

## ГАММА-ЭКССЕСС В ЦЕНТРЕ ГАЛАКТИКИ – СЛЕД ТЁМНОЙ МАТЕРИИ

В. В. Бурдюжа

*Вероятно, аннигиляция атомов из магнитных монополей (2.4 ГэВ) и их переходы Лаймановской серии (1.8, 2.1, 2.25) ГэВ могли создать гамма-эксцесс в нашем галактическом центре, который наблюдался Ферми обсерваторией. Монополи ГэВ энергий могут образовываться в магнитосферах магнетаров и выдвигаться из них. На галактической шкале атомы из магнитных монополей ( $g^+g^-$ ) – часть тёмной материи.*

**Ключевые слова:** магнитные монополи, гамма-эксцесс.

*Краткое введение.* Довольно давно космическая обсерватория Ферми [1] обнаружила гамма-эксцесс в диапазоне энергий 1–8 ГэВ от нашего Галактического центра, внятного объяснения которому до сих пор нет, хотя некоторые физики понимали, что этот эксцесс – аннигиляция частиц тёмной материи [2]. В центр галактики оседают частицы любых масс, и их концентрация может превышать среднюю концентрацию по галактике в разы. Здесь для оценок использовалась концентрация магнитных монополей, которая была найдена в работе [3], но это, конечно, нижняя граница их концентрации. В галактическом центре есть магнетар SGR 1745–2900, обнаруженный XMM-Newton и Chandra, который мог намного увеличить нижнюю границу концентрации магнитных монополей, полученную в [3], т. к. в его магнитосфере образуются монополи [4]. Из-за огромной силы притяжения магнитные частицы при столкновении мгновенно образовали магнитный атом ( $g^+g^-$ ) – монополиум. В природе существует подобный электрический атом ( $e^+e^-$ ) – позитроний [5]. Вероятности переходов между уровнями у магнитных атомов ГэВ энергий более чем на 20 порядков выше, чем у электрических атомов из-за кубической зависимости вероятности переходов от частоты (энергии). Чтобы избежать путаницы, заметим, что магнитные монополи существуют в двух “модификациях”: монополи с энергией  $\ll 1$  эВ, как топологические дефекты, которые наблюдали несколько групп; и монополи как фундаментальные частицы, которые могут иметь

практически любые энергии. Как известно, одной из причин введения инфляции была необходимость избавиться от избытка магнитных монополей, которые образовались при рождении Вселенной.

Генезис  $g^+$  и  $g^-$ , уровни энергии атомов Лаймановской серии и светимость в  $Ly$ -альфа линии магнитных атомов. Вначале скажем несколько слов о монополярном генезисе. Фундаментальное уравнение Дирака [6] имеет вид:

$$(eg)/\hbar c = k/2, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots, \quad (1)$$

где  $k$  – монополярное квантовое число. При  $k = 1$  магнитный заряд  $g = 68.5e$ . Тогда для магнитных атомов постоянная тонкой структуры равна:

$$\alpha_g = g^2/\hbar c = 34.25. \quad (2)$$

Отношение констант тонкой структуры равно:

$$\alpha_g/\alpha_e = 34.25/(1/137) = 4692.25. \quad (3)$$

Теория Дирака не предсказывает масс магнитных монополей, но обычно массы берут такие, чтобы их классические радиусы совпадали. Тогда мы имеем:

$$m_g = (g/e)^2 m_e = 4692.25 m_e \sim 2.56 m_p \sim 2.4 \text{ ГэВ}. \quad (4)$$

Таким образом, мы получили вероятную массу носителя элементарного магнитного заряда. Из-за огромных сил притяжения магнитные заряды немедленно образовали магнитные атомы – монополиумы. Подобные электрические атомы ( $e^+e^-$ ) хорошо изучены и их свойствами тестировалась электродинамика. Наличие такой атомной конструкции как ( $g^+g^-$ ) даёт надежду обнаружить её в космосе, используя  $Ly$  переходы, энергия которых есть:

$$E_2 = 2.4[(1/n_1)^2 - (1/n_2)^2] = 1.8 \text{ ГэВ}. \quad (5)$$

Здесь важно то, что энергия  $Ly_\alpha$  перехода 1.8 ГэВ и энергия аннигиляции магнитных монополей 2.4 ГэВ попадает в наблюдаемый Ферми обсерваторией диапазон галактического гамма-экссесса 1–8 ГэВ [1]. Светимость в линии  $Ly_\alpha$  достигает:

$$L = 4\pi E A n V \sim 2.5 \times 10^{42} \text{ эрг} \cdot \text{сек}^{-1}. \quad (6)$$

Это значение получено для галактического центра в линии с энергией  $E = 1.8$  ГэВ, вероятностью перехода –  $A \sim 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ ,  $n \sim 10^{-19} \text{ см}^{-3}$ , если геометрия центра галактики – сфера с радиусом в 0.1 парсек, объём которой  $V$ . Другие сильные линии

серии Лаймана  $Ly_{\beta}$  2.1 ГэВ и  $Ly_{\gamma}$  2.25 ГэВ также попадают в диапазон гамма-экссесса. Даже при такой малой плотности монополей ( $10^{-19}$  см $^{-3}$ ) светимость в этой  $Ly_{\alpha}$  линии огромна. Оценку на светимость можно уменьшить на 3 порядка, приняв радиус центра галактики  $\sim 3 \times 10^{17}$  см.

*Заключение.* Монополи, как частицы, могут иметь практически любые энергии. Магнитные монополи с энергией  $\ll 1$  эВ через 130 лет после предсказания П. Кюри [7] были обнаружены недавно в спиновом льду немецкими коллегами [8]. Спиновый лёд – класс экзотических магнитов [9]. Заметим, что магнитные монополи с энергией  $\ll 1$  эВ как топологические дефекты наблюдали несколько групп [10, 11]. Было бы неправильно не упомянуть предсказание И. Рыжкина [12] о локализации магнитных монополей в узлах кристаллической решётки некоторых твёрдых тел. Основной момент этой статьи состоит в том, что часть тёмной материи, состоящая из магнитных атомов, заявила о себе гамма-экссессом. Тёмная материя, как известно, это 25% полного бюджета Вселенной, и она должна содержать также лёгкие бозоны Голдстоуна с энергией  $10^{-5}$  эВ, образующиеся в течение фазовых переходов при потере высокой симметрии в течение эволюции:

$$SO(10) \rightarrow \dots SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(3) \times U(1) \rightarrow U(1). \quad (7)$$

Обсуждая галактический центр, нельзя не отметить строительство глобальной синхронизированной сети радиотелескопов, связанное с исследованием чёрных дыр с угловым разрешением, сопоставимым с их горизонтом событий.

Окончательно: гамма-экссесс в нашем галактическом центре – это совокупность энергий сильных линий Лаймановской серии магнитных атомов ( $g^+g^-$ ) 1.8; 2.1; 2.25 ГэВ и энергии аннигиляции этих атомов 2.4 ГэВ, которые попадают в диапазон гамма-экссесса. Монополи ГэВ-энергий образуются в магнитосферах магнетаров и выдуваются в межзвёздную среду.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al. (Fermi LAT Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**(25), 251101 (2009). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.251101>.
- [2] J. Terning, Ch. Verhaaren, JHEP **12**, 152 (2019). <http://doi.org/10.1007/JHEP12%282019%29152>.

- [3] Ya. B. Zel'dovich, M. Yu. Khlopov, Phys. Lett. B **79**, 239 (1978). doi.org/10.1016/0370-2693(78)90232-0.
- [4] A. V. Kluev, Phys. Rev. D **110**, 023011 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.023011.2024>.
- [5] В. В. Бурдюжа, В. Л. Кауц, Письма в АЖ **21**(3), 1 (1995).
- [6] P. Dirac, Proc. R. Soc. London A **133**, 60 (1931). <https://doi.org/10.98/rsps.1931.0130>.
- [7] P. Curie, Gauss's law for magnetism & law of universal magnetism: calculate the charge of a monopole. Séances de la Société Française de Physique, Paris, **76**, 1894.
- [8] M. Bachmaier, G. Dvali, J. Valbuena-Bermúdez. Phys. Rev. D **108**, 103501 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.103501>.
- [9] C. Castelnuovo, R. Moessner, S. L. Sondhi, Nature **451**, 42 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature06433>.
- [10] M. W. Ray, S. Kandel, M. Mattonen, D. S. Hall, Nature **505**, 657 (2014). <https://doi.org/10.1038/nature/12954>.
- [11] I. Chuang, Science **251**, 1336 (1991). <https://doi.org/10.1126/science.251.4999.133>.
- [12] И. А. Рыжкин, ЖЭТФ **128**(3), 559 (2004). <https://doi.org/10.1134/1.2103216>.

Поступила в редакцию 15 октября 2024 г.

После доработки 29 октября 2024 г.

Принята к публикации 31 октября 2024 г.