

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«МОДЕЛИ КОМПАКТНОГО ГРАВИТИРУЮЩЕГО ОБЪЕКТА В
ЦЕНТРЕ ГАЛАКТИКИ»

Выполнил студент
группы 443

Канапин Алан Александрович

подпись студента

Научный руководитель
д. ф.-м. н., Троицкий Сергей Вадимович

подпись научного руководителя

Допущен к защите

Зав. кафедрой _____
подпись зав. кафедрой

Москва, 2015г.

Введение

Природа массивного объекта в центре нашей галактики (Стрелец А*) до сих пор не ясна до конца. Многие ученые считают, что там находится черная дыра, ввиду его массивности и относительно малых размеров. Масса объекта известна довольно точно, и составляет примерно $M = (3.7 \pm 1.5) \times 10^6 M_{\odot}$. Точно определить радиус на данный момент не удается, но существуют такие ограничения: $R \geq R_s$ - обусловлено предположением, что теория гравитации Эйнштейна верна для космических масштабов, $R \lesssim 1500R_s$ - следует из наблюдений за орбитой ближайшей звезды - будь радиус больше указанного значения, то часть массы Стрельца А* находилась бы за пределами орбиты, и тогда эта орбита не совпадала бы с наблюдаемой кеплеровской.

Существует несколько причин полагать, что рассматриваемый объект является не чёрной дырой. Во-первых, ввиду того что масса известна довольно точно, и радиус чёрной дыры легко рассчитать, можно оценить светимость материи, аккрецирующей на её поверхность - однако она на 3 порядка меньше наблюдаемой, что привело к названию «голодающая чёрная дыра» (black hole on starvation). Также недавние попытки увидеть «тень» чёрной дыры (что в случае успеха доказало бы, что ничто другое в центре галактики находиться не может) показали, что, возможно масса сосредоточна в радиусе, даже меньшем Шварцшильдова - очередная неясность, не позволяющая сделать окончательное утверждение.

Чтобы с уверенностью говорить о том, что это черная дыра, нужно показать, что на этом месте не может находиться ни один другой вид материи, сколько бы экзотическим он не был. Есть два основных варианта, которые в теории могли бы заменить чёрную дыру – это фермионная звезда, состоящая из вырожденных нейтрино или других фермионов, и бозонная звезда. Целью данной работы является проверка того, можно ли в рамках этих моделей получить значения массы и радиуса, соответствующие текущим наблюдениям, и попробовать объяснить другие наблюдаемые "странныости".

Фермионные звезды

Одним из первых рассмотренных кандидатов на место объекта в центре нашей галактике, являются крупные скопления (звезды) из фермионов.

В 1993 году Viollier и Trautmann рассмотрели материю из нерелятивистских нейтрино, находящихся в гидростатическом равновесии со своим гравитационным полем:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(\frac{r^2}{m_\nu n_\nu} \frac{dP_\nu}{dr} \right) = -8\pi G m_\nu n_\nu$$

Давление для нейтринного вырожденного Ферми-газа:

$$P_\nu = P_\nu = \left(\frac{6}{g} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{\pi^{\frac{4}{3}} \hbar^2}{5m_\nu} n_\nu^{\frac{5}{3}}$$

Ими была получена зависимость радиуса такой звезды от её массы и массы составляющей частицы:

$$R_0 = 6.86 \text{ lyr} \left(\frac{M_\odot}{M_\nu} \right)^{\frac{1}{3}} g^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{17.2 \text{ keV}}{m_\nu c^2} \right)^{\frac{8}{3}}$$

Величина 17.2 keV здесь используется, поскольку в то время вёлся поиск кандидатов в тёмную материю, и нейтрино с такой массой могли бы подойти. Не совсем корректными были ограничения на массу нейтрино, которые они поставили - они использовали данные о сверхмассивном объекте в другой галактике, с массой порядка $10^9 M_\odot$ - но нельзя делать предположение, что все центральные объекты галактик это фермионные звезды - возможно, лишь часть является таковой, а часть и есть черные дыры.

Используя ограничения на радиус $R_S < R < 1500R_S$, получаем ограничения на массу нейтрино:

$$57.8 \text{ keV} < m_\nu < 898 \text{ keV}$$

Таким образом данную модель исключить нельзя, однако пока нет никаких результатов, указывающих на существование нейтрино или другой тёмной материи в таком диапазоне масс. Широко распространено мнение, что центральный объект нашей галактики, это не фермионная звезда.

Бозонные звезды

Другой вариант материи, который мы рассмотрим - бозонные звезды. Они являются решением полевых уравнений Эйнштейна, связанных с комплексным скалярным полем. Скалярное поле обладает $U(1)$ симметрией, что обеспечивает сохраняющуюся величину - количество частиц. Лагранжева плотность выглядит следующим образом:

$$L = -\frac{R}{16\pi} + g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi^*\partial_\nu\phi + V(|\phi|^2)$$

Потенциал обычно берётся в виде

$$V = m^2|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4$$

Выбор потенциала и отличает бозонные звёзды от нетопологических солитонных, которые будут рассмотрены ниже. Масса звезды зависит от массы составного бозона, значения константы самодействия и поля в центре - $\phi(0)$. Используя ограничения на радиус, масса искомого бозона получается в районе 10^{-27} - 10^{-24} GeV (значение константы самодействия слабо влияет на этот результат, а если пытаться добиться большей массы бозона путём изменения центрального поля, то звезда получится слишком некомпактной, т.е. её размеры будут противоречить наблюдениям).

Q-шары

Q-шары (солитонные звезды) отличаются от бозонных выбором потенциала. Помимо условия $U(1)$ симметрии, которое обеспечивает сохранение числа частиц, они ещё обладают тем свойством, что при отсутствии гравитации, они образуют нетопологические солитонные решения - т.е. в их потенциале есть слагаемые, отвечающие за притяжение. Самый простой вид такого потенциала:

$$V = m^2 \phi^* \phi \left(1 - \frac{2\phi^* \phi}{\sigma_0^2} \right)^2$$

В данной работе рассматриваются Q-шары Коулмана - тонкостенное приближение, когда поле внутри радиуса R имеет константное значение $\sim \sigma_0$, затем идёт переходная область шириной $\sim m^{-1}$, а за ней находится вакуум. Как и для обычных Q-шаров, зависимость поля от времени берётся в виде анзата $\phi \sim e^{i\omega t}$.

Из 3-х рассмотренных моделей, данная оказывается наиболее интересной для исследования. Во-первых, Q-шары получаются весьма компактными, с радиусом, отличающимся от Шварцшильдова, на величину порядка 1. Масса звезды растёт монотонно с числом частиц, и критический предел компактности достигается при $R = 2.869GM$, после которого звезда коллапсирует. Во-вторых, получаемая зависимость массы звезды от массы частицы уже содержит в себе 4-ю степень массы Планка (в отличие от предыдущей модели): $M = \frac{0.03038}{\pi G^2 m \sigma_0^2}$ (формула получена для критического случая). При применении к исследуемому объекту, получаем оценку массы частицы ~ 100 GeV (это если взять $\sigma_0 \sim m$). Подобная масса уже выглядит более реалистичной как кандидат на тёмную материю, а меняя значение σ_0 и рассматривая конфигурации меньшей компактности, нежели критическая, можно получить конкретную массу частицы, если вдруг таковая будет обнаружена.

Дальнейшие планы и заключение

Все три рассмотренные модели могут соответствовать действительности при правильном подборе их параметров, однако наиболее реалистичной кажется модель с Q-шарами. С ней и планируется дальнейшее развитие работы.

Следует отметить 2 пункта, которые весьма интересно проверить, в связи с указанными во введении противоречивыми данными наблюдений Стрельца А*.

1) Попробуем объяснить причину маленького наблюдаемого центра нашей галактики в рамках нашей теории. Сам по себе Q-шар очень слабо взаимодействует с материей, и он не имеет поверхности - т.е. акреция на неё не будет наблюдаться, и как следствие, наша звезда не должна излучать. Однако, предлагается рассмотреть механизм падения обычной материи внутрь этой звезды - что, если в его центре образуется скопление материи, которое, хоть и размеров меньше, нежели Шварцшильдов радиус для всей системы, но именно оно отсвечивает в результате акреции на его поверхность?

2) Ещё попробуем объяснить тот факт, что центральные объекты галактик в основном делятся на 2 типа - активные, и неактивные. Как уже упоминалось выше, излучение от нашего центра на 3 порядка ниже рассчитываемого, из-за чего её назвали "голодающей" черной дырой. Если предположить, что действует механизм из 1-го пункта, то зададимся затем вопросом - до какой степени масса внутри Q-шара может расти? Что, если в результате её скопления уже образуется полноценная чёрная дыра, которая поглотит исходную звезду изнутри? Таким образом, будет понятно разделение на 2 типа - активные галактики, это те, в которых в их центрах уже успели образоваться ЧД, а в неактивных - нет.

Наконец добавим, что путём наблюдений можно отличить бозонную звезду от ЧД только увидев её «тень». Этого пока не удалось достичь, и поэтому утверждение о том что Стрелец А* - это ЧД, пока является лишь самым распространённым вариантом, однако это пока не доказано.

Использованные статьи

1993 R. D. Viollier, D. Trautmann, G. B. Tupper "Supermassive neutrino stars and galactic nuclei"

2009 A. E. Broderick, A. Loeb, R. Narayan "The event horizon of Sagittarius A*"

2014 D. Psaltis, R. Narayan, V. L. Fish, A. E. Broderick, A. Loeb, S. S. Doeleman "Event-horizon-telescope evidence for alignment of the black hole in the center of the Milky Way with the inner stellar disk"

2000 D. Torres, S. Capozziello, G. Lambiase "A supermassive scalar star at the Galactic Center?"

2002 R. Schödel "A star in 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way"

2006 F. S. Guzman "Accretion disk onto boson stars: a way to supplant black holes candidates?"

2010 F. S. Guzman, J. M. Rueda-Becerril "Spherical Boson Stars as Black Hole mimickers"

2013 H. Falcke, S. B. Markoff "Towards the event horizon - the supermassive black hole in the Galactic Center"