

Д.М. Насирова¹, А.А. Ғазизова^{1*}

¹ Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
*e-mail: askarkyzy_94@mail.ru

НЕЙТРОНДЫҚ ЖҰЛДЫЗДАРДЫҢ МОДЕЛЬДЕРІ ТУРАЛЫ

Аңдатпа

Бұл шолу мақалада ең өзекті және жұмбақ ғарыш денелерінің бірі және бірегейі – нейтрондық жұлдыздар туралы, олардың ерекшеліктері, сондай-ақ олардың бірегей қасиеттерін ғарыш кеңістігін зерттеу үшін пайдалану мүмкіндігі қарастырылады. Сонымен қатар, мақалада бірнеше авторлардың қатысуымен жүргізілген нейтрондық жұлдызды модельдеу саласындағы зерттеулерге қысқаша шолу жасалды, яғни, нейтрондық жұлдыздардың заманауи модельдері ұсынылып, олардың бақылау көріністері, ядроларының құрылымы, магнит өрістері мен тығыздығы туралы қысқаша қарастырылады. Ұсынылған жұмыстар нейтрондық жұлдыздардың табиғатын түсінуге, сонымен қатар олардың жылдамдығын, тығыздығы мен радиусын анықтауға бағытталған. Сондай-ақ, нейтрондық жұлдыздың ядросының құрылымы мен нейтрондық жұлдыздардың түрлері: пульсарлар, рентгендік пульсарлар, миллисекундтық пульсарлар туралы да қысқаша баяндалып, нейтрондық жұлдыздағы нейтрондардың эффективті массасының қатты нысанды жұлдыздың әртүрлі массалары үшін олардың радиалды координатасына тәуелділігі де көрсетілген. Бұл мақалада тек қана шет ел зерттеулері ғана емес, сонымен қатар, Отандық ғалымдардың нейтрондық жұлдыздар физикасы саласындағы зерттеулеріне де тоқталып өттік. Сондай-ақ, мақалада қатты нысанды жұлдыздағы нейтрондардың эффективті массасының нейтрондық жұлдыздың әртүрлі массалары үшін олардың радиалды координатасына тәуелділік графигі де көрсетілген.

Түйін сөздер: нейтрондық жұлдыз, пульсар, ғарыш, нейтрондық жұлдыз модельдері, жеңіл ядро, тығыз жұлдыз.

Д.М. Насирова¹, А.А. Ғазизова¹

¹ Казахский Национальный Педагогический Университет имени Абая, г.Алматы, Казахстан

О МОДЕЛЯХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Аннотация

В обзорной статье рассматривается одно из самых актуальных, уникальных и загадочных космических тел - нейтронные звезды, их характеристики, а также возможности использования их уникальных свойств для освоения космоса. Кроме того, в статье дается краткий обзор исследований в области моделирования нейтронных звезд, кратко рассмотрены их наблюдения, структура ядра, магнитные поля и плотность звезды. Предлагаемые работы направлены на исследование природы нейтронных звезд, а также определение их скорости, плотности и радиусов. Также кратко описаны строение ядра нейтронной звезды и типы нейтронных звезд: пульсары, рентгеновские пульсары, миллисекундные пульсары, а также показана зависимость эффективной массы нейтронов в нейтронной звезде, также зависимость для разных масс нейтронных звезд от их радиальных координат. В данной статье мы сосредоточились не только на зарубежных исследованиях, но и на исследованиях отечественных учёных в области физики нейтронных звёзд. Также в обзорной статье показан график зависимости эффективной массы нейтронов нейтронной звезды от их радиальных координат для разных масс нейтронной звезды и дан анализ на этот график.

Ключевые слова: нейтронная звезда, пульсар, космос, модели нейтронных звезд, легкое ядро, плотная звезда.

D.M. Nassirova¹, A.A. Gazizova¹

¹ Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Almaty, Kazakhstan;

ABOUT NEUTRON STAR MODELS

Abstract

This review article examines one of the most relevant, unique and mysterious cosmic bodies - neutron stars, their characteristics, as well as the possibility of using their unique properties for space exploration. In addition, the article provides a brief overview of research in the field of modeling neutron stars, briefly discussing their observations, core structure, magnetic fields and stellar density. The proposed work is aimed at studying the nature of neutron stars, as well as determining their speed, density and radii. The structure of the core of a neutron star and the types of neutron stars are also briefly described: pulsars, X-ray pulsars, millisecond pulsars, and the dependence of the effective mass of neutrons in a neutron star is also shown, as well as the dependence for different masses of neutron stars on their radial coordinates. In this article, we focused not only on foreign research, but also on the research of domestic scientists in the field of neutron star physics. The review article also shows a graph of the dependence of the effective mass of neutrons of a neutron star on their radial coordinates for different masses of the neutron star and provides an analysis of this graph.

Keywords: neutron star, pulsar, space, neutron star models, light core, dense star.

Кіріспе

Нейтрондық жұлдыздар – қазіргі таңдағы ғалымдардың қызығушылығын тудырып отырған аспан денелерінің бірі.

Біріншіден, бұл ең кіші жұлдыздар, олардың радиустары шамамен $R \sim 10$ км болатынына қарамастан, олардың массалары Күннің массасының $\sim 1,4$ бөлігін құрайды. Сәйкесінше, мұндай масса мен радиустың мәндері үлкен $\frac{GM^2}{R} \cdot 1053 \text{ erg} \sim 0,2 L/s^2$ гравитациялық энергияға және жер бетіндегі гравитациялық үдеу $GM/R^2 \sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}$ -ге сәйкес келеді. Гравитациялық энергия жұлдыздың тыныштық энергиясының маңызды бөлігі болғандықтан, нейтрондық жұлдыздар релятивистік объектілер болып табылады. Нейтрондық жұлдыздардағы заттың орташа тығыздығы $\rho \sim 7 \cdot 10^{14} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ стандартты ядролық тығыздыққа $\rho_0 = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ г} / \text{см}^3$ қарағанда бірнеше есе жоғары екені анықталған. Жұлдыздың центріндегі тығыздық (10-20) r_0 шамасына жетуі мүмкін. Осылайша нейтрондық жұлдыздардың ядролары қатты сығылған заттардан тұрады. Мұндай қысым үлкен гравитациялық күштерден туындайды және Жер бетінде дәл осындай қысым болған емес. Сондықтан нейтрондық жұлдыздарды аса тығыз материяның «бірегей астрофизикалық зертханалары» ретінде қарастыруға болады. Нейтрондық жұлдыздардың ядролары негізінен протондар мен электрондар қоспасы бар нейтрондардан тұрады деп болжанады, дегенмен басқа бөлшектер де (мюондар, гиперондар, кварктар және т.б.) болуы мүмкін.

Нейтрондық жұлдыздар радиотолқыннан қатты гамма-сәулеленуге дейінгі барлық толқын ұзындығын қамтитын диапазондағы электромагниттік сәулеленудің көзі болып табылады. Олар бақыланатын астрофизикалық объектілердің алуан түрлілігімен байланысты: радиопульсарлар, рентгендік пульсарлар, аномальды рентген пульсарлары (мысалы, Mereghetti et al. 1998, Mereghetti 2001), рентген сәулелері, рентгендік өтпелі кезең (Satrapa et al. 1998), квазипериодтық рентгендік тербелістердің көздері (Psaltis et al. 1998, Kluzniak et al. 1998, Van der Klis 1998), қайталанатын GRB көздері (Cline et al. 2000, Artekar et al. 2001), т.б. Нейтрондық жұлдыздар да жоғары энергиялы бөлшектердің қуатты үдеткіштері болып табылады. Олардың супернова жарылыстары кезінде туылуы қуатты нейтрино импульсімен бірге жүреді.

Жақында астрономдар мен физиктердің назары тағы да нейтрондық жұлдыздар мәселесіне аударылды. Бұл мәселе өте ертеден келе жатыр: оның шығуы туралы көрнекті физик Л.Д. Ландаудың болжамы бойынша, оның пайда болуына біздің Күннен жарты ғасырдан астам уақыт кеткен-мыс. Ландаудың гипотезасы бойынша табиғатта қатты, сұйық, газ және плазмамен қатар заттың нейтрондық күйі де болуы мүмкін. Сіз нейтрондық материяны тек

кейбір жұлдыздардың тереңдігінде кездестіре аласыз, онда адам өзінің практикасында кездестірген шамасынан бірнеше есе жоғары болатын үлкен қысымдар басым. Нейтрондық жұлдыздарды әлі ешкім бақылаған жоқ. Дегенмен, жақында оларды анықтаудың жаңа мүмкіндіктері пайда болды, соның арқасында ғаламның дамуын түсіну үшін қызықты және маңызды объектілер жұлдыздар каталогында өз орнын алады деп үміттенуге болады.

Зерттеу әдіснамасы

Нейтрондық жұлдыздардың құрылымы мен ерекшеліктері туралы. Нейтрондық жұлдыз – негізінен ауыр атомдық ядролар мен электрондарға ұқсас, салыстырмалы түрде жұқа (шамамен 1 км) зат қыртысымен қапталған нейтрондық ядродан тұратын ғарыштық дене. Нейтрондық жұлдыздардың массасын Күннің массасымен салыстыруға болады, бірақ жоғарыда атап кеткендей, нейтрондық жұлдыздың типтік радиусы бар болғаны 10–20 километрді құрайды. Демек, мұндай заттың орташа тығыздығы атом ядросының тығыздығынан бірнеше есе жоғары (ауыр ядролар үшін орташа есеппен $2.7 \cdot 10^{17}$ кг/м³). Нейтрондық жұлдыздың одан әрі гравитациялық жиырылуы болмайды, оған себеп нейтрондардың өзара әрекеттесуі нәтижесінде пайда болатын ядролық заттың қысымының үлкендігінде екені түсінікті. Көптеген нейтрондық жұлдыздардың осьтік айналу жылдамдығы өте жоғары, секундына бірнеше жүз айналымға дейін. Қазіргі концепцияларға сәйкес нейтрондық жұлдыздар супернованың жарылыстары нәтижесінде пайда болады. Бастапқы массасы Күннің (M_{\odot}) массасынан 8 есе асатын кез келген негізгі тізбектегі жұлдыз эволюция процесінде нейтрондық жұлдызға айналуы мүмкін. Жұлдыздың эволюциясы кезінде оның ішкі бөлігіндегі барлық сутегі жанып кетеді де, жұлдыз негізгі тізбектен түседі. Біраз уақыт бойы жұлдыздағы энергияның бөлінуі гелий ядроларынан ауыр ядролардың синтезі арқылы қамтамасыз етіледі, бірақ бұл синтез барлық жеңілрек ядролардың атомдық нөмірі темірдің атомдық нөміріне жақын ядроларға, яғни ядролық байланыс энергиясы ең жоғары элементтерге айналғаннан кейін аяқталады. Ядроғағы барлық ядролық отын таусылғанда, ядро тек азғындалған электрон газының қысымымен гравитациялық сығылу орындалмайды.

Жұлдыздың термоядролық синтез реакциялары болып жатқан сыртқы қабаттарының одан әрі сығылуы мен жеңіл ядролардың жануы нәтижесінде жұлдыз ядросының қысымы күшейеді. Ал, жұлдыз ядросының массасы Чандрасекар шегінен аса бастайды. Азғындалған электрон газының қысымы гидростатикалық тепе-теңдікті сақтау үшін жеткіліксіз болып, ядро тез конденсациялана бастайды, нәтижесінде оның температурасы $5 \cdot 10^9$ К-нен жоғары көтеріледі. Мұндай температураларда қатты гамма-сәулеленудің әрекетінен темір ядроларының альфа бөлшектеріне фотодиссоциациялануы пайда болады. Температураның тағы да жоғарылауымен электрондар мен протондар электрондарды ұстау кезінде нейтрондарға қосылады.

Жұлдыздың тығыздығы $4 \cdot 10^{17}$ кг/м³ ядролық тығыздыққа жеткенде, Ферми-Дирак газының қысымы сығылуын тоқтатады. Жұлдыздың сыртқы қабығының нейтрондық ядроға түсуі тоқтайды және ол нейтрино ағынының әсерінен жұлдыздың өзегінен кері шыға бастайды. Өйткені құлап жатқан қабықтағы өте жоғары температурадағы жұлдыз суперноваға айналады. Жұлдыздан сыртқы қабық ажырағаннан кейін жұлдыз қалдығы - нейтрондық жұлдыз қалады. Егер бұл қалдықтың массасы ($3 M_{\odot}$) асатын болса, онда жұлдыздың ыдырауы жалғасады да, қара құрдым пайда болады [1]. II, I(b) немесе I(c) типті супернованың жарылысы кезінде массивтік жұлдыздың ядросы жиырылып, нейтрондық жұлдызға құлаған кезде, ол өзінің бастапқы бұрыштық импульсінің көп бөлігін сақтайды. Бірақ жұлдыз қалдығының радиусы өзінің пайда болған жұлдызының радиусынан бірнеше есе аз болғандықтан, қалдықтың инерция моменті күрт төмендейді және бұрыштық импульстің сақталу заңына сәйкес нейтрондық жұлдыз өте үлкен шамаға ие болады. Нейтрондық жұлдыздар 1,4 мс-тен 30 мс-ке дейінгі айналу периодтарымен белгілі. Нейтрондық жұлдыздың шағын өлшемдердегі жоғары тығыздығы оның жер бетіндегіден 1011 есе артық, типтік мәндері 1012-ден 1013 м/с²-

қа дейін болатын жер бетіндегі еркін түсу үдеуінен әлдеқайда жоғары болуына байланысты. Осындай жоғары ауырлықпен нейтрондық жұлдыздардың ұшу жылдамдығы 100 000 км/с-тан 150 000 км/с-қа дейін, яғни жарық жылдамдығының үштен бірінің жартысына дейін жетеді. Нейтрондық жұлдыздың ауырлық күші оның үстіне түсетін затты орасан зор жылдамдыққа дейін үдетеді. Оның әсер ету күші құлап жатқан заттың атомдарын жоюға жеткілікті және бұл затты нейтронға дейін айналдырып жіберуі мүмкін.

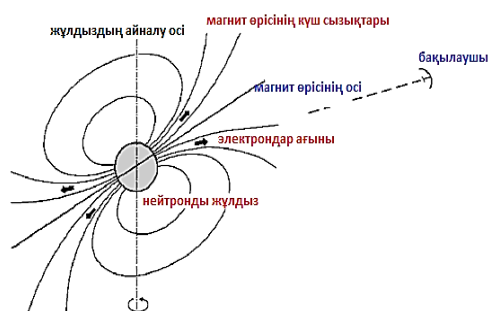
Массалары нақты өлшенген нейтрондық жұлдыздардың көпшілігінің массасы 1,3-тен 1,5-ке дейінгі Күн массасы диапазонында болады, бұл Чандрасекар шегінің мәніне жақын. Теориялық тұрғыдан алғанда, массасы 0,1-ден шамамен 2,16 Күн массасына дейінгі нейтрондық жұлдыздар қолайлы [2]. Белгілі ең массивті нейтрондық жұлдыздар Vela X-1 (1 σ деңгейінде кемінде $1,88 \pm 0,13$ Күн массасына ие, бұл $\alpha \approx 34\%$ маңыздылық деңгейіне сәйкес келеді) [3], PSR J1614–2230ruen (бар массасының бағасы $1,97 \pm 0,04$ күн) [4-6], PSR J0348+0432ruen ($2,01 \pm 0,04$ күннің массалық бағасымен) және ең соңында, PSR J0740 + 6620 (әртүрлі деректердің массалық бағасымен) берілген 2,14 немесе 2,17 күн). Нейтрондық жұлдыздардың гравитациялық сығылуына азғындалған нейтрон газының қысымы кедергі жасайды. Нейтрондық жұлдыз массасының максималды мәні Оппенгеймер-Волков шегімен белгіленеді, ол қазіргі уақытта белгісіз, өйткені ядролық тығыздықтағы зат күйінің теңдеуі әлі де толық зерттелмеген. Ядролық тығыздықтан жоғары тығыздықтың бұдан да жоғары артуымен материяның нейтрондық жұлдыздардан кварк жұлдыздарына ауысуы мүмкін деген теориялық болжамдар бар [7]. Нейтрондық жұлдыздардың бетіндегі магнит өрісі 1012–1013 Г шамасына жетеді (салыстыру үшін Жерде шамамен 1 Г бар). Пульсарлардың радио сәулеленуіне жауап беретін нейтрондық жұлдыздардың магнитосферасындағы процестер болып табылады. 1990 жылдардан бастап кейбір нейтрондық жұлдыздар магнетарларға – магнит өрісі 1014 Г және одан жоғары дәрежелі жұлдыздарға жатқызылды. Магнит өрісінің кернеулігі $4,414 \cdot 10^{13}$ Г «критикалық» мәннен асатын кезде, электронның магниттік моментінің магнит өрісімен әрекеттесу энергиясы оның тыныштық энергиясынан $m_e c^2$, меншікті релятивистік әсерлер, физикалық вакуумның поляризациясы және т.б. 2018 жылға қарай 2600-ден астам нейтрондық жұлдыздар болған. Олардың 90%-ға жуығы жалғыз жұлдыздар, қалғандары көп жұлдызды жүйелердің бөлігі. Жалпы алғанда, біздің Галактикада 108-109 нейтрондық жұлдыз бар, бұл мың қарапайым жұлдызға шамамен бір нейтрондық жұлдыздан келетінін көрсетеді. Нейтрондық жұлдыздар өздерінің қозғалысының жоғары жылдамдығымен сипатталады (әдетте жүздеген км/с). Жұлдызаралық газдың нейтрондық жұлдыздың бетіне аккрециялануы нәтижесінде Жерден нейтрондық жұлдызды әртүрлі спектрлік диапазондарда, соның ішінде оптикалық диапазондарда байқауға болады, ол жұлдыз шығаратын жалпы энергияның шамамен 0,003% құрайды.

Нейтрондық жұлдызда шартты түрде бес қабат болады: атмосфера, сыртқы қабық, ішкі қабық, сыртқы ядро және ішкі ядро. Нейтрондық жұлдыздың атмосферасы – бұл нейтрондық жұлдыздың жылулық сәулеленуі түзілетін плазманың өте жұқа қабаты (ыстық жұлдыздар үшін ондаған сантиметрден, ал суық жұлдыздар үшін миллиметрге дейін) [8]. Сыртқы қабық ядролар мен электрондардан тұрады және қалыңдығы бірнеше жүз метрге жетеді. Нейтрондық жұлдыздың ыстық сыртқы қыртысының бетіне жақын жұқа (бірнеше метрден аспайтын) қабатында электрон газы бұзылмаған күйде болады, ал тереңдеген сайын оның ыдырауы пайда болады, одан тереңірек қабаттарда электрон газы азғындауы релятивистік және ультрарелятивистікке жетеді. Ішкі қыртыс электрондардан, бос нейтрондардан және нейтрондардың артық атомдық ядроларынан тұрады. Тереңдік артқан сайын бос нейтрондардың үлесі артады, ал атом ядроларының үлесі азаяды. Ішкі қыртыстың қалыңдығы бірнеше километрге жетуі мүмкін. Сыртқы ядро протондар мен электрондардың аздаған (бірнеше пайыз) қоспасы бар нейтрондардан тұрады. Массасы аз нейтронды жұлдыздар үшін сыртқы ядро жұлдыздың ортасына дейін жетуі мүмкін [8].

Массивті нейтрондық жұлдыздардың да ішкі ядросы болады. Оның радиусы бірнеше километрге жетуі мүмкін, ядроның центріндегі тығыздық атом ядроларының тығыздығынан 10-15 есе артық болуы мүмкін. Ішкі ядродағы заттың құрамы мен күйі теңдеуі нақты белгісіз. Олар туралы бірнеше гипотеза бар, олардың түрлері келесідей: 1) кварк ядросы, онда нейтрондар өздерінің құрамдас бөлігі жоғары және төмен кварктарға ыдырайды; 2) бариондардың гиперон өзегі, оның ішінде оғаш кварктар; 3) «біртүрлі» (анти)кварктарды қоса алғанда, екі кварк-мезондардан тұратын каон ядросы. Дегенмен, қазіргі уақытта бұл гипотезаларды растау немесе жоққа шығару мүмкін емес [8-9].

Зерттеу нәтижелері

Нейтрондық жұлдыздардың түрлері мен модельдері туралы. Пульсарлар (2-суретте көрсетілген) - өте күшті магнит өрісі бар жылдам айналатын нейтрондық жұлдыздар. Бұл нейтрондық жұлдыздардың ерекше класына жатады, олардың магнит өрісі дененің айналу осіне айтарлықтай бейім. Яғни, пульсарлардың географиялық және магниттік полюстері бір-бірінен біршама алшақ орналасқан. Жұлдыздың бетінен ұшып шыққан бөлшектер магнит өрісінің әсерінен өте жоғары энергияға дейін үдетіледі. Географиялық және магниттік полюстердің сәйкес келмеуі бөлшектердің гравитациялық өрістен белгілі бір бұрышпен шығып, мысалы, біздің планетаға бағытталған сәуле түрінде өтуіне мүмкіндік береді. Алғашқы пульсарды 1967 жылы британдық ғалымдар Джоселин Белл мен Энтони Хьюиш ашты. Алынған сигналдар олардың жүйелілігі мен жоғары жиілігіне байланысты оларды өзге планеталықтар деп ойлап қателескен болатын.



Сурет 1. Пульсарлы модельдер

Бөлшектер полюстер арқылы тар ағынмен өте жоғары жылдамдықпен ұшып, радиосәулелену көзіне айналады. Айналу осьтерінің сәйкес келмеуіне байланысты ағынның бағыты үнемі өзгеріп, маяк эффектісін тудырады. Әрбір маяк сияқты, пульсарлардың да сигналдық жиілігі бар, оны анықтауға болады. Іс жүзінде барлық ашылған нейтрондық жұлдыздар қос рентгендік жүйелерде немесе жалғыз пульсарлар түрінде болады.

Ал, рентгендік пульсарлар тек рентгендік диапазонда сәуле шығарады деп есептейді. Радиация белгілі бір кезеңі бар жарылыстардың нәтижесінде пайда болады. Кейбір нейтрондық жұлдыздар екілік жүйелерде пайда болады немесе олар гравитация өрісінде ұстау арқылы өздеріне серік алады. Мұндай серік өзінің мәнін агрессивті «көршіге» береді. Егер нейтрондық жұлдыздың серігі массасы бойынша Күнмен шамалас болса, онда «жарылыс» сияқты қызықты құбылыстар болуы мүмкін. Бұл секундтар немесе минуттарға созылатын рентгендік жарқылдар. Бірақ олар жұлдыздың жарқырауын 100 мың Күнге дейін арттыра алады. Компаньоннан тасымалданатын сутегі мен гелий жарылғыштың бетіне қойылады. Қабат өте тығыз және қызған кезде термоядролық реакция басталады. Мұндай жарылыстың күші керемет: жұлдыздың әрбір шаршы сантиметрінде бүкіл жердің ядролық эквиваленттің жарылуына тең қуат бөлінеді. Алып серігі болған кезде оған зат жұлдыздық жел түрінде болады, ал нейтрондық жұлдыз оны тартылыс күшімен тартады. Бөлшектер күш сызықтары

бойымен магниттік полюстерге қарай ұшады. Егер магнит осі мен айналу осі сәйкес келмесе, жұлдыздың жарықтығы айнымалы болады. Осыдан рентген пульсары пайда болады.

Пульсарлардың келесі түрі - миллисекундтық пульсарлар екілік жүйелермен байланысты және ең қысқа кезеңдерге ие болады (30 миллисекундтан аз). Олар ең жас деп күтіліп еді, алайда ең «қарты» болып шықты. Ескі және баяу нейтрондық жұлдыз алып серігінің материясын өзіне сіңіреді. Ұстаушының бетіне түсіп, зат оған айналу энергиясын береді, ал жұлдыздың айналуы артады. Бірте-бірте серік массасын жоғалтып, ақ ергежейліге айналады.

Нейтрондық жұлдыздар кәдімгі «Жер» физикасы тұрғысынан да өте қызықты, өйткені оларда түрлі оқиғалар жүзеге асырылады, қазіргі уақытта біздің зертханаларымызда олардың жасалуын елестету мүмкін емес. Нейтрондық жұлдыздардың әлі ашылмағаны олардың өмір сүруіне қарсы дәлел емес. Өйткені нейтрондық жұлдыздарды бақылау өте қиын. Нейтрондық заттың орасан зор тығыздығына байланысты олар ергежейлі: диаметрі небәрі он километр. Бұл кезде жұлдыздың шығаратын энергиясының мөлшері оның бетінің ауданына, яғни диаметрінің квадратына пропорционал. Мұндай жұлдызды, егер қандай да бір ғажайыппен күн жүйесіне жақын орналаспаса, кәдімгі телескоппен байқау мүмкін емес екені анық. Кәдімгі жұлдыздың нейтронға айналуы бірден болатын процесс емес, орасан зор энергияның бөлетін жарылысымен жүреді. Бұл процесс асқын жаңа жұлдыздардың пайда болуына әкеліп соғуы әбден мүмкін. Бұл жағдайда нейтрондық жұлдызды өте жоғары температураға дейін, айталық, Күн бетінің температурасынан мың есе жоғары температураға дейін қыздыруға болады. Бұл кезде жұлдыздың жалпы сәулеленуі қатты жоғарылайды және оның энергиясының көп бөлігін жұлдыз көрінетін жарық түрінде емес, «қатты» рентген сәулесі түрінде шығарады. Бұл сәулеленудің күшінің маңыздылығы соншалықты, бұндай қолданыстағы құралдар мыңдаған жарық жылындағы қашықтықтағы нейтрондық жұлдызды тіркеуге қабілетті.

«Ерекше ауыр немесе жеңіл нейтрондық жұлдыздарды бақылау өте қызықты, өйткені олар бақылаулар арқылы зерттелген орталық тығыздықтардың ауқымын кеңейтеді және осылайша ядролық физиканың болжамдарын ауқымды параметр кеңістігінде сынауға мүмкіндік береді», - деп Джошуа Сокол өз жұмысында көрсетіп өтті [9]. Бұл жұлдыз HESS J1731 – 347 деп аталатын супернованың қалдықтарының ортасында табылған. Алдыңғы зерттеулер оның бізден 10000 жарық жылынан астам қашықтықта екенін анықтады. Алайда, нейтрондық жұлдыздар жағдайында қашықтықты өлшеу (олардың рентгендік сәулеленуіне негізделген) шектеулі, сондықтан жұлдыздың басқа сипаттамаларын дәл анықтау қиын. Дегенмен, жақында HESS J1731 – 347-де жасырылған екінші толқын ұзындықтағы жұлдыз ашылды, бұл жағдай астрономдарға «сенімділік» бергендей болды. Рентген спектрін модельдеу және Gaia жерсерігін бақылаудан алынған нақты қашықтықты бағалау негізінде Германияның Тюбинген қаласындағы Эберхард Карлс университетінің астрономдар тобы HESS J1731 – 347 дейінгі қашықтықты қайта есептеді. Нысан күтілгеннен әлдеқайда жақын болып шықты, шамамен 8150 жарық жылы қашықтықта. Зерттеушілер нейтрондық жұлдыздың басқа сипаттамалары, оның ішінде оның массасы да дұрыс емес болуы мүмкін деген қорытындыға келді. Жаңа есептеулер бойынша нейтрондық жұлдыздың массасы 0,77 Күн массасына тең, ал оның радиусы 10,4 шақырымға бағаланады. «Біздің бағалауымыз бойынша бұл нысан не ең жеңіл нейтрондық жұлдыз немесе күйдің экзотикалық теңдеуі бар «біртүрлі жұлдыз» болып табылады», - деп қорытындылады Nature Astronomy зерттеушілері (2022) [10].

Нейтрондық жұлдыздардың модельдеріне тоқталсақ, 2021 жылдың 19 шілдесінде Британдық Корольдік астрономиялық қоғамының (RAS) астрофизиктері нейтрондық жұлдыздардың интерьерінің жаңа үлгісін жасап, осы типтегі жұлдыздар толығымен дерлік сфералық нысандар болып шыққанын анықтады [11].

Зерттеушілер бұл мәлімдемені нейтрондық жұлдыздардың жинақылығымен және Жерден миллиард есе күшті гравитациялық тартылысымен байланыстырады. Бұл Жер бетіндегі әрбір затты өте аз өлшемдерге дейін қыса алады.

Британдық астрофизиктер LIGO және ViRGO гравитациялық обсерваторияларының деректерін нейтрондық жұлдыздың ішкі бөлігінің жаңа компьютерлік моделін жасау үшін

пайдаланды, бұл оларға жұлдыздың осы түрінің бетіндегі төбешіктердің максималды мүмкін биіктігін дәл өлшеуге мүмкіндік берді. Олардың есептеулері нейтрондық жұлдыздардың толық дерлік сфералық нысандар екенін көрсетеді. Бұған қоса, олар тудыратын гравитациялық толқындарды анықтау бұрын ойлағаннан да қиынырақ болатынын атап өтті. Саутгемптон университетінің зерттеушісі Фабиан Гиттинсін айтуынша, бұл нейтрондық жұлдыздарды олар тудыратын кеңістік-уақыттың ауытқуы арқылы іздеуді айтарлықтай қиындатады [12].

Нейтрондық жұлдыздар – кара құрдымнан кейінгі ғаламдағы ең тығыз нысандар. Шынында да, өзінің тартылуының әсерінен нейтрондық жұлдыз біркелкі сфералық пішінге ие болуы керек. Оның беті серпімді және қозғалмалы, ал «таулар» аздап көтерілуі мүмкін. Олардың биіктігі шар радиусының миллионнан бір бөлігіне жетуге қабілетті деп саналады; орташа нейтрондық жұлдыз үшін бұл максимум 10 сантиметр болады. Алайда, бұл болжам өрескел әсірелеу болып шықты. Нейтрондық жұлдыздардың бетіндегі «таулар» миллиметрден жоғары емес екені анықталды [13]. Британдық астрофизиктердің жүргізген жаңа есептеулері нейтрондық жұлдыздардағы «таулардың» биіктігі максималды миллиметрге жететінін көрсетті. Мұндай нәтижелерді Фабиан Гиттинс және оның Саутгемптон университетіндегі әріптестері 2021 жылғы Ұлттық астрономия жиналысында ұсынды. «Соңғы онжылдықтарда бұл таулар нейтрондық жұлдыздың қыртысы жарылғанға дейін қаншалықты биіктікке көтеріледі және енді оларды көтере алмайды деген сұраққа қызығушылық туындады», - дейді Гиттинс. Алдыңғы есептеулер серпімді қабықтың біркелкі жоғары механикалық кернеу астында болуы және кез келген аймақта бірдей ықтималдықпен сынуы мүмкін екендігіне негізделген. Қазір ғалымдар нейтрондық жұлдыздың жаңа, тазартылған үлгісін қолданды, ол оның сұйық ішкі қабаты, серпімді қабық пен жұқа атмосфера арасындағы өзара әрекеттесуді нақтырақ сипаттайды. Бұл жер қыртысының мінез-құлқын және жарылулардың пайда болуын дәлірек болжауға мүмкіндік берді. Белгілі болғандай, олар бұрын ойлағаннан әлдеқайда ертерек пайда болды және нейтрондық жұлдыздардың «таулары» максималды миллиметр биіктікке көтерілуге үлгереді.

Ұлыбритания ғалымдары нейтрондық гравитациялық толқындарды зерттеудің жаңа моделін жасады, оның арқасында нейтрондық жұлдыздардың құрылымы мен құрамын толығырақ зерттеуге болады [14]. Зерттеушілер атап өткендей, мұндай жұлдыздар екілік жүйені құраған кезде, олар белгілі бір жиілікте гравитациялық толқындар шығарады, олардың ерекшеліктері туралы ақпаратты тасымалдайды. Бір топ ғалымдар әзірлеген модель қос нейтрондық жұлдыздардың гравитациялық толқын сигналының тербеліс жиілігін алғаш рет анықтауға мүмкіндік берді. Астрофизиктердің айтуынша, жаңа толқын детекторларының ашылуымен бұл модельді одан әрі зерттеу және мұндай ғарыш объектілерін классификациялау үшін пайдалануға болады.

Бирмингем университетінің (Ұлыбритания) ғалымдары қос нейтрондық жұлдыздардан шығатын гравитациялық толқындардың бірегей жиіліктерін анықтаудың келесі бір жаңа моделін әзірледі. Бұл туралы Nature Communications (2021) журналында жазылған. Жарық жылдамдығымен таралатын гравитациялық толқындардың Әлемде болуы мүмкін екендігі Альберт Эйнштейн ұсынған жалпы салыстырмалылық теориясында да болжанған. Олар бірнеше жұлдыздардың және кара құрдымның қосылуы сияқты үлкен ғарыштық оқиғалардан туындаған кеңістік-уақыттағы ауытқулар. 1962 жылы кеңес ғалымы Владислав Пустовойт алғаш рет лазерлік интерферометрлердің көмегімен гравитациялық толқындарды тіркеу әдісін қолдануды ұсынды. Алайда, мұндай толқындар алғаш рет 2017 жылы американдық LIGO обсерваториясында эксперименталды түрде тіркелді. Нейтрондық жұлдыздардың табиғаты мен құрылымы әлі күнге дейін аз зерттелген. Бірқатар болжамдарға сәйкес, бұл ғарыштық объектілер асқын жаңа жұлдыздардың жарылуы нәтижесінде пайда болады және шын мәнінде олардың қалдық ядролары болып табылады. Электромагниттік спектрде мыңдаған жалғыз нейтронды жұлдыздар бар, бірақ оларды зерттеу мүмкін емес. Осындай екі жұлдыз тартылып, бір жұлдызға біріктірілген кезде тапсырма жеңілдетіледі. Алынған қос жүйедегі тартылыс

күштердің әсерінен қосылатын екі жұлдыз да созылып, белгілі бір жиілікте гравитациялық толқын тербелістерін тудырады.

«Бір-бірінің маңында айналатын екі жұлдыз серіктерінің тартылыс күшінің әсерінен деформацияланады. Толқындық күштер жұлдыздардың ішінде белгілі бір тербелістерді тудырады, олардан олардың ішкі құрылымы туралы қорытынды жасауға болады. Гравитациялық толқындар сигналының деректеріне негізделген мұндай тербелістердің параметрлерін есептеу арқылы біз осы жұмбақ нысандардың іргелі табиғаты мен құрамы туралы ақпаратты ала аламыз», - деп түсіндірді Бирмингем университетінің гравитациялық толқындарды зерттеу институтының докторы Герайнт Праттен.

Birmingham Science Group әзірлеген модель гравитациялық толқын тербелістерін өлшеуден осындай екілік жүйе туралы бірегей ақпаратты береді. Әзірленген модельді тексеру үшін GW170817 қос нейтрондық жұлдызының қосылуынан алынған толқындар пайдаланылды [15].

«Қос нейтрондық жұлдыздың гравитациялық толқындарын алғашқы бақылаудан кейін үш жылға жуық уақыт өткен соң, біз кіріс сигналдарынан олар туралы қосымша ақпаратты алудың жаңа жолдарын тауып жатырмыз. Неғұрлым күрделі теориялық модельдерді әзірлеу арқылы көп ақпарат жинай алатын болсақ, соғұрлым біз нейтрондық жұлдыздардың шынайы табиғатын ашуға жақындай түсеміз», - деп қосты автор Праттен Патрисия Шмидттің әріптесі. Герайнт Праттен атап өткендей, зерттелген жалғыз оқиғаның нәтижелерінен тек шектеулі ақпарат алынды, өйткені үлкен кедергі салдарынан сигналды оқшаулау мүмкін болмады. Дегенмен, ол неғұрлым жетілдірілген құралдардың көмегімен ғалымдар «тербеліс жиілігін дәлірек өлшеп, өте қызықты ақпарат ала алады» деген сенімде.

Дискуссия

Зерттеушілердің пікірінше, белсенді дамып келе жатқан астросейсмология (жұлдызды тербеліс туралы ғылым) Әлемді зерттеудің ең маңызды құралына айналууда. Астрофизиктердің пайымдауынша, 2030 жылдары ашылуы жоспарланған гравитациялық толқындық обсерваториялардың келесі буыны қос нейтрондық жұлдыздарды көбірек анықтап, оларды қазіргіден әлдеқайда егжей-тегжейлі зерттей алады.

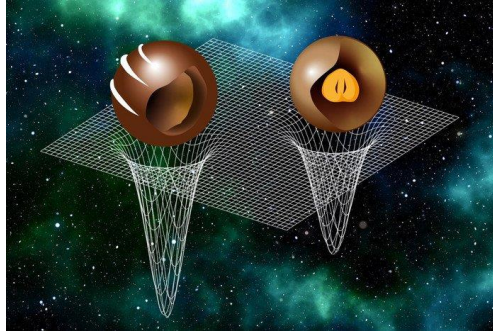
Гёте (Германия) атындағы Франкфурт университетінің физиктері миллионнан астам күй теңдеулерін модельдеп, мынадай қорытындыға келді: «жеңіл» нейтрондық жұлдыздардың жұмсақ мантиясы және қатты ядросы болуы мүмкін, ал «ауыр» нейтрондық жұлдыздар, керісінше, қатты мантияға және жұмсақ өзектің әртүрлі түрлеріндегі сияқты, деп жазған болатын. Жұмыстың нәтижелері *The Astrophysical Journal Letters* журналында жарияланған [16].

Нейтрондық жұлдыздардың ішіндегі экстремалды жағдайлардың үлгісін жасау ең қиын нәрсе, өйткені оларды Жердегі зертханада қайта құру қиын. Сондықтан жұлдыз материясының күй теңдеулері арқылы әртүрлі қасиеттер - тығыздықтан температураға дейін сипатталатын көптеген модельдер бар. Бұл жұмыста ғалымдар бір жағынан теориялық ядролық физикадан алынған деректермен, екінші жағынан астрономиялық бақылаулардан алынған шектеулерді қанағаттандыратын әртүрлі күй теңдеулерін жасады. Бұл теңдеулерде дыбыс жылдамдығы шешуші рөл атқарды. Бұл өлшем дыбыс толқындарының нысанның ішінде қаншалықты жылдам таралатынын сипаттайды және заттың қаншалықты қатты немесе жұмсақ болуына байланысты. Жер бетінде дыбыс жылдамдығын пайдалана отырып, олар планетаның ішін зерттеп, кен орындарын іздейді.

Күй теңдеулерін бағалау кезінде жұмыс тобы күтпеген жаңалық жасады: «жеңіл» нейтрондық жұлдыздар (массалары шамамен 1,7 Күн массасы бар) жұмсақ мантия мен қатты ядроға ие болып көрінеді, ал «ауыр» нейтрондық жұлдыздар (массалары бар) 1,7 Күн массасынан аз) - қатты мантия және жұмсақ ядро.

Жұмыс авторлары бұл заттарды шоколадтармен салыстырады (2-суретті қараңыз): «жеңіл» заттардың ортасында жұмсақ шоколадпен қоршалған фундук, ал «ауыр» заттардың қатты қабаттың ішінде жұмсақ салмасы бар [16].

Физиктер нейтрондық жұлдыздардың бұрын түсіндірілмеген басқа да қасиеттерін аша алды. Зерттеу нәтижелері нейтрондық жұлдыздардың ішіндегі заттың нақты құрылымы мен құрамын ашпайды, бірақ нейтрондық жұлдыздардың центрінің сығылу мүмкіндігінің тікелей өлшемін береді. Сонымен қатар, ашылу қос жүйелердегі нейтрондық жұлдыздардың деформациялану қабілетіне, яғни екі нейтрондық жұлдыздың гравитациялық өрістерімен бір-бірін қаншалықты бұрмалай алатынына жаңа шектеулер қояды. (Ақпарат Ғылыми Ресей порталынан алынды (<https://scientificrussia.ru>)).



Сурет 2. «Жеңіл» және «ауыр» нейтрондық жұлдыздардың иллюстрациясы
(PETER KIEFER & LUCIANO REZZOLLA) [16]

Жаңа ғылыми жұмыста авторлар теориялық ядролық физикамен де, астрофизикалық бақылаулармен де қойылған шектеулерді қанағаттандыратын 1,7 миллионнан астам әртүрлі күй теңдеулерін құрастырды. Бұл дыбыс жылдамдығының ықтималдық тығыздығының функциясын шығаруға және барлық шектеулерді ескере отырып, нейтрондық жұлдыздардың ішкі бөлігіндегі дыбыс жылдамдығын өзгерту жағдайларының қайсысы ең орынды екенін анықтауға мүмкіндік берді. Барлығы 10 миллионнан астам жұлдыздық модельдер талданды. Нейтрондық жұлдыздардың тереңдігіндегі дыбыс жылдамдығы, ең алдымен, үздіксіз өзгертіні және оның ішіндегі бір жерде жарық жылдамдығына әлдеқайда жақын екендігі анықталды. Біріншіден, тығыздықтар $n < 0,5 n_0$ үшін біз Beim-Petik-Satherland (BPS) моделінің кестелік нұсқасын қолданамыз. Екіншіден, $0,5 n_0 < n < 1,1 n_0$ диапазонында біз $p(n) = K n^\Gamma$ түріндегі монотроптарды тұрғызамыз, мұнда K BPS SS сәйкестендіру және біркелкі $\Gamma \in [20]$ сынама алу арқылы бекітіледі. Қысым жұмсақ және қатты болады EOS Hebeler et al. (2013). Үшіншіден, $1,1 n_0 < n \lesssim 40 n_0$ аралығында біз Annala және т.б. ұсынған параметрлеу әдісін қолданамыз (2020), ол термодинамикалық шамаларды құрудың бастапқы нүктесі ретінде μ химиялық потенциалының функциясы ретінде дыбыс жылдамдығын пайдаланады. Сонымен, санның тығыздығын былай көрсетуге болады

$$n(\mu) = n_1 \exp \left(\int_{\mu_1}^{\mu} \frac{d\mu'}{\mu' c_s^2(\mu')} \right) \quad (1)$$

мұндағы $n_1 = 1,1 n_0$ және $\mu_1 = \mu(n_1)$ монотроптың сәйкес химиялық потенциалымен бекітілген. (1) интегралдық теңдеу қысымды береді

$$c_s^2(\mu) = \frac{(\mu_{i+1} - \mu) c_{s,i}^2 + (\mu - \mu_i) c_{s,i+1}^2}{\mu_{i+1} - \mu_i} \quad (2)$$

мұндағы μ_i және μ және c_s^2 $\mu_i \leq \mu \leq \mu_i + 1$ диапазонындағы i -ші сегменттің параметрлері. $c_{s,i}^2$ және μ_1 мәндері монотропшен бекітілген [17].

Процедураның соңғы қадамы ретінде біз қысымы, тығыздығы және $\mu N + 1 = 2,6$ ГэВ кезіндегі дыбыс жылдамдығы бета тепе-теңдіктегі суық кварк материясы үшін параметрленген пертурбациялық QCD нәтижесіне сәйкес келетін шешімдерді сақтаймыз.

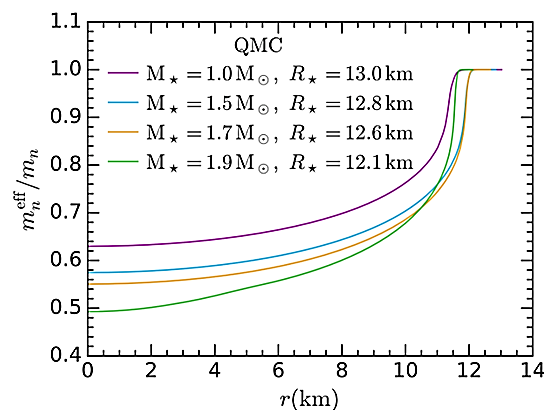
Андрей Фельдман нейтрондық жұлдыздардың қараңғы зат детекторлары ретінде қарастырды [12]. Австралия мен Германиядан келген теориялық физиктер нейтрондық жұлдыздардың гипотетикалық қараңғы материя бөлшектерін басып алу қарқындылығы бұрын болжанғаннан төмен дәрежеде болуы мүмкін деген қорытындыға келді. Ғалымдар нейтронның күңгірт материяның бөлшектерімен әрекеттесетіндіктен оның күрделі ішкі құрылымын ескеретін, сондай-ақ нейтрондардың бір-бірімен әрекеттесуін назардан тыс қалдырмайтын дәлірек теорияны қолданды. Зерттеу Physical Review Letters (2022) журналында жарияланған.

Галактикалардағы жұлдыздардың қозғалысын көптеген астрономиялық бақылаулар қараңғы материяның бар екенін көрсетеді, бірақ жердегі эксперименттерде осы материяны құрайтын элементар бөлшектерді тіркеу әрекеттерінің барлығы әлі сәтті болмай шықты. Бұл ғалымдарды қара материяның аспан денелерімен әрекеттесу нәтижелерін зерттеу керек деген ойға әкелді, олар соншалықты көп бөлшектерден тұрады және соншалықты ұзақ уақыт бойы олардың қараңғы зат бөлшектерімен өзара әрекеттесуінің көптеген актілері орын алуы керек еді. Алдымен қара материяның Күнмен ықтимал әрекеттесуінің салдарын зерттеу ұсынылды, бірақ содан кейін нейтрондық жұлдыздар олардың үлкен тығыздығына байланысты одан да жақсы детекторлар бола алады деген идея алға тартылды.

Егер олар жұлдыздың ішінде жиналып, импульсін нейтрондарға ауыстыратын болса, онда уақыт өте келе бұл нейтрондық жұлдыздың массасының айтарлықтай ұлғаюына әкеліп соғуы керек, ол қара құрдымға құлап кетеді. Егер бөлшектер жойылып, барлық энергиясын нейтрондық жұлдыздың затына аударса, онда ол қызады. Ғалымдардың пайымдауынша, инфрақызыл телескоптардың келесі жаңғыруымен бұл қызу байқалуы мүмкін. Қараңғы материя бөлшектерінің нейтрондық жұлдызбен әрекеттесуін есептегенде, әдетте олардың жұлдыздармен және планеталармен әрекеттесуіндегідей жуықтаулар қолданылады.

Мельбурн университетінен Николь Ф. Белл, Сандра Роблес және Майкл Виргато, Макс Планк ядролық физика институтынан Джорджио Бусони, Тео Ф. Мотта (Тео Ф. Мотта) және Энтони В. Томас (Тео Ф. Мотта) бар теориялық физиктер тобы. Аделаида университетінен Энтони В. Томас) қараңғы материя бөлшектерінің нейтрондық жұлдызбен әрекеттесуінің егжей-тегжейлі есебін жүргізді, онда мұндай жеңілдетулер жасалмаған және дәлірек нәтиже жақыннан өте ерекшеленетіні анықталды.

Нейтрондардың бір-бірімен әрекеттесуін қосу нейтрондық массаны тиімді массамен ауыстыруға дейін төмендетілді, ол тереңдікке қарай өзгертін нейтрондық жұлдыздың тығыздығына байланысты (3-суретті қараңыз).



Сурет 3. Нейтрондық жұлдыздағы нейтрондардың эффективті массасының нейтрондық жұлдыздың әртүрлі массалары үшін олардың радиалды координатасына тәуелділігі [12]

Бұл әсердің қараңғы материяның жұлдызмен өзара әрекеттесу қарқындылығына әсері, егер қараңғы материя бөлшектерінің массасы нейтрондық массадан айтарлықтай асып кетсе, ең күшті болып шықты. Бұл жағдайда өзара әрекеттесу қарқындылығы шамамен 10 есе төмендейді.

Nicole F. Bell және т.б., «Нейтрондық жұлдыздардағы қараңғы материядағы нуклон құрылымы және күшті өзара әрекеттесу», «Физикалық шолу хаттары» (2021) мәліметтері бойынша, нейтрондық жұлдыз, қараңғы материя детекторлары ретінде пайдалану ұсынылатын басқа ғарыштық нысандардан айырмашылығы, жұлдызға түсетін қараңғы материя бөлшектерін жарық жылдамдығымен салыстырылатын жылдамдыққа дейін үдететін өте күшті гравитациялық өріс нейтрондық жұлдызды жасайды. Теоретиктердің есебі көрсеткендей, Егер қараңғы зат бөлшектерінің массасы аз болса (протон массасының 20 пайызынан аз), онда нейтронның нүктелік емес табиғаты әрекеттесу қарқындылығына әсер еткен жоқ. Екі әсерді де есепке алу ауыр қараңғы зат бөлшектерінің нейтрондармен әрекеттесу қарқындылығының (демек, осы бөлшектердің жұлдызмен өзара әрекеттесулерінің санының) шамамен үш есеге төмендеуіне әкелді. Жеңіл бөлшектер үшін, алайда, есептеулердің нәтижелері шамамен алынғандармен өте жақсы сәйкес келді.

Отандық ғалымдардың нейтрондық жұлдыздар физикасы саласындағы зерттеулерінің де өзіндік ерекшеліктері бар. Атай кетсек, профессор Такибаев Нурғали Жабағаевич жетекшілік ететін зерттеушілер тобының жұмысы нейтрондық жұлдыздардың аса тығыз затында қозғалған және аса қозған ядролардың түзілуін теориялық сипаттаумен байланыстырды. Бұл өз кезегінде аса тығыз кристалдың фондық тербелістеріне әкеледі және нейтрондық жұлдыздардың сәулеленуінің (жұлдыз сілкінісінің) модуляциясын түсіндіре алады [18].

Қорытынды

Қорытындылайтын болсақ, астрофизика - нейтрондық жұлдыздардың өзекті мәселесіне арналған ғылыми мақалаларды талдау осы қызықты астрономиялық объектілердің құрылымы мен сәулеленуінің құпияларын шешу әлі де аяқталмаған деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Мәселе жердегі зертханаларда нейтрондық жұлдыздарға тән экстремалды жағдайларды жасаудың қиындығында жатыр. Ал, нәтижесінде эксперименттік зерттеулер мен теориялық болжамдарды салыстыру мүмкін емес. Осы ықшам нысандардың ішкі бөлігіндегі қызықты және сонымен бірге жұмбақ құбылыстарды түрлі модельдер негізінде түсіндіруге талпыныс жасалуда. Болашақта нейтрондық жұлдыздардың азғындалған материясындағы нейтрондардың резонанстық күйлеріне негізделген [17] ғылыми жұмыста авторлар ұсынған модельді ары қарай дамыту ұсынылады. Бұл өз кезегінде жұлдыздарда болатын әртүрлі үдерістерге әкелуі мүмкін, мысалы, жұлдыздардағы синтез реакциялары мен термоядролық реакцияларды қоздырады.

Пайдаланылған әдебиеттер

[1] Bally, John; Reipurth, Bo. (2018) *The Birth of Stars and Planets*. Cambridge University Press, 207-208. ISBN 978-0-521-80105-8.

[2] Трунин Д. *Астрофизики уточнили предельную массу нейтронных звезд* // *Astrophysical Journal Letters*, 2018, № 4, с.17 - 19.

[3] Quaintrell H. (2018) *The mass of the neutron star in Vela X-1 and tidally induced non-radial oscillations in GP Vel* // *Astronomy and Astrophysics*. EDP Sciences, 313—323.

[4] Demorest P. B., Pennucci T., Ransom S. M., Roberts M. S. E. & Hessels J. W. T. (2018) *A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay* // 1081—1083.

[5] *National Radio Astronomy Observatory (2010) «Astronomers discover most massive neutron star yet known; Discovery has broad implications for astrophysics, nuclear physics»*. 41 - 44.

[6] M. Angeles Perez-Garcia, Joseph Silk, Jirina R. Stone. (2010) *Dark Matter, Neutron Stars, and Strange Quark Matter* // *Physical Review Letters*, V. 105. 141101—04.

- [7] Офенгейм Д., Штернин П., Пиран Ц. Нейтронные звезды с максимальной массой – ключ к физике сверхплотного вещества. // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. 2023. Том 49, с.1-4. №1 <https://doi.org/10.31857/S0320010823100054>
- [8] Порожков С.Ю. Вклад нейтронных звезд в скрытую массу // Журнал естественнонаучных исследований, 2022, с. 45-57.
- [9] T. M. Belloni et al. (eds.), *Timing Neutron Stars: Pulsations, Oscillations and Explosions*, *Astrophysics and Space // Science Library* 461, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62110-3>
- [10] Antonios Tsokaros, Milton Ruiz, Lunan Sun, Stuart L. Shapiro (2019) *Dynamically stable ergostars exist!*
- [11] Valery Suleimanov, Gerd Pühlhofer & Andrea Santangelo. (2022) *The lightest neutron star ever discovered intrigues scientists // Nature Astronomy volume 6, 1444–1451*
- [12] Фабиан Г. Нейтронные звезды оказались гладкими сферами, из-за этого их тяжелее отследить // Наука, 2021, №8, с. 14-17
- [13] Бескин В.С., Истомин Я. Н., Филиппов А. А. Радиопульсары. // Успехи физических наук. 2013. Том 183, №-10. с 179—194. <https://doi:10.3367/UFNr.0183.201302e.0179>
- [14] Юдин А.В., Разинкова Т.Л. Блинников С.И. Маломассивные нейтронные звезды с вращением. // Письма в астрономический журнал, Институт космических исследований РАН, Российская академия наук, Отделение физических наук. 2019, с. 893-901 <https://doi:10.1134/S0320010819120076>
- [15] Скрыннико А. Уникальный сигнал: как учёные исследуют нейтронные звёзды с помощью гравитационных волн // *Nature Communications*, 2020
- [16] Christian Ecker & Luciano Rezzolla (2022) *A general, scale-independent description of the sound speed in neutron stars // The Astrophysical Journal Letters* <https://doi:10.3847/2041-8213/ac8674>
- [17] N.Takibayev, D.Nasirova, K.Kato, V.Kurmangaliyeva. *Excited nuclei, resonances and reactions in neutron star crusts. Nuclear Physics in Astrophysics Conference (NPA VII) IOP Publishing. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series Vol. 940 (2018) 012058* <https://doi:10.1088/1742-6596/940/1/012058>
- [18] Sinan Altiparmak, Christian Ecker, and Luciano Rezzolla (2022) *On the Sound Speed in Neutron Stars // American Astronomical Society.* <https://doi:10.3847/2041-8213/ac9b2a>

References

- [1] Bally, John; Reipurth, Bo. (2018) *The Birth of Stars and Planets. Cambridge University Press, 207-208. ISBN 978-0-521-80105-8.*
- [2] Trunin D (2018) *Astrofiziki utocnili predel'nuju massu nejtronnyh zvezd [Astrophysicists have clarified the mass limit of neutron stars]. Astrophysical Journal Letters, № 4, 17-19. (In Russian)*
- [3] Quaintrell H. (2018) *The mass of the neutron star in Vela X-1 and tidally induced non-radial oscillations in GP Vel // Astronomy and Astrophysics. EDP Sciences, 313 – 323.*
- [4] Demorest P. B., Pennucci T., Ransom S. M., Roberts M. S. E. & Hessels J. W. T. (2018) *A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay // 1081—1083.*
- [5] National Radio Astronomy Observatory (2010) «*Astronomers discover most massive neutron star yet known; Discovery has broad implications for astrophysics, nuclear physics*». 41 - 44.
- [6] M. Angeles Perez-Garcia, Joseph Silk, Jirina R. Stone. (2010) *Dark Matter, Neutron Stars, and Strange Quark Matter Physical Review Letters, V. 105. 141101–04.*
- [7] Ofengejm D., Shternin P., Piran C. (2023) *Nejtronnye zvezdy s maksimal'noj massoj – ključ k fizike sverhplotnogo veshhestva [Neutron stars with maximum mass are key to the physics of superdense matter] Pis'ma v Astronomicheskij zhurnal: Astronomija i kosmicheskaja astrofizika. Tom 49, 1-4. (In Russian) https://doi.org/10.31857/S0320010823100054*
- [8] Porojkov S.Ju. (2022) *Vklad nejtronnyh zvezd v skrytiju massu [Contribution of neutron stars to the latent mass] Zhurnal estestvennonauchnyh issledovanij, 45-57. (In Russian)*
- [9] T. M. Belloni et al. (eds.), *Timing Neutron Stars: Pulsations, Oscillations and Explosions*, *Astrophysics and Space Science Library* 461, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62110-3>
- [10] Antonios Tsokaros, Milton Ruiz, Lunan Sun, Stuart L. Shapiro (2019) *Dynamically stable ergostars exist!*
- [11] Valery Suleimanov, Gerd Pühlhofer & Andrea Santangelo (2022) *The lightest neutron star ever discovered intrigues scientists // Nature Astronomy volume 6, 1444–1451*
- [12] Fabian G. (2021) *Nejtronnye zvezdy okazalis' gladkimi sferami, iz-za jetogo ih tjazhelee otsledit' [Neutron stars turned out to be smooth spheres, making them harder to trace] Nauka, №8, 14-17. (In Russian)*

[13] Beskin V. S., Istomin Ja. N., Filippov A. A. (2013) Radiopul'sary [Radio pulsars]. *Uspehi fizicheskikh nauk*. Tom 183, №-10. 179—194. <https://doi:10.3367/UFNr.0183.201302e.0179>

[14] Judin A.V., Razinkova T.L. Blinnikov S.I. (2019) Malomassivnye nejtronnye zvezdy s vrashheniem [Small-mass neutron stars with rotation] *Pis'ma v astronomicheskij zhurnal, Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, Rossijskaja akademija nauk, Otdelenie fizicheskikh nauk*. T. 45, № 12, 893-901. <https://doi:10.1134/S0320010819120076>

[15] Skrynniko A. (2020) Unikal'nyj signal: kak uchjonye issledujut nejtronnye zvjozdy s pomoshh'ju gravitacionnyh voln [A unique signal: how scientists study neutron stars using gravitational waves] // *Nature Communications (In Russian)*

[16] Christian Ecker & Luciano Rezzolla (2022) A general, scale-independent description of the sound speed in neutron stars // *The Astrophysical Journal Letters* <https://doi:10.3847/2041-8213/ac8674>

[17] N.Takibayev, D.Nasirova, K.Kato, V.Kurmangaliyeva. Excited nuclei, resonances and reactions in neutron star crusts. *Nuclear Physics in Astrophysics Conference (NPA VII) IOP Publishing, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series Vol. 940 (2018) 012058* <https://doi:10.1088/1742-6596/940/1/012058>

[18] Sinan Altiparmak, Christian Ecker, and Luciano Rezzolla (2022) *On the Sound Speed in Neutron Stars* American Astronomical Society. <https://doi:10.3847/2041-8213/ac9b2a>