MÁSTER INTERUNIVERSITARIO DE FÍSICA NUCLEAR
CURSO 2024-25

PRÁCTICAS. ESTRUCTURA NUCLEAR: PROPIEDADES Y MODELOS

1. Usando la referencia [1], estudiar los niveles monoparticulares en el marco del modelo de capas de los núcleos mágicos: ^{12}C, ^{16}O, ^{40}Ca, ^{48}Ca. Tomando como ejemplo el ^{40}Ca, analizar el efecto de la interacción spin-órbita en el llenado de los niveles. También, comparar los resultados obtenidos con los valores de las energías monoparticulares que se obtienen de forma empírica usando los excesos de masa de los núcleos vecinos (se pueden consultar también en dicha página, en *Nuclear data* y en la referencia [2]. (Ver **Indicaciones** al final del documento).

2. A partir de los valores de las energías monoparticulares que se obtienen de forma empírica usando los excesos de masa de los núcleos vecinos, según el apartado anterior, usar el programa `wsmod` para determinar los parámetros óptimos del potencial de Woods-Saxon que permiten obtener un buen acuerdo con dichos valores. Hacedlo para cada uno de los núcleos analizados también en el apartado anterior.

3. Partiendo del programa del *Computational Nuclear Physics* [3], que resuelve el modelo de Hartree–Fock con el potencial de Skyrme, comparar los resultados para los mismos núcleos con los obtenidos en el marco del modelo de capas. Usar al menos dos interacciones de Skyrme diferentes. Analizar el resultado que se obtiene para la energía de enlace, así como para las correspondientes densidades nucleares. En los casos en los que sea posible, comparar con el experimento. Comparar también los valores de las energías monoparticulares que se obtienen con las del apartado anterior.

4. Con el mismo programa anterior, incluyendo un apareamiento no nulo, estudiar los núcleos ^{24}Mg y ^{48}Cr.

Los programas a usar en los apartados anteriores los podéis descargar de aquí.

BIBLIOGRAFÍA

[1] `www.volya.net`

[2] Table of Isotopes. Volume 1. Richard B. Firestone. Virginia S. Shirley, editor

[3] Computational Nuclear Physics. *Nuclear Structure* vol. I

[4] Base de datos de Brookhaven National Laboratory.

[5] M. Wang *et al., The AME2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references*, Chinese Physics C. 41 (2017) 030003

[6] `https://www-phynu.cea.fr/science_en_ligne/carte_potentiels_microscopiques/carte_potentiel_nucleaire_eng.htm`

INDICACIONES

	^{5}Li	^{5}He	^{3}He	^{3}H	^{4}He
Δ (MeV)	11.685	11.390	14.930	14.950	2.420
J^π	$\frac{3}{2}^-$	$\frac{3}{2}^-$	$\frac{1}{2}^+$	$\frac{1}{2}^+$	0^+
	^{13}N	^{13}C	^{11}C	^{11}B	^{12}C
Δ (MeV)	5.436	3.125	10.650	8.668	0.000
J^π	$\frac{1}{2}^-$	$\frac{1}{2}^-$	$\frac{3}{2}^-$	$\frac{3}{2}^-$	0^+
	^{17}F	^{17}O	^{15}O	^{15}N	^{16}O
Δ (MeV)	1.952	-0.810	-2.855	0.102	-4.737
J^π	$\frac{5}{2}^+$	$\frac{5}{2}^+$	$\frac{1}{2}^-$	$\frac{1}{2}^-$	0^+
	^{41}Sc	^{41}Ca	^{39}Ca	^{39}K	^{40}Ca
Δ (MeV)	-28.644	-35.139	-27.282	-33.806	-34.847
J^π	$\frac{7}{2}^-$	$\frac{7}{2}^-$	$\frac{3}{2}^+$	$\frac{3}{2}^+$	0^+
	^{49}Sc	^{49}Ca	^{47}Ca	^{47}K	^{48}Ca
Δ (MeV)	-46.555	-41.286	-42.343	-35.698	-44.216
J^π	$\frac{7}{2}^-$	$\frac{3}{2}^-$	$\frac{7}{2}^-$	$\frac{1}{2}^+$	0^+
	^{91}Nb	^{91}Zr	^{89}Zr	^{89}Y	^{90}Zr
Δ (MeV)	-86.637	-87.893	-84.860	-87.695	-89.765
J^π	$\frac{9}{2}^+$	$\frac{5}{2}^+$	$\frac{9}{2}^+$	$\frac{1}{2}^-$	0^+
	^{149}Tb	^{147}Gd	^{145}Gd	^{145}Eu	^{146}Gd
Δ (MeV)	-70.510	-75.207	-72.940	-77.936	-75.361
J^π	$\frac{11}{2}^-$	$\frac{7}{2}^-$	$\frac{1}{2}^+$	$\frac{5}{2}^+$	0^+
	^{209}Bi	^{209}Pb	^{207}Pb	^{207}Tl	^{208}Pb
Δ (MeV)	-18.268	-17.624	-22.463	-21.041	-21.759
J^π	$\frac{9}{2}^-$	$\frac{9}{2}^+$	$\frac{1}{2}^-$	$\frac{1}{2}^+$	0^+

Tabla 1: Excesos de masa y asignaciones de spin-paridad de los estados fundamentales correspondientes a los núcleos a considerar para el cálculo de las energías monoparticulares empíricas. $\Delta(0,1) = 8.071$ MeV. Todos estos datos se pueden obtener de las referencias [4], [5].

A partir de los datos de la tabla anterior, se pueden estimar los valores de las energías de los estados monoparticulares por encima y debajo del nivel de Fermi de forma sencilla, teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
\epsilon_\nu(nlj) &= \Delta(Z,N+1) - \Delta(Z,N) - \Delta(0,1) && (1)\\
\epsilon_\pi(nlj) &= \Delta(Z+1,N)) - \Delta(Z,N) - \Delta(1,0)\,. && (2)
\end{aligned}$$

Para obtener esta expresión, lo que se está asumiendo es que las energías monoparticulares pueden determinarse a partir de las energías de enlace de los núcleos correspondientes, es decir:

$$\begin{aligned}
\epsilon_\nu(nlj) &= B(Z,N) - B(Z,N+1) && (3)\\
\epsilon_\pi(nlj) &= B(Z,N) - B(Z+1,N)\,, && (4)
\end{aligned}$$

y se ha usado simplemente la relación entre las energías de enlace y los excesos de masa (en unidades de energía),

$$B(Z,N) = Z\,\Delta(1,0) + N\,\Delta(0,1) - \Delta(Z,N)\,. \tag{5}$$

En todas las ecuaciones anteriores, ν se refiere a neutrones, π a protones, y nlj se refiere al estado monoparticular en cuestión. Por ejemplo, si nos fijamos en el ^{40}Ca, los estados monoparticulares neutrónicos por encima y debajo del nivel de Fermi serán el $1f_{7/2}$ y el $1d_{3/2}$, respectivamente, tal y como se puede deducir a partir de los valores de spin-paridad de los núcleos ^{41}Ca y ^{39}Ca. Por tanto:

$$\epsilon_\nu(1f_{7/2}) = \Delta(^{41}\mathrm{Ca}) - \Delta(^{40}\mathrm{Ca}) - \Delta(0,1) = -35.139 + 34.847 - 8.071 = -8.363\,\mathrm{MeV}$$

$$\epsilon_\nu(1d_{3/2}) = \Delta(^{40}\mathrm{Ca}) - \Delta(^{39}\mathrm{Ca}) - \Delta(0,1) = -34.847 + 27.282 - 8.071 = -15.636\,\mathrm{MeV}$$

Los estados monoparticulares protónicos alrededor del nivel de Fermi para el ^{40}Ca los podemos determinar igualmente:

$$\epsilon_\pi(1f_{7/2}) = \Delta(^{41}\mathrm{Sc}) - \Delta(^{40}\mathrm{Ca}) - \Delta(1,0) = -28.644 + 34.847 - 8.071 = -1.868\,\mathrm{MeV}$$

$$\epsilon_\pi(1d_{3/2}) = \Delta(^{40}\mathrm{Ca}) - \Delta(^{39}\mathrm{K}) - \Delta(1,0) = -34.847 + 33.806 - 8.071 = -9.112\,\mathrm{MeV}$$

Usando el modelo extremo de partícula independiente también se podría hacer una estimación de otros niveles de partícula independiente, a partir de la energía de los estados excitados de los núcleos vecinos. Por ejemplo, el primer estado excitado del ^{41}Ca está 1.942 MeV por encima del estado fundamental, y su asignación spin-paridad es $3/2^-$. Eso significa que a partir de ese dato, podríamos determinar la energía del estado monoparticular de neutrones $2p_{3/2}$. Teniendo en cuenta ese valor, tendríamos que

$$\epsilon_\nu(2p_{3/2}) = \epsilon_\nu(1f_{7/2}) + 1.942 = -6.421\,\mathrm{MeV}$$