

旋转对超新星塌缩时标的影响*

谭 劲

(西华师范大学 物理与电子信息学院, 四川 南充 637002)

摘要: 基于超新星前身星模型 WS15 M \odot , 详细计算了在一维球对称未旋转条件和旋转条件下的流体动力学时标和电子俘获时标, 进行了比较, 发现在形成激波前很短时间内电子俘获时标将小于流体动力学时标, 这种差异在旋转的星体下更为明显. 计算结果支持了新近提出一种超新星爆发图像, 可能对超新星的爆发机制研究有新的影响.

关键词: 超新星; 流体动力学; 电子俘获; 旋转; 时标

中图分类号: O 420 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2006)05-0411-04

超新星爆发机制的研究是当今核天体物理的热点和重大疑难^[1~3]. 虽然许多学者考虑了各种可能的物理因素对核心塌缩型超新星(包括 II 型, Ib 型和 Ic 型)爆发的影响^[2~6], 在数值模拟上采用了各种质量模型的前身星及考虑 1, 2, 3 维的情况^[7,8], 但仍然没有得到观测的超新星爆发的巨大能量. 通常认为 II 型超新星的 2 种主要爆发机制为: ① 瞬时爆发机制; 当大质量恒星($m > 10 M_{\odot}$, M_{\odot} 为太阳质量)演化到 Si 燃烧后, 中心铁核引力收缩发生坍塌, 释放大量的引力能, 当铁核中心密度达到 2~3 倍核密度时形成反弹激波并冲出铁星核从而导致整个恒星爆炸. 但数值模拟结果表明激波的能量相对不足, 导致在铁星核外层形成驻激波. ② 中微子的延迟爆发机制; 为了解释瞬时爆发的困难, Wilson 等人提出了中微子的延迟爆发机制^[9]. 即初生中子星在极短的时间内产生大量中微子, 外行的中微子流激活驻激波从而得到爆发成功. 但中微子流能否激活强大的向外激波? 迄今仍然是疑问^[10]. 人们不仅考虑了已知各种粒子(e^{-} , e^{+} , p , n , α , π^0 , π , μ 以及 ^{16}O 等原子核)同中微子的相互作用, 而且还探讨了在致密等离子体中, 中微子振荡有可能引起这种相互作用的增强. 但上述中微子流仍然无法产生如此强大的冲压. 也就是说, 即使采用中微子延迟爆发机制, 迄今在理论上

人们也仍然无法自洽地实现超新星的爆发(向外爆发总动能达到 10^{42} J 以上).

在以前的对 II 型超新星的研究中, Chandrasekhar 质量极限是人们判断是否开始坍塌的标准, 用这种方法来研究瞬时爆发没有成功. 虽然人们很早就认识到了自由坍塌的流体动力学时标与电子俘获时标之间有较大差异, 但是通常流体动力学时标大于电子俘获时标; 因而在数值模拟中, 流体动力学时标被用作时间步长的标准. 但在高密时流体动力学时标可能小于电子俘获时标, 也就是说, 塌缩实际进程应该可能比自由坍塌时的进程快. 所以文献[1]重新考虑一种新的坍塌极限的判据: 当电子俘获时标大于流体动力学时标的时候, 星核物质将按照原来的自由塌缩进行, 当电子俘获时标小于流体动力学时标的时候, 相应的壳层将会加速坍塌, 而不是以前到 Chandrasekhar 质量极限的时候突然坍塌. 在这种新的爆发图像中, 电子俘获时标与流体动力学时标的相对大小是至关重要的. 面对超新星爆发疑难, 重新审视 2 种时标的差异显然是非常重要的, 本文拟对前身星模型旋转情况下的电子俘获时标和流体动力学时标进行讨论. 文中采用的计算程序为考虑广义相对论效应对流的 WLYW89 程序, 使用的物态方程和中微子输运方程与文献[5]中的一致. 前身星模型为 WS15 M \odot ^[11], 铁核大小为 $1.37 M_{\odot}$, 计算边界

* 收稿日期: 2005-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10347008).

作者简介: 谭 劲(1965-), 男, 讲师, 四川人, 主要从事核天体物理方面的研究.

取为 $1.6 M_{\odot}$, 从星核中心到 $1.6 M_{\odot}$ 被均匀分割为 96 个质量壳层.

1 未旋转时的时标比较

恒星内部发生的各种物理过程都是以不同的速率进行的, 人们通常用“时标”来描述这些物理过程进行的快慢. 因此时标的概念对于判别一些物理现象的本身是非常重要的. 当恒星处于流体静力学平衡时, 即恒星内每个流元上指向中心的引力与反方向的压力平衡时, 如果由于某种扰动, 使流体静力学平衡状态被破坏, 则流体元就会运动, 直到作用在流体元上的引力与压力之间重新建立新的平衡为止. 从流体静力学平衡状态被破坏到新的平衡为止, 中间需要的时间为流体动力学时标, 通常用 t_{HD} 表示^[12]

$$t_{HD} \approx 446 \rho^{-1/2}, \quad (1)$$

其中 ρ 为计算半径内的平均密度, 非常近似地可以把所在半径处的密度作为平均密度. 电子俘获时标为反应电子俘获快慢的物理量, 通常用 t_{EC} 表示. 其表达式为^[1]

$$t_{EC} \equiv \lambda_{EC}^{-1}, \quad (2)$$

其中, λ_{EC} 为电子俘获率. 它与电子俘获造成的电子丰度变化率 \dot{Y}_e 满足如下关系^[13]

$$\dot{Y}_e = - \frac{X_k}{A_k} \lambda_{EC}^{EC}, \quad (3)$$

其中, X_k , A_k 和 λ_{EC}^{EC} 分别为第 k 种元素的丰度、质量数和电子俘获率. 在文中所用的模型中, 星核由自由质子 p 、自由中子 n 、 α 粒子和平均重核 4 种粒子组成, 只有质子和重核才能俘获自由电子. 因此

$$\dot{Y}_e = \dot{Y}_{eH} + \dot{Y}_{ep}, \quad (4)$$

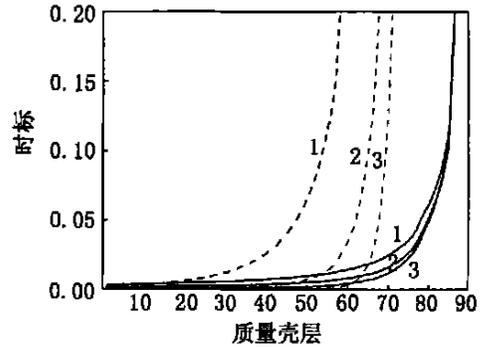
由(3)(4) 式得

$$\lambda_{EC} = - \left(\frac{\dot{Y}_{ep}}{X_p} + \frac{A \dot{Y}_{eH}}{X_H} \right), \quad (5)$$

其中 X_p , X_H 分别是质子和重核 A 的丰度. A 为平均重核的质量数. 其值通过不同的温度、密度和电子丰度条件下的核统计平衡得到. 当不考虑旋转的情况时, 2 种时标随时间的比较如图 1 所示.

从图 1 可以看出随着塌缩时间的增加流体动力学时标和电子俘获时标都是在减小的, 但电子俘获时标变化比流体动力学时标的变化要快得多. 激波反弹前 0.112 s 只有中心满足电子俘获时标小于流体动力学时标的条件. 但是这个区域是不断向外扩

展的, 当激波反弹前 0.03 s 时, 超过一半的铁核区域满足这个条件, 这为文献[1]的机制提供了有力的支持. 但满足这个条件的时间是非常短的, 区域也是有限的中心部分, 这可能是人们长期忽略这种差异的原因. 由于塌缩过程对于超新星能否爆炸成功是至关重要的. 因此这种差异不应该被忽略.



虚线: 电子俘获时标; 实线: 流体动力学时标

1, 2, 3: 分别为激波反弹前 0.112 s, 0.022 s, 0.003 s 的情况

图 1 一维未旋转情况下的电子俘获时标和流体动力学时标比较

Fig. 1 The comparison of electron capture timescales and hydrodynamic timescales at one dimension non rotating case

2 考虑旋转时的时标比较

考虑旋转及忽略旋转的最大不同是: 在旋转核中, 离心力将使塌缩到核密度的时间增加. 由于角动量守恒引起的离心力增加使物质不再以径向轨迹下落, 并引起了赤道平面的物质下落没有两极的物质下落得快, 引起铁核变平, 与球对称图像相比, 旋转模型中塌缩时标更长. 球对称核在反弹后不久就静止了, 而与此相反, 由于离心力的影响, 旋转核反弹的内陷动能将转换为振荡, 此振荡被非球对称压力波衰减, 因而反弹后旋转核将以不同的轴对称径向模式和表面模式的叠加而振荡, 这些模式的频率取决于内核的平均密度. 数值模拟表明, 如果塌缩在刚达到核物质密度以前停止的话, 则径向振荡的幅度增加并且是非线性增加的^[14]. 前身星旋转最简单的影响可以考虑为引力场变弱. 在旋转参考系中, 这种减弱可看成与引力方向相反的离心力, 若旋转角速度足够快, 就可以制止塌缩. 如果引力与离心力平衡, 这时的平衡条件为^[15]

$$\omega = (MG/R^3)^{1/2}, \quad (6)$$

ω 为旋转的角速度, M 为前身星质量, G 为引力常数, R 为前身星半径, 对本文研究的 $15 M_{\odot}$ 前身星, 在模型边缘 ($1.6 M_{\odot}$) 的区域, $R = 4.025 \times 10^8$ cm, 计算得到临界角速度 $\omega = 1.637$ rad/s, 当 $\omega > 1.637$ rad/s, 则前身星不能塌缩. 当 $\omega < 1.637$ rad/s, 随着塌缩行进, 忽略其他外力的影响, 由角动量守恒条件可得前身星总的角动量 $L_{tot} = \sum m_j r_j^2 \omega_j = \text{常量}$, 所以对第 j 个质量壳层来讲

$$\omega_j(t) = \frac{L_j}{m_j r_j^2(\theta, t)}, j = 1, 2, 3 \dots 96, \quad (7)$$

L_j 为初始时刻第 j 个质量壳层的角动量, m_j 和 r_j 分别为第 j 个壳层的质量和随时间变化的垂直半径. 当质量壳层的半径减小, 则由(7)式可知其角速度将随之增大. 为了考虑旋转对超新星爆发的影响, 这里取极限角速度的 5%, 即 $\omega = 0.082$ rad/s 为例计算. 表 1 给出了塌缩中不同纬度下满足电子俘获时标小于流体动力学时标的壳层, θ 为半径与赤道面的夹角. 塌缩特征时间分别区取为 0.103 s, 0.178 s, 0.232 s 和 0.260 s. 可以发现越靠近极轴满足条件的壳层越多, 而且随着时间增加, 时标差异越明显. 在 0.103 s 时, 极轴和赤道上的相差为 2 个质量壳层, 而在 0.260 s 时极轴和赤道上的相差变为 12 个质量壳层. 图 2 给出 0.260 s 时不同的角度 90° 和 60° 两者的具体差异.

表 2 为赤道面上不同的转动角速度对电子俘获时标和流体动力学时标差异的影响. 可以发现转速越大则在相同的时刻满足上述条件的壳层越少. 这

是由于旋转使塌缩时标增长的原因. 当然对于其他非赤道面上的情况是类似的, 不同的角速度对应于不同的演化时标. 明显地, 旋转角速度越快则极轴以外的区域演化越慢. 为了反映整个塌缩图像, 图 3 中给出了前身星中间壳层 $j = 50$ (共 96 层) 随时间塌缩过程, 箭头代表速度矢量, R_7 代表半径以 10^7 cm 为单位. 可以发现极轴方向塌缩很快, 前身星由球型 \rightarrow 椭球型 \rightarrow 哑铃型, 这种旋转不对称性必将引起塌缩演化时标产生差异, 其结果与旋转的角速度有关.

从上面的计算结果可以发现, 在旋转情况下星体赤道面和极轴之间的电子俘获时标和流体动力学时标之间的差异是很明显的. 这种差异随角速度的增加而变得更加明显. 这些结论对进一步研究超新星爆发机制是非常有意义的.

表 1 塌缩中不同纬度下电子俘获时标小于流体动力学时标的壳层 ($\omega = 0.082$ rad/s)

Tab. 1 The shell satisfies the electron timescale is less than hydrodynamic timescale at different latitudes ($\omega = 0.082$ rad/s)

θ	0.103 s	0.178 s	0.232 s	0.260 s
0°	39	46	52	56
30°	39	47	53	57
45°	40	48	54	58
60°	40	49	56	61
90°	41	51	59	67

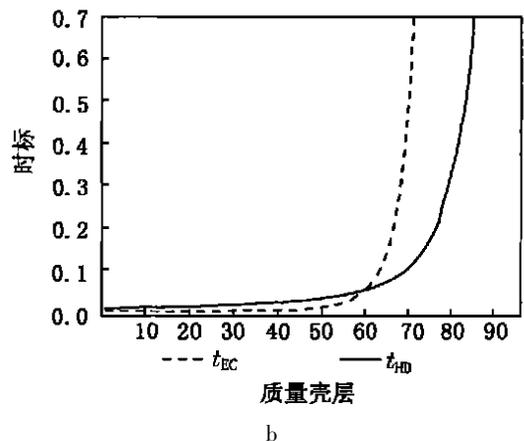
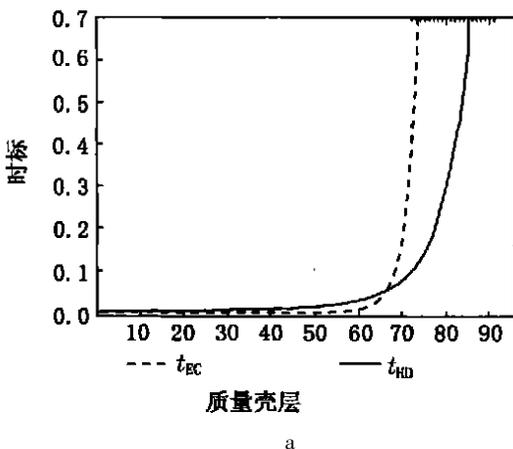


图 2 $\theta = 90^\circ, 60^\circ$ 时电子俘获时标与流体动力学时标的比较 ($t = 0.260$ s)

Fig. 2. The comparison of electron timescale and hydrodynamic timescale at $\theta = 90^\circ, 60^\circ$ ($t = 0.260$ s)

表 2 不同的角速度对应的塌缩进程($\theta = 0^\circ$)Tab. 2 The collapsing process according to different angular velocities($\theta = 0^\circ$)

$\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.103 s	0.178 s	0.232 s	0.260 s
0.032 7	40	49	57	62
0.081 9	39	46	52	56
0.131 0	38	43	47	49

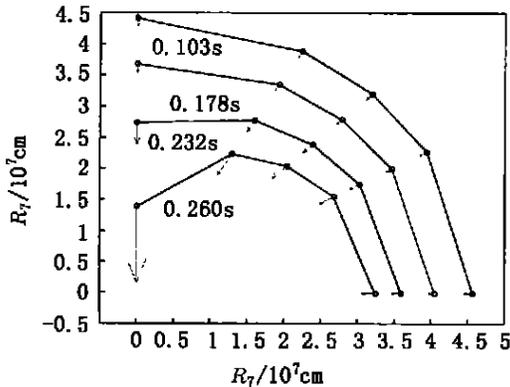
图 3 塌缩速度和半径随时间的演化($j = 50$)

Fig. 3 The evolution of collapsing velocities and radii as a function of time

参考文献:

- [1] PENG Q H. A new mechanism of core collapsed supernova explosion[J]. Nucl Phys A, 2004, 738: 515-518.
- [2] BURUS R, RAMPP M, JANKA H T, et al. Improved models of stellar core collapse and still no Explosions: what is missing? [J] Phys Rev Lett, 2003, 90: 241-101.
- [3] BRUENN S W, DE NISCO KR. General relativistic effects in the core collapse supernova mechanism[J]. ApJ, 2000, 560: 326-338.
- [4] DURSI L J, CALDER A C, ALEXAKIS A. Convection

and mixing in classical novae precursors[J]. AAS, 2002, 34: 955.

- [5] 王贻仁, 张锁春, 谢佐恒, 等. 超新星爆发机制和数值模拟[M]. 郑州: 河南科学出版社, 2003.
- [6] ROBINSON K, DURSI L J, RICKER P M, et al. Morphology of rising hydrodynamic and magnetohydrodynamic bubbles from numerical simulations [J]. ApJ, 2004, 601: 621-643.
- [7] CALDER A C, RICKER P M, DURSI L J, et al. Multi-dimensional simulations of type Ia supernovae[J]. AAS, 2001, 199: 1-371.
- [8] KANE J, ARNETT D, REMINGTON B A, et al. Two dimensional versus three dimensional supernova hydrodynamic instability growth [J]. ApJ, 2000, 528: 989-994.
- [9] WILSON J R, MAYLE R. Report on the progress of supernova research by the livermore group [J]. Phys Rep, 1993, 227: 97-111.
- [10] 彭秋和. 恒星演化和超新星爆发理论中某些重要问题的核物问题[J]. 物理学进展, 2001, 21: 225-236.
- [11] WOOSLEY S E, WEAVER T A. The evolution and explosion of massive stars. II. explosive hydrodynamics and nucleosynthesis[J]. ApJS, 1995, 101: 181-235.
- [12] WOOSLEY S E, HEGER A, WEAVER T A. The evolution and explosion of massive stars[J]. Mod Phys Rev, 2002, 74(11): 1-1071.
- [13] AUFDERHEIDE M B, FUSHIKI I, WOOSLEY S E, et al. Search for important weak interaction nuclei in presupernova evolution [J]. ApJS, 1994, 91(1): 389-417.
- [14] 李启斌. 90年代天体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [15] 李宗伟, 肖兴华. 普通天体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.

The influence of rotating on the collapse timescales of supernova

TAN Jing

(School of Physics and Electronic Information, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract: Based on the presupernova WS15 M_☉, the detailed calculations and comparisons of electron capture timescale and hydrodynamic timescale at one-dimension non-rotating and rotating case are done. The results show that the electron capture timescales are shorter than hydrodynamic timescales in a short time before shock bounce. This difference becomes more obvious at rotating case. The conclusions support a new supernova mechanism, and may make some new effects on the research of the explosion of supernova.

Key words: supernova; hydrodynamics; electron capture; rotating; timescale