

Final de Introducción a la Física Nuclear

Núcleos Exóticos

Estructura de Capas de Núcleos Exóticos

Jorge Martínez Fernández

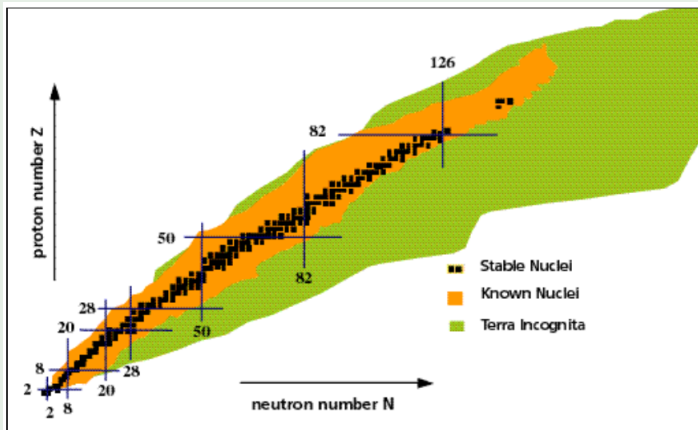
26 de diciembre de 2018

Introducción

- Sólo 288 de los miles de nucleidos que encontramos en la nuclear chart son estables o prácticamente estables.
- Éstos forman el *Valley of Stability*.
- El principal factor que determina la estabilidad del núcleo es la energía de separación.
- Los límites de la existencia de los nucleidos están determinados por $S_n = 0$ ($S_p = 0$). éstas son las *drip lines*.
- La *drip line* “protónica” está bien delineada experimentalmente hasta el protactinium $Z = 91$ (hasta 2012).
- La *drip line* “neutrónica” sólo está determinada hasta el oxígeno $Z = 8$. Esto se debe a la distancia del valle de estabilidad a la línea.

Introducción

Tabla de Nucleidos - Long term plans in the study of atomic nuclei - GANIL (2001)

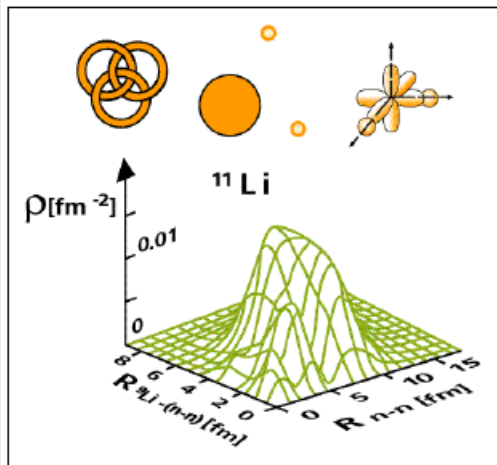


Introducción

Los núcleos exóticos exhiben propiedades que los diferencian de los estables. Algunas de las principales son:

- **Clusterización:** Localización no homogénea de los nucleones en el núcleo.
- **Halos:** Nucleones débilmente ligados. Producen núcleos extrañamente grandes.
- **Skins:** Neutrones al rededor del núcleo que producen menor densidad nuclear. Incrementan la interacción de apareamiento.
- **Núcleos Borromenaios:** Núcleos débilmente ligados que pueden ser considerados como sistemas de 3 cuerpos, donde los subsistemas son no ligados de a pares. (Ej. ^{11}Li).
- **Efectos del continuo:** Al estar cerca del treshold de energía, se deben considerar como sistemas abiertos.
- Many more...

Núcleos Borromeanos - Long term plans in the study of atomic nuclei - GANIL (2001)



Estructura de Capas

- Otra característica importante de los núcleos exóticos es la pérdida de la estructura de *números mágicos*.

Estructura de Capas

- Otra característica importante de los núcleos exóticos es la pérdida de la estructura de *números mágicos*.
- La estructura de capas es una propiedad fundamental de los núcleos.

Estructura de Capas

- Otra característica importante de los núcleos exóticos es la pérdida de la estructura de *números mágicos*.
- La estructura de capas es una propiedad fundamental de los núcleos.
- El potencial del Shell Model (SM), caracterizado por una región relativamente constante, una superficie delgada y una fuerte interacción spin-órbita fue propuesta por Maria Göppert-Mayer (y otros) en 1949.
- La idea de este modelo es considerar a los nucleones como partículas independientes, moviéndose en un potencial central.

Estructura de Capas

- Otra característica importante de los núcleos exóticos es la pérdida de la estructura de *números mágicos*.
- La estructura de capas es una propiedad fundamental de los núcleos.
- El potencial del Shell Model (SM), caracterizado por una región relativamente constante, una superficie delgada y una fuerte interacción spin-órbita fue propuesta por Maria Göppert-Mayer (y otros) en 1949.
- La idea de este modelo es considerar a los nucleones como partículas independientes, moviéndose en un potencial central.
- Como vimos, el potencial de Woods-Saxon con el término SO dan como resultado los gaps de energías que conducen a los números mágicos detectados experimentalmente.
- Pero, ¿hasta dónde es válida esta imagen?

Estructura de Capas

- Otra característica importante de los núcleos exóticos es la pérdida de la estructura de *números mágicos*.
- La estructura de capas es una propiedad fundamental de los núcleos.
- El potencial del Shell Model (SM), caracterizado por una región relativamente constante, una superficie delgada y una fuerte interacción spin-órbita fue propuesta por Maria Göppert-Mayer (y otros) en 1949.
- La idea de este modelo es considerar a los nucleones como partículas independientes, moviéndose en un potencial central.
- Como vimos, el potencial de Woods-Saxon con el término SO dan como resultado los gaps de energías que conducen a los números mágicos detectados experimentalmente.
- Pero, ¿hasta dónde es válida esta imagen?
- A medida que nos movemos de los núcleos estables, agregando neutrones, vemos que los números mágicos $N = 20$ y $N = 28$ desaparecen, y aparecen nuevos como $N = 14, 16, 18$ y 32 .

Estructura de Capas

Shell Model

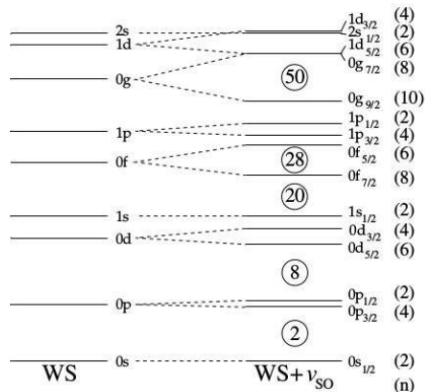
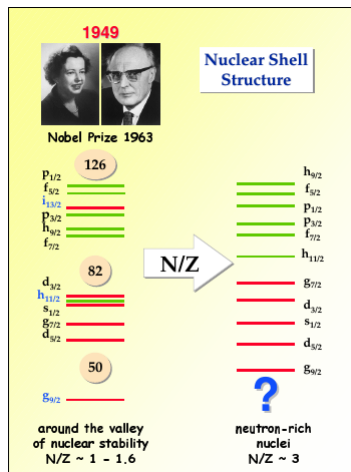


TABLE I.

| Osc. No. | Square well | Spect. term | Spin term | No. of states | Shells | Total No. |
|----------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------|-----------|
| 0 | 1s | 1s | $1s_{1/2}$ | 2 | 2 | 2 |
| 1 | 1p | 2p | $1p_{1/2}$ | 4 | 6 | 8 |
| | | | $1p_{3/2}$ | 2 | | |
| 2 | 1d | 3d | $1d_{3/2}$ | 6 | 12 | 20 |
| | | | $1d_{5/2}$ | 4 | | |
| 3 | 2s | 2s | $2s_{1/2}$ | 2 | 8? | 28? |
| | | | $1f$ | 4f | | |
| 4 | 2p | 3p | $1f_{5/2}$ | 6 | 22 | 50 |
| | | | $2p_{3/2}$ | 4 | | |
| 5 | 3s | 3s | $2p_{1/2}$ | 2 | 10 | 82 |
| | | | $1g_{7/2}$ | 8 | | |
| 6 | 3d | 3d | $1g_{5/2}$ | 6 | 32 | 82 |
| | | | $2d_{3/2}$ | 4 | | |
| 7 | 3s | 3s | $3s_{1/2}$ | 2 | 12 | 126 |
| | | | $1h_{11/2}$ | 12 | | |
| 8 | 3p | 4p | $1h_{9/2}$ | 10 | 44 | 126 |
| | | | $2f_{7/2}$ | 8 | | |
| 9 | 3p | 4p | $2f_{5/2}$ | 6 | 14 | 126 |
| | | | $3p_{3/2}$ | 4 | | |
| 10 | 3p | 4p | $3p_{1/2}$ | 2 | 14 | 126 |
| | | | $1i_{13/2}$ | 14 | | |
| 11 | 3d | 3d | $1i_{11/2}$ | 12 | 44 | 126 |
| | | | $2g$ | 6g | | |
| 12 | 3d | 3d | $2g$ | 6g | 44 | 126 |
| | | | $4s$ | 4s | | |

Shell Model



Evolución de la estructura de capas

¿Por qué?

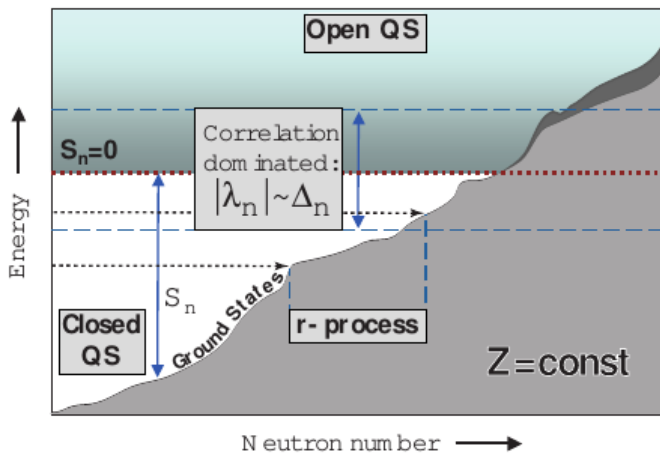
Evolución de la estructura de capas

¿Por qué?

Básicamente, para hacer una descripción más *realista* del problema de muchos cuerpos debemos tener en cuenta tres cuestiones importantes:

- El campo medio es sensible al llenado de las orbitas, debido a la componente tensorial de la interacción entre nucleones.
- Correlaciones, como apareamientos, entre nucleones débilmente ligados y no ligados tienen un rol importante, ya que estamos en una zona cercana al treshold.
- El sistema se comporta como un sistema cuántico abierto.

Evolución de la estructura de capas



Evolución de la estructura de capas

Teniendo en cuenta estos factores, se formulan modelos, en general fenomenológicos, para finalmente obtener las energías.

Como vimos, podemos hacer una expansión multipolar de los potenciales. Los términos más relevantes de la expansión son el monopolar y el cuadripolar.

En particular vamos a ver los efectos del orden monopolar de interacciones nucleón-nucleón en la estructura de capas del núcleo.

Evolución de la estructura de capas

Los valores de energías y sus corrimientos dependen del modelo de interacción efectiva, y éstos a su vez están parametrizados a partir de los resultados de experimentos. La elección del modelo depende del problema. Veamos un ejemplo de interacción efectiva nucleón-nucleón y la modificación de la estructura de capas:

Los valores de energías y sus corrimientos dependen del modelo de interacción efectiva, y éstos a su vez están parametrizados a partir de los resultados de experimentos. La elección del modelo depende del problema. Veamos un ejemplo de interacción efectiva nucleón-nucleón y la modificación de la estructura de capas:

VOLUME 87, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

20 AUGUST 2001

Magic Numbers in Exotic Nuclei and Spin-Isospin Properties of the NN Interaction

Takaharu Otsuka,^{1,2} Rintaro Fujimoto,¹ Yutaka Utsuno,³ B. Alex Brown,⁴ Michio Honma,⁵ and Takahiro Mizusaki⁶

¹*Department of Physics, University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan*

²*RIKEN, Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan*

³*Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan*

⁴*National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824*

⁵*Center for Mathematical Sciences, University of Aizu, Tsuruga, Ikki-machi, Aizu-Wakamatsu, Fukushima 965-8580, Japan*

⁶*Department of Law, Senshu University, Higashimita, Tama, Kawasaki, Kanagawa, 214-8580, Japan*

(Received 31 March 2001; published 3 August 2001)

The magic numbers in exotic nuclei are discussed, and their novel origin is shown to be the spin-isospin dependent part of the nucleon-nucleon interaction in nuclei. The importance and robustness of this mechanism is shown in terms of meson exchange, G -matrix, and QCD theories. In neutron-rich exotic nuclei, magic numbers such as $N = 8, 20$, etc. can disappear, while $N = 6, 16$, etc. arise, affecting the structure of the lightest exotic nuclei to nucleosynthesis of heavy elements.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.082502

PACS numbers: 21.30.Fe, 21.60.Cs, 27.20.+n, 27.30.+t

Ejemplo

El término monopolar de la expansión viene dado por:

$$V_{j_1 j_2}^T = \frac{\sum_J (2J + 1) \langle j_1 j_2 | V | j_1 j_2 \rangle_{JT}}{\sum_J (2J + 1)}$$

donde $\langle j_1 j_2 | V | j_1 j_2 \rangle_{JT}$ son los elementos de matriz de la interacción de dos cuerpos, V .

La dependencia de J desaparece, por lo que lo único que importa es el número de nucleones de cada órbita.

Ejemplo

Tomemos las energías para ^{30}Si y ^{24}O , ambos con $N = 16$.

Las órbitas de valencia son

$0d_{5/2,3/2}$, $1s_{1/2}$, $0f_{7/2}$ y $1p_{3/2}$. (Capa llena p).

^{30}Si tiene 6 protones de valencia y es estable.

^{24}O no tiene protones de valencia y es un núcleo exótico (rico en neutrones).

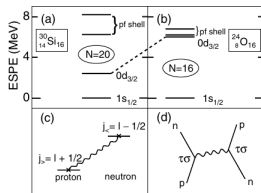


FIG. 1. Neutron ESPE's for (a) ^{30}Si and (b) ^{24}O , relative to $1s_{1/2}$. The dotted line connecting (a) and (b) is drawn to indicate the change of the $0d_{3/2}$ level. (c) The major interaction producing the basic change between (a) and (b). (d) The process relevant to the interaction in (c).

Ejemplo

- Para el ^{30}Si los neutrones en $0d_{3/2}$ y $1s_{1/2}$ están cerca.
- Para el ^{24}O el nivel $0d_{3/2}$ está más arriba, cerca de la capa pf , y aparece un gap de energía entre $0d_{3/2}$ y $1s_{1/2}$ de $\sim 6\text{Mev}$.
- Por otro lado, en el ^{30}Si el gap de energía aparece entre el nivel $0d_{3/2}$ y la capa pf (resultado conocido).

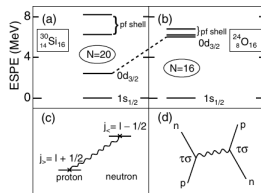


FIG. 1. Neutron ESPE's for (a) ^{30}Si and (b) ^{24}O , relative to $1s_{1/2}$. The dotted line connecting (a) and (b) is drawn to indicate the change of the $0d_{3/2}$ level. (c) The major interaction producing the basic change between (a) and (b). (d) The process relevant to the interaction in (c).

Ejemplo

Vemos que el número mágico $N = 20$ existe en el núcleo estable ^{30}Si .

Pero desaparece para el núcleo exótico ^{24}O , y tenemos un nuevo número mágico $N = 16$.

Este efecto no es relevante para los isótopos livianos del O ($N \sim 10$).

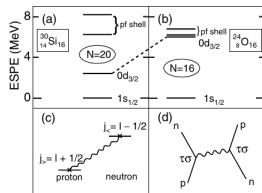


FIG. 1. Neutron ESPE's for (a) ^{30}Si and (b) ^{24}O , relative to $1s_{1/2}$. The dotted line connecting (a) and (b) is drawn to indicate the change of the $0d_{3/2}$ level. (c) The major interaction producing the basic change between (a) and (b). (d) The process relevant to the interaction in (c).

Ejemplo

La interacción NN en este proceso viene dada por:

$$V_{\tau\sigma} = \tau \cdot \tau\sigma \cdot \sigma f_{\tau\sigma}(r)$$

donde τ y σ son los operadores isospin y spin, y r es la distancia entre nucleones.

El efecto de esta interacción en ^{30}Si es una fuerte atracción entre un protón en $0d_{5/2}$ y un neutrón en $0d_{3/2}$.

En general, tenemos esta interacción entre un par $\pi - \nu$ en órbitas $j_{>} = l + 1/2$ y $j_{<} = l - 1/2$. $j_{>}$ y $j_{<}$ son pares del SO.

En este caso tenemos $l = 2$ (d).

De esta manera ^{24}O es un núcleo mágico (y no semimágico).

Ejemplo

El origen de este tipo de potencial se encuentra en la fuerza tensorial de modelos $\pi + \rho$ meson exchange.

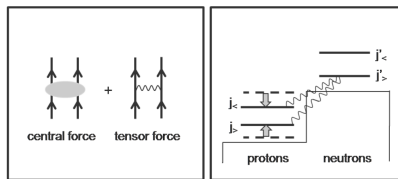
Otros números mágicos

Se puede mostrar que las capas $N = 20$ y $N = 28$ desaparecen y aparecen nuevas con $N = 16$ para $Z = 6, 8$ y $N = 34$ para $Z = 20$.

También para los isótopos ^{52}Ca y ^{54}Ca aparecen gaps en $N = 32$ y $N = 34$.

$N = 6$ también puede convertirse en mágico.

Vale la pena remarcar que la “magicidad” de los números depende del núcleo en cuestión, ya que estas interacciones NN responsables de los corrimientos dependen del llenado de los niveles de protones y neutrones. Fuerzas residuales tensoriales.



Conclusiones

- Vimos que la estructura de capas, tan importante para el entendimiento de los núcleos, puede romperse bajo ciertas condiciones, apareciendo nuevos números mágicos.
- Observamos que con distintos modelos de fuerza residual podemos hacer descripciones más “realistas” de los núcleos.
- Con estos modelos podemos no sólo considerar la interacción entre distintos nucleones, si no que también con la aparición del operador *isospín* podemos considerar interacciones entre protones y neutrones, considerados completamente independientes en nuestros modelos anteriores.

Referencias

J. Dobaczewski, N. Michel, W. Nazarewicz, M. Płoszajczak, J. Rotureau. (2007). Shell structure of exotic nuclei. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 59 (1), 432-445.

Jochen Erler, Noah Birge, Markus Kortelainen, Witold Nazarewicz, Erik Olsen, Alexander M. Perhac & Mario Stoitsov. (2012). The limits of the nuclear landscape. *Nature*, 486 509–512.

Long term plans in the study of atomic nuclei. (2001) Conseil scientifique GANIL.

Otsuka, T., Fujimoto, R., Utsuno, Y., Brown, A., Honma, M., Mizusaki, T. (2001). Magic numbers in exotic nuclei and spin-isospin properties of the NN interaction. *Physical Review Letters*, 87 (8).

Otsuka, T., Suzuki, T., Fujimoto, R., Grawe, H., Akaishi, Y. (2005). Evolution of nuclear shells due to the tensor force. *Physical Review Letters*, 95.

Otsuka, T., Suzuki, T., Honma, M., Utsuno, Y., Tsunoda, N., Tsukiyama, K., Hjorth-Jensen, M. (2010). Novel features of nuclear forces and shell evolution in exotic nuclei. *Physical Review Letters*, 104