题,在此不再赘述。但我需要强调一下,任务能不能‘带’学科,除了其他因素外,学科意识强不强往往是关键之所在。

核 天 体 物 理 学*

——核物理和天体物理的相互影响(II)

王荣平 (Rong-Ping Wang) 吕南姚 (Nan-Yao Lu)

冯达璇 (Da Hsuan Feng) Friedrich-Karl Thielemann

4. 慢中子俘获过程

直到现在,一个显而易见的问题是象锡、稀土族元素以及铀素等这些比铁还重的元素是如何形成的?结果证明是,这些元素的形成不可能是前面我们已经讨论过的带电原子核间的聚变过程。它们是通过一系列中子俘获和 β 衰变过程(分别简记为“s-过程”和“r-过程”),现在

物理

我们来讨论它们是怎样的过程。要克服重原子核的库仑位垒所需要的温度超过 $5 \times 10^9 \text{K}$,如此高温之下将产生许多高能光子,它的效果是引起更多的光致裂变反应而不是结合成重原子核(参看关于II型超新星的讨论)。因此,重于

* 本文原稿为英文,由南京大学天文系彭秋和翻译。

铁的元素主要是通过铁族元素作为种子核的中子俘获过程来产生。在氦燃烧(典型动能为 30 keV) 时,由于在 ^{22}Ne 和 ^{13}C 核的 (α, n) 反应中产生的热中子是 s-过程的主要中子源,很低的中子丰度导致 $\tau_{n,\gamma} \gg \tau_{\beta}$, 即两次接连俘获中子的时间间隔远远长于所涉及的不稳定核的 β 衰变半衰期。这个条件将确定 s-过程沿着 β 稳定的路径,正如图 5 所示。这个过程可以简要地描述如下。一个种子 ^{56}Fe 核,受到中子流的

辐照,俘获一个中子形成 ^{57}Fe 。这个同位素对于 β 衰变是稳定的,所以它将俘获另一个中子。如此方式生成的同位素序列将继续下去,直到形成短寿命的 ^{59}Fe 。此时 $\tau_{n,\gamma} \gg \tau_{\beta}$ 成立,因而 ^{59}Fe 立即衰变为稳定的 ^{59}Co 。随后的中子俘获将以 ^{59}Co 作为中子核再重复上述过程以产生更重的核素。这个过程将一直持续到 ^{210}Bi 核,它是对于 α 衰变而言的不稳定性,因而回旋式地将返回到 ^{206}Pb 。s-过程在这个时候终止。

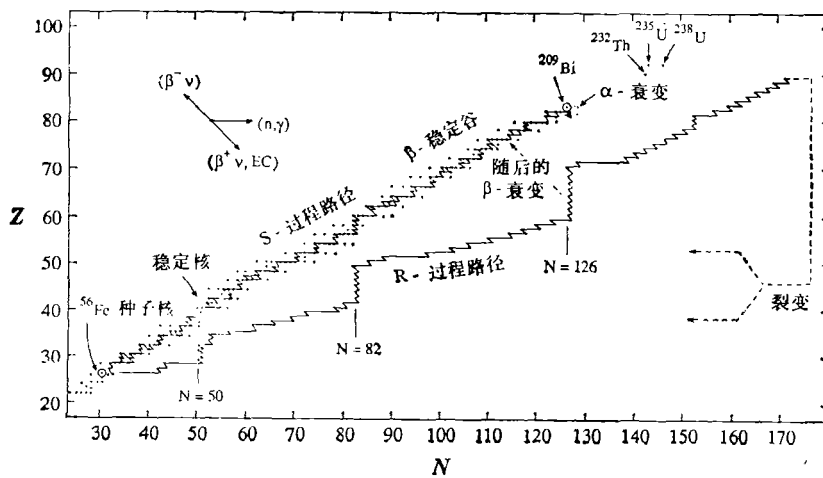


图 5 核合成过程行进的路径的一部分和其特征(图中标出了 s-过程和 r-过程,经 Georgetown 大学的 William Rodney 允许,这个图取自文献[1]的图 9.13)

显然,为了使 s-过程得以进行,必须具有中子丰富的环境。在氦燃烧阶段, α 粒子的丰度很高,具有很大的 (α, n) 截面的原子核反应只有 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 以及 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 。 ^{22}Ne 是在氦燃烧中通过 ^{14}N 核(它是在 H 燃烧中从 CNO 核留下来的,参看前面的讨论)俘获 α 粒子形成的,其反应过程为: $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(\beta^+)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 。 ^{13}C 只能产生于中介质量恒星在 He 壳层燃烧期间的热脉动状态。这时 ^1H 被混合到 He 层中去: $^{12}\text{C}(\beta, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$ 。当这种恒星的外包层被吹散而形成行星状星云(参看前面讨论)时,大多数 s-过程核被抛射到星际介质中。从实验结果人们知道, 30keV 的热中子的平均中子俘获截面大约为 0.1 靶。在 β 稳定谷附近,原子核的典型的 β 寿命为几秒钟。所以,当要求 $\tau_{n,\gamma} = (n_a \cdot \sigma \cdot \nu)^{-1} \gg \tau_{\beta}$ 时,经过简单计算容易估计出 s-过程中的中子密度不会高于

10^{10}cm^{-3} , 更典型的值 10^6cm^{-3} 。具有幻数中子,而且 (n, γ) 截面很小的稳定的原子核的观测丰度有很锐的峰值,这强烈地表明存在着这种过程。

5. 快中子俘获过程和 II 型超新星

在观测到的元素分布中可以看见,在 s-过程峰值的前面大约 8—12 个质量单位处,存在着一些很宽的峰,通常解释为 r-过程核合成。实际上,比 ^{209}Bi 更重的那些核素以及重于铁的元素的一半左右都是由于 r-过程形成的。同 s-过程相反, r-过程需要非常大的中子流量,其典型的密度为 10^{20}cm^{-3} 或更多。在这样的环境中,种子核可以经历非常迅速的中子俘获过程,即 $\tau_{n,\gamma} \ll \tau_{\beta}$, $\tau_{n,\gamma}$ 的典型值的量级为 10^{-4}s 。按定义,中子俘获是沿一连串同位素组成的序列。如果这个序列到达某个同位素时,或者它具有相对更短的 β 寿命,或者在这个核素上的

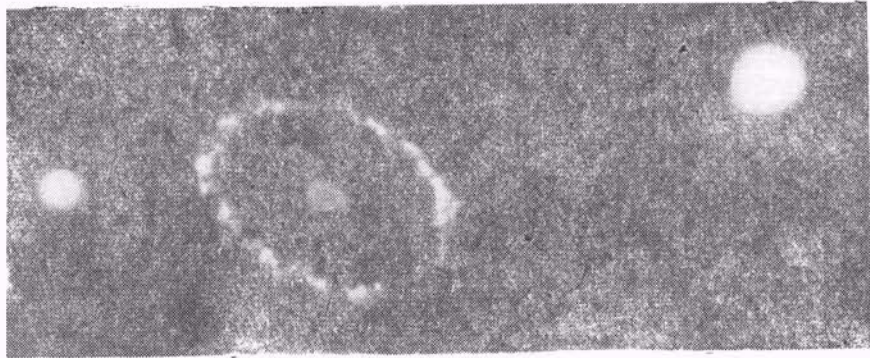


图6 SN1987A 的光学照片(摄于它爆发后一年左右, NASA 提供的照片)

(γ, n)光致裂变反应快于中子俘获反应,这个中子俘获序列就中止。其中后一情况通常出现在质量数超过稳定的同位素大约20—30左右。图5中所示的r-过程路径通过远离 β 稳定的富中子核区,它是在所谓等候点近似(WPA)之下得到的。对于一个同位素链,这个近似是假定 $\tau_{\alpha, \gamma}$ 和 $\tau_{\gamma, n} \ll \tau_{\beta}$,以至于在发生 β 衰变之前就达到了一种平衡的丰度。它导致在同样的中子分离能中出现丰度分布的一个极大值,这就要求中子密度和温度(光子的能量)都很高,典型值分别为 $n_n > 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 和 $T > 10^9 \text{K}$ 。

实际上,人们预料R-过程核合成是象超新星1987A(见图6)那样的II型超新星的直接结果。天体物理学家相信,这些非常壮观的天文事件确实在恒星最里面而且中子丰富的抛射层内提供了r-过程核合成场所。在这样高的密度和温度下,就r-过程等候点近似的条件是满足的。被抛射物质的不同部分中子密度或许不同,所以会沿稍微不同的r-过程路径进行。在 β 稳定线和中子滴出线之间的许多原子将参与r-过程核合成,参与过程的原子核数目从3000到7000不等。不同的原子核质量公式预言这个范围的数目不同。显然,建立一个微观上合理可信的质量公式是摆在对天体物理学感兴趣的核结构物理学家面前的一个迫切的任务。当环境中的中子密度和温度下降到某些临界值之下时,r-过程将被冻结住,已合成的原子核然后通过 β 衰变回到稳定的元素。所以,几乎所有的锕系元素,包括称之为年代计的 ^{232}Th , ^{235}U 和 ^{238}U 就被合成了,这三种核素的 β 半衰期分

别为 1.4×10^{10} , 4.47×10^9 和 7.04×10^8 年。当前,低质量II型超新星被认为对r-过程作出最重要的贡献。

三、未解决的问题,评注和展望

自1957年以来,人们对恒星演化和重元素的起源逐步有了深刻的了解。事实上,恒星演化的早期阶段以及核合成或许属于天体物理学家今天了解的最好的领域。在我们的简短讨论中,我们最多只是沿着恒星演化踪迹提供了核合成的概要。略微修改一下图象就给出较后几代恒星的演化和核合成。确实,s-过程和CNO循环就只能发生在以后几代恒星中,它们已经含有象C,N,O等较重的元素。要给出这个迷人领域有关的所有观点,无疑地超出了这篇短文的范围。我们鼓励那些有兴趣了解更多内容的读者去阅读我们仔细地选择和引用在本文末尾的一些合适的书和研究论文。如同所有的科学前沿一样,核天体物理学仍然存在许多重要问题尚未充分了解。它们中的许多问题是同恒星晚期演化,超新星爆发以及r-过程有关。下面简短地讨论某些例子。

1. 关于核反应,恒星结构和太阳中微子问题

正如我们在前面已经提到的,一个核反应的速率和主要产物通常非常敏感地依赖于温度,它是由恒星内能量平衡来决定的。然而,恒星晚期阶段,特别是当对流时标接近于核反应时标时,其动力学仍然没有了解清楚。另一个需要很好的了解的是已合成的物质是如何通过

星风和爆炸事件又有多大程度地被抛回到星际介质中去,以使观测的元素丰度分布同核合成理论所预言的分布更好地一致。中子星的极大质量是多少?具有这种极大质量的核心坍缩将导致黑洞而不会引起 II 型超新星爆发。通过数值模拟计算和观测天文学,人们对这些课题正在获得新的认识。另一个仍然未解决的重要问题是同 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率有关的。它对于确定最后的铁核心质量来说是非常重要的。正如我们知道,对于大质量恒星的晚期演化阶段来说,这个量是一个关键参量。在 He 燃烧后如果 ^{12}C 被摧毁光,碳燃烧和氦燃烧就不会发生,将产生不同的 Fe-核心质量。虽然一般认为 r-过程发生在超新星事件过程中,一个有关的未解决的问题仍然是 R-过程的场所。对核物理学家来说最重要、最紧迫的挑战或许是关于核结构的全面认识以使人们能够把建立象原子核质量这样的物理量可靠地外推到不稳定核区域。

观测到的太阳中微子流量只是太阳模型预言值的三分之一左右,这个事实作为太阳中微子失踪问题已经长达 20 多年。人们并不清楚这个矛盾究竟是来自普遍接受的核物理或粒子物理失效或者仅仅是由于太阳模型中的误差?还是同时来自这两方面?一种时髦的解决方案是借助于粒子物理学,它要求三种不同味的中微子(电子, μ 和 τ 中微子)之间的振荡。由于唯一能被 ^{37}Cl - ^{37}Ar 实验探测的味是电子中微子,所以假设可能是有根据的。但是除此之外,这个假设需要中微子带有一定的很小质量,这是迄今在观测上仍未解决的问题。另一方面,太阳中微子流的矛盾可能简单地来自我们对太阳内部缺乏认识。 ^{37}Cl - ^{37}Ar 实验可探测到的是相对地能量很高的中微子,它们来自一个次要的核过程,这个过程对太阳内部的温度很敏感。新的苏联-美国 SAGE 实验和欧洲 GALLEX 实验被设计来探测低能太阳中微子,它实际上同温度无关。事实上, SAGE 的初步结果似乎倾向于即使在低能下,太阳中微子失踪问题仍然存在。我们对太阳内部的认识是在不断地

改进。类似于地震学的研究方法成功地应用于太阳,最近已经确立了太阳对流区的范围和其他性质。这种振荡的观测将最后允许我们更精确地建立太阳模型。

2. 关于超新星机制和快中子俘获过程

较重元素合成于恒星晚期演化阶段。活跃在核天体物理的许多现代研究,目的在于研究有关核反应率及其产生物,其焦点集中于研究超新星爆发附近的阶段。实验核物理在 s-过程的研究中起着重要的作用。由于参与 s-过程的核素全部都位于 β 稳定谷附近,利用许多现有的核实验装置可以测量一些个别的核反应及其反应率。考虑到观测到的天文环境,人们建立有关这些实际过程的模型,力图用它去拟合观测到的元素丰度。在另一方面, r-过程的研究需要在理论上建立一个非常庞大的,包括几乎所有可能的富中子核和超不稳定核在内的动力学网络。我们已经看到,已合成的富中子同位素通过许多核过程进一步发生反应,特别是通过 β 衰变、中子发射、裂变、中子诱导的裂变以及 β 延迟的裂变。在这个核反应网络中所涉及的一些关键物理量包括中子俘获截面、 β 衰变的半衰期以及裂变位垒在内的所有核过程参量。目前,在计算中子俘获截面时,最普遍利用的模型是 Hauser-Feshbach 统计模型。这个模型需要知道原子核的光学位势,关于 γ -分宽度的巨偶极共振参量,能级密度参量以及反应的 Q 值。在过去 30 年内,核物理学家对许多核反应通道的光学位势已经进行了大量深入的分析。同样, γ -分宽度问题也或多或少地合理解决了。目前最薄弱的环节或许是能级密度和 Q 值。这些量是原子核的基本性质,可以直接从原子核的质量推断出来。过去,利用宏观的液滴质量公式,天体物理推断出银河系的年龄约为 $1.2-1.5 \times 10^{10}$ 年,似乎同天文观测相符合,是合理的。最近,核物理学家已经集中于开展核过程的整体微观性质的研究。这种努力的结果之一是根据原子核壳层模型的基本有效相互作用从微观上计算了有关原子核的质量。值得注意的是,用这种方法计算原的质量已经最为

精确地描述了原子核的形变和 β 半衰期。

核物理学的传统课题在于集中研究超重元素。实际上所有的原子核模型都预言存在一个稳定的或长寿命的超重元素岛，它大约位于 $Z = 114$ 和 $N = 164$ 的位置上。但是直到今天，也没有发现它们存在的证据。核物理学家现在正力图利用 r -过程来解释这个谜。一种猜测的图象如下：当 r -过程进入到 r -系区域时，沿“ r -路径”上的原子核逐渐变得容易裂变，一直到达某一个区域，其中 β -延迟的裂变率接近100%，这个区域阻止通过 r -过程合成更重的原子核。不过，我们还必须从理论上准确地了解这些裂变率。由于在 r -过程核合成中 β 衰变和核裂变起着决定性的作用，因此可以完全肯定地说，在中子极为富丰的原子核裂变理论中，现有的不确定性会严重地限制我们定量地了解那些最重的原子核 r -过程丰度图案的细节。这对于(根据核计时器的研究)预言银河系年龄，可能产生很大的不确定性。

3. 原初核合成，暗物质和宇宙学

核天体物理学的另一重要方面是原初核反应的研究，这是一个面临许多新挑战的老问题。由 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 以及 ${}^7\text{Li}$ 同 ${}^1\text{H}$ 丰度的比值的观测上的限制，标准的宇宙大爆炸模型给出了重子密度 Ω_b 的上限，它大约等于临界密度(指使得宇宙刚好为封闭时的密度——译者注)。后者是所谓的暴涨宇宙模型所需要的密度。有一些方法来增加 Ω_b 。例如，原始密度中的非均匀性，它可以局部地改变中子与质子数目的比率，因而在给定的重子密度下它将会促使氦和氘的生成数量增加或减少。 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 原初丰度的观测值也使 Ω_b 的值限制在0.2到0.3之间。人造卫星“宇宙背景探测器”(COBE)的新发现，表明了宇宙微波背景辐射几乎是2.73K的理想黑体谱。而且，它在空间上相当平滑，其非均匀性在十万分之一以下。这有利于宇宙大爆炸模型，但是它却向星系形成理论以及今天观测到的大尺度结构的解释提出了严峻的挑战。

恒星是星系的“积木块”，星系又是宇宙的“积木块”。恒星结构、演化以及各种星族了解

物理

得愈清楚，将使我们对星系，因而宇宙和宇宙学就认识得更清楚。例如，暗物质和星系演化是今天最重要问题中的两个，它们正在被人们所认识。星系旋转曲线和星系团的观测要求 Ω 值近似地等于0.2，它全部是由重子贡献的(然而，它远远多于以发光的恒星形式所发现的物质)。就重子组成的暗物质而言，有两种潜在的、有希望的候选者，它们是褐矮星和黑洞。前一种星体的质量太低，以致不能够发生氢核燃烧。后一类天体是大质量恒星死亡后的残骸。褐矮星的质量上限同它们的化学成分有关，而黑洞的质量谱依赖于我们对超新星事件的知识。恒星演化与核合成研究中的进展，明显地有益于我们搜寻由重子组成的暗物质。

星系形成无疑是当前天体物理学中最有争议的课题之一。星系演化涉及物质各种成分的动力学演化，同恒星形成过程有关的星系内温度分布，以及星际介质内不同的化学环境下产生的各种星族等问题。目前人们非常希望能够进一步了解恒星的各个晚期阶段，恒星的演化以及它们抛射物的化学成分。

4. 展望

上面所提出的这些问题的解答正是核物理学家们通过核物理实验室的实验和理论数值模

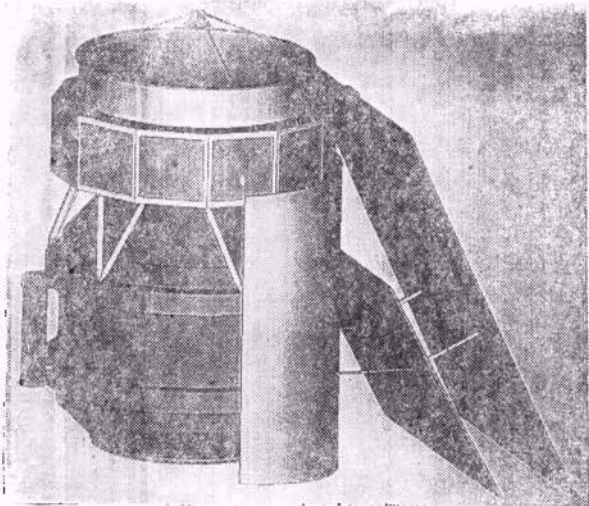
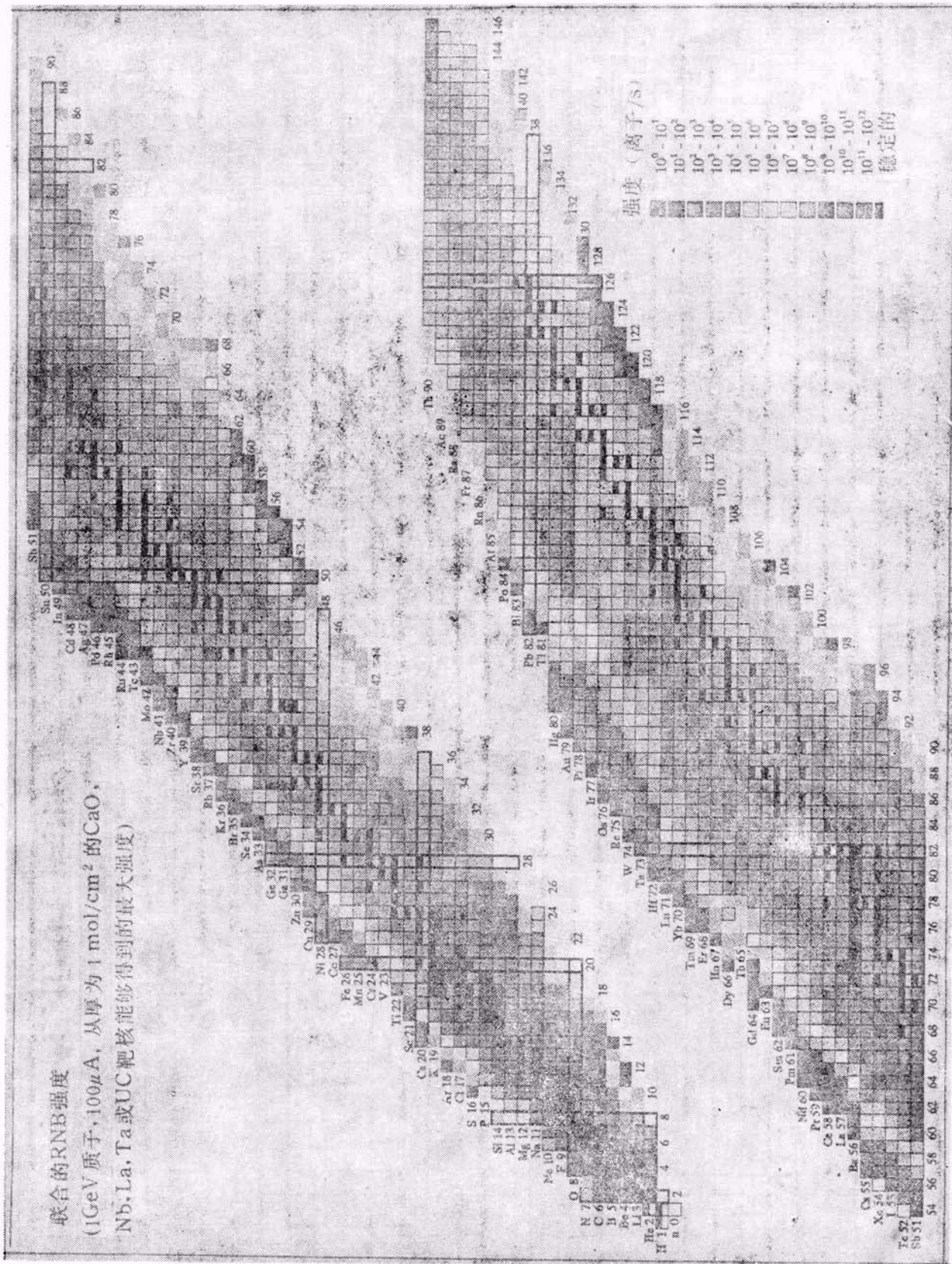


图7 空间红外望远镜(SIRTF)照片[它是一个灵敏度很高的望远镜，绕地球作轨道飞行，寿命很长(5年)，它很有希望探测到原始星系(Jet Propulsion 天文台的 Michael Werner提供的照片)]

联合的RNB强度

(1GeV质子, 100 μ A, 从厚为1 mol/cm²的CaO, Nb, La, Ta或UC靶核能够得到的最大强度)



拟正在追寻的目标。除了这些努力，天文观测正在不断地累积重要的观测资料，以便更好地认识这些问题和找到最后的答案。

80年代天文观测的许多发现，促进和加强了我们对恒星演化和核合成的认识。其中最值得注意的例子之一，是两个研究小组独立地发现了来自 SN1987A 的 20 个左右的反中微子。这项工作的重要结果是它证实了 II 型超新星爆发时释放的总能量，中微子的平均能量以及坍塌时间的理论估计。

90年代可以称为大发现的 10 年。我们可以合理地预期：人们将要采用更为迅速的超巨型计算机，许多新型望远镜将会运转，而且将建造一些新的核物理实验装置。例如，这 10 年结束前后美国将发射一个“空间红外望远镜”（图 7），它对红外波段非常灵敏，很有希望能够探测到具有很大红移的原始星系的初始核合成；哈勃空间望远镜将不断收集有关恒星在光学和紫外波段的高分辨观测资料；SAGE 和 GALLEX 的实验将采集更多的数据，太阳中微子失踪问题中的天体物理原因和粒子物理原因最后将会可靠地区别开来。这十年内全世界还要建造许多放射性束流装置。当前正在拟定中最宏伟的规划之一是在美国称之为“同位旋实验室”（见图 8 及其文字说明），大约在这十年末它就可以运行。根据这个实验室的规划，核科学家将会“制造”大量目前难以获得的不稳定原子核。这将使我们的认识大大向前迈进，可以回答现在仅仅是从理论上探讨的许多核天体物理问题。我们预料这个实验室将会有许多激动人心的发现，它将大大加强我们对宇宙演化的认识，包括对恒星演化和核合成这些基本问题的认识。所以，我们希望而且也相信，在本世纪末这篇文章将要增加许多新章节。

我们感谢 Richard N. Boyd, Rick Casten, John

J. Cowan, 韩晓林, Shigemi Ohra, Edwin Salpeter, 翁春华和吴程礼宝贵的物理见解、评注和有益的讨论。王荣平和吕南姚感谢他们在南京大学的老师和朋友。在南京大学，他们曾在一起度过了非常美满的大学生活。另外，我们感谢 Charles Penniman，他细心地两次阅读本文的手稿，感谢他在文体上对本文作了大量重要的修改。

- [1] Claus E. Rolfs and William S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos* (The University of Chicago Press, 1988).
- [2] Donald D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis* (The University of Chicago Press, 1983).
- [3] R. Kippenhahn and A. Weigert, *Stellar Structure and Evolution* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990).
- [4] *Nucleosynthesis: Challenges and New Developments*, edited by W. David Arnett and James W. Truran, (The University of Chicago Press, 1985).
- [5] *Primordial Nucleosynthesis*, edited by W. J. Thompson, B. W. Carney and H. J. Karwowski (World Scientific, 1990).
- [6] *Nucleosynthesis and Chemical Evolution*, edited by B. Hauck, A. Maeder, and G. Meynet (Geneva Observatory, Switzerland, 1986).
- [7] Joseph Silk, *The Big Bang* (Freeman and Comany, San Francisco, 1980).
- [8] K. Olive, D. N. Schramm, G. Steigman and T. Walker, *Phys. Lett.*, **B236**(1990), 454
- [9] F. Käppler, H. Beer and K. Wisshak, *Rep. Prog. Phys.* **52**(1989), 945.
- [10] D. Hallowell and I. Iben, *Astrophys. J.* **340**(1989), 966.
- [11] J. J. Cowan, F. -K. Thielemann and J. W. Truran. *Phys. Reports*, **267**(1991), 208.
- [12] X. -L. Han, C. -L. Wu, D. H. Feng and M. W. Guidry, *Phys. Rev C* (in press); Wang, R. -P., Thielemann, F. -K., Feng, D. H., Wu, C.-L., *Phys. Letters*, (1992), (in press).
- [13] P. Möller and J. R. Nix. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **39**(1988), 213.
- [14] K. -L. Kratz, J. P. Bitouzet, F. -K. Thielemann, P. Möller and B. Pfeiffer, *Isotopic r-process Abundances and Nuclear Structure Far From Stability; Implications For The r-process Mechanism*, (Preprint).
- [15] G. J. Mathews and J. J. Cowan, *Nature*, **345**- 6275, 7th, June, (1990), 491.
- [16] Marschall, L. A., *The Supernova Story*, Plenum, New York/London, (1988).
- [17] H. A. Bethe, *Review of Modern Physics*, **62**(1990), 4.
- [18] *Supernovae*, edited by S. E. Woosley, Springer-Verlag,

图 8 “同位旋实验室报告”中的图 1。这个报告是由 ISL 北美筹备指导委员会作出的，刊登在“LALP Report”，91—51，1991 上；它显现出 ISL 能够产生的一些放射性束流，当利用能量为 1GeV，流强为 100 μ A 的质子束轰击靶厚为 1mol/cm² 的 CaO, Nb, La, Ta 和 UC 时能够产生的全部同位素都被标出了；计算强度时只考虑了由放射性衰变引起的能量损失，没有包括电离、跃迁，特别没有计及靶核和离子源中的剥脱过程；对于某些同位素而言，这些未计入的能量损失可以产生显著的影响（由 Brookhaven 国家实验室的 R. Casten 提供）

- New York.
- [19] *Highlights of Modern Astrophysics: Concepts and Controversies*, edited by S. L. Shapiro and S. A. Teukolsky, John Wiley and Sons, Inc., (1986).
- [20] B. E. J. Pagel, and M. G. Edmunds, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 19(1981), 77.
- [21] V. Trimble, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 25(1987), 425.
- [22] David J. Stevenson, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 29 (1991), 163.
- [23] E. Anders and N. Grevesse, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53(1989), 197.
- [24] J. N. Bahcall and R. K. Ulrich, *Rev. Mod. Phys.*, 60 (1988), 297.

稀有气体簇的光学性质

张 志 三

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

主要叙述稀有气体簇 (rare-gas clusters) 的光学性质, 其中包括它们的光谱线的分析, 光致电离的论述, 以及某些稀有气体簇两相共存的光谱证据。

Abstract

In this paper recent progress in the study of the optical properties of rare-gas clusters is described. The main topics include the spectroscopy and photoionization processes of rare-gas clusters, and the co-existence of their liquid and solid phases.

我们可以举出许多理由来说明为什么要研究含有 n 个原子的簇。其中之一自然是想了解簇的性质是如何随 n 来变的, n 可以看作表征簇的性质的一个参量。 n 的变化范围很广, 从 2 可以变到无限大。另一理由是想在原子和固体之间的间隙架起一座桥梁, 通过簇的研究来理解固体是如何形成的。但有人认为对于这个论点还应加一点注解: 当 n 变到无限大时, 并不必然显示出块状固体的性质, 很可能在过渡中会通过一个十分令人感兴趣的新领域, 即所谓介观凝聚物质物理。

簇的研究也提供了一个新途径来制备新材料。这类新材料可能具有特殊的物理与化学性质。簇具有不同的稳定结构, 例如有 55 个原子构成的 20 面体, 也有 60 个原子构成的类似足球的形状。不同的稳定结构凝聚成的固态, 其性能不同于我们现在已知的任何物态。于是, 材料学者希望能设计出一些新型材料, 使之能具有所希望的微电子学性质、机械性质、化学性

质等。

簇的种类很多, 任何元素及任何分子都可以形成簇。当前, 在原子簇的研究中, 研究得较多的为稀有气体簇。这类簇中的原子之间的相互作用势为成对的相加性, 而且是球对称的, 这就使得对它们进行模拟变得容易些了。例如, 对 19 个氩原子所形成的簇的模拟表明: 在一定的温度范围内, 固体簇与液体簇是共存的, 也就是说它具有不同的熔点与凝固点。光谱技术可以清楚地探测出这种两相共存的现象。

在实验技术方面, 由于超声束技术的发展及探测手段的改善, 产生出来的稀有气体簇可以包含 10^6 个原子。

簇的电子结构是决定其物理性质及化学性质的重要因素。光谱技术历来是研究物质的光学性质的方法之一, 其所提供的资料为了解电子结构是必须的。事实上, 簇物理已成为理论化学、固体物理及光谱学的综合研究领域了。

在纯范德瓦耳斯簇中, 例如稀有气体簇, 由