

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.03.02

超新星 SN1987A 遗迹的尘埃

刘 悦¹, 姜碧涛¹, 李爱根²

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 美国密苏里大学 物理与天文系, 密苏里州哥伦比亚市 65211, 美国)

摘要: 超新星是宇宙中最重要的尘埃来源之一。对超新星遗迹尘埃的研究, 能增进人们对恒星演化、大质量恒星的核合成和抛射物的物理和化学演化等的了解。SN1987A 是 1604 年以来在地球上观测到的最亮的超新星, 因此也是研究超新星和超新星遗迹物理独一无二的对象。综述了 SN1987A 遗迹的抛射物和内赤道环中尘埃的种类、质量、尺寸等特性, 以及这些尘埃特性随时间的演变。如果 SN1987A 遗迹中的大部分尘埃能够存活在未被激波破坏, 而且 SN1987A 具有典型性, 那么可以认为超新星是宇宙尘埃的重要来源。

关键词: 超新星遗迹; SN1987A; 尘埃; 抛射物; 内赤道环

中图分类号: P145.3 **文献标识码:** A

1 引 言

尘埃在星际介质天体物理中扮演着重要的角色, 它是星际气体加热的光电子来源, 为 H_2 分子的形成提供“场地”, 从而影响着星际气体的热力学和化学性质。此外, 尘埃能使星系在较短波长的辐射减弱, 而在红外波段发出辐射, 从而使星系的能谱分布发生变化。据估计, 宇宙中约 30% 甚至更多的星光都由尘埃在红外波段重新产生^[1]。星际尘埃决定星系的外观、星际介质的性质以及恒星形成的关键过程^[2]。星际尘埃的尺寸、形状、化学组分是其基本特性, 通过消光、偏振以及紫外和红外光学波段的特征获得^[3]。

大质量恒星在演化的最后阶段会发生爆炸, 伴随大量抛射物同时合成大量重元素。随着抛射物的膨胀, 气体快速冷却并凝结, 然后形成尘埃; 抛射物中的难熔元素融进尘埃颗粒中^[4]。超新星抛射物丰富了银河系的富金属产物, 包括 Si, Fe, O 和 Mg, 它们正是尘埃颗粒的主要元素, 因此, 尘埃颗粒可能在膨胀冷却的超新星遗迹中形成。超新星遗迹中被激波加热的尘埃在红外波段辐射强烈, 因此, 红外观测是研究尘埃性质以及尘埃的形成和消失的极

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-03-26

资助项目: 国家自然科学基金 (11533002)

通讯作者: 姜碧涛, bjiang@bnu.edu.cn

佳方式之一^[5]。理论模型推测, II 型超新星贡献的尘埃量为 $(0.15\sim 14)\times 10^{-6} M_{\odot} \text{kpc}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[6]。通过对 20 多个超新星和超新星遗迹的尘埃质量进行计算^[7], 人们发现这些超新星和超新星遗迹几乎都只含有 $10^{-6} M_{\odot} \sim 10^{-3} M_{\odot}$ 质量的温尘埃 (其温度在 50~100 K 之间), 远低于预测的 $0.1 M_{\odot} \sim 1.0 M_{\odot}$ ^[8-10]。但是, SN1987A 是个例外^[7]——赫歇尔空间望远镜 (Herschel Space Observatory) 2011 年的远红外测光结果表明, SN1987A 的遗迹中有 $0.4 M_{\odot} \sim 0.7 M_{\odot}$ 的尘埃。如果这些尘埃的大部分能够存在, 不被激波破坏, 则超新星应该是宇宙尘埃的重要来源。

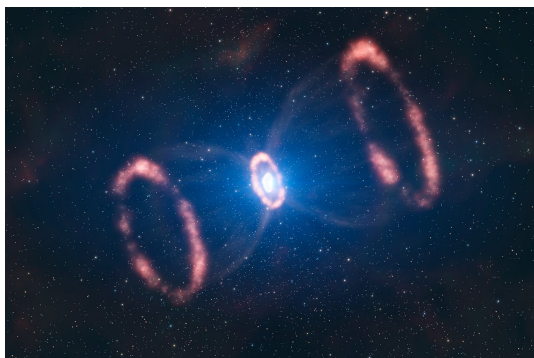
SN1987A 在 1987 年 2 月 23 日第一次被观测到, 它位于距离只有 50 kpc 的大麦哲伦云中, 地球上的观测者能够目睹它的爆发以及演化成遗迹的整个过程, 它也因此成为地面、机载以及空间观测设备研究得最多的河外天体之一。相比其他河外星系中的超新星, SN1987A 距离地球很近, 其爆发产生的激波过程可被持续观测, 且受到星际和星周尘埃 (如早期星风过程的遗迹和残留的星周物质等) 辐射的污染较小, 所以 SN1987A 为研究超新星的尘埃形成和演化提供了最好的样本^[11]。

2 SN1987A 的基本情况

根据超新星光谱中是否含有 H 吸收线, 超新星可分为 I 型和 II 型: 光谱中不含有 H 吸收线的为 I 型超新星; 含有 H 吸收线的为 II 型超新星。SN1987A 属于 II 型超新星, 它的前身星是一颗蓝超巨星, 名为 SK-69° 202, 质量在 $18 M_{\odot} \sim 20 M_{\odot}$ 之间^[11, 12]。随着时间的推移, SN1987A 已从主要由放射性元素衰变 (主要是 ^{56}Co 和 ^{44}Ti) 供能的超新星遗迹, 演化成主要由激波与星周物质相互作用供能的超新星遗迹^[11]。SN1987A 周围有一个由内赤道环、两个外环以及漏斗状星云组成的星周包层 (circumstellar envelope, CSE)^[13, 14] (见图 1), 模糊的外环和内赤道环近乎共轴, 但不共面, 其中内赤道环距离 SN1987A 的爆发中心约 0.7 l.y., 圆半径约为 0.6 l.y., 外环距离爆发中心约 1.8 l.y., 半径约为内赤道环的 3 倍^[15, 16]。它们是致密的气体/尘埃环, 可能来自前身星的质量流失^[17], 也可能来自双星的并合作用^[18]。随着观测设备的改进以及各项研究的进行, 人们对 SN1987A 的研究已经取得许多进展, 但是仍有一些谜团未能解开。例如, 一般认为超新星爆发后会留下一个致密天体, 但是到目前为止, 除了中微子脉冲, 没有其他证据表明 SN1987A 的遗迹中有致密天体形成。SN1987A 的遗迹以及星周物质分布明显偏离球对称甚至圆柱体对称的原因也还未能得到合理的解释^[15]。

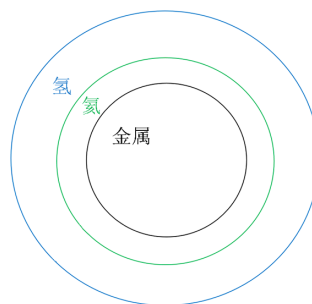
SN1987A 爆发时抛出了质量约为 $11.3 M_{\odot}$ 的抛射物, 该抛射物分为三层, 最里面是 $2.4 M_{\odot}$ 的富金属包层, 中间是 $2.2 M_{\odot}$ 的富氦包层, 最外面是 $6.7 M_{\odot}$ 的富氢包层^[19] (见图 2)。同时, 抛射物分布并不均匀, 而具有成团性^[20-23], 且不断向外膨胀。大约在 SN1987A 爆发后第 3 700 天, 该遗迹的 X 射线流量突然上升^[24], 这被认为是抛射物膨胀产生的激波第一次与内赤道环内侧的凸起物相遇的标志。与此同时, SN1987A 也从由放射性元素 (主要是 ^{56}Co 和 ^{44}Ti) 衰变供能转变为由激波供能。大约在其爆发后第 6 000 天, 内赤道环上出现珠状的紫外-光学热结, 标志着激波到达内赤道环主体^[17, 25-27]。从此时开始, SN1987A 的红外辐射至少有两个来源, 一个是新生成的尘埃 (未被高速激波瓦解), 另一个是被加热的原星周包层

中的尘埃^[24]。第 3 章将对两种尘埃的特点分别进行讨论。



注：中心亮点为 SN 1987A 的抛射物，其中间的小环为内赤道环；两边的两个大环为外赤道环。

图 1 SN1987A 的抛射物和周围的赤道环^[28]



注：最里面是 $2.4M_{\odot}$ 的富金属包层，中间是 $2.2M_{\odot}$ 的富氦包层，最外面是 $6.7M_{\odot}$ 的富氢包层。

图 2 SN1987A 的抛射物结构示意图^[19]

3 抛射物中的尘埃

3.1 抛射物中尘埃存在的证据

在 SN1987A 爆发后两年内，已有三个观测到的现象支持了尘埃在其抛射物中凝结的猜想^[29-35]：(1) 在 SN1987A 爆发后第 615 天，在 $10\ \mu\text{m}$ 附近的光度翻了一倍^[36]，而与此同时， ^{56}Co 衰变产生的 γ 射线热光度却下降了 8 倍。来自抛射物中形成的尘埃颗粒的辐射导致了红外光度的增长^[37]。(2) 从 SN1987A 爆发后约 520 天之后，光学的光变曲线比 γ 射线预期热光度下降得快，而同时期的红外光度上升，可见光波段与红外波段的光度之和等于 γ 射线的预期热光度^[37]，这表明尘埃已形成。(3) 光学发射线 ([Mg I], [O I], [C I], [Si I]) 的轮廓在 SN1987A 爆发后第 400 天左右开始出现蓝移，说明来自超新星包层后方的发射线被抛射物中新凝结的尘埃所消光^[37]。

Kozasa 等人^[19, 38, 39]的理论研究表明，在 SN1987A 爆发后约第 415 天到 615 天，尘埃在抛射物中凝结。Wooden 等人^[37]通过对 SN1987A 爆发后第 2000 天内 KAO (Kuiper Airborne Observatory) 观测到的 $1.7\sim 12.6\ \mu\text{m}$ 中 IRS (红外) 光谱进行研究，得到了抛射物中尘埃的一些特性 (以下称为早期抛射物中的尘埃)。Matsuura 等人^[11]通过对 SN1987A 爆发后第 5000 天赫歇尔空间望远镜观测的 $100\sim 500\ \mu\text{m}$ 远红外能谱进行研究，也得到了抛射物中尘埃的一些特性 (以下称为晚期抛射物中的尘埃)。

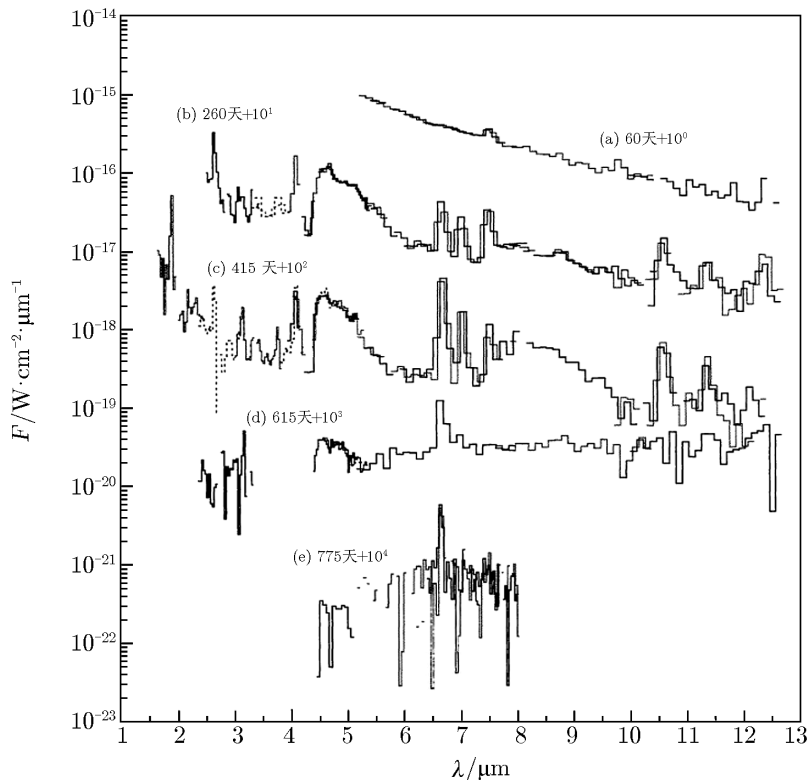
3.2 早期抛射物中的尘埃

3.2.1 尘埃的种类

Kozasa 等人基于尘埃的均匀成核和生长理论^[40-43]，建立了一个理论模型，讨论早期抛射物中尘埃的特性。Kozasa 等人^[19, 38, 39]考虑了两种情况：(1) 抛射物保持分层，称为“Case C” (C 为碳)；(2) 富金属包层和氦包层均匀混合，称为“Case O” (O 为氧)^[44, 45]。在

Case C 中, 石墨颗粒在抛射物中凝结。但是由于石墨颗粒在光学到红外波段的质量吸收系数很大^[46], 如果计算得到的近红外流量不超过观测值, 那么 $10\ \mu\text{m}$ 处的流量就需比观测值小两个量级^[29], 因此 Kozasa 排除了 Case C。对于 Case O, 通过计算化学平衡和元素组成, 以及 Al_2O_3 , MgSiO_3 和 Fe_3O_4 依次递减的凝结温度, 他们认为 Al_2O_3 , MgSiO_3 和 Fe_3O_4 依次在抛射物中凝结。大约在 SN1987A 爆发后第 465 天, $10\ \mu\text{m}$ 处的流量出现提升, 表明 Al_2O_3 开始在抛射物中凝结^[36]。大约在爆发后第 550 天, $0.55\ \mu\text{m}$ 处的光深快速上升, 表明 MgSiO_3 开始凝结。大约在爆发后第 620 天, $0.55\ \mu\text{m}$ 处的光深再次快速上升, 表明 Fe_3O_4 开始凝结。

Wooden 等人^[37]通过分析 KAO 在 SN1987A 爆发后第 60, 260, 415, 615, 775 天的光谱 ($1.7 \sim 12.6\ \mu\text{m}$, 见图 3), 对早期抛射物中的尘埃特性进行了讨论。这五个时期的光谱中有大量的发射线, 包括氢的四个线系 (汉弗莱系、普丰德系、布拉开系、帕邢系), 金属的精细结构谱线 ($[\text{NiII}] 6.634\ \mu\text{m}$, $[\text{NiI}] 7.507\ \mu\text{m}$, $[\text{ArII}] 6.985\ \mu\text{m}$, $[\text{CoII}] 10.521\ \mu\text{m}$) 和 CO, SiO 分子谱线。



注: 为了展示重叠的光栅布置, 让光谱特征清晰, 已依次使光谱流量下降 90% 将光谱区分开, 光谱流量平移量标识在天数后面。在真实的流量尺度上, 给出 SN1987A 爆发后五个时期的 KAO 观测结果, 并清楚展示了在第 615 天波长大于 $7\ \mu\text{m}$ 波段尘埃连续发射的增加。

图 3 SN1987A 爆发后第 60 天到 775 天期间 KAO 拍摄的光谱^[37]

与 Kozasa 等人的研究结果不同, Wooden 等人认为抛射物并未混合均匀^[23, 47], 而是形成包含大量不同元素的区域, 每个区域都可能有不同的尘埃颗粒。例如, 氢燃烧产生的富碳灰可能导致无定形碳颗粒或者石墨颗粒的凝结。富金属区域可能提高硅酸盐颗粒^[19, 38] (如 MgSiO_3 , Mg_3SiO_4) 和氧化物颗粒 (如 Al_2O_3 , Fe_3O_4) 或金属 Fe-Ni 颗粒的凝结。虽然图 3 中 $10\ \mu\text{m}$ 处的光谱没有硅酸盐特征^[33], 但这并不能排除硅酸盐尘埃的凝结, 因为当时 SN1987A 抛射物在 $10\ \mu\text{m}$ 波长外尚属光学厚。由于 Wooden 等人是利用灰体对光谱进行拟合, 因而不能得出尘埃组分的信息。

3.2.2 尘埃的尺寸

Kozasa 等人^[19, 38, 39]认为, 抛射物中的尘埃经过均匀核合成和尘埃增长的过程, 长到最终尺寸, 该尺寸正比于关键分子的浓度。Kozasa 等人通过计算得到, Al_2O_3 颗粒和 Fe_3O_4 颗粒的半径均为 $0.001\ \mu\text{m}$, MgSiO_3 颗粒的半径为 $0.007\ \mu\text{m}$, 与 Lucy 等人^[32]通过分析谱线轮廓蓝移所推出的结果比较接近 (其模型假设抛射物中的尘埃半径为 $0.01\ \mu\text{m}$)。

相反, Wooden 等人^[37]认为中红外辐射来自大颗粒的尘埃。他们认为红外辐射来自三种成分: 热气体成分、中性氢的连续成分和尘埃的热辐射成分。他们利用这三种成分, 采用多维非线性 χ^2 方法, 对 SN1987A 爆发后的光谱进行了拟合^[48], 发现红外辐射来自半径大于 $3\ \mu\text{m}$ 的尘埃, 或来自位于光学厚团块中的尘埃, 见图 3。

3.2.3 尘埃的质量

Kozasa 等人^[19, 38, 39]认为, 由于氢包层中可凝结元素丰度较小, 关键分子、原子的碰撞时间长, 但饱和时间短, 因此尘埃不太可能在氢包层中凝结。在抛射物质量 M_r 小于 $1.0M_\odot$ 的区域 (M_r 表示与抛射物中心相距 r 以内的抛射物的质量)^[39], 可凝结元素丰度较大, 会储存较多的潜热, 而氢和氦原子的丰度较低, 不能有效地带走储存的潜热, 所以这个区域的尘埃颗粒不能稳定增长。因此 Kozasa 等人认为, 尘埃在抛射物的质量 M_r 范围为 $1.0M_\odot \sim 4.4M_\odot$ 的区域中形成。他们通过计算得出, 这个区域中的尘埃总质量约为 $0.23M_\odot$, 包括大约 $0.009M_\odot$ 的 Al_2O_3 尘埃颗粒, $0.19M_\odot$ 的 MgSiO_3 尘埃颗粒, 以及 $0.031M_\odot$ 的 Fe_3O_4 尘埃颗粒。当非均匀分布的团块的数密度是抛射物的平均数密度的 3 倍时, 尘埃的温度从第 518 天的约 $430\ \text{K}$ 下降到第 813 天的约 $240\ \text{K}$ ^[35, 36]。

Wooden 等人^[37]利用红外观测进行计算, 得到抛射物中的尘埃质量要比 Kozasa 等人的结果小得多。他们首先假设所有的尘埃具有相同的半径, 且在红外波段是光学薄, 再通过计算得到尘埃质量的下限 (小于 $10^{-4}M_\odot$)。如果尘埃颗粒处于光学厚的团块中, 尘埃质量会更大, 这种情况的尘埃质量 M_d 可由光深 $\tau_{d,\text{IR}}$ 和质量吸收系数 $\kappa_{d,\text{IR}}$ 的比率推出, 公式如下:

$$M_d = \frac{L_d}{4\sigma T_{d,\text{BB}}^4} \frac{\tau_{d,\text{IR}}(\lambda)}{\kappa_{d,\text{IR}}(\lambda)}, \quad (1)$$

其中, L_d 为尘埃的光度, T_d 为尘埃的温度。质量吸收系数 $\kappa_{d,\text{IR}}$ 在瑞利极限 ($\lambda \gg a$, a 为尘埃颗粒的半径) 下几乎为常数, 不依赖于尘埃颗粒的化学性质和半径。当总光深 $\tau_{d,\text{IR}}$ ($30\ \mu\text{m}$) 约为 1 时, Wooden 等人得到在第 615 天, 尘埃的质量约为 $3.1 \times 10^{-4}M_\odot$ 。他们利用多维非线性 χ^2 方法对光谱进行拟合, 得到第 615 天的尘埃温度约为 $(422 \pm 32)\ \text{K}$; 在第 615 天到

775 天期间, 尘埃的质量至少增加了 1.6 倍^[35], 且温度下降到 (307 ± 70) K。

3.2.4 尘埃特性小结

由于在 SN1987A 爆发后的 1 000 天以内, SN1987A 红外波段的观测数据较少, 且数据精度较低, 对尘埃的种类、尺寸没有很好的约束。结合后继的研究, Kozasa 等人^[38]认为早期抛射物中的尘埃质量较小, 与 Wooden 等人的结果较为一致, 量级约为 $10^{-4} M_{\odot}$ ^[37]。结合 Wooden 等人和 Kozasa 等人的研究结果可知, 在 SN1987A 爆发后第 600 天左右, 尘埃的温度约为 400 K。

Kozasa 等人基于均匀成核和尘埃生长理论而建的模型, 忽略了实际参与抛射物团状结构形成的化学反应, 并且忽略了可以破坏尘埃颗粒的化学反应和通过冷凝增长的尘埃颗粒^[49], 虽然 Kozasa 等人使模型得以简化, 但是他们得到的尘埃质量被严重高估, 明显大于 Wooden 等人通过光谱拟合得到的结果。

3.3 晚期抛射物中的尘埃

3.3.1 远红外/亚毫米发射的来源

SN1987A 远红外/亚毫米波段的辐射可能来自线发射 ([O III] 88 μm , [N II] 122 μm , [C II] 158 μm , [N II] 205 μm)、同步辐射和尘埃的连续辐射。赫歇尔空间天文台 (Herschel Space Observatory) 搭载的 PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) 和 SPIRE (Spectral and Photometer Imaging Receiver) 探测器在 SN1987A 爆发后约第 8 000 天, 对该超新星遗迹的远红外/亚毫米波段进行了观测。SN1987A 在 100 μm , 160 μm , 250 μm , 350 μm , 500 μm 5 个波段的流量依次为 (70.5 ± 8.5) mJy, (125.3 ± 16.1) mJy, (131.7 ± 12.1) mJy, (49.3 ± 6.5) mJy, 小于 57.3 mJy。此外, 这些波段的光致电离发射线只贡献了流量的 0.2%^[50], 可以忽略。被抛射物/内赤道环相互作用产生的激波扫过的气体也会产生线发射, 但是其贡献并不比光致电离的线发射多^[51], 也可忽略。因此, 远红外/亚毫米波段的辐射不考虑线发射。同步辐射在该波段的流量要比观测到的流量低 2 个量级^[52], 也排除了同步辐射作为该波段流量的主要来源。综上所述, 尘埃的连续辐射是远红外/亚毫米波段辐射的主要来源^[11]。

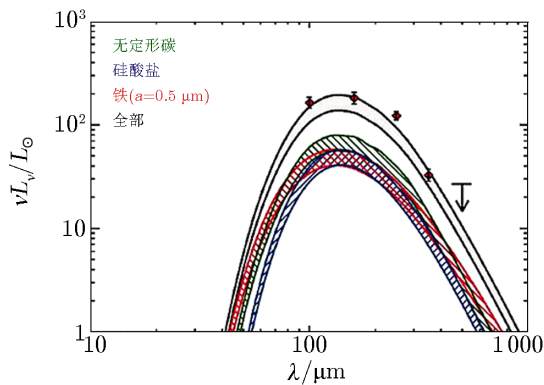
SN1987A 中有连续性辐射的尘埃有四个来源: (1) 前身星产生的尘埃; (2) 被 SN1987A 的激波扫过的星周介质中的尘埃; (3) 来自星周介质中尘埃的回光; (4) 抛射物中的尘埃。由于 SN1987A 的前身星在红巨星阶段会产生大量硅酸盐, 所以如果探测到的连续性辐射来自 SN1987A 的前身星在演化过程中产生的尘埃, 这些尘埃的成分主要是硅酸盐。假设气尘质量比为 300^[11], 则前身星在演化过程中产生的硅酸盐尘埃的质量约为 $0.03 M_{\odot}$ (对应的演化过程损失 $10 M_{\odot}$ 物质), 被激波扫过的星周介质中尘埃的质量约为 $3 \times 10^{-6} M_{\odot}$, 都比拟合观测数据所得到硅酸盐尘埃质量 (大于 $2 M_{\odot}$) 小得多^[11]。因此, 前身星产生的尘埃和星周介质中的尘埃都不是远红外/亚毫米辐射的主要来源。如果这些辐射来自星周介质中尘埃的回光, 那么这些尘埃的温度要比利用赫歇尔空间天文台的观测数据计算得到的尘埃温度高得多^[11]。综上所述, 赫歇尔空间天文台观测到的 SN1987A 远红外/亚毫米波段的辐射主要来自其抛射物中的尘埃^[11]。

3.3.2 尘埃的种类

Matsuura 等人^[11]在 2011 年分析了 SN1987A 爆发后第 8 467 天和 8 564 天, 赫歇尔空间望远镜 PACS 和 SPIRE 探测器在远红外/亚毫米波段所观测到的数据。他们先用单尘埃成分对获得的能谱进行拟合, 但这样所得的尘埃质量要远大于 SN1987A 抛射物中该尘埃组成元素的丰度。因此 Matsuura 等人认为抛射物中的尘埃由多种尘埃颗粒组成, 其主要成分是无定形碳和硅酸盐, 也包含一些 Fe 尘埃颗粒和硫化物尘埃 (如 FeS)。

Indebetouw 等人^[4]认为赫歇尔空间望远镜的分辨率不够高, 不能将抛射物和前身星的星风与临近的星周物质区分开来。他们分析了 ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) 在 SN1987A 爆发后约 9 000 天的观测数据后发现, SN1987A 的抛射物中存在着大量的 Mg 和 Si, 且早期的光谱中存在 SiO 分子的谱特征^[37, 53], 因此 SN1987A 中的尘埃应由硅酸盐和无定形碳组成。

3.3.3 尘埃的质量



注: 尘埃模型的具体情况见 Matsuura 等人^[11]的表 4。阴影线区域代表每种尘埃的可能流量范围。

图 4 各种尘埃对 SN1987A 的远红外 / 亚毫米能谱贡献的总和^[11]

Matsuura 等人^[11]在 2011 年用多种尘埃成分组成的模型对赫歇尔空间望远镜获得的能谱进行拟合 (见图 4), 得到抛射物中尘埃的温度在 17~23 K 之间, 质量在 $0.4M_{\odot} \sim 0.71M_{\odot}$ 之间。

2015 年, Matsuura 等人^[27]在其模型中增加了 SN1987A 爆发后第 9 090 天和 9 122 天赫歇尔空间望远镜的观测数据, 重新进行能谱拟合 (见图 5), 并对 2011 年的结果进行了修正。他们认为, 抛射物中有 $0.8M_{\odot}$ 的尘埃, 由质量约为 $0.5M_{\odot}$, 温度约为 20 K 的硅酸盐尘埃颗粒以及质量约为 $0.3M_{\odot}$, 温度约为 25 K 的无定形碳尘埃颗粒组成。这个结果略微大于 Rauscher 等人^[54]得到的结果 ($0.25M_{\odot}$)。

Indebetouw 等人^[4]先利用 ALMA 6.8 mm 波段的观测数据提取出抛射物周边花托状结构的辐射模型, 然后将其从各波段的观测中剔除, 以提高抛射物尘埃质量计算的精度。剔除花托状结构后, 抛射物中的尘埃在各波段的辐射如图 6 所示。Indebetouw 等人对 ALMA 的数据进行能谱拟合 (见图 7), 得到的尘埃质量比 Matsuura 等人得到的结果要小, 这因为他们剔除了非抛射物成分的辐射。他们认为抛射物中的尘埃质量约为 $0.63M_{\odot}$ (由 $0.24M_{\odot}$ 的无定形碳尘埃和 $0.39M_{\odot}$ 的硅酸盐尘埃组成), 尘埃的温度约为 22 K。

Dwek 等人^[60]也分析了赫歇尔空间望远镜和 ALMA 的观测数据, 但他们由建立的模型得到的尘埃质量更小。由于连续椭球分布的不透明度质量吸收系数大, 可降低所需尘埃质量, 为了使尘埃质量满足元素丰度的限制要求, Dwek 等人假设尘埃是椭球复合颗粒 (即尘埃尺寸

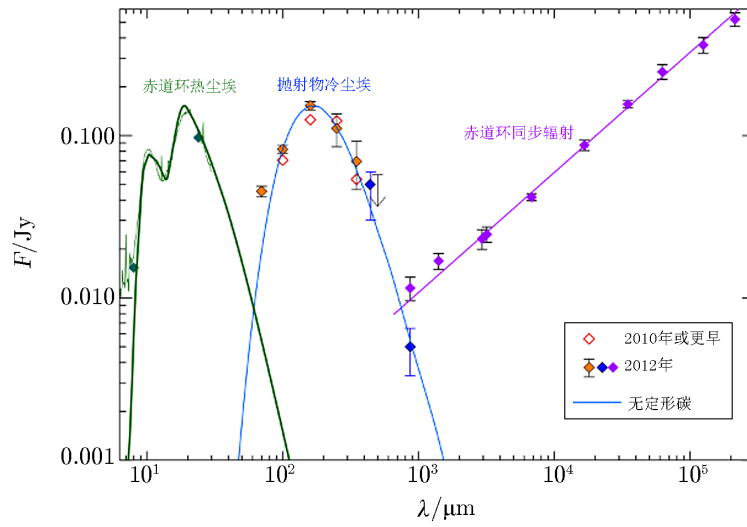
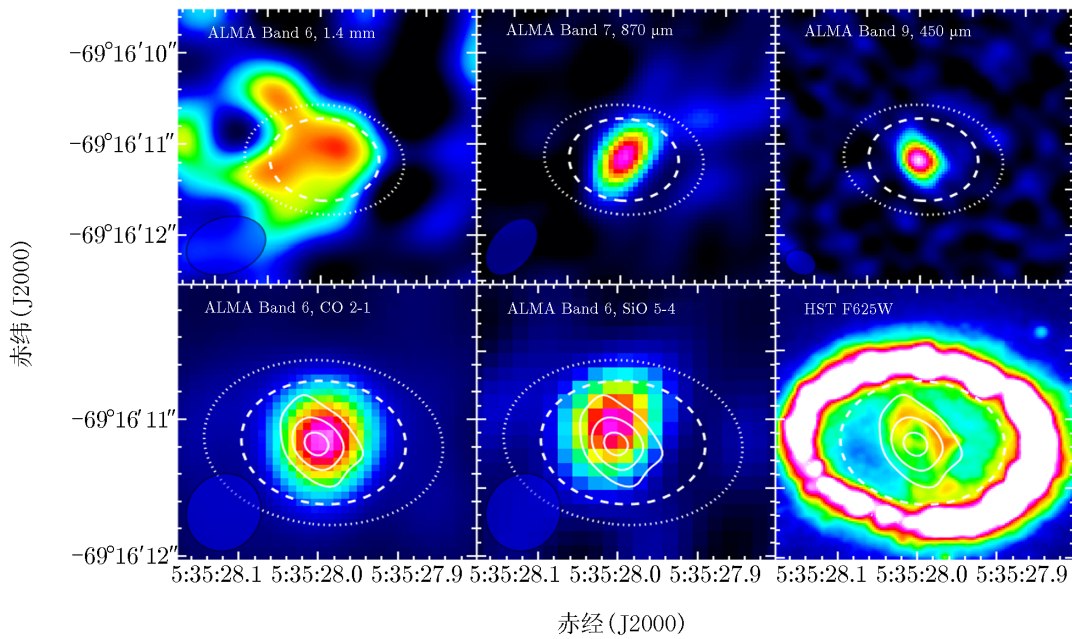
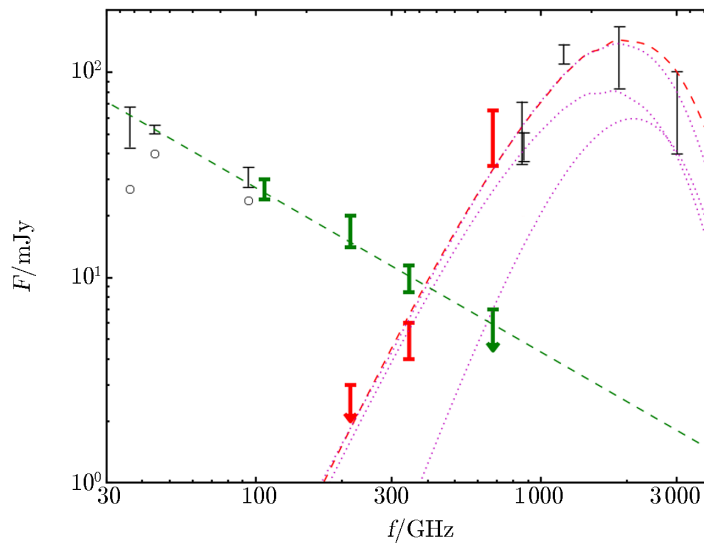


图 5 SN1987A 爆发后第 8 467 至 9 122 天的能谱^[27, 52, 55, 56]



注: 第 1 行的 3 个图表示剔除了花托状结构的抛射物 (点椭圆虚线表示抛射物位置, 虚线表示逆向激波位置); 第 2 行左边 2 个图分别表示来自 CO 和 SiO 的发射, 第 3 个图表示 HST (Hubble space telescope) F625W(光学)450 μm 等高线。

图 6 SN1987A 爆发后约 9 000 天的抛射物^[4, 57-59]



注：绿色虚线表示拟合的抛射物周边花托状结构的流量密度，红色虚线表示利用无定形碳尘埃颗粒拟合的抛射物流量密度，品红色虚线表示用无定形碳和硅酸盐尘埃颗粒拟合的结果。

图 7 SN1987A 爆发后约 9 000 天的能谱图^[4]

具有连续椭球分布)，主要由长椭球形的硅酸盐 (MgSiO_3) 颗粒和无定形碳颗粒组成。Dwek 等人利用赫歇尔和 ALMA 观测到的 SN1987A 爆发后第 8 515 天和 9 090 天的数据，进行能谱拟合，得到抛射物中的尘埃质量约为 $0.45M_{\odot}$ (包括约 $0.4M_{\odot}$ 的硅酸盐尘埃颗粒和 $0.05M_{\odot}$ 的无定形碳尘埃颗粒)，尘埃的温度约为 26 K。这个结果满足了元素丰度对尘埃质量的限制要求。

3.3.4 尘埃特性小结

晚期抛射物中的尘埃特性研究结果见表 1。对 SN1987A 晚期抛射物中尘埃特性的研究主要利用了来自远红外和亚毫米波段的数据，再通过能谱拟合等方法，天文学家得到晚期抛射物中的尘埃主要由硅酸盐和无定形碳组成，其质量明显高于早期抛射物中的尘埃，在 $0.45M_{\odot} \sim 0.8M_{\odot}$ 之间。晚期抛射物中尘埃的温度明显低于早期抛射物中的尘埃，约为 26 K。

Indebetouw 等人^[4]利用 ALMA 的数据，剔除了花托状结构的影响，降低了尘埃质量估算的误差，其得到的尘埃质量的计算结果要比 Matsuura 等人^[11]用赫歇尔空间望远镜的观测数据得到的结果更精确，为 $0.63M_{\odot}$ 。并且 Indebetouw 等人得到的碳尘埃的质量为 $0.24M_{\odot}$ ，符合碳元素丰度的限制 ($0.25M_{\odot}$)。Dwek 和 Arendt^[60]采用了复合椭球状的尘埃，结合 SN1987A 早期的抛射物观测数据，进一步降低了尘埃的质量 ($0.45M_{\odot}$)，且符合元素丰度的限制条件。但这个结果也要求几乎所有模型预测的 Si 和 Mg 都要凝结到尘埃中。若要进一步精确确定晚期抛射物中的尘埃质量，需要仔细观测辐射的来源，排除红外回光和星周尘埃的影响，以及对尘埃性质 (如形状) 进行限制。此外，随着抛射物膨胀，抛射物中的尘埃会

表 1 晚期抛射物中尘埃特性的研究结果

望远镜	波段	观测时间	尘埃种类	尘埃质量 / M_{\odot}	尘埃温度 /K	参考文献
Herschel: PACS 和 SPIRE	远红外和 亚毫米波段	第 8 467, 8 564 天	硅酸盐、无 定形碳、铁	0.4~0.7	17~23	[11]
ALMA	毫米、亚 毫米波段	第 9 000 多天	碳质尘埃、 硅酸盐尘埃 (Mg_2SiO_4)	0.63	26	[4]
Herschel	远红外和 亚毫米波段	第 8 467, 8 564, 9 090, 9 122 天	无定形碳、 硅酸盐	0.8 ^a	无定形碳 为 23, 硅 酸盐为 22	[27]
Gemini South: T-ReCS, Herschel 和 ALMA	中红外、毫米、 亚毫米波段	第 615, 775, 1 144, 8 515 和 9 090 天	硅酸盐、 无定形碳	0.45 ^b	25.2~26.3	[60]

a 包括 $0.5M_{\odot}$ 硅酸盐, $0.3M_{\odot}$ 无定形碳。
b 包括 $0.4M_{\odot}$ 硅酸盐, $0.05M_{\odot}$ 无定形碳。

与逆向激波相互作用, 尘埃可能会被破坏^[27, 61-63]。

3.4 抛射物尘埃质量变大的原因

由上述分析可知, SN1987A 晚期抛射物中的尘埃质量 (约 $0.45M_{\odot} \sim 0.8M_{\odot}$) 比早期抛射物中的尘埃质量 (约 $10^{-4}M_{\odot}$) 大得多, 主要原因有两个: (1) 尘埃质量在过去的 20 年中通过吸积 (元素在尘埃核外表面冷却, 增加单个尘埃的质量) 而不断增长; (2) 晚期观测到的尘埃在 SN1987A 爆发后约 600 天时已经存在, 但由于当时抛射物是光学厚的, 至少在中红外波段是光学厚的, 大量的尘埃没有被探测到^[11]。

Matsuura 等人^[27]认为, 由于尘埃颗粒不断吸积并增长, 因此尘埃质量在过去 20 年中迅速变大。在早期 (小于 2000 天), C 原子几乎被锁在 CO 分子中^[64], 阻止了大量无定形碳尘埃颗粒的形成 (最多为 $5.5 \times 10^{-3}M_{\odot}$)。Clayton^[65]提出一个可能的解决方法: 放射性元素衰变产生的 γ 射线会引起康普顿散射, 并产生高能粒子。这些高能粒子会分解 CO 分子。随着抛射物的膨胀和气体密度的下降, 电子的屏蔽作用下降, 于是 CO 分子的分解率迅速上升; 如果原子或者分子被吸积到尘埃颗粒中, 那么总的尘埃质量就会随着时间增加。

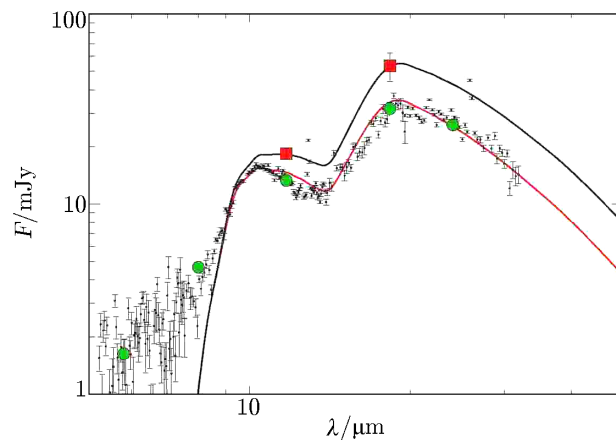
与 Matsuura 不同, Dwek 和 Arendt^[60]认为抛射物中的尘埃在第 615 天左右已经在光学厚的团块中基本形成。他们通过分析赫歇尔空间望远镜和 ALMA 在 SN1987A 爆发后第 9000 天左右的数据, 建立了一个尘埃模型, 再由该模型拟合而得到的尘埃质量约为 $0.45M_{\odot}$ 。Dwek 和 Arendt 用这个尘埃模型去拟合 KAO 观测到的 SN1987A 爆发后第 615 天和 775 天的光谱, 发现光谱可以被尘埃模型很好地拟合, 且抛射物是光学厚的, 尘埃的形状不会影响抛射物的黑体谱。因此, 他们认为尘埃只有在早期是通过吸积形成。在约第 615 天之后, 可冷凝的元素 (元素冷却凝结形成尘埃核, 从而增加尘埃的数量) 已经被基本耗尽, 黏合 (尘埃相遇之后结合在一起) 成为尘埃颗粒增长的主要途径^[66]。

4 内赤道环中的尘埃

SN1987A 爆发后第 6 000 天左右^[26]，由于抛射物与内赤道环的相互作用，内赤道环被点亮^[67]。人们利用这个时期 SN1987A 的 20 μm 处的观测数据发现，中红外波段的辐射主要来自尘埃的热发射。抛射物中的尘埃主要在富金属层中形成，而富金属层的膨胀速度比富氢层的膨胀速度慢得多，在这个时期还没到达赤道环，所以这些尘埃先前就已存在于星周介质中，而不是在抛射物中新形成的尘埃。尘埃可能位于辐射 X 射线的等离子体中，由电子碰撞加热，也可能位于光学结中，由激波辐射加热^[25, 68]。

4.1 尘埃的种类

2004 年，Bouchet 等人^[13]分析了南双子星天文台 (Gemini South) 8 m 望远镜的 T-ReCS (Thermal Region Camera and Spectrograph) 观测的 SN1987A 爆发后第 6 067 天在内部赤道环 10 μm 波长处的辐射。结合对其他 II 型超新星的研究，他们认为尘埃的主要成分可能是辉石 (主要是 MgSiO_3 和 FeSiO_3) 和石墨。2006 年，Bouchet 等人^[25]重新分析 T-ReCS 观测到的 SN1987A 爆发后第 6 526 天在内赤道环 11.7 μm 和 18.3 μm 处的中红外高分辨率图像，以及同时期 (第 6 190 天) Spitzer (斯皮策) 空间望远镜的 5 ~ 38 μm 光谱，并与钱德拉 X 射线望远镜观测到的图像、哈勃空间望远镜的紫外-光学图像和 ATCA 射电同步图像对比。Bouchet 等人利用单成分的尘埃颗粒 (石墨、硅酸盐、无定形碳) 对 Spitzer 空间望远镜的 IRS 光谱进行拟合，发现 IRS 光谱由硅酸盐尘埃拟合得最好 (见图 8)，因此他们排除了石墨和碳尘埃作为星周介质中尘埃的主要成分的可能，并认为内赤道环中的尘埃主要为硅酸盐尘埃。



注：绿圈表示 Spitzer 空间望远镜测量的流量；红方形表示 T-ReCS 测量的流量。Spitzer 空间望远镜的 IRS 数据清楚展示了硅酸盐是尘埃的主要成分。

图 8 用硅酸盐尘埃模型拟合 Spitzer 空间望远镜的 IRS 光谱^[25]

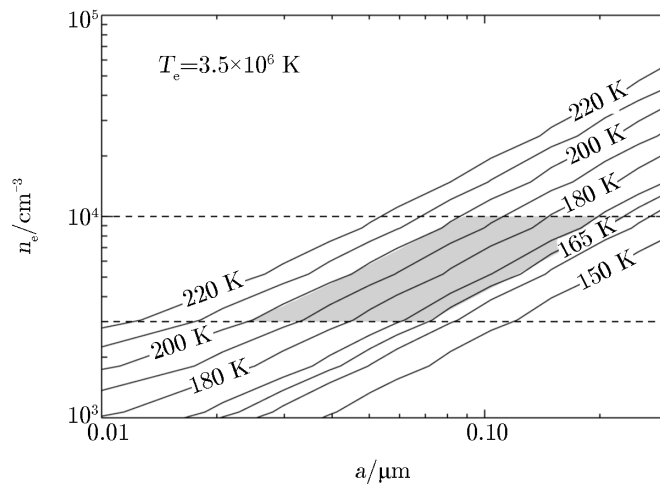
Dwek 等人^[17]在 2008 年分析了 Spitzer 空间望远镜在 SN1987A 爆发后第 6 190 天和 7 137 天的 IRS 光谱，他们认为内赤道环中的尘埃为硅酸盐。但在 2010 年的再次研究中，他们发现 IRS 光谱 5 ~ 8 μm 波段的辐射不能用硅酸盐来拟合，但与 K 波段的连续辐射 (0.4 mJy)

相关^[55], 这代表谱指数为 $\alpha \approx -1.8$ 的 ν^α 幂律谱。而韧致辐射的谱指数为 $\alpha \approx -0.1$, 观测的射电同步辐射的谱指数为 $\alpha \approx -0.8$ ^[56], 因此排除了热韧致辐射和同步辐射机制。Dwek 等人因此认为这个附加的热尘埃成分的辐射与硅酸盐辐射是紧密相关的, 而它的光谱形状在较长的波段应是无特征的, 不影响 $9.7 \mu\text{m}$ 和 $18 \mu\text{m}$ 处硅酸盐发射特征的拟合。原则上, 这个附加的 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 热尘埃辐射 (我们称之为第二种尘埃) 可以由抛射物中形成的尘埃颗粒发出。但是第二种尘埃成分总的红外光度约为 $10^{29} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 比来自抛射物中 ^{44}Ti 的放射性衰变产生的预测光度要低 2 个量级^[70]。因此, 第二种尘埃成分不可能来自抛射物中的凝结尘埃。

将主体硅酸盐尘埃成分与碳或纯铁或磁铁矿 (Fe_3O_4) 或硫化铁 (FeS) 结合, 都可以对内赤道环总的 IRS 光谱进行较好的拟合。另外一些可能的第二种尘埃成分, 尤其是铁和氧化铝, 由于其在大于 $8 \mu\text{m}$ 的波段具有与 Spitzer 空间望远镜 IRS 光谱不符的发射特征而被排除。由于纯铁、磁铁矿和硫化铁可存在的等离子体密度远高于碳和硅酸盐, 若第二种尘埃存在于与硅酸盐尘埃颗粒相同的气体中, 那么只有碳尘埃颗粒存在的等离子体密度范围与硅酸盐颗粒具有一致性。但是, 这种环境也会摧毁碳尘埃。所以, 产生 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 波段辐射的第二种尘埃的成分仍旧是个谜。

4.2 尘埃的尺寸

Dwek 等人^[17] 在 2008 年推算了尘埃的尺寸分布, 发现碰撞加热的尘埃颗粒的尺寸分布由气体温度和密度决定 (见图 9), 气体温度约为 0.3 keV (电子温度 $T_e = 3.5 \times 10^6 \text{ K}$)^[26], 它限制了等离子体密度和尘埃尺寸的变化范围。



注: 电子密度 n_e 的范围由等离子体电离时间尺度限制 (由水平虚线示意), 它与观测的电子温度范围 (由等高实线示意) 共同将尘埃的尺寸分布限制在 $0.023 \sim 0.22 \mu\text{m}$ 之间。

图 9 尘埃温度作为气体密度和尘埃颗粒尺寸的函数的等高图^[17]

图 9 中, 观测到的尘埃温度在 $165 \sim 200 \text{ K}$ 之间, 以此可以画出限定尘埃尺寸的平行四边形的两条斜边。模拟软 X 射线在第 6 914, 7 095 和 7 171 天的光谱, 可以推出电子密度 n_e 从 10^4 cm^{-3} 下降到 $3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, 由此可以画出限定尘埃尺寸的平行四边形的另外两条边, 并

得到能被加热到 165~200 K 的尘埃的尺寸在 0.023~0.22 μm 之间。尺寸小于 0.023 μm 的尘埃可能在最初的紫外闪中被蒸发。

4.3 尘埃的质量

尘埃质量可表示为:

$$M_d = \frac{D^2 F_\nu(\lambda)}{\kappa(\lambda) B_\nu(\lambda, T)}, \quad (2)$$

其中, D 是超新星的距离, 为 51.4 kpc^[71], $F_\nu(\lambda)$ 是观测流量, $\kappa(\lambda)$ 是质量吸收系数, $B_\nu(\lambda, T)$ 是普朗克函数。利用 T-ReCS 在 10 μm 的观测数据进行能谱拟合, 并考虑温度的不确定性, Bouchet 等人得到内赤道环中尘埃的质量在 $(1\sim 80)\times 10^{-6} M_\odot$ 之间, 温度约为 180_{-10}^{+20} K。而利用 T-ReCS 在 11.7 μm 和 18.3 μm 的观测数据, 他们得到尘埃的质量约为 $2.6_{-1.4}^{+2.0}\times 10^{-6} M_\odot$, 温度约为 166_{-12}^{+19} K。

2008 年, Dwek^[17] 通过拟合 Spitzer 空间望远镜在 SN1987A 爆发后第 6 190 天的 5~30 μm 的 IRS 光谱, 得到尘埃的质量约为 $1.1\times 10^{-6} M_\odot$, 温度约为 180_{-15}^{+20} K。

4.4 尘埃是否被破坏

如果尘埃被气体碰撞加热, 那么体积为 V 的气体尘埃发射的红外流量 F_{IR} 正比于 $n_e n_d \Lambda_d(T_g) V$, 其中 n_d 是尘埃颗粒的数密度, n_e 是电子的数密度, $\Lambda_d(T_g)$ 是通过气体-尘埃颗粒碰撞的气体的冷却函数 (单位为 $10^{-13} \text{ J}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)。来自相同体积的总的 X 射线流量正比于 $n_e^2 \Lambda_g(T_g) V$, $\Lambda_g(T_g)$ 是气体通过原子过程 (碰撞激发和辐射复合等) 的冷却函数。因此, 红外-X 射线流量比为:

$$IRX = \left(\frac{n_d}{n_e}\right) \frac{\Lambda_d(T_g)}{\Lambda_g(T_g)}. \quad (3)$$

对于红外波段与软 X 射线 ($kT_e \approx 0.3 \text{ keV}$, $T_e \approx 3.5 \times 10^6 \text{ K}$) 流量比, 这个比值在 3 ~ 20 之间, 取决于尘埃尺寸。如果尘埃颗粒没被破坏, 那么激波后面的气体保持空气质量比为常数, 且被激波扫过的气体的 X 射线和红外波段流量的演化均随时间成正比, 也就是说, IRX 的值会保持常数。因此, IRX 值的任何变化意味着尘埃颗粒被破坏^[55]。

Dwek 等人^[17] 在 2008 年分析了 SN1987A 爆发后第 6 000 天至第 8 000 天的 Spitzer 空间望远镜 IRS 光谱。他们猜想, 激波渗入赤道环产生的软 X 射线加热了尘埃, 导致尘埃的红外辐射。在第 6 000 天至 8 000 天期间, IRX 的值粗略保持在 2.5。如果 IRX 的值偏大, 意味着赤道环中大部分难熔物质都锁在了尘埃中; 如果 IRX 的值不变, 意味着红外和 X 射线流量以相同的速率演化。这要求空气质量比在整个激波膨胀进入介质的过程中是均匀的, 且没有尘埃颗粒被破坏, 或者气体冷却不影响来自激波气体的红外和 X 射线辐射。因此他们认为内赤道环中的尘埃几乎没被破坏。

4.5 尘埃的特性小结

内赤道环中的尘埃特性研究结果见表 2。通过对 SN1987A 爆发后第 6 000 天至 8 000 天之间的中 IRS 光谱进行分析, 人们发现内赤道环中的尘埃主要是硅酸盐, 其质量约为 $10^{-6} M_\odot$, 远小于抛射物中尘埃的质量。内赤道环中尘埃的尺寸在 0.023~0.22 μm 之间, 温度约为 180 K, 高于晚期抛射物中尘埃的温度。

表 2 内赤道环中尘埃特性的研究结果

望远镜	波段 / μm	观测时间 /天	尘埃种类	尘埃质量 / M_{\odot}	尘埃温度 /K	尘埃尺寸 / μm	参考文献
Gemini South: T-ReCS	10	6 067	辉石或者 石墨颗粒	$(1\sim 80)\times 10^{-6}$	180^{+20}_{-10}		[13]
Gemini South: T-ReCS	11.7	6 526	硅酸盐主导	$2.6^{+2.0}_{-1.4}\times 10^{-6}$	166^{+19}_{-12}		[25]
Spitzer: IRS	18.3	6 190	硅酸盐颗粒	1.1×10^{-6}	180^{+20}_{-15}	0.023 ~ 0.22	[17]
Spitzer: IRS	5~30	6 000 至 8 000	硅酸盐 + 第二 种尘埃成分	1.2×10^{-6}	180		[55]

利用南双子座天文台 (Gemini South: T-ReCS) 和 Spitzer 空间望远镜在 SN1987A 爆发后约第 6 000 天的数据, 人们分析尘埃的质量和温度, 得到了较一致的结果。Dwek 等人还利用 Spitzer 空间望远镜的数据, 分析了尘埃的半径, 并对第二种尘埃成分进行了猜测。但是 Spitzer 空间望远镜不能明显区分抛射物与内赤道环中的尘埃, 其光谱数据可能受内赤道环周围尘埃的影响较大。

5 与其他核坍缩超新星遗迹中尘埃的比较

5.1 尘埃的来源

Gerardy 等人^[72]研究了 II 型超新星的近 IRS 光谱, 以及其他超新星的尘埃辐射。他们认为 SN1979C 和 SN1985L 的红外辐射来自抛射物中的尘埃, 而在 SN1982E, SN1982L, SN1982R, SN1993J, SN1994Y 和 SN1999el 中观测到的红外辐射源于先前存在于星周介质中的尘埃。由此可见, 抛射物和星周介质中都可能存在尘埃^[7]。但是, 到目前为止只对少数几个超新星, 人们有直接证据可以证明它们的抛射物中有尘埃形成^[7]。

5.2 尘埃的质量

影响尘埃质量计算的因素主要有三个: (1) 采用的尘埃种类及其光学常数; (2) 未知的尘埃尺寸分布; (3) 尘埃温度^[7]。

5.2.1 尘埃的种类

Bouchet 等人^[13]推测 SN1987A 中的尘埃为硅酸盐, Ercolano 等人^[73]则认为是大量的石墨颗粒。对年轻的超新星, Fox 等人^[74, 75]认为 SN2005ip 中没有硅酸盐, 只有石墨。Andrews 等人^[76, 77]更倾向于 SN2007it 和 SN2007od 中的尘埃颗粒主要是无定形碳。Kotak 等人^[78]发现了 SN2004et 中有硅酸盐存在的证据 (不断下降的 SiO 质量)。Hines 等人^[79]采用了基于 Mg 和典型硅酸盐的尘埃颗粒模型^[80-82], 对河内超新星遗迹 Cas A 的红外能谱进行拟合, 而 Dunne 等人^[83, 84]假设尘埃颗粒是无定形的或者是成团聚合的结构。蟹状星云和 SNR B0540

的尘埃颗粒被推测是硅酸盐和石墨^[85-87]。由上面的研究工作可知,尘埃类型的确定是繁琐的,且其对尘埃质量的影响是复杂的^[7]。超新星爆发后,其抛射物经过先膨胀再冷却的过程最后形成尘埃。随后,超新星爆发产生的逆向激波会破坏新形成的尘埃。超新星爆发后产生的尘埃与超新星遗迹中尘埃的差别,还是一个有待解决的问题。

实验室研究已经揭示了原始陨石中存在星周起源尘埃颗粒。人们利用同位素分析可以得到确定尘埃类型的最直接证据。X型的太阳前碳化硅(SiC)和氮化硅(Si₃N₄)已经被认为源于超新星^[88];除此之外,一小分支的太阳前氧化铝颗粒和一些来自默奇森含碳陨石的低密度碳颗粒也被估计起源于超新星^[89, 90];最近观测到¹⁸O/¹⁶O在一些来自陨石的硅酸盐样本中大量出现,这证明了超新星中镁-氧-硅酸盐的存在^[91]。

5.2.2 推算的尘埃质量

Sugerman等人^[92]利用成团模型推出,在SN2003gd爆发后499天,尘埃的最大质量为 $1.78 \times 10^{-3} M_{\odot}$;在爆发后678天,尘埃的最大质量为 $2.0 \times 10^{-2} M_{\odot}$ 。相反,Meikle等人^[93]认为只有 $4 \times 10^{-5} M_{\odot}$ 的热尘埃存在,且由超新星的中红外发射不能得出 $2.0 \times 10^{-2} M_{\odot}$ 的尘埃质量。他们认为结果的不同可能是Sugerman等人^[92]的平滑模型中有较多冷尘埃存在导致的。

在超新星爆发后214—1393天,II型超新星SN1999em, SN2003gd, SN2004dj, SN2004et, SN2005af, SN2007it和SN2007od的尘埃质量的数量级基本为 $10^{-4} M_{\odot}$,温度为几百开^[76, 77, 92-97]。在已经存在几百到几千年的超新星遗迹中,有大量的冷尘埃存在。比如,超新星遗迹Cas A中存在约 $10^{-5} M_{\odot}$ 的热尘埃(大于170 K)及约 $0.01 M_{\odot}$ 的温尘埃和冷尘埃(小于150 K)^[79, 81, 82, 98, 99]。Dunne等人^[84]推算出存在的尘埃质量约 $1 M_{\odot}$,温度约为20 K。但是,Bartko等人^[100]利用哈勃空间望远镜分辨出Cas A中未被冲击的内部区域的冷尘埃成分(温度约为35 K),据此得到的尘埃质量为 $7.5 \times 10^{-2} M_{\odot}$,远低于Dunne等人^[84]的结果。Sugerman等人^[92]发现,SNR 1E0102.2-7219的抛射物中新形成了质量为 $3 \times 10^{-3} M_{\odot}$,温度为70 K的尘埃。而人们利用对B0540和蟹状星云的观测数据,得到尘埃的平均质量在 $10^{-3} M_{\odot} \sim 10^{-2} M_{\odot}$ 之间^[13, 85-87]。

若不考虑超新星的类型或者前身星的质量,在早期(超新星爆发后2000天内),只有热尘埃存在,且其质量小于 $3 \times 10^{-3} M_{\odot}$ 。在晚期(爆发5000天之后),算出的尘埃质量的范围分布较大,有7个量级(从 $10^{-7} M_{\odot}$ 到 $1 M_{\odot}$)。可以推测,随着超新星和超新星遗迹的演化,尘埃的尺寸在变大,且总的尘埃数量在增加。但是,在超新星爆发的早期只有热尘埃存在也可能反映了一种观测的选择效应。在这些时期,由于长波(远红外到(亚)毫米波段)的观测数据缺少,而长波的观测对冷尘埃的温度更敏感,因此,不能排除早期存在冷尘埃的可能性^[7]。

6 总结与展望

早期的光学发射线轮廓蓝移等证据表明,SN1987A的抛射物中有尘埃形成。在SN1987A爆发后1000天内,抛射物中尘埃的种类未能完全确定,尘埃的质量约为 $10^{-4} M_{\odot}$,温度约

为 400 K。爆发后 9 000 天左右, 抛射物中的尘埃颗粒主要为硅酸盐和无定形碳, 尘埃的质量有明显的增加, 在 $0.45M_{\odot} \sim 0.8M_{\odot}$ 之间, 温度在 17~26 K 之间。在 SN1987A 爆发后约 6 000 天, 抛射物与内赤道环周围物质的相互作用点亮了内赤道环。内赤道环中的尘埃主要是硅酸盐, 尘埃质量明显小于抛射物中的尘埃质量, 约为 $1.1 \times 10^{-6}M_{\odot}$, 温度约为 180 K。

一般认为, 超新星和渐近巨星支恒星是星系中尘埃的主要来源。其中, 渐近巨星支恒星是银河系及其邻近星系尘埃的主要来源。而在红移 $z > 6$ 的高红移星系中, 渐近巨星支恒星还未演化到晚期产生尘埃的阶段, 因此只有超新星才能产生尘埃。如果其他核坍缩超新星产生的尘埃质量与 SN1987A 接近, 那么, 核坍缩超新星就能向星系贡献与渐近巨星支恒星相当的尘埃。为了解释高红移星系的大量红外发射, 每个超新星中必须产生 $0.1M_{\odot}$ 的尘埃。如果在逆向激波与抛射物相互作用时, 尘埃没被破坏, 那么高红移星系中每个 II 型超新星只产生 $0.1M_{\odot}$ 的尘埃。如果 II 型超新星能产生 $0.23M_{\odot}$ 的尘埃^[4], 且有 $0.1M_{\odot}$ 的尘埃能在逆向激波通过星周介质后仍然存在^[4], 那么 II 型超新星可以主导所有红移星系中的尘埃生成。

詹姆斯·韦伯太空望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 计划在 2019 年发射, 是一个中红外观测设备, 能观测 1~25 μm 的图像和光谱。它的角分辨率比 Spitzer 空间望远镜高近一个量级, 灵敏度则比 Spitzer 空间望远镜高了几百倍, 能促进银河系和大小麦哲伦云中的一些超新星遗迹的研究。詹姆斯·韦伯太空望远镜能够对 SN1987A 的演化进行连续观测, 有利于人们更好地了解 SN1987A 后续的演化过程。同时, 该望远镜更高的分辨率及灵敏度, 有利于将 SN1987A 抛射物和内赤道环中的尘埃区分开, 因此我们对 SN1987A 遗迹中尘埃的种类、质量等性质的研究将更深入。相信詹姆斯·韦伯太空望远镜的发射, 能让我们对 SN1987A 遗迹的尘埃有更好的了解^[5]。

致谢

感谢高健、高爽、苑海波博士有益的讨论。感谢李军和王钰溪关于 LaTeX 使用经验的交流。感谢审稿人细致的审阅和富有帮助的建议。

参考文献:

- [1] Bernstein R A, Freedam W L, Madore B F. *ApJ*, 2002, 571: 107
- [2] Draine B T. *ARA&A*, 2003, 41: 241
- [3] 李墨萍, 赵刚, 李爱根. *天文学进展*. 2006, 24(3): 260
- [4] Indebetouw R, Matsuura M, Dwek E, et al. *ApJ*, 2014, 782: 2
- [5] Williams B J, Temim T. *Handbook of Supernovae*, Athem W A, Paul M, eds. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 20
- [6] Jones A P. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2001, 359: 1691
- [7] Gall C, Hjorth J, Andersen A C. *A&A Rev*, 2011, 19: 43
- [8] Todini P, Ferrara A. *MNRAS*, 2001, 325: 726
- [9] Nozawa T, Kozasa T, Umeda H, et al. *ApJ*, 2003, 598: 785
- [10] Cherchneff I, Dwek E. *ApJ*, 2010, 713: 1
- [11] Matsuura M, Dwek E, Meixner M, et al. *Science*, 2011, 333: 1258

- [12] Arnett W D, Bahcall J N, Kirsher R P, et al. *A&A Ann Rev*, 1989, 27: 629
- [13] Bouchet P, Buizer J M D, Suntzeff N B, et al. *ApJ*, 2004, 611: 394
- [14] Ben E K S, Arlin P S C, William E K, et al. *ApJ*, 2005, 159: S60
- [15] Richard M, Claes F. *ARA&A*, 2016, 54: 19
- [16] Tziamtzis A, Lundqvist P, Groningsson P, et al. *A&A*, 2011, 527: 35
- [17] Dwek E, Arendt R G, Bouchet P, et al. *ApJ*, 2008, 676: 1029
- [18] Podsiadlowski P, Joss P C. *Nature*, 1989, 338: 401
- [19] Kozasa T, Hasegawa H, Nomoto K. *ApJ*, 1989, 344: 325
- [20] Pinto P A, Woosley S E. *Nature*, 1988, 333: 534
- [21] Spyromilio J, Meikle W P S, Allen D A. *MNRAS*, 1990, 242: 669
- [22] Hanuschik R W, Thimm G, Seidensticker K J. *A&A*, 1989, 220: 153
- [23] Fryxell B, Miller E, Arendt D. *ApJ*, 1991, 367: 619
- [24] Park S, Zhekov S A, Burrows D N, et al. *ApJ*, 2004, 610: 275
- [25] Bouchet P, Dwek E, Danziger J, et al. *ApJ*, 2006, 650: 212
- [26] Park S, Zhekov S A, Burrows D N, et al. *ApJ*, 2005, 634: 73
- [27] Matsuura M, Dwek E, Barlow M J, et al. *ApJ*, 2015, 800: 50
- [28] <http://www.eso.org/public/news/eso1032/>, 2010
- [29] Whitelock P A, Catchpole R M, Menzies J W, et al. *MNRAS*, 1989, 240: 7
- [30] Moseley S H, Dwek E, Glaccum J R, et al. *Nature*, 1989, 340: 697
- [31] Danziger I J, Gouffes C, Bouchet P, Lucy l B. *IAU Circ*, 1989, No.4746
- [32] Lucy L B, Danziger I J, Gouffes C, et al. *IAU Colloq No 120, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag*, 1989: 164
- [33] Lucy L B, Danziger I J, Gouffes C, et al. *The Tenth Santa Cruz Workshop in Astronomy and Astrophysics. New York: Springer-Verlag*, 1989: 82
- [34] Wooden D H. PhD Thesis. San Francisco: Univ of California Santa Cruz, 1989: 816
- [35] Suntzeff N B, Bouchet P. *AJ*, 1990, 99: 650
- [36] Roche P F, Aitken D K, Smith C H, et al. *Nature*, 1989, 337: 533
- [37] Wooden D H, Rank D M, Cohen M, et al. *ApJ*, 1993, 88: S477
- [38] Kozasa T, Hasegawa H, Nomoto K. *ApJ*, 1989, 346: 81
- [39] Kozasa T, Hasegawa H, Nomoto K. *A&A*, 1991, 249: 474
- [40] Yamamoto T, Hasegawa H. *Progress of Theoretical Physics*, 1977, 58: 816
- [41] Draine B T, Slapeter E E. *Journal of Chemical Physics*, 1977, 67: 2230
- [42] Kozasa T, Hasegawa H. *Progress of Theoretical Physics*, 1987, 77: 1402
- [43] Hasegawa H, Kozasa T. *Progress of Theoretical Physics*, 1988, 96: 107
- [44] Itoh M, Kumagai S, Shigeyama T, et al. *Nature*, 1987, 330: 233
- [45] Kumagai S, Shigeyama, Nomoto K, et al. *A&A*, 1988, 197: 7
- [46] Draine B T. *ApJ*, 1985, 57: S587
- [47] McCray R. *Supernovae and Stellar Evolution*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1991: 1
- [48] Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, et al. *Numerical Recipes*. Cambridge: University Press, 1989:14
- [49] Sluder A, Milosavljevic M, Montgomery M H. *arXiv:1612.09013*, 2016
- [50] Mattila S, Lundqvist P, Groningsson P, et al. *ApJ*, 2010, 717: 1140
- [51] Groningsson P, Fransson C, Leibundgut B, et al. *A&A*, 2008, 492: 481
- [52] Potter T M, Staveley-Smith L, Ng C Y, et al. *ApJ*, 2009, 705: 261
- [53] Roche P F, Aitken D K, Smith C H, et al. *MNRAS*, 1991, 252: 39
- [54] Rauscher T, Heger A, Hoffman R D, et al. *ApJ*, 2002, 576: 323
- [55] Dwek E, Arendt R G, Bouchet P, et al. *ApJ*, 2010, 722: 425
- [56] Zanzardo G, Staveley-Smith L, Ball L. *ApJ*, 2010, 710: 1515
- [57] Michael E, McCray R, Chevalier R, et al. *ApJ*, 2003, 593: 809
- [58] France K, McCray R, Heng K, et al. *Science*, 2010, 329: 1624
- [59] Kamenetzky J, McCray R, Indebetouw R, et al. *ApJ*, 2013, 773: L34

- [60] Dwek E, Arendt R G. *ApJ*, 2015, 810: 75
- [61] Jones A P, Tielens A G G M, Hollenbach D J, et al. *ApJ*, 1994, 433: 797
- [62] Nozawa T, Kozasa T, Habe A. *ApJ*, 2006, 648: 435
- [63] Silvia D W, Smith B D, Shull J M. *ApJ*, 2012, 748: 12
- [64] Sarangi A, Cherchneff I. *ApJ*, 2013, 776: 107
- [65] Clayton D D. *New Astronomy Reviews*, 2011, 55: 155
- [66] Sarangi A, Cherchneff I. *A&A*, 2015, 575: A95
- [67] Luo D, McCray R, Slavin J. *ApJ*, 1994, 430: 264
- [68] Polomski E, Gehrz R D, Woodward C E, et al. *BAAS*, 2004, 36: 1466
- [69] Kjær K, Leibundgut B, Fransson C, et al. *A&A*, 2007, 471: 617
- [70] Woosley S E, Pinto P A, Hartmann D. *ApJ*, 1989, 346: 395
- [71] Panagia N. *New Views of the Magellanic Clouds*. San Francisco: ASP, 1999: 549
- [72] Gerardy C L, Fesen R A, Hoflich P, et al. *AJ*, 2000, 119: 2968
- [73] Ercolano B, Barlow M J, Sugerman B E K. *MNRAS*, 2007, 375: 753
- [74] Fox O D, Chevalier R A, Dwek E, et al. *ApJ*, 2010, 725: 1768
- [75] Mattila S, Meikle W P S, Lundqvist P, et al. *MNRAS*, 2008, 389: 141
- [76] Andrews J E, Gallagher J S, Clayton G C, et al. *ApJ*, 2010, 715: 541
- [77] Andrewa J E, Sugerman B E K, Clayton G C, et al. *ApJ*, 2011, 731: 47
- [78] Kotak R, Meikle P, van Dyk S D, et al. *ApJ*, 2009, 704: 306
- [79] Hines D C, Rieke G H, Gordon K D, et al. *ApJ*, 2004, 154: S290
- [80] Dorschner J, Friedemann C, Guertler J, et al. *Astrophysics and Space Science*, 1980, 68: 159
- [81] Arendt R G, Dwek E, Moseley S H. *ApJ*, 1999, 521: 234
- [82] Rho J, Kozasa T, Reach W T, et al. *ApJ*, 2008, 673: 271
- [83] Dunne L, Eales S, Ivison R, et al. *Nature*, 2003, 424: 285
- [84] Dunne L, Maddox S J, Ivison R J, et al. *MNRAS*, 2009, 394: 1307
- [85] Green D A, Tuffs R J, Popescu C C. *MNRAS*, 2004, 355: 1315
- [86] Temim T, Gehrz R D, Woodward C E, et al. *ApJ*, 2006, 132: 1610
- [87] Williams B J, Borkowski K J, Reynolds S P, et al. *ApJ*, 2008, 687: 1054
- [88] Amari S, Nittler L R, Zinner E, Lewis R S. *Lunar and Planetary Science Conference*, 1997, 28: 33
- [89] Nittler L R, Alexander C M O, Wang J, et al. *Nature*, 1998, 393: 222
- [90] Travaglio C, Gallino R, Amari S, et al. *ApJ*, 1999, 510: 325
- [91] Leitner J, Hoppe P, Zipfel J. *Lunar and Planetary Science Conference*, 2015, 46: 1874
- [92] Sugerman B E K, Ercolano B, Barlow M J, et al. *Science*, 2006, 313: 196
- [93] Meikle W P S, Mattila S, Pastorello A, et al. *ApJ*, 2007, 665: 608
- [94] Elmhamdi A, Danziger I J, Chugai N, et al. *MNRAS*, 2003, 338: 939
- [95] Kotak R. *IAUs*, 2008, 250: 437
- [96] Meikle P, Kotak R, Farrah D, et al. *ApJ*, 2011, 732: 28
- [97] Szalai T, Vinko J, Balog Z, et al. *A&A*, 2011, 527: 61
- [98] Douvion T, Lagage P O, Pantin E. *A&A*, 2001, 369: 589
- [99] Krause O, Birkmann S M, Rieke G H, et al. *Nature*, 2004, 432: 596
- [100] Bartko H, Martins F, Trippe S, et al. *ApJ*, 2010, 708: 834

Dust in the SN1987A Remnant

LIU Yue¹, JIANG Bi-wei¹, LI Ai-gen²

(1.Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Department of Physics and Astronomy, University of Missouri, MO 65211, USA)

Abstract: Supernovae(SNe) are considered as one of the most important sources of cosmic dust. At high redshifts (e.g., $z > 6$), SNe are the dominant dust producer since asymptotic giant branch (AGB) stars have not yet sufficiently evolved to make dust. Dust in supernova remnants(SNRs) offers a valuable insight into the late-stage evolution and nucleosynthesis of massive stars, and the physical and chemical evolution of the ejecta of SN explosion. As the brightest SN observed from the Earth since 1604, SN1987A provides us a unique opportunity for studying SNe and SNRs. In this review we summarize the properties of the dust in the ejecta and the inner equatorial ring of SN1987A. We discuss the dust composition, size, and mass and their evolution with time. If most of the dust in SN1987A can survive the reverse shock wave and SN1987A is a typical Type II SN, then SNe are one important dust source of the interstellar medium of galaxies.

Key words: supernova remnant; SN1987A; dust; ejecta; inner equatorial ring