

## Vela Jr.: Ejecta-Clump Interaction in the Vela Supernova Remnant

Chih-Yueh Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Chung-Yuan Christian University, Chung-Li, Taoyuan

<sup>2</sup>University Inter-Discipline Department, Honor College, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei  
Email: cw5b@msn.com

Received: Jan. 20<sup>th</sup>, 2013; revised: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2013; accepted: Mar. 8<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Chih-Yueh Wang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** The *ROSAT* source RX J0852.0-4622, or Vela Jr., superposed on the Vela supernova remnant, has been identified as a separate young supernova remnant based on its shell-like appearance in X-ray  $> 1.3$  keV and on its detection as a source of the  $^{44}\text{Ti}$   $\gamma$ -ray decay line. However, a re-examination of the observational facts suggests that Vela Jr. should be part of the Vela remnant. We suggest that the shell X-ray feature is produced by a fast ejecta clump (bullet) from the Vela supernova that deposited its kinetic energy in the supernova remnant shell. The estimated energy  $< 0.3 \times 10^{49}$  erg could be supplied by a  $< \sim 0.1 M_{\odot}$  clump moving at 1700 km/s. Two-dimensional gas dynamic simulations show that a circular appearance can be produced in the supernova shell under proper conditions. We suggest that the nickel bubble effect is responsible for producing such heavy ejecta clumps in supernovae. There may be other similar X-ray features at a lower brightness level and there may be emission from heavy element ejecta in the object.

**Keywords:** ISM (RX J0852.0-4622, Vela Jr.); Supernova Remnants (Vela Jr., Vela SNR, SN1572); Hydrodynamics; Instabilities; Shock Waves

## Vela Jr.: 超新星喷发团块与超新星遗骸的互动

王致悦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中原大学物理系, 中坜, 桃园

<sup>2</sup>台湾科技大学荣誉学院不分系, 台北

Email: cw5b@msn.com

收稿日期: 2013年1月20日; 修回日期: 2013年2月22日; 录用日期: 2013年3月8日

**摘要:** 重迭在船帆座超新星遗骸(Vela supernova remnant)视线上的 *ROSAT* X 射线源 RX J0852.0-4622, 或称 Vela Jr., 因其在 1.3 千电子伏的波段上呈现圆壳外观和检测出  $^{44}\text{Ti}$  的  $\gamma$  射线衰变线, 所以被认为是新发现的年轻超新星遗骸。然而, 观测证据指出 Vela Jr. 应属于船帆座超新星遗骸的一部份而非独立的物体。二维气体动力学模拟显示, 超新星快速的高密度喷发气体物(子弹)可以影响遗骸的外围, 产生类似于 Vela Jr. 的圆环结构。估计 Vela Jr. 的能量为  $< 0.3 \times 10^{49}$  erg, 相当于 1700 km/s、 $< \sim 0.1 M_{\odot}$  的超新星喷发物所注入的动能。我们认为子弹生成最有可能是镍泡效应(nickel bubble effect)。我们预测子弹应该产生辐射, 而船帆座超新星遗骸在低 X 射线亮度的波段上也应存在其它类似的结构。

**关键词:** 星际介质(RX J0852-4622, Vela Jr.); 超新星遗骸(Vela Jr., Vela SNR, SN1572); 流体力学; 不稳定性; 冲击波

## 1. 引言

ROSAT 射线源 RX J0852.0-4622, 或称 Vela Jr., 许多观测根据其 在 1.3 千电子伏 X 射线波段上显现的环状结构推论其为一个独立的超新星遗骸<sup>[1]</sup>(图片请见[1])。Vela Jr. 迭加在船帆座超新星遗骸(Vela SNR,  $\sim 250$  pc,  $\sim 10,000$  岁<sup>[2]</sup>)的视线方向上。Vela SNR 的边缘有些像炮弹般的碎片突出<sup>[3,4]</sup>, 而 Vela Jr. 刚好位于子弹“D”上(图片请见[4])。Iyudin 等检测 COMPTEL  $\gamma$  射线数据发现该区域有  $^{44}\text{Ti}$  的辐射线<sup>[5]</sup>。由于  $^{44}\text{Ti}$  只在超新星中产生, 根据  $^{44}\text{Ti}$  的辐射强度、90 年的半衰期、和一般超新星遗骸应有的大小尺寸与震波速度等性质, 推测 Vela Jr. 为  $\sim 680$  岁、距离为 200 pc 的超新星遗骸<sup>[3,6]</sup>。南极冰芯的丰度测量也显示 700 年前硝酸盐突增, 可能是 Vela Jr. 爆发的结果<sup>[7]</sup>。Vela Jr. 因此据信是本银河系中仅次于仙后座遗骸 Cas A 的第二年轻的超新星遗骸。

Combi 等无线电深度连续光谱调查发现 Vela SNR 在 2.4 和 1.42 GHz 波段上也出现对应于 Vela Jr. 的光环<sup>[8]</sup>。Combi 等认为子弹“D”是 Vela Jr. 所有, 不属于 Vela SNR。RXTE 观测发现 Vela Jr. 虽然是高能量的射线源, 却不含超新星的核融合反应产物——铁 K 线辐射<sup>[9]</sup>。ASCA 观测则发现 Vela Jr. 的能量来源为非热辐射<sup>[10]</sup>, 其中心存在一个非致密、弥漫性(diffusive)的 X 射线源。

支持 Vela Jr. 是年轻超新星遗骸的主要依据是  $^{44}\text{Ti}$  的百万电子伏  $\gamma$  射线辐射。然而, 再分析 Vela Jr. 的 COMPTEL 数据揭露其  $^{44}\text{Ti}$  信号只有 2~4  $\sigma$  的信心水平, 强度因分析方法而异<sup>[11]</sup>。随后的观测发现 Vela Jr. 同步辐射能量达到百兆电子伏<sup>[12]</sup>, 是本银河系  $\sim 250$  个超新星遗骸中少数具有超高能量者。我们认为 Vela Jr. 应非独立的超新星遗骸, 而是船帆座遗骸的一部分。Vela Jr. 的环形结构应是 Vela 超新星喷发物(ejecta)快速接近遗骸冲击波(blast wave)的能量激发现象。以下我们检视观测, 概述二维模型, 并根据观测讨论结果。

## 2. 互动模型

包括第谷超新星遗骸(SN1572, Ia 型超新星)与 Cas A 等许多大质量超新星遗骸中都观察到明显的子弹或团块接近或突出于超新星遗骸的冲击波。ASCA

观察到 Vela SNR 的子弹“A”富含 Si 线辐射<sup>[13]</sup>, 子弹“D”富含 O、Mg、与 Si<sup>[14]</sup>, 证明子弹形成于恒星核心而非来自于星际介质(ISM)。N63A 的主壳也发现几个富含 Ne, Mg 和 Si 的突起<sup>[15]</sup>。因此我们考虑 Vela Jr. 其实是 Vela SNR 喷发团块与冲击波互动的结果<sup>[16,17]</sup>。Vela 是重力塌缩的超新星, 大质量恒星爆炸之前可能有质量损失, 确切的演化阶段不明。喷发物向周围星际介质自由扩展时会形成反向震波(reverse shock)与正向震波(forward shock, 或称冲击波)。震波间的气体因不稳定(Rayleigh-Taylor instability)而向外对流。我们使用 ZEUS2D 有限差分法程序集<sup>[18]</sup>以二维(即 2.5 维)球坐标模拟震波间带的气体动力。

我们考虑 Ia 型超新星<sup>[19]</sup>或是重力塌缩型超新星遗骸, 喷发物质密度向外呈不同的指数幂律递减。由于此密度分布只取决于爆炸质量和动能, 因此遗骸的演化阶段可由质量、动能、和星际介质密度所定义比例参数来决定<sup>[16,19]</sup>。反向震波在参数时间  $t' = 2.5$  时开始向内移动;  $t' = 8$  时到达遗骸中心。第谷超新星遗骸的年龄约为  $t' = 1.75$ 。二维球坐标中团块/子弹其实是一个轴对称的圆环(toroid), 而非一个球体的投影, 但我们预期二维演化性质应与三维模拟非常近似。气体压力、磁性、热传导、和辐射在大尺度上对于气体动力不会有显著的影响。

超新星的喷发物质最初是自由移动的(速度 = 半径/时间)。团块一旦通过遗骸的反向震波进入震波间带, 会因为 RAM 压力过大而横向扩展、不稳定而后碎裂。只有高密度团块才能穿越反向震波至冲击波之间的震波间带而不被撕裂。团块碎裂的基本过程类似于冲击波扫过星际云所造成的扰动<sup>[20]</sup>。

高密度团块最后达到冲击波时会造成遗骸的突起。第谷超新星遗骸的边缘有两 X 射线团块, 一富含 Si 另一富含 Fe。两团块的游离比率(ionization ratio, 电子密度与时间的乘积  $ne \cdot t$ )相差约  $\sim 100$  倍, 可知 Si 团块密度是 Fe 团块密度的 100 倍<sup>[21]</sup>。我们的数值模拟<sup>[16]</sup>发现第谷超新星需要  $\sim 100$  倍压缩的高密度团块才能解释遗骸的突起。Vela 超新星遗骸甚至需要  $\sim 1000$  倍的密度压缩才可像子弹“D”般超越 Vela 超新星遗骸半径的 40%<sup>[17]</sup>。遗骸凸起的程度还取决于团块的喷射速度。超新星内层的喷发物速度低, 即使存在高密度团块也难以影响冲击波。因此, 子弹现象应

仅存在于相对年轻的超新星遗骸。若要在重力塌缩的超新星遗骸产生与 Vela 相符的凸起,最佳的喷射速度约是  $V \sim 3000 \text{ km/s}^{[17]}$ 。Vela 以及其它数个重力坍缩超新星遗骸所观察到的 O 的速度刚好符合此速度范围。

一旦喷发团块进入冲击波的区域,团块最终必然减速并且被冲击波赶上。凸出的冲击波在冲击波主壳形成微弱的震波,产生一种小规模爆炸。震波相交引发次震波与切线不连续面(tangential discontinuity),于是形成 Vela Jr.的环形结构(图 1)。

Vela Jr.角直径为  $2^\circ$ , 相应的无线电外径是  $1.8^\circ \pm 0.2^\circ^{[22]}$ , 约占 Vela SNR 表面积(角直径为  $8^\circ$ )的 1%。如果 Vela 的动能是  $10^{51} \text{ erg}$ , Vela Jr.表面积便有  $10^{49} \beta \text{ erg}$  的能量聚集, 其中  $\beta \leq 1$ 。Vela 冲击波速度估计约  $600 \text{ km/s}^{[23]}$ 。假设 Vela SNR 是在 Sedov 爆炸波自由扩展的演化阶段, 由于冲击波速度是喷发物的  $2/5$ , 估计子弹的速度便是  $\sim 1500 \text{ km/s}$ 。Vela 在  $250 \text{ pc}$  的距离上的半径是  $17 \text{ pc}$ ; 将  $17 \text{ pc}$  除以 Vela 中央脉冲星的特征年龄  $10,000 \text{ 岁}$  也得出喷发速度为  $1700 \text{ km/s}^{[1]}$ 。

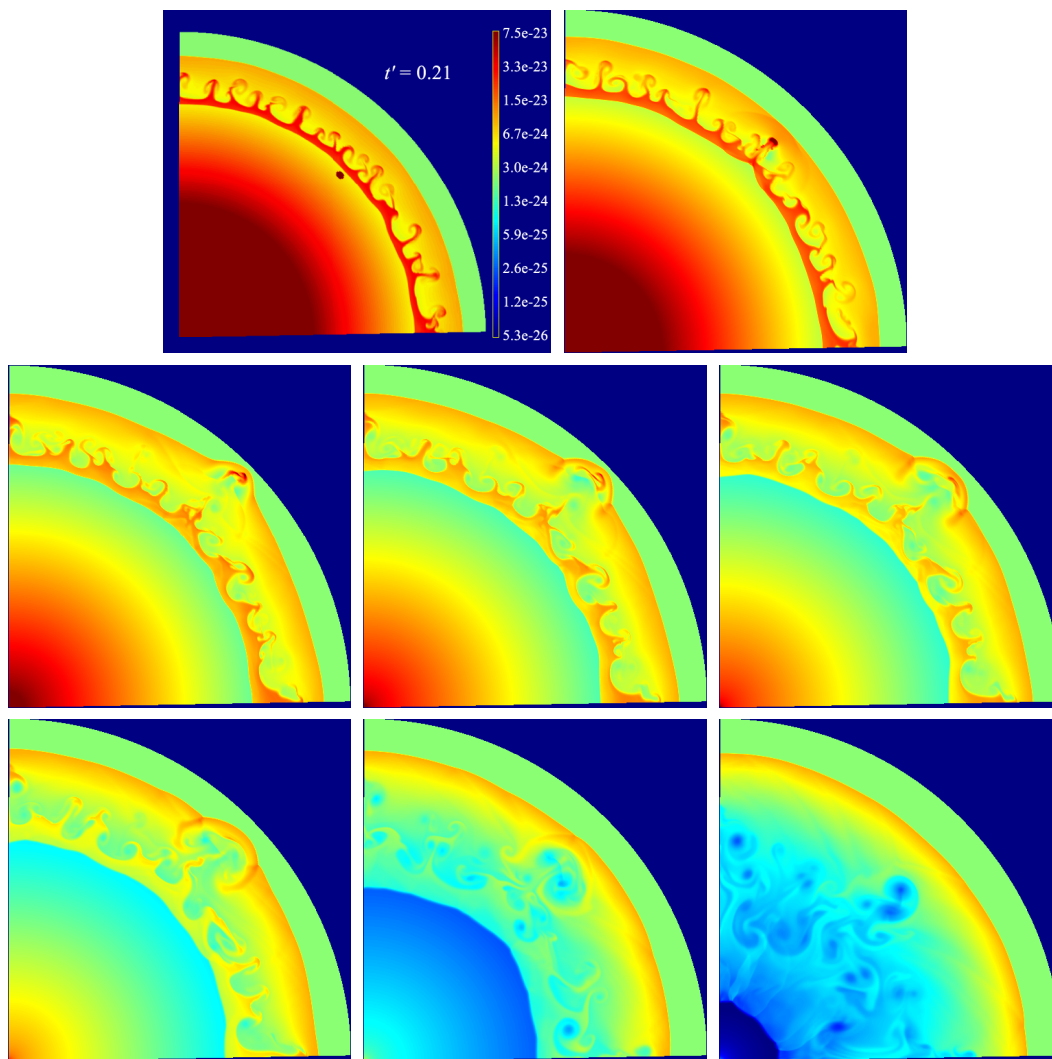


Figure 1. Snapshots of a clump with a density contrast of 100 in Type Ia supernova ejecta expanding into the intershock region at dynamical stages  $t' = 0.21, 0.33, 0.59, 0.72, 0.85, 1.16, 2.45$  and  $6.30$ . A ring is seen at  $t' = 1.16$  when the protrusion on the remnant outlines is caught up by the blast wave. The age of Tycho's remnant is  $t' = 1.75$ . The contour levels are exponentially distributed between the minimum and 2% of the maximum density at  $t' = 0.21$ . The model uses standard explosion mass and density with a constant ambient density of  $2.34 \times 10^{-24} \text{ gm}\cdot\text{cm}^{-3}$ , as described in Wang (2011). The color bar denotes values of mass density in  $\text{gm}\cdot\text{cm}^{-3}$ . The grid uses  $600 \times 300$  zones

图 1. 密度对比为 100 倍的 Ia 型超新星喷发团块扩展至震波间带。所示时间为  $t' = 0.21, 0.33, 0.59, 0.72, 0.85, 1.16, 2.45$  与  $6.30$ 。团块于  $t' = 1.16$  减速时被冲击波赶上形成环形结构。第谷超新星遗骸的年龄约为  $t' = 1.75$ 。等高线的上下限为  $t' = 0.21$  时最大气体密度的 2% 和最小密度, 等高线呈指数递减分布。本模拟使用 Wang(2011) 描述的模型: 标准爆炸质量、动能、与恒定星际介质密度  $2.34 \times 10^{-24} \text{ gm}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。彩条显示气体密度, 使用 cgs 单位。模拟网格使用  $600 \times 300$  个格点

利用 Vela Jr. 对 Vela 的面积比例可估计子弹质量是  $\sim 0.1 \beta M_{\odot}$ 。

从 X 射线能量可估计 Vela Jr. 的热能<sup>[6,24]</sup>。Vela Jr 的能量(假设 200 pc 的距离)约为  $2.6 \times 10^{49}$  erg, 这比超新星  $1 \times 10^{51}$  erg 的标准能量要低得多。Vela Jr. 在 X 射线频谱是非热辐射<sup>[9,10]</sup>, 因此 X 射线通量实际上限制了热辐射的上限。Vela Jr. 的 X 射线频谱为  $F(\nu) \sim \nu^{-1.6}$ <sup>[10]</sup>, 它所对应的同步辐射电子数频谱是  $N(E) \sim E^{-4.2}$ 。电子数目密度分布若在高能处陡峭下降, 一个小的能量密度扰动就可能增强硬 X 射线辐射强度。我们推测子弹的冲击提高了部分区域的电子能量, 因而造成明亮圆环。Vela Jr. 只在 ROSAT 1.3~2.4 千电子伏的波段观测到, 表明电子密度没有非常大的跳跃。

如果 Vela Jr. 是 Vela 喷发物与遗骸互动的结果, Vela SNR 中可能也有其它子弹团块产生类似的辐射效应。然而, 1.3 千电子伏之上的 X 射线<sup>[2]</sup>并无其它相似的构造。我们的模型显示子弹在突出遗骸时动能并未减损很多, 主要能量仍是动能。可预期团块在横向扩展开始破碎时会有一些 X 射线发射。此外, 由于 Vela Jr. 位于 Vela 的边缘, 预期所观察到的圆环因投影效应在半径方向上缩短, 而在北-南方向显得较长。Vela Jr. 的东侧圆环不明显, 不易辨别测试此效应。

子弹一旦减速, 在冲击波附近激发的震波将随着时间而减弱。Allen, Markwardt & Petre<sup>[9]</sup>发现, Vela Jr. 和 Vela 在 3~12 keV 的波段内有非常相似的光谱, 因此 Vela Jr. 确实有高能量的 X 射线辐射。Vela Jr. 因为表面亮度比 Vela 的其它地方高所以较显著。

关于 Vela Jr. 无线电观测的讨论可见于 Combi 等<sup>[8]</sup>和 Duncan & Green<sup>[22]</sup>。Duncan & Green 基于以下理由认为 Vela Jr. 应是船帆座遗骸的一部分:

1) Vela Jr. 表面亮度类似于 Vela。在 X 射线圆环发现之前, 这个区域被认为是 Vela 的一部分。作为一超新星遗骸, 如果 Vela Jr. 距离是 200 pc, 其无线电表面亮度会是不同寻常的低, 甚至低于 SN 1006。

2) Vela Jr. 无线电辐射跟 Vela 其它部分是连续的, 特别是东边向北的丝状结构显然属于 Vela。Combi 等认为 Vela Jr. 的一部分可以认定是 Vela 结构的部分。

3) Vela Jr. 北部无线电明亮部分的光通量  $F = \nu^{\alpha}$  的谱指数估计为  $\alpha = -0.4 \pm 0.15$ 。此数值对年轻的超新星遗骸而言是异常平坦, 但符合 Vela SNR 外壳的谱

指数<sup>[25]</sup>。

4) Vela 与 Vela Jr. 交接处没有任何磁场与偏振特性的不连续性。如果 Vela Jr. 是单独的超新星遗骸, 一定受到 Vela 超新星遗骸的辐射影响。

### 3. 讨论

我们发现超新星喷发气体如果受到高度压缩产生团块, 团块强硬到不被反向震波粉碎, 一旦移动至冲击波附近就会具有强大的破坏力量。Blondin, Borowski & Reynolds<sup>[26]</sup>研究非均匀超新星喷出物与周围介质的作用, 发现喷出物如果包含比周围稀薄 100 倍的镍泡, 冲击波半径会有 <5% 至 15% 的变化。Vela 的半径为  $4^{\circ}$ ; 子弹“A”和子弹“E”分别位于 Vela 的边界外  $1.2^{\circ}$  与  $2.4^{\circ}$ <sup>[4]</sup>。这样大的偏差表示 Vela 喷出物含有非常致密的团块。

高密度团块的最可能成因是超新星外层的元素因超新星中心元素  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  的辐射衰变而受到压缩(镍泡效应)。Li, McCray & Sunyaev<sup>[27]</sup>首先在 SN1987A 的中心发现 Fe 有非常大的体积充填系数, 认为是  $^{56}\text{Ni}$  衰变加热的结果。Vela SNR 的 O $\lambda$ 6300 谱线显示 O 元素聚集成团<sup>[28]</sup>, 子弹“D”的光谱也显示有  $0.01M_{\odot}$  的 Si 元素<sup>[12]</sup>。Vela Jr. 的中央区域没有 Si 辐射<sup>[10]</sup>, 但低于一千电子伏能量的辐射来源是 O 和 Ne。六个子弹的几何中心也指向 Vela SNR 中心。这些证据与镍泡效应的预期一致。

假设  $^{56}\text{Ni}$  的初始分布是球对称的, 我们的一维辐射流体力学模拟发现镍泡效应将压缩超新星核反应的中间元素至 100 倍的密度对比<sup>[29,30]</sup>, 这与子弹与遗骸的二维互动模拟结果<sup>[15,16]</sup>相符。当喷发物变为 optically thin 时, 估计团块以  $\sim 1500$  km/s 的速度冻结在喷发物中。镍泡效应压缩的总质量约为  $\sim 1M_{\odot}$ , 是船帆座子弹重量的 10~100 倍。

Vela Jr. 的身份至今仍有高度争议。其百兆电子伏的非热同步辐射的发现更增添其复杂性。许多研究将超高能量辐射视为超新星震波加速星际介质粒子为宇宙射线的证据。我们发现第谷遗骸的震波半径与速度符合理想绝热的扩展模型, 动能毫无减损。我们因此怀疑宇宙射线并非来自于超新星震波<sup>[31]</sup>。

我们预测以下观测与理论需要进一步检测来澄清 Vela Jr. 的性质。

1) Vela Jr.不是  $^{44}\text{Ti}$  的辐射源。INTEGRAL 观测确实表明 Vela Jr.的  $\gamma$  射线并非 Iyudin 等所声称的  $^{44}\text{Ti}$  辐射。

2) Vela Jr.中央应可检出子弹的 X 射线辐射。Tsunemi 等发现 ASCA 的 X 射线观测中 Ca 钙含量在 Vela Jr.的一侧过高<sup>[27]</sup>。钙的存在可归因于  $^{44}\text{Ti}$  的衰变,但也可能来自 Vela 遗骸的喷出团块。Slane 等<sup>[10]</sup>发现 Vela Jr.中心有弥漫性辐射,但也不排除是致密射线源。致密星体不是我们模型所预期的。有可能是子弹太小或碎裂成数块。Mereghetti<sup>[32]</sup>根据 BeppoSAX 观测认为 Vela Jr.中央的致密星体可能是 Early-Type 高温的恒星,但还有另有一个未解析出的射线源,可能是中子星。Pavlov 等<sup>[33]</sup>根据 Chandra 观测认为 Vela Jr.中心存在一紧凑的 X 射线源,属于一种年轻但无线电静默的新型中子星。由于以上所有有利于致密星的观测研究皆有疑义,Iyudin 等在稍后 2005 年的 XMM Newton 观测<sup>[34]</sup>中改变其观点,推测 Vela Jr.是一个低于 Chandra-sehkar 质量的 Ia 型超新星,其中心不存在致密射线源。

3) 当团块以均匀等向速度向外至冲击波时可以激发电子、形成环形的切线不连续面。子弹上游应为低压区,是否可形成 X 射线连续面可能与不稳定气体的扰动高度有关。Wang & Chevalier<sup>[16]</sup>的高解析度模拟(图 8)显示子弹上游的扰动气体连接成一较完整的环形。我们将以三维数值模拟计算 Vela 超新星子弹所引发的 X-ray 辐射,检验其在视线上所投影的亮度是否与观测相符。

4) 子弹的速度、质量与作用时间与球对称镍泡效应的估算相符,显示子弹为致密喷发物质。至于非球对称的  $^{56}\text{Ni}$  分布如何压缩气体、创建如 Vela 子弹般~1000 倍的高密度团块,还需借由未来多维辐射流体力学的模拟研究。

#### 4. 结论

观测证据指出 Vela Jr.应属于船帆座超新星遗骸的一部份而非独立的超新星。二维气体动力学模拟显示 Vela Jr.的圆环结构可起源于超新星的高密度喷出物(子弹)与遗骸冲击波的作用。子弹的速度、质量、作用时间与镍泡效应的估算相符。我们预测子弹应该产生辐射,而船帆座超新星遗骸在低 X 射线亮度的波

段上也可能存在其它类似的结构。

#### 5. 致谢

感谢我的老师 Roger Chevalier 的指教与贡献以及 National Center for High-Performance Computing 提供计算设施。

#### 参考文献 (References)

- [1] B. Aschenbach. Discovery of a young nearby supernova remnant. *Nature*, 1998, 396: 141-142.
- [2] A. N. Cha, K. R. Sembach and A. C. Danks. The distance to the vela supernova remnant. *The Astrophysical Journal*, 1999, 515(1): L25.
- [3] R. Strom, H. M. Johnston, F. Verbunt and B. Aschenbach. A radio-emitting X-ray "bullet" ejected by the Vela supernova. *Nature*, 1995, 373: 590.
- [4] B. Aschenbach, R. Egger and J. Trümper. Discovery of explosion fragments outside the Vela supernova remnant shock-wave boundary. *Nature*, 1995, 373: 587-590.
- [5] A. F. Iyudin, et al. Emission from  $^{44}\text{Ti}$  associated with a previously unknown Galactic supernova. *Nature*, 1998, 396: 142-144.
- [6] B. Aschenbach, A. F. Iyudin and V. Schonelder. Constraints of age, distance and progenitor of the supernova remnant RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642. *Astronomy and Astrophysics*, 1999, 350: 997-1006.
- [7] C. P. Burgess, K. Zuber. Footprints of the newly discovered Vela supernova in Antarctic ice cores? *Astroparticle Physics*, 2000, 14(1): 1.
- [8] J. A. Combi, G. E. Romero and P. Benaglia. Radio detection of the supernova remnant RX J0852.0-4622. *The Astrophysical Journal*, 1999, 519(2): L177.
- [9] G. E. Allen, C. B. Markwardt and R. Petre. The high-energy RXTE X-ray spectrum of the recently-discovered remnant RX J0852-4622. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1999, 31: 862.
- [10] P. Slane, J. P. Hughes, R. J. Edgar, P. P. Plucinsky, E. Miyata, H. Tsunemi and B. Aschenbach. RX J0852.0-4622: Another nonthermal shell-type supernova remnant (G266.2-1.2). *The Astrophysical Journal*, 2001, 548(2): 814.
- [11] V. Schonfelder, et al.  $^{44}\text{Ti}$  gamma-ray line emission from Cas A and RXJ0852-4622/GROJ0852-4642. In: M. L. McConnell, J. M. Ryan, Eds., AIP Conference Proceedings 510, 5th Compton Symposium, AIP, Melville, 2000: 54-59.
- [12] R. Petre, U. Hwang and E. Allen. Evidence for cosmic-ray acceleration in supernova remnants from X-ray observations. *Advances in Space Research*, 2001, 27(4): 647-652.
- [13] H. Tsunemi, E. Miyata and B. Aschenbach. Spectroscopic study of the Vela-shrapnel. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 1999, 51(5): 711-717.
- [14] P. Slane, J. P. Hughes, R. J. Edgar, P. P. Plucinsky, E. Miyata, H. Tsunemi and B. Aschenbach. RX J0852.0-4622: Another nonthermal shell-type supernova remnant (G266.2-1.2). *The Astrophysical Journal*, 2001, 548(2): 814.
- [15] J. S. Warren, J. P. Hughes and P. O. Slane. Revealing new physical structures in the supernova remnant N63A through chandra imaging spectroscopy. *The Astrophysical Journal*, 2003, 583(1): 260.
- [16] C.-Y. Wang, R. A. Chevalier. Instabilities and clumping in type Ia supernova remnants. *The Astrophysical Journal*, 2001, 549(2): 1119.
- [17] C.-Y. Wang, R. A. Chevalier. Bullets in a core-collapse supernova remnant: The vela remnant. *The Astrophysical Journal*,

- 2002, 574(1): 155.
- [18] J. M. Stone, M. L. Norman. ZEUS-2D: A radiation magnetohydrodynamics code for astrophysical flows in two space dimensions. I-The hydrodynamic algorithms and tests. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 1992, 80(2): 753-790.
- [19] V. V. Dwarkadas, R. A. Chevalier. Interaction of type Ia supernovae with their surroundings. *The Astrophysical Journal*, 1998, 497(2): 807.
- [20] R. I. Klein, C. F. McKee and P. Colella. On the hydrodynamic interaction of shock waves with interstellar clouds. I: Nonradiative shocks in small clouds. *The Astrophysical Journal*, 1994, 420(1): 213-216.
- [21] U. Hwang, E. V. Gotthelf. X-Ray emission-line imaging and spectroscopy of tycho's supernova remnant. *The Astrophysical Journal*, 1997, 475(2): 665.
- [22] A. R. Duncan, D. A. Green. The supernova remnant RX J0852.0-4622: Radio characteristics and implications for SNR statistics. *Astronomy and Astrophysics*, 2000, 364: 732-740.
- [23] F. Bocchino, A. Maggio and S. Sciortino. ROSAT PSPC observation of the NE region of the Vela supernova remnant III. The two-component nature of the X-ray emission and its implications on the ISM. *Astronomy and Astrophysics*, 1999, 342(3): 839-853.
- [24] W. Chen, N. Gehrels. The progenitor of the new COMPTEL/ROSAT supernova remnant in Vela. *The Astrophysical Journal*, 1999, 514(2): L103.
- [25] Cohen, G. Sheldon, Dunn and M. Louise. The lymphocytologists; abell and schenck on anaphylaxis. *Allergy and Asthma Proceedings*, 1991, 12(3): 199-205.
- [26] J. M. Blondin, K. J. Borkowski and S. P. Reynolds. Dynamics of Fe bubbles in young supernova remnants. *The Astrophysical Journal*, 2001, 557(2): 782.
- [27] H. Li, R. McCray and R. A. Sunyaev. Iron, cobalt, and nickel in SN 1987A. *The Astrophysical Journal*, 1993, 419: 824.
- [28] H. Tsunemi, E. Miyata, B. schenbach, J. Hiraga and D. Akutsu. Overabundance of calcium in the young SNR RX J0852-4622: evidence of over-production of  $^{44}\text{Ti}$ . *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2000, 52: 887-893.
- [29] C.-Y. Wang. Clump development by the nickel bubble effect in supernovae. *The Astrophysical Journal*, 2005, 626(1): 183.
- [30] C.-Y. Wang. Nickel Bubble expansion in type Ia supernovae: Adiabatic solutions. *The Astrophysical Journal*, 2008, 686(1): 337.
- [31] C.-Y. Wang. Rayleigh-Taylor instabilities in Type Ia supernova remnants undergoing cosmic ray particle acceleration-low adiabatic index solutions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 415(1): 83-92.
- [32] S. Mereghetti. The X-ray sources at the center of the supernova remnant RX J0852.0-4622. *The Astrophysical Journal*, 2001, 548(2): L213.
- [33] G. G. Pavlov, D. Sanwal, B. Kiziltan and G. P. Garmire. The compact central object in the RX J0852.0-4622 supernova remnant. *The Astrophysical Journal*, 2001, 559(2): L131.
- [34] A. F. Iyudin, et al. *XMM-Newton* observations of the supernova remnant RX J0852.0-4622/GRO J0852-4642. *Astronomy and Astrophysics*, 2005, 429(1): 225-234.

## 附录

**动画 1.** 密度轮廓说明 Ia 型超新星喷发团块与遗骸冲击波相互作用随时间的演化。如图 1,  $\gamma = 5/3$ 。

**Movie 1.** Density contours illustrating the time evolution of the Type Ia supernova clump-remnant interaction using  $\gamma = 5/3$ , as in Figure 1.

(动画可以在 YouTube 上观看; The animation can be viewed at Youtube)