

М. А. НҮСПӘЛИЕВА, Д. М. НАСИРОВА, М. Н. ТӘКІБАЕВА*

(әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ.);

* Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ.)

НЕЙТРОНДЫ ЖҰЛДЫЗДАР ҚАБЫҚШАСЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ РЕАКЦИЯЛАР ЖАЙЛЫ

Аннотация

Жұмыста нейтронды жұлдыздарға қатысты негізгі шешімін таппаған мәселелер реті айтылып өтілді және ондағы құбылыстар ядролық реакциялар тұрғысынан түсіндірілді. Көпшілікке таныс негізгі мағұлматтар кеңірек баяндалды. Әсіресе нейтронды жұлдыздар қабықшасындағы процестер мен құпиясы көп ішкі ядро жайлы.

Нейтронды жұлдыз қабықшасындағы ядролық реакциялар арқылы құбылыстарды түсіндіру негізінен тізбектей электронды қарпу реакциясы арқылы жүзеге асады. Негізінен темір элементтерінен тұратын ішкі қыртыстағы тізбектей электронды қарпу реакциясы әсерінен бастапқы электронды газ тығыздығы мен соңғы электронды газ тығыздығы есептелініп, салыстырылды. Нәтижесінде бастапқы және соңғы электронды газ тығыздықтары өзгерісінен ішкі қыртыстағы ауытқу анықталып, оның нейтронды жұлдызда болып жатқан сан құбылыстың бірі – жұлдызсілкінісінің себебі болуы мүмкін екендігі болжамдалды.

Кілт сөздер: нейтронды жұлдыз, қабықша, ішкі қыртыс, ядролық реакция, жұлдызсілкініс.

Ключевые слова: нейтронные звезды, оболочки, внутренняя кора, ядерные реакции, звездотрясения.

Key words: neutron stars, shell, inner crusts, nuclear reaction, stars quake.

Кіріспе. XX ғасырдың соңы жалпы адамзат үшін көптеген ашылулар мен шешімін таппаған мәселелерге толы ғылыми-техникалық прогрестің уақыты болды. Бірақ, мүмкіндіктің жоқтығынан көптеген зерттеулер тығырыққа тіреліп жатты. Соның бірі, әрі сол жылдардағы астрономдар үшін ғажайып объектке айналған бірегейі – нейтронды жұлдыздар еді. Нейтронды жұлдыздар үшін жүретін процестерді, ондағы құбылыс-тарды зерттеу үшін көптеген гипотезалар ұсынылып, физиканың әр саласынан қарастыруға тура келді. Бүгінде бұл ғажайып аспан объектісінің көптеген құпиялары ашылғанмен, әлі бүкпесі көп сырлары толып жатыр. Соның бірі нейтронды жұлдыздар қабықшасында айныған нейтронды газдардың қалыптасуы мен ондағы өтіп жатқан реакциялар. Оны біз теориялық зерттеулер мен эксперименттік есептеулерге сүйене отырып қарастырамыз. Бұл мәселенің шешілуі астрофизика саласына да, классикалық физикаға да, қазір енді дамып келе жатқан плазма физикасының дамуына да елеулі үлес қосады.

Нейтронды жұлдыздар барлық жұлдыздар ішіндегі ең жинақысы, аталуы олардың негізгі құрамының кері бета-ыдырау процесінде протондар мен электрондардың өзара

жою нәтижесінде пайда болған нейтрондардан тұру себебінен. Оның ішкі қыртыстарында еркін нейтрондармен қатар айныған нейтронды ферми-газ да бар. Қалыпты массасы $M : 1 - 2M_e$, мұнда $M_e = 2 \cdot 10^{33}$ – Күн массасы, ал радиусы $R = 10 - 14$ км. Мұндай жұлдыздағы заттың массалық тығыздығы ρ орташа $\sim 10^{15}$ г·см⁻³, қалыпты ядролық тығыздықтан $\rho_0 = 268 \cdot 10^{14}$ г·см⁻³ үш есе артық. Мұндай затты жер зертханасында іске асыру мүмкін емес, тіпті оның қасиеттері мен құрамы да әлі толық анықталмаған. Мұны сипаттау үшін әртүрлі теориялық модельдер бар, олардың қайсысын қолдану нейтронды жұлдыздарды зерттеу барысында ғана анықталады, теориялық модельдер көмегімен оларды бақылау сараптамасы мен түсіндірілуінен.

Нейтронды жұлдыздардың пайда болуы – аса қуатты жұлдыз жарқылының нәтижесі, яғни қарапайым гравитациялық энергия бөлігінің жылулық энергияға өту процесі. Бұл процесс ескі аса қуатты жұлдыздың жағармайы таусылуымен байланысты, алдымен сутегі, одан кейін сутегіні жаққаннан пайда болған гелий, одан кейін оттегі мен магнийге дейін ауыр химиялық элементтер. Мұндай тізбекті ядролық айналулардың соңғы өнімі жұлдыздың орталығына шоғырланған – темір тобындағы элементтердің изотобы. Тек айныған электронды ферми-газдың ғана қысымы жұлдыздың темір-никельді ядросын ауырлық күшінің әсерінен өз ортасына түсірмеуге шыдайды. Бірақ оттегіні жаққаннан кейін бірнеше күн өткен соң темір ядро чандрасекар шегінен асатын массаға жетеді, $1,44 M_e$ – гравитациялық сығылуға айныған электрондар қысымы шыдай алатын максималды масса. Осы кезде гравитациялық коллапс орын алады – жұлдыз ядросының катастрофалық қопарылысы. Коллапс кезіндегі орасан зор гравитациялық энергияның ($\geq 10^{53}$ эрг) бөлінуі – гигант жұлдыздың ішкі қабықтарын жарық жылдамдығының 10% жететін жылдамдықпен лақтыратын толқынның тууына әкеп соғады, бұл кезде жұлдыздың ішкі бөлігі сол мөлшердегі жылдамдықпен сығыла береді. Нәтижесінде атомдардың ядролары үлкен бір алып ядроға бірігеді. Егер оның массасы Оппенгеймер-Волковтың шегінен аспайтын болса ядролық материяның қысымымен гравитациялық сығылуға ұшырамаған нейтронды жұлдыз туылады. Осы кезде бөлінген энергияның 1%-ы – нәтижесінде тұмандық құрайтын ша-шыраған қабықтардың кинетикалық энергиясына айналады, тек 0,01%-ы ғана ($\sim 10^{49}$ эрг) аса қуатты жұлдыз ретінде бақыланатын және бүкіл галактика жарқырауын жабатын электромагнитті сәулеленуге айналады.

Біздің мақсатымыз нейтронды жұлдыздар қабықшасындағы осы ядролық реакциялар мен олардың циклін қарастыру, реакциялар арқылы нейтронды жұлдыздағы өтіп жатқан құбылысты түсіндіру. Нейтронды жұлдыз қабықшасы атомдық ядро кристалл құратын қатты қыртысқа, өзін кулондық сұйықтық ретінде көрсететін мұхитқа бөлінеді. Қыртыстың өзі ядро бос электрондар мен нейтрондар теңізі бар ішкі, бос электрондары жоқ сыртқы бөліктен тұрады. Қабықшаның вакуумды шекарасында газтекес плазмалық атмосфера, ал қыртыстың ядромен шекарасында – сұйықкристалдық мантия болуы мүмкін.

Қабықшалар тығыздығы тереңдіктің өсуімен ұлғаяды, яғни гравитациялық қысымның ұлғаюымен. Ішкі қыртыс әдетте $\sim 1 - 2$ км қалыңдыққа ие. Оның тығыздығы атомдық ядролар біртекті массаға бірігетін $\rho_0 \approx (4 - 6) \times 10^{11}$ г·см⁻³ мәніне дейін өседі. Ішкі қыртыстағы ядролық химиялық тепе-теңдік – бета-қарпу және бета-ыдырау реакцияларына қатысты зертханалық жағдайда кездеспейтін заттың құрамына әкеледі:

нейтрондар мен электрондардан тұратын сұйықтыққа батырылған үлкен нейтрон жетіспеушілігіне ұшыраған ауыр ядролар. Ішкі қыртыстың елеулі аумағындағы нейтрондар асқынақыш: теориялық бағалаулар көрсеткендей, асқынақыштың сәйкес критикалық температурасы тығыздықпен өзгере отырып, бірнеше миллиард градусқа дейін жетеді, бұл нейтронды жұлдыздың ішкі қыртысындағы заттың кәдімгі кинетикалық температурасынан жоғары.

Ішкі қыртыс – тереңделе отырып айныған электрондар теңізімен толған кулондық кристаллға айналатын өте тығыз кристалл. Қысымның әсерінен кристалл атомдары электрондық қабықтарынан айрылып, жалаңаш ядро болып қалады. $\rho > 1,2 \cdot 10^7 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ тығыздықтан бастап құрылымда кері бета-ыдырау жүруі мүмкін: $p + e \rightarrow n + \nu_e$. Мұнда протонның біраз қоспасы бар деп есептелінеді. Ішкі қыртысты атом ядросының нейтронизация процестерінің басталуымен байланысты мына реакция көрсетеді: $A(Z,N)+e \rightarrow A(Z-1,N+1)+\nu_e$, $A(Z,N)+e \rightarrow A(Z-1,N+1)+\nu_e$. Бұл реакциялар $\rho > 10^{11} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ қысымда энергетикалық ұтымды, ал ядролар ней-тронды қаныққан болады. Мұнда зат айныған электрондардың ультрарелятивистік фермитенізінен, ал торлар жалаңаш ядро мен еркін нейтрондардан тұратын болады.

Нейтронды жұлдыздарда нейтриноны шығарумен жүретін реакциялар ($T \leq 10^9 \text{ К}$). Мұнда нейтронды жұлдыздың жылулық эволюциясының қыртыстарындағы бірнеше млрд К-нен төмен температураға дейін суынғаннан кейінгі жағдайы қарастырылады. Бірнеше млрд К-нен төмен температурада суыну процесі кезінде шығарылғын кез келген нейтрино, нейтронды жұлдыз затымен өзара әрекеттеспей-ақ оны еркін тастап кетеді.

Эволюцирленген массивті жұлдыздардың ядросындағы өте жоғары температурада ($T \geq 10^9 \text{ К}$) нейтрино арқылы энергияның жоғалуы урка-реакциялармен байланысты.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (1)$$

$$e^- + p \rightarrow n + \nu_e. \quad (2)$$

Бұл реакциялар ядро коллапсы кезінде де болады. Алайда, нуклондар айныған болған кезде, мысалы 10^9 К температурадан төмен суынған нейтронды жұлдыздарда бұл реакциялар қатты басылады.

Енді нейтронның ыдырау реакциясын қарастырайық. Ыдырауға тек Ферми бетінен $\sim kT$ шегінде жатқан нейтрондар ғана ұшырайды. Сәйкесінше, энергияның сақталу заңынан пайда болған протон мен электрон Ферми деңгейлерінен $\sim kT$ шегінде болуы тиіс; босап шыққан нейтрино энергиясы да kT шамасында болу керек.

$p_F(e) - p_F(p) = p_F(n)$ теңсіздігіне сәйкес протон мен электрон нейтронмен салыстырғанда аз им-пульске ие болуы керек. Алайда, бұл мүмкін емес; ыдырауда импульс сақтала алмайды, егер энергия сақталатын болса. Процесс жүзеге асу үшін импульсті алып кететін басқа бөлшек болу керек. Сондықтан бұрындары айтылған болжам бойынша, нейтронды жұлдыз суынуында маңызды ролді «модифицирленген» урка-реакциялар алады.

$$n + n \rightarrow n + p + e^{-} + \bar{\nu}_e, \quad (3)$$

$$n + p + e^{-} \rightarrow n + n + \nu_e. \quad (4)$$

Бұл реакцияларға $\mu_e \succ m_\mu c$, $\rho \geq 8 \cdot 10^{14}$ г/см³ болғанда жүретін мюонды нейтрино сәулеленуінің реакциясы қосылады.

$$n + n \rightarrow n + p + \mu^{-} + \bar{\nu}_\mu, \quad (5)$$

$$n + p + \mu^{-} \rightarrow n + n + \nu_\mu. \quad (6)$$

τ -нейтриномен сәйкес реакциялар нейтронды жұлдыз қыртысының қалыпты тығыздығында жүрмейді, өйткені $m_\tau c^2 = 1784$ МэВ.

Модифицирленген урка-реакциялар күшті де, әлсіз де өзара әрекеттесуге қатысады. Мысалы, (5) реакцияда соқтығысатын нейтрондар нейтрондардың біреуі ыдырамайынша протонға айнала отырып пиондармен алмасады. Сондықтан, осы процестің жылдамдығын есептегенге дейін қарапайым реакцияны қарастырады – вакуумдегі таза нейтрондық ыдырау (1-2) реакциясы. Оның күшті әсерлесу эффектісі аз.

Электрондық қарпу реакциялары. Нейтронды жұлдыздардың беткі қабаттарының зат тығыздығын келесі формулалар көмегімен $\rho = (A/2Z) \cdot 1.98 \cdot 10^6 x^3 \text{ г/см}^{-3}$, $x = p_F / m_e c$, $\lambda_e = h / m_e c$ электронның Ферми деңгейі формуласымен $E_f = \sqrt{p_F^2 c^2 + m_e^2 c^4}$ анықтасак болады. Электрондардың еркін протондармен қарпылуы ρ і $1.2 \cdot 10^7 \text{ г/см}^{-3}$ тығыздықта жүзеге асады.

Әрбір тұрақты ядро өзіндік тізбектей электрондық қарпу реакциясын тудырады. Реакциялар нәтижесінде пайда болған ұрпақ ядролар, жер беті жағдайында тұрақты болғандай, тығыз материяларда да тұрақты болады. Олардың электрон шығара алмау себебі – Ферми сұйықтығы қарсы әрекет тудыруынан. Одан бөлек, ұрпақ ядролар бір уақытта негізгі және қозған күйде бола алады.

Біз табиғатта 5,845% кездесетін ⁵⁴Fe изотопы үшін келесі реакциялар тізбегін жазсак болады

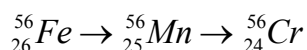
$${}^{54}\text{Fe} + e^{-} \rightarrow {}^{54}\text{Mn} + \nu, \quad E_e \succ 0.697 \text{ MeV}$$

$${}^{54}\text{Mn} + e^{-} \rightarrow {}^{54}\text{Cr} + \nu, \quad E_e \succ -1.377 \text{ MeV}$$

$${}^{54}\text{Cr} + e^{-} \rightarrow {}^{54}\text{V} + \nu, \quad E_e \succ 7.042 \text{ MeV}. \quad (7)$$

Оң жағында қарпу реакциясы үшін табалдырық энергиясы мәні берілген. ⁵⁴Fe тығыздығы $\rho_m \approx 1.555 \cdot 10^6 \text{ г/см}^{-3}$.

Енді біз нейтронды жұлдызда өтіп жатқан құбылыстың параметрлер өзгерісін көрсету үшін мынадай темір тұрақты ядросының өздігінен тудырған тізбекті қарпу реакциясын қарастырайық.



Олардың бастапқы және соңғы электронды газ тығыздықтарын есептеп, қатынасын ала отырып негізгі масса сақталуымен болатын өзгерісті байқаймыз.

$\rho_0 \frac{Z}{A} = m_B n_e$ $\rho_0 = 1.9479 \cdot 10^6 \text{ x}^3 / \text{cm}^3$ $\rho_0 = 1.9479 \cdot 10^6 \text{ x}^3 / \text{cm}^3$ $Y_e = \frac{Z}{A}$ – бір барионға сәйкес келетін электрондардың орта саны

$$\rho_{\sigma}; \bar{\rho} \frac{56}{26} \quad \rho_c; \bar{\rho} \frac{56}{24}$$

$$1.9479 \cdot 10^6 \text{ x}^3 \frac{Z}{A} = m_B n_e$$

$$\frac{\rho_c}{\rho_{\sigma}}; \frac{24}{26}; 1 - \frac{1}{13} \Delta \rho_c; \rho_{c\sigma} - \rho_{\sigma} = \rho \frac{Z \rho_c}{3 \rho_{\sigma}} - 1 \frac{24}{26} = \rho \frac{Z}{3} - \frac{1}{13} \frac{24}{26} \approx 7\%$$

$$n_e = \frac{1.9479 \cdot 10^6 \text{ x}^3 \frac{Z}{A}}{m_B}$$

$$\Delta \rho_c; \rho_{c\sigma} - \rho_{\sigma} = \rho \frac{Z \rho_c}{3 \rho_{\sigma}} - 1 \frac{24}{26} = \rho \frac{Z}{3} - \frac{1}{13} \frac{24}{26} \approx 7\%$$

Қорытынды. Сонымен, нейтронды жұлдыздардың ішкі қыртысындағы екі ядроның өзара әсерлесу қашықтығы олардың радиустарынан көп үлкен, сондықтан ондағы реакциялар қалыпты жер жағдайындағы реакциялармен бірдей. Ал ішкі ядрода олар өзара тең, сондықтан онда қандай реакция жүріп жатқаны да бел-гісіз. Осыған сүйене отырып, біз мынандай тұжырым жасасақ болады: осы жұмыста жүргізілген нейтронды жұлдыздар қабықшасындағы ядролық реакциялар есептеулеріне сәйкес бастапқы электрон газының тығыздығы мен қарпу әсерінен пайда болған соңғы электрондар газы тығыздығының айырмашылығы 7%. Бұл дегеніміз ішкі қыртыс өзгерісіне, біздің болжауларымызша – жұлдызсілкінісіне әкеледі. Бұл құбылыс реакцияның өту уақыты қысқа болғанда байқалуы мүмкін. Әзірге осы реакциялардың өту уақыты есептеліну үстінде. Нейтронды жұлдыз ғажайып астрономиялық объект болғандықтан оны тек сараптама жасау арқылы, реакциялар арқылы гипотетикалық тұрғыдан баяндаймыз.

ӘДЕБИЕТ

- 1 Chiu H.-Y. Salpeter E.E. Surface X-Ray Emission from Neutron Stars // Phys. Rev. 12, 143, 1964.
- 2 Шапиро С., Тьюкольски С. Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. – М.: Мир, 1985.
- 3 Потехин А.Ю. Физика нейтронных звезд УФН 2010 г.
- 4 Takibayev N. Excited Nuclei in Neutron Star Crusts.

5 Haensel P., Potekhin A., Yakovlev D. Neutron Stars; 1. Equation of State and Structure. – Boston/Dodrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2006.

6 Camenzind M. Compact Objects in Astrophysics. – Berlin Heidelberg New York: Springer, 2007.

7 Чугунов А.И. Сильнонеидеальная плазма в оболочках компактных звезд: Автореф. дис. – Физико-технический институт им. Иоффе. – СПб., 2007.

8 www.ioffe.ru

9 nauka.by.ru

REFERENCES

1 Chiu H.-Y. Salpeter E.E. Surface X-Ray Emission from Neutron Stars // Phys. Rev. 12, 143, 1964.

2 Shapiro S., T'jukol'ski S. Chernye дыры, belye karliki i nejtronnyye zvezdy. – M.: Mir, 1985.

3 Potehin A.Ju. Fizika nejtronnyh zvezd UFN 2010g.

4 Takibayev N. Excited Nuclei in Neutron Star Crusts.

5 Haensel P., Potekhin A., Yakovlev D. Neutron Stars; 1. Equation of State and Structure. – Boston/Dodrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2006.

6 Camenzind M. Compact Objects in Astrophysics. – Berlin Heidelberg New York: Springer, 2007.

7 Chugunov A.I. Sil'noneideal'naja plazma v obolochkah kompaktnyh zvezd: Avtoref. dis. – Fiziko tehničeskij institut im. Ioffe. – SPb., 2007.

8 www.ioffe.ru

9 nauka.by.ru

Резюме

М. А. Нусипалиева, Д. М. Насирова, М. Н. Такибаева*

(Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы;

*Казахский педагогический университет им. Абая, г. Алматы)

О ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ В ОБОЛОЧКАХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Дан обзор ряда актуальных задач физики нейтронных звезд. Проведен анализ некоторых важных цепочек реакций захвата электронов ядрами в твердых оболочках

нейтронных звезд, приводящих к изменению элементного состава вещества и нарушению баланса давлений, создаваемых разными силами. В частности, проведен сравнительный анализ и расчеты плотностей электронного газа начального и конечного состояний слоя оболочки звезды, состоящей из элементов железа. Были определены отклонения плотности слоя вследствие этих реакций. Такое явление может быть причиной звездотрясений, которые происходят в нейтронных звездах.

Ключевые слова: нейтронные звезды, оболочки, внутренняя кора, ядерные реакции, звездотрясения.

Summary

M. A. Nusipaliyeva, D. M. Nasirova, M. N. Takibayeva*

(Al-Farabi Kazakh national university, Almaty;

* Kazakh national pedagogical university named after Abai, Almaty)

ABOUT NUCLEAR REACTIONS IN CRUSTS OF NEUTRON STARS

Was given review of actual problem of physics neutron stars. Carried out analyze of some important chain reactions of electron capture in solid shell of neutron stars. Particular, carried out comparative analyze and calculations of densities of initial and finally electron gas state crust shell of neutrons. Was defined deflection crust density as a result of these reactions. This phenomena can be a reason of stars quake which occurring in neutron stars.

Key words: neutron stars, shell, inner crusts, nuclear reaction, stars quake.

Поступила 27.03.2013г