

## МОГУТ ЛИ ВСПЫХИВАЮЩИЕ ЗВЕЗДЫ ОБЪЯСНИТЬ АННИГИЛЯЦИОННУЮ ЛИНИЮ ИЗ БАЛДЖА ГАЛАКТИКИ?

Г.С.БИСНОВАТЫЙ-КОГАН<sup>1,2</sup>, А.С.ПОЗАНЕНКО<sup>1,2</sup>

Поступила 26 января 2017

В качестве источника позитронов, необходимых для образования наблюдаемой узкой аннигиляционной линии из балджа Галактики, мы рассматриваем маломассивные вспыхивающие звезды, составляющие основное население балджа Галактики. Оценки, основанные на наблюдениях вспышек на звездах малой массы, в сочетании с наблюдениями аннигиляционной линии в солнечных вспышках, позволяют сделать утверждение о том, что скорость производства позитронов при вспышках звезд балджа может быть достаточна для объяснения формирования узкой стационарной аннигиляционной линии, наблюдаемой из области балджа Галактики.

*Ключевые слова: аннигиляционная линия; позитроны; вспыхивающие звезды*

1. *Введение.* Электрон-позитронная аннигиляционная линия из центра Галактики была открыта в аэростатном эксперименте с помощью германиевого гамма-телескопа [1] и подтверждена экспериментом OSSE на космической комптоновской гамма обсерватории [2,3]. Длительные наблюдения космической обсерватории INTEGRAL [4,5] позволили получить подробные свойства аннигиляционной линии из балджа Галактики. Эти наблюдения позволили оценить частоту образования позитронов ( $e^+$ ) в балдже на уровне  $2 \times 10^{43} \text{ с}^{-1}$  [6]. В литературе обсуждались возможные источники происхождения позитронов. Рассматривались вспышки сверхновых [7,8], микроквазары [9], космические гамма-всплески [10], приливные разрушения звезд [11], активные процессы в окрестности черной дыры в центре Галактики Sgr A\* [12], генерация  $e^+$  субрелятивистскими космическими лучами [13], а также процессы, связанные с распадом частиц темной материи [14,15].

Одной из важных отличительных особенностей наблюдаемой диффузной аннигиляционной линии является отсутствие пространственно разрешенных источников [6]. Любая модель образования этой линии должна учитывать это свойство, которое не выполняется в большинстве перечисленных выше моделей.

В качестве источника позитронов, необходимых для образования наблюдаемой аннигиляционной линии из балджа Галактики, мы предлагаем рассмотреть

маломассивные вспыхивающие звезды, которые составляют основное население балджа Галактики. Оценки, основанные на наблюдениях вспышек на звездах малой массы, в сочетании с наблюдениями аннигиляционной линии в солнечных вспышках, позволяют сделать утверждение о том, что скорость производства позитронов при вспышках звезд балджа Галактики может быть достаточна для объяснения формирования наблюдаемой аннигиляционной линии.

2. *Позитроны в солнечных вспышках.* По интенсивности аннигиляционной линии  $E_\gamma = 511$  кэВ, наблюдаемой в мощных солнечных вспышках, можно оценить число позитронов, рождающихся в этих вспышках. Во время вспышки, наблюдавшейся в июле 2002г. в течение 960с, было зарегистрировано  $F_{511, \text{sun}} = 83 \pm 14$  см<sup>-2</sup> гамма-квантов в аннигиляционной линии [16]. Вспышка была зарегистрирована германиевым детектором космической обсерватории RHESSI. Используя эти данные, можно оценить число позитронов, эжектированных в процессе вспышки, в предположении изотропии излучаемой линии. При расстоянии от Земли до Солнца  $D = 1.5 \cdot 10^{13}$  см, полное число фотонов, излученных в линии 511 кэВ, равняется

$$N_{511, \text{sun}} = F_{511, \text{sun}} 4\pi D^2 = 2.3 \cdot 10^{29}. \quad (1)$$

Очевидно, что регистрация аннигиляционной линии прямо указывает на рождение позитронов, однако точная оценка количества позитронов, рожденных в солнечной вспышке, затруднительна по нескольким причинам.

Аннигиляция позитрона может происходить по двум основным каналам, один из них - через образование ортопозитрония с последующей аннигиляцией и излучением трех фотонов различной энергии. В результате, это приводит не к образованию линии с энергией 511 кэВ в спектре излучения, а к образованию континуума. Канал аннигиляции через образование парапозитрония приводит к рождению двух фотонов с равной энергией 511 кэВ, т.е. образованию аннигиляционной линии. Относительная эффективность аннигиляции по этим двум каналам известна как отношение  $Q_{3\gamma}/Q_{2\gamma}$  [17]. Если это отношение близко к единице, то число проаннигилированных позитронов примерно равно числу гамма-квантов в линии, имея в виду, что при аннигиляции парапозитрония рождаются два кванта с энергией 511 кэВ.

Излучение в линии 511 кэВ может быть анизотропным, так как излучение происходит в небольшой области солнечной фотосферы.

И, наконец, только малая часть позитронов может проаннигилировать за время вспышки, остальная часть не проаннигилировавших позитронов попадает в межпланетную среду.

Пусть позитроны, проаннигилировавшие по пути от Солнца к Земле, составляют долю  $\delta$  от всех позитронов, образованных в солнечной вспышке. Тогда полное количество позитронов, генерируемых во время вспышки,

можно записать в виде  $N_{e^+,sun} \approx N_{511,sun}/\delta$ . Позитроны, производимые во вспышках за счет бета-распада радиоактивных изотопов являются почти релятивистскими - одним из признаков этого является наблюдаемая поляризация микроволнового излучения солнечных вспышек [18]. В этом случае сечение аннигиляции [19] есть

$$\sigma_{ann} \approx \pi r_e^2 = 2.5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2, \quad (2)$$

где  $r_e = 2.6 \cdot 10^{-13}$  см - классический радиус электрона.

Концентрация электронов в солнечной короне может быть аппроксимирована степенной функцией [20], с плотностью у основания короны  $n_{cor,0} \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Число электронов на луче зрения от Солнца до Земли можно приблизительно оценить как  $N_{e,cor} \approx n_{cor,0} R_e \approx 7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ . С учетом (2), это приводит к вероятности аннигиляции позитронов при их движении от Солнца до Земли в виде  $W_{ann} \approx \sigma_{ann} N_{e,cor} \approx 2 \cdot 10^{-6} = \delta$ . Для этого значения  $\delta$ , число позитронов, рожденных в рассмотренной солнечной вспышке, можно оценить как

$$N_{e^+,sun,flare} \approx N_{511,sun}/\delta = 2.3 \cdot 10^{29}/\delta \approx 1.2 \cdot 10^{35}. \quad (3)$$

Теперь можно вычислить отношение  $\eta$  числа позитронов, рожденных в солнечной вспышке, к болометрической энергии вспышки. Для вспышки класса X4.8, рассмотренной выше, болометрическая энергия составляет приблизительно  $5 \cdot 10^{32}$  эрг [21]. Тогда имеем

$$\eta = 1.2 \cdot 10^{35} / 5 \cdot 10^{32} = 240 e^+ / \text{эрг}. \quad (4)$$

*3. Рождение позитронов во вспышках звезд галактического балджа.* Для оценки скорости рождения позитронов во вспышках звезд галактического балджа требуется знать число вспышек звезд в балдже, свойства вспышек на них, а также введенную выше для Солнца (4) величину  $\eta$ , в применении к вспышкам звезд. Частоту вспышек на вспышках звезд можно оценить, используя данные, полученные с космического телескопа Кеплер [22-24]. Из наблюдений 4494 мощных вспышек на 77 звездах класса G, было получено степенное распределение для частоты вспышек  $\nu$  в зависимости от их болометрической светимости  $E$

$$\nu(E) = A \cdot E^{-\gamma}, \quad \gamma = 2.04 \pm 0.17. \quad (5)$$

Для индивидуальных звезд индекс  $\gamma$  может меняться от 0.65 до 2.45. Для дальнейших оценок используем значение  $\gamma = 2$ . Нормировочный коэффициент  $A$  оценим из наблюдений часто вспышек звезд на космическом телескопе Кеплер как  $A \approx 10^{36} \text{ эрг}^{-1} \text{ год}^{-1}$  (см. рис.8 из [24]). Средняя полная энергия

$E_{tot}$ , выделяемая одной вспыхивающей звездой за один год, есть

$$E_{tot} = \int v(E) \cdot E dE \text{ эрг/год.} \quad (6)$$

В качестве верхнего предела возьмем болометрическую энергию наиболее интенсивной из наблюдаемых на Кеплере вспышки с  $E_{max} \approx 2 \cdot 10^{37}$  эрг. Минимальный энергетический предел вспышки определить невозможно, ввиду недостаточной чувствительности телескопа. Возьмем вместо этого минимальную энергию наблюдаемых солнечных вспышек  $E_{min} \approx 10^{24}$  эрг [21]. Используя эти значения для пределов, получаем

$$E_{tot} = A \cdot \ln(E_{max}/E_{min}) \approx 3 \cdot 10^{37} \text{ эрг/год.} \quad (7)$$

Принимая массу балджа Галактики равной  $M_b = 2 \cdot 10^{10} M_{sun}$  [25] и среднюю массу вспыхивающих звезд в балдже классов G, K, M примерно  $0.3 \cdot M_{sun}$ , получим полное число звезд  $N_{stars} = M_b / (0.3 \cdot M_{sun}) \approx 6 \cdot 10^{10}$ . Полная скорость производства позитронов в балдже  $N_{e^+}$  записывается в виде

$$N_{e^+} = N_{stars} \cdot E_{tot} \cdot \eta = 1.8 \cdot 10^{48} \eta e^+/\text{год.} \quad (8)$$

Из наблюдений  $e^+e^-$  аннигиляционной линии в балдже известна частота образования позитронов  $R_{e^+} = 2 \cdot 10^{43} \text{ с}^{-1} \approx 6 \cdot 10^{50} \text{ год}^{-1}$ , необходимая для объяснения интенсивности линии [6]. Сравнивая эту частоту с величиной из формулы (8), получаем, что вспыхивающие звезды могут обеспечить необходимое производство позитронов при  $\eta \approx 340$ , что немногим больше величины  $\eta \approx 240$ , полученной для Солнца.

Полученное расхождение в величине  $\eta$  не является значимым, ввиду имеющихся неопределенностей в параметрах, используемых при оценках. Такими параметрами являются значения максимальной и минимальной энергии звездных вспышек (7), коэффициента конверсии  $\eta$  (4), показателя степени  $\gamma$  в распределении частоты вспышек от энергии (5), доли вспыхивающих звезд в балдже, распределение процессов аннигиляции по различным каналам в орто- и парапозитронии. Для рассмотренной выше солнечной вспышки [16], только  $\sim 10^{-4}$  от болометрической светимости вспышки тратится на производство позитронов. Эта величина может быть больше для более мощных вспышек.

Таким образом, сделанные нами достаточно грубые оценки указывают на то, что производство позитронов вспыхивающими звездами балджа является существенным, и, возможно, и главным источником производства позитронов, ответственных за образование аннигиляционной линии, наблюдаемой из центральной части Галактики.

Рассмотренная модель образования позитронов применима ко всем объектам, содержащим много вспыхивающих звезд. В Галактике такими

объектами являются шаровые скопления, в которых красные карлики являются основной звездной популяцией. Для наблюдений аннигиляционной линии от ближайших массивных шаровых скоплений наиболее подходящим является шаровое скопление NGC 5139 на расстоянии 4.8 кпк, с массой  $\sim 4 \cdot 10^6 M_{\text{sun}}$  [26]. Поток квантов  $e^+e^-$  аннигиляционной линии от этого скопления, с учетом его массы и расстояния, должен быть примерно в 1000 раз меньше, чем поток от балджа Галактики. Достаточная чувствительность для подобных наблюдений может быть достигнута будущими гамма-телескопами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-12-30016). Г.С.Б.-К. выражает благодарность Пьетро Убертини (Pietro Ubertini) за полезное обсуждение и ценные замечания.

<sup>1</sup> Институт Космических Исследований РАН,  
Москва, Россия, e-mail: gkogan@iki.rssi.ru

<sup>2</sup> Национальный Исследовательский Ядерный Университет НИЯУ  
МИФИ, Москва, Россия

## CAN FLARING STARS EXPLAIN THE ANNIHILATION LINE FROM THE GALAXY BULGE?

G.S.BISNOVATYI-KOGAN<sup>1,2</sup>, A.S.POZANENKO<sup>1,2</sup>

We consider low-mass flaring stars representing the main population of the Galactic bulge as a main source of positrons responsible for emission of a narrow annihilation line from the center of the Galaxy. We discuss flares statistics in low-mass stars, and observations of the annihilation line in solar flares. Combined analysis of flare statistics and estimating positron production from the Sun shows that the rate of the positron production from flaring stars of the bulge could be enough for explanation of the stationary narrow annihilation line observed from the Galactic bulge.

Key words: *annihilation line: positrons: flaring stars*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Leventhal, C.J.MacCallum, P.D.Stang*, *Astrophys. J.*, **225**, L11, 1978.
2. *W.R.Purcell, D.A.Grabelsky, M.P.Ulmer et al.*, *Astrophys. J.*, **413**, L85, 1993.
3. *W.R.Purcell, L.-X.Cheng, D.D.Dixon et al.*, *Astrophys. J.*, **491**, 725, 1997.
4. *P.Jean, J.Knodlseder, V.Lonjou et al.*, *Astron. Astrophys.*, **407**, L55, 2003.
5. *E.Churazov, S.Sazonov, S.Tsygankov et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **411**, 1727, 2011.
6. *T.Siegert, R.Diehl, G.Khachatryan et al.*, *Astron. Astrophys.*, **586**, A84, 2016.
7. *N.Prantzos*, *Astron. Astrophys.*, **449**, 869, 2006.
8. *A.Alexis, P.Jean, P.Martin, K.Ferriere*, *Astron. Astrophys.*, **564**, A108, 2014.
9. *T.Siegert, R.Diehl, J.Greiner et al.*, *Nature*, **531**, 341, 2016.
10. *E.Parizot, M.Cassir, R.Lehoucq, J.Paul*, *Astron. Astrophys.*, **432**, 889, 2005.
11. *K.S.Cheng, D.O.Chernyshov, V.A.Dogiel*, *Astrophys. J.*, **645**, 1138, 2006.
12. *T.A.Totani*, *PASJ*, **58**, 965, 2006.
13. *M.Pshirkov*, *Physical Review D*, **94**, 103002, 2016.
14. *Y.Ascasibar, P.Jean, C.Bæhm, J.Knodlseder*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **368**, 1695, 2006.
15. *J.-R.Cudell, M.Yu.Khlopov, Q.Wallemacq*, eprint arXiv:1401.5228, 2014.
16. *G.H.Share, R.J.Murphy, J.G.Skibo et al.*, *Astrophys. J.*, **595**, L85, 2003.
17. *R.J.Murphy, G.H.Share, J.G.Skibo, B.Kozlovsky*, *Astrophys. J. Suppl.* **161**, 495, 2005.
18. *G.D.Fleishman, A.T.Altynsev, N.S.Meshalkina*, *Publ. Astron. Soc. of Japan*, **65**, S7, 2013.
19. *V.B.Berestetskii, E.M.Lifshitz, L.P.Pitaevskii*, *Relativistic Quantum Theory*, **4**, Pergamon Press, 1971.
20. *P.B.Esposito, P.Edenhofer, E.Lueneburg*, *Journal of Geophysical Research* **85**, 3414, 1980.
21. *C.J.Schrijver, J.Beer, U.Baltensperger et al.*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **117**, A08103, 2012.
22. *M.Kitze, R.Neuhäuser, V.Hambaryan, C.Ginski*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **442**, 3769, 2014.
23. *S.Candelaresi, A.Hillier, H.Maehara et al.*, *Astrophys. J.*, **792**, 67, 2014.
24. *Chi-Ju Wu, Wing-Huen Ip, Li-Ching Huang*, *Astrophys. J.*, **798**, 92, 2015.
25. *E.Valenti, M.Zoccali, O.A.Gonzalez et al.*, *Astron. Astrophys.*, **587**, L6, 2015.
26. *G. van de Ven, R.C.E. van den Bosch, E.K.Verolme, P.T. de Zeeuw*, *Astron. Astrophys.*, **445**, 513, 2006.