

## ЛЕБЕДЬ X-3 КАК ИСТОЧНИК СВОБОДНЫХ ГЛЮОНОВ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Б.А.Арбузов

В статье предлагается интерпретировать наблюдающиеся на эксперименте необычные свойства мюонов сверхвысоких энергий, порожденных излучением от галактического источника Лебедь X-3, как результат рождения их свободными глюонами. Подтверждением такой интерпретации служит угловой разброс мюонов вокруг направления на источник, который объясняется здесь многократным рассеянием глюонов сверхвысоких энергий на тепловом глюонном газе.

В последнее время привлекает внимание галактический объект Лебедь X-3, который является интенсивным источником фотонов в интервале энергий от радиочастот до  $10^{16}$  эВ (см. обзор <sup>1</sup>). Недавно опубликованы результаты измерений потоков мюонов с энергиями  $\gtrsim 1$  ТэВ <sup>2,3</sup>, происхождение которых явным образом связано с излучением от источника Лебедь X-3, поскольку их импульсы направлены от него, а их интенсивность имеет период вариации 4,8 часа, характерный для этого источника. Оказывается, что зарегистрированная интенсивность мюонов, по крайней мере, в 20 раз больше, чем она должна бы быть в предположении, что они рождаются многотэвными фотонами от источника Лебедь X-3 <sup>4,5</sup>. Таким образом, следует принять, что от обсуждаемого источника приходят какие-то другие частицы сверхвысоких энергий, отличные от фотонов. В силу большой удаленности Земли от объекта,  $x = 10 \pm 1,5$  кпк, т.е.  $3 \cdot 10^{22}$  см, эти частицы должны быть нейтральными, стабильными и иметь нулевую (либо малую  $\lesssim 1$  ГэВ) массу. Из обсуждения различных возможностей <sup>2-5</sup> следует, что известные частицы здесь не подходят. В настоящей статье, основываясь на возможности неполного заключения цвета <sup>6-8</sup>, мы предлагаем интерпретировать частицы, приходящие от источника Лебедь X-3 и порождающие с большой вероятностью мюоны сверхвысоких энергий, как свободные глюоны.

Предлагая и отстаивая такую интерпретацию, мы опираемся на следующие соображения.

1. Лебедь X-3 является природным ускорителем, производящим пучки частиц с энергией, по крайней мере, до  $10^{16}$  эВ. При столкновении с медленными протонами, которые с необходимостью имеются в объекте и его окрестностях, энергия в системе ЦИ составляет до 4 ТэВ, что существенно выше порога рождения открытого цвета в рамках концепции неполного заключения цвета в КХД <sup>6-8</sup>. Таким образом, в составе плазмы в источнике (см. модели в <sup>1</sup>) могут быть нескомпенсированные цветные заряды, которые, в частности, излучают свободные глюоны. Итак, в случае справедливости возможности неполного заключения цвета, Лебедь X-3 вполне может быть источником свободных глюонов.

2. Пусть глюоны с энергией порядка 10 ТэВ, излученные источником Лебедь X-3, достигают Земли. Как следует из оценок работ <sup>6,8</sup>, область взаимодействия цветных зарядов с ядрами определяется радиусом  $r_0 = 10^{-12}$  см, что дает сечение взаимодействия  $\sigma = 10^{-23}$  см<sup>2</sup>. Эти оце-

нки, в частности, согласуются с данными по аномальным ядерным фрагментам <sup>8</sup>. Такое большое сечение приведет к взаимодействию глюона в верхних слоях атмосферы. При этом значительной должна быть вероятность расщепления глюона на пару кварк-антикварк:  $g + A \rightarrow \bar{q} + q + A'$  + адроны, поскольку в суммарном октетном состоянии нет высокого потенциального барьера, обеспечивающего эффективное заключение кварков в бесцветном состоянии. Глюон не различает ароматов кварков, поэтому при столь высокой энергии со сравнимой вероятностью рождаются пары  $\bar{u}u, \bar{d}d, \bar{s}s, \bar{c}c, \bar{b}b, \bar{t}t, \dots$ . Три последние пары, не успев провзаимодействовать в атмосфере, распадаются, причем мюоны испускаются примерно в 20% случаев. Таким образом, взаимодействие глюона с ядром с большой вероятностью (возможно, порядка процента) дает высокоэнергетический мюон. В то же время, вероятность рождения такого мюона в ливнях, вызванных  $\gamma$ -квантами, оказывается существенно меньше, что и приводило к заключению о невозможности объяснения эффекта <sup>5</sup>. В нашей схеме наблюдаемые мюоны получаются за счет распадов тяжелых кварков или содержащих их тяжелых частиц, рожденных во взаимодействиях энергичных глюонов в атмосфере. Отметим, что мюон должен сохранять направление родившего его глюона. Действительно, отношение его поперечного импульса к продольному можно оценить из отношения  $m_q/p$ , что даже для  $t$ -кварка с массой 40 ГэВ дает  $4 \cdot 10^{-3}$ , т.е. угол  $0,2^\circ$ . В то же время, эксперимент <sup>2,3</sup> дает существенно большие (порядка нескольких градусов) отклонения импульсов мюонов от направления на Лебедь X-3. Это чрезвычайно важное для нашей интерпретации обстоятельство имеет следующее объяснение.

3. Следует рассмотреть, что происходит с глюоном на пути от источника до Земли. Количество атомов водорода на этом пути невелико:  $3 \cdot 10^{22}$  ат/см<sup>2</sup>, так что при сечении  $\sigma = 10^{-23}$  см<sup>2</sup> расстояние до источника составляет всего лишь треть длины взаимодействия, т.е. взаимодействие с межзвездным водородом практически не сказывается на распространении глюонов. Однако обсуждаемые космические глюоны должны прежде всего взаимодействовать с тепловым глюонным газом, который с необходимостью существует при справедливости неполного заключения цвета <sup>8</sup>. Как отмечалось в цитированной работе, при температуре и плотности глюонного газа, равных соответствующим параметрам известного реликтового фотонного газа:  $T = 4 \div 5$  К,  $n = 10^3$  см<sup>-3</sup>, наличие глюонов в среде не сказывается на движении бесцветных тел. Но цветной глюон высокой энергии будет испытывать многократное рассеяние в газе, что приведет к изменению направления его движения. При оценке многократного рассеяния мы пользуемся выражением для дифференциального сечения рассеяния на малые углы глюона с большим импульсом  $p$  на мягком глюоне

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{225 G^4}{256\pi p^2 \theta^3} \quad (1)$$

Здесь эффективная инфракрасная константа  $G$  трехглюонного взаимодействия определяется коэффициентом при  $1/r$  для  $r \gg r_0$  в потенциале взаимодействия цветных зарядов <sup>6,8</sup>. Условие сшивания в точке  $r_0 = 10^{-12}$  см области кулоновского убывания с областью линейного роста  $V(r) = a^2 r$ ,  $a = 428$  МэВ, дает  $G^4 = 3\pi a^2 r_0^2 = 4,3 \cdot 10^3$ . Средний квадрат угла отклонения мы оцениваем из (1) с помощью известного метода <sup>9</sup>.

$$\langle \theta^2 \rangle = nx \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\sigma}{d\theta} \theta^2 d\theta = nx \frac{225 G^4}{256\pi p^2} \ln \frac{1}{r_0 n^{1/3}} \quad (2)$$

Здесь минимальный угол  $\theta_1$  определяется средним расстоянием между отдельными глюонами в газе, максимальный  $\theta_2$  — радиусом  $r_0$ , который ограничивает область кулоновского взаимодействия. Подставляя в (2) полученное значение  $G^2$ , а также приведенные выше параметры  $n = 10^3$  см<sup>-3</sup>,  $r_0 = 10^{-12}$  см,  $x = 3 \cdot 10^{22}$  см, получаем для  $p = 10$  ТэВ:  $\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = 0,12$  рад =  $7^\circ$ . Именно отклонения порядка нескольких градусов от направления на источник, что существенно превышает разрешение установок <sup>2,3</sup>, и характерно для обсуждаемых мюонов.

Таким образом, предлагаемая интерпретация дает объяснение наиболее загадочным свойствам мюонов, связанных с источником Лебедь X-3, а именно, большой вероятности рождения мюонов сверхвысоких энергий в единичном акте взаимодействия и сравнительно большим угловым разбросом их импульсов вокруг направления на источник. Для выяснения природы явления последнее обстоятельство представляется наиболее существенным. Экспериментальное подтверждение свойств углового разброса, описываемого законом многократного рассеяния <sup>2</sup>, не только подтвердило бы справедливость глюонной интерпретации обсуждаемого эффекта, но и послужило бы доказательством существования теплового глюонного газа.

Поскольку рассматриваемое явление может дать решающую информацию по проблеме наблюдаемости цветных состояний, автор хотел бы подчеркнуть важность и желательность дальнейших экспериментов с подземными (или подводными) мюонами сверхвысоких энергий, связанными направлением и временными вариациями с источником Лебедь X-3.

#### Литература

1. *Владимирский Б.М. и др.* УФН, 1985, 145, 255.
2. *Marshak M.L. et al.* Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 2079.
3. *Battistoni G. et al.* Phys. Lett. B, 1985, 155B, 465.
4. *Barnhill M.V. et al.* Preprint University of Wisconsin MAD/PH/252, Madison, 1985.
5. *Stanev T., Vankov Ch.P., Halzen F.* Preprint University of Wisconsin, MAD/PH/253, Madison, 1985.
6. *Арбузов Б.А.* Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 403.
7. *Арбузов Б.А. и др.* ЯФ, 1984, 40, 836.
8. *Арбузов Б.А.* ЯФ, 1985, 42, 542.
9. *Росси Б.* Частицы больших энергий. М.: ГИТТЛ, 1955.

Поступила в редакцию

5 сентября 1985 г.