

Нейтрондық жұлдыздар

Дәрістің мақсаты: нейтрондық жұлдыздардың ішінде және оның айналасында қандай процестер мен физикалық құбылыстардың болатынын, оларды зерттеуде қандай әдістер мен құралдардың қолданылатыны туралы терең түсінік алу.

Дәрістің жоспары:

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

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].

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

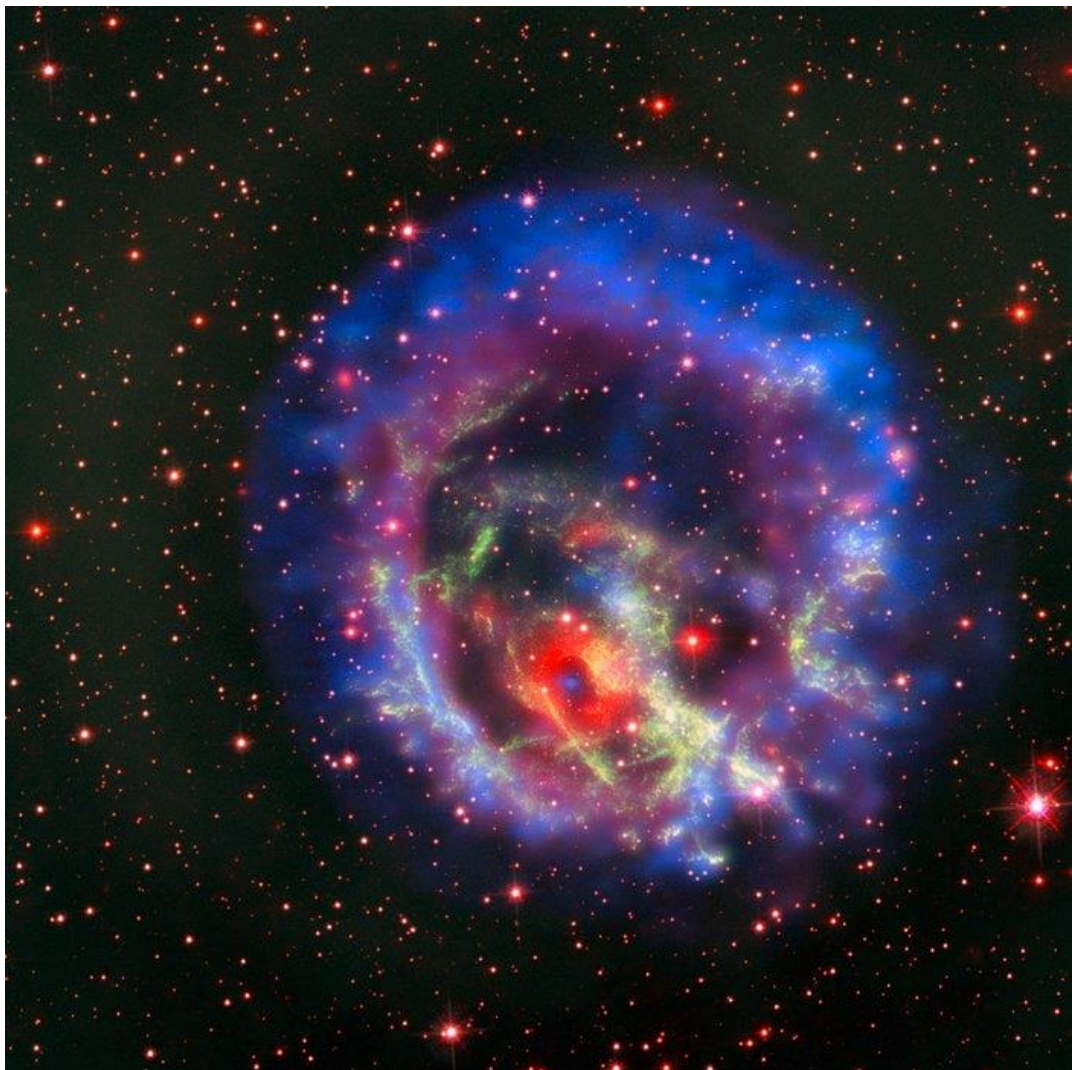
Нейтрондық жұлдыздардың ерекше қасиеті - аса жоғары тығыздығы, шамамен $\rho_0 \approx 2.8 \cdot 10^{14} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Алайда, атом ядросынан айырмашылығы, ондағы нуклондар кварктар арасындағы күшті өзара әрекеттесу арқылы ұсталып тұрады, ал нейтрондық жұлдызда гравитациялық күшпен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

Нейтрондық жұлдыздарды бақылау және зерттеу

Нейтрондық 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 нейтрондық жұлдыздар аса жаңа жұлдыздардың жарылысы кезіндегі қалдықтарынан түзіледі деген болжам ұсынды. Нейтрондық жұлдыз модельдерінің алғашқы есептеулерін Оппенгеймер мен Волков жасады, олар нейтрондық жұлдыздар – тығыздығы жоғары бос нейтрондардың идеал газынан тұруы керек деп есептеді [2].

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

1968 жылы Vela шоқжұлдызындағы пульсарлардың ашылуы нейтрондық жұлдыздардың асажаңа 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 нейтрондық жұлдыз анықталған. Солардың ішіндегі белгілі ең үлкен нейтрондық жұлдыздар Vela X-1 ($M = 1,88 \pm 0,13M_{\odot}$), PSR J1614-2230 ($M = 1,97 \pm 0,04M_{\odot}$), PSR J0348+0432 ($M = 2,01 \pm 0,04 M_{\odot}$) және 2019 жылы ашылған PSR J0740+6620 ($M = 2,14 \pm 0,2M_{\odot}$) [2].



1-сурет. Кіші Магеллан бұлтында оқшауланған нейтрондық жұлдыз [4]

Нейтрондық жұлдыздың құрылымы

Әдеттегі нейтрондық жұлдызда екі негізгі аймақты қарастыруға болады: ядро және қабық. Өз кезегінде ядро сыртқы және ішкі болып бөлінеді, ал қабығы қатты және сұйық деп ажыратылады. Қабықтың вакууммен

шекарасында газ тәрізді плазмалық атмосфера, ал қыртыстың ядромен шекарасында сұйық кристалды мантия болады деп болжанған.

Нейтрондық 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 нейтрондық сұйықтық [2].

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

Нейтрондық 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].

Нейтрондық 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 нейтрондық 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.

Нейтрондық жұлдыздың массасын Күндікімен салыстыруға болады, бірақ оның радиусы небәрі 10 км (6 миль) болғандықтан, орташа тығыздығы судан 1 квадриллион есе артық. Осындай аз көлемдегі мұндай үлкен масса қарқынды тартылыс күшін тудырады: нейтрондық жұлдыздың бетінде заттардың салмағы Жер бетіндегіден 100 миллиард есе артық. Қарқынды гравитациялық өріс жұлдыз шығаратын жарыққа және басқа электромагниттік сәулеленуге әсер етіп, қызыл ығысуды тудырады (z шамамен 0,2-ге тең). Күшті гравитациялық тартылыс нейтрондық жұлдыздардың ыдырамай жылдам айналуына (секундына жүздеген айналым) мүмкіндік береді. Бұл айналу жылдамдығы бастапқы жұлдыздың ядросы бұрыштық импульс жоғалтпай жойылған жағдайда күтіледі - егер бастапқы жұлдыздың магнит өрісі болса, онда бұл да нейтрондық жұлдызға ыдырау кезінде сақталуы және шоғырлануы мүмкін.

Пульсарлардың, гамма-сәулелену көздерінің және кейбір рентгендік қос жүйелердегі нейтрондық жұлдыздардың магнит өрістері шамамен 100 миллион тесла (Жердің магнит өрісінің күші шамамен триллион есе) деп есептеледі.

Нейтрондық жұлдыздың айналуы

Нейтрондық жұлдыздар пайда болғаннан кейін бұрыштық импульстің сақталуына байланысты өте жылдам айналады. Бастапқы жұлдыздың

ядросының баяу айналуы оның кішірейген сайын жылдамдығын арттырады. Жаңа нейтрондық жұлдыз секундына бірнеше рет айнала алады. Кейде нейтрондық жұлдыз серік жұлдыздың орбиталық материясын жұтып, оның айналуын секундына бірнеше жүз есеге дейін арттырады, бұл нейтрондық жұлдыздың сопақ сфероидқа айналуына әкеледі.

Уақыт өте келе нейтрондық жұлдыздар айналуын бәсеңдетеді, өйткені олардың айналмалы магнит өрістері энергияны шығарады; Ескі нейтрондық жұлдыздардың әрбір айналуын аяқтау үшін бірнеше секунд кетуі мүмкін. Нейтрондық жұлдыздың айналуын бәсеңдететін жылдамдық әдетте тұрақты және өте баяу болады, төмендеу жылдамдығы бір айналу кезінде 10^{-10} -нан 10^{-21} секундқа дейін ауытқиды. Осылайша, бір айналымға 10^{-15} секунд баяулаудың әдеттегі жылдамдығымен қазір 1 секундта айналатын нейтрондық жұлдыз бір ғасырда 1,000003 секундта немесе 1 миллион жылда 1,03 секундта айналады.

Нейтрондық жұлдыздардан радио және рентген сәулелерінің «импульстері» байқалды, олар жұлдыздың айналу осіне міндетті түрде сәйкес келмейтін магниттік полюстерге жақын жерде үдетілген бөлшектердің әсерінен пайда болады деп саналады. Қисық сызықты эмиссия деп аталатын радиациялық процесс арқылы бұл бөлшектер радио сәулеленудің когерентті сәулелерін жасайды. Сыртқы бақылаушылар бұл сәулелерді магниттік полюс көру сызығынан өткен сайын сәулелену импульсі ретінде көреді.

Импульстар нейтрондық жұлдыздың айналуымен бірдей жылдамдықпен келеді, сондықтан периодты болып көрінеді. Мұндай импульстарды шығаратын нейтрондық жұлдыздар *пульсарлар* деп аталады. Қазіргі уақытта белгілі ең жылдам айналатын нейтрондық жұлдыз PSR J1748-2446ad секундына 716 айналыммен айналады. Соңғы жұмыс XTE J1739-285 нейтрондық жұлдызынан 1122 Гц жиілікте рентгендік тербелістің (спиннің жанама өлшемі) анықталғаны туралы хабарлады. Дегенмен, бұл сигнал осы уақытта тек бір рет көрінді және бұл жұлдыздың басқа жарылуында расталғанға дейін алдын ала қарастырылуы керек.

Нейтрондық жұлдыздардың күй теңдеуі

Басқа жұлдыздарға қарағанда, нейтрондық 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 ~ 0.5 мс, бірақ бүгінгі күні байқалған ең кіші период шамамен үш есе, 1.396 мс-ке тең. Нейтрондық 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 нейтрондық жұлдыздардың магниттік өрістері $B \sim 10^{12}$ Гс болуы керек екендігі атап өтілді, бұл әдеттегі ақ ергежейлілердің өрісінен алты есе асып түседі, бірақ нейтрондық 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 нейтрондық 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:

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

мұндағы $a_1 = 10^{53}$ эрг.

Бақылаулардан нейтрондық 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 нейтрондық жұлдыздың мөлшеріне дейін сығылғанда $B_{NS} \sim 5 \cdot 10^{11}$ Гс болады. Мұндай мәндер радио пульсарларды бақылаумен расталады [2].

Қос жүйедегі нейтрондық жұлдыздар

Көптеген нейтрондық жұлдыздар басқа нейтрондық 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 нейтрондық жұлдыздың, барстераның айналуымен модуляцияланады, олардың бетінде жарылғыш термоядролық жану пайда болады, квази-периодты тербеліс көздері және т.б. бар, олар нейтрондық 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. — стр.656.
2. Потехин А.Ю. Физика нейтронных звезд // Phys. Usp. — 2010. — Vol. 53. — P.1235–1256.
3. Oppenheimer J.R., Volkoff G.M. On Massive Neutron Cores // Physical Reviw. — 1939. — Vol. 55. — P.374–381.
4. <https://www.eso.org/public/spain/images/eso1810a/>