

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Application 3

Методы расчета кулоновских волновых функций и функций Уиттекера Calculation methods for Coulomb and Whittaker functions

Кулоновские функции

Особо остановимся на методах расчета кулоновских волновых функций рассеяния, регулярная $F_L(\eta, \rho)$ и нерегулярная $G_L(\eta, \rho)$ части которых являются линейно независимыми решениями радиального уравнения Шредингера с кулоновским потенциалом для состояний рассеяния, которое имеет вид [78]

$$\chi_L'(\rho) + \left(1 - \frac{2\eta}{\rho} - \frac{L(L+1)}{\rho^2}\right) \chi_L(\rho) = 0,$$

где $\chi_L = F_L(\eta, \rho)$ или $G_L(\eta, \rho)$, $\rho = kr$, а $\eta = \frac{\mu Z_1 Z_2}{\hbar^2 k}$ – кулоновский параметр. Вронскианы таких кулоновских функций имеют вид [257]

$$W_1 = F_L' G_L - F_L G_L' = 1,$$

$$W_2 = F_{L-1}' G_L - F_L G_{L-1}' = \frac{L}{\sqrt{\eta^2 + L^2}}.$$

Рекуррентные соотношения между ними записываются в форме

$$L[(L+1)^2 + \eta^2]^{1/2} u_{L+1} = (2L+1) \left[\eta + \frac{L(L+1)}{\rho} \right] u_L - (L+1)[L^2 + \eta^2]^{1/2} u_{L-1},$$

$$(L+1)u'_L = \left[\frac{(L+1)^2}{\rho} + \eta \right] u_L - [(L+1)^2 + \eta^2]^{1/2} u_{L+1} \quad ,$$

$$Lu'_L = [L^2 + \eta^2]^{1/2} u_{L-1} - \left[\frac{L^2}{\rho} + \eta \right] u_L \quad ,$$

где $u_L = F_L(\eta, \rho)$ или $G_L(\eta, \rho)$.

Асимптотика таких функций при $\rho \rightarrow \infty$ может быть представлена в виде [258]

$$F_L = \text{Sin}(\rho - \eta \ln 2\rho - \pi L / 2 + \sigma_L) \quad ,$$

$$G_L = \text{Cos}(\rho - \eta \ln 2\rho - \pi L / 2 + \sigma_L) \quad .$$

Имеется достаточно много методов и приближений для вычисления кулоновских волновых функций рассеяния [259, 260, 261, 262, 263, 264, 265]. Однако, только сравнительно недавно появилось быстро сходящееся представление, позволяющее получить их значения с высокой степенью точности и в широком диапазоне переменных с малыми затратами компьютерного времени [42, 43].

Кулоновские функции в таком методе представляются в виде бесконечных цепных дробей [266]

$$f_L = F'_L / F_L = b_0 + \frac{a_1}{b_1 + \frac{a_2}{b_2 + \frac{a_3}{b_3 + \dots}}} \quad ,$$

где

$$b_0 = (L + 1)/\rho + \eta/(L + 1) \quad ,$$

$$b_n = [2(L + n) + 1][(L + n)(L + n + 1) + \eta\rho] \quad ,$$

$$a_1 = -\rho[(L + 1)^2 + \eta^2](L + 2)/(L + 1) \quad ,$$

$$a_n = -\rho^2[(L+n)^2 + \eta^2][(L+n)^2 - 1]$$

и

$$P_L + iQ_L = \frac{G'_L + iF'_L}{G_L + iF_L} = \frac{i}{\rho} \left(b_0 + \frac{a_1}{b_1 + \frac{a_2}{b_2 + \frac{a_3}{b_3 + \dots}}} \right),$$

где

$$b_0 = \rho - \eta, \quad b_n = 2(b_0 + in),$$

$$a_n = -\eta^2 + n(n-1) - L(L+1) + i\eta(2n-1).$$

Используя приведенные выражения можно получить связь между кулоновскими функциями и их производными [267]

$$F'_L = f_L F_L,$$

$$G_L = (F'_L - P_L F_L) / Q_L = (f_L - P_L) F_L / Q_L,$$

$$G'_L = P_L G_L - Q_L F_L = [P_L (f_L - P_L) / Q_L - Q_L] F_L.$$

Такой метод расчета оказывается применим в области при $\rho \geq \eta + \sqrt{\eta^2 + L(L+1)}$, т.е. для $L = 0$ имеем $\rho > 2\eta$, и легко позволяет получить высокую точность благодаря быстрой сходимости цепных дробей. Поскольку кулоновский параметр η обычно имеет величину порядка единицы, а орбитальный момент L всегда можно положить равным нулю, то метод дает хорошие результаты уже при $\rho > 2$. Значения кулоновских функций при любом ρ и для $L > 0$ всегда можно получить из рекуррентных соотношений.

Таким образом, задавая некоторое значение F_L в точке ρ , находим все остальные функции и их производные с точностью до постоянного множителя, который определяется из бронскианов. Вычисления кулоновских функций по приведенным формулам и сравнение их с табличным материалом [257] показывает, что можно легко получить восемь - девять правильных знаков, если ρ удовлетворяет приведенному выше условию.

Ниже приведен текст компьютерной программы для вычисления кулоновских волновых функций рассеяния. Данная программа написана на алгоритмическом языке Fortran - 90 для системы PS - 4. Здесь Q – кулоновский параметр, LM – орбитальный момент данной парциальной волны, R – расстояние от центра, на котором вычисляются кулоновские функции, F и G – кулоновские функции, а W – Бронскиан, определяющий точность вычисления кулоновских функций на заданном расстоянии.

SUBROUTINE CULFUN(LM,R,Q,F,G,W)

! ****Подпрограмма расчета кулоновский функций ****

IMPLICIT REAL(8) (A-Z)

INTEGER L,K,LL,LM

EP=1.0D-015; L=0; F0=1.0D-000

GK=Q*Q

GR=Q*R

RK=R*R

B01=(L+1)/R+Q/(L+1)

K=1

BK=(2*L+3)*((L+1)*(L+2)+GR)

AK=-R*((L+1)**2+GK)/(L+1)*(L+2)

DK=1.0D-000/BK

DEHK=AK*DK

S=B01+DEHK

15 K=K+1

AK=-RK*((L+K)**2-1.D-000)*((L+K)**2+GK)

BK=(2*L+2*K+1)*((L+K)*(L+K+1)+GR)

DK=1.D-000/(DK*AK+BK)

```
IF (DK>0.0D-000) GOTO 35
25 F0=-F0
35 DEHK=(BK*DK-1.0D-000)*DEHK
S=S+DEHK
IF (ABS(DEHK)>EP) GOTO 15
FL=S
K=1
RMG=R-Q
LL=L*(L+1)
CK=-GK-LL
DK=Q
GKK=2.0D-000*RMG
HK=2.0D-000
AA1=GKK*GKK+HK*HK
PBK=GKK/AA1
RBK=-HK/AA1
AOMEK=CK*PBK-DK*RBK
EPSK=CK*RBK+DK*PBK
PB=RMG+AOMEK
QB=EPSK
52 K=K+1
CK=-GK-LL+K*(K-1.)
DK=Q*(2.*K-1.)
HK=2.*K
FI=CK*PBK-DK*RBK+GKK
PSI=PBK*DK+RBK*CK+HK
AA2=FI*FI+PSI*PSI
PBK=FI/AA2
RBK=-PSI/AA2
VK=GKK*PBK-HK*RBK
WK=GKK*RBK+HK*PBK
OM=AOMEK
EPK=EPSK
AOMEK=VK*OM-WK*EPK-OM
EPSK=VK*EPK+WK*OM-EPK
PB=PB+AOMEK
QB=QB+EPSK
IF (( ABS(AOMEK)+ABS(EPSK) )>EP) GOTO 52
```

```

PL=-QB/R
QL=PB/R
G0=(FL-PL)*F0/QL
G0P=(PL*(FL-PL)/QL-QL)*F0
F0P=FL*F0
ALFA=1.0D-000/( (ABS(F0P*G0-F0*G0P))**0.5 )
G=ALFA*G0
GP=ALFA*G0P
F=ALFA*F0
FP=ALFA*F0P
W=1.0D-000-FP*G+F*GP
IF (LM==0) GOTO 123
AA=(1.0D-000+Q**2)**0.5
BB=1.0D-000/R+Q
F1=(BB*F-FP)/AA
G1=(BB*G-GP)/AA
WW1=F**G1-F1*G-1.0D-000/(Q**2+1.0D-000)**0.5
IF (LM==1) GOTO 234
DO L=1,LM-1
AA=((L+1)**2+Q**2)**0.5
BB=(L+1)**2/R+Q
CC=(2*L+1)*(Q+L*(L+1)/R)
DD=(L+1)*(L**2+Q**2)**0.5
F2=(CC*F1-DD*F)/L/AA
G2=(CC*G1-DD*G)/L/AA
WW2=F1*G2-F2*G1-(L+1)/(Q**2+(L+1)**2)**0.5
F=F1; G=G1; F1=F2; G1=G2
ENDDO
234 F=F1; G=G1
123 CONTINUE
END

```

Результаты контрольного счета кулоновских функций для $\eta = 1$ и $L = 0$, и сравнение их с табличными данными [257] приведены в табл.ПЗ.1. Видно, что правильные результаты получаются уже для $\rho = kr = 1$. Величина вронскиана представленного в виде $W_0 - 1$, при любых $\rho \geq 1$ не превыша-

от $10^{-15} \div 10^{-16}$.

Табл.ПЗ.1. Кулоновские функции.

ρ	F_0 (Наш расчет)	F_0 [257]	G_0 (Наш расчет)	G_0 [257]
1	2.275262105105590E-001	0.22753	2.043097162103547	2.0431
5	6.849374120059441E-001	0.68494	-8.98414359092021E-001	-0.89841
10	4.775608158625742E-001	0.47756	9.428742426537808E-001	0.94287
15	-9.787895837822600E-001	-0.97879	3.404637385301291E-001	0.34046
20	-3.292255362657541E-001	-0.32923	-9.72428398697120E-001	-0.97243

Функции Уиттекера

Функция Уиттекера является решение уравнения Шредингера без ядерного потенциала для связанных состояний [257]

$$\frac{d^2 W(\mu, \nu, z)}{dz^2} - \left(\frac{1}{4} - \frac{\nu}{z} - \frac{1/4 - \mu^2}{z^2} \right) W(\mu, \nu, z) = 0 ,$$

которое можно привести к стандартному виду уравнения Шредингера

$$\frac{d^2 \chi(k, L, r)}{dr^2} - \left(k^2 + \frac{g}{r} + \frac{L(L+1)}{r^2} \right) \chi(k, L, r) = 0 ,$$

где $g = \frac{2\mu Z_1 Z_2}{\hbar^2} = 2k\eta$, $\eta = \frac{\mu Z_1 Z_2}{k\hbar^2}$ – кулоновский параметр, $z = 2kr$, $\nu = -\frac{g}{2k} = -\eta$ и $\mu = L+1/2$.

Для нахождения численных значений функции Уиттекера обычно используют ее интегральное представление

$$W(\mu, \nu, z) = \frac{z^\nu e^{-z/2}}{\Gamma(1/2 - \nu + \mu)} \int_0^\infty t^{\mu-\nu-1/2} (1+t/z)^{\mu+\nu-1/2} e^{-t} dt ,$$

которое можно привести к виду

$$W_{-\eta L + \frac{1}{2}}(z) = W\left(L + \frac{1}{2}, -\eta, z\right) = \frac{z^{-\eta} e^{-z/2}}{\Gamma(L + \eta + 1)} \int_0^1 t^{L+\eta} (1+t/z)^{L-\eta} e^{-t} dt$$

Легко видеть, что при $L = 1$ и $\eta = 1$ приведенный интеграл превращается в $\Gamma(3)$, который сокращается со знаменателем и остается простое выражение

$$W\left(1 + \frac{1}{2}, -1, z\right) = \frac{e^{-z/2}}{z} .$$

Его можно использовать далее для контроля правильности вычислений функции Уиттекера при любых значениях z , помня, что $L = 1$, $\eta = 1$ и $z = 2kr$.

Ниже приведена программа для расчета функций Уиттекера, которая использует, описанное выше интегральное представление [257].

PROGRAM UIT

```
IMPLICIT REAL(8) (A - Z)
```

```
INTEGER L
```

```
L=1
```

```
SK=1.0D-000
```

```
GK=1.0D-000
```

```
DO X=1,20
```

```
CALL WW(SK,L,GK,X,WH)
```

```
W=DEXP(-X*SK)/2.0D-000/X/SK
```

```
PRINT*, X,WH,W
```

```
ENDDO
```

END

SUBROUTINE WW(SK,L,GK,RR,WH)

```
IMPLICIT REAL(8) (A-Z)
```

```
DIMENSION VV(0:100000)
```

```
INTEGER NN,L,NNN,I
```

```
SS=(ABS(SK))**0.5
```

```

AA=GK/SS
BB=L
ZZ=1.0D-000+AA+BB
AAA=1.0D-000/ZZ
NNN=1000000
DO I=1,NNN
AAA=AAA*I/(ZZ+I)
ENDDO
GAM=AAA*NNN**ZZ
CC=2.0D-000*RR*SS
NN=10000
HH=0.0050D-000
DO I=0,NN
TT=HH*I
VV(I)=TT**(AA+BB)*(1.0D-000+TT/CC)**(BB-AA)*EXP(-
TT)
ENDDO
CALL SIMP(VV,HH,NN,SI)
WH=SI*EXP(-CC/2.0D-000)/(CC**AA*GAM)
END
SUBROUTINE SIMP(V,H,N,S)
IMPLICIT REAL(8) (A-Z)
DIMENSION V(0:10240000)
INTEGER N,II,JJ
A=0.0D-000; B=0.0D-000
A111: DO II=1,N-1,2
B=B+V(II)
ENDDO A111
B111: DO JJ=2,N-2,2
A=A+V(JJ)
END DO B111
S=H*(V(0)+V(N)+2.0D-000*A+4.0D-000*B)/3.0D-000
END

```

Здесь $A = \frac{\mu Z_1 Z_2}{k \hbar^2} = G / k$ – кулоновский параметр,

$$G = \frac{\mu Z_1 Z_2}{\hbar^2}, \quad k^2 = \frac{2\mu E}{\hbar^2} = \frac{2\mu E}{41.4686} \quad - \text{ волновое число в } \text{Фм}^{-2},$$

если E – энергия выражена в МэВ, X – расстояние от центра, равное r в Фм, $Z = 2kr$ – безразмерная переменная, L – орбитальный момент.

Ниже приведены результаты расчета функции Уиттекера при $\eta = 1$ и $k = 1$ для разных орбитальных моментов L и ее точные значения W_{ex} при $L = 1$ и $\eta = 1$.

R	W(L = 0)	
1.0000000000000000	1.020290079327840E-001	
2.0000000000000000	2.363196623576423E-002	
3.0000000000000000	6.392391215042637E-003	
4.0000000000000000	1.863857863268692E-003	
5.0000000000000000	5.684597929937536E-004	
6.0000000000000000	1.786848627416934E-004	
7.0000000000000000	5.739835037958716E-005	
8.0000000000000000	1.874246806441706E-005	
9.0000000000000000	6.199016558901119E-006	
10.0000000000000000	2.071563699444139E-006	
11.0000000000000000	6.981628624614050E-007	
12.0000000000000000	2.369723360890071E-007	
13.0000000000000000	8.092018511054453E-008	
14.0000000000000000	2.777589770610260E-008	
15.0000000000000000	9.577168790058733E-009	
16.0000000000000000	3.315309238772864E-009	
17.0000000000000000	1.151676608740117E-009	
18.0000000000000000	4.013201009814541E-010	
19.0000000000000000	1.402378280368625E-010	
20.0000000000000000	4.912856187198094E-011	
R	W(L = 1)	$W_{\text{ex}}(L = 1)$
1.0000000000000000	1.839408242280025E-001	1.839397205857212E-001
2.0000000000000000	3.383402381280602E-002	3.383382080915318E-002
3.0000000000000000	8.297894515224235E-003	8.297844727977325E-003
4.0000000000000000	2.289468597870201E-003	2.289454861091772E-003
5.0000000000000000	6.737987426912442E-004	6.737946999085467E-004
6.0000000000000000	2.065639207693961E-004	2.065626813888632E-004

7.000000000000000	6.513481691899502E-005	6.513442611103688E-005
8.000000000000000	2.096654004284359E-005	2.096641424390699E-005
9.000000000000000	6.856141363786637E-006	6.856100227037754E-006
10.000000000000000	2.270010108152015E-006	2.269996488124243E-006
11.000000000000000	7.591727727640804E-007	7.591682177384391E-007
12.000000000000000	2.560103841139389E-007	2.560088480553421E-007
13.000000000000000	8.693626803869737E-008	8.693574642234824E-008
14.000000000000000	2.969763243906337E-008	2.969745425369885E-008
15.000000000000000	1.019680519741103E-008	1.019674401672753E-008
16.000000000000000	3.516745310397776E-009	3.516724209976847E-009
17.000000000000000	1.217636046617811E-009	1.217628740819167E-009
18.000000000000000	4.230575312477445E-010	4.230549929086842E-010
19.000000000000000	1.474428961693802E-010	1.474420115141386E-010
20.000000000000000	5.152914973511605E-011	5.152884056096395E-011

Из этой таблицы видно, при $L = \eta = 1$ наблюдается совпадение с точными значениями функции с относительной ошибкой порядка 10^{-5} . При использовании $NNN = 1000$ и $NN = 1000$ с $HN = 0.015$ получаем, что эта ошибка равна $6 \cdot 10^{-3}$ или 0.6%.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Application 4

Основные астрофизические термины и понятия

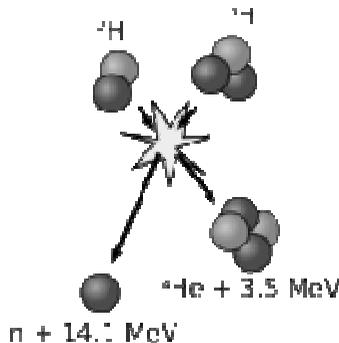
Basic astrophysical terms and concepts

Ядерная астрофизика

Новый раздел современной астрофизики, который изучает роль процессов микромира в космических явлениях. Предметом ядерной астрофизики являются ядерные процессы (термоядерные реакции) в звездах, протозвездах и других космических объектах, приводящие к выделению энергии и образованию различных химических элементов [8].

Термоядерная реакция синтеза

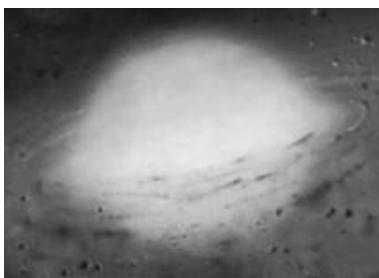
Ядерная реакция при сверхвысоких температурах. Для того чтобы произошла термоядерная реакция (реакция синтеза), заряженные атомные ядра при своем столкновении должны преодолеть силу электростатического отталкивания, а для этого они должны иметь большую кинетическую энергию. Если предположить, что кинетическая энергия ядер определяется их тепловым движением, то можно сказать, что для начала реакции синтеза нужна большая температура.



Поэтому такая ядерная реакция названа «термоядерной» – зависящей от температуры [6]. Схема такой реакции для ${}^2\text{H}{}^3\text{H}$ слияния показана на рисунке выше.

Протозвезда

Звезда на завершающем этапе своего формирования, вплоть до момента загорания термоядерных реакций (протон - протонного цикла) в ее ядре, после которого сжатие протозвезды прекращается и она становится стабильной звездой Главной последовательности [8].



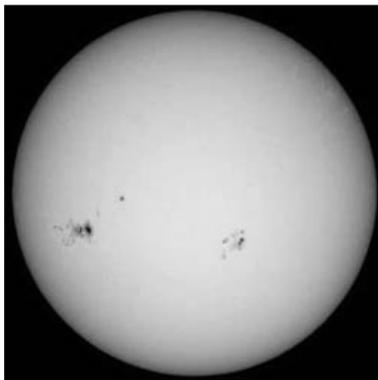
Звезда

Горячая сфера ионизированного газа или плазмы, разогреваемая за счет ядерной энергии (термоядерных реакций) и удерживаемая в относительно стабильном состоянии силами тяготения. Типичным примером звезды является наше Солнце. Большие группы звезд образуют галактики [121].

Солнце

Газовый, точнее плазменный, шар – сфера. Радиус Солнца $R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^{10}$ см, т.е. в 109 раз больше экваториального радиуса Земли; масса Солнца $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{33}$ г., т.е. в 333 000 раз больше массы Земли. В Солнце сосредоточено 99,9% массы Солнечной системы. Средняя плотность солнечного вещества $1,41 \text{ г/см}^3$, что составляет 0,256 средней плотности Земли. Солнечное вещество содержит по массе свыше 70% водорода, свыше 20% гелия и около 2% других элементов. Мощность излучения Солнца – его светимость $L_{\odot} \approx 3,86 \cdot 10^{33}$

эрг/с или $3,86 \cdot 10^{26}$ Вт, эффективная температура поверхности $T_s = 5780$ К. Солнце относится к звездам – карликам спектрального класса G2. На диаграмме спектр - светимость или диаграмме Герцшпрунга - Рассела Солнце находится в средней части главной последовательности, на которой лежат стационарные звезды, практически не изменяющие своей светимости в течение многих миллиардов лет [8].

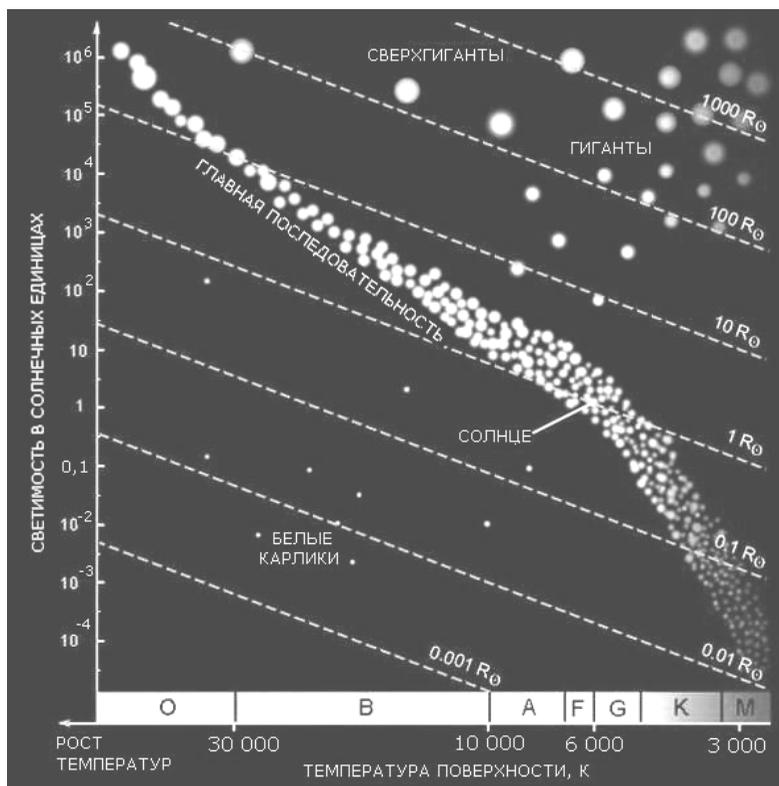


Главная последовательность

Главная последовательность пересекает диаграмму Герцшпрунга - Рассела по диагонали из верхнего левого угла (высокие светимости, ранние спектральные классы) в нижний правый угол (низкие светимости, поздние спектральные классы). Положение звезд на диаграмме Герцшпрунга - Рассела зависит от массы, химического состава и процессов выделения энергии в их недрах. Звезды на главной последовательности имеют одинаковый источник энергии (термоядерные реакции горения водорода или, так называемый, протон - протонный термоядерный цикл), так что их светимость и температура (а следовательно, положение на главной последовательности) определяются главным образом массой. Самые массивные звезды с $M \approx 50M_{\odot}$ располагаются в верхней (левой) части главной последовательности, а с продвижением вниз по главной последовательности массы звезд убывают до $M \approx 0.08M_{\odot}$ [8].

Диаграмма Герцшпрунга - Рассела

Показывает зависимость между абсолютной звездной величиной, светимостью, спектральным классом и температурой поверхности звезды. Неожиданным является тот факт, что звезды на этой диаграмме располагаются не случайно, а образуют хорошо различимые участки. Диаграмма используется для классификации звезд и соответствует современным представлениям о звездной эволюции. Диаграмма дает возможность (хотя и не очень точно) найти абсолютную величину по спектральному классу (Рисунок приводится по данным: <http://zvezdi-galakt.narod.ru/diagr1.htm>).

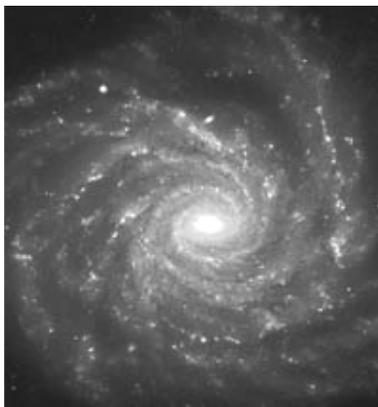


Существование главной последовательности связано с тем, что стадия горения водорода составляет $\sim 90\%$ времени

эволюции большинства звезд: выгорание водорода в центральных областях звезды приводит к образованию изотермического гелиевого ядра, переходу к стадии красного гиганта и уходу звезды с главной последовательности. Относительно краткая эволюция красных гигантов приводит, в зависимости от их массы, к образованию белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр [6].

Галактика

Гигантская звездная система, состоящая из миллиардов звезд, подобных нашему Солнцу. В ней содержится значительное количество вещества в виде газопылевых облаков и различные виды излучения. Диаметр нашей галактики около $40 \text{ КПК} = 40\,000 \text{ пк}$ [8].



Световой год

Единица расстояния, используемая в астрономии. Световой год равен длине пути, который свет проходит в вакууме за 1 тропический год: $1 \text{ св.г.} = 9.46 \cdot 10^{15} \text{ м} = 9.46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 0.307 \text{ парсек (пк)}$ [8].

Парсек

Еще одна единица астрономических расстояний: $1 \text{ парсек (пк)} = 3.26 \text{ св.г.} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3.086 \cdot 10^{16} \text{ м}$ [8].

Астрономическая единица

Среднее расстояние между центрами Земли и Солнца, примерно равное большой полуоси земной орбиты. Одна из наиболее точно определенных астрономических постоянных. Используется в качестве единицы измерения расстояний между телами в Солнечной системе. Астрономическая единица $1 \text{ (а.е.)} = 149\,597\,870 \pm 2 \text{ км}$ [8].

Красный гигант

Холодные с $T_{\text{вн}} \approx 3000 \div 5000 \text{ К}$, большие звезды $R = (10 \div 200) R_{\odot}$ и высокой светимостью $L \approx 10^2 \div 10^4 L_{\odot}$. Имеют маленькое инертное ядро, состоящее из гелия и слоевой источник вокруг ядра, в котором горит водород, причем такая звезда имеет очень протяженную конвективную зону [8].

Белый карлик

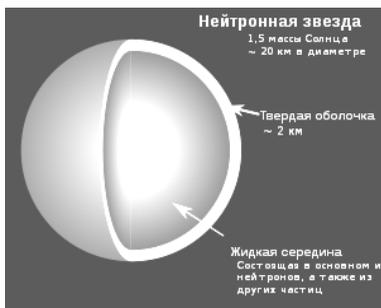
Это проэволюционировавшие звезды с массой, не превышающей предел Чандрасекара (максимальная масса, при которой звезда может существовать, как белый карлик), лишённые собственных источников термоядерной энергии.

Белые карлики представляют собой компактные звезды с массами, сравнимыми с массой Солнца, но с радиусами в ~ 100 и, соответственно, светимостями в $\sim 10\,000$ раз меньше, чем солнечной. Плотность белых карликов составляет $10^5 \div 10^9 \text{ г/см}^3$, что почти в миллион раз выше плотности обычных звезд главной последовательности. По численности белые карлики составляют по разным оценкам $3 \div 10\%$ звездного населения нашей Галактики [8]. Белые карлики происходят из сжавшихся остывающих ядер нормальных звезд, на заключительном этапе эволюции, сбросивших с себя оболочку. В отличие от обычных звезд, в белом карлике не идут термоядерные реакции и он светится исключительно за счет остывания [6]. Если масса белого карлика превышает предел Чандрасекара, он превращается в нейтронную звезду.

Нейтронная звезда

Это астрономическое тело, один из конечных продуктов

эволюции звезд, состоит из нейтронной сердцевины и тонкой коры вырожденного вещества с преобладанием ядер железа и никеля.



Нейтронные звезды имеют очень малый размер – 20 ÷ 30 км в диаметре, средняя плотность вещества такой звезды в несколько раз превышает плотность атомного ядра, которая для тяжелых ядер составляет в среднем $2,8 \times 10^{17}$ кг/м³.

Массы большинства известных нейтронных звезд близки к 1,44 массы Солнца, что равно значению предела Чандрасекара [6]. Если масса нейтронной звезды превышает предел Оппенгеймера - Волкова, она превращается в черную дыру.

Черная дыра

Это область в пространстве - времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть ее не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света. Граница этой области называется горизонтом событий, а ее характерный размер – гравитационным радиусом. В простейшем случае сферически симметричной черной дыры он равен радиусу Шварцшильда $r_s = \frac{2GM}{c^2}$, где c – скорость света, M – масса тела, G – гравитационная постоянная. Теоретически возможность существования таких областей пространства - времени следует из некоторых точных решений уравнений Эйнштейна [6].

Предел Чандрасекара

Предельная масса белого карлика, в котором гравитационное равновесие поддерживается давлением вырожденного электронного газа. Значение этой массы слегка зависит от химического состава белого карлика и лежит в интервале $M = 1.38 \div 1.44 m_{\odot}$ [8].

Предел Оппенгеймера - Волкова

Верхний предел массы нейтронной звезды, при которой давление вырожденного нейтронного газа уже не может компенсировать силы гравитации, что приводит к ее коллапсу в черную дыру. Одновременно предел Оппенгеймера - Волкова является нижним пределом массы черных дыр, образующихся в ходе эволюции звёзд. Современные (2008г.) оценки предела Оппенгеймера - Волкова лежат в пределах $2,5 \div 3$ солнечных масс m_{\odot} [6].

Планета

(от греческого *aster planets* – блуждающая звезда)

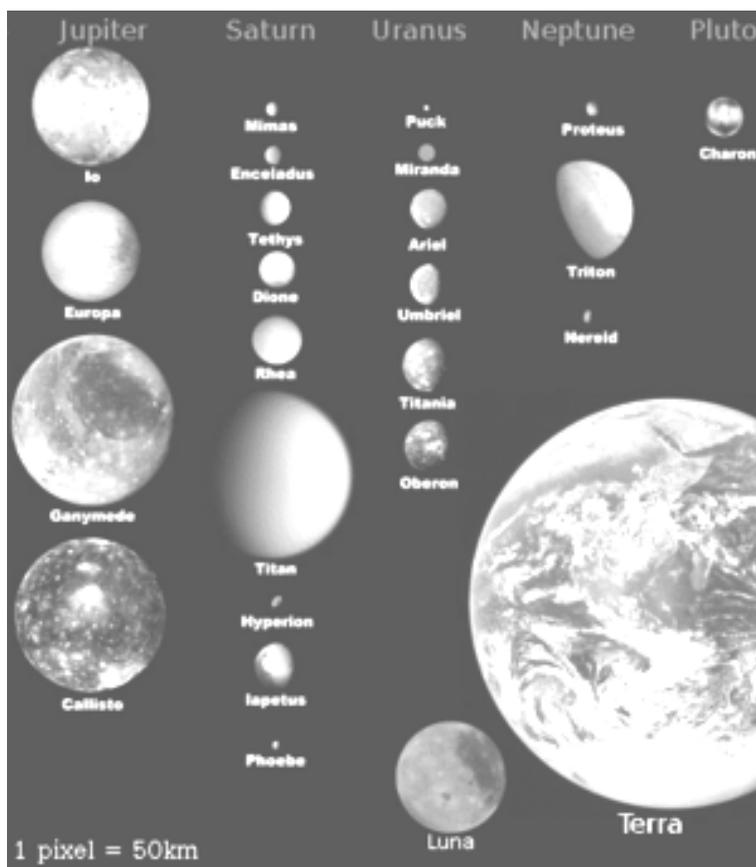
Небесное тело, движущееся вокруг Солнца (или любой звезды) в его гравитационном поле и светящееся отраженным солнечным светом. Масса планеты слишком мала для того, чтобы внутри нее могли протекать характерные для звездных недр ядерные реакции. Ядерные реакции не могут "зажигаться" в недрах тел, имеющих массу меньше, примерно, 0.1 массы Солнца m_{\odot} [8].



Спутник

(малые планеты)

Небесное тело, обращающееся по определённой траектории (орбите) вокруг другого объекта (например, планеты) в космическом пространстве, под действием гравитации. Различают искусственные и естественные спутники. Почти у всех планет нашей Солнечной системы имеются естественные спутники [6]



История Вселенной, Солнца и Земли

Считается, что сингулярность Вселенной была 20 млрд. лет

назад [268] (хотя по новым данным это примерно 14 млрд. лет). Данные, приведенные здесь и в следующей таблице, несколько отличаются – они взяты из разных источников.

Время	Эпоха	Событие	Время от сего- дняшнего момента, лет
0	Сингулярность	Большой Взрыв	20 млрд.
10^{-43} с	Планковский момент	Рождение частиц	20 млрд.
10^{-6} с	Адронная эра	Аннигиляция протон-антипротонных пар	20 млрд.
1 с	Лептонная эра	Аннигиляция электрон-позитронных пар	20 млрд.
1 мин	Радиационная эра	Ядерный синтез гелия, дейтерия	20 млрд.
1 неделя		Излучение к этой эпохе термализуется	20 млрд.
10000 лет	Эра вещества	Во Вселенной начинает доминировать вещество	20 млрд.
300000 лет		Вселенная становится прозрачной для излучения	19.7 млрд.
1-2 млрд. лет		Начало образования галактик	18-19 млрд.
3 млрд. лет		Образование скопления галактик	17 млрд.
4 млрд. лет		Сжатие нашей протогалактики	16 млрд.
4.1 млрд. лет		Образование первых звезд	15.9 млрд.
5 млрд. лет		Рождение квазаров, образование звезд	15 млрд.

10 млрд. лет		Образование звезд	10 млрд.
15.2 млрд. лет		Образование межзвездного облака, давшего начало Солнечной системе	4.8 млрд.
15.3 млрд. лет		Сжатие протосолнечной туманности	4.7 млрд.
15.4 млрд. лет		Образование планет, затверждение пород	4.6 млрд.
16.1 млрд. лет	Архезойская эра	Образование самых старых земных пород	3.9 млрд.
17 млрд. лет		Зарождение микроорганизмов	3 млрд.
18 млрд. лет	Протозойская эра	Возникновение богатой кислородом атмосферы	2 млрд.
19 млрд. лет	Палеозойская эра	Зарождение макроскопических форм	1 млрд.
19.4 млрд. лет		Самые ранние окаменелости	600 млн.
19.55 млрд. лет		Первые растения на суше	450 млн.
19.6 млрд. лет		Рыбы	400 млн.
19.75 млрд. лет		Хвойные, образование гор	250 млн.
19.8 млрд. лет	Мезозойская эра	Рептилии	200 млн.
19.85 млрд. лет	Кайнозойская эра	Динозавры, дрейф континентов	150 млн.
19.95 млрд. лет		Первые млекопитающие	50 млн.
20 млрд. лет		Человек (<i>Homo sapiens</i>)	2 млн.

Характеристики Вселенной

Основные, более современные, чем в предыдущей таблице, характеристики Вселенной и некоторые этапы ее эволюции [2].

$t = 0$		<p>Большой взрыв. Рождение Вселенной</p> $\rho(\text{г/см}^3) = \frac{5 \cdot 10^5}{t^2(\text{с})}, T(\text{К}) = \frac{10^{10}}{\sqrt{t(\text{с})}}$
$t = 10^{-43}$ с		<p>Эра квантовой гравитации. Струны</p> $\rho = 10^{90} \text{ г/см}^3, T = 10^{32} \text{ К}$
$t = 10^{-35}$ с		<p>Кварк-глюонная среда</p> $\rho = 10^{75} \text{ г/см}^3, T = 10^{28} \text{ К}$
$t = 1$ мкс		<p>Кварки объединяются в нейтроны и протоны</p> $\rho = 10^{17} \text{ г/см}^3, T = 6 \cdot 10^{12} \text{ К}$
$t = 100$ с		<p>Образование дозвездного ${}^4\text{He}$</p> $\rho = 50 \text{ г/см}^3, T = 10^9 \text{ К}$
$t = 380$ тыс. лет		<p>Образование нейтральных атомов</p> $\rho = 0,5 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3, T = 3 \cdot 10^3 \text{ К}$
$t = 10^8$ лет	ПЕРВЫЕ ЗВЕЗДЫ	<p>Горение водорода в звездах</p> $\rho = 10^2 \text{ г/см}^3, T = 2 \cdot 10^6 \text{ К}$
		<p>Горение гелия в звездах</p> $\rho = 10^3 \text{ г/см}^3, T = 2 \cdot 10^8 \text{ К}$
		<p>Горение углерода в звездах</p> $\rho = 10^5 \text{ г/см}^3, T = 8 \cdot 10^8 \text{ К}$
		<p>Горение кислорода в звездах</p> $\rho = 10^5 + 10^6 \text{ г/см}^3, T = 2 \cdot 10^9 \text{ К}$
		<p>Горение кремния в звездах</p> $\rho = 10^6 \text{ г/см}^3, T = (3 + 5) \cdot 10^9 \text{ К}$
$t = 13,7$ млрд. лет		<p>Современная Вселенная</p> $\rho = 10^{-30} \text{ г/см}^3, T = 2,73 \text{ К}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

List of the literature

1. Ядерная астрофизика / Под. ред. У. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрама. М.: Мир, 1986. 519 с.
2. Капитонов И.М., Ишханов Б.С., Тутынь И.А. Нуклеосинтез во вселенной. М.: Либроком, 2009; Ишханов Б.С. Нуклеосинтез // <http://nuclphys.sinp.msu.ru/lect/index.html>.
3. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М.: ЛКИ, 2008. 552 с.
4. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. М.: Фрязино, 2006. 496 с.; Постнов К.А. Лекции по общей астрофизике для Физиков // <http://www.astronet.ru:8101/db/msg/1170612/index.html>.
5. Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984. 384 с.
6. <http://ru.wikipedia.org>.
7. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция вселенной. М.: Наука, 1975. 735 с.
8. <http://astronet.ru>.
9. Гуляев С.А., Жуковский В.М., Комов С.В. Система мира // <http://detc.usu.ru/assets/ansci0011/general/index.html>.
10. Epelbaum E, Gloeckle W., Meissner U.G. The two-nucleon system at next-to-next-to-next-to-leading order // Nucl. Phys. 2005. V. A747. P. 362-424; Epelbaum A. et al. Three-nucleon forces from chiral effective field theory // Phys. Rev. 2002. V. C66. P. 064001-1-064001-17; Epelbaum E. Four-nucleon force using the method of unitary transformation // Eur. Phys. J. 2007. V. A34. P. 197-214.
11. Фаддеев Л.Д. Теория рассеяния для системы из трех частиц // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. С. 1459-1467.
12. Якубовский О.А. Об интегральных уравнениях теории рассеяния для N частиц // ЯФ. 1967. Т. 5. С. 1312-1320.
13. Grassberger P. and Sandhas W. Systematical treatment of

the non-relativistic N-particle scattering problem // Nucl. Phys. 1967. V. B2. P. 181-206; Alt E.O., Grassberger, P. and Sandhas W. Systematical and practical treatment of the few-body problem // JINR Report No. E4-6688. Dubna. 1972.

14. Deltuva A., Fonseca A.C. Four-body calculation of proton- ^3He scattering // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98 . P. 162502-1-162502-4; Deltuva A., Fonseca A.C. Ab initio four-body calculation of n- ^3He , p- ^3H , and d-d scattering // Phys. Rev. 2007. V. C76. P. 021001-1(R) -0211001-4(R).

15. Lazauskas R. Elastic proton scattering on tritium below the n- ^3He threshold // Phys. Rev. 2009. V. C79. P. 054007-1-054007-5.

16. Tang Y.C., Lemere M., Thompson D.R. Resonating-group method for nuclear many-body problems // Phys. Rep. 1978. V. 47. P. 167-223.

17. Navratil P., Vary J.P., and Barrett B.R. Properties of ^{12}C in the ab initio nuclear shell model // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 5728-5731.

18. Quaglioni S. and Navratil P. Ab initio many-body calculations of n- ^3H , n- ^4He , p- $^3,4\text{He}$, and n- ^{10}Be scattering // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. P. 092501-1-092501-4.

19. Kievsky A., Viviany M., Rosati S. Polarization observables in p-d elastic scattering below 30 MeV // Phys. Rev. 2001. V. C64. P. 024002-1-024002-18.

20. Дубовиченко С.Б. Свойства легких атомных ядер в потенциальной кластерной модели. Алматы: Данекер, 2004. 248 с.

21. Загуский В.Л. Справочник по численным методам решения уравнений. М.: Физ. мат. лит., 1960. 215 с.

22. Мелентьев П.В. Приближенные вычисления. М.: Физ. мат. лит., 1962. 387 с.

23. Демидович Б.П., Марон И.Ф. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664 с.

24. Дубовиченко С.Б. Методы расчета ядерных характеристик. Алматы: Комплекс, 2006. 311 с.

25. Немец О.Ф. и др. Нуклонные ассоциации в атомных ядрах и ядерные реакции многонуклонных передач. Киев:

Наукова Думка, 1988. 488 с.

26. Baktybaev M.K. et al. The scattering of protons from ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ nuclei // The Fourth Eurasian Conference “Nuclear Science and its Application”. October 31-November 3. Baku. Azerbaijan. 2006. P. 62; Burtebaev N. et al. The new experimental data on the elastic scattering of protons from ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{16}\text{O}$ and ${}^{27}\text{Al}$ nuclei // Book of Abstracts the Fifth Eurasian Conference on “Nuclear Science and its Application”. October 14-17. Ankara. Turkey. 2008. P. 40.

27. Zazulin D.M. et al. Scattering of protons from ${}^{12}\text{C}$ // The Sixth International conference “Modern Problems of Nuclear Physics” September 19-22. Tashkent. Uzbekistan. 2006. P. 127; Baktybaev M.K. et al. Elastic scattering of protons from ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ and ${}^{27}\text{Al}$ // The 4th Eurasia Conf. “Nucl. Sci. and its Appl.” Baku. Azerbaijan. 2006. P. 56.

28. Neudatchin V.G. et al. Generalized potential-model description of mutual scattering of the lightest p+d, d+ ${}^3\text{He}$ nuclei and the corresponding photonuclear reactions // Phys. Rev. 1992. V. C45. P. 1512-1527.

29. Дубовиченко С.Б. Фотопроцессы в Nd и d ${}^3\text{He}$ системах на основе кластерных моделей для потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ. 1995. Т. 58. С. 1253-1259.

30. Дубовиченко С.Б., Узиков Ю.Н. Астрофизические S-факторы фотоядерных реакций на легких ядрах // ЭЧАЯ. 2011. №2.

31. Fowler W.A., Caughlan G.R., Zimmerman B.A. Thermonuclear reaction rates, II // Ann. Rev. Astr. Astrophys. 1975. V. 13. P. 69-112.

32. Mohr P.J., Taylor B.N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002 // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77(1). P. 1-107.

33. Angulo C. et al. A compilation of charged-particle induced thermonuclear reaction rates // Nucl. Phys. 1999. V. A656. P. 3-183.

34. Варшалович Д.А., Москалев А.Н., Херсонский В.К. Квантовая теория углового момента. Л.: Наука, 1975. 436 с.

35. http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mudlsearch_for

=atomnuc!

36. Айзенберг И., Грайнер В. Механизмы возбуждения ядра. М.: Атомиздат, 1973. 347 с.

37. Plattner G.R., Viollier R.D. Coupling constants of commonly used nuclear probes // Nucl. Phys. 1981. V. A365. P. 8-12.

38. Mukhamedzhanov A.M., Tribble R. E. Connection between asymptotic normalization coefficients, sub threshold bound states, and resonances // Phys. Rev. 1999. V. C59. P. 3418-3424.

39. Блохинцев Л.Д., Борбей И., Долинский Э.И. Ядерные вершинные константы // ЭЧАЯ. 1977. Т. 8. С. 1189-1245.

40. Марчук Г.И., Колесов В.Е. Применение численных методов для расчета нейтронных сечений. М.: Атомиздат, 1970. 304с.

41. Абрамовиц И.Г. и др. Справочная математическая библиотека. Математический анализ. Дифференцирование и интегрирование. М.: Физ. мат. лит., 1961. 350 с.

42. Barnet A. et al. Coulomb wave function for all real η and ρ // Comput. Phys. Comm. 1974. V. 8. P. 377-395.

43. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Методы расчета кулоновских функций и фаз рассеяния // Вестник КазНПУ физ.-мат. Алматы. 2003. № 1(7). С. 115-122.

44. Itzykson C., Nauenberg M. Unitary groups: Representations and decompositions // Rev. Mod. Phys. 1966. V. 38. P. 95-101.

45. Ходгсон П.Е. Оптическая модель упругого рассеяния. М.: Атомиздат, 1966. 230 с.

46. Дубовиченко С.Б. Фазовый анализ упругого ${}^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния в области энергий 40-50 МэВ // ЯФ. 2008. Т. 71. С. 66-75.

47. Дубовиченко С.Б., Такибаев Н.Ж., Чечин Л.М. Физические процессы в дальнем и ближнем космосе. Алматы: Дайк-Пресс, 2008. 228 с.

48. Kukulin V.I. et al. Detailed study of the cluster structure of light nuclei in a three-body model : (I). Ground state of ${}^6\text{Li}$ // Nucl. Phys. 1984. V. A417. P. 128-156.

49. Скорняков Л.А. Справочная математическая библио-

тека. Общая алгебра. М.: Наука, 1990. 591 с.

50. Попов Б.А., Теслер Г.С. Вычисление функций на ЭВМ. Киев: Наукова думка, 1984. 598 с.

51. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Мир, 1974. 832 с.

52. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Методы решения обобщенной задачи на собственные значения // Вестник КазНПУ физ.-мат. Алматы. 2003. № 1(7). С. 110-115; Дубовиченко С.Б. Некоторые методы решения задач ядерной физики на связанные состояния // Вестник КазНУ сер. физ. Алматы. 2008. № 1. С. 49-58.

53. Дубовиченко С.Б. Альтернативный метод решения обобщенной матричной задачи на собственные значения // Изв. НАН РК физ.-мат. сер. 2007. № 4. С. 52-55.

54. Михлин С.Г., Смолицкий Х.Л. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. М.: Наука, 1965. 383 с.

55. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Современные методы программирования актуальных физических задач // Труды конф. Современные проблемы и задачи информатизации в Казахстане. КазНТУ. Алматы. Казахстан. 6-10 октября 2004. С. 358-390.

56. Блат Дж., Вайскопф В. Теоретическая ядерная физика. М.: ИЛ, 1954. 658 с.

57. Fowler W.A. Experimental and theoretical nuclear astrophysics: the quest for the original of the elements // Nobel Lecture. Stockholm. 8 Dec. 1983; Фаулер У.А. Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов // УФН. 1985. Т. 145. С. 441-488.

58. Snover K.A. // Solar p-p chain and the ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ S-factor // University of Washington, CEPRA. NDM03. 1/6/2008.

59. Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factor of the radiative $p^2\text{H}$ capture // Euro. Phys. Jour. 2009. V. A39. № 2, P. 139-143.

60. Schiavilla R., Pandaripande V.R., Wiringa R.B. Momentum distributions in $A=3$ and 4 nuclei // Nucl. Phys. 1986. V.

A449. P. 219-242.

61. Uzikov Yu.N. Backward elastic $p^3\text{He}$ scattering and high momentum components of ^3He wave function // Phys. Rev. 1998. V. C58. P. 36-39.

62. Uzikov Yu.N. and Haidenbauer J. ^3He structure and mechanism of $p^3\text{He}$ elastic scattering // Phys. Rev. 2003. V. C68. P. 014001-1-014001-6.

63. Schmelzbach P. et al. Phase shift analysis of $p^2\text{H}$ elastic scattering // Nucl. Phys. 1972. V. A197. P. 273-289; Arvieux J. Analyse en dephasages des sections efficaces et polarisations dans la diffusion elastique $p^2\text{H}$ // Nucl. Phys. 1967. V. A102. P. 513-528; Chauvin J., Arvieux J. Phase shift analysis of spin correlation coefficients in $p^2\text{H}$ scattering // Nucl. Phys. 1975. V. A247. P. 347-358; Huttel E. et al. Phase shift analysis of $p^2\text{H}$ elastic scattering below break-up threshold // Nucl. Phys. 1983. V. A406. P. 443-455.

64. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Потенциальное описание процессов упругого Nd , dd , $\text{N}\alpha$ и $\text{d}\tau$ рассеяния // ЯФ. 1990. Т. 51. С. 1541-1550.

65. Griffiths G.M., Larson E.A., Robertson L.P. The capture of proton by deuteron // Can. J. Phys. 1962. V. 40. P. 402-411.

66. Ma L. et al. Measurements of $^1\text{H}(\text{d}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ and $^2\text{H}(\text{p}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ at very low energies // Phys. Rev. 1997. V. C55. P. 588-596.

67. Schimid G.J. et al. The $^2\text{H}(\text{p}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ and $^1\text{H}(\text{d}\rightarrow,\gamma)^3\text{He}$ reactions below 80 keV // Phys. Rev. 1997. V. C56. P. 2565-2681.

68. Casella C. et al. First measurement of the $\text{d}(\text{p},\gamma)^3\text{He}$ cross section down to the solar Gamow peak // Nucl. Phys. 2002. V. A706. P. 203-216.

69. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор радиационного $p^2\text{H}$ захвата при низких энергиях // Доклады НАН РК 2008. Т. 60. № 3, С. 33-38.

70. Tilley D.R., Weller H.R., Hasan H.H. Energy Levels of Light Nuclei $A = 3$ // Nucl. Phys. 1987. V. A474. P. 1-60.

71. Tilley D.R., Weller H.R., Hale G.M. Energy levels of light nuclei $A = 4$ // Nucl. Phys. 1992. V. A541. P. 1-157.

72. Киржниц Д.А. Содержится ли дейтрон внутри тритона? // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28 С. 479-481.
73. Bornard M. et al. Coupling constants for several light nuclei from a dispersion analysis of nucleon and deuteron scattering amplitudes // Nucl. Phys. 1978. V. A294. P. 492-512.
74. Plattner G.R., Bornard M., Viollier R.D. Accurate determination of the ^3He -pd and ^3He -pd* coupling constants // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 39. P. 127-130.
75. Lim T.K. Normalization of the tail of the trinucleon wave function // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 30. P. 709-710.
76. Kievsky A. et al. The three-nucleon system near the N-d threshold // Phys. Lett. 1997. V. B406. P. 292-296.
77. Ayer Z. et al. Determination of the asymptotic D- to S-state ratio for ^3He via (d, ^3He) reactions // Phys. Rev. 1995. V. C52. P. 2851-2858.
78. Мотт Н., Месси Г. Теория атомных столкновений. М.: Мир, 1969. 756 с.
79. Schimd G.J. et al. Effects of Non-nucleonic Degrees of Freedom in the D(p \rightarrow , γ) ^3He and p(d \rightarrow , γ) ^3He Reactions // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 3088-3091.
80. Schimd G.J. et al. Polarized proton capture by deuterium and the $^2\text{H}(p,\gamma)^3\text{He}$ astrophysical S-factor // Phys. Rev. 1995. V. 52. P. R1732-R1732.
81. Viviani M., Schiavilla. R., Kievsky A. Theoretical study of the radiative capture reactions $^2\text{H}(n,\gamma)^3\text{H}$ and $^2\text{H}(p,\gamma)^3\text{He}$ at low energies // Phys. Rev. 1996. V. C54. P. 534-553.
82. Warren J.B. et al. Photodisintegration of ^3He near the Threshold // Phys. Rev. 1963. V. 132. P. 1691-1692.
83. Berman B.L., Koester L.J., Smith J.H. Photodisintegration of ^3He // Phys. Rev. 1964. V. 133. P. B117-B129.
84. Fetisov V.N., Gorbunov A.N., Varfolomeev A.T. Nuclear photo effect on three-particle nuclei // Nucl. Phys. 1965. V. 71. P. 305-342.
85. Ticcioni G. et al. The two-body photodisintegration of ^3He // Phys. Lett. 1973. V. B46. P. 369-371.
86. Geller K.N., Muirhead E.G., Cohen L.D. The $^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$

reaction at the breakup threshold // Nucl. Phys. 1967. V. A96. P. 397-400.

87. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Электромагнитные эффекты в легких ядрах на основе потенциальной кластерной модели // ЭЧАЯ. 1997. Т. 28. С. 1529-1594.

88. Дубовиченко С.Б. М1 процесс и астрофизический S - фактор реакции $p^2\text{H}$ захвата // Изв. ВУЗов физ. 2011.

89. Дубовиченко С.Б. Фазовый анализ $p^{12}\text{C}$ рассеяния при астрофизических энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2008. С. 21-27.

90. Дубовиченко С.Б. Метод невязок для решения задачи на собственные значения для системы дифференциальных уравнений второго порядка // Изв. НАН РК, физ.-мат. сер., 2007. №4. С.49.

91. Хюльтен Л., Сугавара М., Проблема взаимодействия двух нуклонов. Строение атомного ядра. М.: ИЛ, 1959. С. 9-98.

92. Дубовиченко С.Б. Методы расчета и компьютерная программа для вычисления ядерных характеристик связанных состояний в потенциалах с тензорной компонентой. Алматы, Каз. Гос. ИНТИ. 1997. 29с.

93. Reid R.V. Local phenomenological nucleon-nucleon potentials. Ann. Phys. 1968. V. 50. P. 411-448.

94. Дубовиченко С.Б., Неудачин В.Г., Сахарук А.А., Смирнов Ю.Ф. Обобщенное потенциальное описание взаимодействия легчайших ядер pt и ph // Изв. АН СССР сер. физ. 1990. Т. 54. С. 911-916; Neudatchin V.G., Sakharuk A.A., Dubovichenko S.B. Photodisintegration of ^4He and supermultiplet potential model of cluster-cluster interaction // Few Body Systems. 1995. V. 18. P. 159-172.

95. Berg H. et al. Differential cross section, analyzing power and phase shifts for $p^3\text{He}$ elastic scattering below 1.0 MeV // Nucl. Phys. 1980. V. A334. P. 21-34; Kavanagh R.W., Parker P.D. He+p elastic scattering below 1 MeV // Phys. Rev. 1966. V. 143. P. 779-782; Morrow L., Haerberli W. Proton polarization in $p^3\text{He}$ elastic scattering between 4 and 11 MeV // Nucl. Phys. 1969. V. A126. P. 225-232.

96. Дубовиченко С.Б. Фотопроцессы в $p^3\text{H}$ и $n^3\text{He}$ кана-

лах ядра ${}^4\text{He}$ на основе потенциальных кластерных моделей // ЯФ. 1995. Т. 58. С. 1377-1384.

97. Tombrello T.A. Phase shift analysis for ${}^3\text{He}(p,p){}^3\text{He}$ // Phys. Rev. 1965. V. 138. P. B40-B47.

98. Yoshino Y. et al. Phase shift of $p{}^3\text{He}$ scattering at low energies // Prog. Theor. Phys. 2000. V. 103. P. 107-125.

99. McSherry D.H., Baker S.D. ${}^3\text{He}$ polarization measurements and phase shifts for $p{}^3\text{He}$ elastic scattering // Phys. Rev. 1970. V. C1. P. 888-892.

100. Drigo L., Pisent G. Analysis of the $p{}^3\text{He}$ low energy interaction // Nuovo Cim. 1967. V. BLI. P. 419-436.

101. Szaloky G., Seiler F. Phase shift analysis of ${}^3\text{He}(p,p){}^3\text{He}$ elastic scattering // Nucl. Phys. 1978. V. A303. P. 57-66.

102. Tombrello T.A. et al. The scattering of protons from ${}^3\text{He}$ // Nucl. Phys. 1962. V. 39. P. 541-550.

103. McIntosh J.S., Gluckstern R.L., Sack S. Proton triton interaction // Phys. Rev. 1952. V. 88. P. 752-759.

104. Frank R.M., Gammel J.L. Elastic scattering of proton by ${}^3\text{He}$ and ${}^3\text{H}$ // Phys. Rev. 1955. V. 99. P. 1406-1410.

105. Kankowsky R. et al. Elastic scattering of polarized protons on tritons between 4 and 12 MeV // Nucl. Phys. 1976. V. A263. P. 29-46.

106. Аркатов Ю.М. и др. Изучение реакции ${}^4\text{He}(\gamma,p){}^3\text{H}$ при максимальной энергии гамма излучения 120 МэВ // ЯФ. 1970. Т. 12. С. 227-233.

107. Hahn K. et al. ${}^3\text{H}(p,\gamma){}^4\text{He}$ cross section // Phys. Rev. 1995. V. C51. P. 1624-1632.

108. Canon R. et al. ${}^3\text{H}(p,\gamma){}^4\text{He}$ reaction below $E_p = 80$ keV // Phys. Rev. 2002. V. C65. P. 044008.1-04408.7.

109. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор радиационного $p{}^3\text{H}$ захвата при низких энергиях // Известия НАН РК физ.-мат. сер. 2008. №4. С. 89-92; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factors of the $p{}^2\text{H}$ and $p{}^3\text{H}$ radiative capture at low energies // Uz. J. Phys. 2008. V. 10. № 6. P. 364-370.

110. Lim T.K. ${}^3\text{He}$ -n vertex constant and structure of ${}^4\text{He}$ // Phys. Lett. 1975. V. B55. P. 252-254; Lim T.K. Normalization of the p- ${}^3\text{H}$ and n- ${}^3\text{He}$ tails of ${}^4\text{He}$ and the ${}^4\text{He}$ charge from factor // Phys. Lett. 1973. V. B44. P. 341-342.
111. Gibson B.F. Electromagnetic disintegration of the $A = 3$ and $A = 4$ nuclei // Nucl. Phys. 1981. V. A353. P. 85-98.
112. Дубовиченко С.Б. Астрофизические S-факторы радиационного p ${}^2\text{H}$ и p ${}^3\text{H}$ захвата // Изв. ВУЗов физ. 2009. № 3. С. 68-73.
113. Perry J.E., Bame S.J. ${}^3\text{H}(p,\gamma){}^4\text{He}$ reaction // Phys. Rev. 1955. V. 99. P. 1368-1375.
114. Balestra F. et al. Photodisintegration of ${}^4\text{He}$ in Giant-Resonance Region // Nuo. Cim. 1977. V. 38A. P. 145-166.
115. Meyerhof W. et al. ${}^3\text{He}(p,\gamma){}^4\text{He}$ reaction from 3 to 18 MeV // Nucl. Phys. 1970. V. A148. P. 211-224.
116. Feldman G. et al. ${}^3\text{H}(p,\gamma){}^4\text{He}$ reaction and the $(\gamma,p)/(\gamma,n)$ ratio in ${}^4\text{He}$ // Phys. Rev. 1990. V. C42. P. R1167- R1170.
117. Clegg T., Barnard C., Swint J., Well J. The elastic scattering of protons from ${}^3\text{He}$ from 4.5 to 11.5 MeV // Nucl. Phys. 1964. V. 50. P. 621-628.
118. Tombrello T.A., Jones C.M., Phillips G.C., Weil J.L. The scattering of protons from ${}^3\text{He}$ // Nucl. Phys. 1962. V. 39. P. 541-550.
119. Дубовиченко С.Б. и др. Астрофизический S-фактор радиационного p ${}^6\text{Li}$ захвата при низких энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2010. №7. С. 78-85; Дубовиченко С.Б. и др. Астрофизический S-фактор реакции p ${}^6\text{Li}$ → ${}^7\text{Be}\gamma$ захвата // ЯФ. 2011. Т. 74. №3.
120. Skill M. et al. Differential cross section and analyzing power for elastic scattering of protons on ${}^6\text{Li}$ below 2.2 MeV // Nucl. Phys. 1995. V. A581. P. 93-106.
121. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt>
122. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В., Сахарук А.А. Потенциальное описание упругого N ${}^6\text{Li}$ и α т рассеяния // ЯФ. 1993. Т. 56. С. 90-106.
123. Неудачин В.Г., Сахарук А.А., Смирнов Ю.Ф. Обоб-

ценное потенциальное описание взаимодействия легчайших кластеров - рассеяние и фотоядерные реакции // ЭЧАЯ. 1992. Т. 23. С. 480-541; Неудачин В.Г., Стружко Б.Г., Лебедев В.М. Супермультиплетная потенциальная модель взаимодействия легчайших кластеров и единое описание различных ядерных реакций // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36. С. 888-941.

124. Petitjean C., Brown L., Seyler R. Polarization and phase shifts in ${}^6\text{Li}(p,p){}^6\text{Li}$ from 0.5 to 5.6 MeV // Nucl. Phys. 1969. V. A129. P. 209-219.

125. Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. М.: Наука, 1969. 414 с.

126. Tilley D.R. et al. Energy levels of light nuclei $A=5,6,7$ // Nucl. Phys. 2002. V. A708. P. 3-163.

127. Switkowski Z.E. et al. Cross section of the reaction ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ // Nucl. Phys. 1979. V. A331. P. 50-60; Bruss R. et al. Astrophysical S-factors for the radiative capture reaction ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ at low energies // Proc. 2nd Intern. Symposium on Nuclear Astrophysics. Nuclei in the Cosmos. Karlsruhe. Germany. 6-10 July. 1992. Kappeler F., Wisshak K., Eds. IOP Publishing Ltd. Bristol. England. 1993. P. 169.

128. Arai K., Baye D., Descouvemont P. Microscopic study of the ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ and ${}^6\text{Li}(p,\alpha){}^3\text{He}$ reactions // Nucl. Phys. 2002. V. A699. P. 963-975.

129. Prior R. M. et al. Energy dependence of the astrophysical S factor for the ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ reaction // Phys. Rev. 2004. V. C70. P. 055801-055809.

130. Burker F.C. Neutron and proton capture by ${}^6\text{Li}$ // Austr. J. Phys. 1980. V. 33. P. 159-176.

131. Cecil F.E. et al. Radiative capture of protons by light nuclei at low energies // Nucl. Phys. 1992. V. A539. P. 75-96.

132. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор радиационного $p{}^6\text{Li}$ захвата // Доклады НАН РК. 2009. № 6. С. 41-45.

133. Дубовиченко С.Б., Зазулин Д.М. Фазовый анализ упругого $p{}^6\text{Li}$ рассеяния при астрофизических энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2010. №5. С. 20-25.

134. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор радиационного $p^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N}\gamma$ захвата // Изв. ВУЗов России физ. 2009. № 8. С. 58-73.

135. Дубовиченко С.Б. Астрофизические S-факторы радиационного ${}^3\text{He}^4\text{He}$, ${}^3\text{H}^4\text{He}$ и ${}^2\text{H}^4\text{He}$ захвата // ЯФ. 2010. Т. 73. № 9. С. 1573-1584.

136. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор $p^7\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be}\gamma$ захвата при низких энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2010. №11; Дубовиченко С.Б. Астрофизический S - фактор радиационного захвата протонов на ядрах ${}^3\text{H}$ и ${}^7\text{Li}$ // ЯФ. 2011. Т. 74, №3; Дубовиченко С.Б. и др. Астрофизический S - фактор радиационного $p^7\text{Li}$ захвата // Изв. НАН РК физ.-мат. сер. 2010. №4.

137. Tilley D.R. et al. Energy level of light nuclei. $A = 8,9,10$ // Nucl. Phys. 2004. V. A745. P. 155-363.

138. <http://cdfc.sinp.msu.ru>.

139. Warters W.D., Fowler W.A., Lauritsen C.C. The elastic scattering of proton by Lithium // Phys. Rev. 1953, V. 91, P. 917-921.

140. Brown L. et al. Polarization and phase shifts in ${}^7\text{Li}(p,p){}^7\text{Li}$ from 0.4 to 2.5 MeV and the structure of ${}^8\text{Be}$ // Nucl. Phys. 1973. V. A206. P. 353-373.

141. Zahnow D. et al. The S factor of ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ and consequences for S extrapolation in ${}^7\text{Be}(p,\gamma_0){}^8\text{B}$ // Z. Phys. 1995. V. A351. P. 229-236.

142. Авотина М.П., Золотавин А.В. Моменты основных и возбужденных состояний ядер. Часть 2. М: Атомиздат, 1979. 522 с.

143. Godwin M.A. et al. ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction at $E_p = 80-0$ keV // Phys. Rev. 1997. V. C56. P. 1605-1612.

144. Spraker M. et al. Slope of the astrophysical S factor for the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction // Phys. Rev. 1999. V. C61. P. 015802-015808.

145. Дубовиченко С.Б. Программа расчета действительных фаз ядерного рассеяния // Вестник КазГАСА. 2003. №9/10. С. 220-227.

146. Zahnow D. et al. Thermonuclear reaction rates of ${}^9\text{Be}(p,\gamma){}^{10}\text{B}$ // Nucl. Phys. 1996. V. A589. P. 95-105.
147. Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. Том 1. М.: Мир, 1971. 456 с.
148. Ajzenberg - Selove F. Energy level of light nuclei $A = 5 - 10$ // Nucl. Phys. 1988. V. A490. P. 1-225.
149. Wulf E.A. et al. Astrophysical S-factors for the ${}^9\text{Be}(p,\gamma){}^{10}\text{B}$ reaction // Phys. Rev. 1998. V. C58, P. 517-523.
150. Sattarov A. et al. Astrophysical S factors for ${}^9\text{Be}(p,\gamma){}^{10}\text{B}$ // Phys. Rev. 1999. V. C60. P. 035801-035808.
151. Mukhamedzhanov A.M. et al. Asymptotic normalization coefficient for ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^9\text{Be} + p$ // Phys. Rev. 1999. V. C56. P. 1302-1312.
152. Дубовиченко С.Б. Астрофизический S - фактор радиационного ${}^9\text{Be}$ захвата // Изв. ВУЗов физ. 2011.
153. Дубовиченко С.Б. Программа поиска фаз упругого рассеяния ядерных частиц со спином 1/2 // Вестник КазНТУ 2004. №3. С. 137-144.
154. Дубовиченко С.Б. и др. Фазовый анализ дифференциальных сечений упругого $p^{12}\text{C}$ рассеяния при астрофизических энергиях // Изв. НАН РК физ.-мат. сер. 2007. №6. С. 58-67.
155. Jahns M.F., Bernstein E.M. Polarization in $p\alpha$ scattering // Phys. Rev. 1967. V. 162. P. 871-877.
156. Barnard A., Jones C., Well J. Elastic scattering of 2-11 MeV proton by ${}^4\text{He}$ // Nucl. Phys. 1964. V. 50. P. 604-620.
157. Brown R.I., Haerberli W., Saladin J.X. Polarization in the scattering of protons by α particles // Nucl. Phys. 1963. V. 47. P. 212-213.
158. Jackson H.L. et al. The ${}^{12}\text{C}(p,p){}^{12}\text{C}$ differential cross section // Phys. Rev. 1953. V. 89. P. 365-269.
159. Jackson H.L. et al. The excited states of the ${}^{13}\text{N}$ nucleus // Phys. Rev. 1953. V. 89. P. 370-374.
160. Moss S.J., Haerberli W. The polarization of protons scattered by Carbon // Nucl. Phys. 1965. V. 72. P. 417-435.
161. Barnard A.C.L. et al. Cross section as a function of an-

gle and complex phase shifts for the scattering of protons from ^{12}C // Nucl. Phys. 1966. V. 86. P. 130-144.

162. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A = 13, 14$ // Nucl. Phys. 1991. V. A523. P. 1-116.

163. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A = 12$ // Nucl. Phys. 1990. V. A506. P. 1-186.

164. Burtebaev N. et al. New measurements of the astrophysical S-factor for $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ reaction at low energies and the asymptotic normalization coefficient (nuclear vertex constant) for $p+^{12}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N}$ reaction // Phys. Rev. 2008. V. C78. P. 035802-035813.

165. Кукулин В.И., Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф. Взаимодействие составных частиц и принцип Паули // ЭЧАЯ. 1979. Т. 10. С. 1236-1255.

166. Imbriani G. Underground laboratory studies of pp and CNO some astrophysical consequences LUNA // Third European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics. October 2-9. 2005. S. Tecla (Catania). Sicily. Italy.

167. Cacioli A. et al. Ultra-sensitive in-beam γ -ray spectroscopy for nuclear astrophysics at LUNA // Eur. Phys. J. 2009. V. A39. P. 179-186.

168. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Фотопроцессы на ядрах ^7Li и ^7Be в кластерной модели для потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ. 1995. Т. 58. С. 635-641; Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Фотопроцессы на ядре ^6Li в кластерных моделях для потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ. 1995. Т. 58. С. 852-859.

169. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Потенциальное описание кластерных каналов лития // ЯФ. 1993. Т. 56. С. 87-98; Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Кулоновские формфакторы ядер лития в кластерной модели на основе потенциалов с запрещенными состояниями // ЯФ. 1994. Т. 57. С. 784-791.

170. Barnard A.C., Jones C.M., Phillips G.C. The scattering of ^3He by ^4He // Nucl. Phys. 1964. V. 50. P. 629-640.

171. Spiger R., Tombrello T.A. Scattering of He^3 by He^4 and of He^4 by Tritium // *Phys. Rev.* 1967. V. 163. P. 964-984.

172. Ivanovich M., Young P.G., Ohlsen G.G. Elastic scattering of the several hydrogen and helium isotopes from tritium // *Nucl. Phys.* 1968. V. A110. P. 441-462.

173. McIntyre L.C., Haerberli W. Phase shifts analysis of d- α scattering // *Nucl. Phys.* 1967. V. A91. P. 382-398.

174. Keller L.G., Haerberli W. Vector polarization measurements and phase shift analysis for d- α scattering between 3 and 11 MeV // *Nucl. Phys.* 1979. V. A156. P. 465-476.

175. Gruebler W. et al. Phase shift analysis of d- α elastic scattering between 3 and 17 MeV // *Nucl. Phys.* 1975. V. A242. P. 265-284.

176. Schmelzbach P.A. et al. Phase shift analysis of d- α elastic scattering // *Nucl. Phys.* 1972. V. A184. P. 193-213.

177. Дубовиченко С.Б. Тензорные ${}^2\text{H}^4\text{He}$ взаимодействия в потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями // *ЯФ.* 1998. Т. 61. С. 210-217.

178. Blokhintsev L.D. et al. Determination of the ${}^6\text{Li}(\alpha+d)$ vertex constant (asymptotic coefficient) from the ${}^4\text{He}+d$ phase-shift analysis // *Phys. Rev.* 1993. V. C48. P. 2390-2394.

179. Блохинцев Л.Д. и др. Расчет ядерной вершинной константы для виртуального распада ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha+d$ в модели трех тел и ее применение для описания астрофизической ядерной реакции $d(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ при сверхнизких энергиях // *ЯФ.* 2006. Т. 69. С. 456-466.

180. Lim T.K. The ${}^6\text{Li}-\alpha-d$ vertex constant // *Phys. Lett.* 1975. V. B56. P. 321-324.

181. Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Modified two-body potential approach to the peripheral direct capture astrophysical $a+A \rightarrow B+\gamma$ reaction and asymptotic normalization coefficients // *Nucl. Phys.* 2007. V. A781. P. 247-276.

182. Brune C.R. et al. Sub-Coulomb α transfers on ${}^{12}\text{C}$ and the ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ S-factor // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 83. P. 4025-4028.

183. Igamov S.B., Tursunmakhatov K.I., Yarmukhamedov R.

Determination of the ${}^3\text{He}+\alpha$ to ${}^7\text{Be}$ asymp. normalization coefficients (nucl. vertex constants) and their application for extrapolation of the ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ astrophysical S-factors to the solar energy region // arXiv:0905.2026v4 [nucl-th] 6 Jan. 2010. 28p.

184. Блохинцев Л.Д. и др. Определение ядерных вершинных констант для вершины ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He}{}^4\text{He}$ с помощью N/D - уравнений и вычисление астрофизического S-фактора для реакции ${}^4\text{He}({}^3\text{He},\gamma){}^7\text{Be}$ // Изв. РАН сер. физ. 2008. Т. 72. С. 321-326.

185. Langanke K. Microscopic potential model studies of light nuclear capture reactions // Nucl. Phys.1986. V. A457. P. 351-366.

186. Kajino T. The ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ and ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ reactions at astrophysical energies // Nucl. Phys. 1986. V. A460. P. 559-580.

187. Burkova N.A. et al. Is it possible to observe an isoscalar E1-multipole in ${}^6\text{Li}\gamma\alpha$ reactions? // Phys. Lett. 1990. V. B248. P. 15-20.

188. Brune C.R., Kavanagh R.W. Rolf C. ${}^3\text{H}(\alpha,\gamma){}^7\text{Li}$ reaction at low energies // Phys. Rev. 1994. V. C50. P. 2205-2218.

189. Griffiths G.M. et al. The ${}^3\text{H}({}^4\text{He},\gamma){}^7\text{Li}$ reactions // Can. J. Phys. 1961. V. 39. P. 1397-1403.

190. Schroder U. et al. Astrophysical S factor of ${}^3\text{H}(\alpha,\gamma){}^7\text{Li}$ // Phys. Lett. 1987. V. B192. P. 55-58.

191. Brown T.A.D. et al. ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ astrophysical S factor // Phys. Rev. 2007. V. C76. P. 055801.1-055801.12; arXiv:0710.1279v4 [nucl-ex] 5 Nov. 2007.

192. Confortola F. et al. Astrophysical S factor of the ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reaction measured at low energy via detection of prompt and delayed γ rays // Phys. Rev. 2007. V. C75. P. 065803; arXiv:0705.2151v1 [nucl-ex] 15 May 2007.

193. Gyurky G. et al. ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ cross section at low energies // Phys. Rev. 2007. V. C75. P. 035805-035813.

194. Singh N. et al. New Precision Measurement of the ${}^3\text{He}({}^4\text{He},\gamma){}^7\text{Be}$ cross section // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 262503-262507.

195. Osborn J.L. et al. Low-energy behavior of the ${}^3\text{He}(\alpha,$

- γ)⁷Be cross section // Nucl. Phys. 1984. V. A419. P. 115-132.
196. Bemmerer D. et al. Activation measurement of the ³He(α,γ)⁷Be cross section at low energy // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 122502-122507; arXiv:nucl-ex/0609013v1 11 Sep. 2006.
197. Costantini H. The ³He(α,γ)⁷Be S-factor at solar energies: the prompt experiment at LUNA // arXiv:0809.5269v1 [nucl-ex] 30 Sep. 2008.
198. Robertson R.C. et al. Observation of the Capture Reaction ²H(α,γ)⁶Li and Its Role in Production of ⁶Li in the Big Bang // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. P. 1867-1870.
199. Mohr P. et al. Direct capture in the 3⁺ resonance of ²H(α,γ)⁶Li // Phys. Rev. 1994. V. C50. P. 1543-1549.
200. Kiener J. et al. Measurements of the Coulomb dissociation cross section of 156 MeV ⁶Li projectiles at extremely low relative fragment energies of astrophysical interest // Phys. Rev. 1991. V. C44. P. 2195-2208.
201. Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Triple-differential cross section of the ²⁰⁸Pb(⁶Li, α d)²⁰⁸Pb Coulomb breakup and astrophysical S-factor of the d(α,γ)⁶Li reaction at extremely low energies // Nucl. Phys. 2000. V. A673. P. 509-525.
202. Кукулин В.И., Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф., Эль-Ховари Р. Роль принципа Паули в формировании оптических потенциалов // Изв. АН СССР сер. физ. 1974. Т. 38. С. 2123-2128.
203. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Справочная математическая библиотека. Матрицы и вычисления. М: Физ. мат. лит., 1984. 318с.
204. Дубовиченко С.Б., Чечин Л.М. Вариационные методы решения уравнения Шредингера // Вестник АГУ физ.-мат. сер. 2003. №.2(8). С.50-58.
205. Salpeter E.E. Nuclear reactions in stars // Phys. Rev. 1957. V. 107. P. 516-525; Salpeter E.E. Nuclear Reactions in stars without hydrogen // Astrophys. Jour. 1952. V. 115. P. 326; Rolfs C. Nuclear reactions in stars far below the Coulomb barrier // Progress in Particle and Nuclear Physics 2007. V. 59. P. 43.

206. Schurmann D. et al // ArXiv:nucl-ex/0511050v1. 29 Nov. 2005.
207. Дубовиченко С.Б. Фазовый анализ ${}^4\text{He}{}^4\text{He}$ рассеяния при 40-50 МэВ // Изв. ВУЗов физ. 2007. № 6. С. 74-79.
208. Jones C.M. et al. The scattering of alpha particles from ${}^{12}\text{C}$ // Nucl. Phys. 1962. V. 37. P. 1-9.
209. Дубовиченко С.Б. Фотопроцессы в ${}^4\text{He}{}^{12}\text{C}$ канале ядра ${}^{16}\text{O}$ на основе потенциальной кластерной модели // ЯФ. 1996. Т. 59. С. 447-553.
210. Plaga R. et al. The scattering of alpha particles from ${}^{12}\text{C}$ and the ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ stellar reaction rate // Nucl. Phys. 1987. V. A465. P. 291-316.
211. Tilley D. R., Weller H. R., Cheves C. M. Energy levels of light nuclei $A = 16-17$ // Nucl. Phys. 1993. V. A564. P. 1-183.
212. Дубовиченко С.Б. и др. Фазовый анализ и потенциальное описание упругого ${}^4\text{He}{}^{12}\text{C}$ рассеяния при низких энергиях // Изв. ВУЗов физ. 2009. № 7. С. 55-62; Дубовиченко С.Б. и др. Фазовый анализ упругого ${}^4\text{He}{}^{12}\text{C}$ рассеяния при энергиях 1.5-6.5 МэВ // Доклады НАН РК. 2008. №6. С. 24-32.
213. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Астрофизический S-фактор радиационного ${}^4\text{He}{}^{12}\text{C}$ захвата при низких энергиях // Доклады НАН РК. 2009. № 3. С. 30-36.
214. Kettner K.U. et al. The ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C},\gamma){}^{16}\text{O}$ reaction at stellar energies // Z. Phys. 1982. V. A308. P. 73-94.
215. Dyer P., Barnes C.A. The ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ reaction and stellar helium burning // Nucl. Phys. 1974. V. A233. P. 495-520.
216. Asuma R.E. et al. Constraints on the low-energies E1 cross section of ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ from the β -delayed α spectrum of ${}^{16}\text{N}$ // Phys. Rev. 1994. V. C50. P. 1194-1215.
217. Descouvemont P., Baye D. ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ reaction in a multiconfiguration microscopic model // Phys. Rev. 1987. V. C36. P. 1249-1255.
218. Heydenberg N.P., Temmer G.M. Alpha-Alpha scattering at low energies // Phys. Rev. 1956. V. 104. P. 123-134.
219. Russel J.L. et al. Scattering of alpha particles from He-

lium // Phys. Rev. 1956. V. 104. P. 135-142.

220. Tombrello T.A., Senhouse L.S. Elastic scattering of Alpha particles from Helium // Phys. Rev. 1962. V. 129. P. 2252-2258.

221. Nilson R. et al. Alpha-Alpha particle scattering in the energy range 12.3 to 22.9 MeV // Phys. Rev. 1956. V. 104. P. 1673-1680.

222. Nilson R. et al., Investigation of excited states in ^8Be by α -particle scattering from Helium // Phys. Rev. 1958. V. 109. P. 850-860.

223. Steigert F.E., Samson M.B. Alpha-Alpha scattering from 12.88 to 21.62 MeV // Phys. Rev. 1953. V. 92. P. 660-664.

224. Chien W.S., Brown R.E. Study of the $\alpha\alpha$ system below 15 MeV // Phys. Rev. 1970. V. C10. P. 1767-1784.

225. Bredin D.J. et al. The scattering of alpha particles by helium // Proc. Roy. Soc. 1959. V. A251. P. 143-155.

226. Darriulat P., Igo G., Pugh H.G. Elastic scattering of alpha particles by helium between 53 and 120 MeV // Phys. Rev. 1965. V. 137. P. B315-B323.

227. Conzett H.E. et al. Alpha-alpha scattering in the 36.8 to 47.3 MeV // Phys. Rev. 1960. V. 117. P. 1075-1079.

228. Igo G. Optical model analysis of the scattering of alpha particles from helium // Phys. Rev. 1960. V. 117. P. 1079-1085.

229. Burcham W.E. et al. Alpha-alpha scattering at 38/5 MeV // Nucl. Phys. 1957. V. 3. P. 217-220.

230. Буртебаев Н.Т., Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.И., Канашиевич В.И. Препринт № 88-01 ИЯФ (Алма-Ата, Казахстан, 1988).

231. Van Niftrik G. J.C. et al // In "Compt. Congr. Int. Phys. Nucl.", Paris. 1964. V. 2. P. 858.

232. Дубовиченко С.Б. Компьютерная программа для фазового анализа упругого $^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния // В Сб. "Современные проблемы и задачи информатизации в Казахстане". Алматы. КазНТУ. 2004. С. 327-351.

233. Conzett H.E., Slobodrian R.J. in "Compt. Renu. Cong. Int. Phys. Nucl.", Paris. 1964. V. 2, P. 228; Conzett H. E. et al.

Bull. Amer. Phys. Soc. 1957. V. 2. P. 305.

234. Буртебаев Н.Т., Дуйсебаев А.Д. В сб. "Тезисы XXX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра." Ленинград. 1980. С. 393.

235. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei: A = 5-10 // Nucl. Phys. 1979. V. A320. P. 1-224.

236. Кукулин В.И., Рыжих Г.Г., Чувильский Ю.М., Эрамжян Р.А. Свойства шестинуклонной системы в динамической мультикластерной модели с антисимметризацией // Препр. ИЯИ АН СССР П-0685. 1990. 36с.

237. Кукулин В.И., Рыжих Г.Г., Чувильский Ю.М., Эрамжян Р.А. Исследование проявления корреляционных и обменных эффектов в электромагнитных формах факторах легких ядер в рамках мультикластерной динамической модели // Изв. АН СССР сер. физ. 1989. Т. 53. С. 121-126.

238. Кукулин В.И. Шестинуклонная система как теоретическая ядерная лаборатория // Изв. АН КазССР физ.-мат. сер. 1988. № 2. С. 44-55.

239. Kukulín V.I. et al. Multicluster dynamic model for light nuclei and its verification in strong and electromagnetic interaction // J. Phys. Soc. Jnp. Suppl. 1989. V. 58. P. 777-789.

240. Eramzhyan R.A., Ryzhikh G.G., Kukulín V.I., Tchuvil'sky Yu.M. Exchange and correlation effects in the electromagnetic structure of light nuclei // Phys. Lett. 1989. V. B228. P. 1-5.

241. Walliser H., Fliesbach T. Cluster picture of ${}^7\text{Li}$ // Phys. Rev. 1985. V. C31. P. 2242-2250.

242. Афанасьев В.Д. и др. Электромагнитная структура ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$ // ЯФ. 1996. Т. 60. С. 97-98.

243. Kukulín V.I., Pomerantsev V.N., Cooper S.G., Dubovichenko S.B. Improved $d^4\text{He}$ potentials by inversion: The tensor force and validity of the double folding model // Phys. Rev. 1998. V. C57. P. 2462-2473.

244. Kukulín V.I., Vorontchev V.T., Pomerantsev V.N. Three body calculation of $A=9$ nuclei with super-symmetric $\alpha\alpha$ potential // Few Body Syst. 1995. V. 1. P. 191-202; Ворончев В.Т.,

Кукулин В.И. и др. Изучение структуры и свойств ядер с $A = 9$ в рамках мультикластерной динамической модели $2\alpha+N$ // ЯФ. 1994. Т. 57. С. 1964-1980.

245. Дубовиченко С.Б. Трехтельная модель ядра ${}^7\text{Li}$ // Изв. РАН сер. физ. 2000. Т. 64. С. 2289-2292.

246. Shoda K., Tanaka T. Clusters in the photodisintegration of ${}^9\text{Be}$ // Phys. Rev. 1999. V. C59. P. 239-252-252.

247. Дубовиченко С.Б. Вариационные методы в трехтельной модели // Вестник Каз.ГАСА. 2003. № 9/10. С. 227-232.

248. Дубовиченко С.Б. Компьютерная программа для расчета характеристик ядра ${}^7\text{Li}$ // Вестник Каз.НТУ. 2004. № 5. С. 174-182.

249. Juster F.P. et al. Tritium electromagnetic form factors // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. P. 2261-2264.

250. Beck D.H. et al. Tritium form factors at low q // Phys. Rev. 1984. V. C30. P. 1403-1408.

251. Sick I. Precise nuclear radii from electron scattering // Phys. Lett. 1982. V. B116. P. 212-214.

252. Afnan I.R., Tang Y.C. Investigation of nuclear three- and four-body systems with soft-core nucleon-nucleon potentials // Phys. Rev. 1968. V. 175. P. 1337-1345.

253. Krasnopolsky V.M., Kukulin V.I. A new many particle variational method // Czech. J. Phys. 1977. V. B27. P. 290-304; Krasnopolsky V.M., Kukulin V.I. A stochastic variational method for few body systems // J. Phys. 1977. V. G3. P. 795-811.

254. Jenny B. et al. Phase shift analysis of ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, {}^2\text{H}){}^3\text{He}$ scattering // Nucl. Phys. 1980. V. A337. P. 77-85.

255. Kanada H. et al. Characteristic features of specific distortion in light nuclear systems // Nucl. Phys. 1986. V. A457. P. 93-97; Kanada H., Kaneko T., Tang Y.C. Multiconfiguration resonating group study of the five-nucleon system // Nucl. Phys. 1989. V. A504. P. 529-532; Chwieroth F.S., Tang Y.C., Tompson D.R. Microscopic coupled channel study of the five-nucleon system with RGM // Phys. Rev. 1974. V. C9. P. 56-65; Chwieroth F.S., Brown R.E., Tang Y.C., Tompson D.R. Study of ${}^2\text{H}{}^3\text{H}$ and

$^2\text{H}^3\text{He}$ systems with RGM // Phys. Rev. 1973. V. C8. P. 938-942; Shen P.N., Tang Y.C., Fujiwara Y., Kanada H. Specific distortion effect in the five-nucleon system // Phys. Rev. 1975. V. C31. P. 2001-2008.

256. Буркова Н.А., Дубовиченко С.Б. Трехтельная $^4\text{He}^3\text{H}^2\text{H}$ модель ядра ^9Be // Изв. ВУЗов физ. 2008. № 1. С. 86-91.

257. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям. М: Наука, 1979. 830 с.

258. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимация // М: Мир, 1980. 608 с.

259. Melkanoff M.A. Fortran program for elastic scattering analysis with nuclear optical model // Univ. California Pres. Berkeley. Los Angeles. 1961. 116p.

260. Lutz H.F., Karvelis M.D. Numerical calculation of coulomb wave functions for repulsive coulomb fields // Nucl. Phys. 1963. V. 43. P. 31-44.

261. Melkanoff M. Nuclear optical model calculations // Meth. in Comput. Phys. Acad. Press. N-Y. 1966. V. 6. P. 1-80.

262. Gody W.J., Hillstrom K.E. Chebyshev approximations for the coulomb phase shifts // Meth. Comput. 1970. V. 111. P. 671-677.

263. Smith W.R. Nuclear penetrability and phase shift subroutine // Usics Communs. 1969. V. 1. P. 106-112.

264. Froberg C.E. Numerical treatment of Coulomb wave functions // Rev. Mod. Phys. 1955. V. 27. P. 399-411.

265. Abramowitz M. Tables of Coulomb wave function. V.1. Washington. N.B.S. 1952. 141p.

266. Данилов В.Л. и др. Справочная математическая библиотека. Математический анализ. Функции, пределы, цепные дроби. М: Физ. мат. лит., 1961. 439 с.

267. Кузнецов Д.С. Специальные функции. М: Высшая школа. 1965. 272 с.

268. <http://phys.bsu.edu.ru/resource/nphys/spargalka/038.htm>.

Дубовиченко С.Б.

Термоядерные процессы Вселенной

*Компьютерная верстка и дизайн Дубовиченко С.Б.
Графический дизайн Дубовиченко Ю.С.*

*Общая идея графического дизайна и оформления книг серии
"Казахстанские Космические Исследования" НЦ КИТ НКА РК
принадлежит издательству "Дайк-Пресс", Алматы, РК*

Подписано к печати 15.12.2010. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч. - изд. л. 33,1 Тираж 300. Цена договорная.

Издание ДТОО "Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова" НЦ КИТ НКА РК,
Алматы, РК, (727)-260-75-90



Тридцать лет
процессы
взаимодействия



**Дубовиченко
Сергей
Борисович**

**Академик
Международной
Академии
Информатизации
(МАИН РК)**

*Доктор физико -
математических наук
Казахстана и России
по специальностям
01.04.16 и 05.13.18*

*Член Европейского
Физического Общества*

*Член Нью -
Йоркской Академии
Наук*

*Лауреат премии ЛКСМ
КазССР*

*Лауреат гранта
международного фонда
Дж. Сороса*

*Главный научный
сотрудник
Астрофизического
института
им. В.Г. Фесенкова
НЦ КИТ НКА РК*

Профессор

<http://dubovichenko.ru>
sergey@dubovichenko.ru
dubovichenko@mail.ru