

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՀԱՍՄԻԿ ԱՇՈՏԻ ՇԱՀԻՆՅԱՆ

ՏԱՐՕՐԻՆԱԿ ՔՎԱՐԿԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԳԵՐԽԻՏ  
ԵՐԿՆԱՅԻՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐՈՒՄ

Ա.04.02 - «Տեսական ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի  
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2016

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АСМИК АШОТОВНА ШАГИНЯН

НАЛИЧИЕ СТРАННОГО КВАРКОВОГО ВЕЩЕСТВА В СВЕРХПЛОТНЫХ  
НЕБЕСНЫХ ТЕЛАХ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.02 – “Теоретическая физика”

ЕРЕВАН 2016

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում

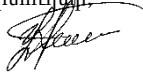
Գիտական ղեկավար՝	Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր, ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Յու. Լ. Վարդանյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր, ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս Դ. Մ. Սեդրակյան Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Կ. Մ. Շահաբասյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	ՀՀ ԳԱԱ Վ. Համբարձումյանի անվան Բյուրականի աստղադիտարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2016թ. մայիսի 21-ին ժամը 12:00-ին, Երևանի պետական համալսարանում գործող Ֆիզիկայի 049 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (0025, Երևան, Ա.Մանուկյան փ. 1, ԵՊՀ):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2016թ. ապրիլի 18-ին:

049 Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,  
Ֆիզմաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ



Վ.Պ.Քալանթարյան

---

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете

Научный руководитель:	доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент НАН РА Ю.Л. Вартамян
Официальные оппоненты:	доктор физ.-мат. наук, профессор, академик НАН РА Д.М. Седракян доктор физ.-мат. наук, профессор, К.М. Шахабасян
Ведущая организация:	Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В. Амбарцумяна НАН РА

Защита диссертации состоится 21-ого мая 2016г. в 12:00 часов на заседании Специализированного совета 049 по Физике при Ереванском государственном университете (0025, Ереван, ул. А. Манукяна 1, ЕГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 18-ого апреля 2016г.

Ученый секретарь Специализированного совета 049,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент



В.П. Калантарян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность проблемы.* В настоящее время основной моделью, описывающей историю и судьбу Вселенной, является модель Большого взрыва. Она была создана в 40-х гг. прошлого века, благодаря работам Г.Гамова и его сотрудников Р.Алфера и Р.Хермана [1], изучавших возможность рождения элементов во Вселенной. Они первыми осознали, что эта возможность могла быть реализована лишь в очень горячей и плотной Вселенной, на самом раннем этапе своего развития. Совмещение этих идей с наблюдательными данными Э.Хаббла (они появились еще в 1929г.) и теоретическими работами А.Фридмана (1922-1924) [2] и Дж.Леметра (1927) [3] привело к рождению модели Большого взрыва.

Согласно концепции Большого взрыва в далеком прошлом (в соответствии с современными данными около 14 млрд. лет назад) вещество Вселенной было сконцентрировано в очень малом объеме и имело экстремально высокую плотность, температуру и давление. Происходило стремительное расширение Вселенной, сопровождавшееся ее охлаждением и уменьшением давления.

30-ые и 40-ые годы были особенные и для ряда теоретических исследований о возможном существовании сверхплотных небесных тел: так называемых сверхплотных звезд. Такие объекты имеют центральные плотности порядка ядерной. Пионерами данного направления были Ландау [4], Бааде и Цвики [5], Оппенгеймер и его сотрудники [6].

В Армении теоретические исследования сверхплотной материи начались в шестидесятые годы, еще до открытия пульсаров и во многом стимулировались космогоническими идеями академика Виктора Амбарцумяна. Наблюдательное открытие компактных источников рентгеновского излучения и пульсаров, сделало физику сверхплотных небесных тел актуальной в современной теоретической физике и астрофизике. Экстремальные физические условия в сверхплотных небесных телах делают их уникальными естественными лабораториями, которые представляют обширный материал для исследования физики элементарных частиц, ядерных взаимодействий, а также и теории

гравитации. Исследованию сверхплотных звезд посвящены многочисленные ценные монографии, такие как работы Зельдовича и Новикова [7], Саакяна [8], [9], Шапиро [10].

Внимание на тот факт, что вырожденная ядерная плазма, кроме нейтронов и небольшого количества протонов и электронов может содержать также странные барионы – гипероны, впервые было обращено в работах Амбарцумяна и Саакяна [11]. В работах Саакяна и Варганияна [12], [13] было показано, что учет ядерного взаимодействия понижает пороги стабильности гиперонов, делая возможным их существование в недрах массивных устойчивых нейтронных звезд. По этой причине правильнее их называть барионными звездами.

В связи с бурным развитием физики кварков в середине 80-ых годов возник особый интерес к теории странной ядерной плазме. Было доказано, что при сверхядерных плотностях возможен фазовый переход из состояния, в котором кварки заключены внутри барионов, в состояние сплошной кварковой плазмы. Бодмер [14] и Виттен [15] показали, что переход к кварковой фазе с образованием вещества, имеющего странность  $-1$  на барион, энергетически выгоднее, чем нестранная кварковая плазма. Высказанная Виттеном гипотеза была детально исследована Фэри и Джаффи [16].

Странная кварковая материя (СКМ) содержит примерно равное количество  $u, d, s$  – кварков и небольшое количество электронов или позитронов, которые обеспечивают электронейтральность. СКМ может образовывать самоудерживающиеся, связанные состояния в виде так называемых “странных” звезд. При возможном термодинамическом равновесии с нуклонной оболочкой странная кварковая материя может являться также ядром нейтронной звезды.

В монографии Гленденнинга [17] и в работах Фэри и Алкока [18], Гензела [19], Бенвенуто [20], Варганияна и др. [21] рассматривались основные свойства странных звезд. Характерными особенностями странных звезд являются скачкообразное падение плотности на поверхности от сверхядерных значений

до нуля и весьма слабое увеличение плотности к центру, также возможность существования сколь угодно малых масс.

Для описания свойств странного кваркового вещества одной из общепринятых моделей является модель мешка, разработанная в Массачусетском Технологическом Институте (MIT) [22, 23]. Модель мешка (MIT) характеризуется тремя феноменологическими параметрами: постоянной мешка  $B$  (давлением вакуума), постоянной кварк-глюонного взаимодействия  $\alpha_c$  и массой странного кварка  $m_s$ . Численные значения этих параметров известны с большими неопределенностями, что делает возможным существование принципиально различных вариантов странного кваркового вещества. Выбирая модель мешка для разных наборов значений параметров определяется уравнение состояния странной кварковой материи.

Странная кварковая материя, в зависимости от численных значений параметров модели мешка, может быть самосвязанной (энергия на барион с вычетом массы нейтрона отрицательна). В этом случае могут существовать небесные тела, состоящие исключительно из странной кварковой материи, которые называются странными звездами.

Странная кварковая звезда имеет четко вырожденную поверхность. В [24] рассматриваются проблемы образования и структуры коры у странных звезд. Электроны, которые обеспечивают электронейтральность кваркового вещества, с СКМ связаны лишь кулоновской силой. Они частично покидают кварковую поверхность, распространяясь на сотни ферми. У поверхности странной кварковой звезды образуется тонкий заряженный слой, где напряженность поля достигает  $10^{17} - 10^{18}$  В/см [18]. Электрическое поле направлено наружу и поддерживает кору, которая состоит из атомных ядер и вырожденных электронов (Ае-вещество). Кора не находится в химическом равновесии со странной кварковой материей и связана с кварковым ядром одной гравитацией. Из-за малости вероятности туннельного перехода атомных ядер через электрический барьер обе фазы могут сосуществовать бесконечное время.

Если СКМ является самосвязанной, то возможно существование как голых странных звезд, целиком состоящих из странной кварковой материи, так и странных звезд с корой. Странная звезда может приобрести свою кору во время образования или за счет аккреции обычного вещества [24]. Для странных звезд, где масса кварковой сердцевины  $M_{core}/M_{\odot} > 0.5$ , толщина и масса коры пренебрежимо малы по сравнению с радиусом и массой звезды.

При определенном наборе значений параметров мешка уравнение состояния странной кварковой материи приводит к реализации равновесных кварковых конфигураций с максимальными массами  $M_{max}$ , которые больше недавно точно определенной массы двойного радиопульсара *PSR J 0348 + 0432*, равной  $2.01M_{\odot}$  [25].

**Цель работы.** Целью представленной диссертационной работы является:

- исследование астрофизических проявлений сверхплотных звезд - так называемых странных звезд, состоящих из самоудерживающейся странной кварковой материи в рамках теории мешка MIT,
- исследование звездных конфигураций, содержащих СКМ с максимальными массами и сравнение с наблюдательными данными,
- определение возможных значений параметров теории мешка MIT, которые обеспечивают значения максимальных масс звезд, содержащих СКМ, больше  $2.01M_{\odot}$  полученные из наблюдений [25].

**Научная новизна работы.** Исследуется странная кварковая материя (СКМ), для которой использована модель мешка, в которой переход к состоянию СКМ происходит при плотности энергии, не превышающей удвоенную плотность в атомных ядрах, что намного меньше центральной плотности энергии нейтронных звезд с максимальной массой. Поэтому на кривой зависимости массы  $M$  равновесных сверхплотных конфигураций от центральной плотности энергии  $\rho_c$  (кривая  $M(\rho_c)$ ) нейтронные звезды малой массы и конфигурации, состоящие из СКМ, образуют одно семейство. Исследуются возможные ограничения, которые ставят на уравнение состояния сверхплотного барионного вещества, проведенные в последние годы точные измерения массы, близкие к двум солнечным, двух радиопульсаров. В рамках

модели мешка определены наборы значений феноменологических постоянных мешка ( $B$ ,  $\alpha_c$ ,  $m_s$ ), использование которых в уравнении состояния СКМ приводит к максимальной массе равновесных кварковых конфигураций  $M_{max}$ , которые больше недавно точно определенной массы двойного радиопульсара *PSR J0348+0432*, равной  $2.01M_{\odot}$ . Для таких конфигураций вычислены в зависимости от центральной плотности энергии  $\rho_c$  значения массы, радиуса, полного числа барионов, красного смещения с поверхности странной звезды. Для каждой серии с  $M_{max} > 2.01M_{\odot}$  вычислены также значения перечисленных интегральных параметров для сверхплотных конфигураций с массами **2.01, 1.97 и 1.44** солнечных масс, которые из наблюдений определены с большой точностью. Если в дальнейшем для этих конфигураций с большой точностью кроме массы удастся определить из наблюдений также другой интегральный параметр (например, радиус или красное смещение), то сопоставлением с результатами теоретических вычислений можно будет выбрать осуществляемый в природе вид уравнения состояния. При этом оказывается, что согласно полученным уравнениям состояния все три пульсара, с наиболее точно измеренными массами, могут быть возможными кандидатами странных звезд. В рамках модели мешка для различных значений феноменологических постоянных  $\alpha_c$  и  $m_s$  получены уравнения состояния странной кварковой материи, когда давление вакуума зависит от концентрации барионов  $B(n)$ . Показано, что в данном случае реализуются как странные звезды, так и нейтронные звезды со странным кварковым ядром (гибридные звезды). Однако, при этом значения массы странных звезд не превышают  $\sim 1.9M_{\odot}$ .

***Практическая ценность.*** Полученные в диссертации результаты представляют определенный интерес для теории небесных тел, находящихся на последних стадиях эволюции. Они также дают возможность выбрать модель странной кварковой материи, что в свою очередь представляет интерес для физики микромира. По мере накопления наблюдательного материала они могут быть использованы для окончательного астрофизического

подтверждения или опровержения гипотезы о существовании странной кварковой материи и странных звезд.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах кафедры теории волновых процессов и физики радиофизического факультета ЕГУ, Международной конференции “The Modern Physics of Compact Stars and Relativistic Gravity 2015” (Ереван, Армения, 2015, 30 сент. – 03 окт.), Юбилейной Научной Сессии, посвященной 90-летию ЕГУ (Ереван, Армения, 2009, 11-15 мая).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, список которых приводится в конце автореферата.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав (11 параграфов), заключения и списка литературы из 125 наименований. Общий объем работы 117 страниц, включая 25 рисунков и 14 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследования, а также приводится краткое содержание работы.

**В первой главе** диссертации рассматривается уравнение состояния странной кварковой материи.

В §1.1 рассматривается странная кварковая материя как энергетически выгодное состояние сверхплотного вещества. Схематически обосновывается стабильность странной кварковой материи. Показано, что СКМ имеет энергетическое преимущество над  $ud$  плазмой, как при нулевой (ультрарелятивистский случай), так и при ненулевой массе  $s$  кварка. Рассматривается возможность существования странных и нейтронных звезд с кварковым ядром.

В §1.2 в рамках модели мешка, разработанной в Массачусетском Технологическом Институте (*MIT*), обсуждается термодинамика странной кварковой материи. Согласно этой модели, СКМ представляет собой



вырожденный ферми-газ из  $u, d, s$  кварков с небольшой добавкой электронов или позитронов, которые обеспечивают электронейтральность.

Характер уравнения состояния СКМ определяется феноменологическими параметрами модели мешка - постоянной мешка  $B$  (давлением вакуума), постоянной кварк-глюонного взаимодействия  $a_c$  и массой странного кварка  $m_s$ . Массами  $u, d$  кварков и вырожденных электронов из-за их малости пренебрегаем. Отметим также, что кварк-глюонное взаимодействие учтено в первом порядке по константе разложения  $(2a_c/\pi)$ , что приводит к требованию значительной малости этой величины.

Приведены уравнения состояния СКМ как для общего случая, так и для ультрарелятивистского случая, когда  $m_s = m_d = m_u = 0$ . Обсуждается условие связанности странной кварковой материи:  $\rho c^2/n < m_0 c^2$  при нулевом давлении, где  $\rho$  плотность энергии и  $n$  барионная концентрация,  $m_0 c^2 = M(^{56}\text{Fe})/56 = 930.4$  МэВ. В этом случае возможно образование самоудерживающихся конфигураций, так называемых “странных звезд”.

В §1.3 исследуется влияние  $\beta$  процессов на наличие электронов в кварковой плазме. Показано, что в кварковой плазме наличие электронов вносит свой вклад в общее давление, но изменяет количественную оценку отношения энергии на барион в СКМ и НКМ, полученную из условия  $n_e=0$ , весьма незначительно.

В §1.4 в рамках модели мешка для различных значений параметров  $B, m_s$  и  $a_c$  определяется уравнение состояния СКМ. Для трех наборов параметров мешка приведены зависимости давления от плотности, а также химические потенциалы кварков и электронов, концентрация барионов и средняя энергия на один барион. Эти результаты показывают, что значение давления почти линейно возрастает с увеличением плотности. Приведены также зависимости химических потенциалов от концентрации барионов. При увеличении концентрации барионов  $n$  значение химического потенциала  $\mu_B$  понижается.

*Во второй главе* детально исследуются характерные особенности странных звезд. Рассматриваются конфигурации максимальных масс и их интегральные параметры.

В §2.1 приводится система релятивистских уравнений звездного равновесия (система уравнений Толмена-Оппенгеймера-Волкова - ТОВ) [6, 26]. Рассмотрен физический смысл полной массы  $M$ , массы покоя  $M_0$  и собственной массы  $M_p$ .

В §2.2 с точностью до шестого порядка по радиальной переменной  $r$  найдены приближенные решения уравнения ТОВ для линейной зависимости уравнения состояния СКМ. Показано, что это решение достаточно точно описывает распределение давления и зависимость интегральных параметров странных звезд от центральной плотности вещества для масс  $M_{core} < 0.1M_\odot$ .

В §2.3 в рамках модели мешка (MIT) рассматривается странная кварковая материя, состоящая из примерно равного количества  $u, d, s$  кварков и обеспечивающих их электронейтральность небольшой добавки электронов.

Для 15 наборов феноменологических постоянных мешка рассчитаны уравнения состояния СКМ, которые приводят к осуществлению странных звезд ( $\mathcal{E}(n_{min}) < 0$ ), с максимальными массами больше двух солнечных  $M_{max} \geq 2.01M_\odot$ . Обсуждаются также конфигурации с массами  $M_{max} = 1.44M_\odot$ ,  $M_{max} = 1.97M_\odot$  и  $M_{max} = 2.01M_\odot$ , для которых приводятся такие интегральные параметры, как полная масса, собственная масса, масса покоя, радиус, красное смещение с поверхности звезды.

В §2.4 обсуждаются возможные ограничения на уравнение состояния сверхплотного барионного вещества, к которым приводит точное измерение массы двойного радиопульсара  $PSR J0348 + 0432 (M/M_\odot = 2.01 \pm 0.04)$ .

Рассматривается уравнение состояния СКМ по модели мешка, которое приводит к максимальной массе равновесных кварковых конфигураций  $M_{max}$ , которые больше недавно точно определенной массы двойного радиопульсара  $PSR J0348 + 0432$ , равной  $2.01M_\odot$ . Для таких конфигураций в зависимости от центральной плотности энергии  $\rho_c$  вычислены значения массы, радиуса, полного числа барионов, красного смещения с поверхности странной звезды. Для каждой серии с  $M_{max} > 2.01M_\odot$  исследуются также интегральные

параметры для сверхплотных конфигураций с массами **2.01, 1.97 и 1.44** солнечных масс, которые из наблюдений определены с большой точностью.

В §2.5 исследуется дефект массы странных звезд. Приведены зависимости внутренней энергии  $E_{in}$  и энергии связи  $\Delta_2 M$  от полной массы  $M$  для рассматриваемых конфигураций странных звезд.

*В третьей главе* исследуются странные звезды при переменном давлении вакуума.

В §3.1 в рамках модели мешка рассматривается уравнение состояния странной кварковой материи, когда давление вакуума зависит от концентрации барионов. Такая зависимость объясняется тем фактом, что плотность кварковой материи возрастает с поверхности до центра звезды. В диссертационной работе используется гауссовская параметризация, которая строится на идее существования асимптотического предельного значения этого параметра. Рассматривается четыре набора параметров мешка. Расчеты ведутся для следующих значений параметров мешка:  $m_s = 95$  и  $150$  МэВ и  $\alpha_c = 0.01$  и  $0.05$ . Как в предыдущих случаях, так и здесь массами  $u$ ,  $d$  кварков и электронов из-за их малости пренебрегаем. Определены основные термодинамические величины: концентрация барионов  $n$ , средняя энергия на барион  $\epsilon$ , давление  $P$  и плотность энергии  $\rho$ .

В §3.2. обсуждаются звездные конфигурации при переменном давлении вакуума. Получены интегральные параметры звездных конфигураций. Приведены зависимости полной массы звезды от радиуса, и зависимости внутренней энергии от полной массы странных звезд. Результаты вычислений показывают, что при учете зависимости давления вакуума от концентрации барионов, конфигурации странных звезд имеют максимальные массы меньше двух солнечных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные результаты диссертации:

1. Исследованы возможные ограничения, которые ставит на уравнение состояния сверхплотного барионного вещества точное измерение массы радиопульсара **PSR J0348 + 0432**. Показано, что если для странной кварковой материи СКМ воспользоваться моделью мешка, то переход к СКМ происходит при плотностях, не превышающих удвоенную плотность в атомных ядрах, что намного меньше центральной плотности энергии нейтронных звезд с максимальной массой. Поэтому в рамках модели мешка на диаграмме зависимости массы от центральной плотности (кривая  $M(\rho_c)$ ) нейтронные звезды малой массы и сверхплотные звезды, состоящие из СКМ, по центральной плотности  $\rho_c$  составляют одно семейство.
2. Для заданной тройки параметров мешка определена зависимость  $\mathcal{E}(n)$  и значения  $n_{min}$  и  $\mathcal{E}_{min} = \mathcal{E}(n_{min})$ , при которых давление  $P = 0$ . Значениями  $n_{min}$  и  $\mathcal{E}_{min}$  для данного уравнения состояния СКМ (выбранной тройки параметров мешка) определяются значения плотности энергии  $\rho_s$  в единицах  $10^{15} \text{ г/см}^3$  на поверхности странной звезды  $ss$ , если  $\mathcal{E}_{min} < 0$ , или на поверхности кварковой сердцевины гибридных звезд, если  $\mathcal{E}_{min} > 0$ .
3. Для каждого уравнения состояния интегрированием уравнений TOV найдена зависимость массы равновесных устойчивых конфигураций от значения центральной плотности энергии  $\rho_c$  – кривые  $M(\rho_c)$ , и для каждой серии определены максимальные значения массы  $M_{max}$ , где теряется устойчивость. Для уравнений состояний с  $M_{max}/M_{\odot} > 2.01$  кроме интегральных параметров конфигураций с  $M_{max}$  определены также интегральные параметры конфигураций с массами  $M/M_{\odot} = 1.44, 1.97$  и  $2.01$ . Если в дальнейшем для этих конфигураций с большой точностью кроме массы удастся определить из наблюдений также другой интегральный параметр (например, радиус или красное смещение), то сопоставлением с результатами

теоретических вычислений можно будет выбрать осуществляемый в природе вид уравнения состояния.

4. Из полученных результатов следует, что из трех параметров мешка  $(B, \alpha_c, m_s)$  определяющим для значения максимальной массы является параметр  $B$ , с увеличением которого  $M_{max}$  уменьшается и при некотором критическом значении  $B_0$  приводит к массе, меньше  $2.01M_\odot$ . Осуществляются только те уравнения состояния, для которых  $B \leq B_0$ . Отметим, что хотя при уменьшении значения  $B$  максимальная масса растет, но при этом переход к СКМ происходит при плотностях, слегка превышающих ядерную. Так при  $B = 30 \text{ МэВ/фм}^3$  ( $m_s = 150 \text{ МэВ}, \alpha_c = 0.05$ ) имеем  $M_{max}/M_\odot = 2.52$ , но  $n_{min}/n_0 = 1.1\epsilon$ , где  $n_0$  - ядерная концентрация барионов. Это делает сомнительным осуществление таких уравнений состояния. В этой связи отметим, что в используемой модели мешка даже для предельных уравнений состояния, для которых  $M_{max}/M_\odot \approx 2.01$ , переход к странной кварковой материи происходит при плотностях, не достигающих двух ядерных плотностей, когда  $n_{min}/n_0 \leq 1.7$ .
5. Конфигурации, содержащие СКМ, рассмотренные на основе уравнения состояния мешка MIT, характеризуются весьма малой сжимаемостью. Поэтому в отличие от нейтронных звезд радиус таких конфигураций с ростом массы также растет (радиусы конфигураций с  $M/M_\odot = 1.97$  больше радиусов конфигураций с  $M/M_\odot = 1.44$ ). Однако, перед потерей устойчивости, благодаря эффектам ОТО, это поведение нарушается. Показано, что для всех рассмотренных уравнений состояния радиус конфигураций с  $M_{max}$  меньше радиуса конфигураций с  $M/M_\odot = 2.01$ .
6. Определены энергия связи  $E_B$  звездных конфигураций и коэффициент упаковки  $f = 1 - M/M_0$ . Если для обычных атомных ядер эта величина меньше 1%, в нейтронных звездах для конфигураций с  $M_{max}$  может достигать 12%, то для конфигураций,

состоящих из СКМ, которые в подавляющем большинстве случаев являются странными звездами ( $\epsilon_{\min} < 0$ ), значительно больше. Так для конфигурации с  $M_{\max}$  в случае  $\alpha_c = 0.05, B = 40$  имеем  $f = 0.26$ , а для  $M_{\max}$ , когда  $\alpha_c = 0.6, B = 40$  имеем  $f = 0.2$ . Определены зависимости внутренней энергии  $E_{\text{in}}$  и энергии связи  $\Delta_2 M$  от полной массы звезды. Рассчитаны значения полного гравитационного дефекта массы  $\Delta_1 M$  для трех конфигураций  $\Delta_1 M / M_{\odot} \sim 0.534 \div 0.544$ . Показано, что коэффициент упаковки у странных звезд значительно больше аналогичной величины нейтронных звезд.

7. Для девяти различных значений пар  $\alpha_c(0.05, 0.5, 0.6)$  и  $m_s(150, 175, 200 \text{ МэВ})$  определены те значения параметров мешка  $B = B_0$ , которые обеспечивают максимальную массу странных звезд  $2.01 M_{\odot}$ . Определены также соответствующие значения энергии СКМ  $(\epsilon_{\min})_0$  на один барион при нулевом давлении. Результаты показывают, что  $B_0$  весьма слабо зависит от  $\alpha_c$  и незначительно уменьшается с увеличением значения массы странного кварка, оставаясь в интервале  $44 < B_0 < 49$ .
8. Численные расчеты для  $\alpha_c = 0.6$  показывают, что и в этом случае имеются уравнения состояния, приводящие к конфигурациям странных звезд ( $\epsilon_{\min} < 0$ ). Однако здесь в предельном случае, когда значение  $B$  увеличиваясь приближается к  $B_0$  ( $M_{\max}$  уменьшаясь стремится к  $2.01 M_{\odot}$ ), имеем  $(\epsilon_{\min})_0 > 0$ . В этом случае могут быть конфигурации, состоящие из СКМ, соответствующие гибридным звездам. Однако, подавляющая часть уравнений состояний и в случае  $\alpha_c = 0.6$  имеет  $\epsilon_{\min} < 0$ , т.е. и в этом случае также в основном осуществляются уравнения состояния, приводящие к странным звездам. К гибридным конфигурациям с  $M_{\max} / M_{\odot} > 2.01$  приводят уравнения состояния СКМ, соответствующие значениям  $\alpha_c$ , изменяющимся в интервале  $0.6 < \alpha_c < 1$ . Отметим, что в этом

необходимо проявить определенную осторожность, т.к. термодинамические потенциалы для СКМ -  $\Omega_i$  ( $i = u, d, s$ ), получены в рамках теории возмущения, в которой кварк-глюонное взаимодействие учтено в первом порядке по константе разложения  $(2\alpha_c/\pi)$ , что приводит к требованию значительной малости этой величины.

9. Оказывается, что если для константы кварк-глюонного взаимодействия  $\alpha_c$  ограничиться значениями  $\alpha_c < 0.6$ , то согласно полученным уравнениям состояния все три пульсара с наиболее точно измеренными массами  $(M/M_\odot = 1.44, 1.97, 2.01)$  могут быть возможными кандидатами странных звезд.
10. Исследуется уравнение состояния странной кварковой материи, когда давление вакуума зависит от концентрации барионов. В диссертационной работе используется гауссовская параметризация для функции  $B(n)$ . Наборы параметров мешка для моделей I и II приводят к осуществлению самосвязанных странных звезд ( $ss$ ). Для четырех пар параметров  $\alpha_c$  и  $m_s$  в рамках теории мешка MIT с зависящей от концентрации кварков параметра  $B$  определены зависимости давления  $P$  и энергии на один барион  $\mathcal{E}$  от концентрации барионов. Показано, что эта энергия минимальна, при  $n_{min} = 3.7n_0$  где  $n_0 = 0.15 \text{ фм}^{-3}$  - ядерная концентрация. Определены интегральные параметры странных звезд. Показано, что рассмотренные наборы параметров СКМ не обеспечивают максимальную массу  $2.01M_\odot$ .

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. S. Alpher, "Ralph A Alpher, George Antonovich Gamow, and the Prediction of the Cosmic Microwave Background Radiation", *Asian J. of Physics*, vol. 23, pp. 17-26, 2014.
2. A. Friedman and U. d. Krümmung des Ramus, *Zeitschrift for Physics* (English translation in: *Gen. Rel. Grav.* vol. 31, 1999, p.1991-2000), vol. 10 , no. N 1, pp. 377-386, 1922 .
3. G. Lemaitre, "Expantion of the universe, a homogeneouse universe of constant mass and increasing radius according for the radial velocity of extra-galactic nebulae.", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 91, pp. 483-490, 1931.
4. L. D. Landau, "On the theory of stars", *Phys. Z. USSR*, vol. 1, p. 285, 1932.
5. W. Baade and F. Zwicky, "Supernovae and cosmic rays", *Phys. Rev.*, vol. 45, p. 138, 1934.
6. G. M. Volkoff and J. R. Oppengeimer, "On massive neutron cores", *Phys. Rev.*, vol. 55, p. 374, 1939.
7. Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков, «Теория тяготения и эволюция звезд,» Наука, М., 1971.
8. Г. С. Саакян, «Равновесные конфигурации вырожденных газовых масс,» Наука, М., 1972.
9. Г. С. Саакян, «Физика нейтронных звезд,» изд. ЕГУ, Ереван, 1998.
10. С. Шапиро и С. Тьюколски, «Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды,» Мир, М., 1985.
11. В. А. Амбарцумян и Г. С. Саакян, «Внутреннее строение гиперонных конфигураций звездных масс,» *Астрон. ж.*, vol. 38, p. 1016, 1961.
12. G. S. Sahakian и Y. L. Vartanian, «On the possible phase states of matter at extremely high densities,» *Nuovo Cimento*, vol. 30, p. 82, 1963.
13. Г. С. Саакян и Ю. Л. Вартанян, «Основные параметры барионных конфигураций,» *Астрон. ж.*, vol.41, p. 193, 1964.
14. A. R. Bodmer, "Collapsed Nuclei", *Phys. Rev.*, vol. D4, p. 160, 1971.



15. E. Witten, "Cosmic separation of phases", *Phys. Rev.*, vol. D.30, p. 272, 1984.
16. R. L. Jaffe and E. Farhi, "Strange matter", *Phys. Rev.*, vol. D.30, p. 2379, 1984.
17. N. K. Glendenning, *Nuclear Physics, Particle Physics and General Relativity*, Berkeley, California: Springer, 1996.
18. C. Alcock, E. Farhi and A. Olinto, "Strange stars", *Astrophys. J.*, vol. 310, p. 261, 1986.
19. P. Haensel, J. L. Zdunik and R. Schaeffer, "Strange quark stars", *Astron. Astrophys.*, vol. 160, p. 121, 1986.
20. O. G. Benvenuto and J. E. Horvath, "On the structure of strange stars and bagged QCD parameters", *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, vol. 241, p. 43, 1989.
21. Ю. Л. Варганиян, А. К. Григорян and Т. Р. Саркисян, "Модели странных звезд с корой и странных карликов", *Астрофизика*, vol. 47, pp. 223-236, 2004.
22. A. Chodos, R. L. Jaffe, K. Johnson, C. B. Thorne and V. F. Weisskopf, "A new extended model of hadrons", *Phys. Rev.*, vol. D9, p. 3471, 1974.
23. A. Chodos, R. L. Jaffe, K. Johnson and C. B. Thorn, "Baryon structure in the bag theory", *Phys. Rev. D*, vol. 10, p. 2599, 1974.
24. N. K. Glendenning and F. Weber, "Nuclear solid crust on rotating quark stars", *Astrophys. J*, vol. 400, p. 647, 1992.
25. R. S. Lynch and et. al., "A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary", *Science*, vol. 340, no. 6131, 2013.
26. R. C. Tolman, "Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid", *Phys. Rev.*, vol. 5 (4), p. 364, 1939.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Հ.Ա.Շահինյան, «Փոքր զանգվածով տարօրինակ աստղերի մասին», Հոբելյանական գիտական նստաշրջան, Հոդվածների ժողովածու, ֆիզմաթ գիտություններ, 2010, էջ 173-180:
2. Yu.L.Vartanyan, Sh.R.Melikyan, H.A.Shahinyan, “Electrons in quark plasmas” Astrophysics, vol. 55, No.3, 2012, p. 429-433.
3. Yu.L. Vartanyan, A.K. Grigoryan, A.A.Shaginyan, “The Pulsar PSR J0348-0432 and Strange Stars”, Astronomy Letters, vol. 41, No.7, 2015, p. 343-350.
4. Yu.L. Vartanyan, A.K. Grigoryan, H.A.Shahinyan, “Maximum mass of strange stars and pulsars with the most accurately measured masses”, Astrophysics, vol. 58, No.2, 2015, p. 276-288.
5. H.A.Shahinyan, “Mass defect of strange stars”, Proceedings of the YSU, №2, 2015, p. 57-61.
6. Yu.L.Vartanyan, G.S.Hajyan, A.K.Grigoryan, A.G.Alaverdyan, H.A.Shahinyan, “Mass – radius relation of white and strange stars”, Int. Conf. “The Modern Physics of Compact Stars and Relativistic Gravity 2015” (30.09-03.10. 2015 Yerevan) p. 7.
7. Yu.L.Vartanyan, A.K.Grigoryan, H.A.Shahinyan, “Pulsars with more exactly measured masses as possible candidates of strange stars.”, Int. Conf. “The Modern Physics of Compact Stars and Relativistic Gravity 2015”(30.09-03.10. 2015 Yerevan) p. 15.
8. Yu.L.Vartanyan, G.S.Hajyan, G.B.Alaverdyan, A.K.Grigoryan, A.R.Harutyunyan, A.G.Alaverdyan, H.A.Shahinyan “Strange quark matter in compact stars”, in proceedings of the 3th Conference “Modern Physics of Compact Stars 2015”, PoS (MPCS 2015) 006 (15 pages), 2016.

## ՀԱՄՄԻԿ ԱՇՈՏԻ ՇԱՀԻՆՅԱՆ

### ՏԱՐՕՐԻՆԱԿ ՔՎԱՐԿԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԳԵՐԽԵՏ ԵՐԿՆԱՅԻՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐՈՒՄ

#### ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Հանգուցային բառեր. գերխիտ աստղեր, տարօրինակ քվարկային նյութ, առավելագույն զանգված, կրկնակի պուլսարներ:

Ատենախոսությունը նվիրված է տարօրինակ քվարկային նյութից բաղկացած գերխիտ երկնային մարմինների՝ տարօրինակ աստղերի հետազոտությանը:

Ատենախոսական աշխատանքում պարկի մոդելի շրջանակներում ուսումնասիրվել է տարօրինակ քվարկային նյութը, որում անցումը տարօրինակ քվարկային վիճակի տեղի է ունենում ատումներում միջուկային խտության կրկնակիին չգերազանցող խտությունների դեպքում, ինչը շատ ավելի փոքր է առավելագույն զանգվածով նեյտրոնային աստղերի էներգիայի կենտրոնական խտությունից: Դրա շնորհիվ հավասարակշռական գերխիտ կոնֆիգուրացիաների  $M$  զանգվածի՝ էներգիայի կենտրոնական  $\rho_c$  խտությունից կախվածության կորի վրա ( $M(\rho_c)$ -կոր) փոքր զանգվածով նեյտրոնային աստղերը և տարօրինակ քվարկային նյութից կազմված կոնֆիգուրացիաները ձևավորում են մեկ ընտանիք: Որոշված են այդ հաստատունների համախմբերը, որոնց օգտագործումը տարօրինակ քվարկային նյութի վիճակի հավասարման մեջ բերում է հավասարակշիռ կոնֆիգուրացիաների առավելագույն զանգվածներին, որոնք մեծ են վերջերս ճշգրիտ չափված կրկնակի  $PSR J0348 + 0432$  ռադիոպուլսարի զանգվածից,  $M_{max} > 2.01M_{\odot}$ : Այդ կոնֆիգուրացիաների համար կախված էներգիայի կենտրոնական խտությունից  $\rho_c$  հաշվարկված են զանգվածը, շառավիղը, բարիոնների ընդհանուր թիվը և տարօրինակ աստղի մակերևույթից կարմիր շեղումը:  $M_{max} > 2.01M_{\odot}$  պայմանի դեպքում յուրաքանչյուր խմբի համար հաշվարկված են նաև վերոհիշյալ ինտեգրալ պարամետրերի արժեքները այնպիսի գերխիտ կոնֆիգուրացիաների համար, որոնց զանգվածները հավասար են  $2.01, 1.97$  և  $1.44$  արևի զանգված և, որոնք մեծ ճշտությամբ որոշված են դիտումների արդյունքում: Պարզվում է, որ համաձայն ստացված վիճակի հավասարումների, բոլոր

երեք հնարավորինս ճշգրիտ չափված զանգվածներով պուլսարները կարող են հանդիսանալ տարօրինակ աստղերի հնարավոր թեկնածուներ: Եթե հետազայում այս կոնֆիգուրացիաների համար մեծ ճշտությամբ, բացի զանգվածից, հաջողվի որոշել նաև այլ ինտեգրալ պարամետր (օրինակ, շառավիղը կամ կարմիր շեղումը), ապա համեմատելով տեսական հաշվարկների արդյունքների հետ, կարելի է ընտրել բնության մեջ իրականացվող վիճակի հավասարման տեսքը:

Պարկի մոդելի շրջանակներում ֆեռոմենտոգրիական  $\alpha_c$  և  $m_s$  հաստատունների տարբեր արժեքների համար տարօրինակ քվարկային նյութի համար որոշվել են վիճակի հավասարումները, երբ վակուումի ճնշումը կախված է բարիոնների կոնցենտրացիայից  $B(n)$ : Ցույց է տրված, որ այդ դեպքում իրականանում են ինչպես տարօրինակ աստղեր, այնպես էլ տարօրինակ քվարկային կորիզով նեյտրոնային աստղեր (հիբրիդային աստղեր): Ընդ որում այս դեպքում տարօրինակ աստղերի զանգվածները չեն գերազանցում  $1.9M_{\odot}$ -ը:

Աշխատանքում քննարկվում է նաև փոքր զանգվածով մերկ տարօրինակ աստղերի ինտեգրալ պարամետրերը: Ինքնակապված տարօրինակ քվարկային նյութի վիճակի հավասարման համար առաջարկվում է անալիտիկ բանաձև, որը մեծ ճշտությամբ համընկնում է թվային մեթոդներով ստացված արդյունքների հետ: Այն կարևորվում է հատկապես տարօրինակ թզուկների ուսումնասիրության համար, քանի որ վերջիններս ունեն  $0.017M_{\odot}$  զանգվածով տարօրինակ քվարկային կորիզ ( $M_{\text{core}} < 0.02M_{\odot}$ ): Արդյունքները ցույց են տալիս, որ տարօրինակ թզուկների միջուկներում նյութի բաշխումը և նրանց շառավիղները գործնականում չեն տարբերվում մերկ տարօրինակ աստղերի համար ստացված արդյունքներից:

Ուսումնասիրվում է քվարկային պլազմայում  $\beta$  պրոցեսների ազդեցությունը էլեկտրոնների առկայության վրա: Ստացվում է, որ քվարկային պլազմայում էլեկտրոնների ոչ մեծ քանակությունը չնայած իր ներդրումն ունի ճնշման մեջ, այնուամենայնիվ, տարօրինակ քվարկային և ոչ տարօրինակ քվարկային նյութերում մեկ բարիոնին բաժին ընկնող էներգիաների քանակական գնահատականը փոխում է շատ աննշան:

HASMIK SHAHINYAN

PRESENCE OF STRANGE QUARK MATTER IN SUPERDENSE CELESTIAL  
OBJECTS

SUMMARY

Keywords: superdense stars, strange quark matter, maximal mass, binary pulsars

The dissertation work is dedicated to the study of superdense celestial objects – strange stars consisted of strange quark matter.

In the dissertation work strange quark matter (SQM) has been studied using a bag model in which the transition to strange quark matter state takes place at energy densities of no more than twice the density in atomic nuclei, which is much lower than the central energy density of maximally massive neutron stars. Due to this fact neutron stars with low mass and configurations consisted of strange quark matter form one family on the dependence curve of  $M$  mass of equilibrium superdense configurations on energy central  $\rho_c$  density ( $M(\rho_c)$ -curve). The groups of values of these constants were determined the use of which in the equation of state of strange quark matter leads to maximal masses of equilibrium configurations that are heavier than the mass of *PSR J0348 + 0432* pulsar recently measured with high precision  $M_{max} > 2.01M_{\odot}$ . For these configurations depending on central energy density  $\rho_c$ , the mass, radius, total number of baryons and red shift from strange star surface were measured. In the case of  $M_{max} > 2.01M_{\odot}$  for each group the values of above mentioned integral parameters were calculated for such superdense configurations the masses of which are equal to **2.01, 1.97 and 1.44** sun mass and that are precisely determined in the results of observations. It was revealed that according to obtained equations of state all three possibly precisely measured pulsars may be probable candidates for strange stars. If further it becomes possible to determine another integral parameter for these configurations besides the mass with high precision (for

instance radius or red shift), there will be a chance to choose a form of the equation of state that exists in nature by comparing with theoretical calculations.

In the framework of bag model for different values of phenomenological  $\alpha_c$  and  $m_s$  constants the equations of state of strange quark matter were determined when the pressure of vacuum depends on concentration of baryons  $B(n)$ . It was shown that in this case both strange stars and neutron stars with strange quark core (hybrid stars) are realized. Moreover, in this case the masses of strange stars do not exceed  $1.9M_\odot$ .

In this work the integral parameters of bared strange stars with small mass were discussed. An analytic formula was suggested for the equation of state of self-bound strange quark matter which precisely coincides with obtained results by numeric methods. It is particularly important for investigation of strange dwarfs since they have a quark core with  $0.017M_\odot$  mass ( $M_{core} < 0.02M_\odot$ ). The results show that a distribution of the matter in nuclei of strange dwarfs and their radii practically do not differ from those obtained for naked strange stars.

The influence of  $\beta$  processes on the presence of electrons in quark plasmas was discussed. It was obtained that a small number of electrons in quark plasma changes quantitative estimate of energy per one baryon in both strange quark and non-strange quark matters insignificantly despite it has own deposit in the pressure.