Эволюция одночастичных энергий в дисперсионной оптической модели

Дисперсионное соотношение

$V(\mathbf{r},\mathbf{r}';E) = V(\mathbf{r},\mathbf{r}') + P/\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W(\mathbf{r},\mathbf{r}';E')}{E'-E} dE'$

Основы дисперсионной оптической модели (ДОМ) J_I, МэВ фм³ 120 100 80 60 40 20 0 --70 -60 -50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50 60 70 $ΔJ_{I,s,d}$,ΜэΒ·φ M^3 Е, МэВ n+⁴⁰Ca 50 0 -50 60 Е, МэВ -60 -20 20 -40 0 40

Основы ДОМ

$$U(r, E) = -U_p(r, E) - U_{so}(r, E) + V_C(r)$$

$$U_{p}(r,E) = V_{HF}(r,E) + \Delta V(r,E) + iW_{I}(r,E) =$$

$$= V_{HF}(E)f(r,r_{HF},a_{HF}) + \Delta V_{s}(E)f(r,r_{s},a_{s}) - 4a_{d}\Delta V_{d}(E)\frac{d}{dr}f(r,r_{d},a_{d}) +$$

$$+ iW_{s}f(r,r_{s},a_{s}) - i4a_{d}W_{d}\frac{d}{dr}f(r,r_{d},a_{d})$$

$$U_{so}(r,E) = 2V_{so}(E)\frac{1}{r}\frac{d}{dr}f(r,r_{so},a_{so})\vec{l}\vec{s}$$

$$\int_{0}^{900} \frac{1}{\sqrt{5}} \int_{0}^{900} \frac{1}{\sqrt{5}} \int_$$

Основы ДОМ

$$\left[\frac{-\nabla^2}{2m} + V(r, E_{nlj})\right] \Phi_{nlj}(\vec{r}) = E_{nlj} \Phi_{nlj}(\vec{r})$$

 $V(r, E_{nlj}) = V_{HF}(r, E_{nlj}) + \Delta V_{s}(r, E_{nlj}) + \Delta V_{d}(r, E_{nlj}) + U_{so}(r, E_{nlj})$



взято из C. MAHAUX and R. SARTOR. Nuclear Physics A468 (1987) 193

ДОМ до начала исследований в НИИЯФ

- ДОМ разработан на примере дважды магических ядер ⁴⁰Ca, ²⁰⁸Pb и магического ядра ⁹⁰Zr
- Мнимый потенциал определяется при анализе данных по рассеянию нуклона ядром
- Хартри-фоковская составляющая при E<0 находится из соотношений:

$$E_{F} = \frac{E_{+} + E_{-}}{2}$$

$$V_{HF}(E_{F}) = \frac{V_{HF}(E_{+}) + V_{HF}(E_{-})}{2}$$



Точки - экспериментальные данные, сплошная линия – наш расчет, штриховая - расчет Wang Y. et al.// Phys. Rev. 1993. V.C47. P.2677

Система $p + {}^{90}Zr$



Система $p + {}^{90}Zr$



Спектроскопические факторы S_{nij} протонных состояний ⁹⁰Zr. Линия с крестами – расчет с ДОП наст. раб., темные квадраты – данные реакции (e,e'p), темные кружки – (d,³He), светлые кружки – (³He,d), темные ромбы – (n,d), светлые ромбы – (d,n).



Система $p + {}^{90}Zr$

Значения полной фрагментационной ширины(в МэВ) протонных состояний в ⁹⁰ Zr						
nlj	Г _{nlj} ^{ДОП} наст.раб.	Г _{nlj} ^{эксп} , (p,2p)	Г _{nlj} эксп, (e,e'p)			
1f _{7/2}	1.91	2.03(0.89)	3.1(6); 6.7(1)			
2s _{1/2}	10.59	3.65(0.63)	8(2); 10(1)			
1d _{3/2}	9.79	4.46(0.79)	7(2)			
1d _{5/2}	12.18	7.57(0.76)	13			
1p _{1/2}	10.65	9.18(0.88)				
1p _{3/2}	12.04	15.55(0.95)				
1s _{1/2}	17.94	18.78(1.0)				

Система $p + {}^{90}Zr$



Система $p + {}^{90}Zr$



Зарядовая плотность

Систематики глобальных параметров нуклонного потенциала традиционной оптической модели (ТОМ) для ядер близких к сферическим

CH89

A = 40—209 E = 10—65 MeV

R.L. VARNER,W.J. THOMPSON, T.L. McABEE, E.J. LUDWIG and T.B. CLEGG. A GLOBAL NUCLEON OPTICAL MODEL POTENTIAL. PHYSICS REPORTS 201, No. 2 (1991) 57—119.

KD

A = 24—209 E = 1keV—200 MeV

A.J. Koning, J.P. Delaroche. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV. Nuclear Physics A 713 (2003) 231–310

Метод конструирования ДОП для стабильных ядер

- До начала исследований в НИИЯФ:
- Мнимый потенциал определяется при анализе данных по рассеянию нуклона ядром
- Хартри-фоковская составляющая при E<0 находится из соотношений

$$E_{F} = \frac{E_{+} + E_{-}}{2}$$

$$V_{HF}(E_{F}) = \frac{V_{HF}(E_{+}) + V_{HF}(E_{-})}{2}$$

- Результаты НИИЯФ:
- Мнимый потенциал определяется с использованием современных систематик глобальных параметров
- Хартри-фоковская составляющая при E<0 при анализе наиболее точных и достоверных данных совместной оценки реакций срыва и подхвата нуклона на одном и том же ядре (И.Н. Бобошин и др. НИИЯФ)
- Преимущества: может быть использована:
- а) в случае ядер, для которых данные по рассеянию ограничены или отсутствуют;
- б) не только для магических ядер

Мнимая часть ДОП – по глобальным параметрам KD

Koning A.J., Delaroche J.P. Nucl. Phys. A. 2003. V. 713. P. 231-310.



Оболочечный эффект



Оболочечный эффект

E>0



Smith A.B., Guenter P.T., Whalen J.F. THE OPTICAL MODEL OF FEW-MeV NEUTRON ELASTIC SCATTERING FROM Z = 39 TO 51 TARGETS// Nucl. Phys. 1984. V.A415.P.1.

J_I^{KD}(Е_к=6 МэВ) - 78 ÷ 83 МэВ⋅фм³

E<0

В магических ядрах энергетический диапазон около энергии Ферми, где мнимый потенциал зануляется, больше, чем в соседних немагических ядрах W_I =0 при $\left|E-E_F\right| < E_p$



Оболочечный эффект

 Оболочечный эффект ответственен за формирование «чашеобразной формы» эволюции энергий заполняемой нейтронной оболочки 1f_{7/2}



Первые наборы глобальных параметров ДОП

Bespalova O.V., Romanovsky E.A., Spasskaya T.I. Journal of Physics. 2003. V. G 29. N 6. P.1193 (**603**)

Беспалова О.В., Романовский Е.А., Спасская Т.И. Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68, № 8. С.1214. (**Б04**)

Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В. и др. Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 3. С.438-442. (**Б07**) Morillon B., Romain P. Phys. Rev. 2004. V. C70. P. 014601 (MR04)

Morillon B., Romain P. Phys. Rev. 2006. V. C74. P. 014601-1 – 014601-6. (MR06)

Morillon B., Romain P. Phys. Rev. 2007. V. C76. P. 044601 (MR07)

Глобальные параметры Б03

Вудс-Саксоновская форма

$$V_{R} = V_{0} + 0.299 E_{C} \pm V_{t} \frac{N-Z}{A} + V_{e} \exp[-aE]$$
 (+ для р, - для п).

$$E_C = \frac{1.73 \cdot Z_T}{(1.238 \cdot A_T^{1/3} + 0.116)}$$
(CH89)

Зависящий от энергии параметр радиуса

$$r_{V}(E) = r_{V}(E_{F}) + r_{V}^{(1)} \left\{ \frac{\beta_{I}(E - E_{F})\left[(E - E_{F})^{2} + \beta_{I}^{2}\right]}{(E - E_{F})^{4} + \beta_{I}^{4}} - \frac{\beta_{s}(E - E_{F})\left[(E - E_{F})^{2} + \beta_{s}^{2}\right]}{(E - E_{F})^{4} + \beta_{s}^{4}} \right\} - r_{V}^{(2)}(E - E_{F})^{2}.$$

 $r_V(E_F)$ =1.21 фм, $r_V^{(1)}$ =0.015+0.00047 α (фм), $r_V^{(2)}$ =3.76·10-6 (фм/МэВ²),

V₀=25.5 МэВ, V_e=27.6 МэВ и а=0.0105 МэВ⁻¹ (*Е* в МэВ).

Глобальные параметры Б04

$$V_{HF}(E) = \left(V_0 \pm V_t \frac{N - Z}{A} + E_C V_C\right) \exp\left[-\eta E \left(V_0 \pm V_t \frac{N - Z}{A} + E_C V_C\right)^{-1}\right]$$

$$\eta = \begin{cases} 0.439 - 0.000381A & (\partial \pi n) \\ 0.469 - 0.000153A & (\partial \pi p) \end{cases}$$

 V_0 =51.44 M₃B , V_t =21 M₃B, V_c =0.27,

Глобальные параметры Б07 $V_{HF}(E) = \left(V_0 \pm V_t \frac{N-Z}{A} + E_C V_C\right) \exp\left[-\kappa E\right] \qquad \begin{cases} \kappa = 0.00808 - 0.00427(N-Z)/A \\ \kappa = 0.00773 + 0.00382(N-Z)/A \end{cases}$ дляр для n В анализ добавлены энергии *Е*_{лі}^{эксп} вблизи Е_гдля магических ядер ⁴⁸Ca, ⁵²Cr, ⁵⁴Fe, ⁵⁶Ni $N_{nlj} = 1/2 \cdot \left[1 - \frac{(E_{nlj} - E_{\rm F})}{\sqrt{(E_{nlj} - E_{\rm F})^2 + (\Delta)^2}} \right]$ □ - Ca. ■ - Cr. ● - Fe. ▲ - Ni. △ - Zr. + - Sr -6 *Е*_{*г}ⁿ=-12.46+35.36(*N-*Z*)/А (МэВ),</sub> -8 E_{F}^{ρ} =-11.93-54.82(N-Z)/A + E_{C} . (M \ni B). -10 -12 Беспалова О.В. и др. Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 3. С.438 -14 $E_{F} = \frac{1}{2} (E_{F}^{+} + E_{F}^{-})$ 0,00 0,04 0,08 0,12 0,16 -8 -10 $E_{F_{\tau}}^{-} = (M_A - M_{A-1} - m_{\tau})c^2$ -12 86 -14 , o -16 , □ , -16 , -16 , -18 , -18 , -18 , -18 , -14 $E_{F_{\sigma}}^{+} = (M_{A+1} - M_{A} - m_{\sigma})c^{2}$

Eⁿ_F, M∋B

-20 -22

0,00

0.04

0.08

(N-Z)/A

0.12

0.16

 E_{F}^{n} =-12.52+31.3(N-Z)/A (M₃B), E_{F}^{ρ} =-11.88-57.5(N-Z)/A + E_{C} (M \ni B). Jeukenne J.-P., Mahaux C., Sartor R. Phys. Rev. C. 1991, V. 43, P. 2211,



Сравнение с глобальными параметрами MR

$\gamma^2 =$	$\frac{1}{\Sigma}$	$E_{_{nlj}}^{(i)}-E_{_{nlj}}^{_{\mathfrak{I}\mathfrak{K}}cn})$	2			
λi	$N \sum_{nlj}$	$\left(\Delta^{_{\mathfrak{KC}n}}_{_{nlj}} ight)^2$				
			Ядро	Нуклон	$\chi^2_{\text{\tiny EPC 07}}/\chi^2_{MR04,06}$	$\chi^2_{\text{\tiny EPC 07}}/\chi^2_{MR07}$
			⁴⁰ Ca	n	0.2	0.3
						0.12
				р		0.12
			⁹⁰ Zr	n	0.36	0.53
				р	0.20	
			²⁰⁸ Pb	n	0.48*	0.47*
				р	0.31	

*Значения $E_{n,1s_{1/2}}^{MR}$ не вычислены из-за проблемы сходимости

процесса итераций при нахождении V^{MR}_{HF}

Сравнение предсказаний Е_{nli} : Б07 и РМСП



Typel S., Wolter H. H. Relativistic mean field calculations with density – dependent mesonnucleon coupling. Nucl. Phys. A. 1999. V. 656. P. 331

А

Метод конструирования ДОП

Стабильные ядра

- Хартри-фоковская составляющая при E<0 при анализе наиболее точных и достоверных данных совместной оценки реакций срыва и подхвата нуклона на одном и том же ядре (И.Н.Бобошин и др., НИИЯФ)
- Преимущества:

может использоваться

- а) в случае ядер, для которых данные по рассеянию ограничены или отсутствуют;
- б) не только для магических ядер

Нестабильные ядра

Хартри-фоковская составляющая при E<0 определяется из согласия суммарного числа нуклонов в связанных состояниях

$$N_{n(p)} = \sum_{nlj} (2j+1) N_{nlj} (E_{nlj}^{\text{ДОП}})$$
числу N(Z) ядра
$$N_{nlj} = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{(E_{nlj} - E_{\text{F}})}{\sqrt{(E_{nlj} - E_{\text{F}})^2 + (\Delta)^2}} \right)$$

Преимущества:

может использоваться в случае ядер, для которых нет данных ни по рассеянию, ни по одночастичным энергиям

Нейтронные одночастичные характеристики

































-







The examples of coupling to vibrational and Gamow-Teller collective modes clearly indicate that an asymmetry dependence different from the N-Z/A dependence assumed in global OM might be expected from long-range correlations.

Ослабление эффекта замыкания оболочек с увеличением поверхностного слоя





Ослабление эффекта замыкания оболочек вблизи границы нейтронной стабильности





HFB+SkP

J. Dobaczewski, PHYS. REV.C 53, N 6, 1996, P. 2809

Нейтронно-избыточные ядра – важный объект исследований в связи с астрофизическим r-процессом

















Усиление s-d инверсии за счет тензорного взаимодействия



Эволюция разности энергий протонных состояний 2s_{1/2} и 1d_{3/2} в изотопах Са, вычисленная в [M. Grasso et al.. Phys. Rev. C. 76. 2007. 044319] с и без тензорного члена (а) и с ДОП (б). Линии – расчет, точки – экспериментальные данные.

















последовательностей 2d_{5/2} и 1g_{7/2} при N=66

G. Colo et al. Phys. Lett., B 646, 227 (2007) – тензорное взаимодействие позволяет описать щель $\Delta_{1h_{11/2}-1g_{7/2}}$

p-Pb

W_I зависит от (N-Z)/А для протонноизбыточных ядер слабее, чем для стабильных?



 ΔS_{p} , МэВ 5

4









Заключение

- 1. Разработана методика конструирования ДОП стабильных ядер, не требующая наличия экспериментальных данных по рассеянию нуклонов в широком диапазоне энергий. Методика применена для описания и предсказания нейтронных и протонных одночастичных характеристик изотопических цепочек четно-четных стабильных ядер от Ca до Sn. В целом достигается согласие с имеющимися экспериментальными данными по Enlj и Nnlj в пределах их погрешностей. В частности удалось описать наблюдающиеся закономерности оболочечной структуры стабильных ядер. Среди них:
- а) параллельное заполнение нейтронных подоболочек **2p, 1f_{5/2} в ядрах вблизи Ni**; б) динамику нейтронного уровня **1f_{7/2} в стабильных изотопах Ca**, Ti, Cr, Fe. Было показано, что такая динамика, характерная для случая перехода от ядер с заполненной оболочкой к ядрам с заполняемой оболочкой, обусловлена проявлением оболочечного эффекта в мнимой части ДОП. Оболочечный эффект заключается в расширении интервала нулевых значений мнимой части ДОП вблизи энергии Ферми.
- в) динамику (инверсию) протонных уровней **2s**_{1/2} и **1d**_{3/2} в изотопах Са; более быстрое заглубление нейтронных уровней **1***f*_{5/2} по сравнению с рядом расположенными уровнями **2p** при увеличении Z при заполнении протонной оболочки **1f**_{7/2}.
- г) формирование близких к вырожденным групп нейтронных состояний 3s_{1/2}, 2d_{3/2} и **1g**_{7/2}, **2d**_{5/2} (т.н. псевдоспиновые дублеты) в изотопах Sn, ответственных за проявление изотопом ¹¹⁴Sn слабых магических свойств по нейтронам;
- д) особенности в одночастичных характеристиках исследуемых стабильных ядер, соответствующие магическим числам Z, N=20, 28, 50 и неклассической паре N=56, Z=40, а именно значительные энергетические «частично-дырочные» щели и близость вероятностей заполнения одночастичных орбит к 0 и 1.

- Предложен первый набор глобальных параметров ДОП. Он характеризуется малыми значениями отклонения расчетных энергий от экспериментальных данных и может быть применена для расчета одночастичных характеристик нейтронных и протонных состояний и данных по рассеянию нуклонов на сферических и близких к ним ядрах с А от 40 до 208 в области энергии от -65 до +65 МэВ.
- 3. Разработана методика конструирования ДОП нестабильных сферических и близких к ним ядер с N, Z, меняющимися вплоть до границ нуклонной стабильности с целью предсказания одночастичных характеристик таких ядер и исследования их эволюции.
- 4. Методика применена для систематического предсказания нейтронных и протонных одночастичных энергий и вероятностей заполнения четно-четных нестабильных ядер от Si до Pb при изменении N,Z в направлении границ нуклонной стабильности. Кроме отмеченных выше закономерностей, одночастичные спектры, вычисленные с ДОП, сконструированным по разработанной методике, демонстрируют:
- а) уменьшение энергетической щели, соответствующей магическим числам, вблизи границы нейтронной стабильности, что соответствует ослаблению эффекта замыкания оболочек в таких ядрах;
- б) продемонстрированы признаки классических и новых неклассических магических чисел нейтронов (протонов), проявляющиеся в одночастичных спектрах. Такие признаки выделены в расчетных с ДОП одночастичных спектрах нестабильных ядер с классическими магическими числами N, Z= 20, 28, 50, 82 и числами Z=14, N=28 (⁴²Si), Z=20, N=32 (⁵²Ca); Z=28, N=40 (⁶⁸Ni); N=56, Z=40 (⁹⁶Zr).

Спасибо за внимание