АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

УДК 523.68, 530.12

ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И АСТЕРОИДНАЯ ОПАСНОСТЬ

А. А. Шацкий[*)]

E-mail: shatskiy@asc.rssi.ru

Рассчитана вероятность попадания первичной черной дыры в пояс астероидов Койпера (в Солнечной системе). Показано, что при определенных массах первичные черные дыры могут значительно менять траектории и орбиты астероидов. Такие события могут явиться причиной локальных катастроф в Солнечной системе и глобальных для Земли (например, падение Тунгусского метеорита). Оценена частота событий такого рода.

Введение

Астероидная опасность является сегодня одной из актуальных научных проблем. Геофизические данные говорят о том, что Земля подвергалась опасным астероидным атакам не регулярно, а через определенные промежутки времени — около 190 млн лет. Эти глобальные повторяющиеся события дают основания говорить, что вероятность астероидных (или метеоритных) атак не постоянна во времени, а зависит от внешних (по отношению к Солнечной системе) причин [1].

На сегодняшний день природа темной материи не выяснена. Одними из кандидатов на эту роль могут быть первичные черные дыры (ПЧД). В случае если вся темная материя состоит из ПЧД, то на их массы есть ограничение не только снизу (Хоукинговский предел), но и сверху. Сверху массы ПЧД ограничены данными по гравитационному микролинзированию (см., напр., [2]). Эти ограничения еще не имеют однозначных пределов и, по разным оценкам, лежат в диапазоне $10^{26} \div 10^{28}$ г (т. е. порядка масс Луны или Земли).

В настоящей работе найдена вероятность столкновения (взаимодействия) ПЧД, пролетающей через Солнечную систему, с астероидом. Данный процесс может стать источником дополнительной опасности столкновения Земли с космическим телом.

На сегодняшний день обнаружены астероиды, орбиты которых проходят в опасной близости от Земли. По-настоящему опасны для Земли только те астероиды, которые имеют достаточно большие размер и массу. Например, Тунгусский метеорит должен был иметь размеры около 50 м в поперечнике.

Как известно, в Солнечной системе существуют три основных астероидных пояса:

1) главный пояс астероидов (пояс Фаэтона) имеет массу около 10^{24} г $\sim 10^{-3} M_{\oplus}$, где $M_{\oplus}$ — масса Земли. Его астероиды находятся на расстояниях 2–3.5 астрономической единицы (а. е.) от Солнца;

2) пояс Койпера имеет массу около 10^{27} г $\sim M_{\oplus}$. Его астероиды находятся на расстояниях 40–60 а. е. от Солнца;

3) облако Оорта находится на границе Солнечной системы (> 100 а. е.), и его масса точно неизвестна.

Как известно, вероятность столкновения с космическим телом прямо пропорциональна площади поверхности этого тела. Масса всех астероидов составляет величину порядка массы Земли, но ввиду их очень большого количества полная площадь их поверхностей оказывается порядка площади поверхности Солнца. Кроме этого есть еще один важный фактор, увеличивающий вероятность столкновения: масса астероида несравненно меньше массы Солнца, поэтому для изменения траектории астероида совершенно необязательно его прямое столкновение с ПЧД. Для этого достаточно гравитационного рассеяния ПЧД на астероиде, т. е. пролета ПЧД на некотором удалении от него. Этот фактор увеличивает вероятность взаимодействия ПЧД и астероида на несколько порядков. Поэтому вероятность взаимодействия ПЧД с астероидом оказывается гораздо больше, чем с любой из планет или даже с Солнцем.

Вероятность попадания ПЧД в Солнечную систему

В рамках предлагаемой гипотезы считаем, что основная часть массы в Галактике содержится в ПЧД. Для простоты полагаем, что все ПЧД имеют массу $m_{\rm pbh}$ (при непрерывном распределении ПЧД по массам нужно будет ввести плотность распределения по $m_{\rm pbh}$).

Концентрация ПЧД в Галактике $n_{\rm pbh} = \rho_{\rm gal}/m_{\rm pbh}$, где $\rho_{\rm gal} \approx 10^{-24}$ г/см^3 — средняя плотность массы в Галактике.

[*)] Астрокосмический центр, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

Поэтому частота столкновений ПЧД с Солнечной системой

$$\nu_0 = \pi R_a^2 v \rho_{\rm gal}/m_{\rm pbh}, \qquad (1)$$

где R_a — средний радиус орбиты астероидов, v — средняя скорость ПЧД в Галактике (на бесконечности от Солнечной системы).

Вероятность столкновения ПЧД с астероидом

Пусть полная масса астероидов есть $M_{\rm ast}$. Плотность астероидов обычно лежит в пределах $\rho_{\rm ast} = 2 \div 7$ г/см^3. Размер астероидов лежит в очень широком диапазоне, но большую часть составляют астероиды с размерами до 1 км, причем астероидов тем больше, чем меньше размер рассматриваемых астероидов. Рассматривать слишком малые астероиды неинтересно: их столкновения не приводят к серьезным катаклизмам. Поэтому имеет смысл рассматривать астероиды с размерами больше некоторого критического, например $D_{\rm ast} \sim 100$ м. Можно считать, что число таких астероидов

$$N_{\rm ast} = \frac{\gamma_{\rm ast} M_{\rm ast}}{\rho_{\rm ast} D_{\rm ast}^3}, \qquad (2)$$

где $\gamma_{\rm ast}$ — массовая доля астероидов с размерами больше $D_{\rm ast}$.

Частота взаимодействий ПЧД с астероидами ν получается умножением частоты ν_0 на вероятность ν_1 взаимодействия ПЧД с астероидом в Солнечной системе, равную

$$\nu_1 = S_{\rm ast}/(\pi R_a^2), \quad S_{\rm ast} = N_{\rm ast} \cdot \pi h^2, \qquad (3)$$

где h — максимальный прицельный параметр, при котором ПЧД способна значительно изменить траекторию астероида.

Таким образом, используя (1), получаем

$$\nu = \frac{\pi \gamma_{\rm ast} \rho_{\rm gal} M_{\rm ast} v h^2}{m_{\rm pbh} \rho_{\rm ast} D_{\rm ast}^3}. \qquad (4)$$

Величина h будет рассчитана в следующем разделе.

Резкое изменение орбит астероидов за счет их рассеяния на ПЧД

Взаимодействие ПЧД с астероидом является классической задачей двух тел, которую удобнее решать в системе центра масс.

В этой системе удобно ввести следующие обозначения:

$m = m_{\rm ast} m_{\rm pbh}/(m_{\rm ast} + m_{\rm pbh})$ — приведенная масса;

$P = mv$ — импульс приведенной массы в системе центра масс;

$L = mvh$ — угловой момент системы ПЧД—астероид;

r_0 — минимальное расстояние между ПЧД и астероидом;

$U_0 = G m_{\rm pbh} m_{\rm ast}/r_0$ — модуль гравитационной энергии взаимодействия в перигелии орбиты (G — гравитационная постоянная);

$E = \frac{1}{2} m v^2$ — полная энергия системы;

$A = U_0/(2E) = G(m_{\rm pbh} + m_{\rm ast})/(r_0 v^2)$ — безразмерный параметр рассеяния;

$B = r_0/h$ — отношение минимального расстояния к прицельному параметру.

С учетом соотношений между параметрами орбиты и вычитания числа π — нулевого приближения угол отклонения импульса после рассеяния ПЧД на астероиде определяется выражением [3]

$$\Delta\varphi = 2\arccos[1] - 2\arccos\left[\frac{-A}{1+A}\right] - \pi. \qquad (5)$$

При этом для B получается

$$B^2 = \frac{1}{1+2A}. \qquad (6)$$

Изменение начального импульса в системе центра масс есть*)

$$(\Delta P)^2 = 2P^2[1 - \cos(\Delta\varphi)]. \qquad (7)$$

Используя тривиальную тригонометрию, из (5) и (7) получаем

$$\Delta P = P \cdot \frac{2A}{1+A} \approx 2PA = \frac{2Gm(m_{\rm pbh} + m_{\rm ast})}{r r_0 v}. \qquad (8)$$

При движении в Галактике ПЧД имеют среднюю скорость порядка дисперсии скоростей звезд: $v \approx 300$ км/с. Поэтому полная энергия E системы гораздо больше гравитационной энергии взаимодействия: $E \gg U_0$, и как следствие этого $A \ll 1$, $B \approx 1$.

Условием схода астероида с его орбиты является равенство по порядку величины начального импульса астероида $P_{\rm ast} = m_{\rm ast} v_{\rm ast}$ и переданного астероиду импульса ΔP:

$$\alpha P_{\rm ast} = \alpha m_{\rm ast} v_{\rm ast} = \Delta P = \frac{2PA}{1+A}, \qquad (9)$$

где, согласно (7), параметр $\alpha = \sqrt{2(1 - \cos\Delta\varphi)}$ характеризует степень воздействия на астероид.

Учитывая, что на круговой орбите с радиусом R астероид имеет скорость $v_{\rm ast} = \sqrt{GM_\odot/R}$ ($M_\odot$ — масса Солнца), из (9) получаем точное выражение для h^2 с учетом влияния массы астероида:

$$h^2 = \frac{4Gm_{\rm pbh}^2 R}{\alpha^2 v^2 M_\odot}\left[1 - \left(\frac{\alpha(m_{\rm pbh} + m_{\rm ast}) v_{\rm ast}}{2 m_{\rm pbh} v}\right)^2\right], \qquad (10)$$

или

$$h \approx \left(\frac{m_{\rm pbh}}{\alpha M_\oplus}\right)\sqrt{\frac{R}{R_{\rm ast}}}\,800 \text{ км}, \qquad (11)$$

где обозначено: $R_{\rm ast} \approx 10^{15}$ см — среднее расстояние от Солнца до пояса астероидов Койпера.

*) Для астероида и ПЧД изменение импульса по модулю такое же.

Используя выражение для h, получаем для A

$$A \approx \alpha \sqrt{\frac{GM_\odot}{4v^2R}} \left(\frac{m_{\rm pbh} + m_{\rm ast}}{m_{\rm pbh}} \right) \ll 1 \quad (\text{при } m_{\rm pbh} > m_{\rm ast}). \tag{12}$$

Это выражение подтверждает сделанное выше предположение о малости величины A для большинства астероидов из пояса Койпера.

Используя (3) и (10), получаем выражение для вероятности отклонения астероида ПЧД при ее попадании в Солнечную систему:

$$\nu_1 \approx \frac{4Gm_{\rm pbh}^2 \gamma_{\rm ast} M_{\rm ast}}{\alpha^2 v^2 M_\odot R_{\rm ast} \rho_{\rm ast} D_{\rm ast}^3} \approx \frac{2\gamma_{\rm ast} m_{\rm pbh}^2 (100\ \text{м})^3}{\alpha^2 M_\oplus^2 D_{\rm ast}^3}. \tag{13}$$

Подставляя выражение (10) в (4), получаем частоту сбоя орбит крупных астероидов

$$\nu \approx \frac{4\pi G \gamma_{\rm ast} \rho_{\rm gal} M_{\rm ast} R m_{\rm pbh}}{\alpha^2 M_\odot \rho_{\rm ast} D_{\rm ast}^3 v}. \tag{14}$$

Выводы

Итоговое выражение для частоты искомых событий ν удобно представить в виде

$$\nu \approx \left(\frac{10^{-7} ys^{-1}}{\alpha^2} \right) \left(\frac{m_{\rm pbh}}{M_\oplus} \right) \left(\frac{M_{\rm ast}}{M_\oplus} \right) \times \\ \times \left(\frac{\gamma_{\rm ast}^{1/3} (100\ \text{м})}{D_{\rm ast}} \right)^3 \left(\frac{R}{R_{\rm ast}} \right). \tag{15}$$

Последние три множителя в формуле (15) порядка единицы, поэтому итоговое выражение определяется только распределением и полной массой ПЧД в Галактике.

Оценить долю рассеянных астероидов, попадающих именно на Землю, достаточно сложно. Это связано с тем, что даже в отсутствие прямого попадания в какую-либо планету астероид с высокой вероятностью остается в Солнечной системе. Орбита его становится намного опасней: она пересекает орбиты других астероидов и планет. Поэтому рано или поздно этот астероид или вторичные астероиды (выбитые первичным) падают на планеты.

Поэтому вероятность попадания на Землю рассеянного астероида можно оценить (очень грубо) как отношение площади поверхности Земли к сумме площадей поверхностей остальных планет. Это фактор порядка 10^{-2}. Поэтому формула (15) вполне может давать периоды бомбардировок около 190 млн лет, что совпадает с наблюдательными геофизическими данными.

Если рассмотренная в настоящей работе гипотеза верна, то предлагаемые сегодня методы борьбы с астероидной опасностью оказываются малоэффективны. Это связано с тем, что основным принципом таких методов является обнаружение крупных метеоров и астероидов с опасными орбитами и дальнейший мониторинг таких объектов. Если же основная опасность кроется в резком изменении орбит астероидов (за счет их рассеяния на ПЧД), то выявить опасные для Земли объекты заблаговременно не удастся.

При подготовке работы были использованы материалы с сайта http://www.ASTROLAB.ru.

Литература

1. *Гончаров Г.Н., Орлов В.В.* // Астрон. журн. 2003. **80**, № 11. С. 1002.
2. *Carr B.J.* // E-print ArXiv: astro-ph/0511743. 2005. **1**.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. М., 1995.

Поступила в редакцию
12.11.2007