

Drip Lines de Neutrones en la región del Ca mediante Machine Learning Bayesiano

Seminario Final - Introducción a la
Física Nuclear

Manuel Moyano

Tabla de contenidos

1 Introducción

- Drip lines
- Isótopos de Calcio

2 Método

- Machine Learning Bayesiano
- Análisis estadístico

3 Resultados

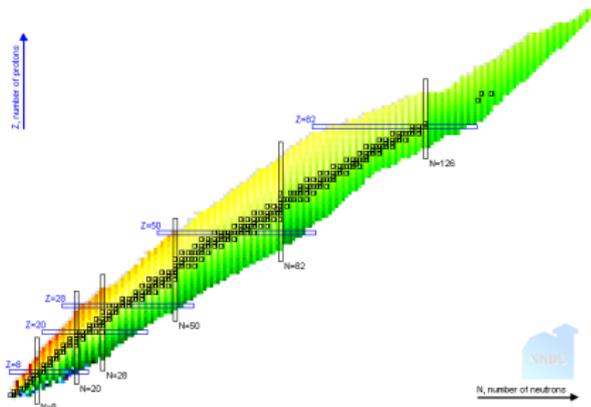
- Isótopos 55-57Ca
- Región Ca completa

4 Conclusiones

5 Referencias

Drip lines

- Al rededor de **3200** isótopos son conocidos.
- Solo **286** nucleidos son parte de lo que llamamos valle de estabilidad.
- Podemos alejarnos de la región de estabilidad agregando neutrones, entrando a regiones de corta vida media.
- La existencia nuclear termina en la drip lines, donde los nucleones ya no están unidos al núcleo mediante la fuerza nuclear fuerte.



Drip lines

- La estabilidad de un nucleido está determinada por su **energía de separación**: la energía necesaria para remover un nucleón (S_n) o par de nucleones (S_{2n}).
- Encontramos la drip line de un neutrón cuando $S_n = 0$ y la drip line de dos neutrones cuando $S_{2n} = 0$.

Drip lines

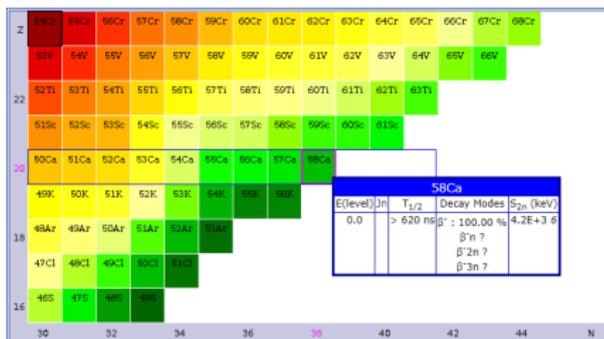
- La estabilidad de un nucleido está determinada por su **energía de separación**: la energía necesaria para remover un nucleón (S_n) o par de nucleones (S_{2n}).
- Encontramos la drip line de un neutrón cuando $S_n = 0$ y la drip line de dos neutrones cuando $S_{2n} = 0$.
- Cuesta energía romper la ligadura de un par nucleónico, resulta que los núcleos con **número par** de nucleones están más ligados que los núcleos con **número impar** de nucleones.
- Como resultado la drip line de un nucleón se alcanza primero que la drip line de dos nucleones.
- Este comportamiento de núcleos pares e impares termina generando **patrones irregulares de existencia de núcleos**.

Isótopos de Calcio

El isótopo más pesado de Ca descubierto es ^{60}Ca .

Es una de las regiones más importantes a estudiar desde el punto de vista teórico, ya que diferentes métodos difieren en las predicciones de la drip line:

- **Método de A-Cuerpos:** predice la drip line de dos neutrones al rededor de ^{60}Ca .
- **Teoría de funcionales de la densidad:** predice la drip line de dos neutrones al rededor de ^{70}Ca .



Método: Machine Learning Bayesiano

El ML Bayesiano es un paradigma para construir modelos estadísticos basados en el **Teorema de Bayes**

- Sea $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ un conjunto de sucesos mutuamente excluyentes, y tales que ninguna de sus probabilidad de ocurrencia sea nula, y sea B un suceso cualquiera del cual se conoce la probabilidad de ocurrencia condicionada a la ocurrencia de A_i $P(B|A_i)$, entonces

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)} \quad (1)$$

Método: Machine Learning Bayesiano

- Aquí se investiga la drip line de neutrones del Ca a través de [Modelos de Masa Nuclear Globales](#), y con la ayuda de [Machine Learning Bayesiano](#).
- Se requiere una gran cantidad de de información para poder realizar extrapolaciones con una certeza razonable mediante Machine Learning.
- Se toman datos basados tanto en Teoría de Funcionales de la Densidad, así como en modelos de masa más fenomenológicos basados en Teoría de Campo Medio.

Análisis estadístico

- Primero se calculan los residuos de energía de separación basándose en en datos de entrenamiento de núcleos (Z,N):

$$\delta_{1n/2n}(Z, N) = S_{1n/2n}^{exp}(Z, N) - S_{1n/2n}^{teo}(Z, N) \quad (2)$$

- Luego estos valores se pueden usar para construir emuladores $\delta_{1n/2n}^{est}$ mediante el análisis de **ML Bayasiano** sobre extrapolaciones de **Procesos Gaussianos** (PG).

Análisis estadístico

- Primero se calculan los residuos de energía de separación basándose en en datos de entrenamiento de núcleos (Z,N):

$$\delta_{1n/2n}(Z, N) = S_{1n/2n}^{exp}(Z, N) - S_{1n/2n}^{teo}(Z, N) \quad (3)$$

- Luego estos valores se pueden usar para construir emuladores $\delta_{1n/2n}^{est}$ mediante el análisis de **ML Bayasiano** sobre extrapolaciones de **Procesos Gaussianos** (PG).
- Las energías de separación desconocidas se predicen estadísticamente combinando predicciones teóricas con los residuos estimados por el ML Bayesiano:

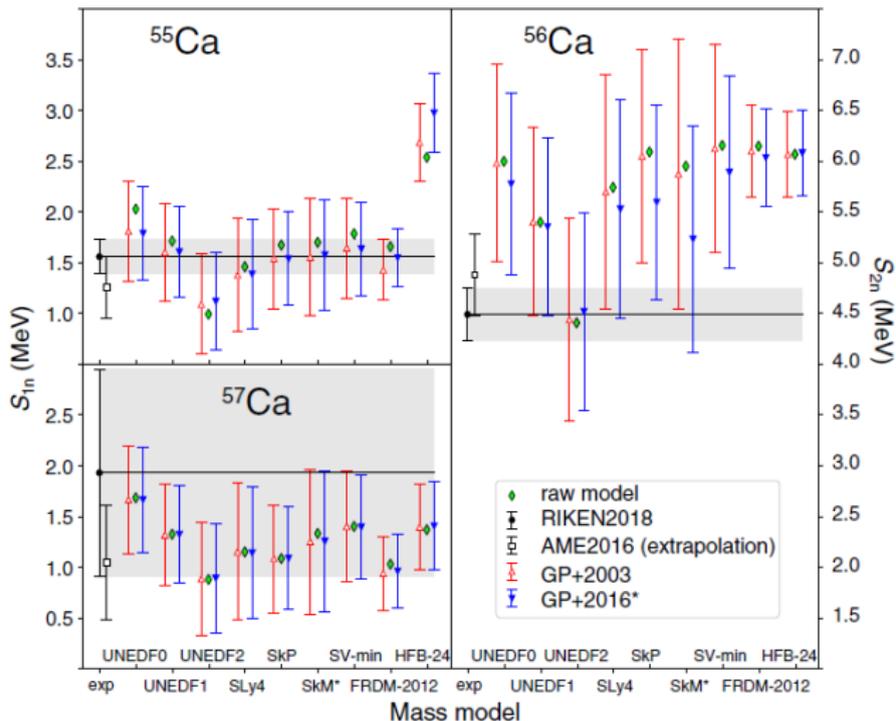
$$S_{1n/2n}^{est}(Z, N) = S_{1n,2n}^{teo}(Z, N) + \delta_{1n,2n}^{est}(Z, N) \quad (4)$$

- El último término es el **promedio posterior bayesiano**, que predice el residuo.

Resultados: 55-57Ca

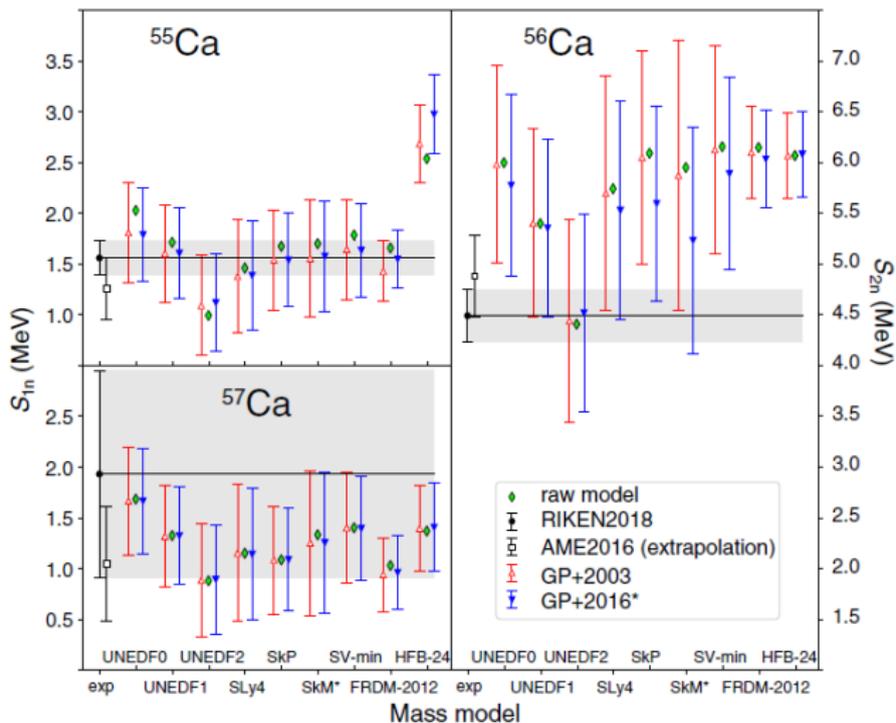
Valores de S_{1n} para ^{55}Ca y ^{57}Ca , y S_{2n} para ^{56}Ca .

Constraste con valores experimentales, considerando diferentes modelos teóricos.



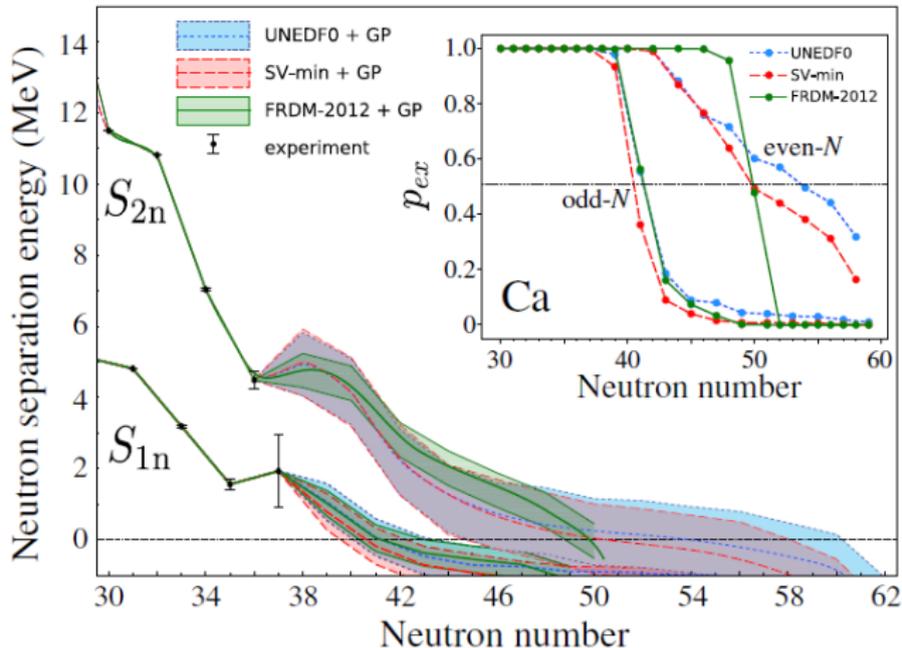
Resultados: $^{55-57}\text{Ca}$

- Buen acuerdo para ^{55}Ca y ^{57}Ca , excepto considerando HFB-24.
- Para ^{56}Ca se encuentran resultados sobreestimados.



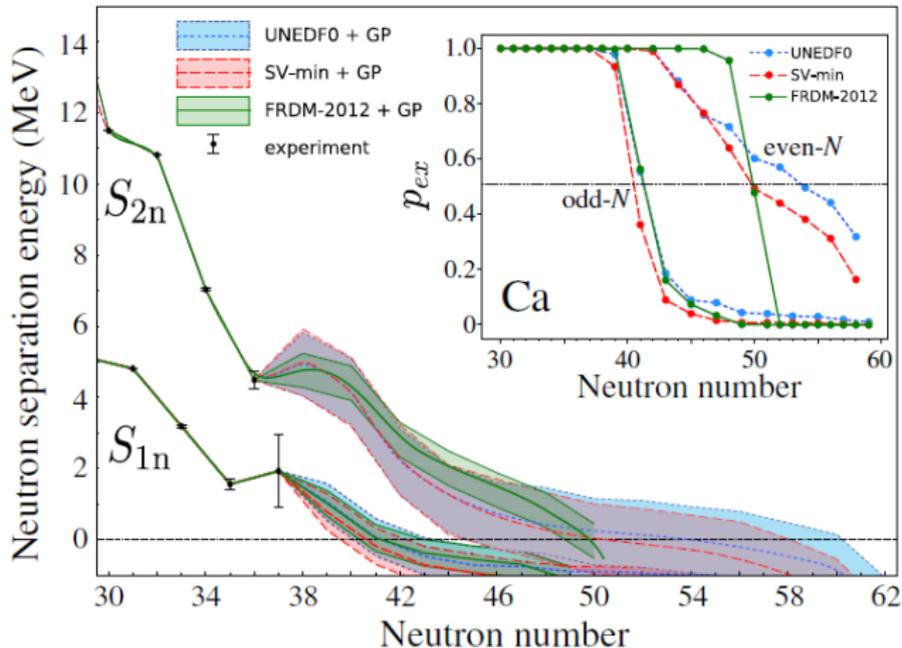
Resultados: 55-57Ca

Energías de separación extrapoladas para tres modelos globales de masa, con corrección del PG.



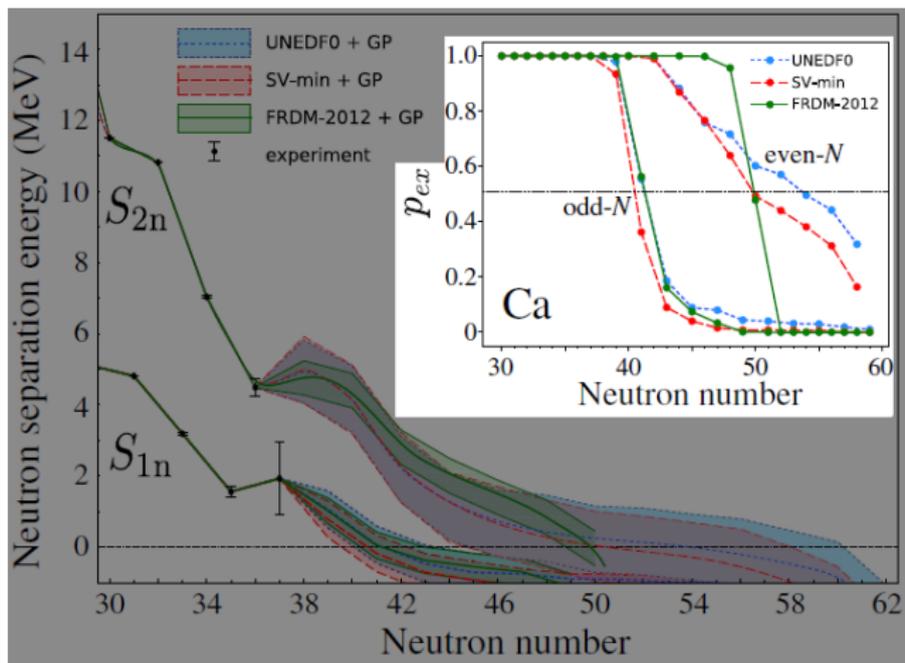
Resultados: 55-57Ca

- UNEDF0+GP: coloca la drip line de $2n$ en $N = 54$.
- Considerando los intervalos de credibilidad de un sigma, se ve que se lo puede colocar hasta $N = 46$ con probabilidad 84%.
- Quizás esta no es la manera más efectiva de visualizar los datos.



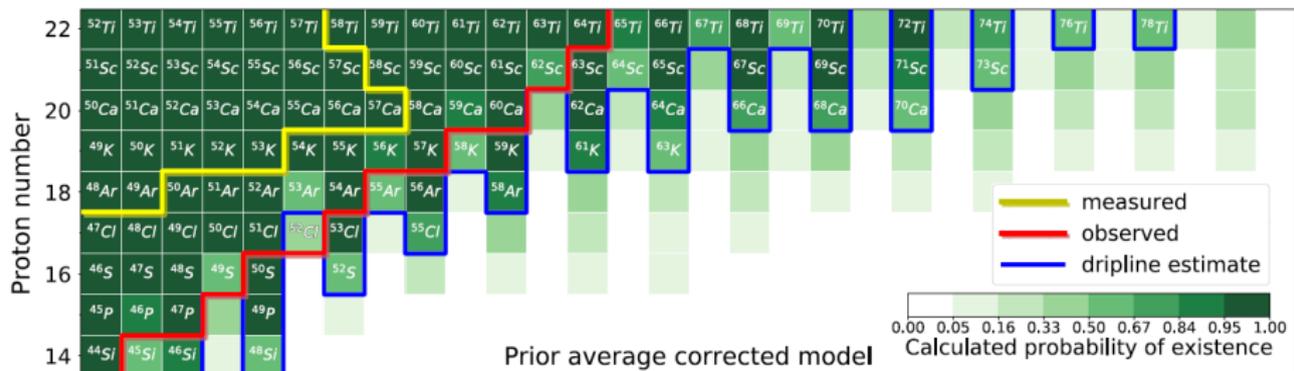
Resultados: 55-57Ca

- $p_{ex}(Z, N)$: probabilidad de que $S_{1n/2n}(Z, N)$ de ser positiva.
- Odd-N: S_{1n} .
- Even-N: S_{2n} .



Resultados: Región Ca completa

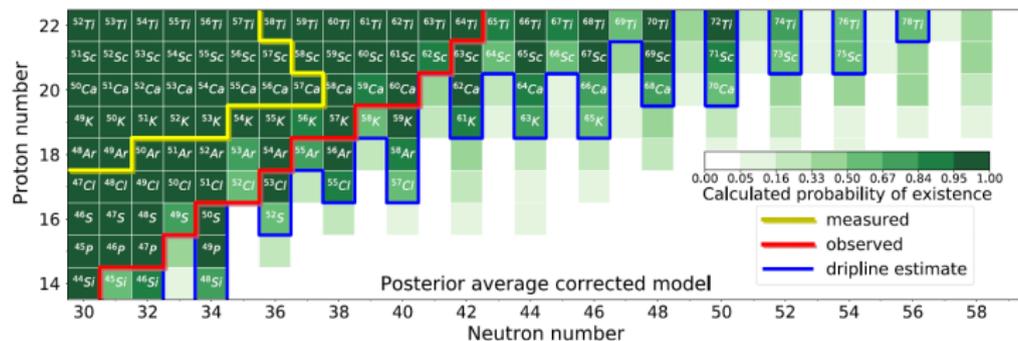
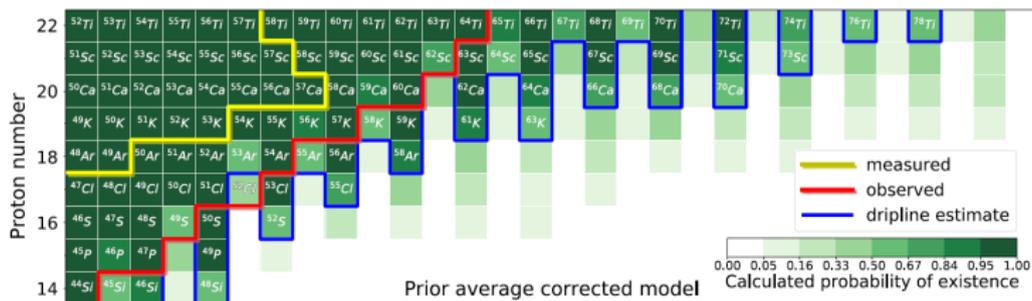
- Los nucleidos ^{52}Cl , ^{53}Ar y ^{49}S representan un desafío para los modelos globales de masa porque están muy débilmente ligados.
- Según el análisis, ^{52}Cl es inestable.
- Sin embargo, experimentalmente se sabe de sus existencias, entonces podemos agregar esta información al ML Bayesiano.



Resultados: Región Ca completa

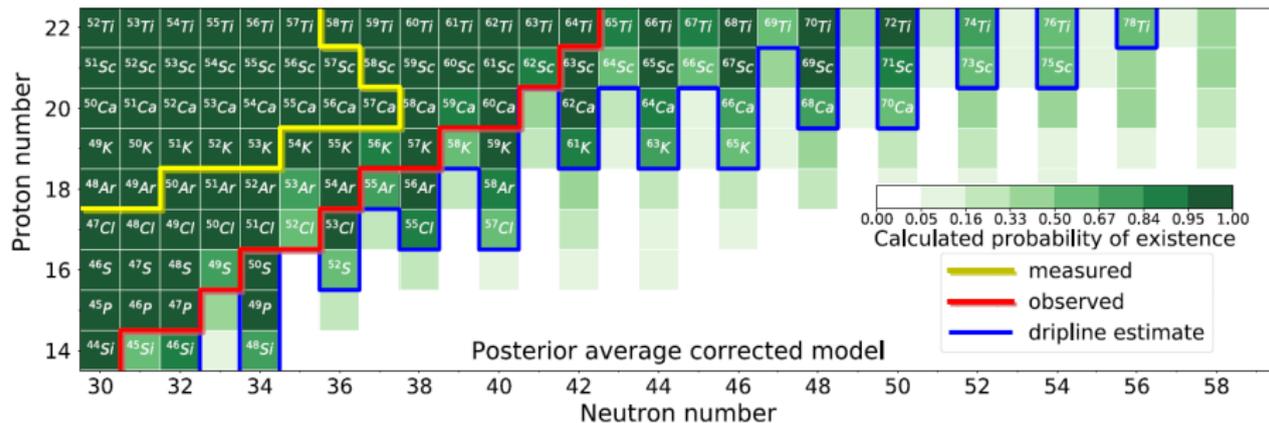
Nueva tabla

- La consideración de los tres nucleidos modifica la predicción en nucleidos alejados.



Resultados: Región Ca completa

- ^{61}Ca y ^{71}Ti se predicen $1n$ inestables.
- Sin embargo las drip line $2n$ se extienden hasta ^{72}Ca y ^{78}Ti .



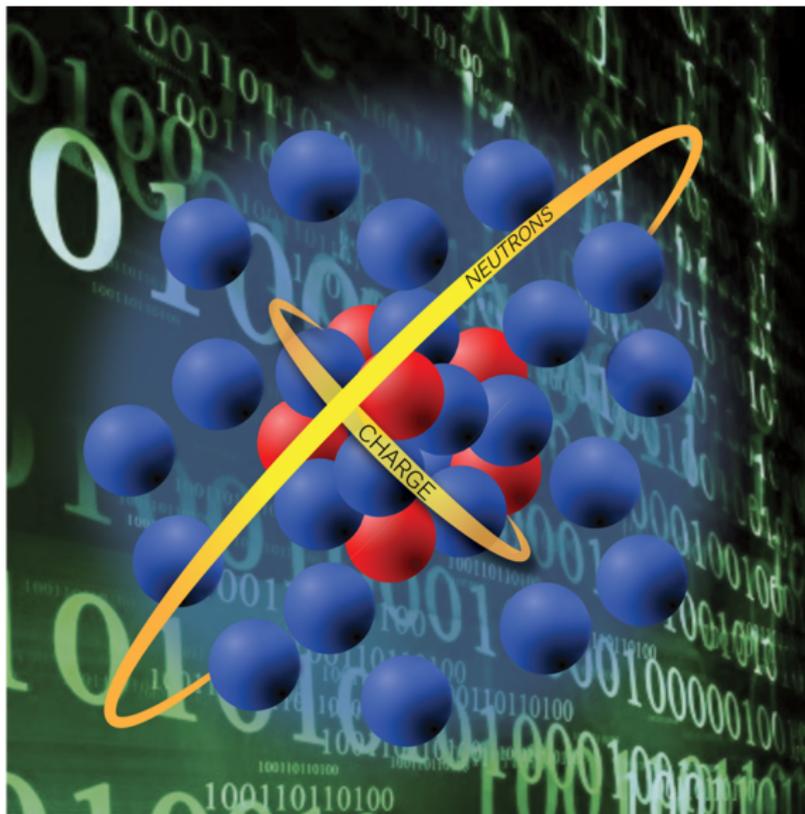
Conclusiones

- Se cuantificó la estabilidad neutrónica de los núcleos en términos de la probabilidad de existencia $p_{ex}(Z, N)$.
- Los resultados finales son consistentes con datos experimentales recientes: ^{60}Ca es ligado con $S_{2n} = 5\text{MeV}$, y ^{49}S , ^{52}Cl y ^{53}Ar están apenas ligados.

A considerar

- Los modelos nucleares por sí solos **no son capaces** de brindar las probabilidades de existencia de los núcleos. Esto se realiza mediante el ML Bayesiano implementado.
- El ML Bayesiano aquí está basado en los resultados de la Teoría de Funcionales de la Densidad (DFT) y los modelos de campo medio, por lo tanto, **los resultados obtenidos están condicionados a la veracidad de estos modelos nucleares**.
- Igual de importantes son los resultados experimentales, como se vió en el caso de ^{49}S , ^{52}Cl y ^{53}Ar .

Fin. ¿Preguntas?



Referencias I



Léo Neufcourt, Yuchen Cao, Witold Nazarewicz, Erik Olsen, y Frederi Viens

Neutron Drip Line in the Ca Region from Bayesian Model Averaging.
PHYSICAL REVIEW LETTERS 122, 062502. 2019.