

ПОИСК ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРИНО СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТЬЮ МАСТЕР

¹Ю.В. Рабинович, ¹О.А. Гресс, ^{2,3}В.М. Липунов

¹Иркутский государственный университет, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия

³Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ, Россия
sunny.rabinovich@mail.ru

SEARCH FOR SOURCES OF ULTRA-HIGH ENERGY NEUTRINOS IN OPTICAL RANGE BY GLOBAL MASTER NETWORK

¹Yu.V. Rabinovich, ¹O.A. Gress, ^{2,3}V.M. Lipunov

¹Irkutsk State University, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Russia

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Russia

Аннотация. Работа посвящена наблюдению в оптическом диапазоне телескопами МАСТЕР квадратов ошибок наблюдений нейтринной обсерватории IceCube. Проведен поиск возможных источников нейтрино сверхвысоких энергий. В качестве источников предполагались известные в оптическом диапазоне. Соответствующих явлений не обнаружено. Найден ряд квазаров, лежащих в квадратах ошибок, в спокойном состоянии. В квадратах ошибок и вблизи них были обнаружены вспышки катаклизмических переменных. После открытия первого радиопульсара на белом карлике ясно, что такие системы могут быть источниками релятивистских частиц. В работе показано, что поток релятивистских частиц от белого карлика в области 100 парсек соответствует потоку частиц от квазара. Разработана методология поиска пульсаров на белых карликах как источников нейтрино.

Ключевые слова: нейтрино сверхвысоких энергий, МАСТЕР, IceCube, радиопульсар, катаклизмическая переменная.

Abstract. We were observing error-boxes of neutrino observatory IceCube in optical range, searching for known types of possible sources of ultrahigh energies neutrino. The expected phenomena were not revealed. We found a number of quasars in a quiet state in error-boxes. We found flashes of cataclysmic variables into and near to error-boxes. After exploration of the first radio pulsar on the white dwarf it has become clear that such systems can be sources of relativistic particles. Therefore, there can be galactic star systems among potential sources of a neutrino. We carried out calculation of relativistic particles stream from the white dwarf in the area of 100 parsecs. It corresponds to a particle stream from a quasar. By the known pulsar observations we made up methodology of white dwarf's pulsars neutrino sources searching by the MASTER telescopes.

Key words: high-energy neutrino, MASTER, IceCube, radio pulsar, cataclysmic variables.

Введение

Наблюдения квадратов ошибок нейтринных алертов впервые проводились в оптическом диапазоне в рамках этой работы. Наблюдения проводились на сети телескопов-роботов МАСТЕР. Целью работы был поиск в оптическом диапазоне возможных источников нейтрино сверхвысоких энергий, зарегистрированных обсерваторией IceCube в 2016–2017 гг. В качестве источников нейтрино сверхвысоких энергий предполагались: взрывы и остатки сверхновых, активные ядра галактик, гамма-всплески, «пузыри Ферми», двойные звезды. Из данных объектов были обнаружены квазары, находящиеся в спокойном состоянии и ряд катаклизмических переменных. После открытия пульсара на белом карлике, стало известно, что такие системы могут являться источниками релятивистских частиц, однако, как источники нейтрино сверхвысоких энергий катаклизмические переменные ранее не рассматривались. В связи с появившейся гипотезой, перед нами возник ряд задач:

1) провести съемку известного пульсара на белом карлике, тем самым отработать методологию съемки короткопеременных объектов;

2) найти наиболее эффективный метод определения периода переменности объекта, в том числе для нерегулярной съемки;

3) провести оценку на энергию частиц, рожденных пульсаром на белом карлике;

4) рассчитать светимость пульсара, чтобы нейтринная обсерватория IceCube могла зарегистрировать поток нейтрино сверхвысоких энергий от него.

Природа нейтрино сверхвысоких энергий

Природа нейтрино сверхвысоких энергий — один из важных вопросов в исследованиях космических лучей. В этой области спектра поток частиц очень мал (1 частица/(км²·стерадиан·век) для $E > 1020$ эВ), соответственно, мала и экспериментальная статистика. В основном, зарегистрированные космические частицы — это протоны и фотоны. Но поток протонов таких высоких энергий, в результате взаимодействия с веществом и излучением в межзвездном пространстве, порождает поток нейтрино. Например, в реакциях типа: $p + X \rightarrow \pi + (\pi^-) + Y \rightarrow \mu + (\mu^-) + \nu\mu(\mu) + Y$. Согласно текущим представлениям ученых, возможны следующие источники нейтрино сверхвысоких энергий.

1. Взрывы и остатки сверхновых
2. Активные ядра галактик. Представляют собой спиральную галактику, в центре которой находится массивная черная дыра (107–109 солнечных масс).
3. Гамма-всплески-источники, создающие мощные вспышки фотонов, которые длятся от долей до нескольких сотен секунд. Они образуются из-за слияния двойных звезд, пары нейтронная звезда — черная дыра, или из-за коллапса сверхмассивной звезды.

4. «Пузыри Ферми» — структуры, исходящие из центра галактики перпендикулярно ее плоскости, диаметр каждой из которых 25 тысяч световых лет. Они излучают в гамма-диапазоне.

5. Двойные звезды-системы из двух гравитационно-связанных звезд, обращающихся по замкнутым орбитам вокруг общего центра масс. Например, микрокварзы: один из участников нейтронная звезда или чёрная дыра, на которую аккрецирует вещество от звезды-партнера. Также для нейтринной астрофизики интерес представляют пульсары в двойных системах.

Плотная среда тормозит ионы, ускоренные этими источниками, рождая нейтральные и заряженные пионы. Они, в свою очередь, распадаются на примерно равное нейтрино и γ -квантов. Поэтому от источников большого количества фотонов ожидается получать такое же количество нейтрино. [<http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino/uen/index.html>]

Наблюдения квадратов ошибок нейтринных алертов

Сеть телескопов роботов МАСТЕР получает нейтринные алерты от двух обсерваторий: Antares и IceCube. Данная работа посвящена анализу наблюдений в квадратах ошибок десяти алертов с Icecube. Всего в этом поле было обнаружено 82 транзиента, в числе которых 27 квазаров, находящихся в спокойном состоянии. Также обнаружены объекты, числящиеся в каталоге переменных звезд AAVSO: 12 звезд типа UG, 15 типа UGSU (все это карликовые новые звезды), 1 затменная звезда. Остальные объекты классифицировать не удалось.

Появление в квадратах ошибок большого числа (даже больше, чем квазаров) переменных звезд заставляет задуматься, не могут ли они рождать потоки нейтрино.

Катаклизмические переменные как источники нейтрино

Катаклизмическими переменными называют двойные системы с очень коротким орбитальным периодом (в среднем, несколько часов), в которых маломассивный компонент — карликовая красная звезда главной последовательности заполняет свою полость Роша, вследствие чего происходит перенос вещества (плазмы) на первичный компонент — белый карлик. Движущаяся на WD плазма имеет значительный угловой момент, поэтому она не падает непосредственно на него, а обращаясь вокруг и обладая определенной вязкостью, образует вокруг WD

аккреционный диск. [<http://www.astronet.ru/db/msg/1169756>]

После открытия радиопульсара на белом карлике [Marsh, 2016], становится ясно, что звездные системы, включающие белого карлика, могут являться источниками релятивистских частиц. Но могут ли такие пульсары рождать нейтрино?

В двойных системах на стадии аккреции возможно ускорение вращения белого карлика. Дело в том, что во время дисковой аккреции (а именно она реализуется в маломассивных двойных системах известных как промежуточные поляры) на замагниченный компактный объект его вращательная эволюция приводит в, так называемое, равновесное состояние, когда ускоряющие моменты сил связанные с моментом вращения аккрецирующего вещества уравниваются замедляющим моментом сил обусловленным взаимодействием магнитного поля, с плазмой за радиусом коротации.

$$dI\omega/dt = \dot{M}\sqrt{GM R_A} - \kappa_t \mu^2 / R_c^3 = 0,$$

где R_A — альвеновский радиус на котором гравитационная энергия сравнивается с магнитной энергией плазмы, κ_t — безразмерный фактор, $R_c = (GM/\omega^2(1/3))$ — радиус коротации на котором скорость вращения силовых линий магнитного поля равна кеплеровской скорости вращения плазмы в диске.

Таким образом, аккреция в двойных системах может ускорять или поддерживать быстрое вращение компактной замагниченной звезды.

Открытие радиопульсара показывает, что эжектирующие белые карлики не только существуют, но и по своим свойствам сильно напоминают классические радиопульсары на нейтринных звездах.

В этом случае можно ожидать, что ускорение релятивистских частиц происходит вблизи магнитных полюсов, где электрические и магнитные поля параллельны. Абсолютным верхним пределом энергии, до которой можно ускорить элементарные частицы в таких условиях очевидно равна:

$$E_{\max} = eER = e(v/c)BR = e(\omega R/c)BR \approx 1.5 \cdot 10^{16} P_{100}^{-1} R_{5000} B_8 \text{ эВ}$$

где, $P_{100} = P/100\text{s}$, $R_{5000} = R/5000 \text{ км}$ — радиус белого карлика, $B_8 = B/10^8 \text{ Гс}$.

Конечно, в действительности, ускорение предположительно происходит в малом зазоре у полюсов, и реальная энергия частиц, конечно, меньше. Однако, предел настолько высок, что мы не видим принципиальных препятствий, чтобы белый карлик с магнитным полем в несколько сот мегагаусс не мог ускорять частицы сверхвысоких энергий.

Но может ли IceCube зарегистрировать эти нейтрино? Иными словами, какова должна быть светимость белого карлика, чтобы зарегистрировать тот же поток нейтрино, что и от квазара.

$$L = 4\pi D^2 F \Rightarrow F = \frac{L}{4\pi D^2}, \quad L \text{ — светимость, } F \text{ — поток частиц, } D \text{ — расстояние до источника}$$

$$\frac{L_1}{4\pi D_1^2} = \frac{L_2}{4\pi D_2^2} \rightarrow L_1 = \frac{D_1^2 L_2}{D_2^2} \rightarrow L_1 = 1062.76 \cdot 10^{28} \approx 10^{31} \text{ эрг/с, } D_1 = D \text{ белого карлика } \approx 326 \text{ световых лет; } D_2 = D \text{ квазара } \approx 10^{10} \text{ световых лет; } L_2 \approx 10^{46} \text{ эрг/с.}$$

Светимость известного пульсара $6.3 \cdot 10^{32}$ эрг/с. Мы видим, что поток релятивистских частиц у Земли от этого пульсара эквивалентен потоку частиц от квазара светимостью 10^{47} эрг/с. А значит, что IceCube мог бы зарегистрировать нейтрино сверхвысоких энергий, от белого карлика-пульсара, находящегося в двойной системе.

Методология определения периода переменности объекта

На уже известном пульсаре нами была отработана методология съемки короткопеременных объектов на телескопах МАСТЕР. В данный момент продолжает разрабатываться наиболее простая и эффективная методология анализа и обработки полученных данных для определения периода переменности. Дело в том, что не все переменные объекты МАСТЕР снимает длительно и непрерывно. Есть случаи, когда объект попадает на несколько кадров с разницей в несколько месяцев. На известном пульсаре были опробованы Фурье-анализ, метод минимизации дисперсии с вычетом и без вычета постоянного тренда по времени, метод Лафлера-Кинмана. Все методы показали правильные результаты с погрешностью в десятые доли секунды. Наиболее точный результат показал метод Лафлера-Кинмана.

Заключение

В ходе работы по наблюдению квадратов ошибок алертов с IceCube, был составлен список переменных объектов, что вносит существенный вклад в малую статистику нейтринных наблюдений. Из-за большого количества найденных в этих координатах катаклизмических переменных нами была сформулирована гипотеза о том, что такие двойные системы могут рождать потоки нейтрино сверхвысоких энергий. В ходе работы не было найдено принципиальных противоречий данной гипотезы. Кроме того, с помощью наблюдения известного пульсара на белом карлике, разработана методология поиска телескопами МАСТЕР короткопеременных в оптическом диапазоне объектов. Что позволит исследовать катаклизмические переменные, найденные в квадратах ошибок, на предмет короткой переменности. Продолжает разрабатываться методология определения периода переменности найденных объектов.

Список литературы

- Marsh T.R., Gänsicke B.T., Hümmerich S., et al. A radio-pulsing white dwarf binary star // Nature. 2016. N 537. P. 374–377
URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino/uen/index.html>
URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1169756>