

# 中性子過剰領域の中性子捕獲断面積の新しい計算アプローチ

原子力機構 原子力基礎工学研究センター  
核データ研究グループ

湊 太志

共同研究者：古立直也  
江幡修一郎

1. 共鳴領域における中性子捕獲断面積計算
2. 準直接捕獲反応における断面積計算

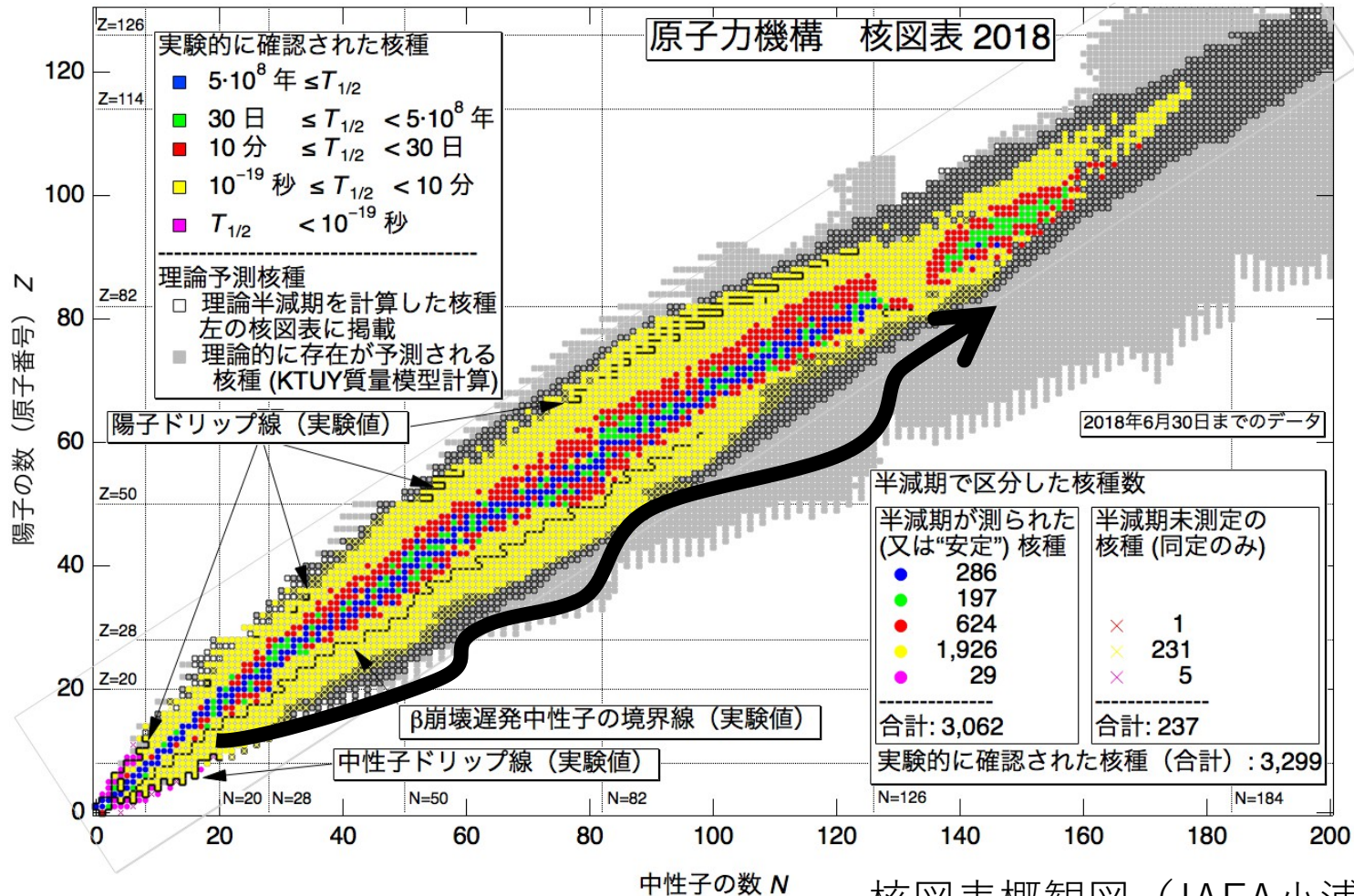
原子核物理でつむぐrプロセス

– Nuclear Physics of r-process Nucleosynthesis –

2019年5月22日-24日 (22-24 May 2019)

京都大学基礎物理学研究所 (YITP, Kyoto University)

# 1. 共鳴領域における中性子捕獲断面積計算



核図表概観図 (JAEA小浦氏作成)

r-processサイトの温度  $10^6 - 10^9 \text{ K}$   
 → 中性子エネルギー 1eV-数

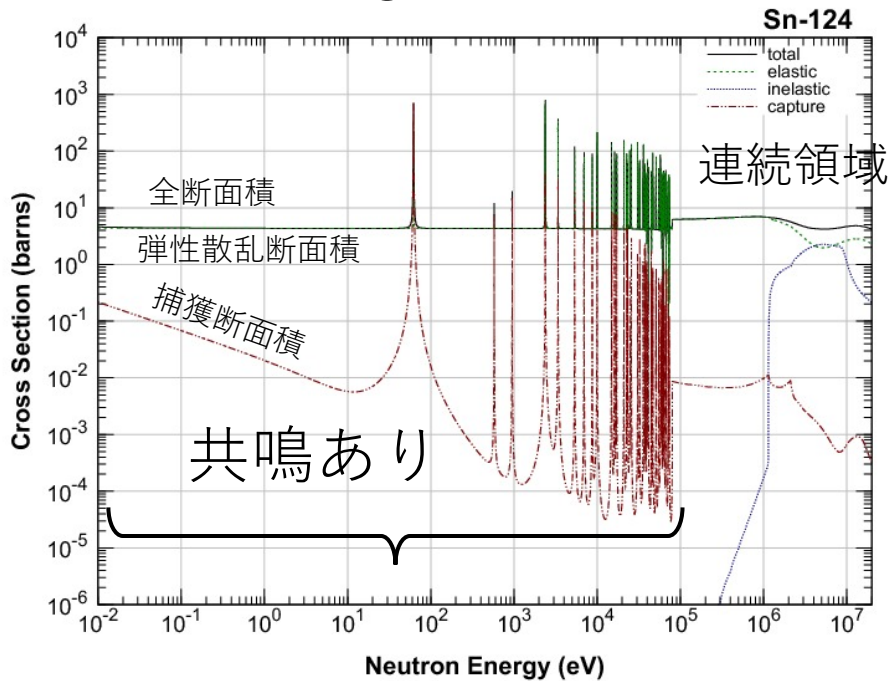
百 keV

high neutron density & high temperature

→  $(n, \gamma)(\gamma, n)$  equilibrium →  $(n, \gamma)$  reaction is not important

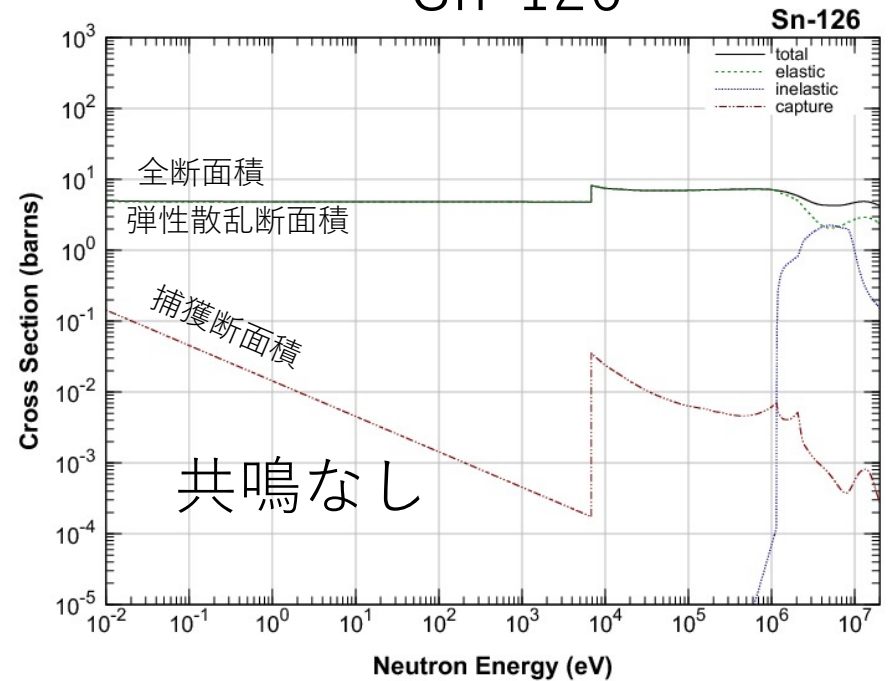
# 中性子核反応断面積 (JENDL-4.0より)

## Sn-124



共鳴領域の断面積は実験データから導出

## Sn-126

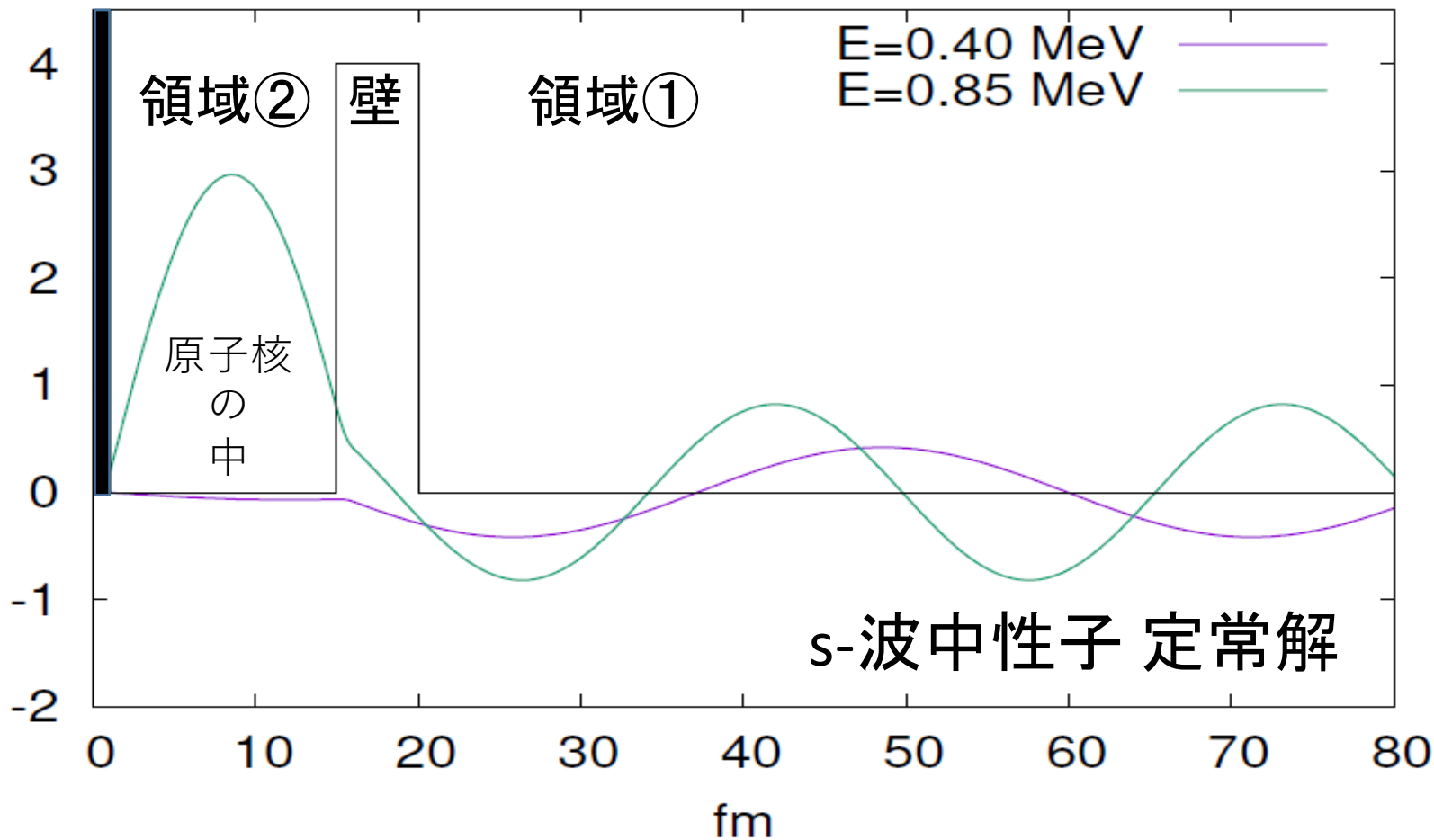


測定データがないので・・・

1. 熱中性子捕獲断面積から $1/v$ 則で導出
2. 弾性散乱断面積は散乱半径から導出

本当に正しいかどうかは分からない

# 共鳴とは？



内側と外側の中性子の波動関数がぴったり合う時

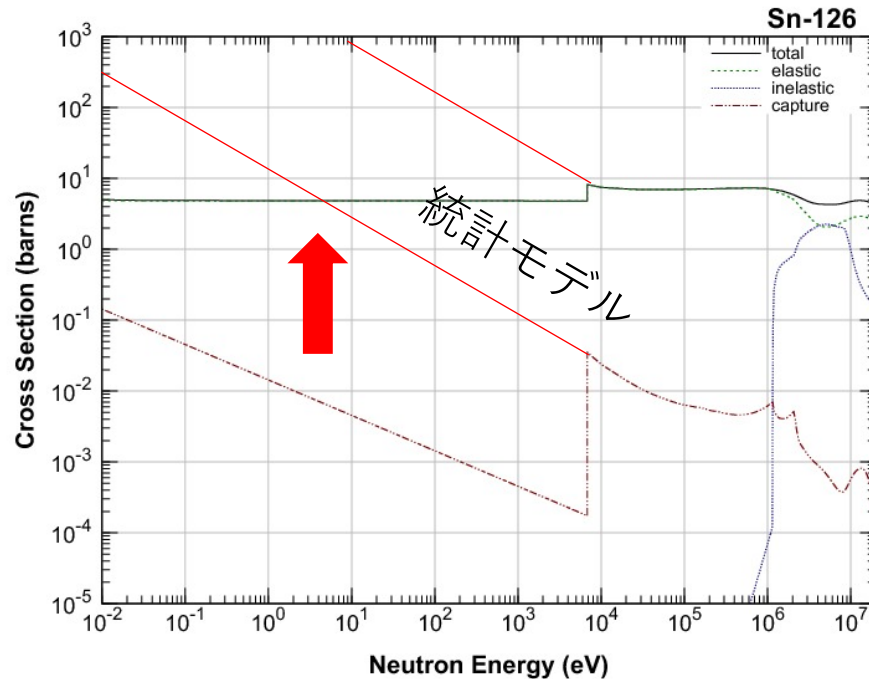
物事は単純ではない ← 内側の波動関数には多体相関

中性子過剰核の中性子捕獲断面積測定データはほとんど無  
理論モデルを使って予測が必要

r-processの中性子捕獲断面積は  
Hauser-Feshbach(HF)統計モデルで外挿

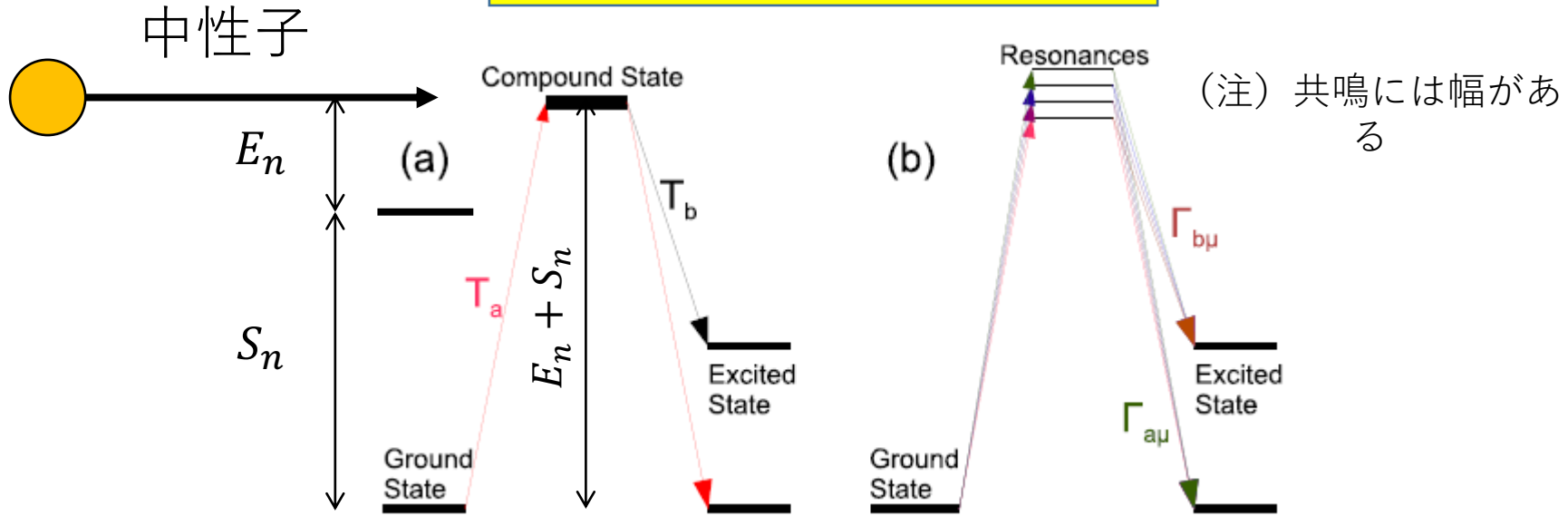
T.Rauscher et al., Atom. Data Nucl. Data Tab. **75**,1(2000)  
Y. Xu, S. Goriely, A. J. Koning, and S. Hilaire, PRC**90**, 024604(2014)

HF統計モデルを応用した場合



注) 統計モデルはJENDL-4.0評価値に比べて断面積を過大評価

# 統計モデルの適用範囲



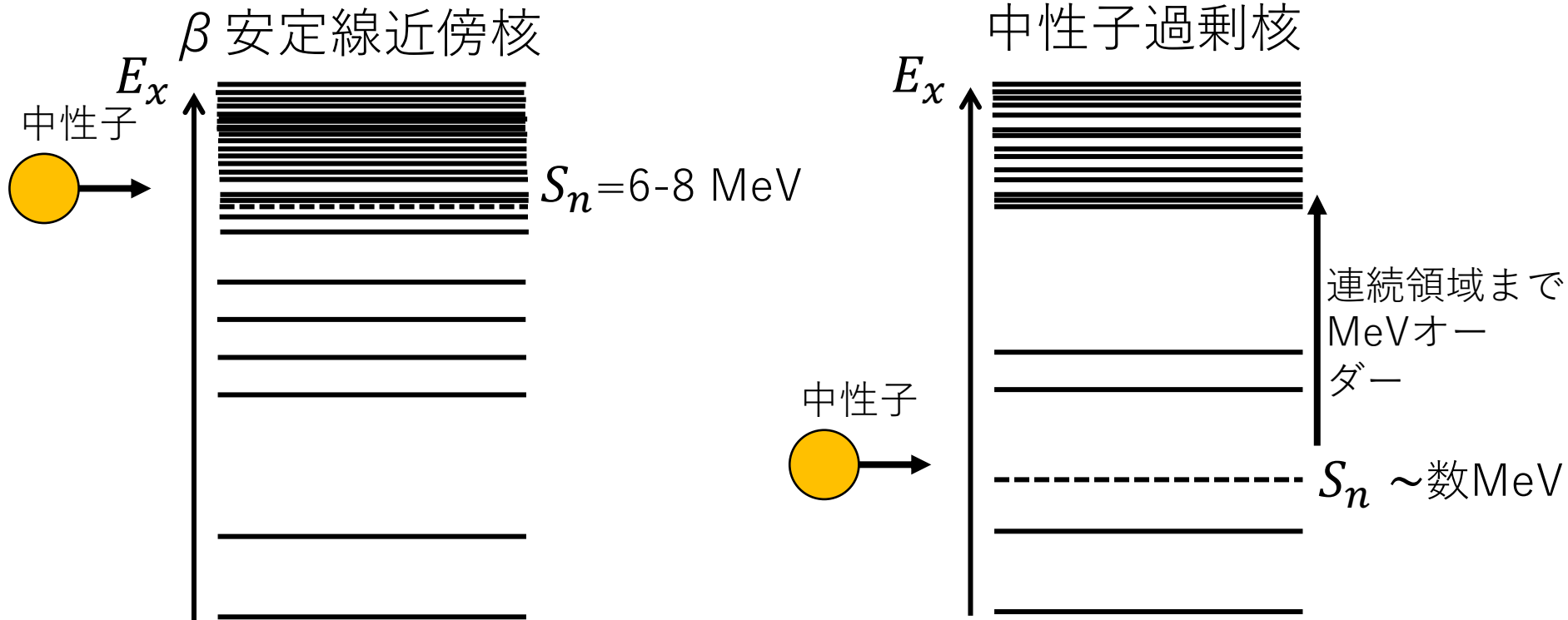
統計モデルで求める  
複合核状態の正体は、

個々の共鳴からの寄与  
の

エネルギー平均値  
 Hauser-Feshbach統計理論は  
 エネルギー平均の近似法

エネルギー平均できるくらい十分な共鳴数が必要

# 安定核と中性子過剰核の共鳴数の違い



1. 中性子過剰核では  $S_n$  近傍に準位が数本しかない
2. 安定核より高い入射中性子エネルギーまで分離共鳴が存在
3. 統計モデル適用可能エネルギーが安定核よりも高  
c.f. T.Rauscher et al., NPA621(1997)33 1



# 低エネルギー側の中性子捕獲断面積を求める方法は？ その1

(中性子) 共鳴を求める理論モデル

- R-matrix
- Gamow Shell Model
- Generator Coordinate Method
- Continuum Particle Vibration Coupling
- etc.

しかし、どれも現実的な応用に用いるには計算が難しく、時間がかかる



低エネルギー側の中性子捕獲断面積を求める方法は？ そ

の2

## 共鳴の統計的性質に着目

(1) 共鳴エネルギー間隔

Wigner 分布

$$P(x) = \frac{\pi}{2} x \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^2\right) \quad x = \frac{E_{i+1} - E_i}{D_0}$$

$D_0$ : average s-wave resonance spacing

(2) 中性子共鳴幅

Porter-Thomas 分布

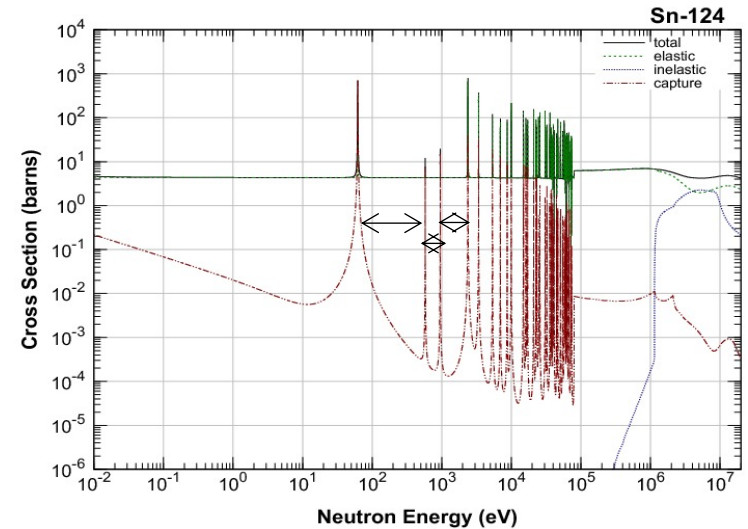
$$P(\Gamma_{ni}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Gamma_{ni}\langle\Gamma_n\rangle}} \exp\left(-\frac{\Gamma_{ni}}{2\langle\Gamma_n\rangle}\right)$$

$\Gamma_{ni} = \Gamma_{ni}/\sqrt{E}$  s-wave neutron reduced width

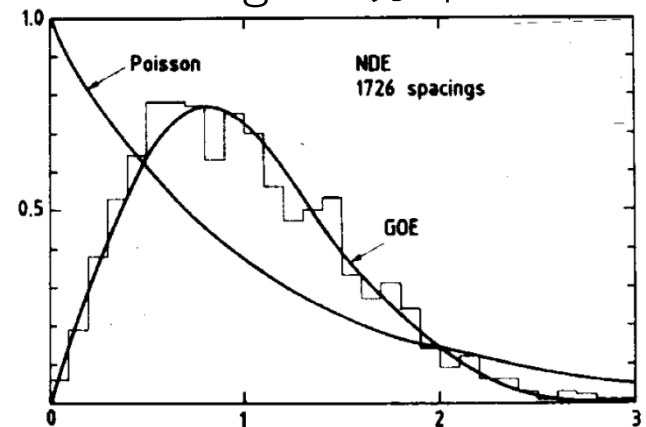
$\langle\Gamma_n\rangle = S_0 D_0$  average s-wave neutron reduced width

$S_0$ : s-wave neutron strength function

本発表ではs,p波のみ考慮



Wigner 分布



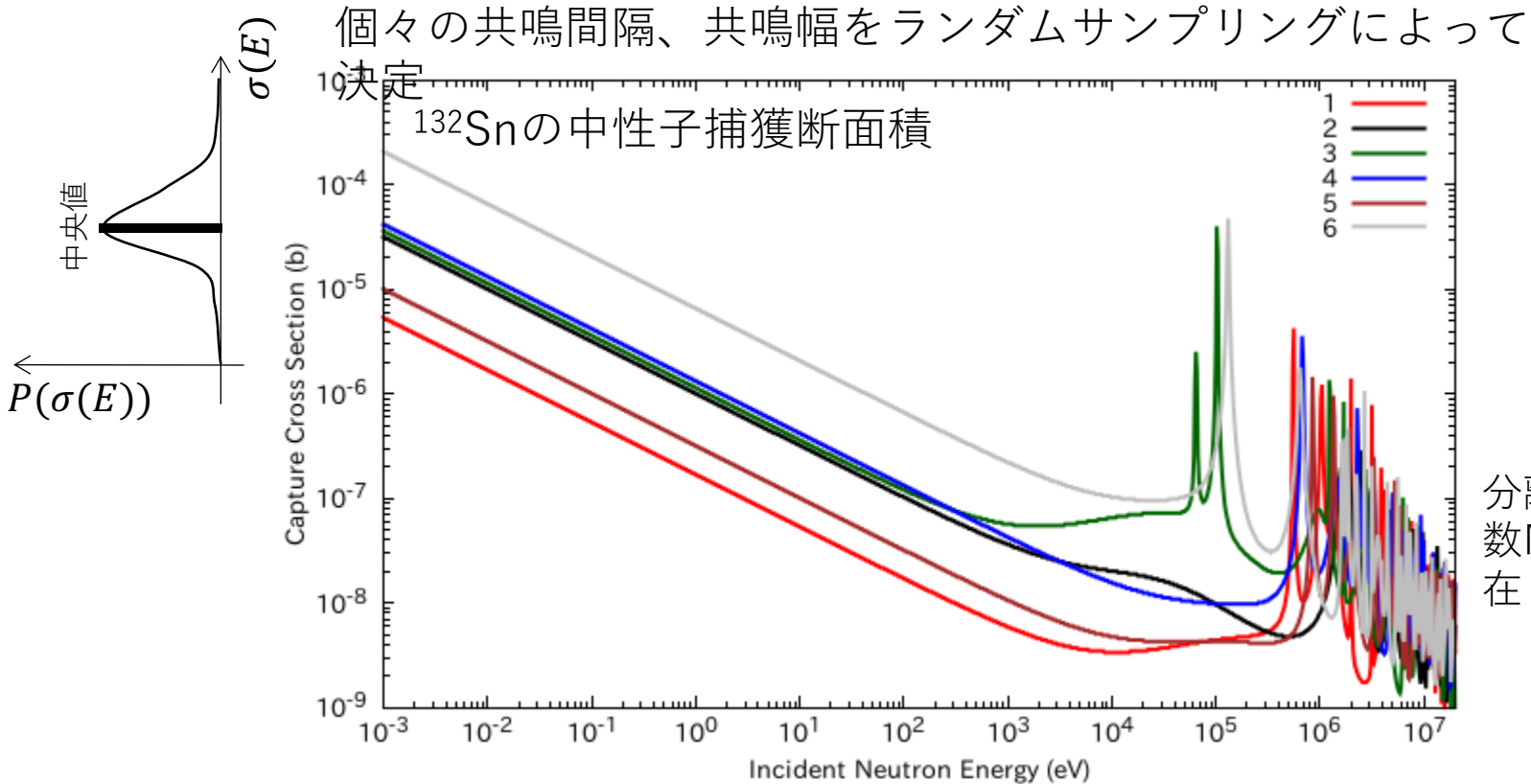
O. Bohigas et al., Nucl.Data for Sci.Technol., Reidel, Dordrecht (1983)

# Wigner & Porter-Thomas 分布から擬似共鳴を作る

$D_0$  と  $S_0$  はそれぞれHybrid LD<sup>\*1</sup>とKunieda2007光学ポテンシャル<sup>\*2</sup>から導出

\*1 : N.Furutachi, FM, O.Iwamoto, JNST56,412(2019)

\*2 : S.Kunieda et al., JNST44,838(2007)



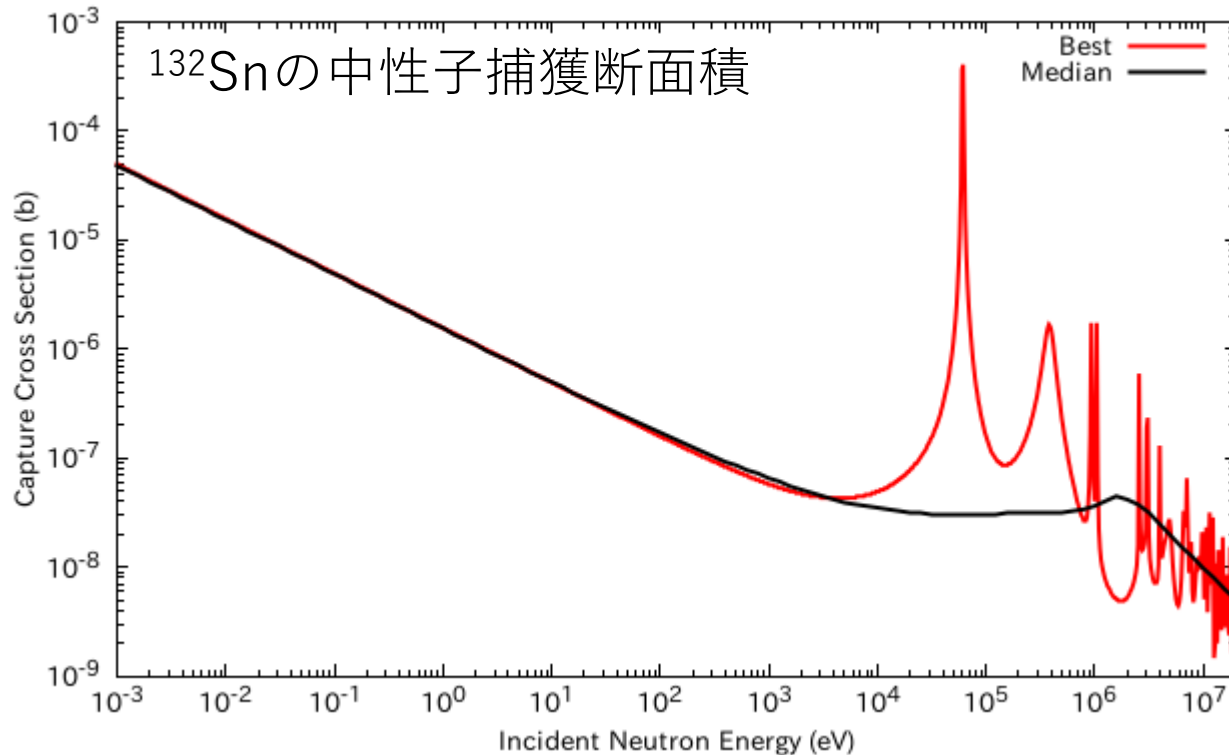
分離共鳴は  
数MeVまで存在！

あらゆるケースの捕獲断面積が得られる  
-どれが一番正しいのか？-



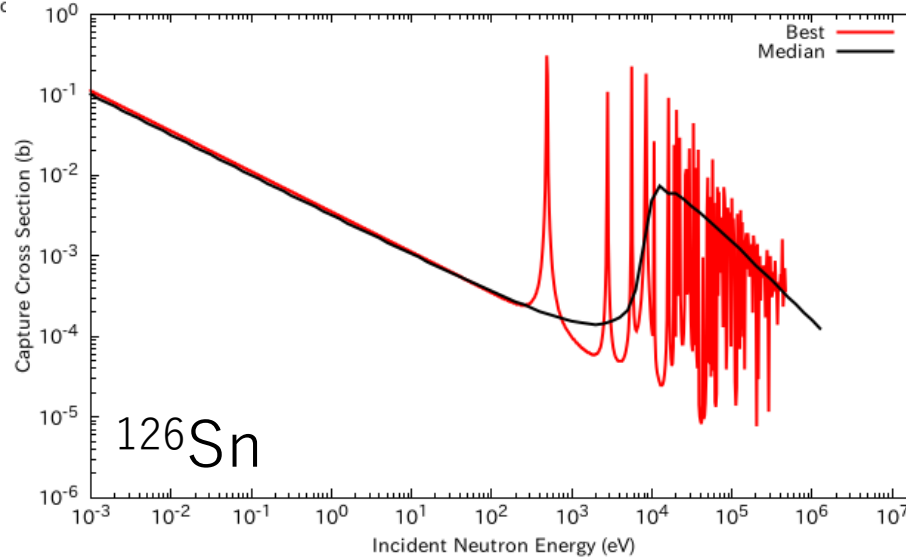
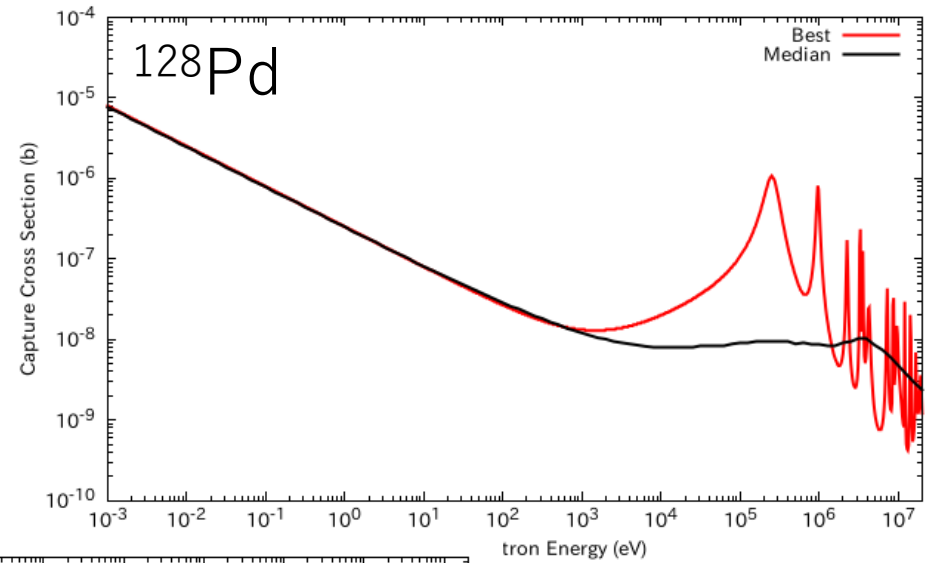
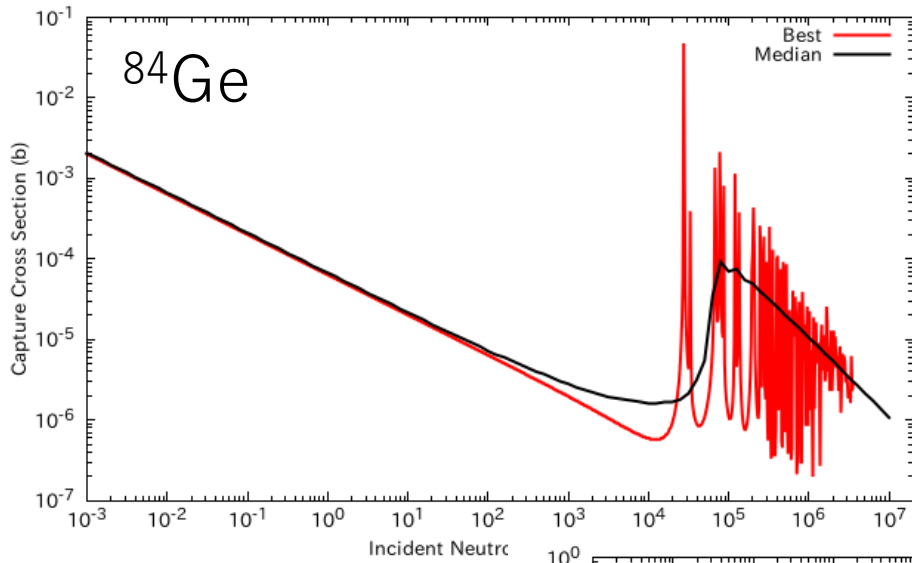
## 解決策：確率密度分布を参考

もっとも中央値をたどる共鳴パラメーターセットを選



ただし、まだs, p波中性子の共鳴のみ  
高いエネルギーではd,f波, …の中性子の共鳴も考慮する必  
要

# 結果



短い計算時間で中性子過剰核の共鳴領域における  
捕獲断面積を予測できる

1核種 2~3分 (14並列) ほとんどは中央値を求める計

## 2. 準直接捕獲反応における断面積計算

Cb-TDHFBで計算されたE1強度を準直接捕獲反応に導入

# 直接・準直接捕獲反応とは？

共鳴反応（複合核を経由する）



直接捕獲反応（複合核を経由しない）

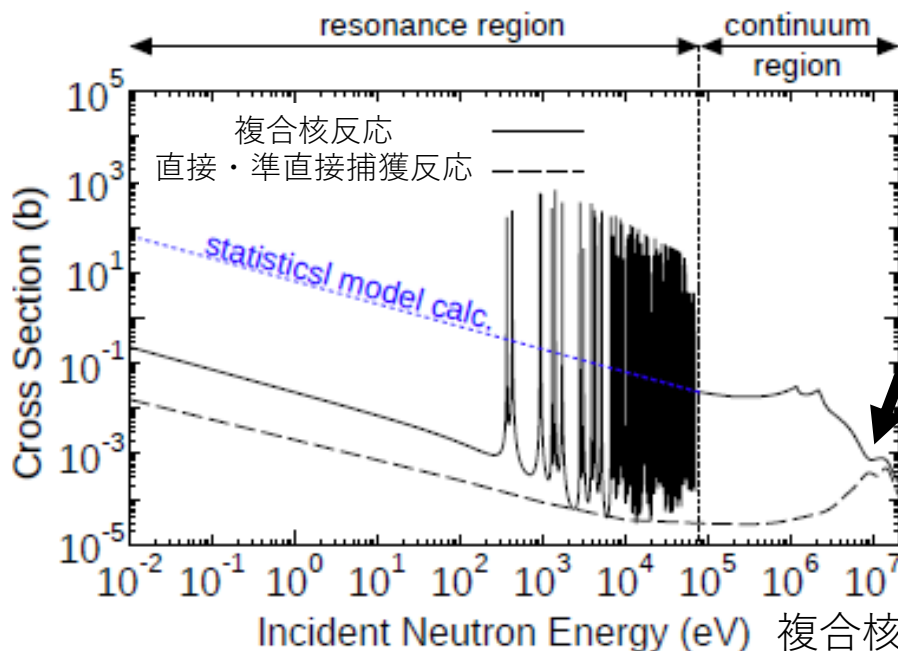
短いタイムスケールで起きる



準直接捕獲反応（複合核を経由しないが  
標的の集団モードを励起）



c.f. pre-equilibrium, doorway state

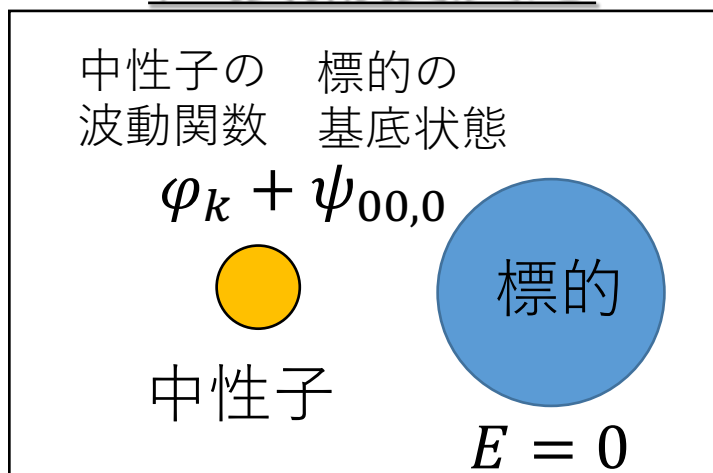


直接・準直接捕獲は  
10MeV近傍で重要に  
なってくる

中性子過剰核の高いエネルギーでは複合核成分が相対的に小さくなり、  
直接・準直接捕獲が重要に！

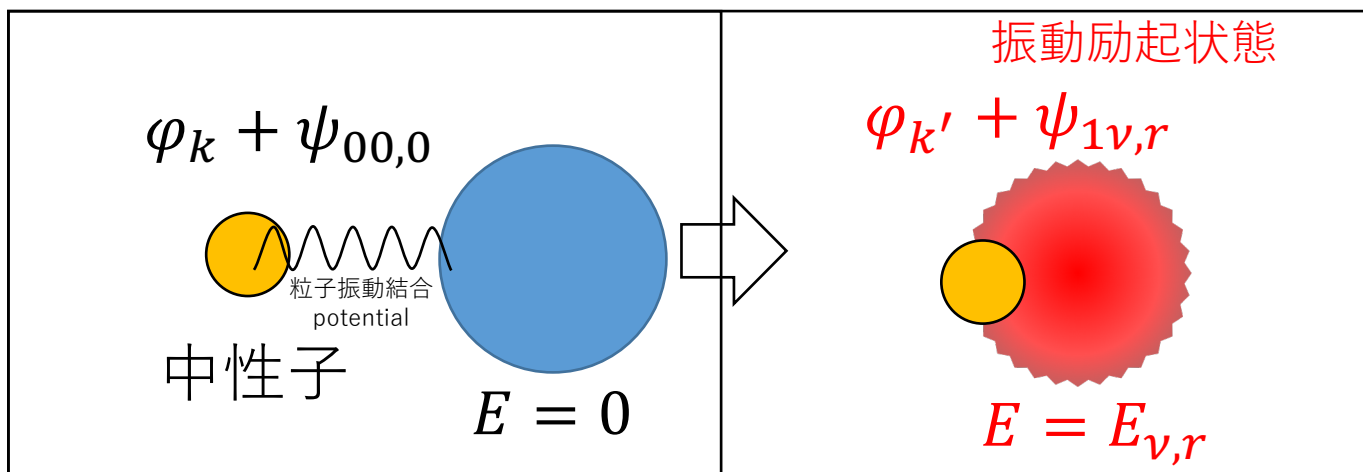
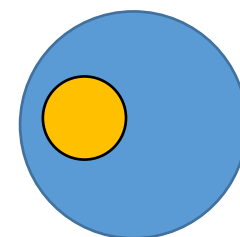
# 直接と準直接捕獲反応の模式図

## 直接捕獲反応



核内中性子の波動関数

$$\varphi_b + \psi_{00,0}$$



## 準直接捕獲反応

振動励起状態をCb-TDHFBで計算

TENDL: 励起子モデルを採用、REACLIB: 考慮していない



波数  $k$ , 角運動量  $LJ$  の状態を持った入射中性子が  $lj$  の終状態になる断面積

$$\sigma^k(lj; LJ) \propto \frac{8\pi}{9} \frac{\mu}{\hbar^2} \left(\frac{k_\gamma}{k}\right)^3 \langle I_i K_i j K_f | I_f K_f \rangle^2 \left| T_d^k(lj; LJ) + T_{sd}^k(lj; LJ) \right|^2$$

直接捕獲反応
準直接捕獲反応

$$T_d^k(lj; LJ) = \bar{e}(-i)^{l+1} Z \left( LJlj; \frac{1}{2} 1 \right) \sqrt{S_{lj}^k} \langle \mathcal{R}_{lj}^k | r | R_{LJ} \rangle$$

$$T_{sd}^k(lj; LJ) = \frac{3}{2\langle r^2 \rangle} \frac{N^2 Z^2}{A^3} e \sum_{l'j'} \left[ Z \left( LJl'j'; \frac{1}{2} 1 \right) (-1)^{l'+1} \sqrt{S_{l'j'}^k} \langle \mathcal{R}_{l'j'}^k | h | R_{LJ} \rangle \sum_{\nu} C_{JKjj'}^{\nu} f_{\nu}(E_{\gamma}) \right]$$

spectroscopic factor
final p.w.f.
initial p.w.f.

partial wave function(p.w.f.)

粒子振動結合ポテンシャル

標的原子核の成分

$$C_{JKjj'}^{\nu} = \langle 1, -\nu, J, \nu + K | j'K \rangle \langle 1, -\nu, J, \nu + K | jK \rangle$$

集団運動の座標  
(ここではE1)

↓

標的の励起状態
標的の基底状態

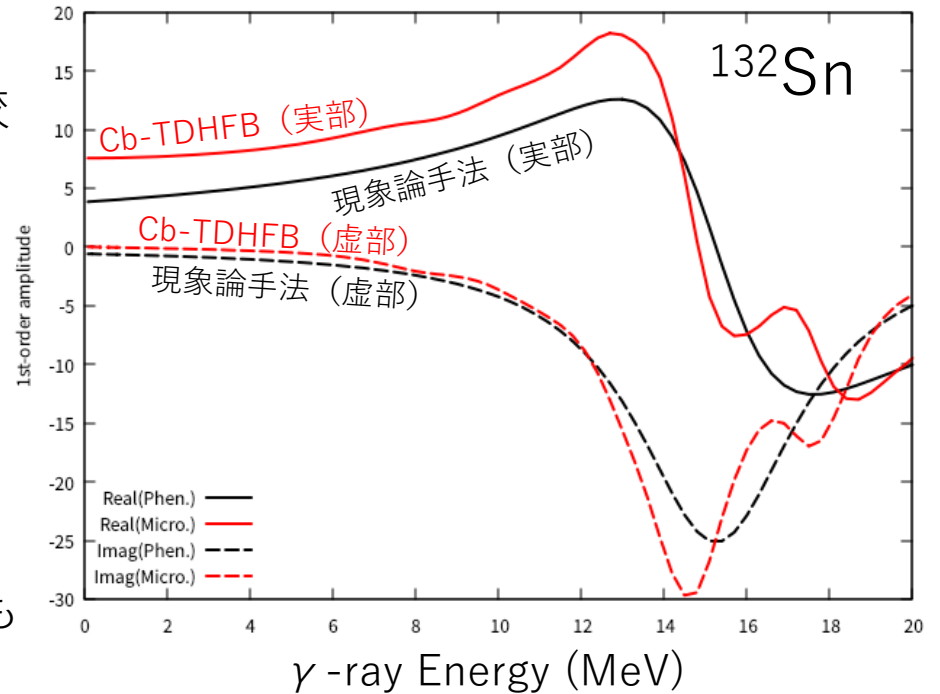
$$f_{\nu}(E_{\gamma}) = \sum_r \frac{|\langle \psi_{1\nu,r} | \rho_{\nu}' | \psi_{000} \rangle|^2}{E_{\gamma} - E_{\nu,r} + i\Gamma_{\nu,r}/2}$$

E1共鳴幅
標的のE1共鳴エネルギー

○:実験値または系統式から決める

$$f_\nu(E_\gamma) = \sum_r \frac{|\langle \psi_{1\nu,r} | \rho'_\nu | \psi_{00} \rangle|^2}{E_\gamma - E_\nu + i\Gamma_{\nu,r}/2} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2A^3}{(NZ)^2} \frac{1}{8\pi^2 \alpha A} \frac{\sigma^{int}}{E_\nu} \frac{1}{E_\gamma - E_\nu + i\Gamma_{\nu,r}/2} \quad \text{現象論手法} \\ \text{Cb - TDHFB} \quad \text{今回の手法} \end{array} \right.$$

$^{132}\text{Sn}$ の $f_\nu(E_\gamma)$ の現象論手法と  
Cb-TDHFBを比較



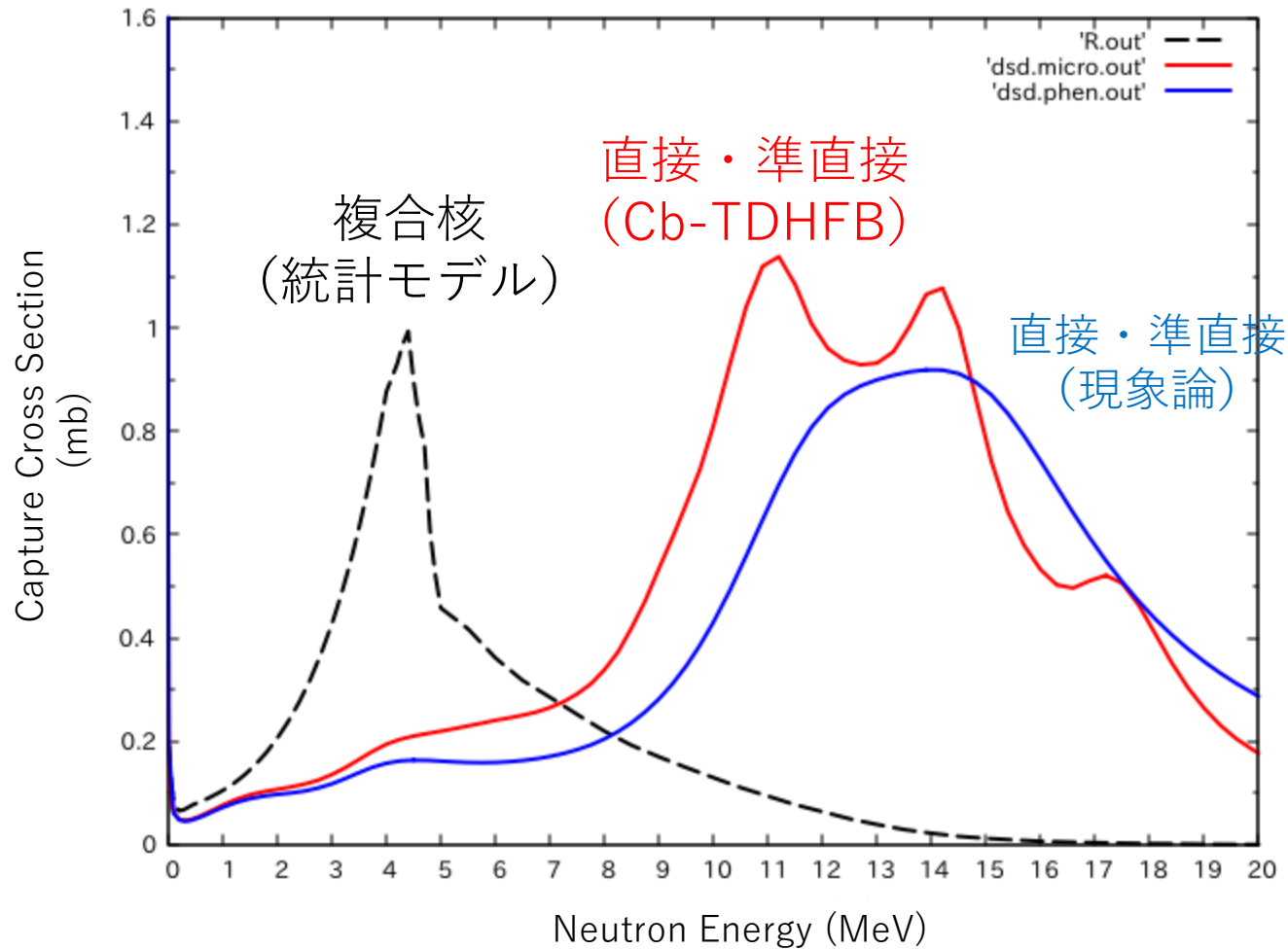
14MeV 以下で  
Cb-TDHFB (実部) > 現象論手法 (実部)

→ 準直接捕獲反応が低いエネルギーでも  
起こりやすくなる

### 計算詳細

- 入射中性子、散乱中性子は光学ポテンシャル(Kunieda2007)で計算
- 中性子束縛状態はDeformed Woods-Saxon ( $r = 1.26A^{1/3}$ ,  $a = 0.6$ )で計算
- 粒子振動結合ポテンシャル  $h(r) = r \left( V_1 f(r) - 4iW_1 a \frac{df}{dr} \right)$

# $^{132}\text{Sn}$ の中性子捕獲断面積



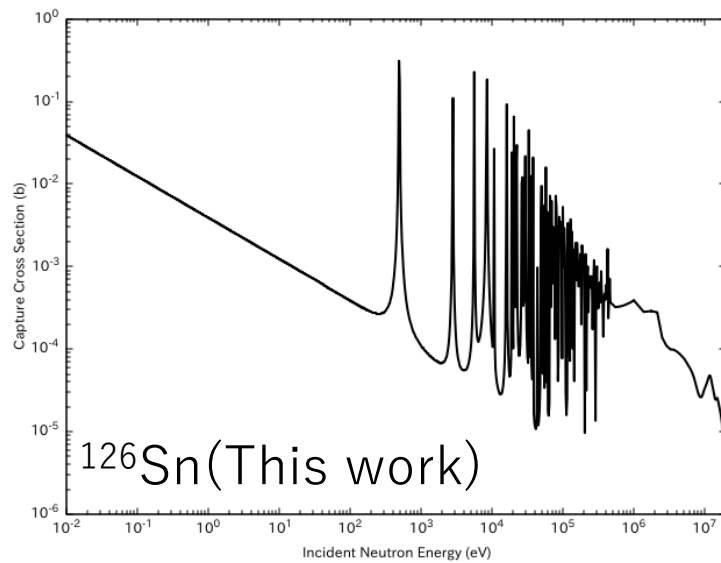
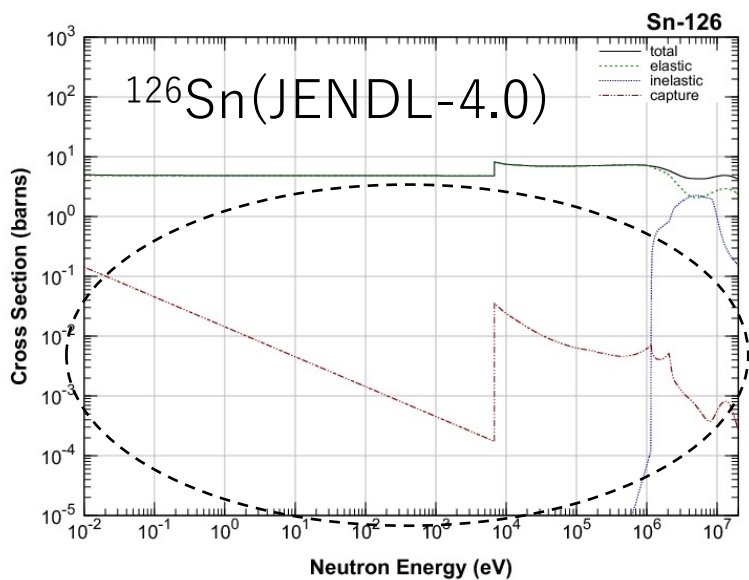
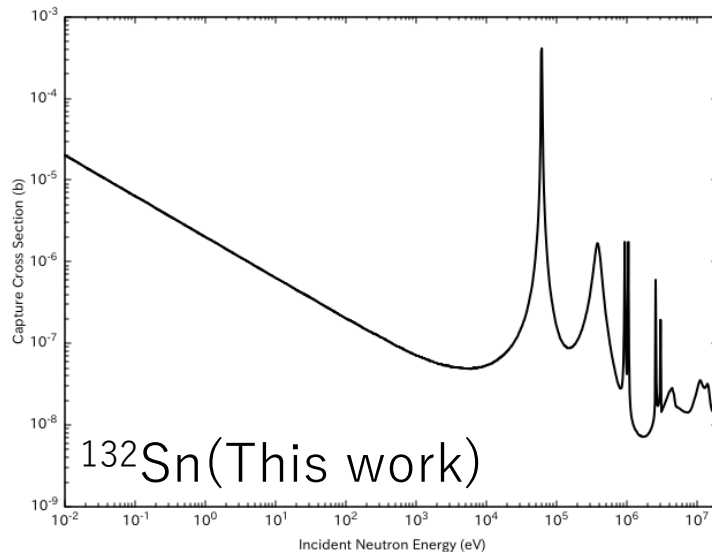
5 MeV以下では複合核モデルがメインだが、直接・準直接の寄与も無視できない  
直接・準直接反応：E<14 MeV以下でCb-TDHFBが現象論と比べてenhance  
ただし、Cb-TDHFBと現象論で使われる $\Gamma$ が異なるため、さらに検証が必要

1. 共鳴領域における中性子捕獲断面積計算  
と

2. 準直接捕獲反応における断面積計算

をまとめると・・・

# 中性子捕獲断面積の図



(注：連続領域は分離共鳴領域と接続するようにスケール)

## まとめ

共鳴の統計的な性質に着目した擬似共鳴の導入  
確率密度分布から決定した中性子捕獲断面積  
準直接捕獲反応における標的の遷移確率に  
微視的構造理論の結果を導入

## 今後の課題

s, p波に加えて、d波 (f,g,h波)中性子の考慮  
分離共鳴領域と連続領域の接続  
semi-microscopic(JLM)光学ポテンシャルの導入  
nや $\gamma$ 以外のチャンネルが開いている場合  
準直接捕獲では、 $\gamma$ 線強度の幅についてまだ慎重な議論要

ご清聴ありがとうございました