

# **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

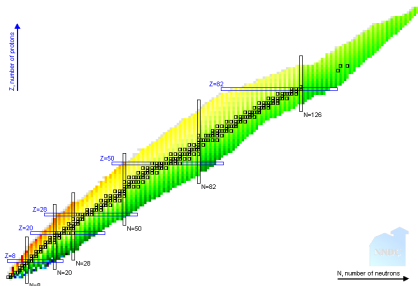
- Isótopos 55-57Ca
- Región Ca completa

## 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

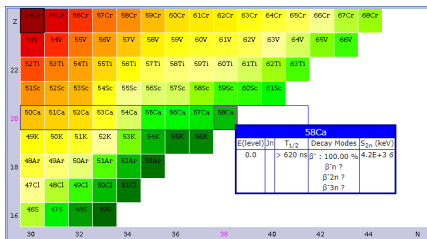
- La estabilidad de un nucleido está determinada por su **energía de separación**: la energía necesaria para remover un nucleón ( $S_n$ ) o par de nucleones ( $S_{2n}$ ).
- Encontramos la drip line de un neutrón cuando  $S_n = 0$  y la drip line de dos neutrones cuando  $S_{2n} = 0$ .
- Cuesta energía 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  $^{60}\text{Ca}$ .

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  $^{60}\text{Ca}$ .
- **Teoría de funcionales de la densidad:** predice la drip line de dos neutrones al rededor de  $^{70}\text{Ca}$ .



# 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:

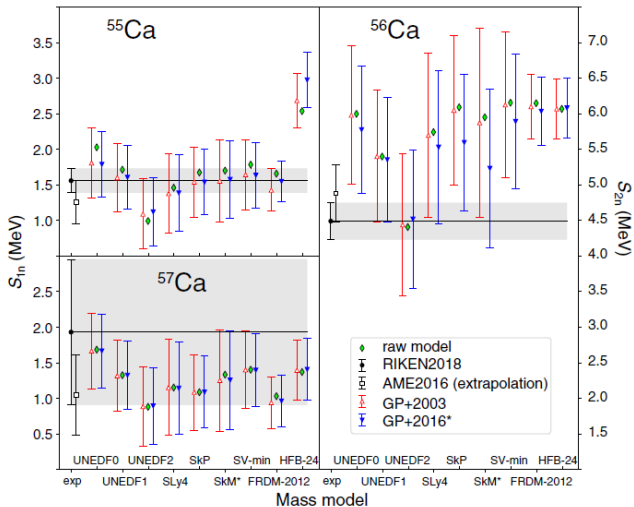
$$S_{1n/2n}^{est}(Z, N) = S_{1n,2n}^{teo}(Z, N) + \delta_{1n,2n}^{est}(Z, N) \quad (4)$$

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

# Resultados: 55-57Ca

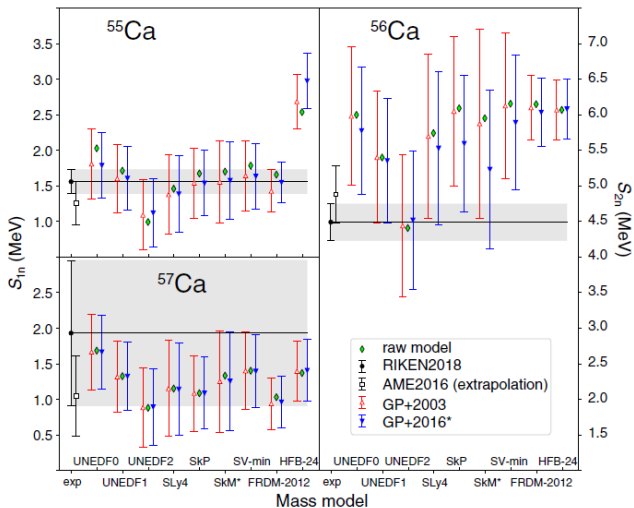
Valores de  $S_{1n}$  para  $^{55}\text{Ca}$  y  $^{57}\text{Ca}$ , y  $S_{2n}$  para  $^{56}\text{Ca}$ .

Constraste con valores experimentales, considerando diferentes modelos teóricos.



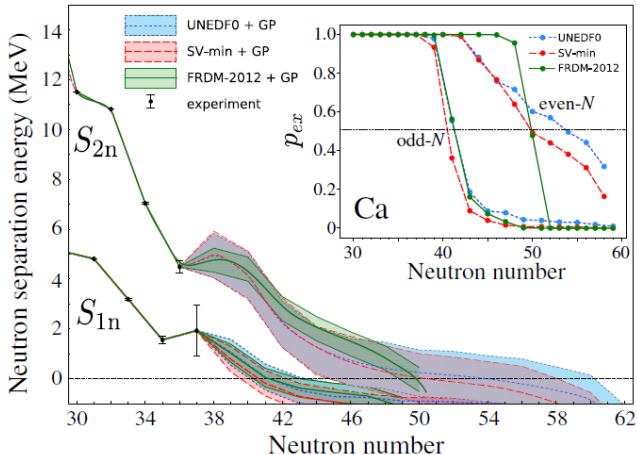
# Resultados: 55-57Ca

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



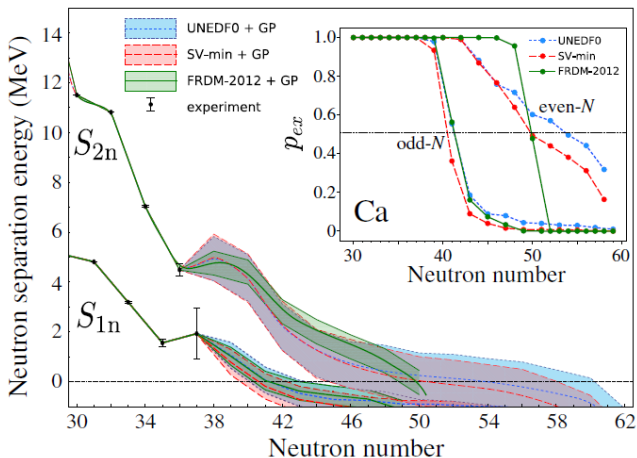
# Resultados: 55-57Ca

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



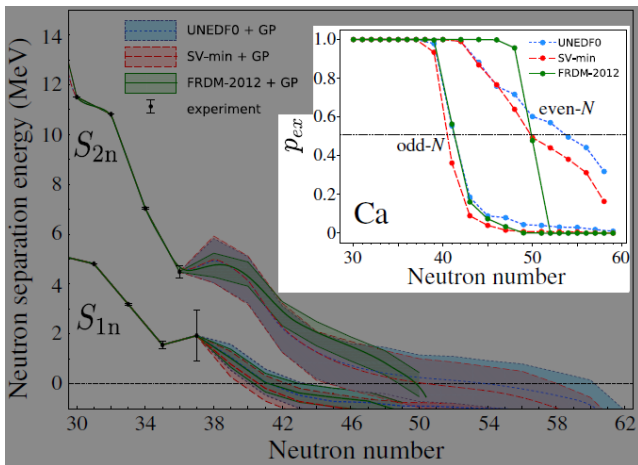
# Resultados: 55-57Ca

- 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.



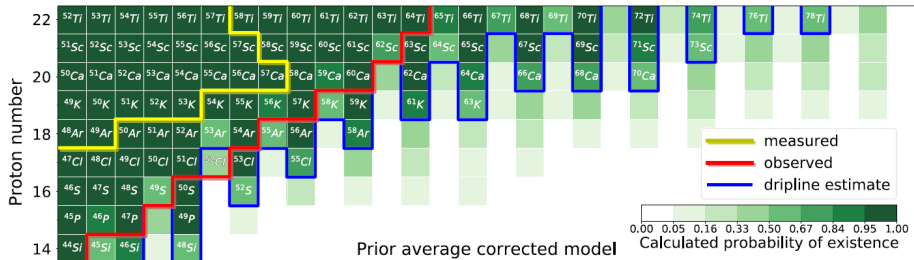
# Resultados: 55-57Ca

- $p_{ex}(Z, N)$ : 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  $^{52}\text{Cl}$ ,  $^{53}\text{Ar}$  y  $^{49}\text{S}$  representan un desafío para los modelos globales de masa porque están muy débilmente ligados.
- Según el análisis,  $^{52}\text{Cl}$  es inestable.
- Sin embargo, experimentalmente se sabe de sus existencias, entonces podemos agregar esta información al ML Bayesiano.

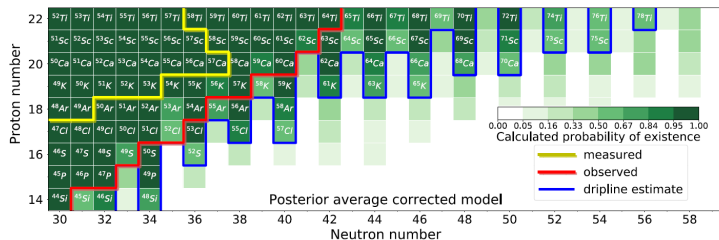
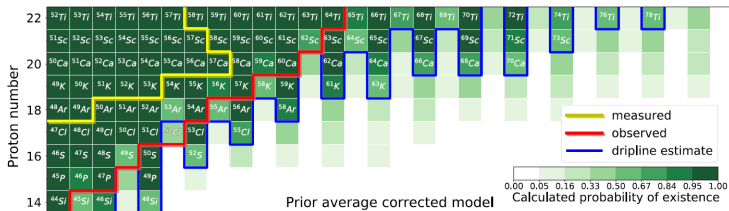




# Resultados: Región Ca completa

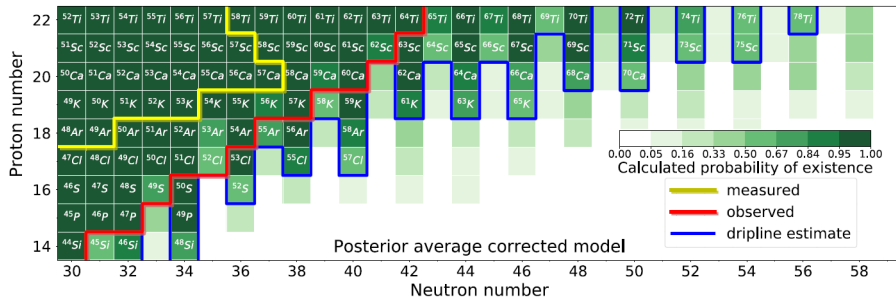
Nueva tabla

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



# Resultados: Región Ca completa

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



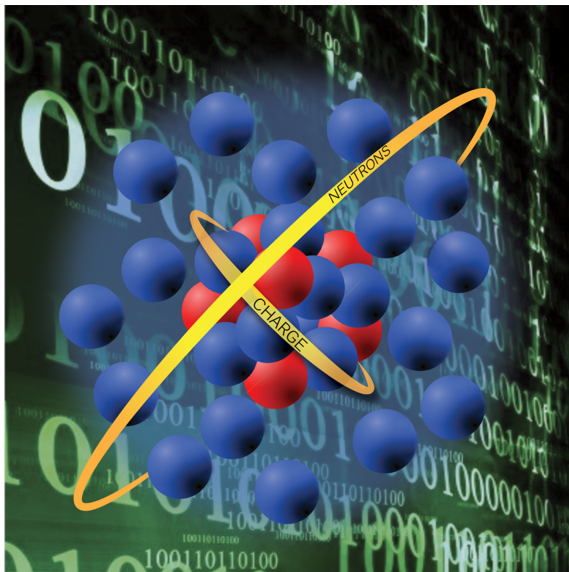
# Conclusiones

- 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:  $^{60}\text{Ca}$  es ligado con  $S_{2n} = 5\text{MeV}$ , y  $^{49}\text{S}$ ,  $^{52}\text{Cl}$  y  $^{53}\text{Ar}$  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  $^{49}\text{S}$ ,  $^{52}\text{Cl}$  y  $^{53}\text{Ar}$ .

# 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.*