

# 平均場近似による光吸収断面積の 系統的記述と問題点

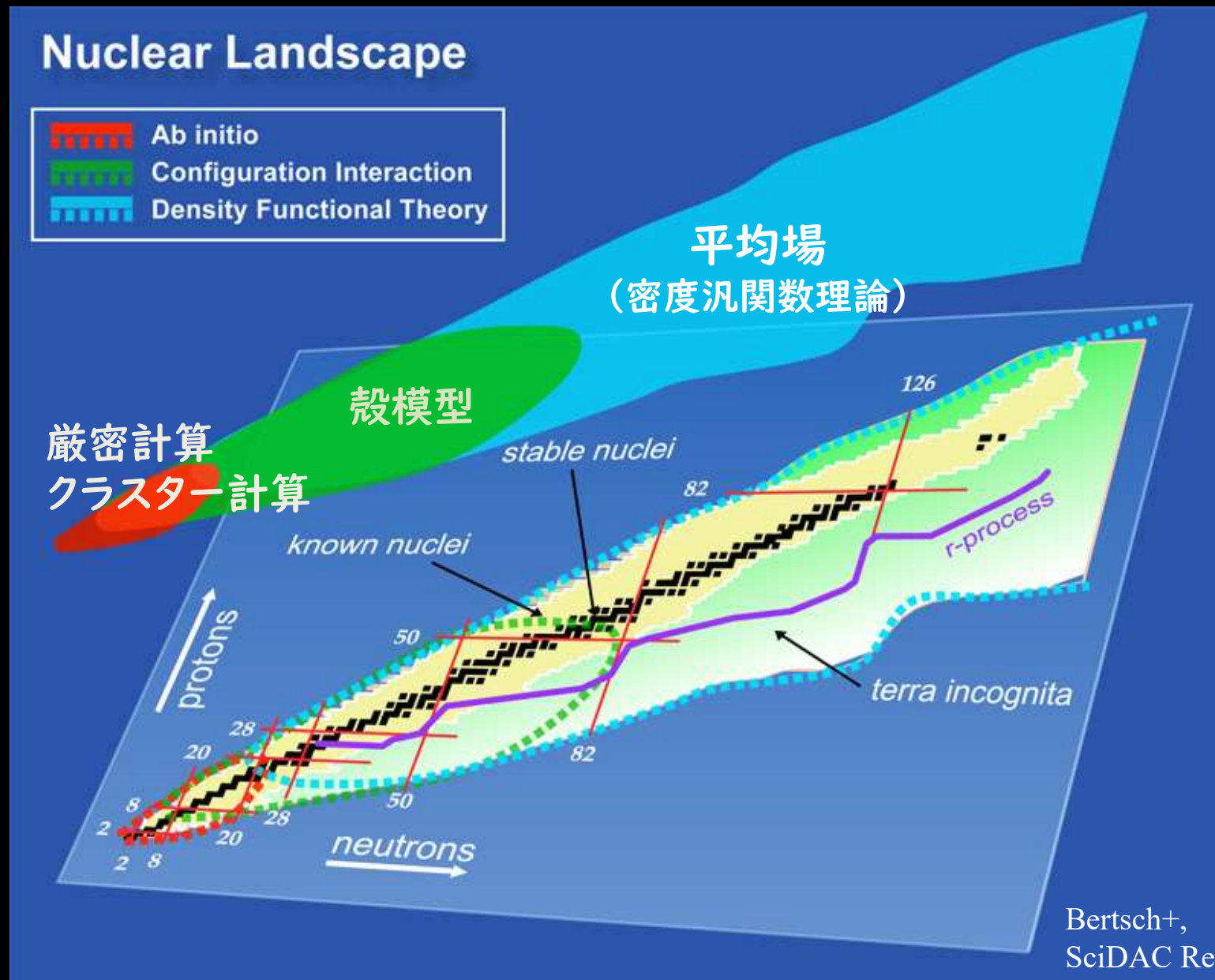
日本物理学会 2020年秋季大会

2020年9月17日

online

稲倉 恒法 (東工大)

# 原子核構造計算と質量領域



# 平均場計算(密度汎関数理論)

- 全系の波動関数を 1つのスレーター行列式で記述する。
- 個々の核子は平均場ポテンシャルの中を独立粒子運動していると仮定。そのポテンシャルは、全ての核子から作られる。
- ✓ A体問題が A個の一体問題になる。(= 計算量の削減)
- ✓ 計算結果の解析が容易で、物理的解釈を与え易い。
- 波動関数とポテンシャルの整合性を取るために、反復的に解く必要がある。
- 核子数が多い核では良い近似になっているが、核子数が少ないと近似が粗くなる。

# 有効相互作用(エネルギー密度汎関数)

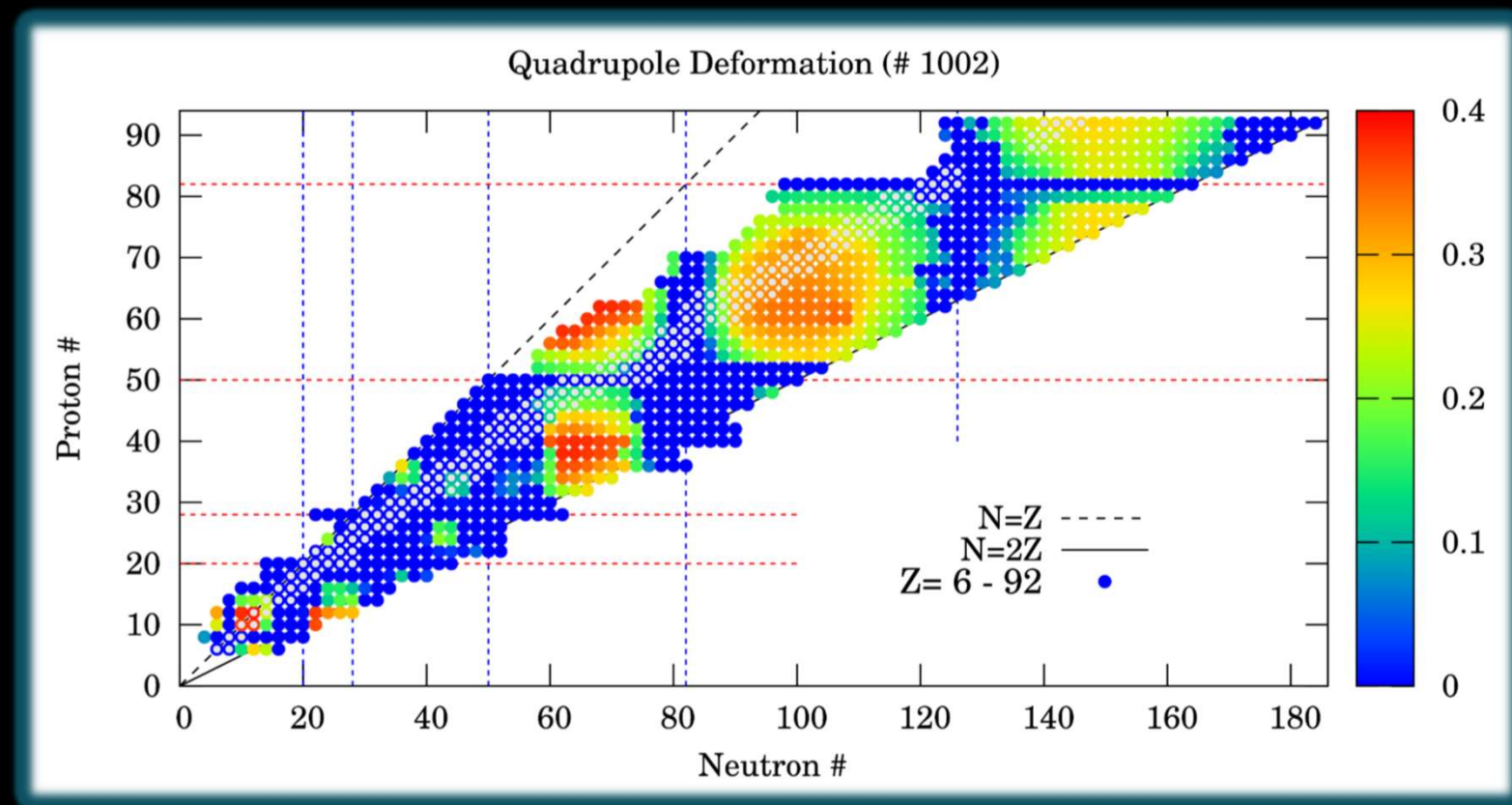
有効相互作用に **Skyrme 相互作用**を用いる。

- 接触型の相互作用で、エネルギーが一体密度の汎関数で表される。
- 有限レンジの効果は、密度の微分項を考慮する事で取り入れている。

$$E[\overset{\text{kinetic}}{\rho(r)}, \overset{\text{current}}{\tau(r)}, \overset{\text{spin-current}}{\overleftrightarrow{J}(r)}, \overset{\text{spin}}{j(r)}, s(r)]$$

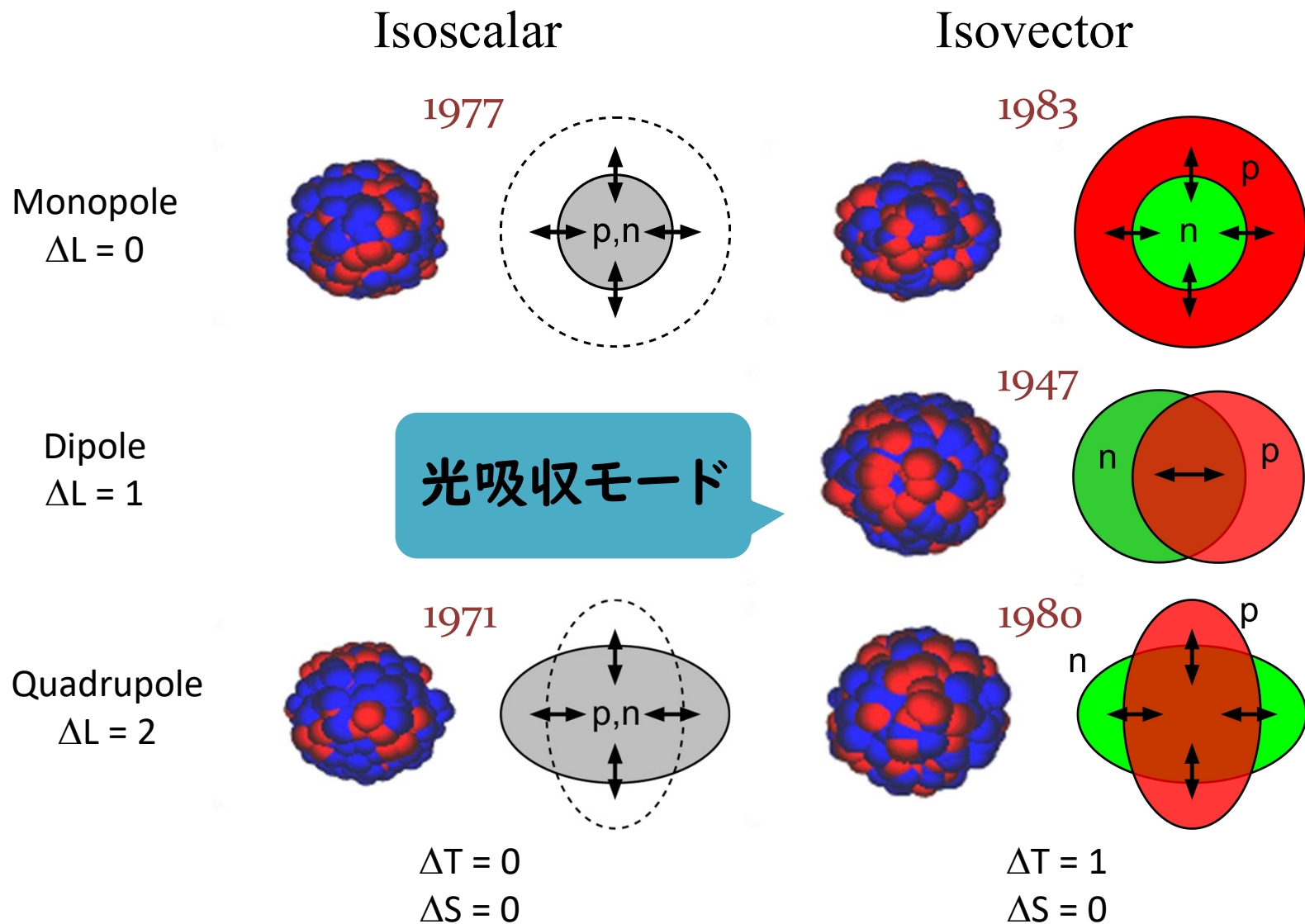
- ✓ 一体密度だけで計算できる。(= 少ない計算量)
- ✓ 全ての核種を同一の相互作用で計算する。
- 汎関数の係数に関して 10程度のパラメーターがあり、数多くのパラメーターセットがある。SkM\*, SLy4, UNEDF1, ...

# 平均場計算による基底状態の系統的計算



Ebata, Nakatsukasa, Phys. Scr. 92, 064005

# 巨大共鳴と光吸収モード



# 線形応答計算 (RPA)

基底状態の密度  $\rho_0$  は定常条件  $[h_0, \rho_0] = 0$  を満たす。  
弱い外場  $V_{ext}$  の下で、密度  $\rho(t)$  は時間依存 Hartree-Fock 方程式に従う。

$$i \frac{d}{dt} \rho(t) = [h(t) + V_{ext}, \rho(t)]$$

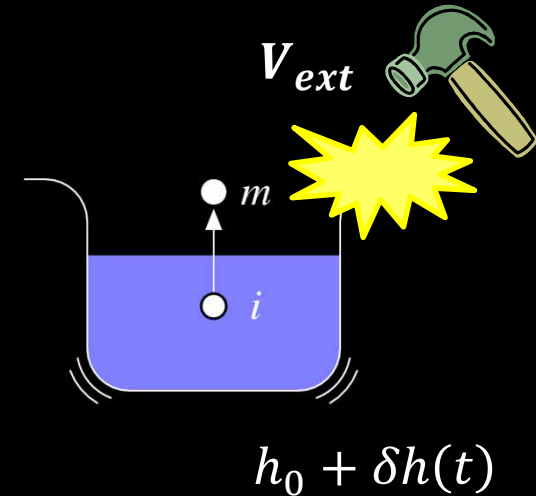
Hamiltonian と密度を基底状態に関する部分と時間発展部分に分割すると、  
 $h(t) = h_0 + \delta h(t)$ ,  $\rho(t) = \rho_0 + \delta \rho(t)$  となり、弱い外場の下での時間依存の  
応答方程式が得られる。

$$i \frac{d}{dt} \delta \rho(t) = [h_0, \delta \rho(t)] + [V_{ext} + \delta h(t), \rho_0]$$

ここで、 $\delta h, \delta \rho, V_{ext}$  の 2 次以上を無視した (線形近似)。フーリエ変換して、  
時間表示からエネルギー表示に変えると

$$\omega \delta \rho(\omega) = [h_0, \delta \rho(\omega)] + [V_{ext} + \delta h(\omega), \rho_0]$$

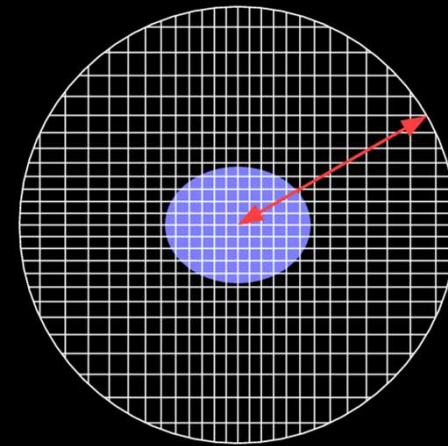
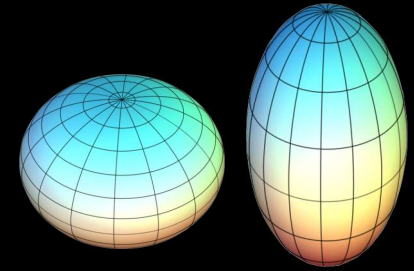
これが解くべき方程式で、原子核の振動励起状態を記述する。





# Key ingredients for GR

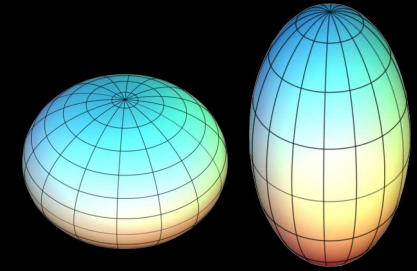
- **連続状態** [閾値を超えると現れる粒子放出を表現する。]
- **座標表示** [連続状態やハローを記述する。]
- **変形自由度** [多くの原子核は変形している。]
- **対相関** [幾つかの励起モードで重要。]
- **自己無撞着計算** [計算の信頼性を損なわないように。]





# Key ingredients for GR

- **連続状態** [閾値を超えると現れる粒子放出を表現する。]
- **座標表示** [連続状態やハローを記述する。]
- **変形自由度** [多くの原子核は変形している。]
- **対相関** [幾つかの励起モードで重要。]
- **自己無撞着計算** [計算の信頼性を損なわないように。]



State-of-the-art calculation: **TDSLDA** by Bulgac+.  
TDSLDA= Time-Dependent Superfluid Local Density Approximation.

# **mesh point** = 110, 592 ( $60 \times 30^2 \text{ fm}^3$ )

applicable for **deformed nuclei**

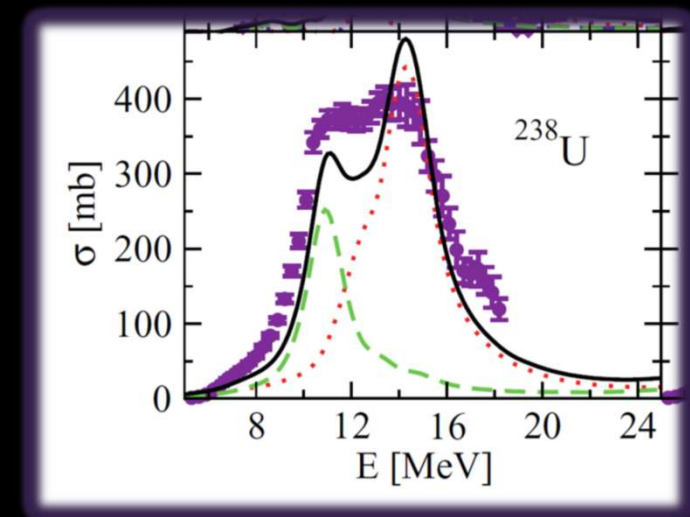
approx. for **continuum states**

**Pairing** : density-dependent pairing

**Self-consistent calc.** (TD scheme)

# GPU = 1800, 2.5 Petaflops

Titan @ ORNL.



Stetcu+, PRC84, 051309.

# Key ingredients for photoabsorption

- **連続状態** [閾値を超えると現れる粒子放出を表現する。]
- **座標表示** [連続状態やハローを記述する。]
- **変形自由度** [多くの原子核は変形している。]
- **対相関** [~~幾つかの励起モードで重要。~~]
- **自己無撞着計算** [計算の信頼性を損なわないように。]

**全てを取り入れて系統的計算するのは非現実的。**

# Key ingredients for photoabsorption

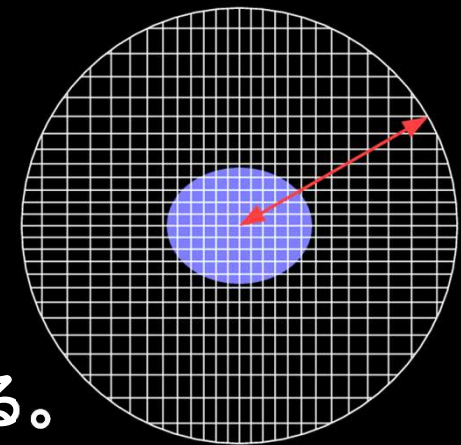
- **連続状態** [閾値を超えると現れる粒子放出を表現する。]
- **座標表示** [連続状態やハローを記述する。]
- **変形自由度** [多くの原子核は変形している。]
- **対相関** [幾つかの励起モードで重要。]
- **自己無撞着計算** [計算の信頼性を損なわないように。]

全てを取り入れて系統的計算するのは非現実的。

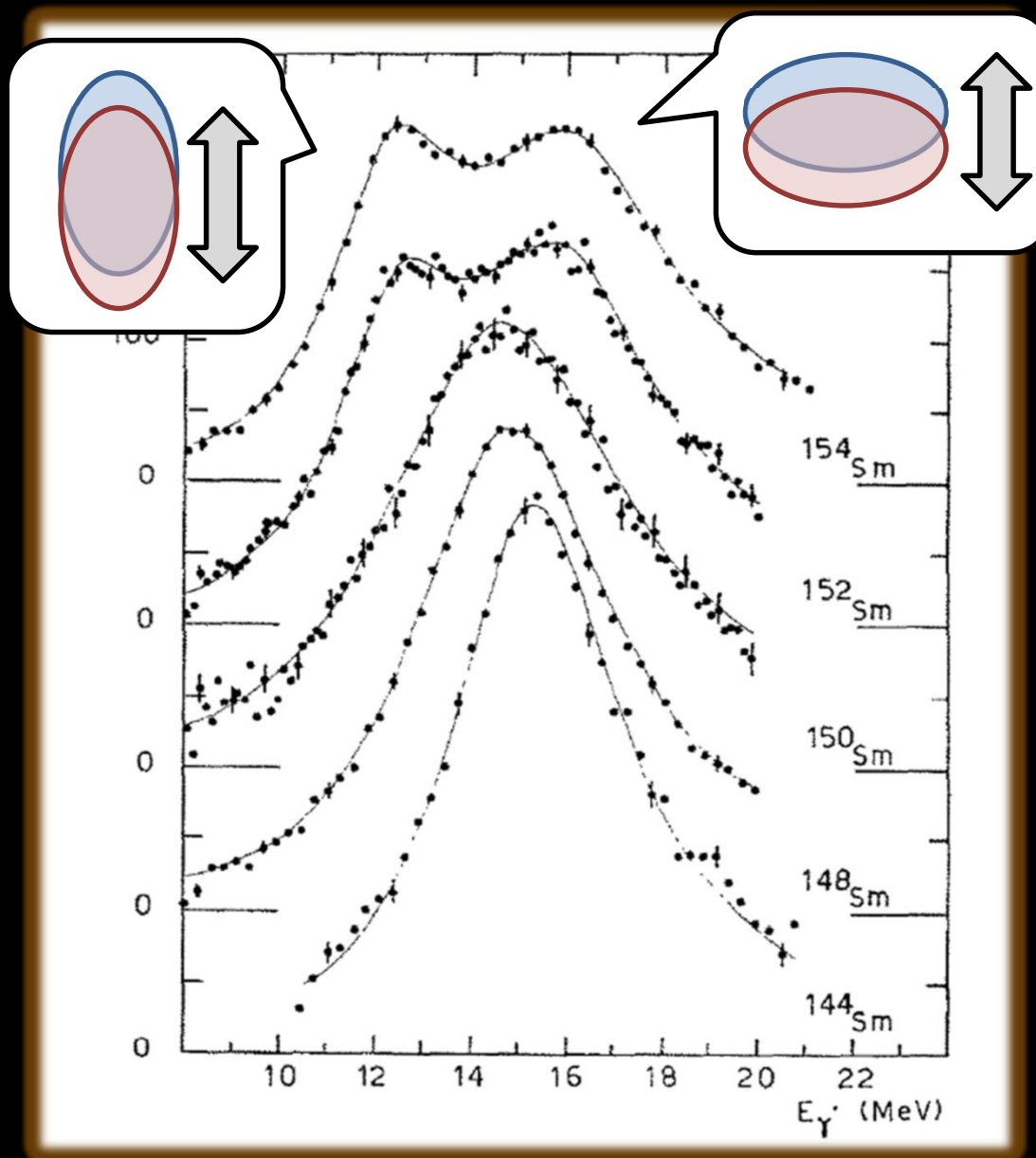
## ➤ 3次元座標表示

- **変形核** も球形核と同様に計算できる。
  - **連続状態** を近似的に扱っている。
- 完全に自己無撞着な計算
- 光吸収断面積の計算では**対相関**は無視できる。

[Ebata+, PRC90, 024303]



# 実験との比較

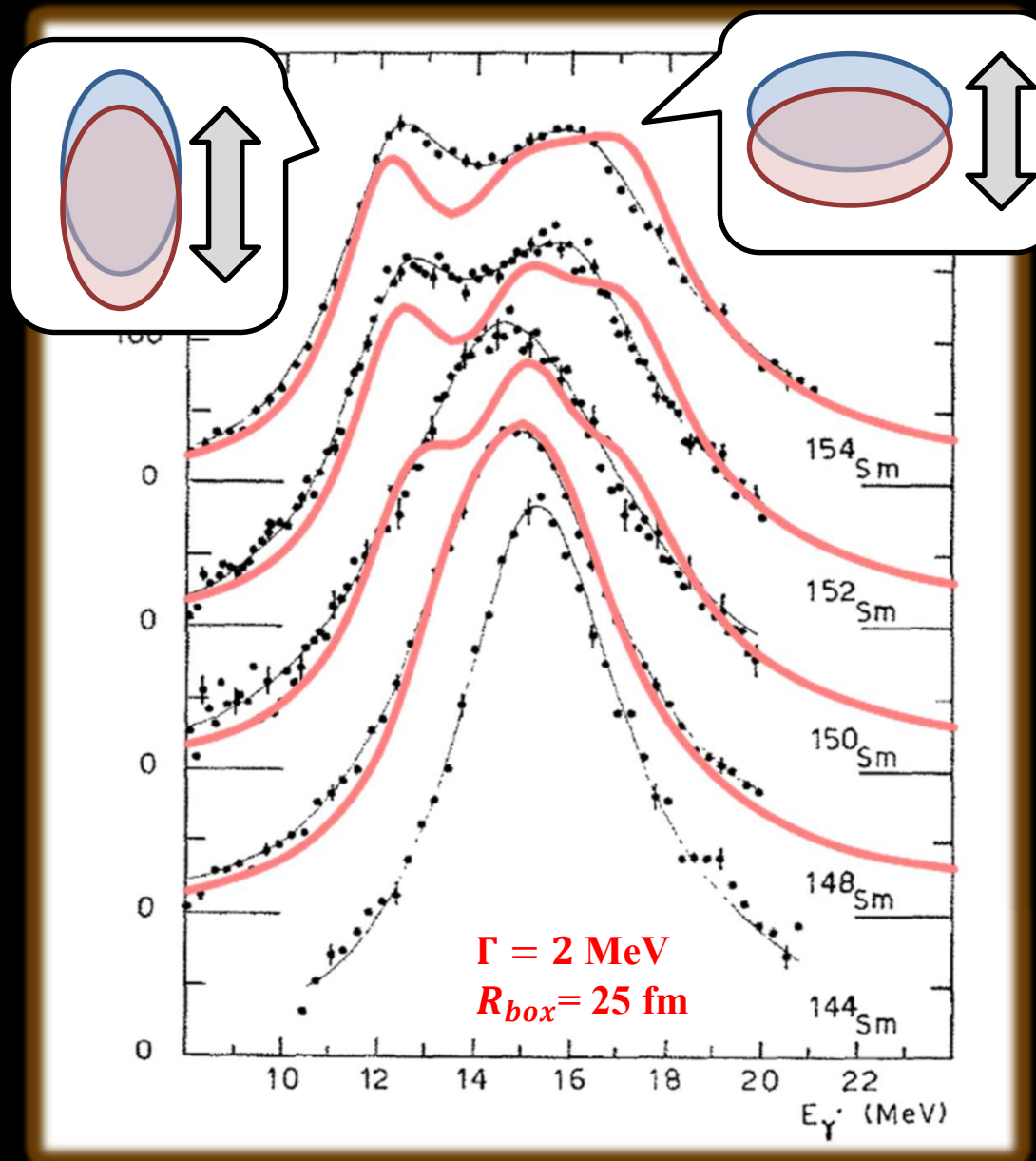


prolate変形



球形

# 実験との比較

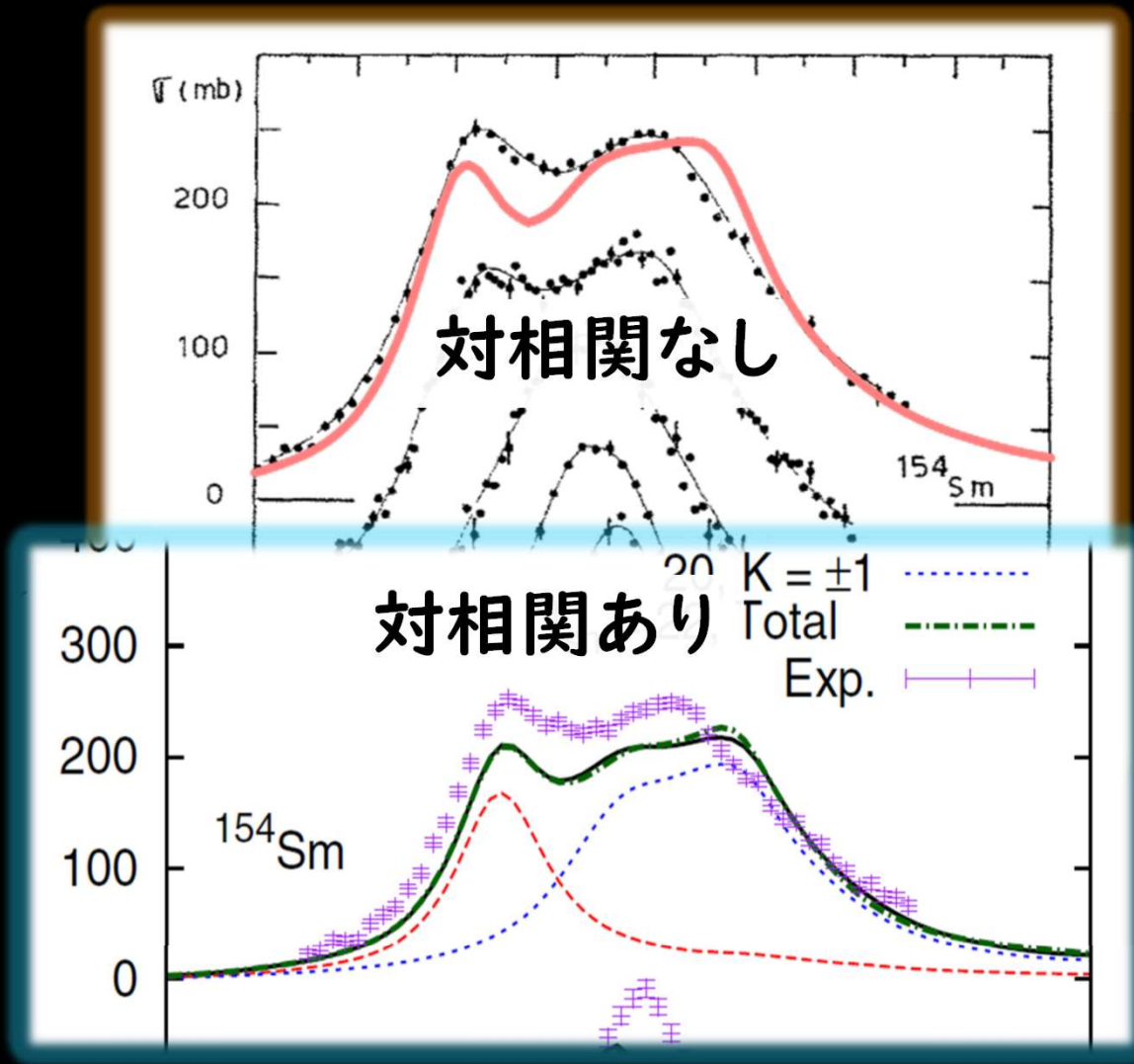


prolate変形



球形

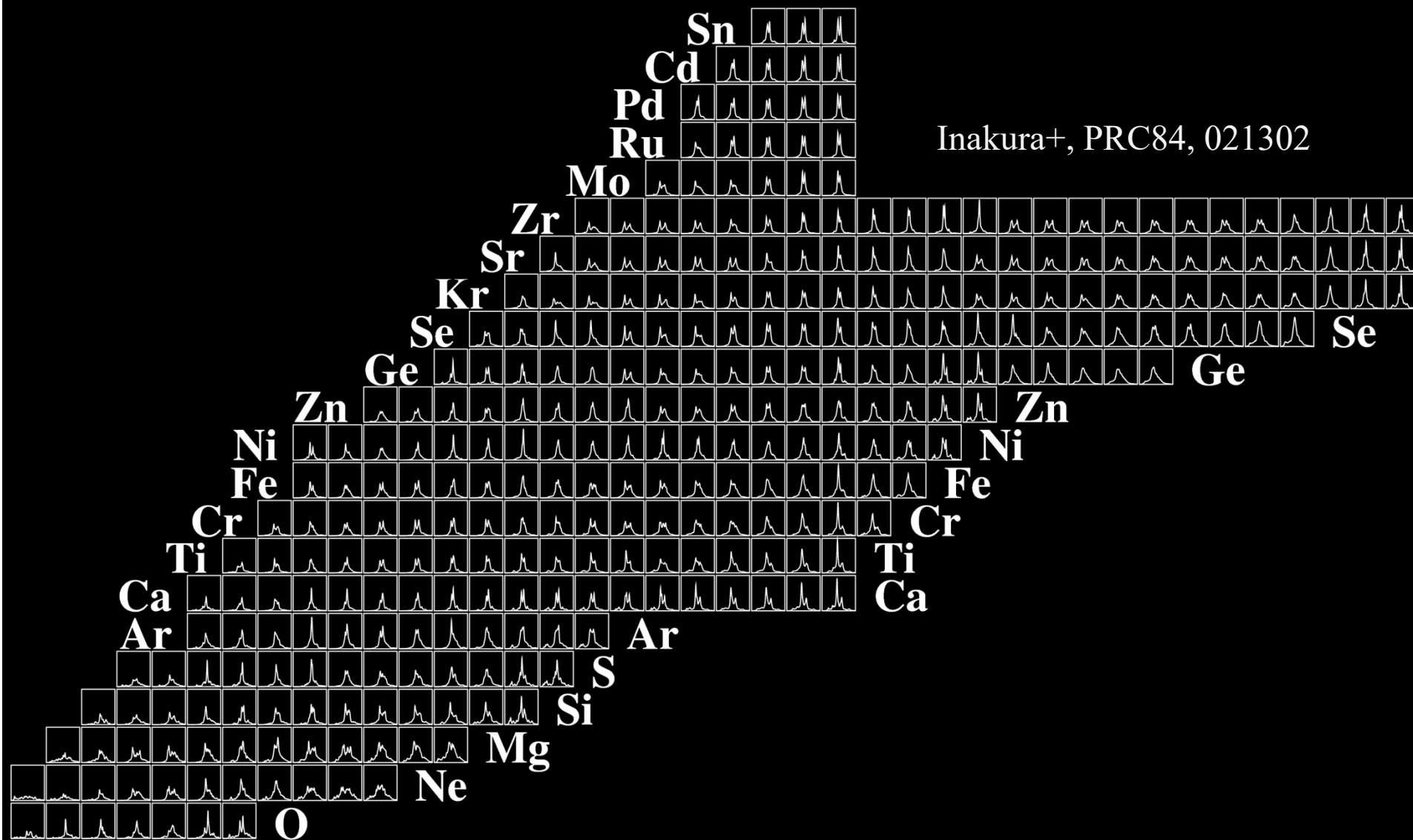
# 対相関の光吸収断面積への影響は小さい



Oishi+,  
PRC93, 034329

他にも Ebata+, PRC90, 024303 参照

# Systematic calc. of E1 mode





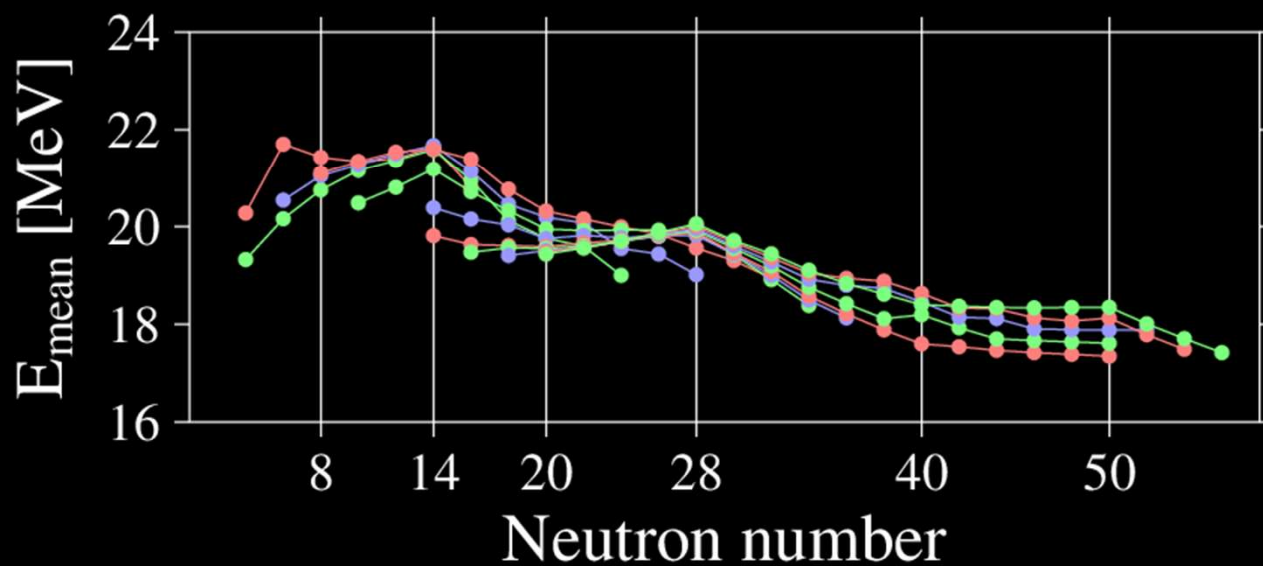
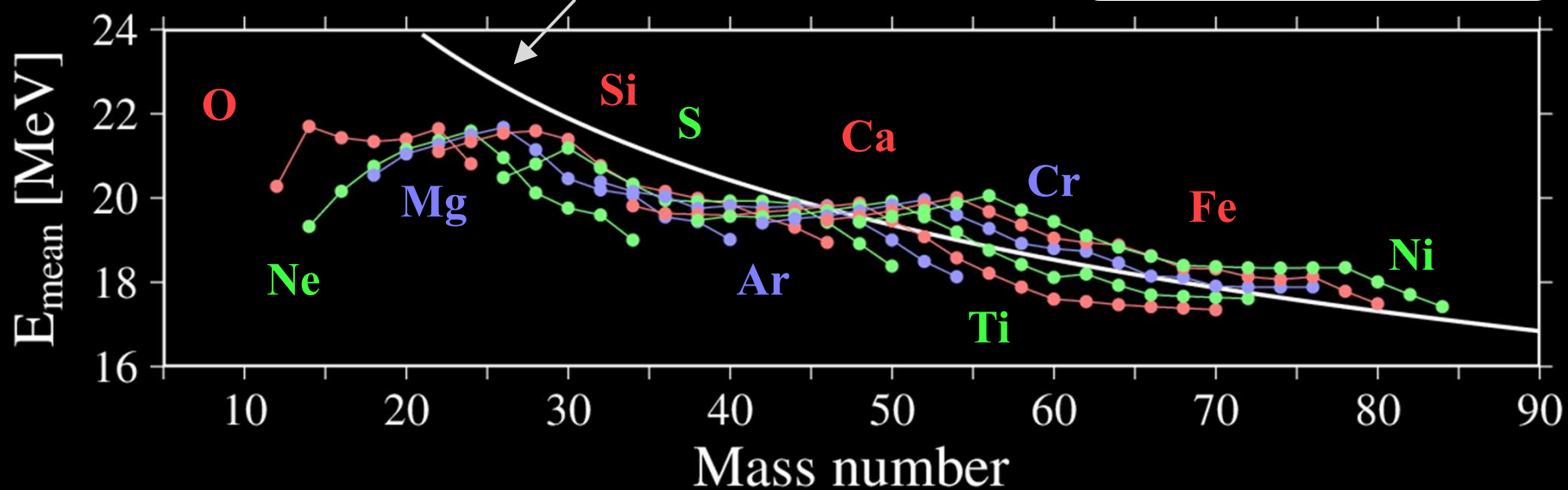
# GDR peaks

Empirical mass dependence

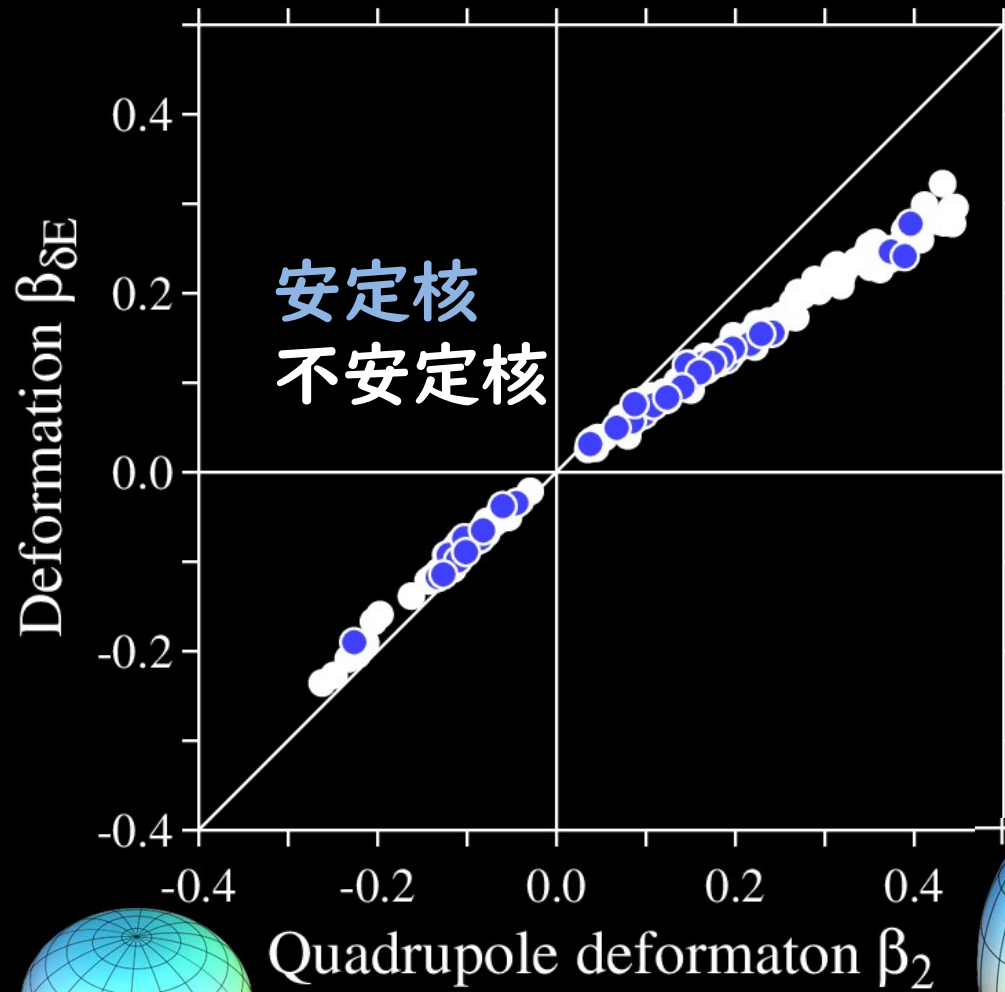
$$31A^{-\frac{1}{3}} + 21A^{-\frac{1}{6}}$$

Mean energy

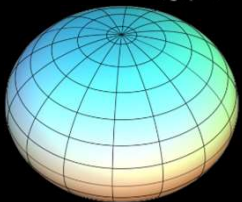
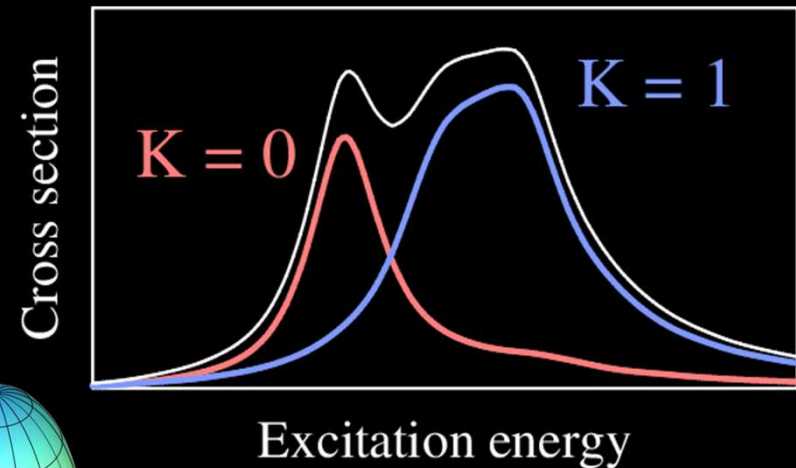
$$E_{\text{mean}} = \frac{\int dE \sigma(E) E}{\int dE \sigma(E)}$$



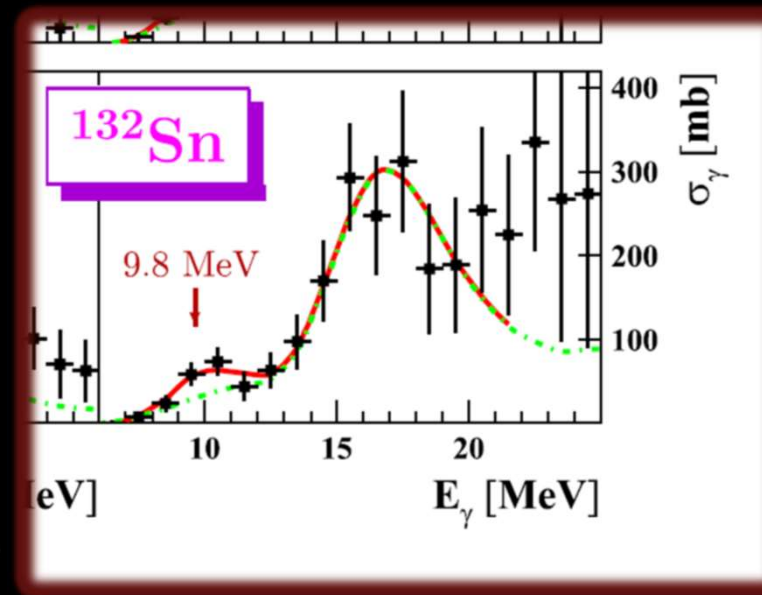
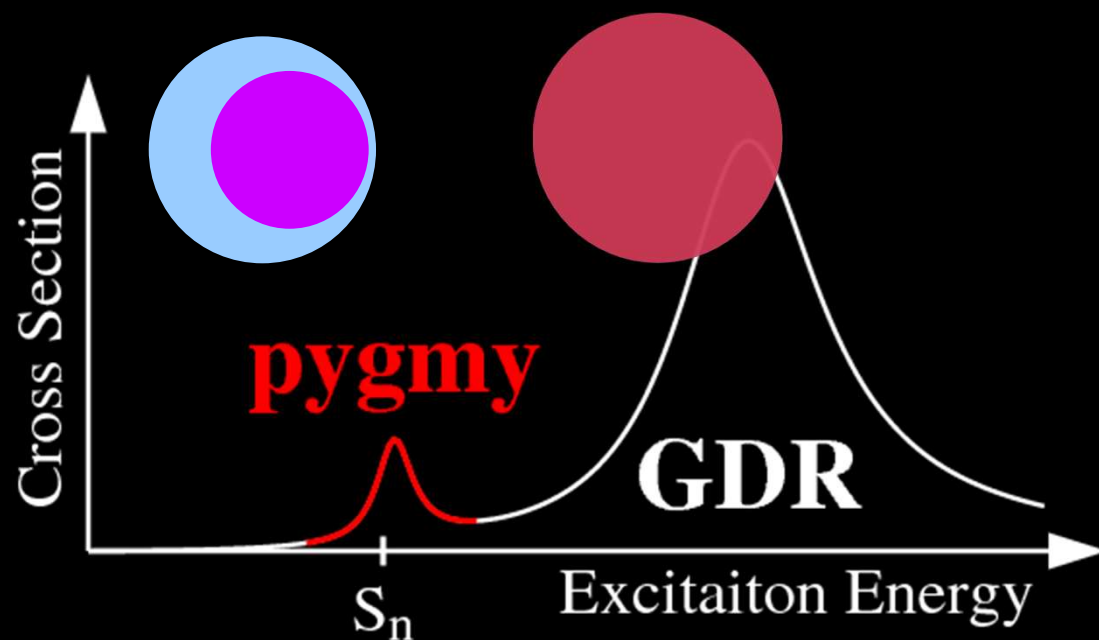
# GDR peak splitting by deformation



$$\beta_{\delta E} = \frac{E_{\text{mean}}^{K=1} - E_{\text{mean}}^{K=0}}{E_{\text{mean}}^{\text{all}}}$$



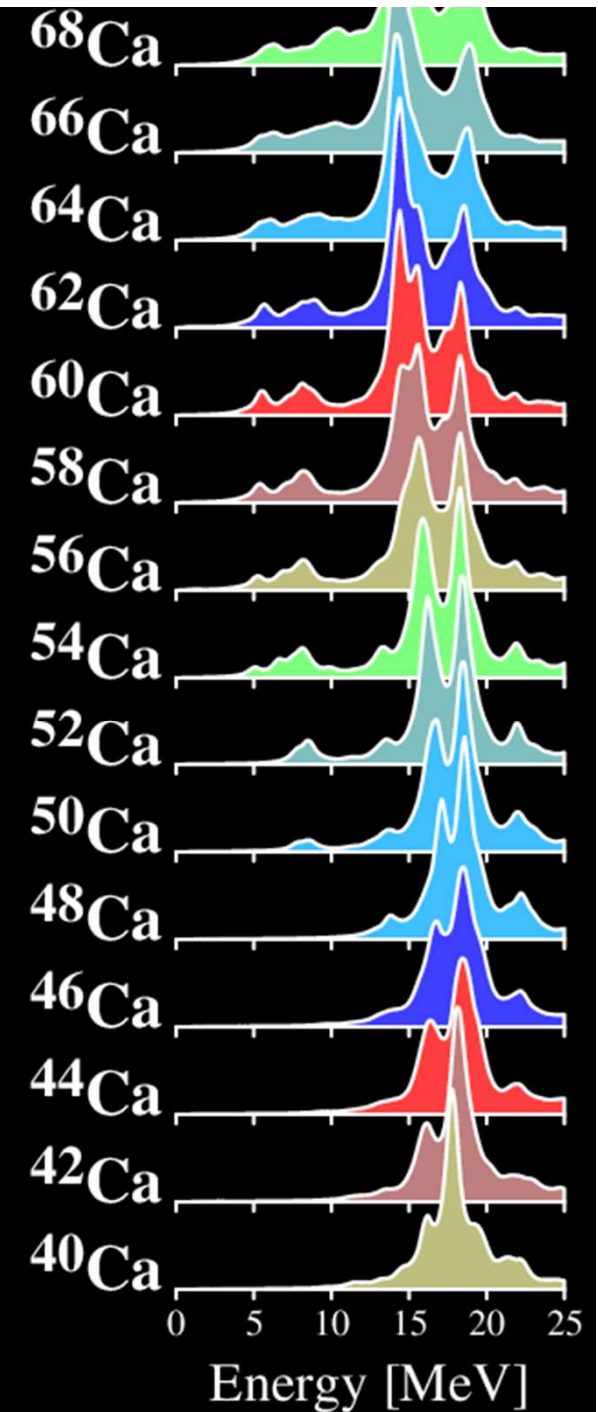
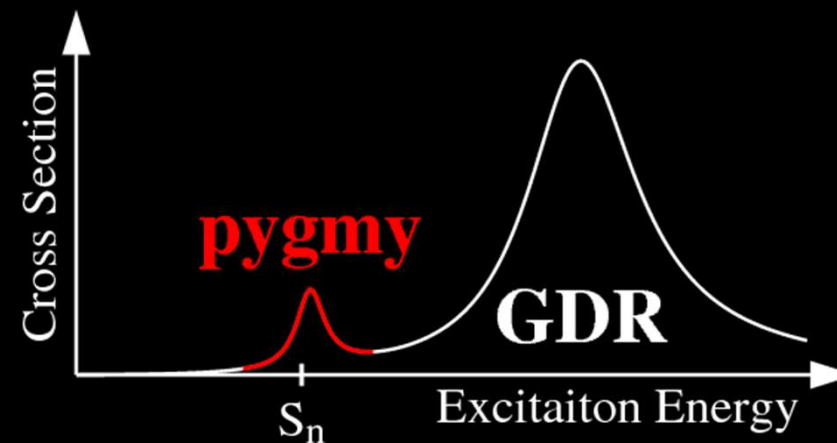
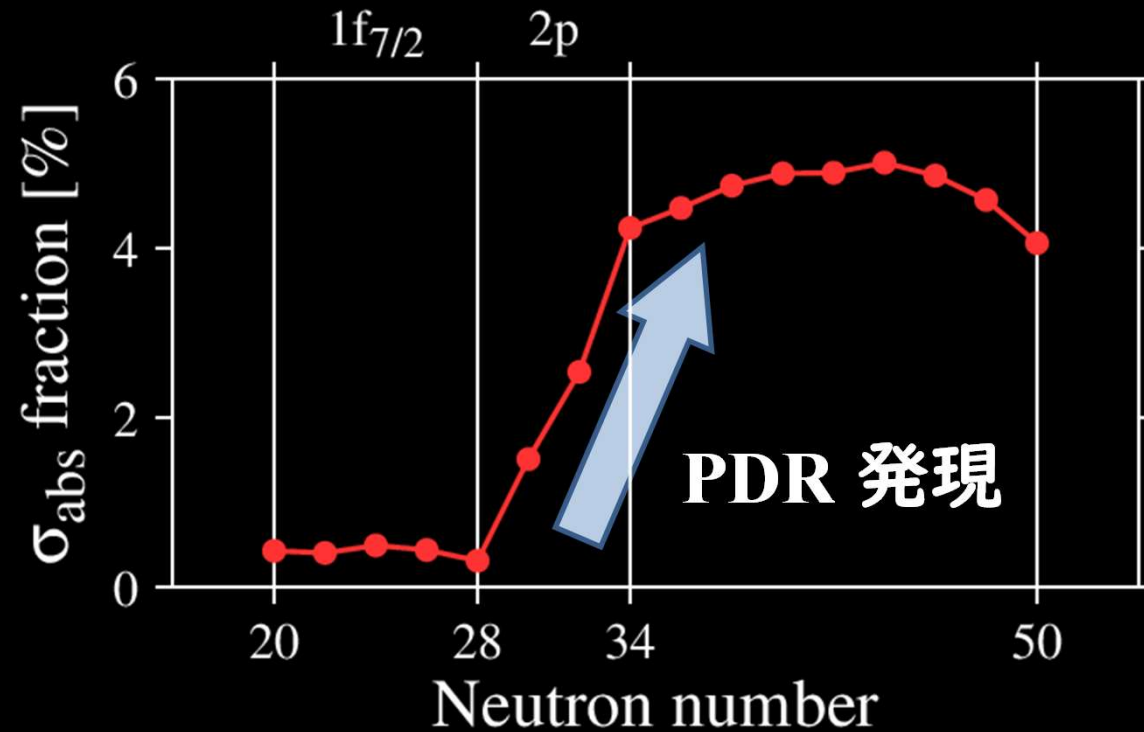
# Pygmy Dipole Resonance (PDR) [ Low-Energy Dipole (LED) mode ]



Adrich+, PRL 95, 132501.

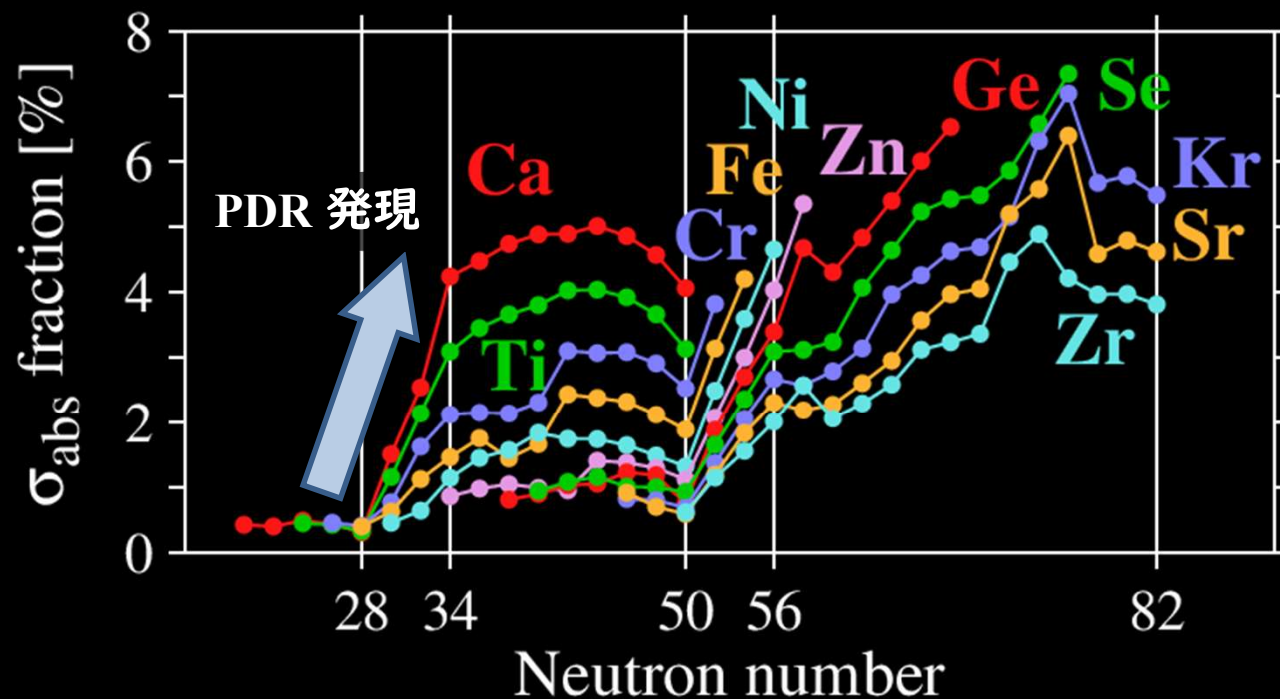
- ✓ 安定核では断面積の 1% 程度だが、中性子過剰核では 数%になる。
- ✓ 不安定核に特有な励起状態と考えられている。
- ✓ PDR(LED)の観測量から核物質の状態方程式に制限を課す研究が行われている。

# PDR (LED) in Ca isotope

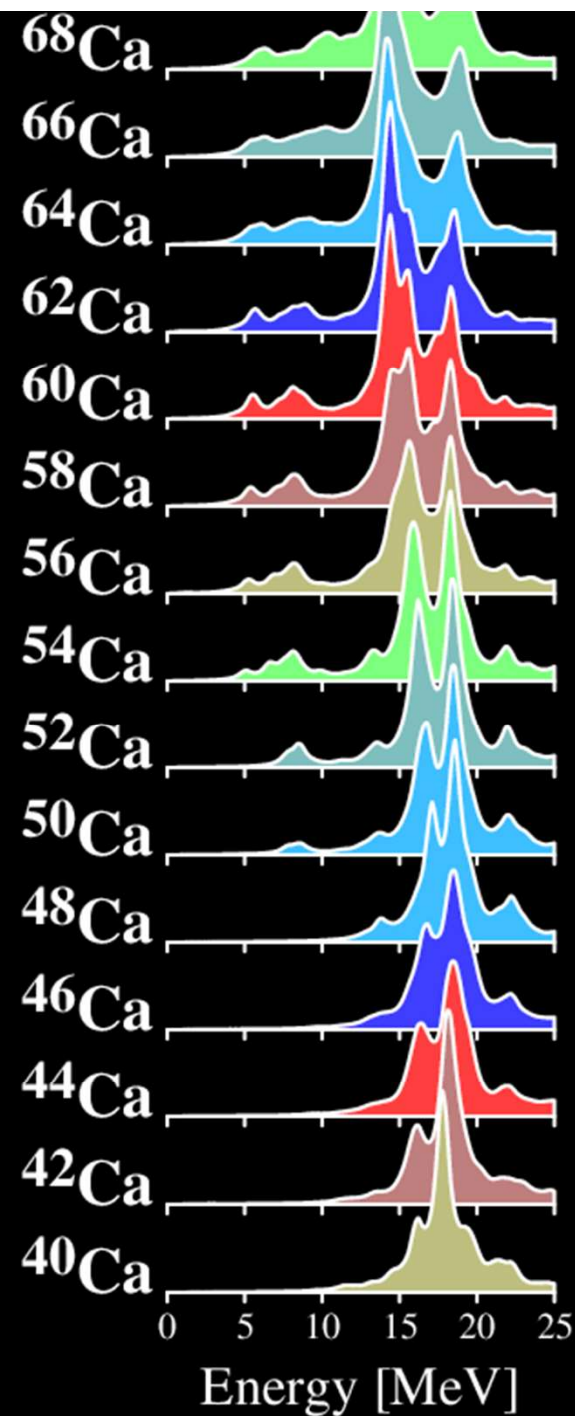


# PDR (LED)

Inakura+, PRC84, 021302



全ての isotope で  
PDR (LED) が現れる。

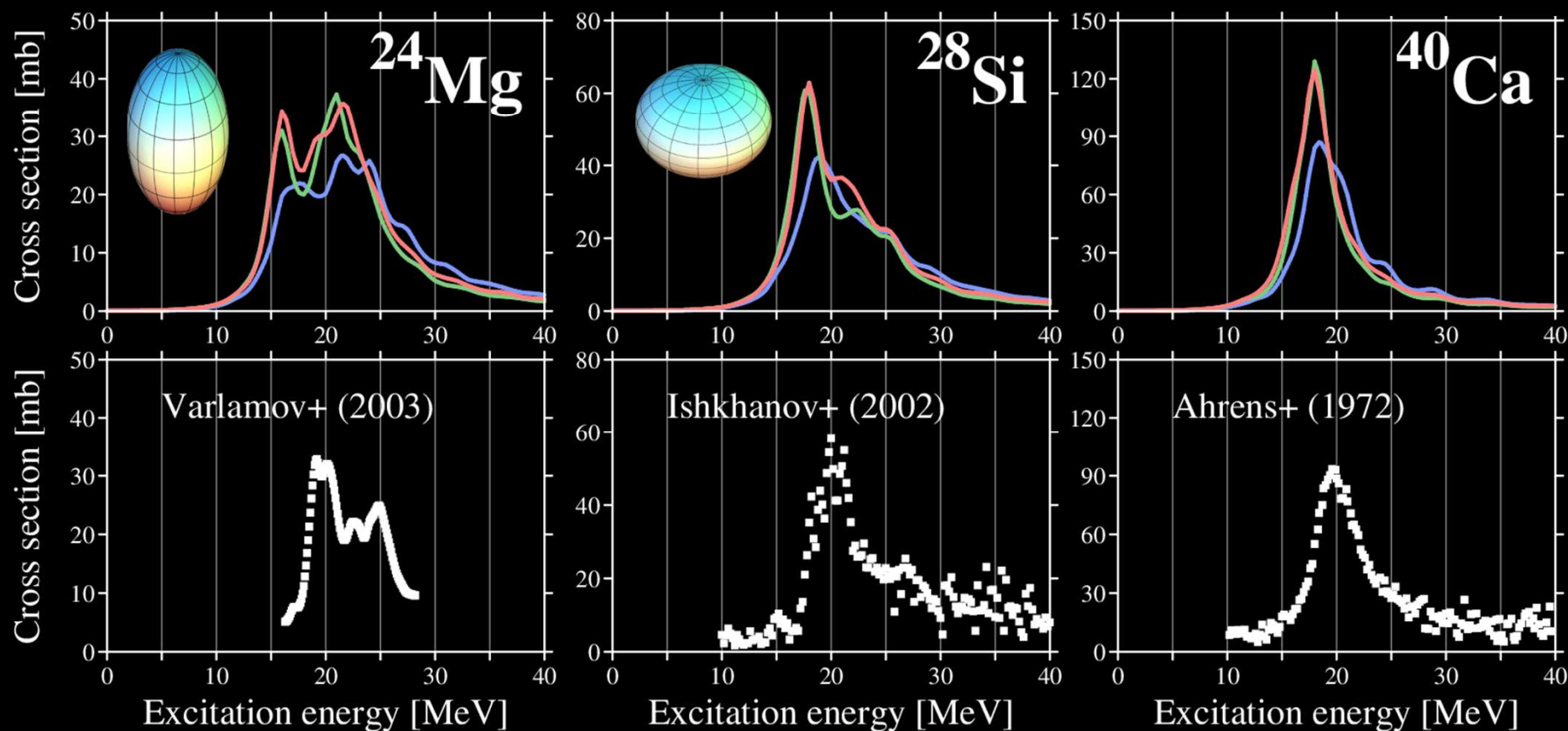




# 問題点

1. 軽い核で GDR のエネルギーが低い。
2. 相互作用依存性が無視できない。

SkM\*  
SLy4  
UNEDF1  
expt.



## 問題点

1. 軽い核で GDR のエネルギーが低い。
2. 相互作用依存性が無視できない。
3. 殻構造に敏感な PDR(LED) の再現性が良くない。
4. GDRの幅が出ない。

## 改善するには…

1. GDRの再現に特化した相互作用の開発？
2. Skyrme 以外の相互作用で計算？
3. RPAを拡張して2ndRPA(extended RPA)の開発？



## Summary

平均場近似を用いて光吸収断面積の系統的記述を行った。

- 巨大共鳴の性質は安定核・不安定核で大きくは変わらない。
- どの isotope でもPDR(LED)が現れる。

ただ、軽い核ではGDRのエネルギーが低く出る問題がある。