

Дәріс 8.

Нейтронды жұлдыздар

Дәрістің мақсаты - нейтронды жұлдыздардың құрылымын, ерекше сипаттамаларын және ғарыштық құбылыстарға әсерін қарастыру.

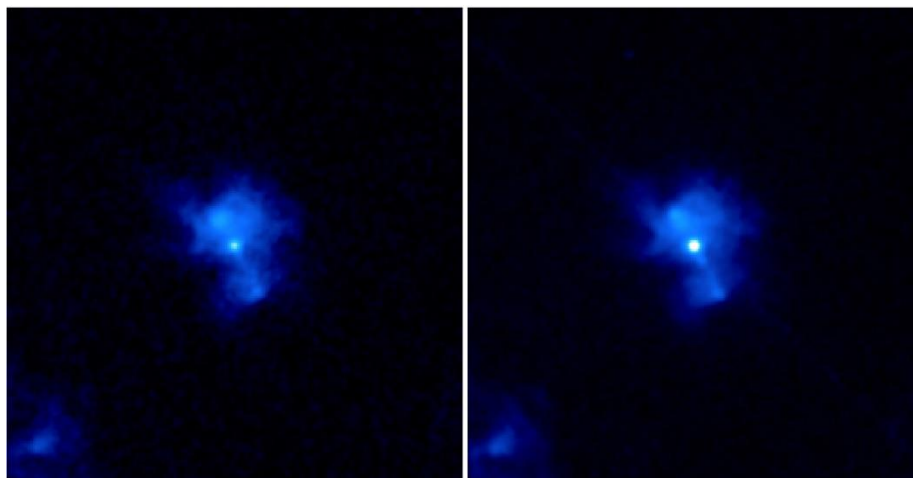
Дәрістің жоспары:

1. Кіріспе. Нейтронды жұлдыздың анықтамасы және жалпы сипаттамалары.
2. Нейтронды жұлдыздарды бақылау және зерттеу.
3. Нейтронды жұлдыздың құрылымы.
4. Нейтронды жұлдыздардың күй теңдеуі.
5. Қос жүйедегі нейтрондық жұлдыздар.

Кіріспе. Нейтронды жұлдыздың анықтамасы және жалпы сипаттамалары.

Шағын жұлдызды нысандардың астрофизикасы – қазіргі ғылымның қарқынды дамып келе жатқан саласы. Қазіргі уақытта жаңа астрофизикалық бақылаулар анықталып жатыр, бұрын зерттелмеген жаңа астрофизикалық нысандар ашылуда. Заманауи астрофизикада шағын жұлдызды нысандар ерекше қызығушылық тудырады, сонымен қатар, оларды зерттеу қазіргі физиканың басқа салаларына да әсер етеді [1-3].

Нейтронды жұлдыздар – бұл негізінен нейтрондардан тұратын жұлдыздар эволюциясының нәтижесі болып табылатын, гидростатикалық тепе-теңдіктегі жұлдыздар, олар негізінен нейтрондардан тұрады. Нейтронды жұлдыздардың көпшілігі Күн массасының 1,3-тен 1,5-ке дейінгі аралығында болады (Сурет-1) [2]. Нейтронды жұлдыздарда іргелі өзара әрекеттесудің барлық төрт түрі жүреді. Үлкен массасына қарамастан, нейтронды жұлдыздардың өлшемі өте кішкентай, диаметрі бірнеше шақырым ғана. Сондықтан, оларды әлемдегі ең тығыз объектілердің бірі болып табылады.



Сурет-1. Нейтронды жұлдыз.

Нейтронды жұлдыздардың ерекше қасиеті - аса жоғары тығыздығы, шамамен $\rho_0 \approx 2.8 \cdot 10^{14} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Алайда, атом ядросынан айырмашылығы, ондағы нуклондар кварктар арасындағы күшті өзара әрекеттесу арқылы ұсталып тұрады, ал нейтронды жұлдызда гравитациялық күшпен ұсталады. Нейтронды жұлдыздардың құрамындағы нейтрондар β -ыдырауының тығыздығы жоғары болғандықтан ыдырамайды [3].

Нейтронды жұлдыздарды бақылау және зерттеу.

Нейтронды жұлдыздардың бар болуы туралы болжамды 1934 жылы Вальтер Бааде мен Фриц Цвикки ұсынған. Олар гравитациялық байланысы қарапайым жұлдыздарға қарағанда күшті болатын, өте жоғары тығыздығы мен радиусы кіші объектілер бар деп тұжырымдады. Сондай-ақ, ғалымдар нейтронды жұлдыздар аса жаңа жұлдыздардың жарылысы кезіндегі қалдықтарынан түзіледі деген болжам ұсынды. Нейтронды жұлдыз модельдерінің алғашқы есептеулерін Оппенгеймер мен Волков жасады, олар нейтронды жұлдыздар – тығыздығы жоғары бос нейтрондардың идеал газынан тұруы керек деп есептеді [2].

1967 жылы "Uhuru" рентгендік спутнигімен тіркелген радио пульсарларды Томас Голд айналмалы нейтронды жұлдыздар деп болжады және қазір бұл тұжырым жалпы қабылданған болып саналады.

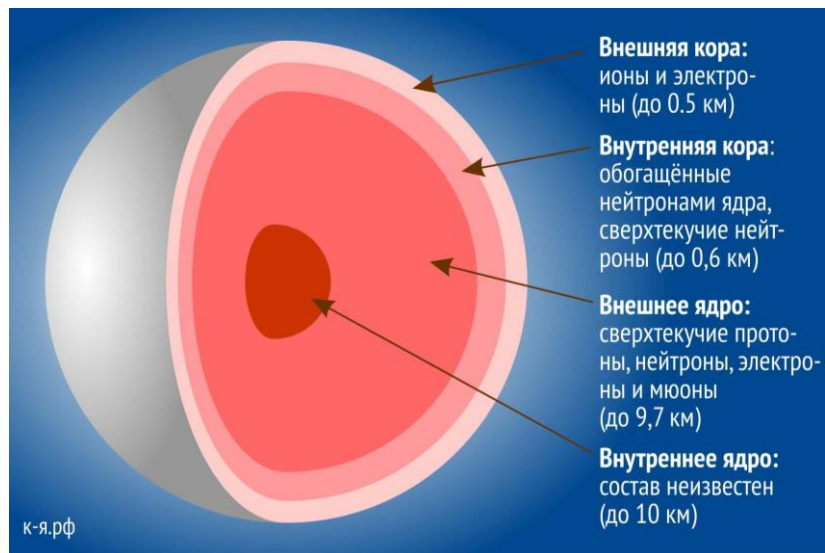
1968 жылы Vela шоқжұлдызындағы пульсарлардың ашылуы нейтрондық жұлдыздардың аса жаңа жұлдыздардың жарылуынан пайда болатындығының дәлелі болды. Сонымен қатар, қос жүйелерге кіретін рентген көздерінің оптикалық және рентгендік бақылаулары нейтрондық жұлдыздардың массаларын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік берді. Қазіргі таңда 2500-ден астам нейтронды жұлдыз анықталған. Солардың ішіндегі белгілі ең үлкен нейтронды жұлдыздар Vela X-1 ($M = 1,88 \pm 0,13 M_c$), PSR J1614-2230 ($M = 1,97 \pm 0,04 M_c$), PSR J0348+0432 ($M = 2,01 \pm 0,04 M_c$) және 2019 жылы ашылған PSR J0740+6620 ($M = 2,14 \pm 0,2 M_c$) [2].

Нейтронды жұлдыздың құрылымы.

Әдеттегі нейтронды жұлдызда екі негізгі аймақты қарастыруға болады: ядро және қабық. Өз кезегінде ядро сыртқы және ішкі болып бөлінеді, ал қабығы қатты және сұйық деп ажыратылады (Сурет-2). Қабықтың вакууммен шекарасында газ тәрізді плазмалық атмосфера, ал қыртыстың ядромен шекарасында сұйық кристалды мантия болады деп болжанған [1].

Нейтронды жұлдыздың сыртқы ядросы әдетте қалыңдығы бірнеше шақырымға және $0.5\rho_0 \lesssim \rho_0 \lesssim 2\rho_0$ диапазонындағы заттың тығыздығына ие. Әдеттегі нейтрондық жұлдыз массасының үлкен үлесін құрайтын сыртқы ядро заты – асқын өткізгіш протон компоненті, сондай-ақ электрондар мен мюондар араласқан асқын сұйық нейтронды сұйықтық [2].

Ішкі ядро радиусы $\rho_0 \gtrsim 2\rho_0$ -дан бастап бірнеше шақырымға жететін орталық аймақты алады [3]. Нейтронды жұлдыздың ішкі ядросындағы заттың құрамы мен қасиеттері белгісіз, өйткені оларды есептеу нәтижесі бірнеше іргелі өзара әрекеттесудің теориялық сипаттамасына байланысты. Сондықтан нейтронды жұлдыздарды зерттеу астрофизика үшін ғана емес, ядролық және элементар бөлшектер физикасы үшін де маңызды.



Сурет-2. Нейтронды жұлдыздың құрылымы.

Нейтронды жұлдыздың сыртқы қыртысының қалыңдығы бірнеше жүздеген метрге дейін жетеді және толық иондалған электрон-ионды плазмадан тұрады. Қысым толығымен электронды құраушымен анықталады, $\rho \gtrsim 10^6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ кезінде электрондар релятивистік сипатқа ие болады [2].

Нейтронды жұлдыздың шекаралық қабаты – газ тәрізді плазмалық атмосфера болып табылады. Атмосферада термиялық электромагниттік сәулелену спектрі қалыптасады, онда эффективті температурасы, гравитациялық үдеу, химиялық құрамы, магнит өрісі және жұлдыздың массасы мен радиусы туралы құнды ақпараттар бар. Атмосфераның геометриялық қалыңдығы жеткілікті суық нейтронды жұлдыздарда бірнеше миллиметрден (эффективті температурасы $T_{eff} \sim 10^{5.5} \text{ К}$) салыстырмалы түрде ыстық жұлдыздарда ондаған сантиметрге дейін ($T_{eff} \sim 10^{6.5} \text{ К}$) болады [2]. Өте төмен тиімді температурасы бар жұлдыздардың қатты немесе сұйық конденсацияланған беті болуы мүмкін.

Нейтронды жұлдыздардың күй теңдеуі.

Басқа жұлдыздарға қарағанда, нейтронды жұлдыздар үшін, жалпы салыстырмалылық теориясының әсері үлкен рөл атқарады. Айналмайтын жұлдыздардың құрылымы сфералық симметриялы дененің гидростатикалық тепе-теңдігінің релятивистік Толман-Оппенгеймер-Волков (ТОВ) теңдеуімен анықталады. Бұл теңдеу барлық айналатын нейтрондық жұлдыздар үшін дәл жуықтау береді, егер бұл жеткіліксіз болса, айналу әсерлерін ұйытқу теориясы бойынша қарастыруға болады. Мүмкін болатын ең кіші айналу периоды $\sim 0.5 \text{ мс}$, бірақ бүгінгі күні байқалған ең кіші период шамамен үш есе, 1.396 мс -ке тең. Нейтронды жұлдыздың берілген күй теңдеуі үшін ТОВ теңдеуін шешу жұлдыз құрылымының модельдер тобын береді, оның параметрі жұлдыздың ортасындағы ρ_c тығыздығы болып табылады. $M(\rho_c)$ функциясының өсуін талап ететін орнықтылық шарты күй теңдеуімен анықталған массалар мен радиустардың белгілі бір интервалында орындалады. Қазіргі заманғы теория

қабылдаған жұлдыз массасының жоғарғы шегі $M_{max} \in [1.5M_{\odot}; 2.5M_{\odot}]$, төменгі шегі $M_{min} \approx 0.1M_{\odot}$ [1-3].

В. Л. Гинсбургтің 1971 жылғы шолуында нейтронды жұлдыздардың магниттік өрістері $B \sim 10^{12}$ Гс болуы керек екендігі атап өтілді, бұл әдеттегі ақ ергежейлілердің өрісінен алты есе асып түседі, бірақ нейтронды жұлдыздың ірімасштабты құрылымына айтарлықтай әсер ету үшін кем дегенде $B \sim 10^{16}$ Гс үлкен өрістер қажет [2]. Осылайша, магнит өрістері тек қабықтардағы процестерге айтарлықтай әсер етуі мүмкін.

Көп жағдайда нейтронды жұлдыздар массасы 8-10 Күн массасынан асатын массивтік жұлдыздардың ядроларының коллапсынан пайда болады. Үлкен жұлдыздың ядросының коллапсы асажаңаның жарқылымен бірге жүреді. Бұл жағдайда босатылған энергия нейтрондық жұлдыздың гравитациялық байланыс энергиясымен сәйкес келеді:

$$\Delta E_g \approx \frac{GM_{NS}^2}{R_{NS}} \sim 0.1M_{NS}c^2 \approx a_1 \frac{M_{NS}}{M_{\odot}}, \quad (1)$$

мұндағы $a_1 = 10^{53}$ эрг.

Бақылаулардан нейтронды жұлдыздардың өте күшті магнит өрісі бар екендігі шығады. Магнит өрісінің плазмаға "қатып қалуына" байланысты зат сығылған кезде магнит өрісінің ағыны сақталады және оның тығыздығы сәйкесінше артады. Заттың қысылуындағы магнит өрісінің ағыны формула бойынша есептеледі:

$$\Phi \approx BR^2 = const. \quad (2)$$

Осылайша күн типіндегі жұлдыз орташа $B_0 \sim 1$ Гс кернеумен, радиусы 10 км нейтронды жұлдыздың мөлшеріне дейін сығылғанда $B_{NS} \sim 5 \cdot 10^{11}$ Гс болады. Мұндай мәндер радио пульсарларды бақылаумен расталады [2].

Қос жүйедегі нейтронды жұлдыздар.

Көптеген нейтронды жұлдыздар басқа нейтронды жұлдыздармен, ақ ергежейлілермен және қарапайым жұлдыздармен қос жүйелердің құрамына кіреді. Қос жүйенің орбиталық параметрлерін өлшеу нейтрондық жұлдыздың массасы туралы қосымша ақпарат алуға мүмкіндік береді. Рентгендік қос жүйе периодты және периодтық емес сәулелену көздері болуы мүмкін, сонымен қатар тұрақты және тұрақты емес көздерге бөлінеді. Рентгендік қос жүйелердің арасында рентгендік пульсарлар бар, оларда сәулелену нейтронды жұлдыздың, барстераның айналуымен модуляцияланады, олардың бетінде жарылғыш термоядролық жану пайда болады, квази-периодты тербеліс көздері және т.б. бар, олар нейтронды жұлдыздың айналуымен модуляцияланады.

Құрамында квазипериодтық осцилляциялары бар рентгендік қос жүйелер 1985 жылы анықталған. Бұл тербелістердің табиғаты туралы әртүрлі гипотезалар айтылды. Ұсынылған тұжырымдарға сәйкес, осцилляция заттың аккрециялық дискісінде пайда болады. Олар ЖСТ рұқсат ететін ең төменгі тұрақты орбитаның кептелік жиілігімен немесе дискінің өзінде резонанстың

қандай да бір түрімен немесе объектінің айналу жиілігінің осы жиіліктердің қосындысымен анықталуы мүмкін.

Тығыз қос жүйелерде күшті магнит өрісі бар заттың ағыны кезінде рентгендік пульсар құбылысы байқалады. Егер магнит өрісі ондай үлкен шамада болмаса, 10^{10} Гс-тан аз болса, онда зат бетінде жиналып, термоядролық жарылыс болуы мүмкін. Бұл жарылыстар тұрақты рентгендік барстер түрінде байқалады [2,3].

Әдебиеттер тізімі:

1. Шапиро С. Л., Тьюколски С. А. Чёрные дыры, белые карлики и нейтронные звёзды / Пер. с англ. под ред. Я. А. Смородинского. — М.: Мир, 1985.-Т.1-2. - 656 с.
2. А. Ю. Потехин, “Физика нейтронных звезд”, УФН, 180:12 (2010), 1279–1304; Phys. Usp., 53:12 (2010), 1235–1256
3. Oppenheimer J.R., Volkoff G.M. On Massive Neutron Cores. Phys. Rev.,55,374,1939