



Evidencia experimental de caos en los estados ligados del ^{208}Pb

L. Muñoz, J. M. G. Gómez

Universidad Complutense de Madrid

R. A. Molina

Instituto de Estructura de la Materia, CSIC, Madrid

A. Heusler

Heidelberg, Alemania

Resumen

- Caos cuántico y fluctuaciones espectrales
- Caos en núcleos
- Caos en los estados ligados experimentales del ^{208}Pb
- Conclusiones

L. Muñoz, R.A. Molina, J.M.G. Gómez y A. Heusler

Phys. Rev. C **95**, 014317 (2017)

Caos cuántico y fluctuaciones espectrales

- Las fluctuaciones espectrales de los sistemas cuánticos cuyo análogo clásico es caótico son universales y coinciden con las predichas por las colectividades gaussianas de la Teoría de Matrices Aleatorias (**RMT: Random Matrix Theory**).

Bohigas, Giannoni y Schmit, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 1 (1984)

El aspecto esencial de los espectros cuánticos caóticos es la existencia de repulsión de niveles y correlaciones.

- Por el contrario: Los sistemas clásicamente integrables dan lugar a espectros cuánticos de niveles descorrelacionados, que son bien descritos por la estadística de Poisson.

Berry y Tabor, *Proc. R. Soc. London* **A356**, 375 (1977)

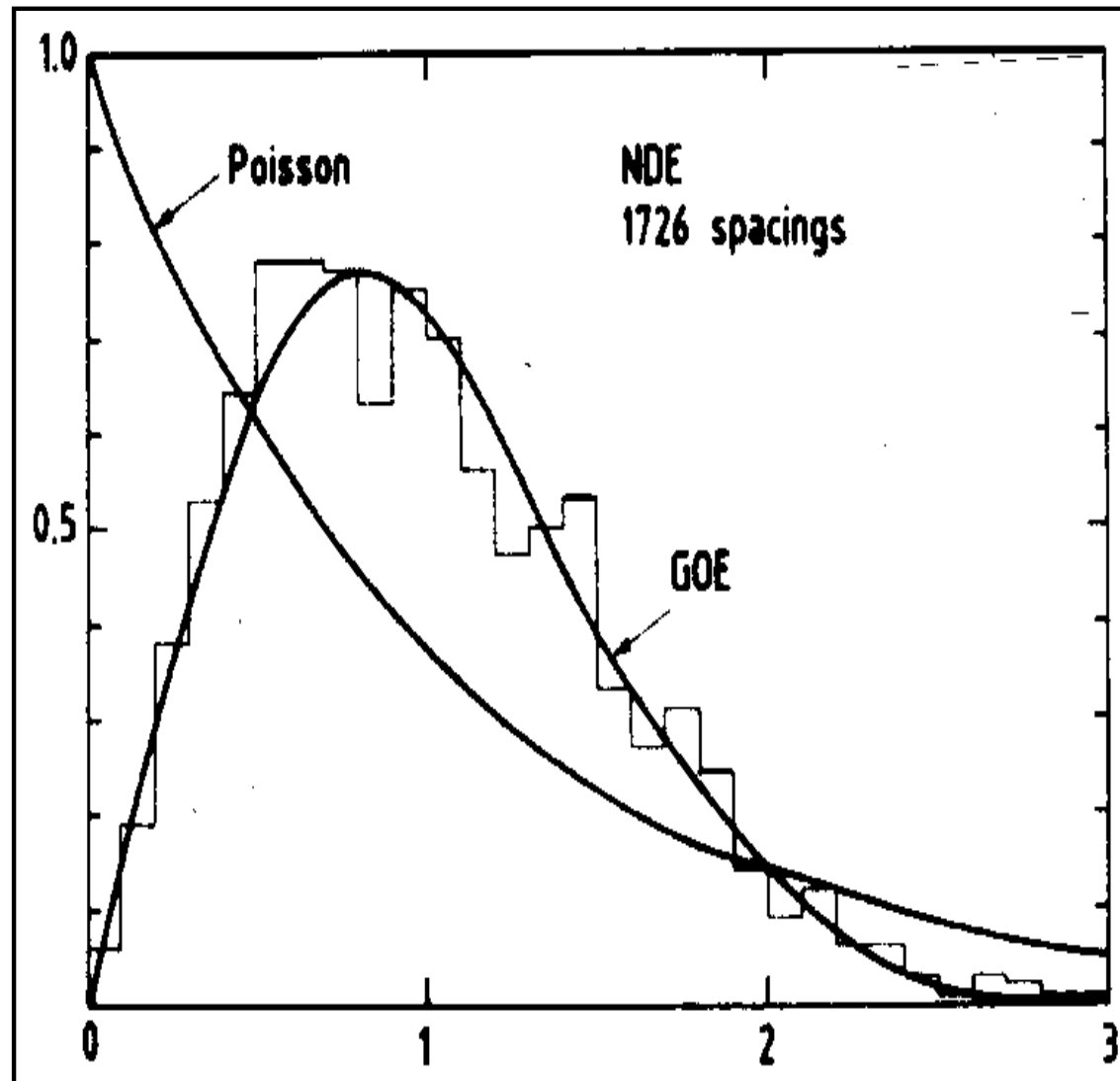
Caos en núcleos

- El núcleo atómico se considera generalmente un caso paradigmático de caos cuántico. Intuitivamente se puede esperar que el movimiento de los nucleones bajo la acción de la fuerza nuclear ligados en el pequeño volumen del núcleo dé lugar a una dinámica caótica.
- Cálculos teóricos, especialmente de modelo de capas, han mostrado un comportamiento fuertemente caótico de los estados ligados en la región de energía alta.

Fluctuaciones espectrales en estados nucleares experimentales

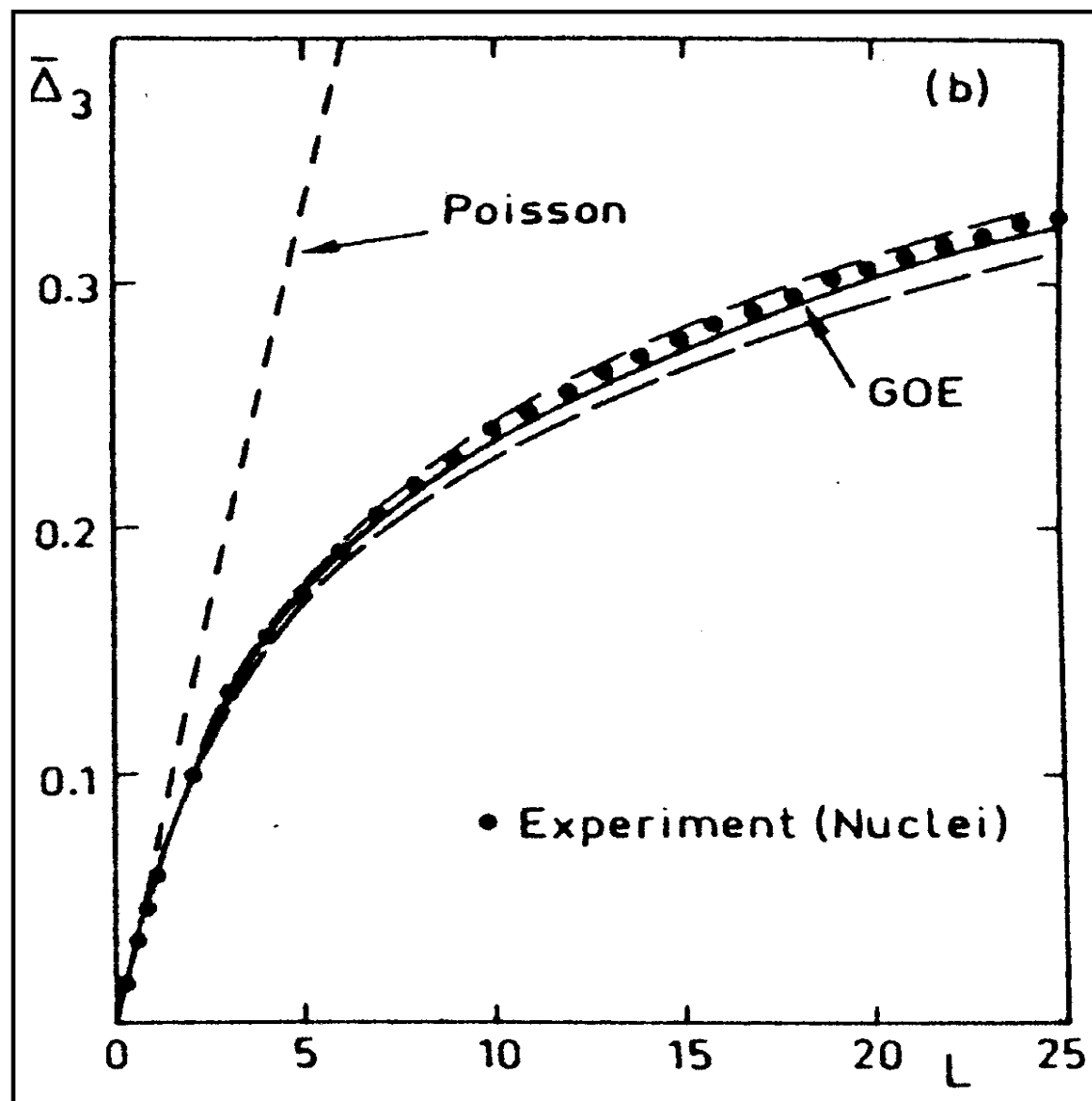
- ➔ Un buen análisis de fluctuaciones en niveles de energía de espectros experimentales requiere de secuencias lo suficientemente **largas**, **puras** y **completas** (mismos valores de J^π sin asignaciones incorrectas o niveles perdidos).
- ➔ Esta situación ideal se encuentra en un gran número de resonancias $J^\pi = 1/2^+$ de neutrones y protones identificadas experimentalmente justo por encima del umbral de emisión de un nucleón. Sus fluctuaciones espectrales presentan muy buen acuerdo con GOE (Gaussian Orthogonal Ensemble).

Distribución $P(s)$ para el NDE (Nuclear Data Ensemble)

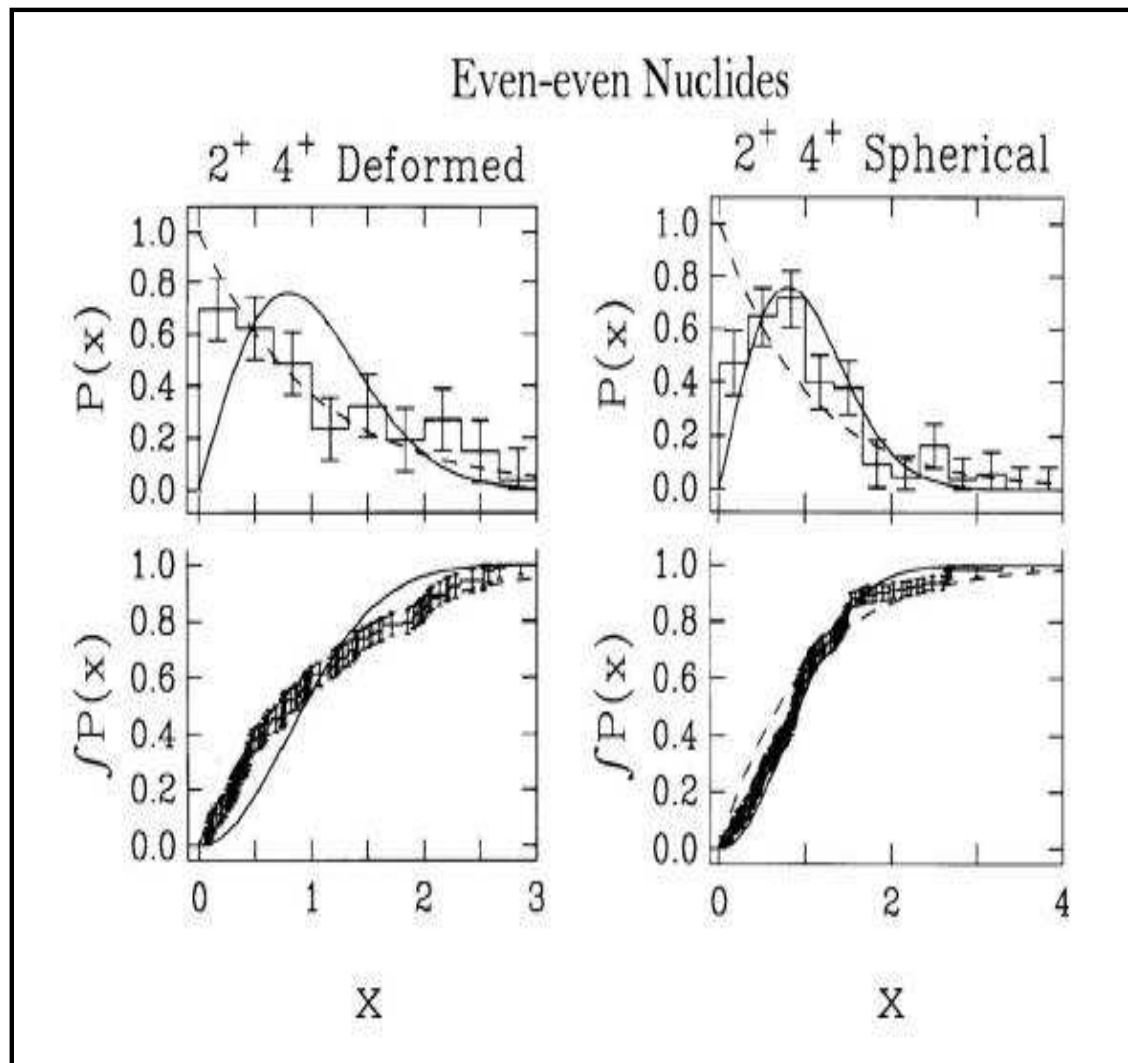


Haq, Pandey y Bohigas, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1086 (1982)

Estadístico $\langle \Delta_3(L) \rangle$ para el NDE



- Sin embargo, la situación ideal de secuencias largas, puras y completas se encuentra raramente en estados ligados nucleares.
- Para mejorar la estadística, Shriner *et al.* reunieron espaciamientos de distintos núcleos en un sólo conjunto y analizaron la distribución $P(s)$.
- Separando los datos en 6 regiones de masa distinta, se observa una clara tendencia de GOE hacia Poisson al aumentar la masa nuclear.
- Generalmente los núcleos esféricos son más cercanos a GOE y los deformados más cercanos a Poisson.



H.A. Weidenmüller y G.E. Mitchell, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 539 (2009)

Adaptado de J. F. Shriner Jr. *et al.*, *Z. Phys. A* **338**, 309 (1991)

Caos en los estados ligados experimentales del ^{208}Pb

Recientemente, 151 estados hasta $E_x = 6.20$ MeV en ^{208}Pb han sido identificados.

A. Heusler et al., Phys. Rev. C **93**, 054321 (2016)

Número de estados con espín y paridad J^π ($N \geq 5$)

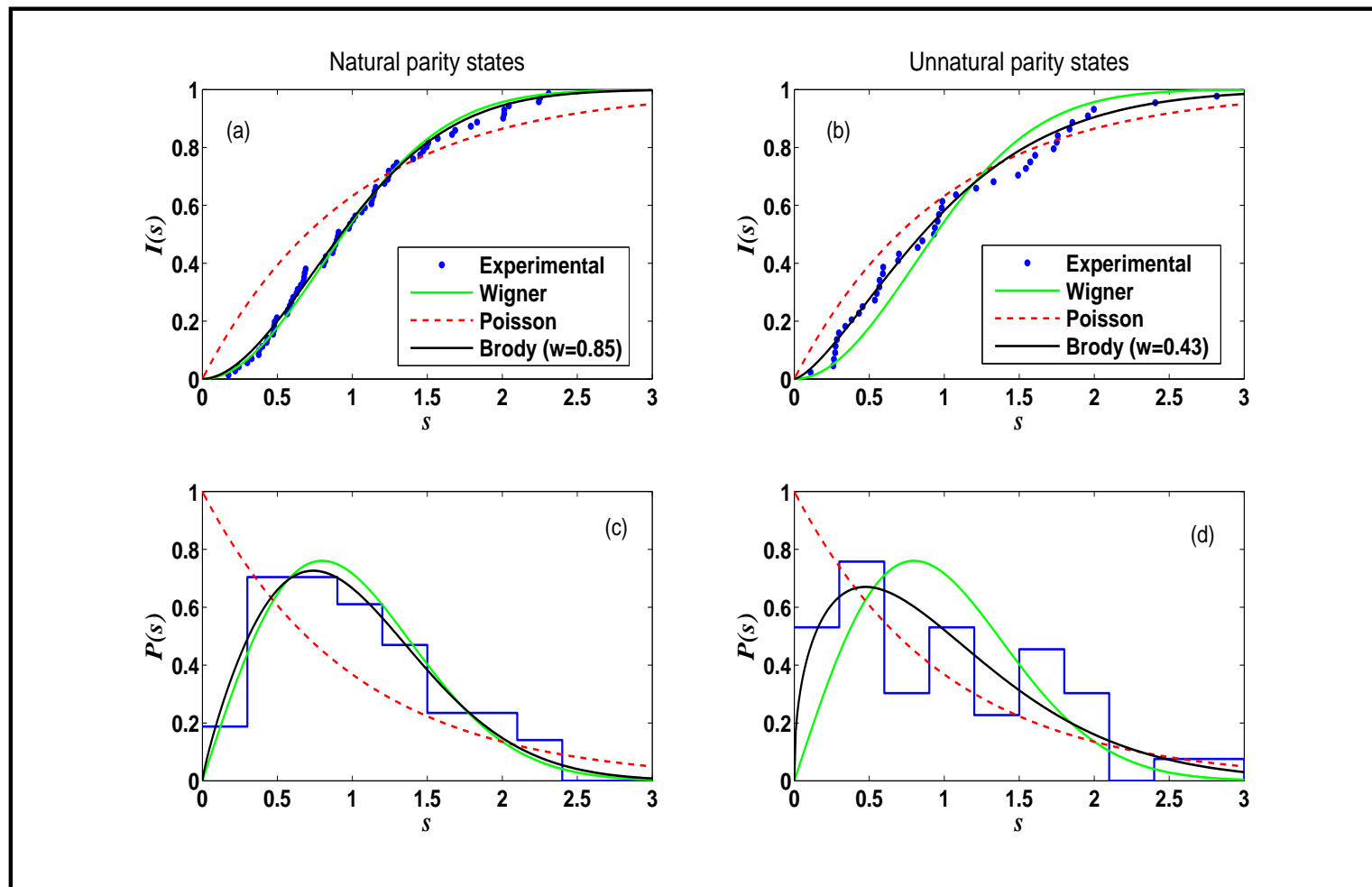
Paridad natural		Paridad no natural	
J^π	N	J^π	N
1^-	7	2^-	9
3^-	19	4^-	14
5^-	15	6^-	8
7^-	5	5^+	6
2^+	9	7^+	8
4^+	7	9^+	5
6^+	9		
8^+	8		

- **Heusler *et al.*** han mostrado que los niveles de energía experimentales concuerdan mejor con un cálculo de modelo de capas simplificado para los estados de paridad no natural que para los de paridad natural del ^{208}Pb .

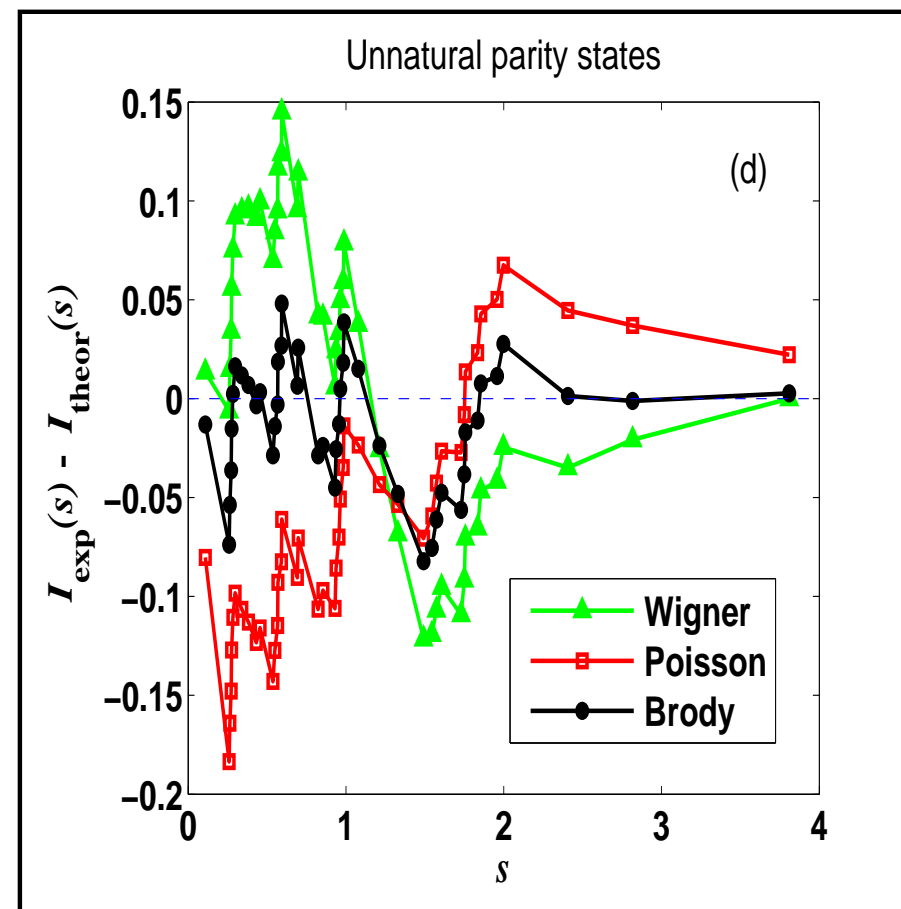
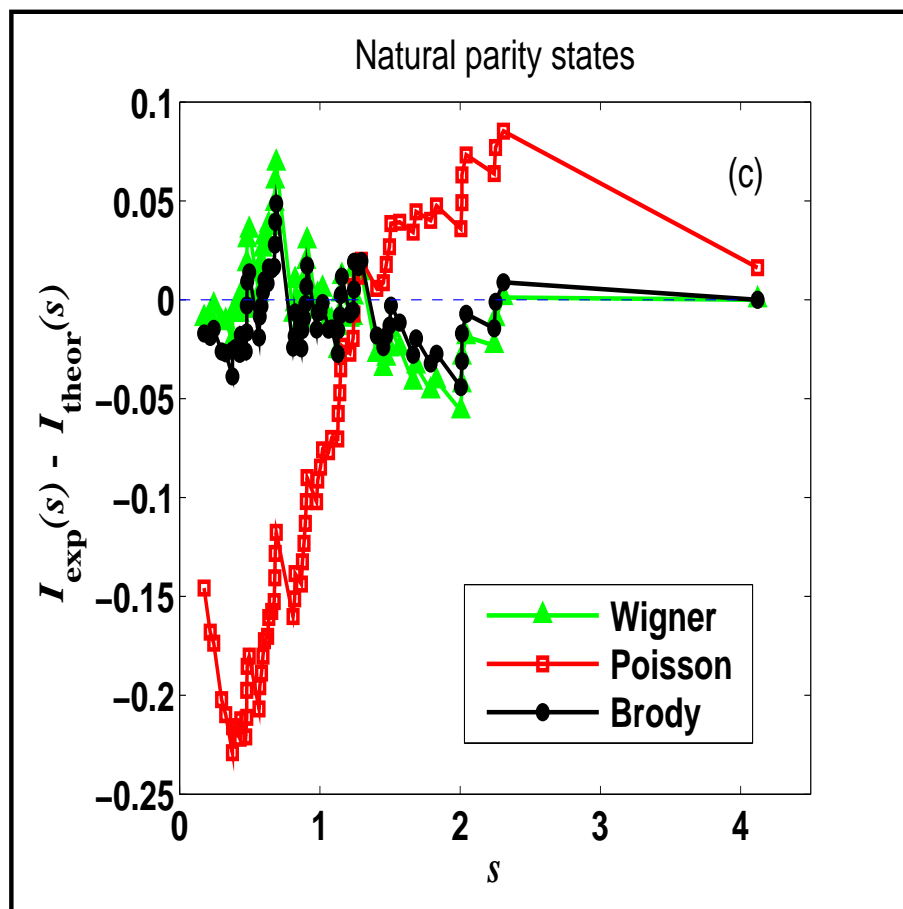
Por tanto, concluyen que **la mezcla de configuraciones es mayor para los estados de paridad natural y la interacción residual es, por tanto, más intensa** que para los estados de paridad no natural.

- Analizando las fluctuaciones espectrales de estos dos conjuntos de datos por separado, hemos encontrado comportamientos diferentes.

L. Muñoz, R.A. Molina, J.M.G. Gómez y A. Heusler, *Phys. Rev. C* **95**, 014317 (2017)



Distribución $P(s)$ y distribución acumulada $I(s)$ en ^{208}Pb



Diferencia de la distribución acumulada experimental con Wigner, Poisson y el mejor ajuste a la función de Brody

Número de espaciamentos, parámetro de Brody ω y desviación cuadrática media (RMSD) de la distribución experimental $I(s)$ respecto de las distribuciones de Wigner y Poisson para distintas combinaciones de paridad.

Paridad	Número de espaciamentos		
	todos	natural	no natural
par	45	29	16
impar	70	42	28
todos	115	71	44
Brody ω	0.68 ± 0.02	0.85 ± 0.02	0.43 ± 0.03
$(\text{RMSD})_W$	0.040	0.025	0.077
$(\text{RMSD})_P$	0.115	0.129	0.088

Conclusiones

- Los 151 niveles de energía del ^{208}Pb constituyen el más largo y completo conjunto de estados ligados identificados en un núcleo.
- Las fluctuaciones espectrales de los 79 estados de paridad natural exhiben el comportamiento más caótico observado en estados nucleares ligados.
- El resultado para los 50 estados de paridad no natural es intermedio entre caos y regularidad.
- Los resultados suponen una confirmación basada en datos experimentales de que el campo medio produce dinámica regular y es la interacción residual la que introduce el caos en el núcleo cuando es suficientemente intensa.
- La *caoticidad* de los estados de paridad natural vs. los de paridad no natural requiere investigación en más profundidad.

Adicional: Otros cálculos en ^{208}Pb

B. Dietz, A. Heusler, K. H. Maier, A. Richter y B. A. Brown,

Phys. Rev. Lett **118**, 012501 (2017)

Comparación de los parámetros de caoticidad f y λ en ^{208}Pb para los niveles de energía experimentales y espectros de modelo de capas obtenidos con las interacciones de Kuo-Brown (KB) y de Michigan-three-Yukawa (M3Y).

Modelo	f		λ	
	paridad natural	paridad no natural	paridad natural	paridad no natural
Expt.	0.92	0.89	1.20	2.00
M3Y	0.80	0.65	0.75	0.58
KB	0.74	0.62	1.10	0.50