

Д. М. НАСИРОВА

(Казахский национальный педагогический университет им. Абая, г. Алматы)

ТРЕХЧАСТИЧНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ И РЕАКЦИИ В ОБОЛОЧКАХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Аннотация

Рассмотрены трехчастичные нейтронные резонансы и реакции в оболочках нейтронных звезд, даны основные характеристики материи в оболочках нейтронных звезд и оценки реакций рассеяния нейтронов на двухядерных системах. Приведены результаты расчетов для нейтронного резонансного рассеяния на системах, состоящих из двух ядер ^{21}Ne , фиксированных в узлах кристаллической решетки в сверхплотной оболочке нейтронной звезды. Приведены формулы и результаты численных расчетов, описывающих энергетическую зависимость амплитуд ядерных реакций вблизи резонансных значений.

Ключевые слова: нейтронные звезды, нейтронная Ферми-жидкость, нейтронные резонансы.

Кілт сөздер: нейтрондық жұлдыздар, нейтрондық Ферми-сұйықтық, нейтрондық резонанстар.

Keywords: neutron stars, neutron Fermi liquid, neutron resonances.

Нейтронные звезды, или, как их иначе называют пульсары, представляют значительный интерес в современной физике и астрофизике поскольку их свойства являются не до конца понятыми. Пульсарами называют объекты, которые с чрезвычайной регулярностью испускают излучения в виде импульсов (пульсаций). Объяснения этих пульсаций связывают с быстрым вращением нейтронной звезды, ось вращения которой не совпадает с осью магнитных полюсов. Магнитное поле такой звезды имеет очень большую величину, так что излучение от звезды может исходить только по направлению магнитных полюсов. Если Земля периодически попадает под такой луч излучения, то его регистрирует, когда этот луч пересекает местоположение Земли. Считается, что пульсары образовались вследствие взрыва сверхновых, в котором внешние области разлетаются в космическое пространство, а внутренняя часть сдавливается и образует компактный звездный объект в частности нейтронную звезду [9].

Существование нейтронных звезд предсказывалось теоретиками еще в 30-х годах. Свое название такие компактные (или сверхплотные) звезды получили из-за того, что предполагалось, что их внутренние слои состоят в основном из нейтронов. Эти нейтроны образуются в твердых оболочках звезды вследствие гигантского гравитационного давления, которое вызывает реакции электронного захвата и образования нейтронов, а также нейтронообогащенные ядра.

Таким образом, нейтронные звезды являются результатом гравитационного коллапса нормальных звезд с массами лишь в несколько раз больше солнечной. В случае больших масс $M > 3M_{\odot}$ образуются «черные дыры», которые вообще не излучают [2]. Нейтронные звезды имеют очень маленькие размеры – 20–30 км в диаметре. Экстремальные условия, которые возникают при формировании нейтронной звезды, так сжимают атомы в ее внешних оболочках, что электроны срываются с атомных орбит и образуют вырожденный электронный Ферми-газ. Затем с увеличением давления, т.е. в более глубоких слоях оболочек электроны захватываются ядрами и, объединяясь с протонами, образуют нейтроноизбыточные ядра. Еще глубже из таких ядер выделяются («выпадают») нейтроны и нейтронные капли [2]. Так образуется нейтронная звезда.

Далее в мантии образуется ядерная жидкость, состоящая из нейтронов, протонов и электронов. Еще глубже, в ядре звезды, уже сама ядерная жидкость теряет свои свойства, образуя кварковую или странную субстанцию, свойства которой еще мало известны [8]. Сверхплотная ядерная жидкость в земных условиях взорвалась бы, подобно ядерной бомбе, но в нейтронной звезде она устойчива благодаря огромному гравитационному давлению.

Во внешних слоях нейтронной звезды давление и температура имеют значительно меньшие величины и материя во многом подобна веществу, и в обычных условиях, включая нормальные звезды и планеты, которую мы хорошо знаем из лабораторных экспериментов. Из-за того, что гравитационные силы даже на поверхности нейтронной звезды значительно больше земных, внешняя оболочка звезды представляет собой твердую корку толщиной всего около километра. Причем, как отмечалось выше, нейтронные звезды имеют колоссальную плотность, которая в центре звезды может в несколько раз превышать плотность самих атомных ядер. Отметим, что плотность тяжёлых атомных ядер составляет в среднем $2.8 \cdot 10^{17}$ кг/м³ [7].

Из-за малого радиуса нейтронной звезды сила тяжести на ее поверхности чрезвычайно велика: примерно в 100 млрд. раз выше, чем на Земле. От коллапса эту звезду удерживает «давление вырождения» электронной вырожденной Ферми-жидкости, а в более глубоких слоях нейтронный вырожденный Ферми-газ. Таким образом, нейтронная звезда состоит из плотного странного или кваркового ядра в центре звезды, затем жидкой мантии, в котором преобладают вырожденные нейтроны с примесью вырожденных протонов и электронов; внутренней части оболочки, образованной атомными ядрами, переобогащёнными нейтронами; и внешней корки, которая представляет собой сверхплотную кристаллическую решётку, состоящую из ядер, погруженную в вырожденную электронную Ферми-жидкость [7].

Вырожденный электронный Ферми-газ это газ, в котором электроны распределены по различным квантовым состояниям в силу принципа Паули и полная энергия газа имеет наименьшее значение. При абсолютном нуле температуры эти электроны будут стремиться занять состояния с наименьшей энергией, равной $E = \frac{p^2}{2m_e}$, где p – импульс электрона, m_e – масса электрона.

При большой пространственной плотности электронов на один электрон приходится малый объем, и, следовательно, большой объем пространства импульсов. Т.е при большой плотности импульсы свободных электронов должны быть велики, даже при нулевой температуре.

Результаты квантовомеханических расчетов показывают, что давление вырожденного электронного Ферми-газа описывается формулой $P = K\rho^{5/3}$ и является его уравнением состояния, здесь постоянная $K = 3 \cdot 10^6$, а ρ – плотность. Это давление компенсирует гравитационное сжатие. Вышеприведённое уравнение состояния

справедливо для холодного (нерелятивистского) вырожденного электронного газа. Напомним, что температура даже в несколько миллионов градусов много меньше характерной Ферми-энергии электронов ($kT \ll E_F$), поэтому газ всегда остается вырожденным даже при значительной температуре [7].

Атомы во внешней коре полностью ионизованы и по существу являются «голыми» атомными ядрами. Энергетически выгодным является состояние вещества, когда эти ядра образуют кристалл. Т.е. вещество, из которого состоит нейтронная звезда, сжимается, и за счет увеличения внутреннего давления происходит упорядочение его структуры, т.е. образование кристаллической решетки. Это объясняется тем, что наружные электроны отрываются и становятся общими и вещество становится все более упакованным [8].

При $T \rightarrow 0$ ионы образуют кристаллическую решетку, где элементарный объем, приходящийся на одно ядро, определяется выражением $a = \frac{\sqrt[3]{3}}{4\pi} n_A^{-1/3}$, где n_A – концентрация ядер, которая определяется как $n_A = \frac{\rho}{m_A}$. В случае, если вещество находится в основном состоянии, то можно предположить, что между ядрами имеется равновесие. Можно найти отвечающий равновесию изотоп в зависимости от плотности. При плотностях ниже $\sim 10^7$ г/см³ в основном состоянии находятся ядра ${}^{56}_{26}\text{Fe}$. А при плотностях, больше указанных, равновесию соответствуют ядра, которые обогащены нейтронами [2]. Например, на границе внешней и внутренней оболочек нейтронной звезды, где плотность $\rho \approx 4 \cdot 10^{11}$ г/см³ преобладают ядра ${}^{21}_{10}\text{Ne}$, для которого мы рассчитали концентрацию ядер $n_A = 1,2 \cdot 10^{34}$ см⁻³, элементарный объем, который приходится на одно ядро $a = 2,3 \cdot 10^{11}$. А расстояние между двумя ядрами равняется значению $d = 43\text{fm}$.

В оболочках нейтронных звезд давление так велико, что становится возможными следующие реакции, когда электроны «вдавливаются» в протоны $e^- + p^+ \rightarrow n + \nu_e$ и в результате образуется нейтронный вырожденный газ. Далее, нейтроны ведут к развитию других ядерных реакций, в частности, реакций резонансного типа.

Резонансные реакции с нейтронами хорошо определены в экспериментах. Резонансы и реакции с нейтронами являются важными в процессах цепных ядерных реакций деления, и, соответственно, во многих практических приложениях этих реакций. В силу этого, а также по причине отсутствия у нейтрона электрического заряда определяет эту частицу в ряд первостепенных при изучении особенностей ядерных резонансов, возникающих в сложных квантовых системах.

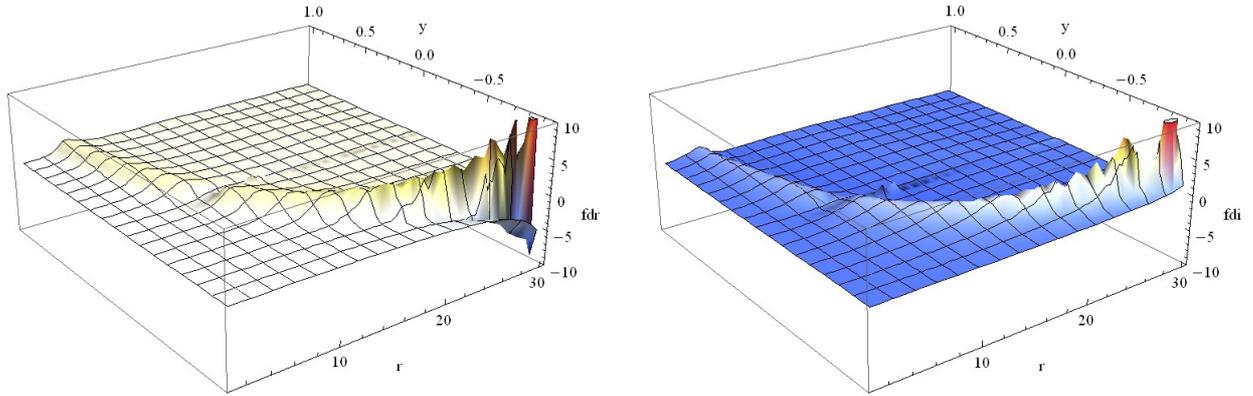
Нейтрон и трехчастичные реакции с участием нейтронов представляют собой исключительно важный объект исследований в астрофизике, об этом отмечается в работах (см. [3; 4] [5]).

Задачей исследования являлось определение нейтронного резонансного рассеяния на системах, состоящих из двух ядер ${}^{21}\text{Ne}$, фиксированных в узлах кристаллической решетки в сверхплотной оболочке нейтронной звезды. Нейтроны с этими ядрами образуют парные резонансные состояния ${}^{21}\text{Ne} + n$ в S -волне, и эти резонансы имеют следующие значения энергий и ширин резонансов [6]:

- 1) $E_b = -18.4\text{keV}$ (значение энергии связанного состояния);

Рисунок 1 – Двухчастичные параметры: $E_b = -18.4\text{keV}$, $E_r = 216\text{keV}$, $\Gamma = 6\text{keV}$.

Трехчастичный резонанс проявляется при $r = 29\text{fm}$



а) значение реальной части функции D

б) значение мнимой части функции D

Рисунок 2 – Двухчастичные параметры: $E_b = -18.4\text{keV}$, $E_r = 402\text{keV}$, $\Gamma = 6\text{keV}$.

Трехчастичный резонанс проявляется при $r = 31\text{fm}$

В реальной и мнимой частях рисунков можно наблюдать одновременное пересечение осей абсцисс, что соответствует долгоживущему трехчастичному состоянию [1]. Аналогичная картина наблюдается и для других нуклидов.

Результаты этих расчетов свидетельствуют о том, что нейтрон в резонансном состоянии может существовать достаточно долго, и это может приводить к разнообразным процессам, происходящим в звездах, например, стимулировать реакции синтеза и термоядерные реакции в этих звездах.

Схема расчетов. Расчетная программа записана в формате пакета прикладных программ Mathematica-8.

Program Ne21_Ne21_n_Almaly.nb is the program for calculations D-function of resonance series in S-wave for Ne(21) + Ne(21) + neutron.

Program is created in the case of one level for «n+Ne21»-subsystem with high level n_Ne(21) we have resonance series:

1) bound state with energy $E_b = -18.4\text{ keV}$ in S-wave,

We determine wave-number as: $k_B = \sqrt{\frac{E(\text{keV})}{2.07}} * 10^{-2} * \text{fm}^{-1}$;

2)

A) the resonance states are: $E_r = E_R - i \Gamma/2$; $l=1$. The first resonance has- $E_R=261\text{ keV}$ and $\Gamma=6000\text{ eV}$ $\Gamma_n=6000\text{ eV}$;

B) the resonance states are: $E_{res} = ER - i \Gamma/2$; $l = 1$. The first resonance has $ER = 402$ keV and $\Gamma = 6000$ eV $\Gamma_n = 6000$ eV

« $k_0 = 0.05025$ »

«insert the characteristics of bound state $k_{i0} = k$ where $E_b = -k^2/2m$ »

$e_\kappa = 18.4$;

$g_r = 6000$;

$e_r = 261$

$$k = \sqrt{\frac{e_\kappa}{2.07}} * 10^{-2}$$

$\beta = 2$;

$m = 1$;

$x = 2$

«insert the characteristics of resonance state $k_{res1} = kr_1 - i * k_{i1}$ where $E_{res} = (k_{res1})^2/2m$ »

$$\langle \langle xt = \sqrt{\frac{2 * Er(eV)}{Gr(eV)}} \frac{1}{\sqrt{1 - (2 * Er(eV))/(Gr(eV))}} \rangle \rangle$$

« $bb = (2 * Er(eV))/(Gr(eV))$ »

$bb = (2 * e_r)/g_r * 10^3$

$xt = \sqrt{bb^2 + 1} - bb$

$$\langle \langle kR1 = \sqrt{\frac{Er(eV)}{0.207 * 10^{-2}}} \rangle \rangle$$

$k_R = kR1 / \sqrt{1 - xt^2}$ »

$$kR1 = \sqrt{\frac{e_r}{2.07}} * 10^{-2}$$

« $N1[\%]$ »

$k_{R1} = kR1 / \sqrt{1 - xt^2}$

« $k_{i1} = xt * k_{R1}$ »

$k_{i1} = xt * k_{R1}$

« $k_{in1} = (Gr_n(eV))/(Gr(eV)) * k_{i1}$ »

$k_{in1} = k_{i1}$

$k_{r1} = k_{R1} - i * k_{i1}$

$k_0 = k_{R1} * (1 + y)$

$k_0^2 = k_0^2$

$z = k_0 * r$

$jr_0 = -((\text{Cos}[z] + i * \text{Sin}[z])/r)$

$\eta_0 = m / (k * (k + i * k_0))$

$$\epsilon \eta_0 = \sqrt{\frac{\kappa}{m}}$$

$\epsilon \eta_0^2 = \epsilon \eta_0^2$

$jr_0^2 = 2 / (z * r * \pi) * (\text{Sin}[z] * \text{CosIntegral}[z] - \text{Cos}[z] * \text{SinIntegral}[z]) - 2 / (r * \pi) * (\text{Cos}[z] * \text{CosIntegral}[z] + \text{Sin}[z] * \text{SinIntegral}[z]) - i * (\text{Sin}[z] / (z * r) - \text{Cos}[z] / r)$

$\eta_1 = (2 * m) / (k_0^2 - \text{Subscript}[k, r_1]^2)$

$$\epsilon \eta_1 = \sqrt{3 * \frac{\kappa_{in1}}{m}}$$

$\epsilon \eta_1^2 = \epsilon \eta_1^2$

$jr_{10} = -jr_0^2$

```

jr11=1/r*(2/z2*(Exp[-I*z]-1)-(z+2*I)/z*Exp[I*z])
a00=1-jr00*ξη02*η0*jr00*ξη02*η0-ξη02*jr01*ξη12*η1*jr10
a01=-ξη02*jr00*η0*ξη0*jr01*ξη1*η1-ξη0*jr01*ξη1*η1*jr11*ξη12*η1
a10=-ξη1*jr10*ξη0*η0*jr00*ξη02*η0-jr11*ξη12*η1*ξη1*jr10*η0*ξη0
a11=1-jr10*ξη02*η0*jr01*ξη12*η1-jr11*ξη12*η1*jr11*ξη12*η1
det=a00*a11-a01*a10
redet=Re[det]
imdet=Im[det]
fdr=redet/(redet2+imdet2)
fdi= imdet/(redet2+imdet2)
Plot3D[fdr,{r,30,50},{y,-0.05,0.1},PlotRange→{-10,10},AxesLabel->{«r»,«y»,«fdr»}]
Show[%,ViewPoint->{0,-2,0}];
Plot3D[fdi,{r,1,40},{y,-0.8,1},PlotRange→{-10,10},AxesLabel->{«r»,«y»,«fdi»}]
Show[%,ViewPoint->{0,-2,0}];

```

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Такибаев Н.Ж. К проблеме небарионного излучения сверхплотных звезд // Сборник «Казахстанские космические исследования». – Т. 6. – 2010.
- 2 Шапиро С.Л., Тьюколски С.А. Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды / Пер. с англ. – Ч. 1-2. – М., 1985.
- 3 Кужевский Б.М. Объект исследований Солнце // Наука в России. – 2002. – Т. 4. – С. 4-11.
- 4 Кужевский Б.М. Гамма-астрономия солнца и исследование солнечных космических лучей // УФН. – 1982. – Т. 137, № 2. – С. 237-265.
- 5 Дубовиченко С.Б., Такибаев Н.Ж., Чечин Л.М. // Физические процессы в дальнем и ближнем космосе // Изд. НКА РК. – Алматы: Дайк_Экспресс, 2008. – С. 120-224.
- 6 Mughabghab S.F., Divadeeman M., Holder N.E. Neutron Cross Sections. – Vol. 1. – Academic press, 1981.
- 7 Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М.: Наука, 1984. – 384 с.
- 8 Киржниц Д.А. // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 38, вып. 2. –С. 503; Труды по теоретической физике. – Т. 2. – Физматлит, 2001. – С. 321.
- 9 Haensel P., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. Neutron Stars // Kluwer Academic Publishers, 2007.
- 10 Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – М.: Энергоатомиздат, 1993.

REFERENCES

- 1 Takibayev N.Zh. *Sbornik «Kazaxstanskije kosmicheskie issledovaniya»*, t. 6, **2010** g. (in Russ)
- 2 Shapiro S.L., Teukolski S.A. *per.s angl., ch.1-2, M., 1985 g. (in Russ)*
- 3 Kuzhevski B.M. *Nauka v Rossii.* - **2002.** - T.4. - S.4-11
- 4 Kuzhevski B.M. *UFN,* - T. 137. - № 2, - **1982**, C.237-265
- 5 Dubovichenko S.B., Takibayev N.Zh, Chechin L.M. *Izd.NKA RK, Almaty, Dajk_Express,* - **2008.** - C. 120-224, (in Russ)
- 6 S.F.Mughabghab, M.Divadeeman, N.E.Holder *Vol.1, Academic press, 1981*
- 7 Shklovsky I.C. *M.:Nauka. 1984*, 384 c., (in Russ)
- 8 Kirzhnic D.A. *ZhETF. T.38. Vyp. 2. S.503. 1960. Trudy po teoreticheskoj fizike. T.2. Fizmatlit. S.321. 2001*, (in Russ)
- 9 P.Haensel, A.Y.Potekhin, D.G.Yakovlev *Kluwer Academic Publishers, 2007*
- 10 Muxin K.N. M.: *Energoizdat. 1993*, (in Russ)

Резюме

Д. М. Насирова

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

НЕЙТРОНДЫ ЖҰЛДЫЗ ҚАБЫҚШАСЫНДАҒЫ ҮШБӨЛШЕКТІК НЕЙТРОНДЫ РЕЗОНАНСТАР МЕН РЕАКЦИЯЛАР

Жұмыста нейтронды жұлдыз қабықшасындағы үшбөлшектік нейтронды резонанстар мен реакциялар қарастырылған және нейтронды жұлдыз қабықшасындағы материяның басты сипаттамалары мен қосядролы жүйедегі нейтрондардың шашырау реакцияларының бағалаулары берілген. Сонымен қатар, нейтронды жұлдыздың аса тығыз қабықшасындағы кристалдық тор түйіндерінде тіркелген ^{21}Ne қосядросынан тұратын жүйедегі нейтронды резонанстық шашыраулар үшін жүргізілген есептеулер нәтижесі келтірілген. Резонанстық мәндер жанындағы ядролық реакциялар амплитудасының энергетикалық тәуелділігін сипаттайтын сандық есептеулер нәтижесі мен формулалары берілген.

Кілт сөздер: нейтрондық жұлдыздар, нейтрондық Ферми- сұйықтық, нейтрондық резонанстар.

Summary

D. M. Nassirova

(Kazakh national pedagogical university named after Abai, Almaty)

THE THREE-PARTICLE NEUTRON RESONANCE AND REACTION IN NEUTRON-STAR CRUST

In this work the three-particle resonances and neutron reactions in the crust of neutron stars, are the main characteristics of matter in the crust of neutron stars and evaluation of the reactions of neutron scattering on dual-core systems. The results of calculations for neutron resonance scattering systems consisting of two neon nuclei, fixed in the crystal lattice in a superdense neutron star crust. The formulas and numerical results describing the energy dependence of the amplitudes of nuclear reactions near the resonance values.

Keywords: Neutron stars, neutron Fermi liquid, neutron resonances.

Поступила 15.04.2013г