

光核反応

2023年度学変A申請「高工ネ原子核宇宙」勉強会
東大本郷 & online

2022年9月27日

稲倉 恒法 (東工大)

そのためにこれを観測@ $\vec{x} = \vec{x}_{earth}$

宇宙線の伝播方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_i(E, \vec{x})}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla N_i(E, \vec{x}) - \nabla \cdot [D(\vec{r}) \nabla N_i(E, \vec{x})] \\ & = Q_i(E, \vec{x}, t) - \left(\frac{v\rho\sigma_i}{m_p} + \frac{1}{\gamma\tau_i} \right) N_i(E, \vec{x}) + \frac{v\rho}{m_p} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} N_k(E', \vec{x}) dE' \end{aligned}$$

これら（青字部分）を知りたい

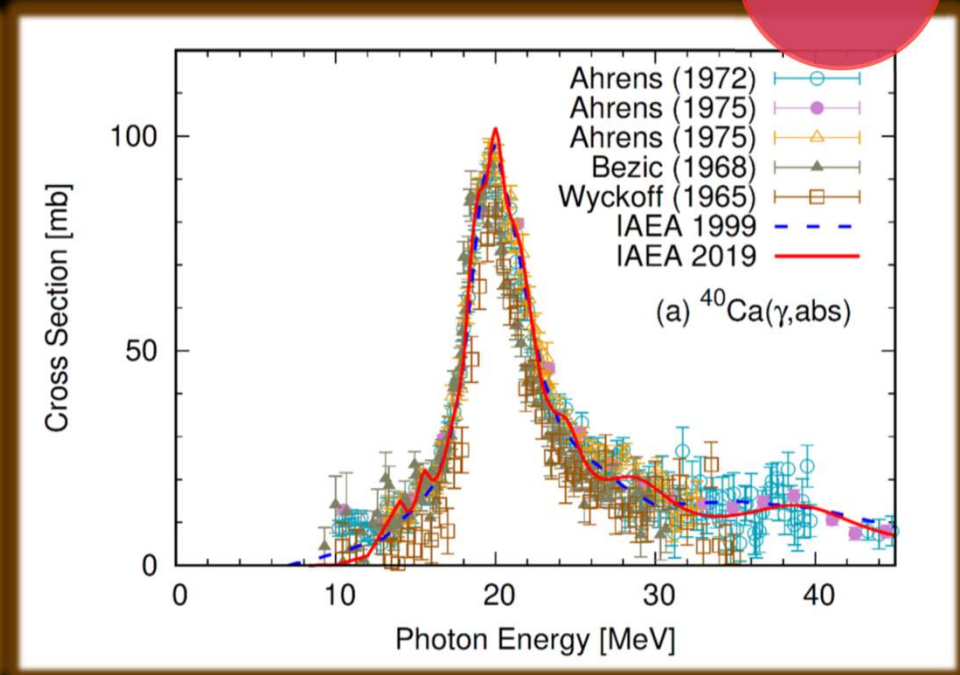
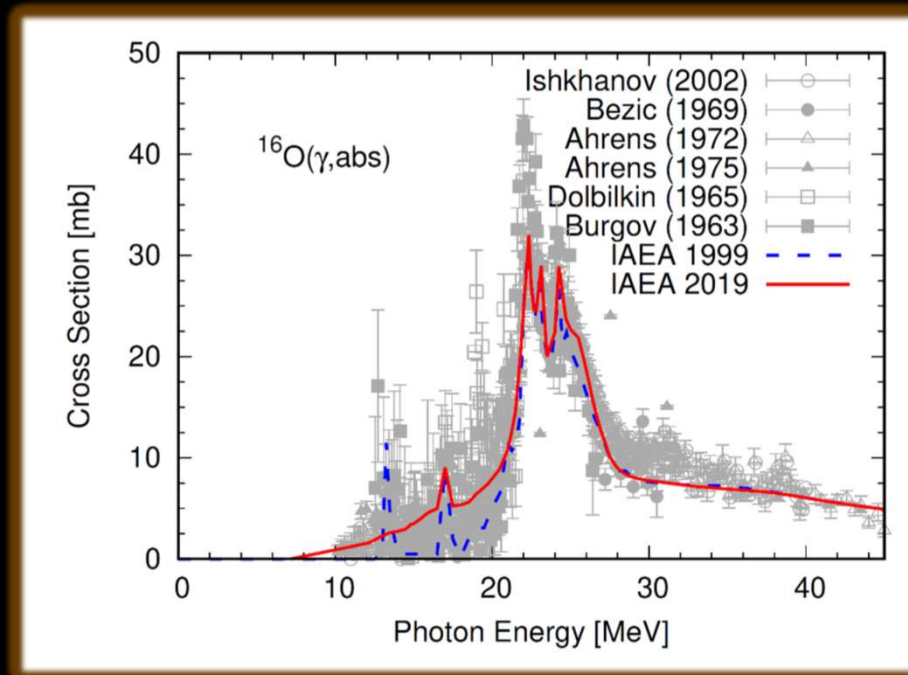
これは原子核物理
実験室で測定可能

光核反応断面積 (γ , abs)

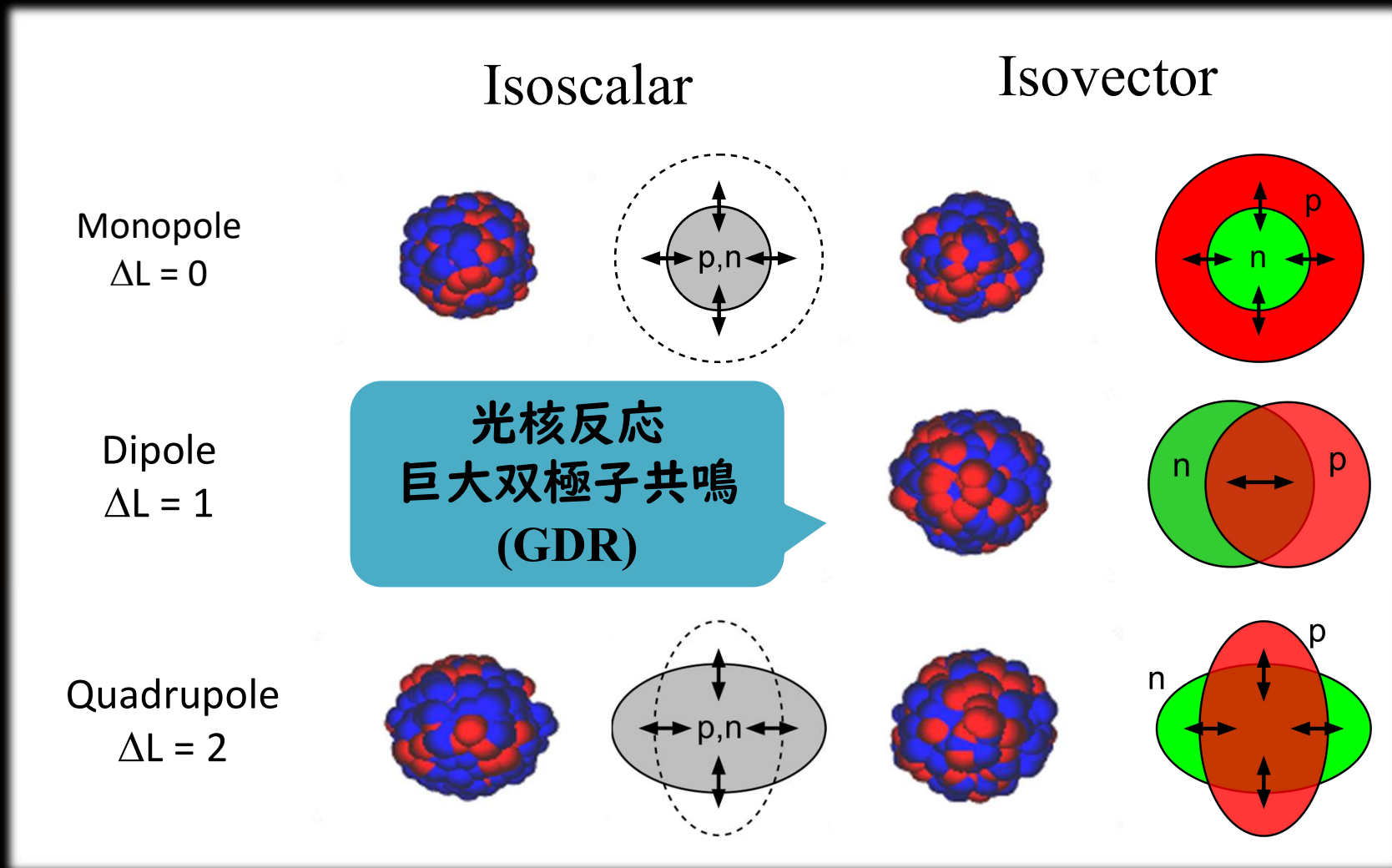
- 一部の安定核でのみ観測されている。
- 15-20MeV 辺りに、巨大双極子共鳴 (GDR) が現れる。

Giant Dipole Resonance (GDR)

- 最もシンプルな集団振動モード。陽子と中性子が逆位相で振動。
- 多くの他の物理量との相関あり。



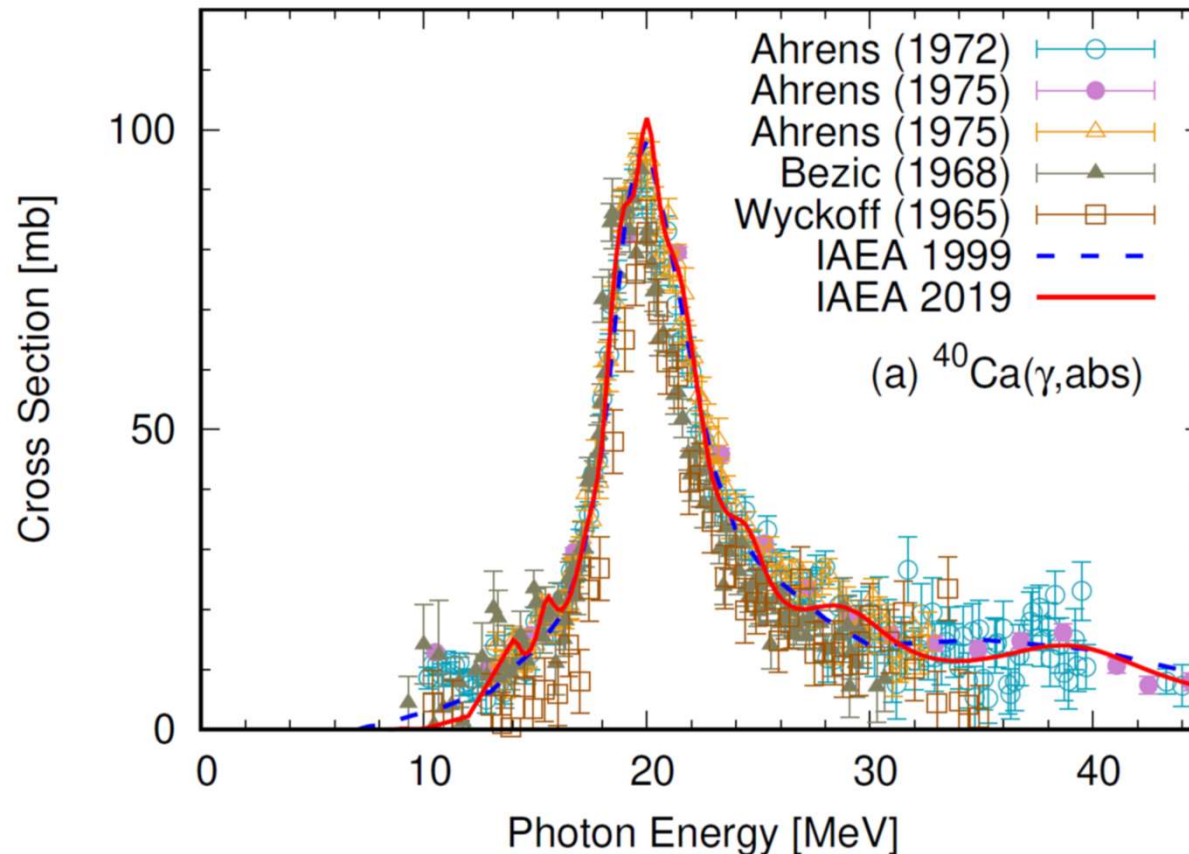
Giant Resonance (巨大共鳴)



様々なタイプの集団運動モードがあり、原子核の色々な特徴を反映した性質を持っている。

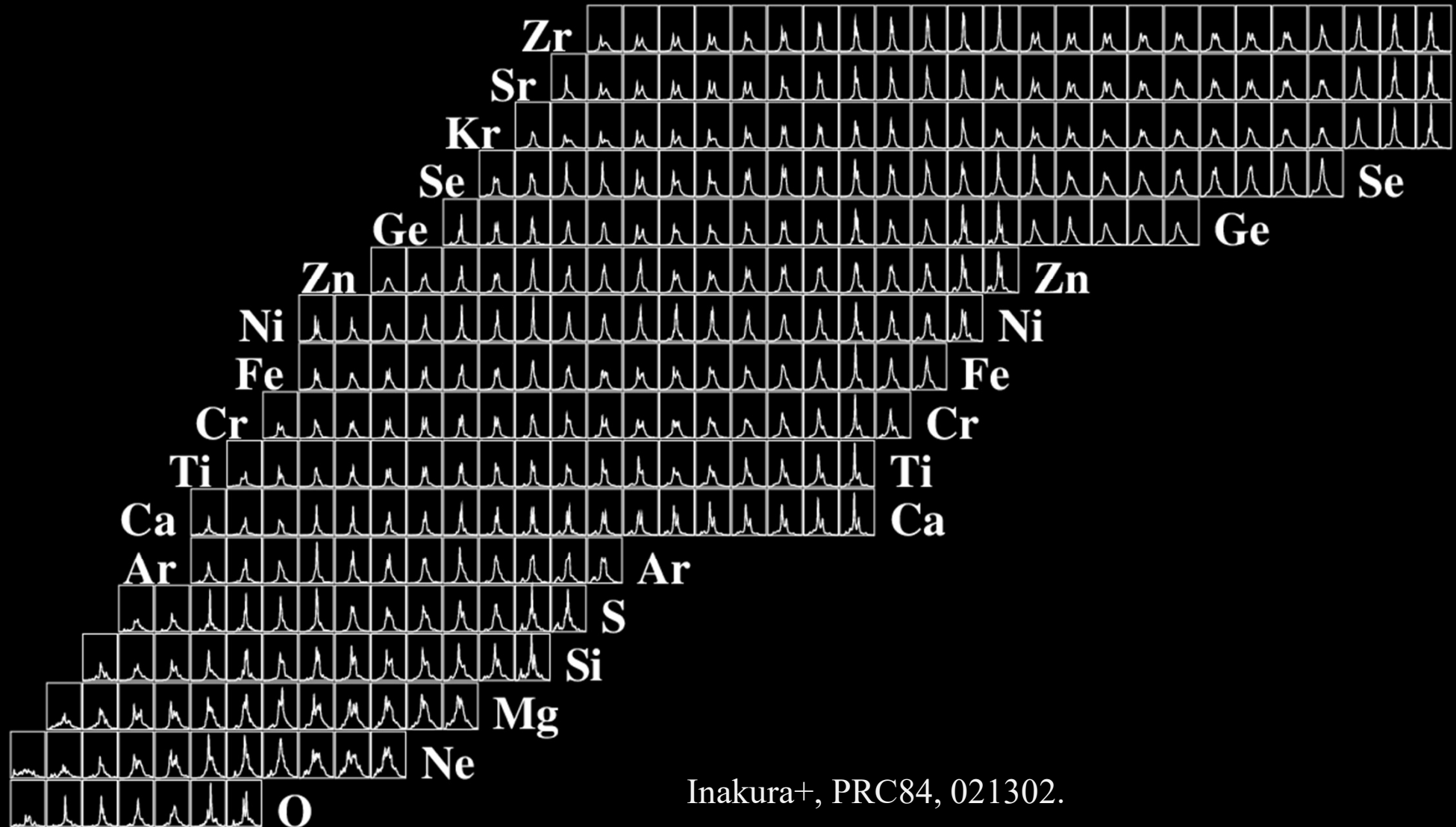
Giant Dipole Resonance (GDR): 実験

- 実験データは一部の安定核のみ。
- 有っても 実験データが古く、データがばらついている。
⇒ B02 が PANDORA project で計測



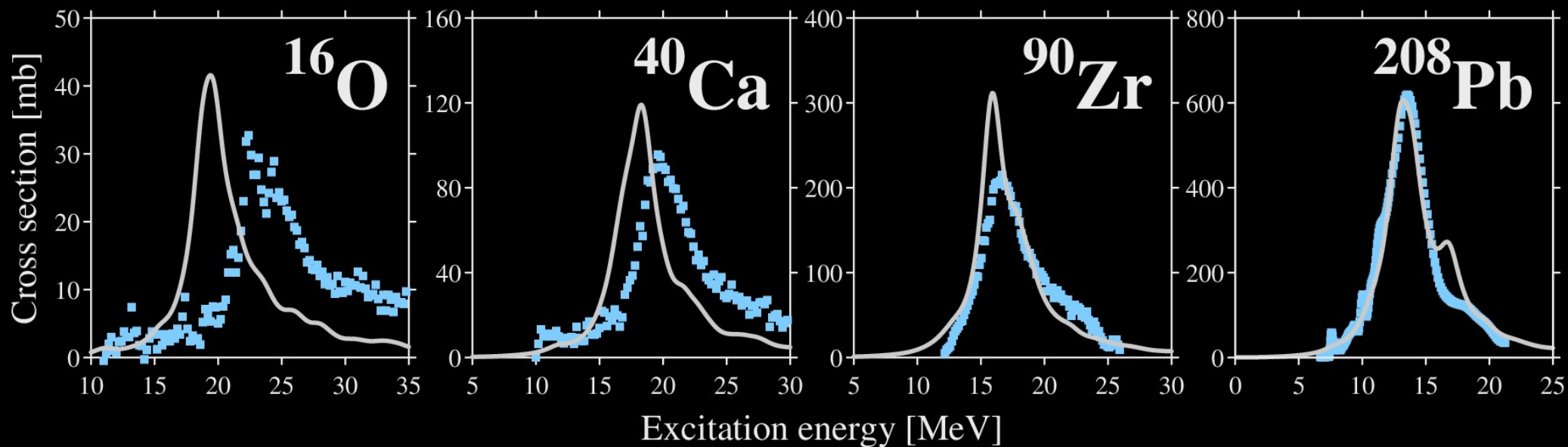
Giant Dipole Resonance (GDR): 理論計算

- 密度汎関数理論(DFT)に基づく乱雑位相近似計算(RPA)が主流
- 系統的計算が既に為されているが、問題あり。



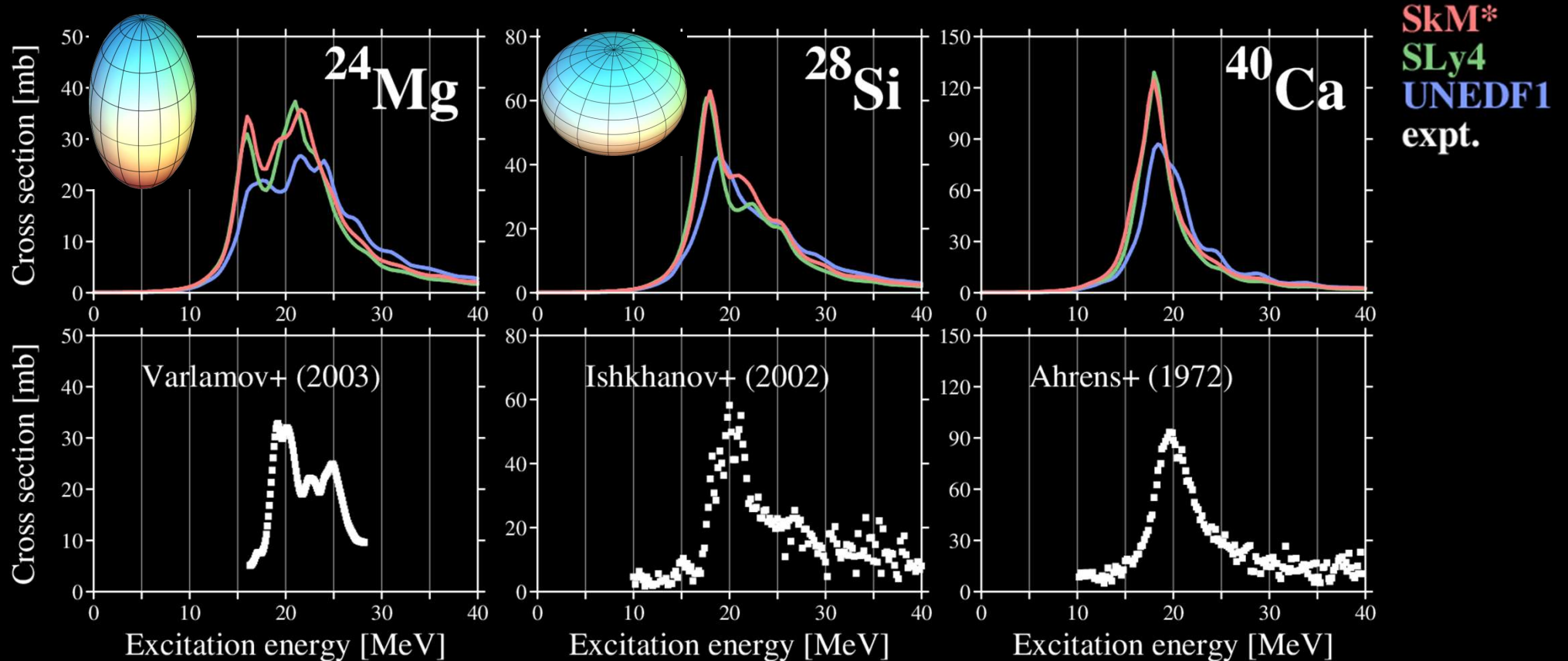
GDR: 理論計算の問題点

- RPA計算では、軽い核で実験データの再現性が悪くなる。
- RPA計算をどんなに真面目に計算しても改善しない。



GDR: 理論計算の問題点

- RPA計算では、軽い核で実験データの再現性が悪くなる。
- RPA計算をどんなに真面目に計算しても改善しない。
⇒ どうやら、有効相互作用に問題あり。



Skyrme 有用相互作用

Skyrme, Nucl. Phys. 9 (1959) 615.
Vautherin & Brink, Phys. Rev. C 5, 626 (1972)

$$\begin{aligned} V_{\text{Skyrme}} = & t_0(1+x_0P_\sigma)\delta(r_i-r_j) && \dots \text{Attractive} \\ & + \frac{t_1}{2}(1+x_1P_\sigma) [\delta(r_i-r_j)k^2 + k'^2\delta(r_i-r_j)] && \dots \text{Non-local} \\ & + t_2(1+x_2P_\sigma)k' \cdot \delta(r_i-r_j)k && \dots \text{Non-local} \\ & + \frac{t_3}{2}(1+x_3P_\sigma)\rho^\alpha \left(\frac{r_i+r_j}{2}\right) \delta(r_i-r_j) && \dots \text{Density-dep repulsive} \\ & + iW_0(\sigma_1+\sigma_2) \cdot [k' \times \delta(r_i-r_j) \cdot k] && \dots \text{Spin-orbit} \end{aligned}$$

$$P_\sigma = \frac{1 + \sigma_i \cdot \sigma_j}{2}, \quad k = \frac{1}{2i} (\vec{\nabla}_i - \vec{\nabla}_j), \quad k' = \frac{-1}{2i} (\vec{\nabla}_i - \vec{\nabla}_j)$$

パラメーター $t_\#, x_\#, \alpha, W_0$ は球形核の基底状態の性質 (質量、半径など) を再現する様に決められている。

代表的なパラメーターセット: SkM*, SLy4, UNEDF1, ...

これらのパラメーターは、最尤値と不確かさを持っている。

Monte Carlo calculation for GDR

パラメーターが持っている最尤値と不確かさ、不確かさの相関を用いてモンテカルロ計算を行い、GDR ピークエネルギーの不確かさを評価する。

SLy5-min parameter

SLy5-min				
p	p_0		$\sqrt{\mathcal{E}_{ii}}$	units
t_0	-2475.408	±	149.455	MeV fm ³
t_1	482.842	±	58.537	MeV fm ⁵
t_2	-559.374	±	144.534	MeV fm ⁵
t_3	13697.07	±	1672.93	MeV fm ^{3+3α}
x_0	0.741185	±	0.189191	
x_1	-0.146374	±	0.468173	
x_2	-1		fixed	
x_3	1.162688	±	0.340537	
W_0	126		fixed	MeV fm ⁵
W'_0	126		fixed	MeV fm ⁵
α	1/6		fixed	

Correlation Matrix

$$C_{ij} = E_{ij}/\sqrt{E_{ii} E_{jj}}$$

	t_0	t_1	t_2	t_3	x_0	x_1	x_3
t_0	1.0000	0.9837	0.9854	-0.9997	-0.6766	0.8110	-0.6158
t_1	0.9837	1.0000	0.9575	-0.9870	-0.7066	0.8489	-0.6553
t_2	0.9854	0.9575	1.0000	-0.9863	-0.6601	0.7843	-0.5964
t_3	-0.9997	-0.9870	-0.9863	1.0000	0.6798	-0.8154	0.6197
x_0	-0.6766	-0.7066	-0.6601	0.6798	1.0000	-0.9327	0.9928
x_1	0.8110	0.8489	0.7843	-0.8154	-0.9327	1.0000	-0.9311
x_3	-0.6158	-0.6553	-0.5964	0.6197	0.9928	-0.9311	1.0000

相関行列

t_0 : 引力の強さ

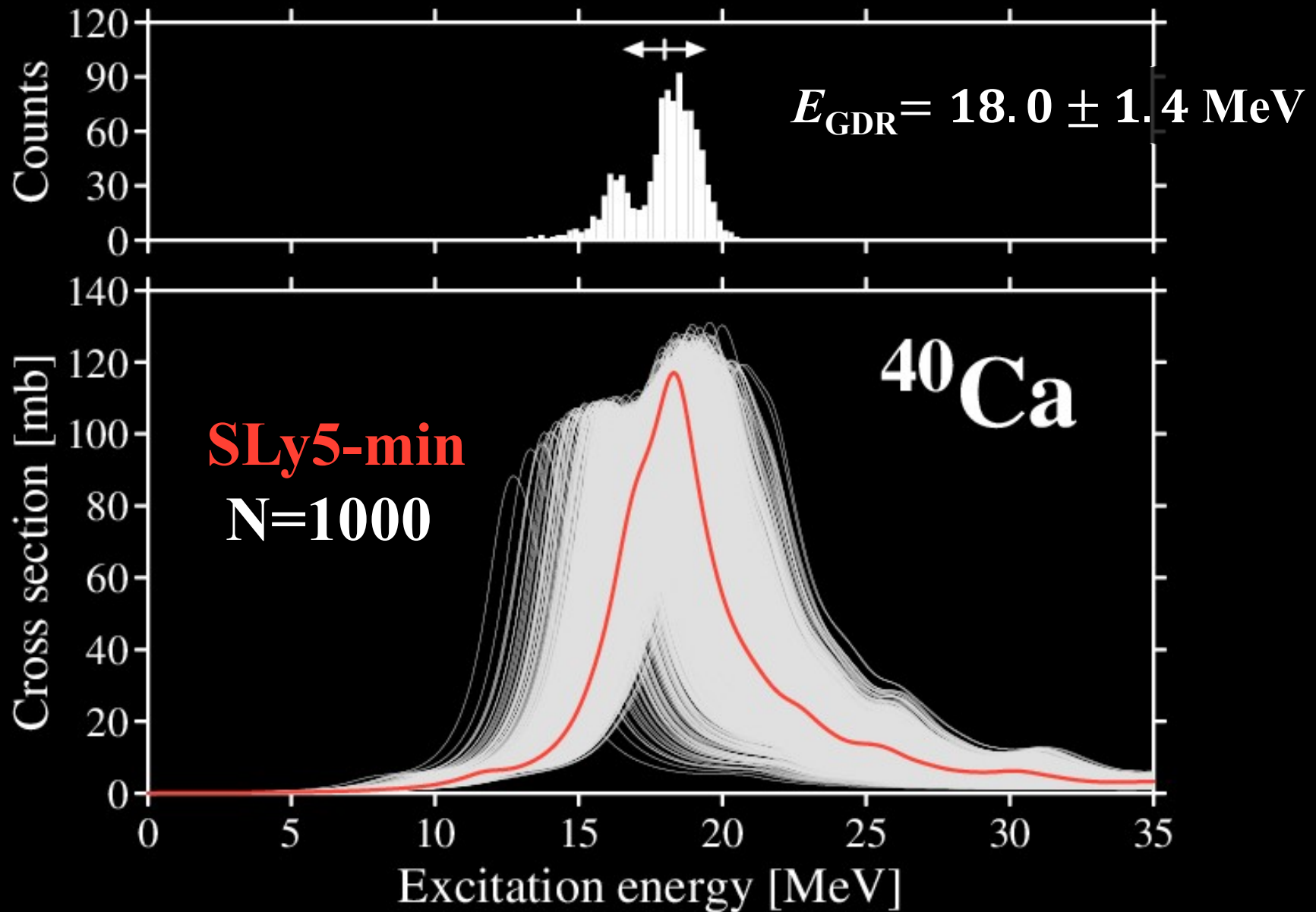
t_3 : 斥力の強さ

相関値: -0.9997

⇒ 引力が強くなるのなら、斥力も同様に強くなる。

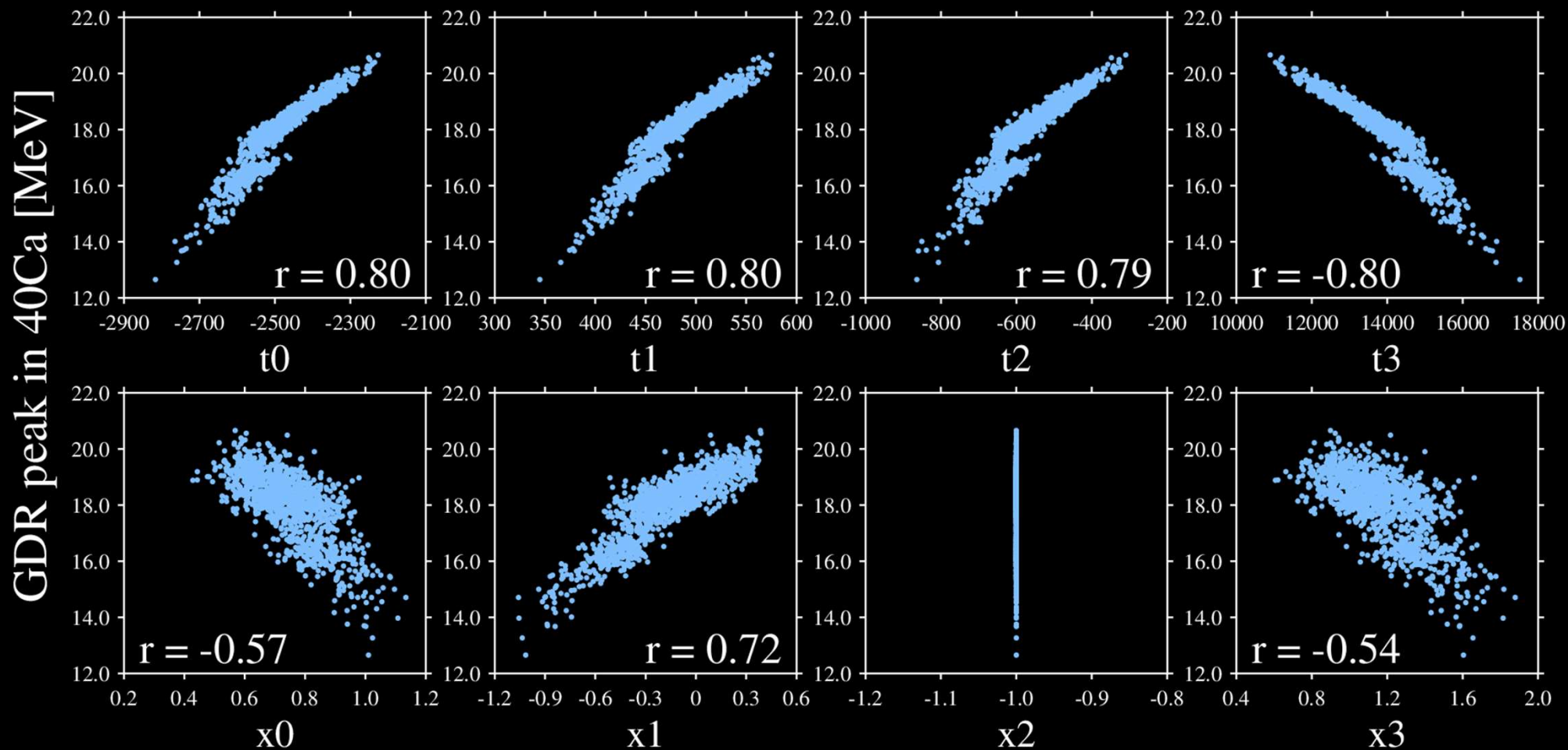
Roca-Maza, Paar, and Colo,
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 034033 (2015)

Randomized GDR in ^{40}Ca



GDR ピークエネルギーと パラメーターとの相関

SLy5-min				
p	p_0		$\sqrt{\mathcal{E}_{ii}}$	units
t_0	-2475.408	\pm	149.455	MeV fm ³
t_1	482.842	\pm	58.537	MeV fm ⁵
t_2	-559.374	\pm	144.534	MeV fm ⁵
t_3	13697.07	\pm	1672.93	MeV fm ^{3+3α}
x_0	0.741185	\pm	0.189191	
x_1	-0.146374	\pm	0.468173	
x_2	-1		fixed	
x_3	1.162688	\pm	0.340537	
W_0	126		fixed	MeV fm ⁵
W'_0	126		fixed	MeV fm ⁵
α	1/6		fixed	



テスト計算：GDRピークエネルギーを調整する。

$$x_0 \rightarrow x_0 - \sigma_{x_0} \cdot f/A$$

$$x_1 \rightarrow x_1 + \sigma_{x_1} \cdot f/A$$

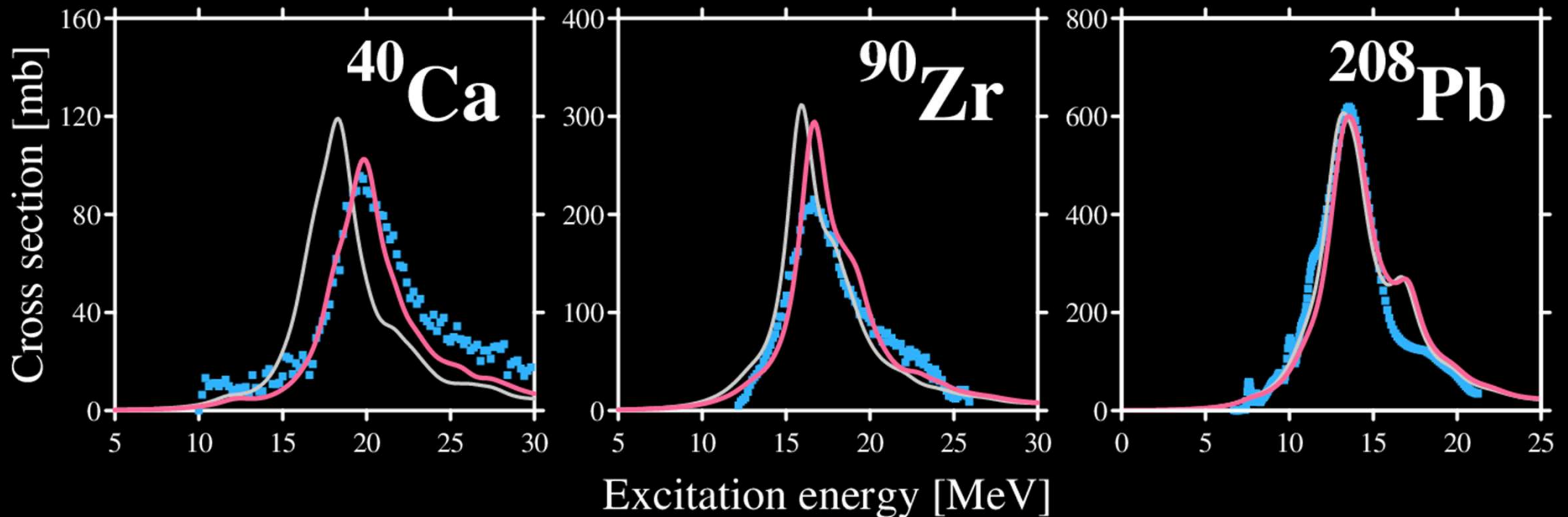
$$x_3 \rightarrow x_3 - \sigma_{x_3} \cdot f/A$$

σ_x : パラメーターの不確かさ (標準偏差)

f : フリーパラメータ

パラメーター間の相関も考慮する。

SLy5-min				
p	p_0		$\sqrt{\mathcal{E}_{ii}}$	units
t_0	-2475.408	\pm	149.455	MeV fm ³
t_1	482.842	\pm	58.537	MeV fm ⁵
t_2	-559.374	\pm	144.534	MeV fm ⁵
t_3	13697.07	\pm	1672.93	MeV fm ^{3+3α}
x_0	0.741185	\pm	0.189191	
x_1	-0.146374	\pm	0.468173	
x_2	-1		fixed	
x_3	1.162688	\pm	0.340537	
W_0	126		fixed	MeV fm ⁵
W'_0	126		fixed	MeV fm ⁵
α	1/6		fixed	



現況のまとめ

モンテカルロ計算を用いて、有効相互作用パラメーターの不確かさに起因するGDRピークエネルギーの不確かさを推定した。

- パラメーターの値とGDRピークエネルギーの間に強い相関がある。
- これらの相関を活用することで、実験値のGDRピークエネルギーを再現できそうである。

やること

- GDRピークエネルギーの実験値を再現するパラメーターを提案する。
- 軽い核($A < 60$)で計算して、計算結果を提供する。