中性子過剰核の keV 領域の中性子捕獲 反応の理論予測

JAEA 核データ研究グループ 湊 太志





r-processに重要なエネルギー領域の捕獲断面積を どうやったら予測できるか?
中性子過剰核のkeV領域に共鳴はあるか?
>中性子捕獲反応の干渉項を再考



研究用原子炉を用いた素粒子原子核物理学

→たぶん現状は難しい 断面積をどうやって測定するのか? その一方で理論計算は技術的には比較的易しい 散乱波の波動関数 束縛一粒子状態の波動関数 主に必要な情報 複合核断面積が相対的に小さくなって • 直接捕獲と同じくらいになる Spectroscopic factor (n, γ) cross sections of Sn isotopes 10^{1} at 30 keV capture state section (mb) En + Sn ~ a few MeV 準位密度小さく、 10⁰ 複合核過程が抑制 En 【 中性子閾值 Sn Cross 10^{-1} DSD HF Rauscher et al. 0 keV 10⁻² 中性子過剰核 125 130 ¹²⁴Sn Sn= 5.7 MeV 135 ¹³⁴Sn Sn= 2.2 MeV S. Chiba et al. Phys. Rev. C77, 015809 (2008). 研究用原子炉を用いた素粒子原子核物理学

中性子過剰核のkeV領域の

<u>中性子核反応断面積</u>

簡単とはいっても、理論計算値が本当に正しいとは話が別 keVの中性子捕獲断面積の測定は難しいが、MeVなら可能か?



くアプローチン

中性子捕獲反応の理論モデルを通じて実験の誤差をkeV領域に伝搬させる

手法の一連の流れ
(1)測定データのある MeV 領域で<u>理論モデルパラメータ</u>の最尤度と共分散を決定
(2)実験データのない keV 領域の断面積を計算
(3)共分散から不確定性を求める

※複合核反応の寄与は今は考えない

パラメータ決定にはガウス過程+ベイズ最適化を使用

実験データの共分散 $V \rightarrow$ 簡単のため実験データ間の相関はゼロと仮定 パラメータの共分散 $X = (C^T V^{-1} C)^{-1}$ 理論モデルの計画行列 C个数値的に求める $C_{ij} = \frac{\partial \sigma_{cap,i}}{\partial x_j}$ $\sigma_{cap,i}: i(1 \le i \le n)$ 番目の 指獲断面積データ $x_i: j$ 番目のパラメータ



捕獲断面積モデルにはポテンシャルモデルを採用 中性子散乱波の計算は、光学モデルを使用 ポテンシャルは Kunieda2007を使用



L. Bonneau et al. PRC75, 054618 (2007).

捕獲断面積
$$\sigma^{(k)}(lj;LJ) = \frac{8\pi}{9} \frac{\mu}{\hbar^2} \left(\frac{k_{\gamma}}{k_n}\right)^3 \langle I_i K_i j K_f | I_f K_f \rangle^2$$

 $\times \left| T_d^{(k)}(lj;LJ) + T_s^{(k)}(lj;LJ) \right|^2,$
 $T_d^{(k)}(lj;LJ) = \bar{e}(-i)^{l+1} Z \left(LJ lj; \frac{1}{2} 1 \right) \sqrt{S_{lj}^{(k)}} \langle \varphi_{lj} | r | \psi_{LJ} \rangle$
 $T_s^{(k)}(lj;LJ) = \pm \frac{3}{2\langle r^2 \rangle} \frac{N^2 Z^2}{A^3} e \sum_{l'j'} (-i)^{l'+1} Z \left(LJ l'j'; \frac{1}{2} 1 \right) \sqrt{S_{lj}^{(k)}} \left\langle \varphi_{l'j'} | h(r) | \psi_{LJ} \right\rangle$
 $\times \sum_{\nu} \langle 1 - \nu J \nu + K | j' K \rangle \langle 1 - \nu J \nu + K | j K \rangle \frac{M_{\nu 0}}{E_n - (E_{\nu} + \epsilon_k) + i \frac{1}{2} \Gamma_{\nu}}$

 $M_{\nu 0}$, Γ_{ν} are taken from H. Kitazawa et al. NPA307, 1 (1978).

<u>使用した理論モデルパラメータ</u> 1) Sn-132のポテンシャルの深さ $x_1 = V_0$ 2) スピン・軌道相互作用の強さ $x_2 = V_{ls}$ 3) Sn-132の半径パラメータ $x_3 = r_0$ 4) 表面のぼやけパラメータ $x_4 = a$ 5) GDR遷移の強さの因子 $x_5 = f$ 6) GDRエネルギーの系統式からのずれ $x_6 = \Delta E_1$

擬似実験データ

	$\Delta\sigma_{cap}$ mb	σ_{cap} mb	E_n
40%誤差	0.14	0.340	10 MeV
30%誤差	0.48	1.60	15 MeV
	0.19	0.390	20 MeV
50%	0.0280	0.0560	30 MeV
│誤差	0.0080	0.0160	40 MeV
	0.0700	0.0140	50 MeV

$$V_0 = -47.839$$
$$V_{ls} = 15.903$$
$$r_0 = 1.206$$
$$a = 0.600$$
$$f = 1.002$$
$$\Delta E_1 = 0.240$$

最適化パラメータ

		-	-			
	V_0	V _{ls}	r_0	а	f	ΔE_1
V_0	1					
V _{ls}	-0.99	1				
r_0	0.96	-0.99	1			
а	0.93	-0.92	0.90	1		
f	0.94	-0.95	0.95	0.82	1	
ΔE_1	0.99	-1.00	0.99	0.92	0.96	1

表:パラメータの相関行列



研究用原子炉を用いた素粒子原子核物理学

7

複合核過程の影響はないという仮定で実施



S. Chiba et al. Phys. Rev. C77, 015809 (2008).

JENDL-5 より https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html



研究用原子炉を用いた素粒子原子核物理学

● 実験データがないときの分離共鳴領域の断面積は・・・



➤ JENDL-5における評価データ

✓ どのくらい共鳴があるのか、おおよその影響を理論計算から見積もることはできないか?

研究用原子炉を用いた素粒子原子核物理学

共鳴間隔と共鳴幅の統計的なふるまい





keV 領域において、共鳴が無いとは言い切れない。

直接捕獲と共鳴捕獲は<u>タイムスケールが違うだけで</u> 最終的に同じ結果になるが、干渉を生じさせる

c.f. 散乱断面積
$$\sigma_{el} = \frac{\pi}{k_i^2} \sum_{l} (2l+1)|1 - S_{cc}|^2$$

$$= \frac{\pi}{k_i^2} \sum_{l} (2l+1)|2ie^{i\Omega_c} sin\Omega_c - S'_{cc}|^2$$

岡体球散乱項 共鳴に係わる項

実験データが存在を示す

図: TENDLのSn-134の捕獲断面積

干渉も考慮した中性子捕獲反応

$$\begin{split} \sigma_{cap} &= \frac{\pi}{k_i^2} (\left|S_{cc'}\right|^2 + \left|S_{dir}\right|^2)? \quad \leftarrow \text{Chlt正確ではない} \\ &= \frac{\pi}{k_i^2} \left|S_{cc'} + S_{dir}\right|^2_{T-\text{matrix}} \quad \leftarrow \text{より正確な記述} \\ &= \sigma_{res} + \sigma_{dir} + \delta\sigma_{int.} \\ &= \sigma_{res} + \sigma_{dir} + \frac{\delta\sigma_{int.}}{\mathbf{F}^3 \mathbf{y} \mathbf{y}} \\ \sigma_{res} &= \frac{\pi}{k_i^2} \left|S_{cc'}\right|^2 = \frac{\pi}{k_i^2} g \frac{\Gamma_{\lambda c} \Gamma_{\lambda c'}}{(E - E_{\lambda})^2 + \Gamma_{\lambda}^2/4} \quad \leftarrow \text{Breit-Wigner Formula} \\ \sigma_{dir} &= \frac{\pi}{k_i^2} |S_{dir}|^2 = \frac{8\pi}{9k_i^2} \cdots \end{split}$$

頃

$$\int \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{$$

 $e^{i\Omega_c}$ は $\delta\sigma_{int}$ 断面積が共鳴より低いところは正、高いところは負と仮定して決定

散乱波:光学ポテンシャル (Kunieda2007ポテンシャル) 一粒子準位、波動関数:Woods-Saxon ポテンシャル 共鳴パラメータ:JENDL-4.0, TENDL-2015

Sn-134 を中性子過剰核の例として計算

表:kT = 30 keVの時の Maxwellian Averaged Cross Section の計算

	C-13	Ge-82	Sn-134
共鳴+直接	0.071mb	0.273mb	0.177mb
共鳴+直接+干渉	0.077mb	0.262mb	0.200mb
変化量 (%)	8%个	4%↓	13%个

まとめ

- ・keV領域の中性子捕獲断面積を、MeV領域や熱中性子の測定から どのくらいの精度で予測できるか、モデルを用いて推測
- ・中性子過剰核の keV 領域における共鳴の存在を議論
- ・ 共鳴があった場合、 直接捕獲との 干渉効果を議論

中性子過剰核の keV 領域を直接測定できなくても、理論モデルを通し て間接的に予測値の不定性を小さくできることを例示 (中性子過剰核は難しいかもしれないが)入手可能な不安定核種で、 実験的に実証できていければ、おもしろいかもしれない