

Преобразование энергии сверхновых в энергию движения звезд поля

Сурдин В.Г.¹

¹ Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ

Аннотация Рассмотрен гравитационный механизм преобразования энергии расширяющихся оболочек сверхновых в механическую энергию звезд поля. Передаточным звеном служит межзвездная среда, которую взрывы сверхновых организуют в расширяющиеся и затем рассасывающиеся оболочки. Показано, что приток механической энергии в звездный диск служит важным фактором его эволюции.

Abstract Surdin V.G. Transformation of supernova energy into kinetic energy of field stars. A gravitational mechanism for the conversion of supernova energy into the mechanical energy of the galactic field stars is suggested.

1. Введение

Как известно, вспышки сверхновых звезд в значительной степени управляют энергетическим балансом и динамикой межзвездной среды. А в какой степени энергия взрыва звезды может конвертироваться в механическую энергию окружающих звезд? Тривиальный пример нам известен: если массивная звезда входит в состав тесной двойной системы и в результате взрыва теряет более половины своей массы, то система может распасться, породив две быстро движущиеся звезды. Но легко понять, что процесс на этом не заканчивается. Значительную энергию уносит сброшенная оболочка, которая сгребает окружающий межзвездный газ, изменения тем самым гравитационный потенциал в пространстве вокруг сверхновой. В результате – изменяется движение всех находившихся в этой области звезд.

Этот динамический эффект расширяющихся остатков сверхновых (в данном случае к нему можно привлечь и расширяющиеся пузыри вокруг ОВ-звезд) неоднократно рассматривался в приложении к молодым, богатым газом звездным скоплениям [1], [2]. Традиционное рассмотрение динамического аспекта этого взаимодействия заключается в том, что кинетической энергии, запасенной в оболочке сверхновой ($\sim 10^{51}$ эрг), достаточно для того, чтобы преодолеть гравитационное поле скопления. При этом на своем пути наружу оболочка сгребает газ скопления и выметает его прочь. В ослабленном гравитационном поле звездное скопление расширяется, теряет наиболее быстрые звезды и при определенных условиях может полностью распасться. Но случай, когда энергия взрыва сверхновой (или излучения и ветра ОВ-звезд) не хватает для выметания газа из скопления, до недавнего времени игнорировал-

ся. Мы рассмотрели его сравнительно недавно [5], показав, что и в этом случае заметная часть энергии взрыва или излучения звезд через посредство межзвездной среды может конвертироваться в механическую энергию движения звезд.

Физический смысл обсуждаемого эффекта можно понять, обратившись к элементарному примеру. Рассмотрим простейшую небесномеханическую задачу о движении пробной частицы в гравитационном поле массивного тела. Если это тело внезапно исчезнет в момент, когда частица находится от него на расстоянии r_1 , то частица продолжит свое движение по инерции с орбитальной скоростью v . Если в некоторый последующий момент тело вновь появится на своем месте, то частица, двигаясь с той же скоростью, окажется от него на расстоянии r_2 . При $r_2 > r_1$ система приобретет энергию; при $r_2 < r_1$ она ее потеряет.

Если вначале частица двигалась по эллиптической орбите, а промежуток времени между исчезновением и появлением центрального тела превысил $2a/v_a$, где a – большая полуось орбиты, v_a – скорость частицы в апоцентре, то приток энергии в систему будет заведомо положительным. Эта энергия обеспечивается механизмом перемещения массивного тела.

Описанная ситуация служит грубым аналогом задачи о расширении и последующем сжатии оболочки сверхновой в гравитационном поле окружающих звезд (рис. 1). Она демонстрирует принципиальную возможность преобразования энергии массивной пульсирующей оболочки в механическую энергию звезд поля. Впервые этот механизм был предложен нами в работе [2] при исследовании ранней эволюции звездных скоплений. Для той конкретной задачи, требовавшей полного разрушения скопления, оценки показали относительно невысокую эффективность нового механизма, поэтому результаты не были тогда опубликованы. Однако для явлений "неразрушительного" характера, таких, например, как рост дисперсии скоростей звезд галактического диска с их возрастом, этот механизм, как мы покажем, может оказаться важным. Работоспособность этого механизма была подтверждена численными экспериментами [3] и [4].

2. Эффективность преобразования энергии

Для оценки коэффициента преобразования энергии оболочки сверхновой в кинетическую энергию звезд поля мы рассмотрели простую модель [5]:

- пространственные плотности звезд (ρ_s) и межзвездной среды (ρ_g) в начальный момент однородны;
- остаток сверхновой представляется бесконечно тонкой оболочкой, мгновенно расширяющейся до максимального радиуса R_m . При этом вся межзвездная среда из охваченного оболочкой объема переносится на поверхность сферы R_m , а затем в динамической шкале времени возвращается на место, вновь равномерно заполняя сферу.

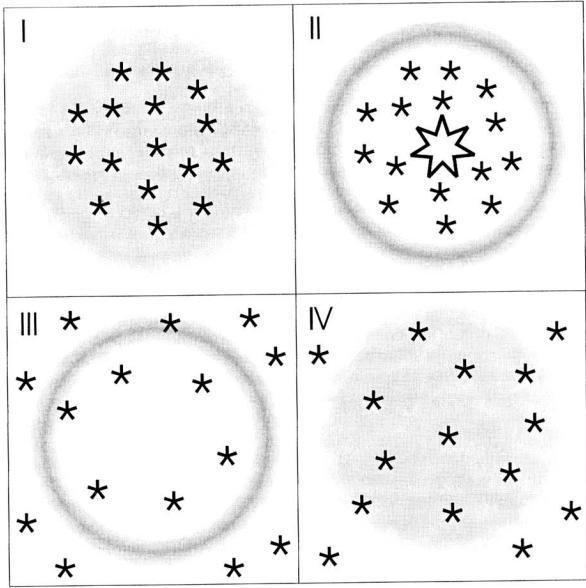


Рисунок 1: Взаимодействие остатка сверхновой со звездами поля. I – группа звезд, имеющих некоторую дисперсию пространственных скоростей, погружена межзвездную среду. II – в центре группы взрывается сверхновая и вымешает газ к границе области. III – внутри оболочки гравитационный потенциал понизился, поэтому часть звезд покинула эту область. IV – остаток сверхновой остыл; плотность газа восстановилась; часть звезд вернулась, но с возросшей механической энергией

Полагая, что вся начальная кинетическая энергия оболочки идет на преодоление гравитации, мы получили [5] коэффициент преобразования энергии η_0 при $\rho_g \leq \rho_s$:

$$\eta_0 = 0.63 \cdot \frac{3k - 3k^2 + k^3}{1 + 0.5k}, \quad (2)$$

а при $\rho_g > \rho_s$:

$$\eta_0 = \frac{0.63}{1 + 0.5k}, \quad (3)$$

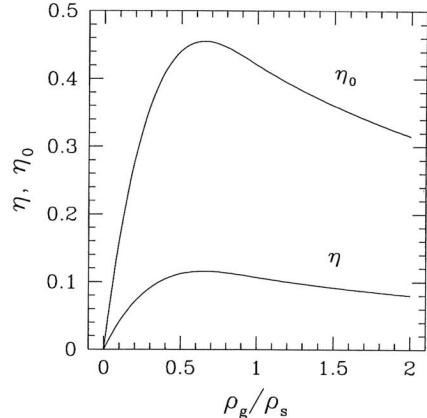


Рисунок 2: Коэффициент преобразования энергии оболочки сверхновой в кинетическую энергию звезд как функция относительной плотности газа (ρ_g/ρ_s). η_0 – без учета радиационных потерь энергии; $\eta = 0.25\eta_0$ – с учетом потери энергии оболочки на излучение

где $k \equiv \rho_g/\rho_s$. Ход η_0 показан на рис. 2. Поскольку эта зависимость получена в предположении полного преобразования кинетической энергии оболочки в ее потенциальную энергию в гравитационном поле звезд и газа, она дает завышенную оценку эффективности процесса. Некоторая часть энергии оболочки, безусловно, термализуется и высыпчивается. Мы оценили вклад этого процесса и нашли [5], что при условиях, характерных для звездных скоплений и галактических дисков, на излучение расширяющейся оболочки теряется порядка 75% ее начальной энергии. С учетом этого получим окончательную оценку для коэффициента преобразования энергии:

$$\eta \approx 0.25\eta_0. \quad (4)$$

Эту формулу можно считать вполне пригодной для астрофизических оценок. Ход η показан на рис. 2.

3. Вклад энергии сверхновых в эволюцию звездного диска Галактики

Как известно, самые молодые населения галактического диска образуют наиболее тонкую его подсистему с характерной высотой над экваториальной плоскостью около 100 pc и соответствующей дисперсией скоро-

стей порядка 10 км/с. С увеличением возраста звезд растет как полутолщина звездного диска, так и дисперсия их скоростей. Рассматривались различные механизмы этой эволюции (например, гравитационные возмущения со стороны гигантских молекулярных облаков или спиральных рукавов), но определенного мнения об относительной роли этих процессов до сих пор нет [6].

Рассмотрим бесконечный однородный диск полутолщиной H и поверхностью плотностью σ . Гравитационное ускорение над диском составляет $g = 4\pi G\sigma$, а работа по увеличению полутолщины диска вдвое равна $E = 4\pi G\sigma^2 H/3$. Чтобы оценить, насколько сильно описанные выше механизм может изменить структуру галактического диска, возьмем в расчет только вспышки сверхновых, удельное энерговыделение которых (на единицу массы, сформировавшихся звезд) составляет $\epsilon = 10^{51} \text{ эрг}/100M_\odot$ [7]. Звездному населению передается доля η этой энергии. Отсюда найдем характерное изменение толщины галактического диска:

$$H = \frac{3\epsilon\eta}{4\pi G\sigma}. \quad (5)$$

Поверхностная плотность галактического диска имеет порядок $\sigma \approx 10^2 M_\odot/\text{пк}^2$. Учитывая, что в тонком диске Галактики средняя плотность межзвездного вещества близка к средней плотности звезд, а с переходом к толстому диску отношение ρ_b/ρ_s существенно уменьшается, можно принять в качестве среднего значения $\eta = 0.01$. Тогда оценка для изменения толщины диска составит $H \approx 3 \text{ кп}$. Этого значения более чем достаточно, чтобы со всей серьезностью отнести к предложенному механизму преобразования энергии сверхновых в энергию движения звезд поля. Даже если мы несколько переоценили его эффективность (например, не учли возможность "галактических фонтанов", снижающих энергию остатков сверхновых), все равно этот механизм должен оказывать сильное влияние на эволюцию вертикальной структуры звездного диска Галактики.

Литература

- [1] Zwicky F., 1953, Publ. Astron. Soc. Pacific, 65, 205
- [2] Сурдин В.Г., 1975, Об эволюции шаровых скоплений и происхождении звезд гало. Дипломная работа, физический факультет МГУ
- [3] Surdin V.G., Moskal' E.V., 1997, Young Stellar Aggregates Embedded in Expanding Supershells // Star Formation Near and Far, Eds. Holt S.S. and Mundy L.G., AIP Press, New York, p. 279
- [4] Moskal' E.V., Surdin V.G., 1998, Dynamical models of stellar associations // Astronomical and Astrophysical Transactions, 15, 37
- [5] Сурдин В.Г., Феоктистов Л.А., 2001, Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия, 56, 6, 61

- [6] Binney J., Tremaine S., 1987, Galactic Dynamics. Princeton University Press.
- [7] Сурдин В.Г., 2001, Рождение звезд, М.: УРСС