

実験データに基づく核分裂の 量子もつれの解析

京都大学原子核理論 D2
樋沢 規宏

2023/2/17 理研



$|1\rangle$



$|0\rangle$

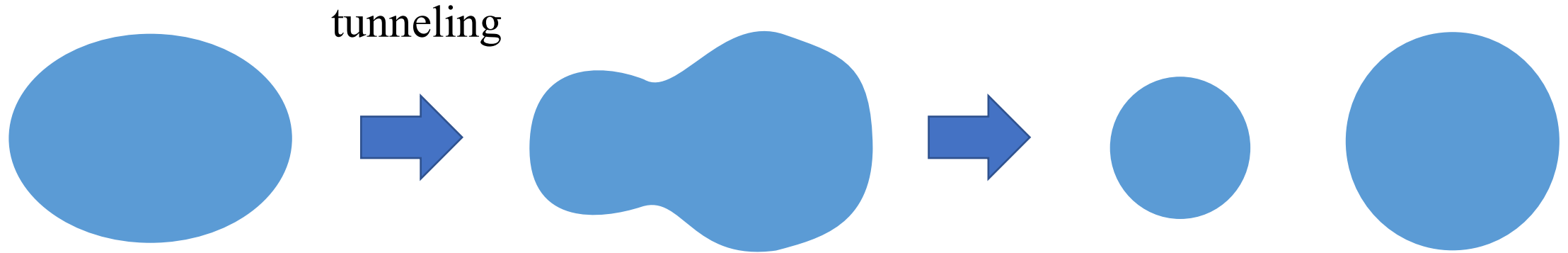
核分裂した原子核の波動関数は

どのような **構造** を持つか？

よくある概念図

■ Spontaneous fission

原子核密度が以下のように時間発展



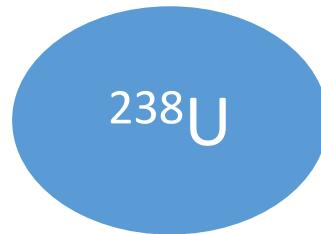
果たして本当にこのようになっているだろうか？

射影測定

■ 確からしいこと

局在化した“pure state”の原子核

detec
tor



detec
tor

射影測定

■ 確からしいこと

非局在化

detec
tor

detec
tor

?

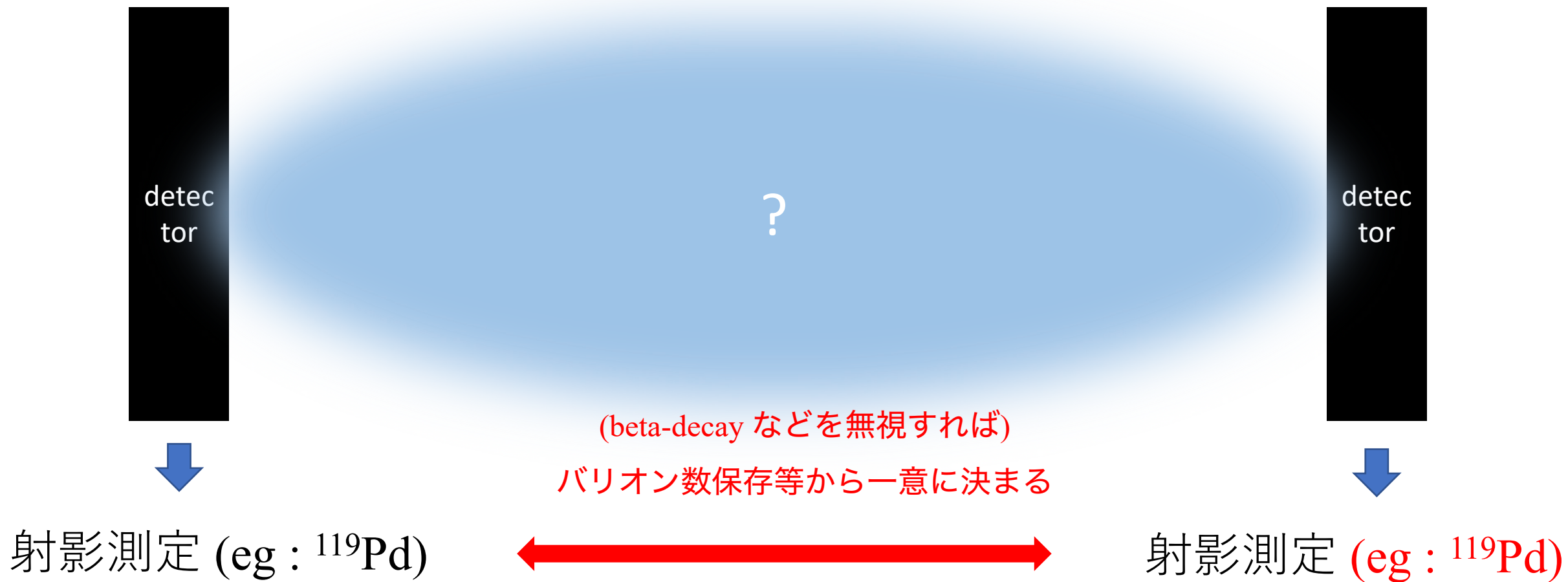
射影測定 (eg : ^{119}Pd)

射影測定



射影測定

■ 確からしいこと



どうやら自発核分裂後の原子核は

entangle しているようだ

Entanglement entropy

Entanglement の定量的な評価 → entanglement entropy

■ 簡単な例

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_A \otimes |\downarrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A \otimes |\uparrow\rangle_B)$$

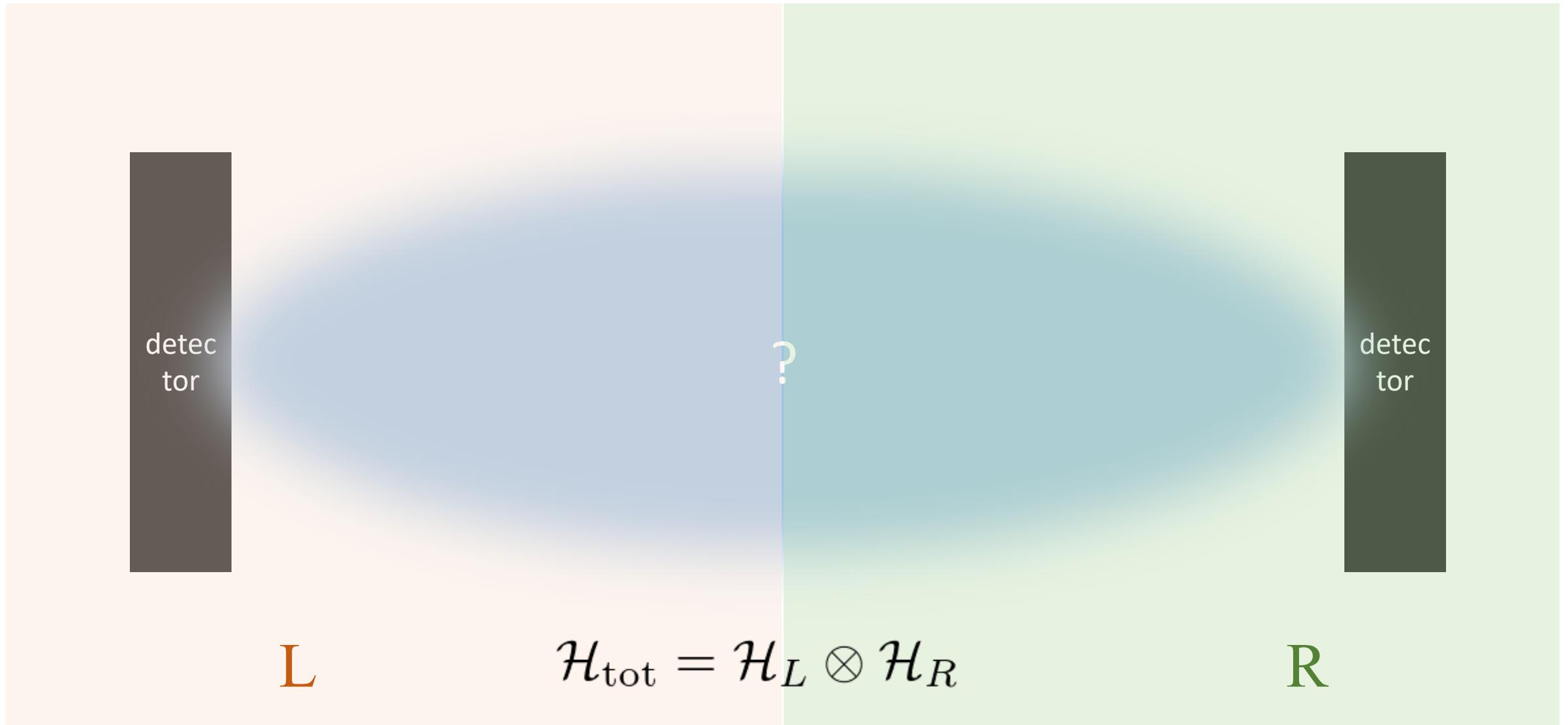
partial trace

$$\rho_A = \text{Tr}_B |\psi\rangle\langle\psi| = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\rangle\langle\downarrow|$$

Entanglement entropy

$$S_A := -\text{Tr}_A \hat{\rho}_A \log \hat{\rho}_A = \log 2 = S_B$$

系の分割



■ Wave function

$$\begin{aligned}
 |\psi(N, Z)\rangle &= \sum_{xy} C_{xy} |x\rangle_L \otimes |y\rangle_R \\
 &= \sum_i \lambda_i |v_i\rangle_L \otimes |u_i\rangle_R && \text{Schmidt decomposition} \\
 &= \sum_{N_L+N_R=N} \sum_{Z_L+Z_R=Z} \sum_{\mu} \lambda_{N_L, N_R, Z_L, Z_R, \mu} |N_L, Z_L, ; \mu\rangle_L \otimes |N_R, Z_R, ; \mu\rangle_R
 \end{aligned}$$

保存チャージの存在により、添字 i の形が制限される

■ Entanglement entropy

$$S_{EE} = - \sum_{N_L+N_R=N} \sum_{Z_L+Z_R=Z} \sum_{\mu} |\lambda_{N_L, N_R, Z_L, Z_R, \mu}|^2 \log |\lambda_{N_L, N_R, Z_L, Z_R, \mu}|^2$$

核分裂後の波動関数を計算することは

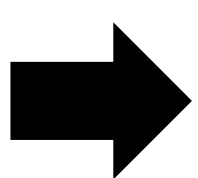
現状 **不可能**

簡略化

少しでもいいから entanglement の情報が見たい

$$\begin{aligned} S_{EE} &= - \sum_{N_L+N_R=N} \sum_{Z_L+Z_R=Z} \sum_{\mu} |\lambda_{N_L, N_R, Z_L, Z_R, \mu}|^2 \log |\lambda_{N_L, N_R, Z_L, Z_R, \mu}|^2 \\ &\rightarrow - \sum_{N_L+N_R=N} \sum_{Z_L+Z_R=Z} |\tilde{\lambda}_{N_L, N_R, Z_L, Z_R}|^2 \log |\tilde{\lambda}_{N_L, N_R, Z_L, Z_R}|^2 \end{aligned}$$

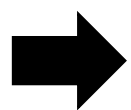
(仮に λ の μ 依存性が無視できるとすれば正当化される)



$|\tilde{\lambda}_{N_L, N_R, Z_L, Z_R}|^2$ は L 系で (N_L, Z_L) 、R 系 $(N_R = N - N_L, Z_R = Z - Z_L)$ の
核分裂生成物が観測される確率

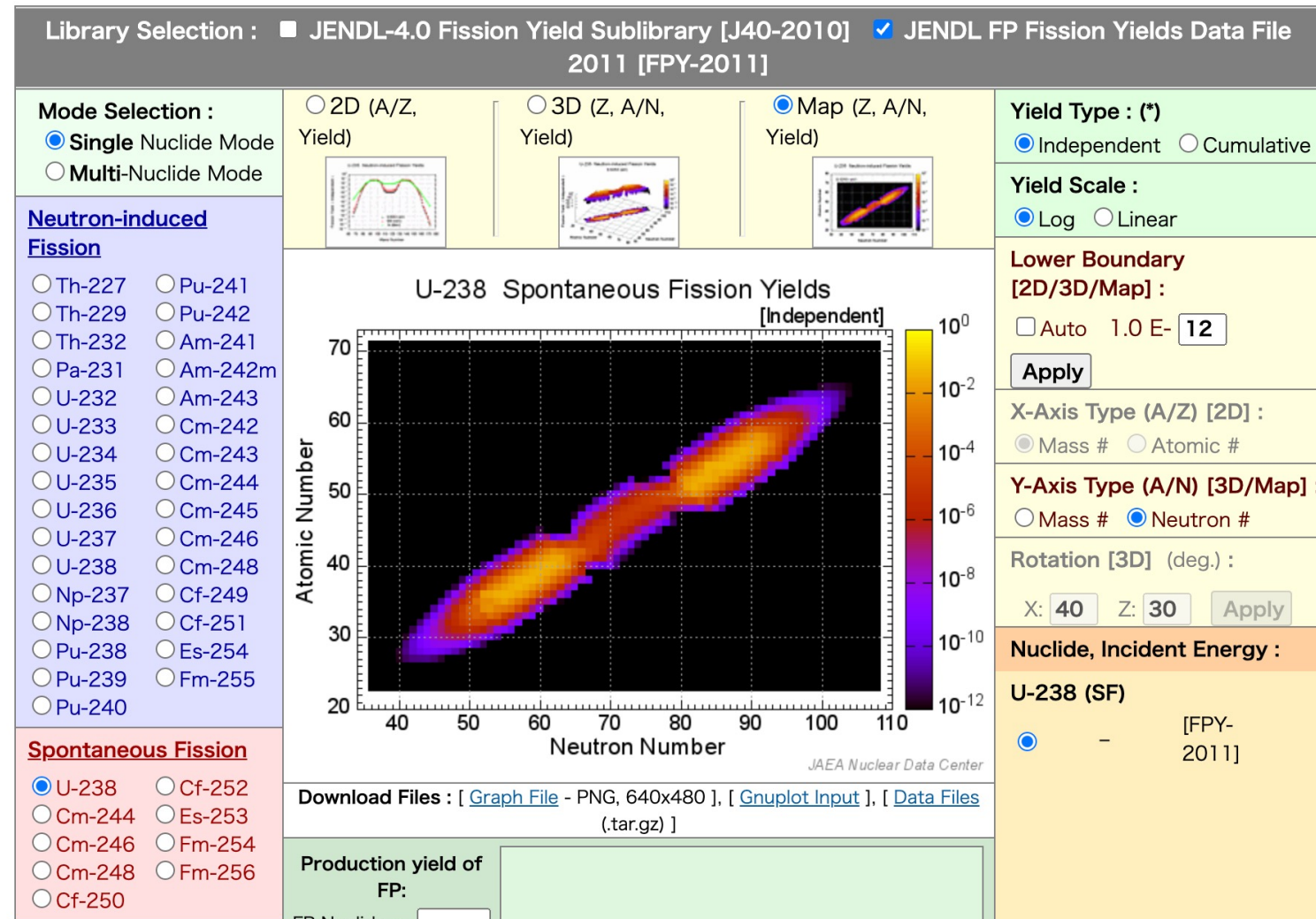
Experimental data

- ✓ JAEA の実験データを使用
- ✓ 形式的には fission product yields に対する Shannon entropy を計算することと同等
- ✓ 3種類 (0.0253 eV, 500 keV, 14 MeV) の induced fission のデータも存在

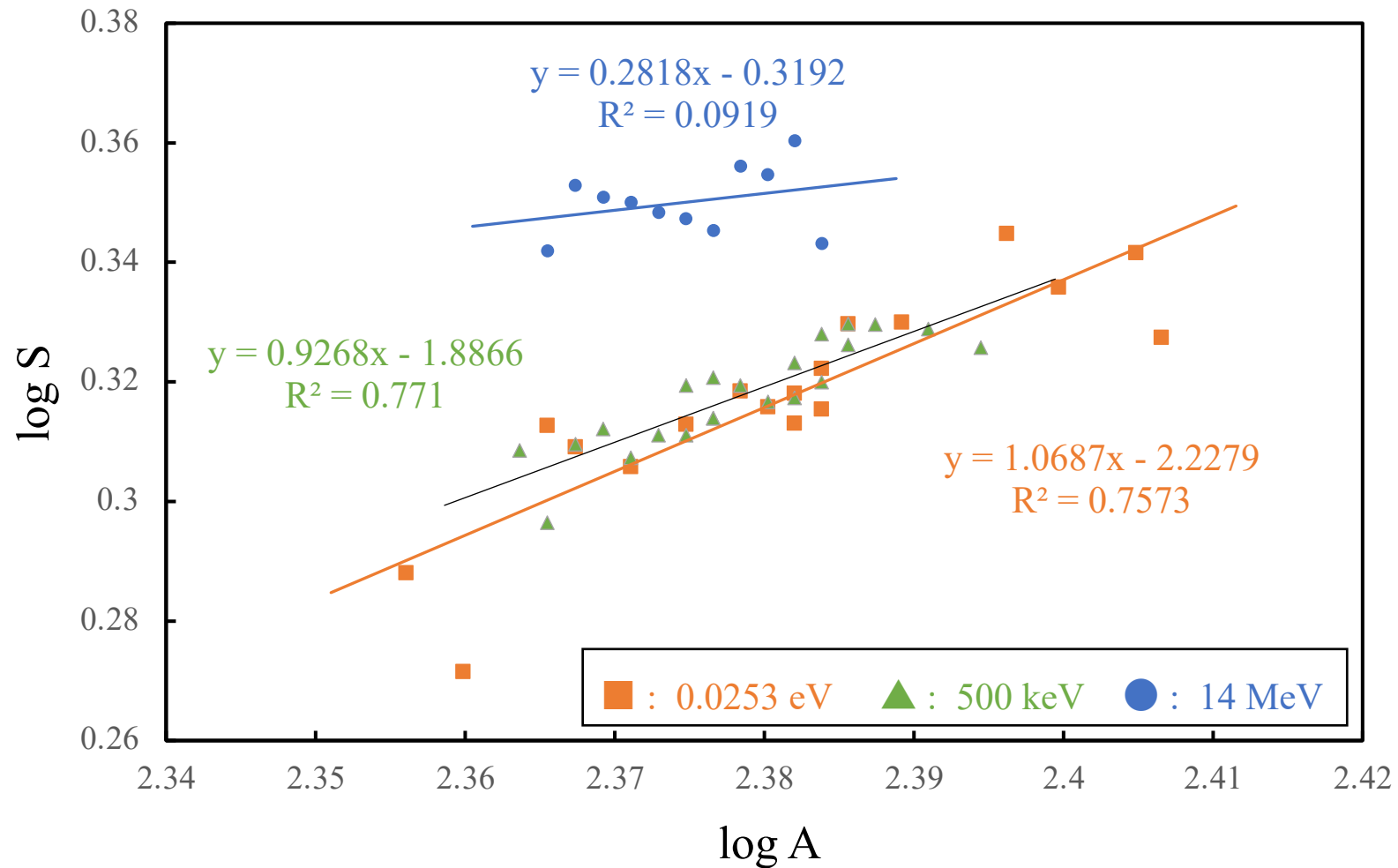


induced に関して Shannon entropy を計算してみる

Graph of Fission Product Yields

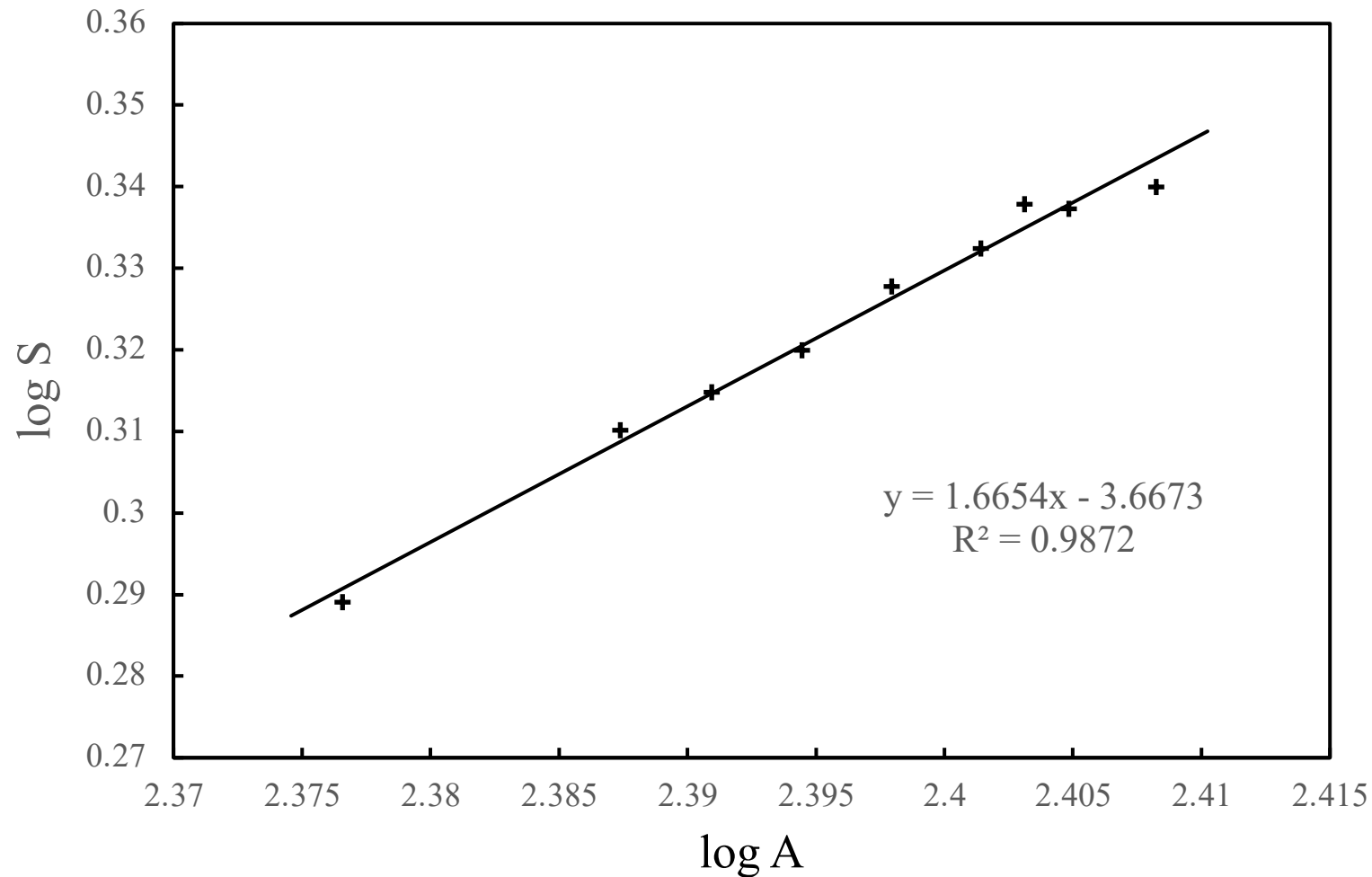


neutron induced fission



- ✓ 0.0253 eV, 500 keVでは $S \propto A \rightarrow$ 熱力学的振る舞い
- ✓ 14 MeV では S と A に相関なし

spontaneous fission



- ✓ 非常に強い相関
- ✓ $1.665 \sim 5/3$ より $S \propto A^{5/3}$ のような振る舞い

■ Area law

- ✓ $S \propto L^{D-1}$, L : system size, D : dimension
- ✓ short range entangled state で見られる
(tensor product state を用いると示せる)

■ Nuclear system

- ✓ System size $L \sim A^{1/3}$  $S \propto L^5$
- ✓ 3次元の non-local な相互作用を持つ

自発核分裂の背景に 6 次元の short range entangled system の存在が期待？

■ まとめ

- ✓ 核分裂において entanglement の概念を導入
- ✓ 大胆な簡略化のもとで、実験データから entanglement entropy を計算
- ✓ spontaneous fission と induced fission で振る舞いに大きな違い
- ✓ 核分裂の背景に 6 次元の short range entangled state の存在が期待