

УДК: 524—37—4

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

К ДИНАМИКЕ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ОБОЛОЧЕК

Выбрасывание вещества в виде расширяющихся оболочек происходит при вспышках новых и сверхновых звезд, при формировании планетарных туманностей. Возможно также образование расширяющихся оболочек в процессе истечения вещества из звезд (например Вольфа-Райе) в межзвездную среду. Быть может, проявления активности в ядрах галактик и квазарах тоже приводят к появлению движущихся оболочек.

Вопросы динамики расширяющихся оболочек уже исследовались в ряде работ [1—6]. При этом принималось во внимание, что масса оболочки возрастает по мере движения как за счет вещества, захватываемого оболочкой из окружающей среды, так и за счет вещества, выбрасываемого из центрального тела и догоняющего оболочку. Таким образом, учитывалось как торможение оболочки при захвате вещества из окружающей среды, так и ускорение оболочки выбрасываемым из центра расширения веществом.

Первоначально Я. Оорт [1] учитывал только торможение окружающей средой и написал строгое решение этой сравнительно простой задачи. Найденные формулы были использованы для анализа расширения оболочек новых звезд на поздних стадиях. Затем автор [2—4] получил точные аналитические результаты для случая, когда действуют оба вышеуказанных динамических фактора. Численное решение такой же задачи выполнено Э. Р. Мустелем [5]. В работе В. Г. Горбацкого [6] изучалось движение оболочек новых звезд на ранних стадиях под воздействием только выбрасываемого звездой вещества.

Автор использовал полученное общее решение при установлении эффекта ускоренного расширения оболочек планетарных туманностей [2], подтвержденного теперь в работах многих исследователей. Надо отметить, что недавно обнаружено [7] наряду с ускоренным движением оболочек также замедление на больших расстояниях от ядра. Это, естественно, связано с влиянием межзвездной среды на расширение оболочек планетарных туманностей.

В теоретических работах [1—6] газодинамические эффекты не учитывались, однако имеются основания полагать, что полученные решения достаточно хорошо соответствуют действительности. Отметим еще одно допущение, принятое в [1—6] и состоящее в отбрасывании силы притяжения оболочки центральным телом. Теперь мы учтем эту силу, но ограничимся случаем, когда нет вещества, выбрасываемого из центра и попадающего в оболочку.

Будем считать оболочку сферически симметричной и тонкой (толщина значительно меньше радиуса), а среду, в которой движется оболочка, однородной, с плотностью вещества ρ . Пусть в начальный момент времени $t = 0$ радиус оболочки r равен r_0 , скорость расширения v соответствует значению v_0 и масса m равна m_0 . Уравнение движения оболочки при сделанных допущениях имеет вид

$$\frac{d}{dt}(mv) = -\frac{GMm}{r^2}, \quad (1)$$

где G — гравитационная постоянная и M — масса центрального тела, от которого расширяется оболочка. Кроме того, изменение массы оболочки в зависимости от r определяется соотношением

$$m = m_0 + \frac{4}{3} \pi r^3 \rho, \quad (2)$$

написанным при условии

$$\frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho \ll m_0, \quad (3)$$

которое будем считать выполняющимся.

Для решения (1) сделаем в нем замену независимой переменной t на r с помощью соотношения $dr/dt = v$. Интегрируя полученную форму уравнения и учитывая начальное условие, имеем

$$v = \frac{F(r)}{1 + a(r)}, \quad (4)$$

где обозначено

$$F^2(r) = v_0^2 - \frac{2GM}{r} \left[\left(\frac{r}{r_0} - 1 \right) + a(r) + \frac{1}{5} a^2(r) \right], \quad (5)$$

а также

$$a(r) = \frac{4\pi r^3 \rho}{3m_0}. \quad (6)$$

Из полученных формул следует важный вывод: скорость расширения обращается в нуль при значении $r = r_*$, которое находится из уравнения

$$v_0^2 = \frac{2GM}{r_*} \left[\left(\frac{r_*}{r_0} - 1 \right) + a(r_*) + \frac{1}{5} a^2(r_*) \right]. \quad (7)$$

Если принять условие, что начальная скорость значительно больше параболической,

$$v_0^2 \gg \frac{2GM}{r_0}, \quad (8)$$

то из (7) следует

$$r_*^5 = \frac{45 m_0^2 v_0^2}{32 \pi^2 G M \rho^2}. \quad (9)$$

Время достижения оболочкой радиуса r получается интегрированием (4). Соответствующая формула имеет вид

$$t = \int_{r_0}^r \frac{1 + a(r')}{F(r')} dr', \quad (10)$$

а t_* — время остановки оболочки — определяется по этой формуле при $r = r_*$. Для условия (8) находим оценку его величины

$$t_* = \frac{4\pi r_*^4}{15 m_0 v_0} I, \quad (11)$$

где

$$I = \int_0^1 (1-x)^{-1/2} x^{-1/5} dx = 2.30. \quad (12)$$

Если сопоставить времена t_* и $t_0 = r_*/v_0$, а также обозначить $\tau = t_*/t_0$, то, используя (6) и (11), получим

$$\tau = \frac{4\pi r_*^3}{15 m_0} I = \frac{1}{5} a(r_*) I. \quad (13)$$

Величина τ показывает, во сколько раз реальное время торможения оболочки больше времени расширения с начальной скоростью v_0 до расстояния от центра r_* , чему соответствует движение в пустом пространстве ($\rho = 0$). Как видно из (12) и (13), значение τ по порядку величины близ-

ко к $a(r_*)$ и определяется отношением массы вещества, захваченного оболочкой при ее движении, к начальной массе. Остановка расширения обусловлена тем, что нарастание массы оболочки на больших расстояниях от центра происходит так быстро, что ослабление притяжения центральным телом на фоне этого процесса оказывается сравнительно медленным.

Эффект полной остановки в расширении оболочки может иметь важное значение для анализа космогонических вопросов. Действительно, после остановки вещество оболочки начнет двигаться к центру притяжения. Это обстоятельство позволяет истолковывать направление эволюции.

On the Dynamics of Expanding Shells. The problem of expansion of a fine spherical shell in a homogeneous medium which it captures has been solved, taking into account the shell gravitation by the central body.

28 октября 1987

Ленинградский государственный
университет

И. Н. МИНИН

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Oort, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 106, 159, 1946.
2. И. Н. Минин, в кн. «Труды четвертого совещания по вопросам космогонии», Изд. АН СССР, М., 1955, стр. 214.
3. И. Н. Минин, Астрон. ж., 37, 939, 1960.
4. В. Г. Горбацкий, И. Н. Минин, Нестационарные звезды, Физматгиз, М., 1963, стр. 179.
5. Э. Р. Мустель, Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 19, 153, 1958; 21, 24, 1959.
6. В. Г. Горбацкий, Вестн. ЛГУ, сер. мат. мех. астр., № 1, 142, 1960; № 13, 131, 1960.
7. F. Sabbadin, E. Hamzaoglu, Astron. and Astrophys., 110, 105, 1982.