

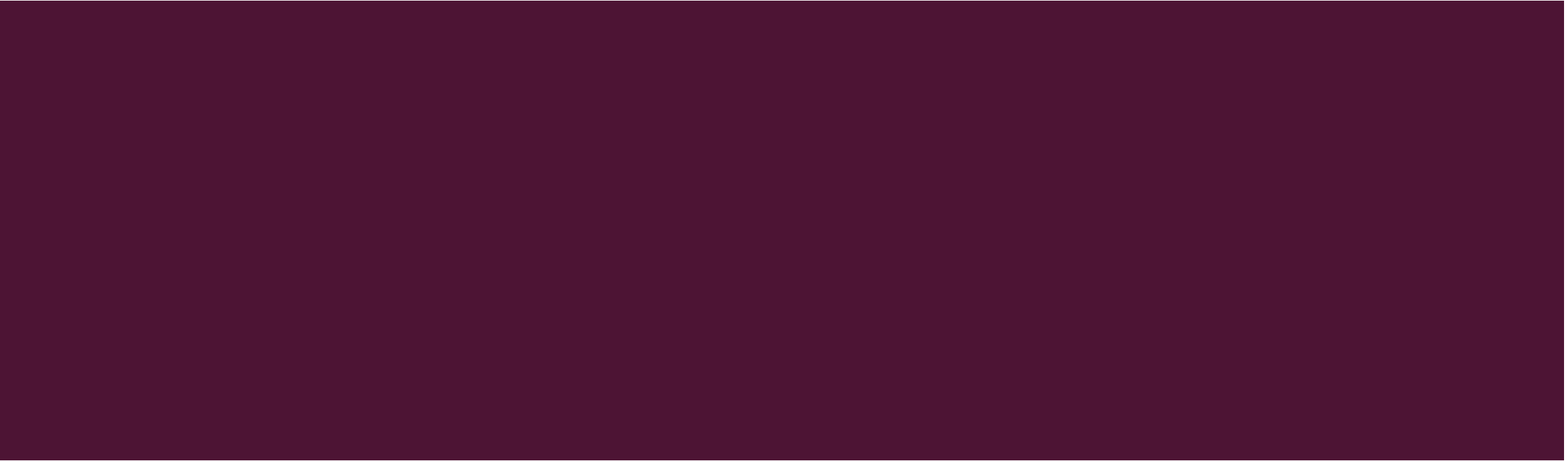


INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR

“MICROSECOND ISOMER AT THE $N=20$ ISLAND OF SHAPE INVERSION OBSERVED
AT FRIB”

SANCHEZ, MARÍA VICTORIA

2024



INTRODUCCIÓN

Un isómero es un estado excitado metaestable del núcleo, cuya vida media es mayor a $10^{-9}s$.

Estos estados excitados son metaestables ya que no poseen transiciones favorables para decaer en gamma, esto puede suceder por dos razones:

- 1) Transición de momento angular: el decaimiento al estado fundamental implica una gran variación del spin.
- 2) Debido al cambio de forma: para un estado excitado el núcleo puede ser deformado y en su estado fundamental tenga forma esférica. El decaimiento del estado excitado al fundamental implica un reordenamiento que puede ser dificultoso.

¿Qué es un núcleo deformado?

El modelo de capas nuclear consiste en describir al núcleo como un sistema interactuante en término de partículas independientes en un potencial central promedio generado por todos los otros nucleones.

$$H_0 \psi = \varepsilon \psi \qquad H_0 = \sum_i^A h(r_i) \qquad h(r) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \right] \nabla_r^2 + v(r)$$

Tres potenciales:

- Woods-Saxon
 - Oscilador Armónico
 - Cosh
- $$v(r) = \frac{-V_0}{1 + e^{r-R/a}} \qquad v(r) = \frac{1}{2} m \omega^2 r^2$$

Estos tres potenciales tienen simetría esférica. Para núcleos con capa cerrada estos potenciales son adecuados, pero para núcleos con número de nucleones alejados de las capas cerradas como $A \approx 25$, $150 < A < 190$ y $A > 220$ para que funcione el modelo de capas hay que modificar el potencial a uno deformado.

Modelo de Nilsson:

En el modelo de capas deformado se resuelve la ecuación de Schrödinger utilizando un potencial que describe la forma del núcleo, por ejemplo el hamiltoniano con un oscilador armónico deformado es:

$$h(r) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_r^2 + \frac{1}{2} m (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2) \right]$$

El resultado de resolver la ecuación es que l y s dejan de ser buenos números cuánticos para describir estados.

Si la deformación posee simetría axial, entonces la proyección del momento angular total sobre el eje de simetría es un buen número cuántico y se lo nombra Ω .

$$\Omega = m_l + m_s = m_l \pm \frac{1}{2}$$

En general se describen los estados deformados con los números cuánticos de Nilsson.

$$\Omega \pi [N n_z \lambda]$$

Con:

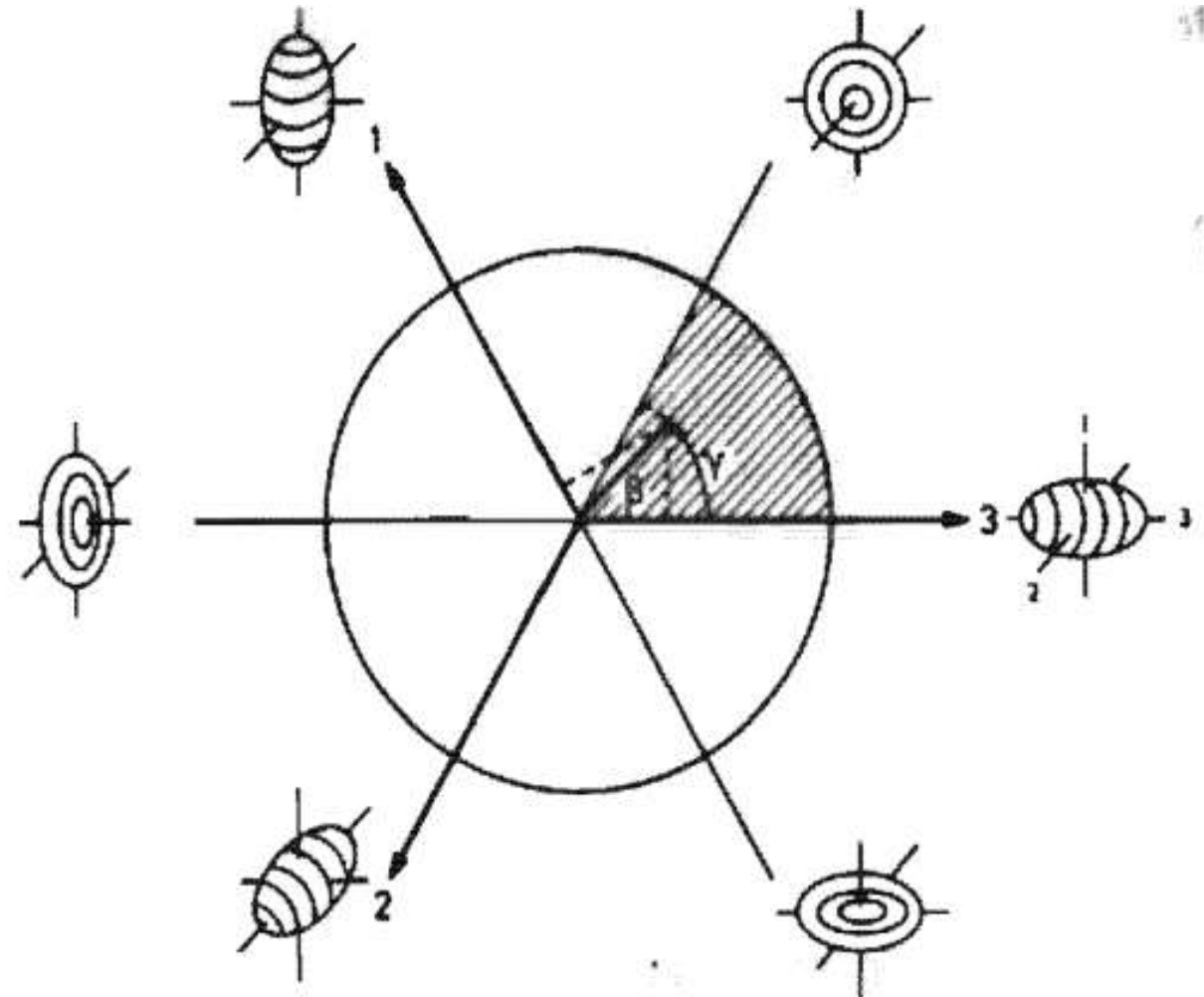
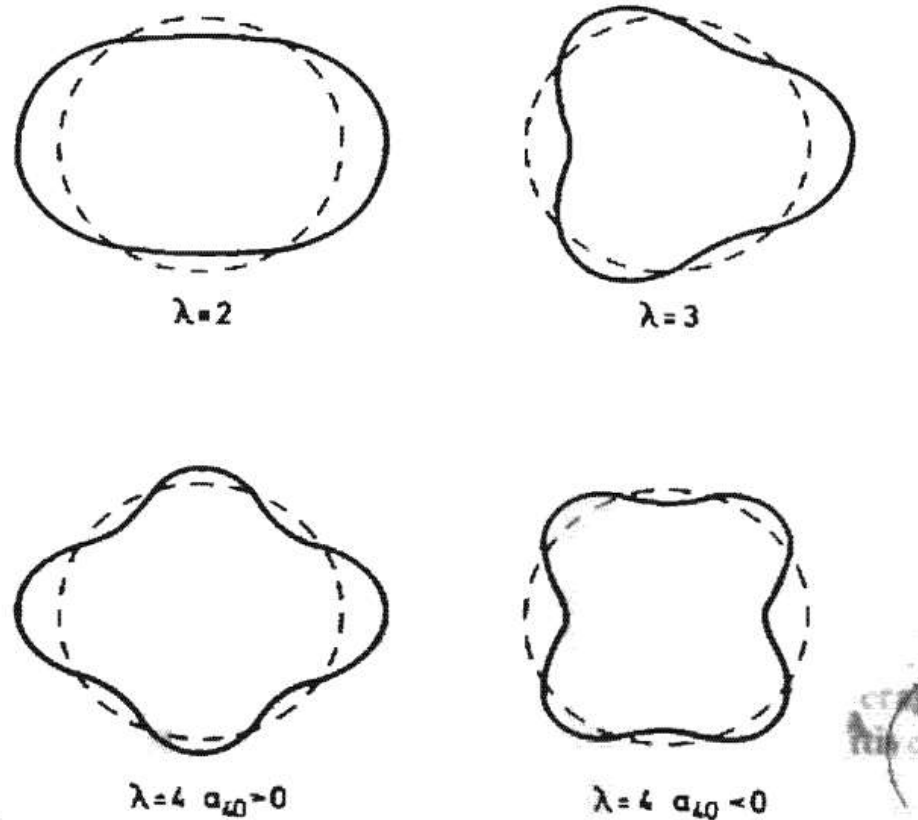
N = número de capa

$\pi = (-1)^N$ paridad

n_z = proyección del momento angular orbital l sobre el eje de simetría.

Un núcleo deformado puede tener distintas formas, dependiendo del valor de un parámetro λ , en el caso $\lambda=2$ el núcleo toma la forma de un elipsoide y se llama deformación cuadrupolar.

Para deformaciones cuadrupolares se definen las coordenadas de Hill-Wheeler γ , β . Para ciertos valores de gamma el núcleo elipsoidal es prolato u oblato o forma triaxial. Beta da la idea de cuán deformado es el núcleo.



Bandas rotacionales.

En el modelo de la gota líquida se considera al núcleo como un todo para estudiar propiedades y no se tienen en cuenta las contribuciones individuales de los nucleones. En particular si el núcleo rota como un cuerpo rígido (sin vibraciones), la energía cinética de rotación será:

$$T_{rot} = \frac{I_1^2}{2I_1} + \frac{I_2^2}{2I_2} + \frac{I_3^2}{2I_3}$$

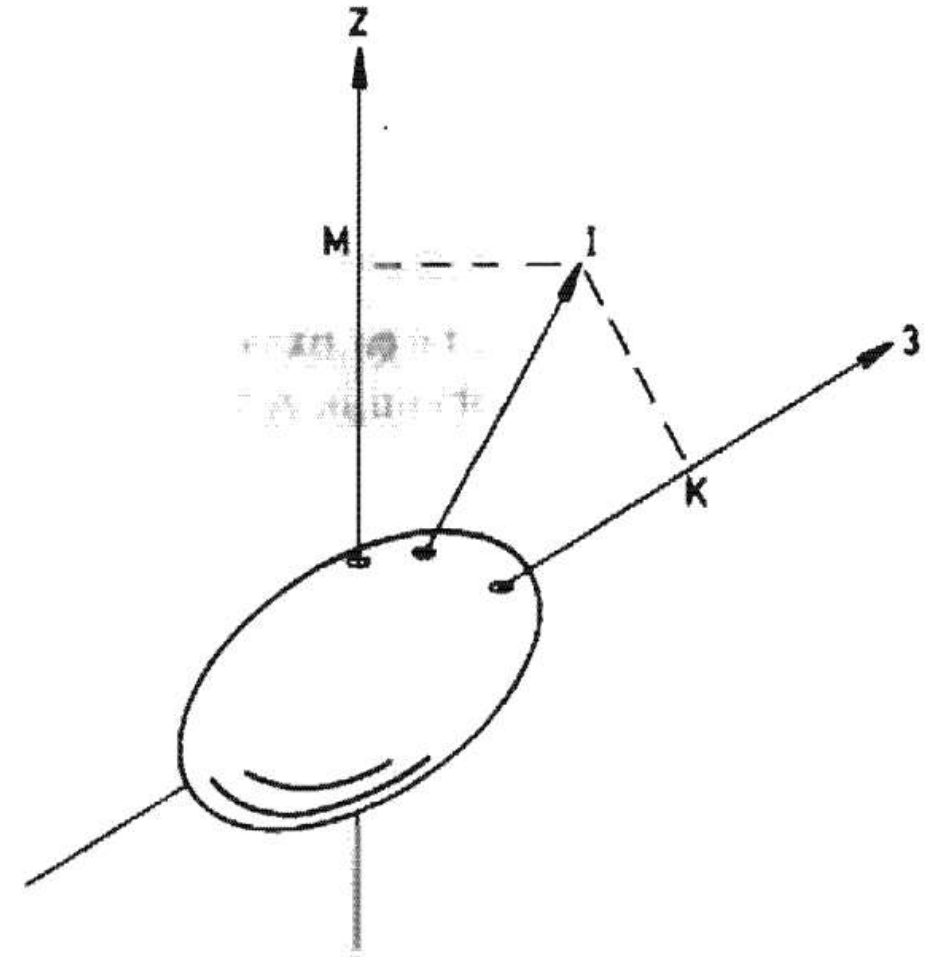
Si el cuerpo rígido tiene simetría axial alrededor del eje 3.

$$H = \frac{I_1^2 + I_2^2}{2I_1} = \frac{I^2 - I_3^2}{2I}$$

Las energías de este hamiltoniano son:

$$E = \frac{\hbar^2}{2I} (I(I + 1)) - K^2$$

Como $J \geq K$, para cada $K \geq 0$ existirá una banda de estados con energía proporcional a $I(I + 1)$, estas bandas se llaman bandas rotacionales. El estado más bajo de una banda se llama “band head”. Paridad $\pi = (-1)^J$



Transiciones electromagnéticas.

Cuando una partícula transiciona de un estado a otro emite energía electromagnética. La energía de radiación electromagnética se puede describir haciendo un desarrollo multipolar.

Una transición eléctrica ($E\lambda$) refiere a la excitación de un protón en un potencial central y que cambia de orbita, en el caso de este trabajo se presentan transiciones eléctricas cuadrupolares ($E2$).

Una transición magnética ($M\lambda$) ocurre cuando el espín intrínseco cambia, en este caso hay transiciones magnéticas cuadrupolares ($M2$).

Estas reglas de selección determinan si una transición se puede dar o no.

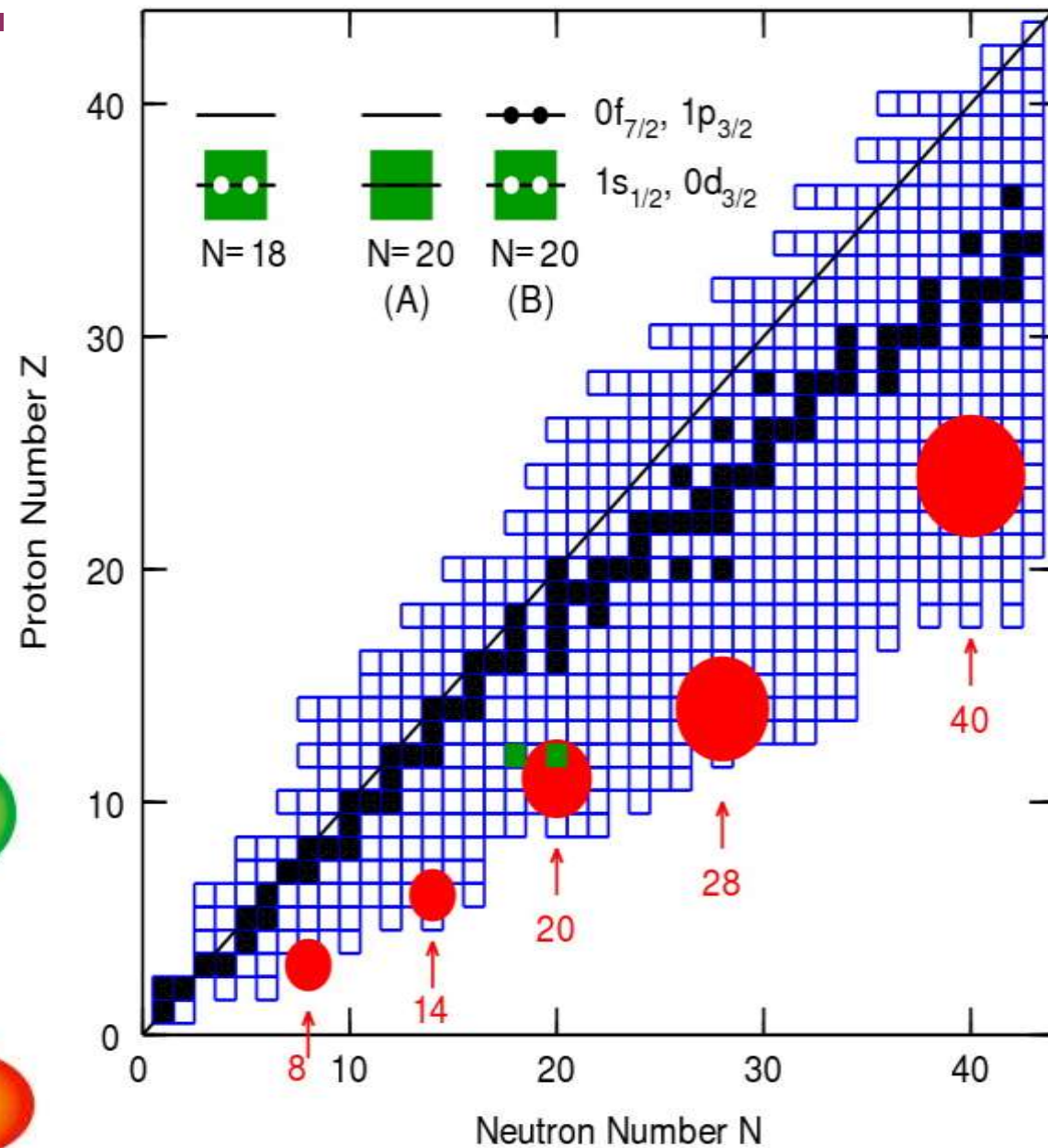
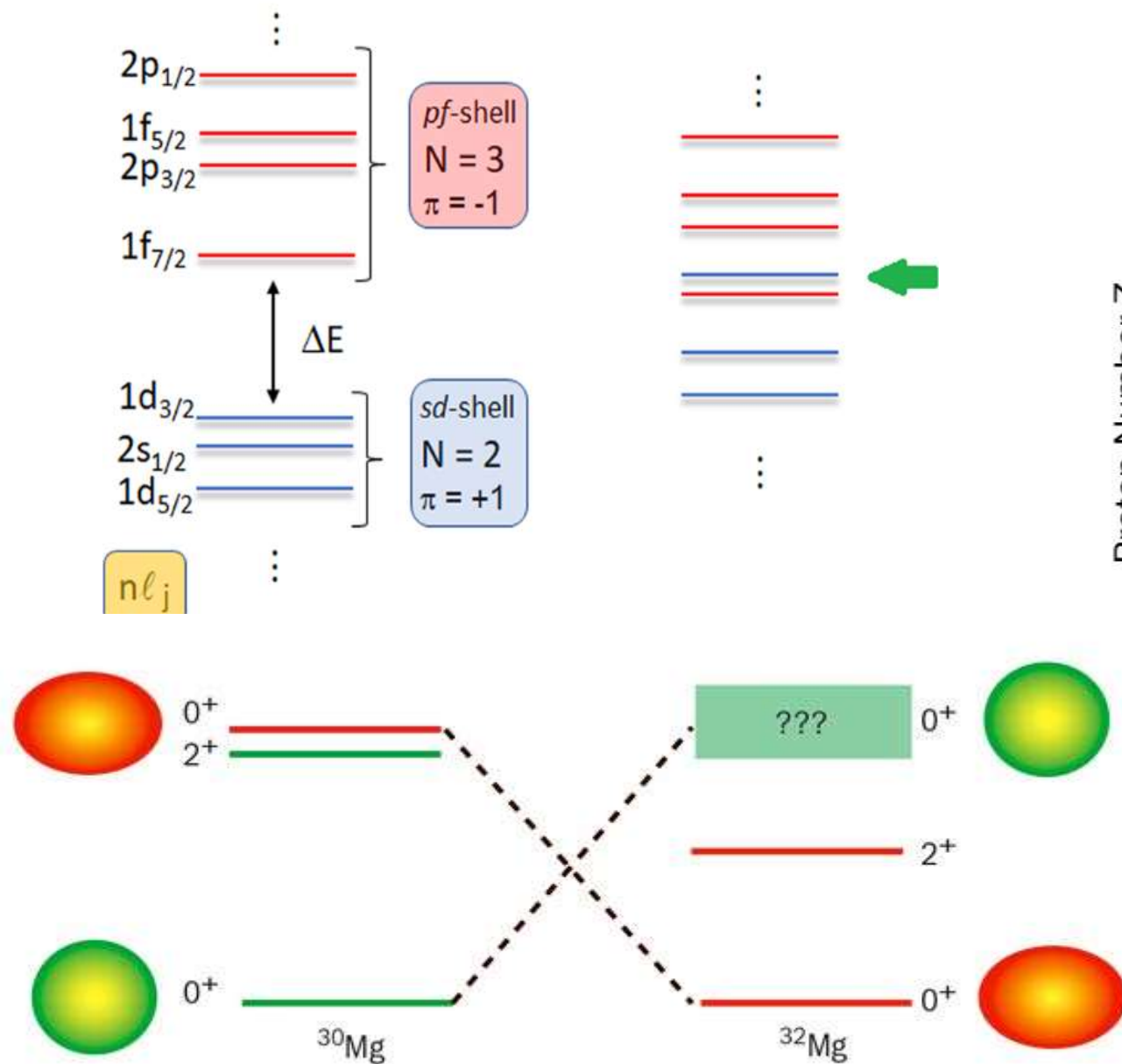
Las cantidades $B(E2, I_i \rightarrow I_f)$ y $B(M2, I_i \rightarrow I_f)$ dan una estimación del número de nucleones que contribuyen a la radiación. Su unidad es la unidad de Weisskopf (W.u).

Otros conceptos

- Isla de Inversión (Island of inversion): región en la tabla de nucleídos donde los isótopos presentan una elevada estabilidad aún estando rodeados de núcleos muy inestables. Cada isla contiene isótopos con un ordenamiento de niveles del modelo de capas que no es el estándar. En términos del modelo de capas, las fuerzas entre nucleones cambia el orden de los orbitales, a veces tanto que los orbitales descienden metiéndose a través de una capa cerrada.
- Coexistencia de forma (shape coexistence): Fenómeno en el cual en un mismo núcleo hay presencia de dos o más estados que poseen formas intrínsecas distintas. Esta presencia de estados excitados de distinta forma se da a niveles excitados bajos y energías muy cercanas. Se conocen casos de estados fundamentales esféricos en coexistencia con estados excitados deformados, sin embargo casos con estados fundamentales deformados con excitados esféricos son más difíciles de encontrar.
- También puede suceder que al tener los estados formas esféricas o deformadas, al invertirse el su orden se invierten las formas (shape inversion). Además se pueden mezclar distintas configuraciones con distintas formas, aunque no muy distintas (shape mixing).

Standard ordering

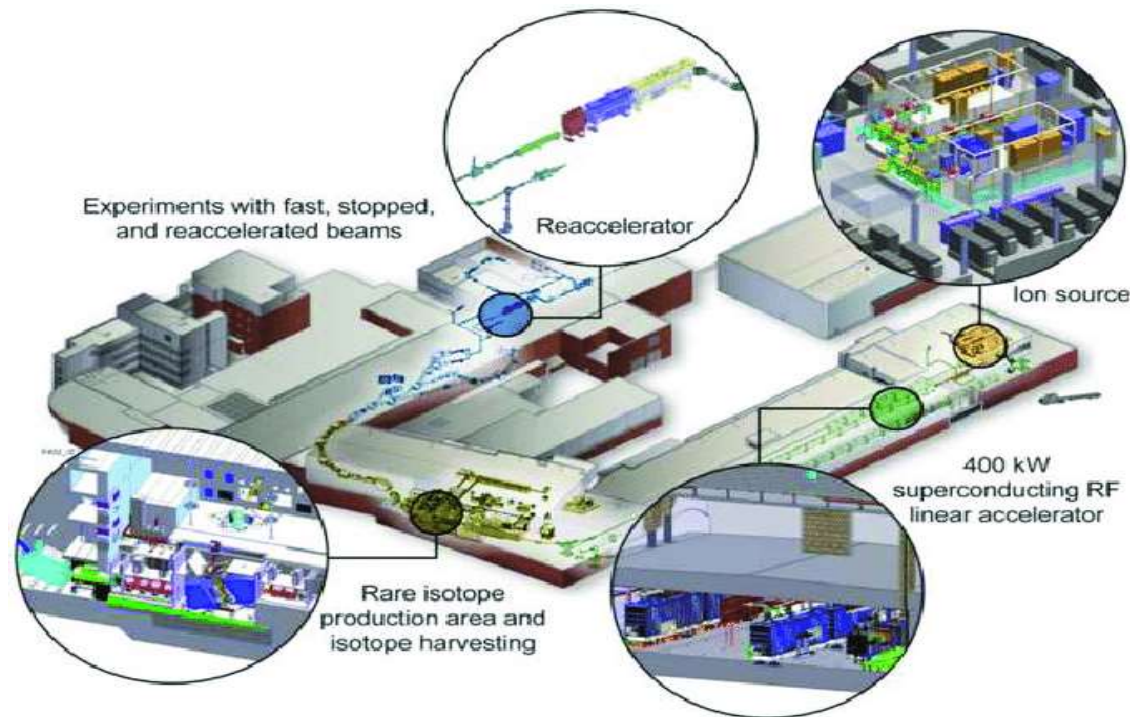
Inversion occurs!



Este paper presenta un nuevo isómero con una vida media de $24(2) \mu\text{s}$ en ^{32}Na . Este núcleo es impar-impar con $Z=11$ y $N=21$ y está ubicado dentro de la isla de inversión $N=20$.

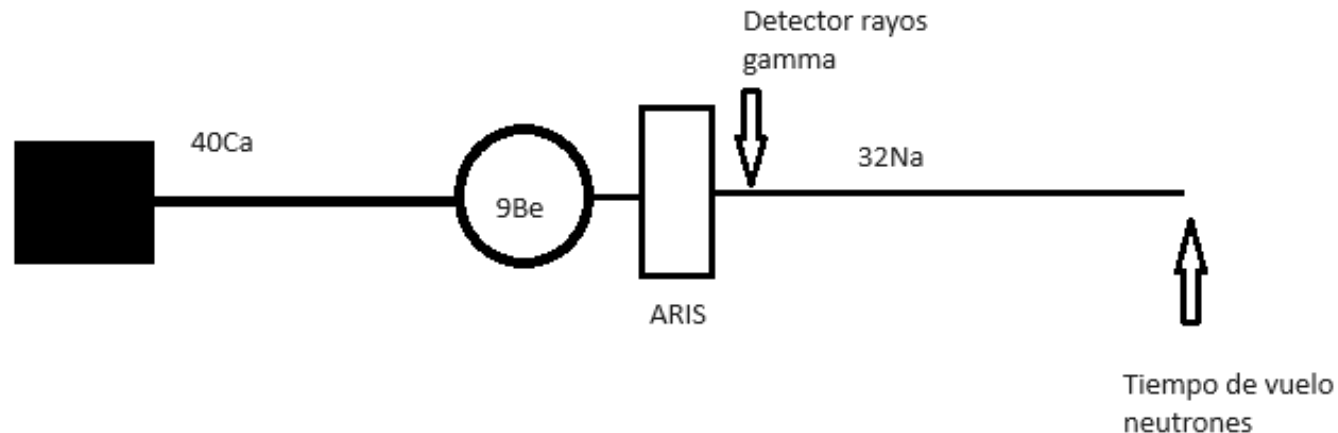
El trabajo que se presenta surge del primer experimento hecho en el Facility for Rare Isotopes (FRIB), con análisis de espectroscopia para estados excitados.

El FRIB está ubicado en la Universidad del Estado de Michigan, EEUU. La primera experiencia fue realizada el 22 de junio de 2022 y los resultados fueron publicados el 14 de noviembre.



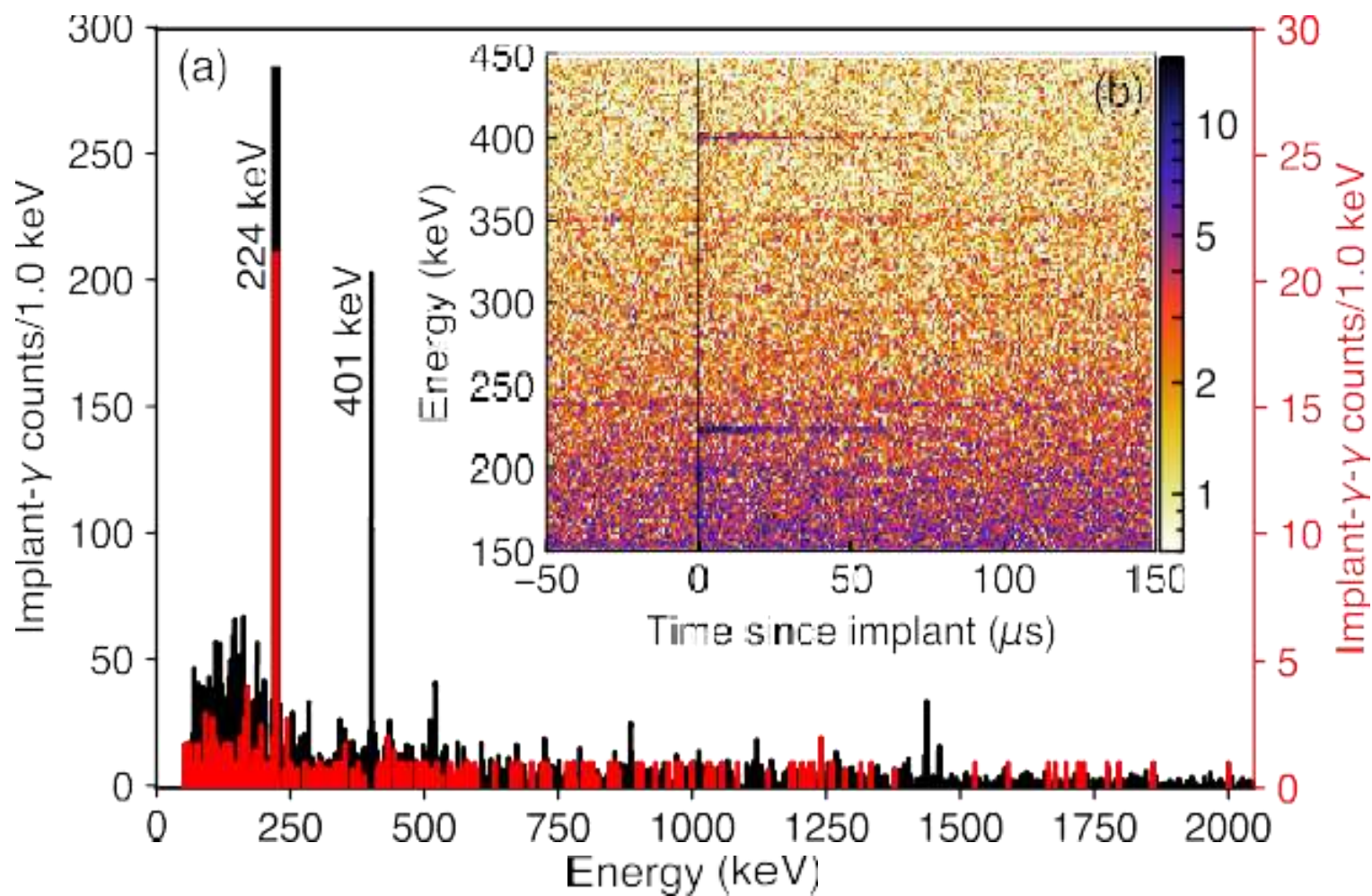
Procedimiento experimental.

- 1) Un haz incidente de ^{48}Ca con una potencia de aprox. 1kW incide en un blanco de ^9Be . El Advanced Rare Isotope Separator (ARIS) selecciona un haz que contiene varios elementos, entre ellos el ^{32}Na .
- 2) De un lado del rayo, se ubica un detector de rayos gamma (Decay Germanium Array) y del otro un dispositivo que mide tiempo de vuelo para neutrones que recorren distancia de un metro (Neutron Xn Tracking).
- 3) Se toman datos de las energías del rayo gamma y la diferencia de tiempo entre la detección del haz con ^{32}Na y la emisión del rayo gamma.

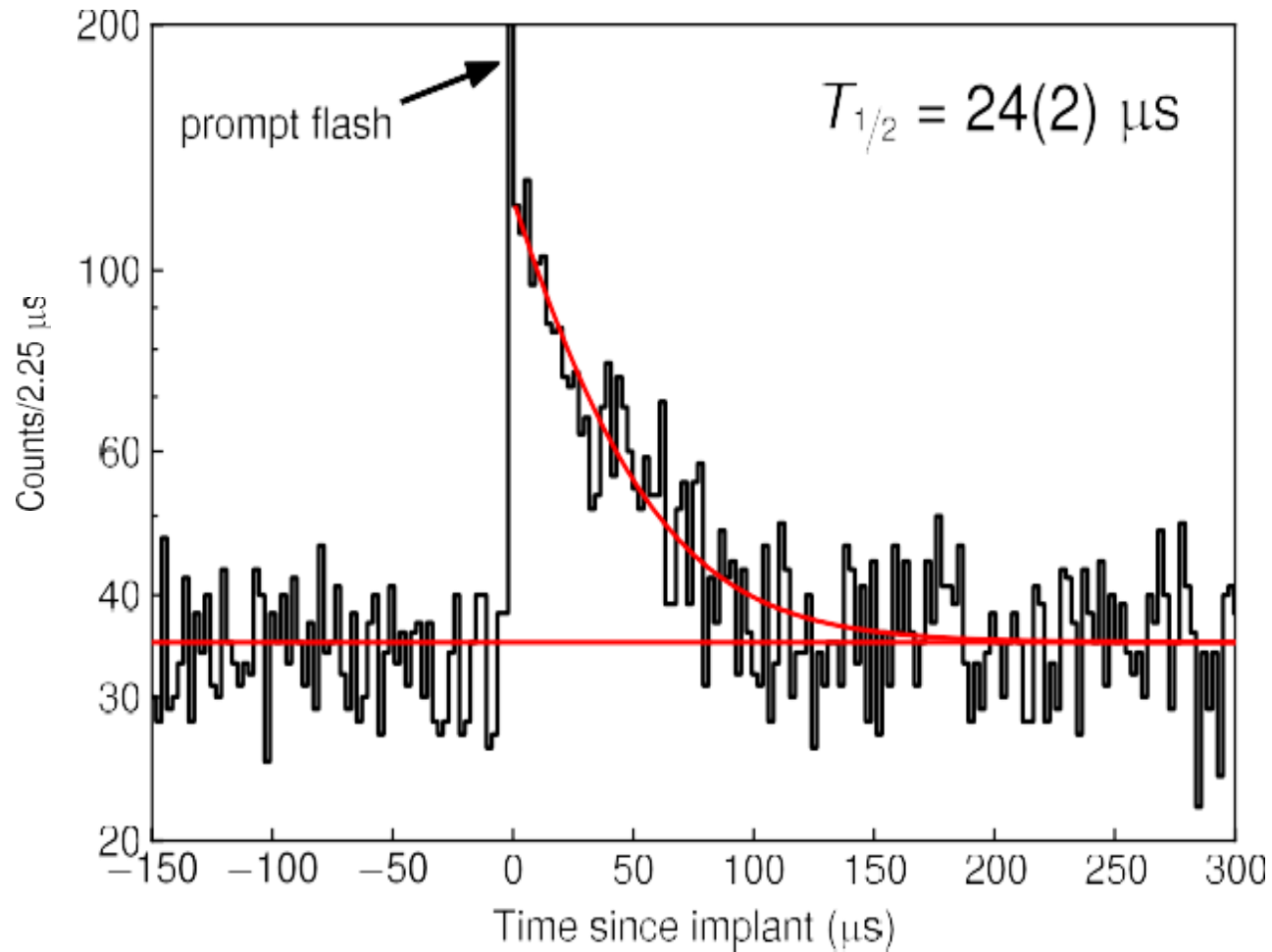


Resultados.

Se presenta una figura con dos gráficos. La figura (a) muestra el espectro de rayos gamma emitidos del ^{32}Na . Dos rayos γ se observan a 244 y 401 keV (negro), además se ve que coinciden (rojo). En la figura (b) se muestra el decaimiento exponencial en el tiempo de estos rayos.



Con la figura (b) se puede medir la vida media del isómero. En la figura se muestra un gráfico de cuentas vs. Tiempo, combinando los dos rayos y juntos.



$$N(T) = N_0 e^{-T/\tau}$$

$$T_{1/2} = \tau \ln 2$$

$$N(T) = N_0 e^{-T_{1/2}/\tau}$$



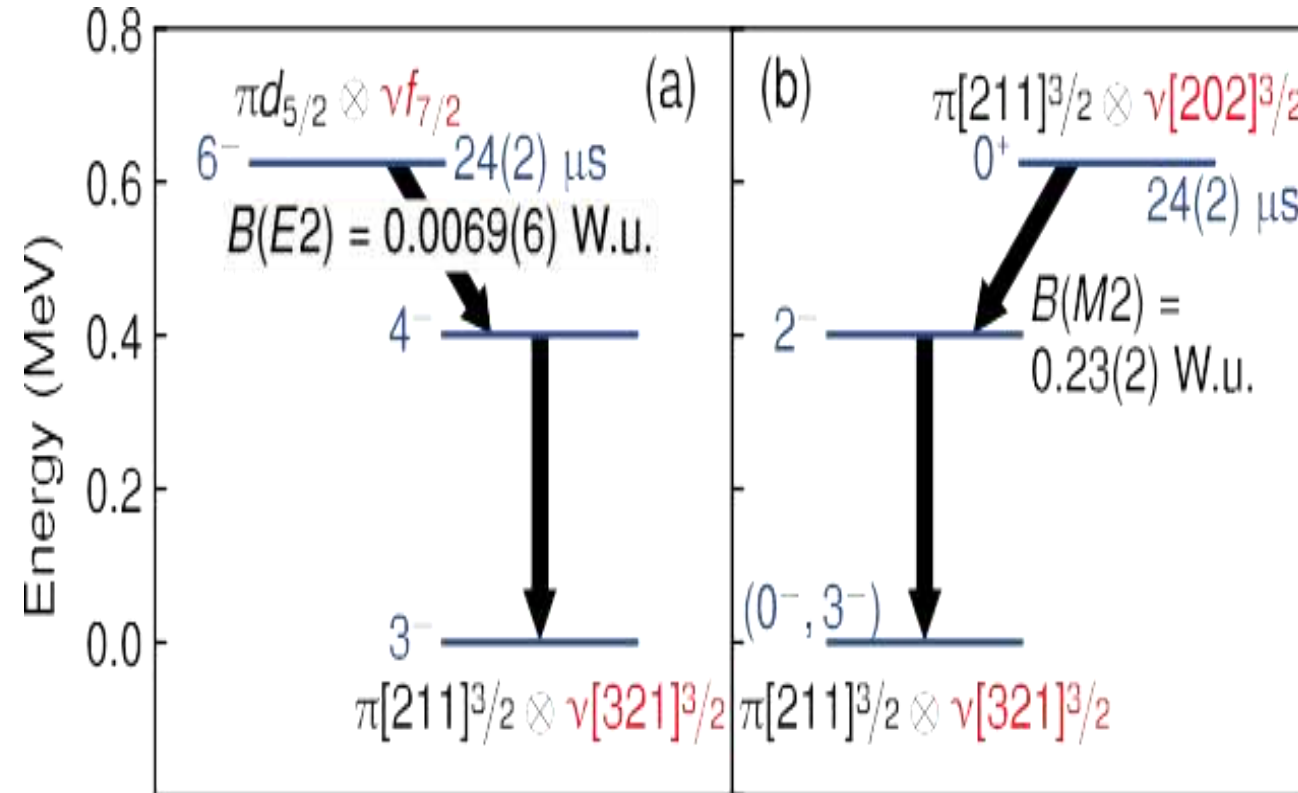
$$T_{1/2} = 24(2) \mu$$
s

Análisis.

En definitiva los resultados indican un isómero de duración del microsegundo en ^{32}Na que decae con dos rayos gamma hacia el estado fundamental o un estado de vida larga que decae en β en ^{32}Na .

El trabajo plantea dos explicaciones para este isómero:

- 1) Isómero esférico que decae con emisión de un rayo γ E2.
- 2) Un isómero deformado que decae con emisión de rayo γ M2.



(a) Un isómero 6^- con forma esférica que surge del acople de los orbitales $\pi d_{5/2} \otimes \nu f_{7/2}$ (multiplete) decae mediante una transición E2 hacia el miembro 4^- de la banda rotacional $K = 3^-$. La secuencia del decaimiento es $6^- \rightarrow 4^- \rightarrow 3^-$, dando los dos rayos gamma observados. Para este caso se considera que hay una coexistencia de forma entre el estado fundamental deformado y un estado excitado esférico.

(b) Un isómero deformado basado en el acople de los estados deformados $\pi[211]^{3/2^+} \otimes \nu[202]^{3/2^+}$, $J^+ = 0^+$ (deformed band head), decae en con una transición M2 al miembro 2^- de la banda rotacional $K = 0^-$. La secuencia de spin es en este caso $0^+ \rightarrow 2^- \rightarrow 0^-$, con los rayos gamma vistos. En este escenario plantea la idea de que los estados están dominados por la deformación sin que ninguno tenga forma esférica.

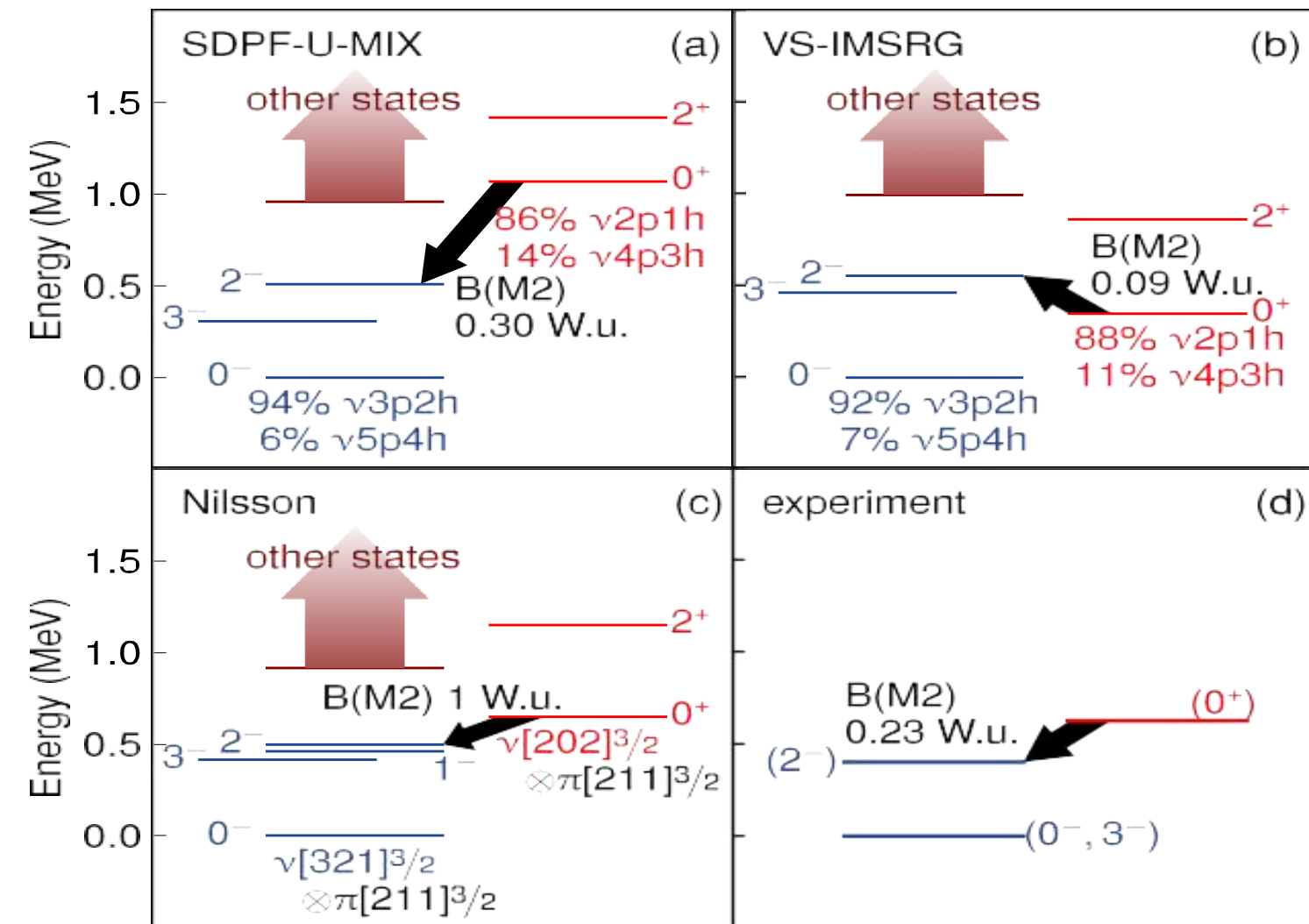


Para determinar cual de estas hipótesis explica mejor el resultado experimental, se hicieron cálculos numéricos para comparar con el esquema de decaimiento experimental. Estos métodos numéricos resuelven la ecuación de Schrödinger (problema de muchos cuerpos) según los parámetros que se den: tipo de interacción y espacio en el que se quiere resolver.

Los tres métodos que se usaron son:

- (a) Cálculos de modelo de capa a gran escala “SPDF-U-MIX”.
- (b) Cálculos Ab-initio “VS-IMSRG”.
- (c) Modelo de Nilsson en el límite de strong coupling.

En la figura siguiente se muestran los resultados obtenidos con los tres métodos mas el resultado experimental.

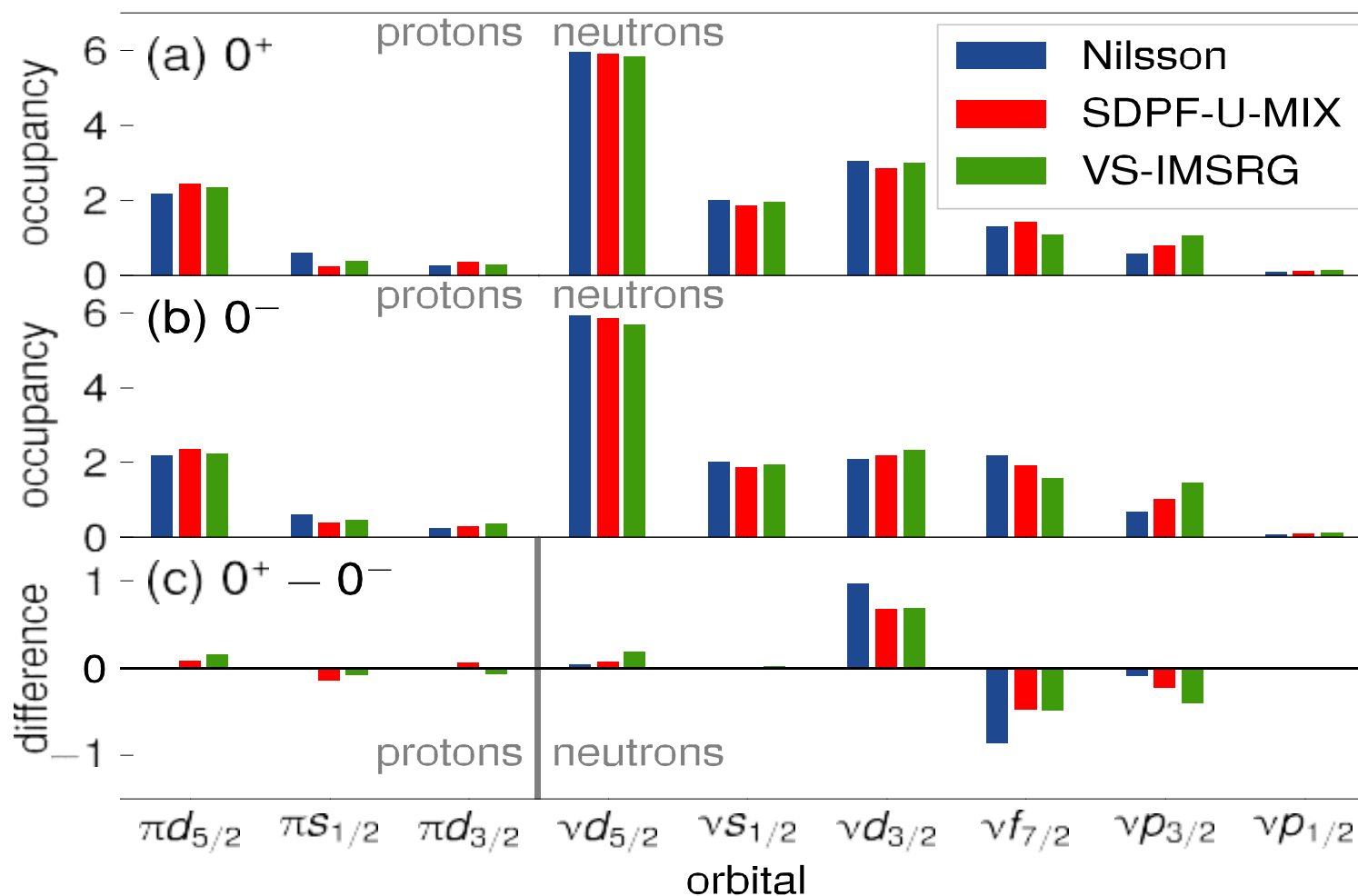


En la figura se pueden ver similitudes entre los esquemas surgidos de los métodos numéricos y el esquema experimental.

Primero, los cuatro esquemas muestran la misma secuencia de decaimiento $0^+ \rightarrow 2^- \rightarrow 0^-$.

Segundo, las *transition strengths* para la transición M2 del segundo caso son están cercanas a la calculada experimentalmente.

Por último se comparan las ocupaciones de los orbitales por parte de los nucleones para cada método de cálculo. De acá se puede concluir que la transición es de tipo M2.



De la comparación del resultado experimental con los resultados de los cálculos numéricos se puede concluir que la segunda hipótesis es la correcta para la existencia del isómero.

Conclusión.

Mediante un experimento hecho en FRIB, se encontró un isómero con vida media $24(2)\text{-}\mu\text{s}$ en ^{32}Na ubicado en la isla de inversión $N=20$, este es el único isómero con vida media del orden del microsegundo en la región. Se plantearon dos hipótesis en cuanto a su existencia y mediante cálculos se pudo concluir que este isómero de espín deformado que decae en $M2$ y cuyo estados de baja energías son todos deformados.

¿Para qué pueden servir estos isómeros?

Estos isómeros pueden ser utilizados como “sondeo” para describir estructuras nucleares, ya que no hay una gran cantidad de configuraciones que den como resultado isomerismo. Además ayudan en la interpretación de las estructuras de las regiones de transición.