

光核反応からのクラスター崩壊の理論研究と 最高エネルギー宇宙線への応用

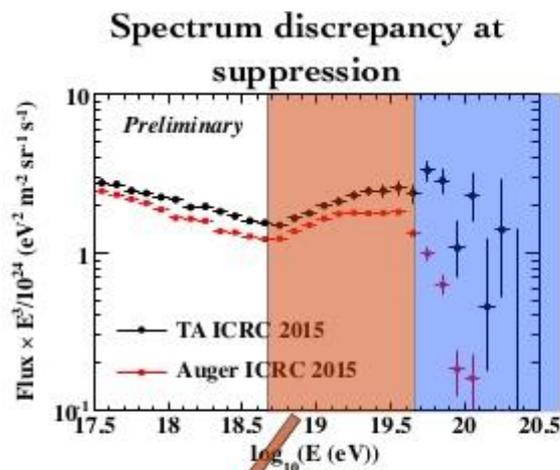
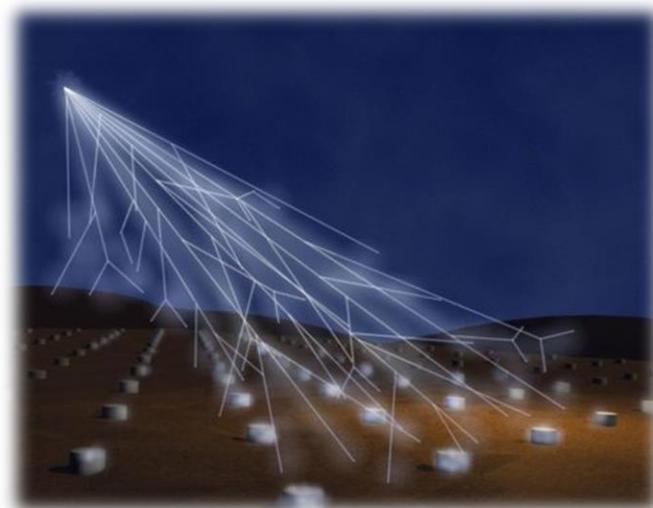
木村真明 (北大理, 北大核データセンター)

- 背景と目的: 超高エネルギー宇宙線と光核反応
- 課題説明: 光吸収断面積とクラスター崩壊
- 進捗と今後の展望
- まとめ

背景と目的: 超高エネルギー宇宙線と光核反応

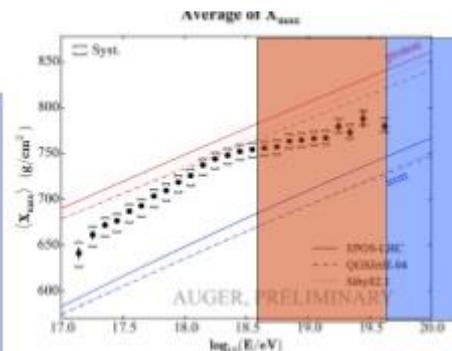
超高エネルギー宇宙線

- 10^{20} eVにも達するエネルギー
- 発生源となる天体現象は不明
- 観測の進歩によって、組成・エネルギー分布が明らかに



No anisotropy seen

ApJ, 794 172 (2014)

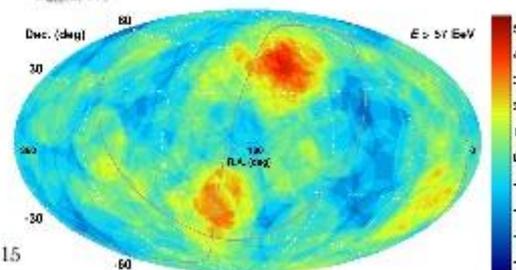


Intermediate composition or models, no information above $10^{19.7}$ eV

A. Porcelli, ICRC 2015,
A. Yushkov, ICRC 2015,
PRD 90 122005 (2014)

**Hotspot/
Warmspot**

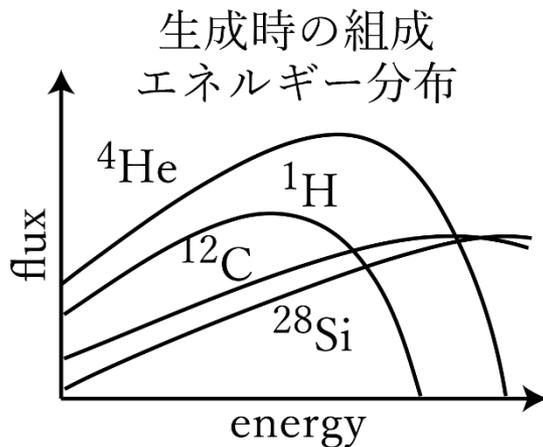
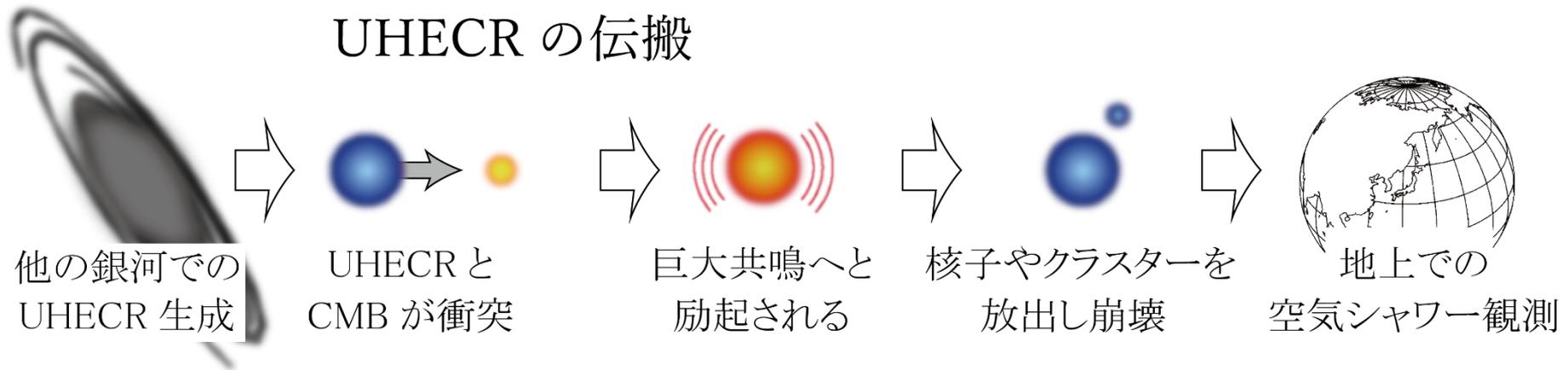
K. Kawata et al, ICRC 2015



背景と目的: 超高エネルギー宇宙線と光核反応

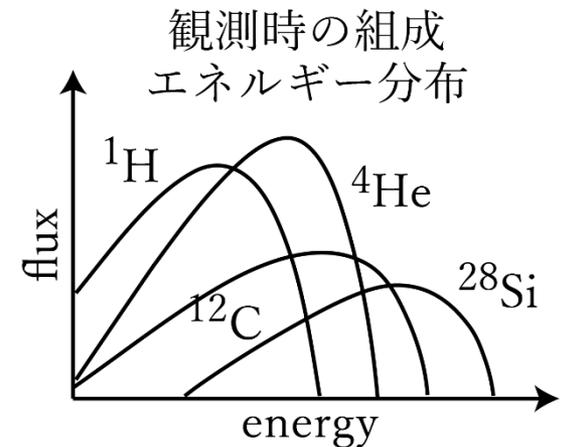
発生源で加速された原子核は、宇宙背景放射に衝突しながら伝搬
⇒ 輸送シミュレーションを行い、発生源での組成を知りたい

UHECR の伝搬



CMB との衝突を繰り返し
組成分布が変化

輸送シミュレーションにより
生成時の組成分布を逆算



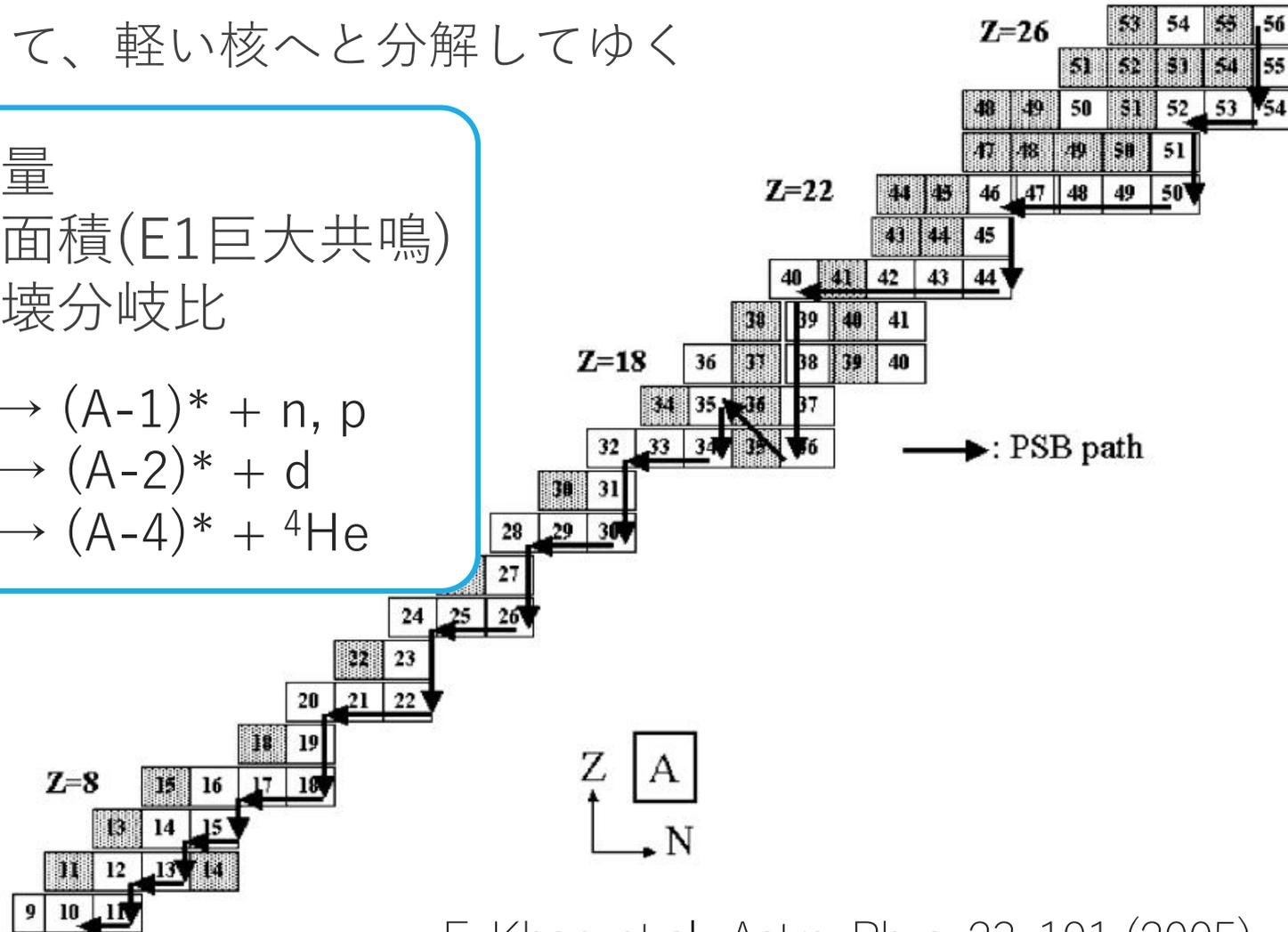
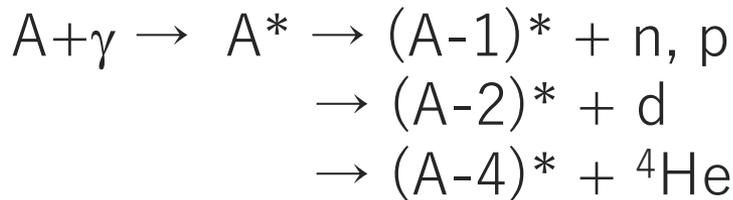
背景と目的: 超高エネルギー宇宙線と光核反応

原子核の静止系では、10-50 MeV の光核反応に相当 (巨大共鳴)
 安定線に沿って、軽い核へと分解してゆく

求めるべき量

○光吸収断面積(E1巨大共鳴)

○共鳴の崩壊分岐比

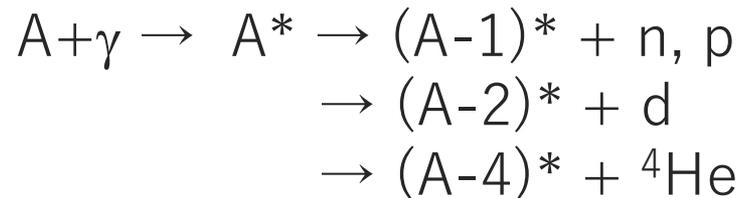


課題①: 軽い核の光核反応断面積

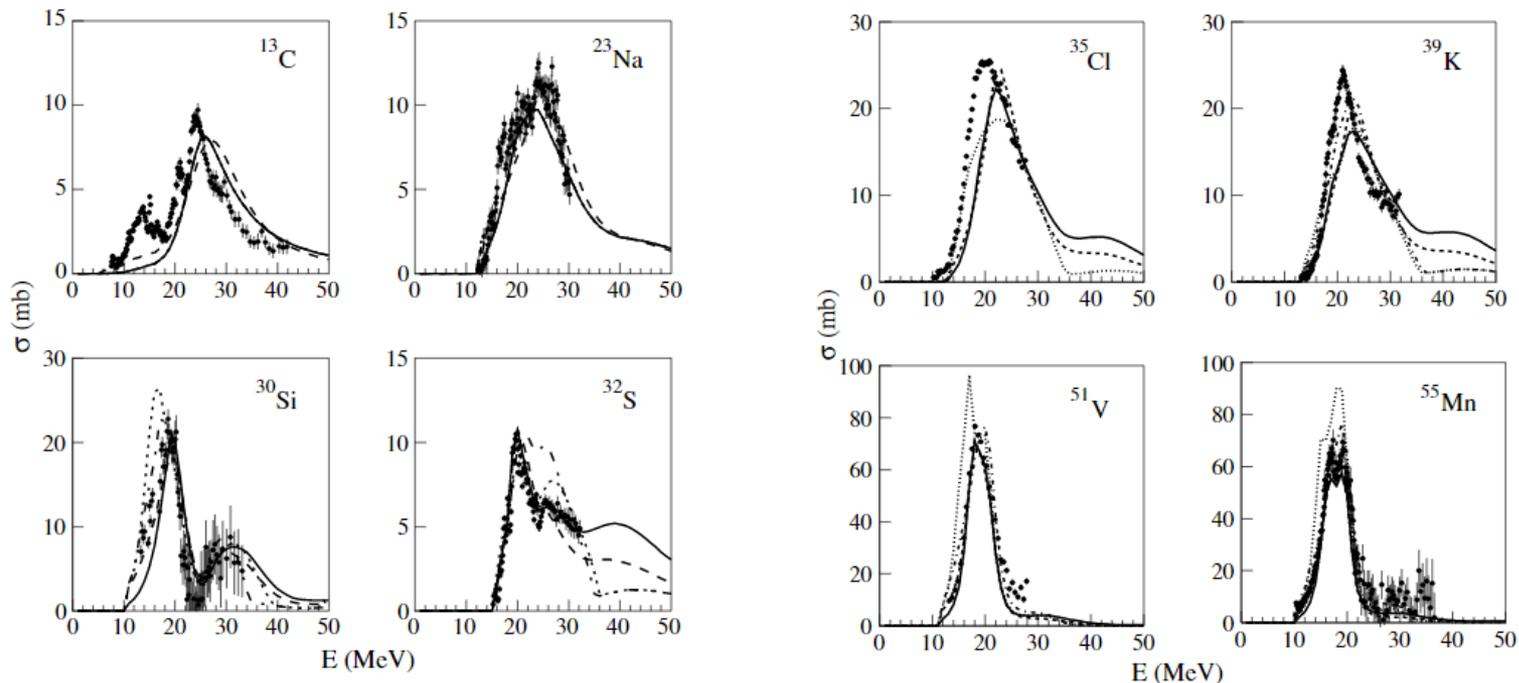
求めるべき量

○光吸収断面積(E1巨大共鳴)

○共鳴の崩壊分岐比



- 軽い核の測定データはそれほど多くない (全断面積の絶対値が不明)
- 現状の理論計算では、共鳴エネルギーが系統的にずれている

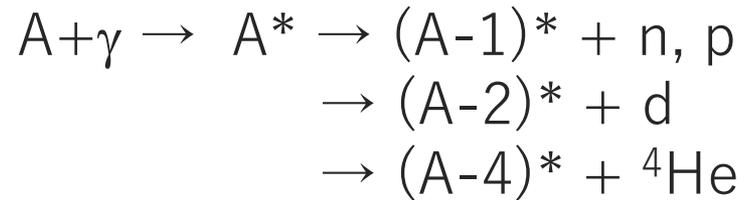


課題②: 巨大共鳴のクラスター崩壊

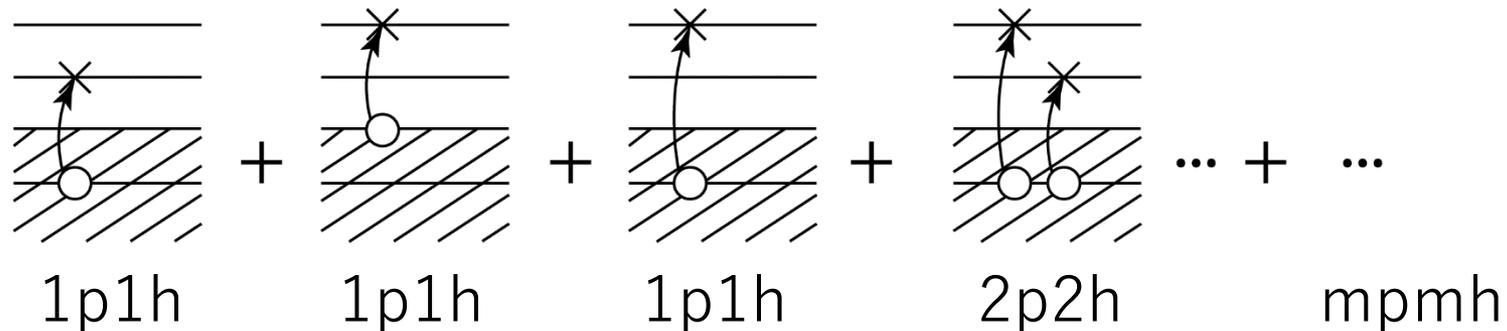
求めるべき量

○ 光吸収断面積 (E1 巨大共鳴)

○ 共鳴の崩壊分岐比



通常、巨大共鳴は 1p1h 状態の重ね合わせで記述される (RPA)



しかし、実際には多粒子多空孔状態との結合により、
クラスター放出 (d , ${}^3\text{He}$, α) が起こる

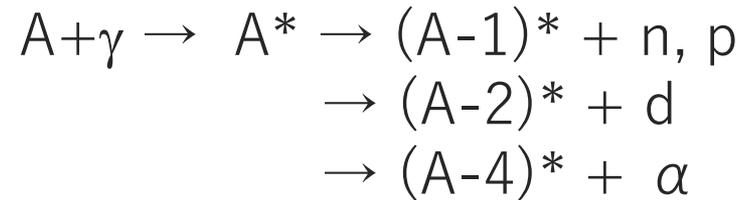
多粒子多空孔配位を考慮した研究が必要

課題②:巨大共鳴のクラスター崩壊

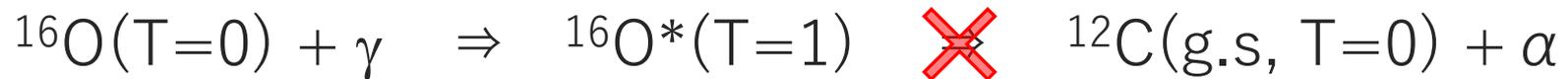
求めるべき量

○光吸収断面積(E1巨大共鳴)

○共鳴の崩壊分岐比



N=Z核では、E1励起のアイソスピン選択則を考慮する必要



N=Z核では、T=0のクラスター崩壊が抑制されるが、その程度は不明。また、アイソスピン混合の影響も有

これらの課題を解決するための、理論研究を提案

課題のまとめと研究計画概要

超高エネルギー宇宙線の起源を解明するために、
軽核の光核反応の研究が必要
核物理にとっても、学術的意義のある課題である

○軽核の光吸収断面積(E1巨大共鳴)

- 実時間発展法を用いた系統的計算の実行
- 密度汎関数の再fit (機械学習アルゴリズムの利用)

○共鳴の崩壊分岐比

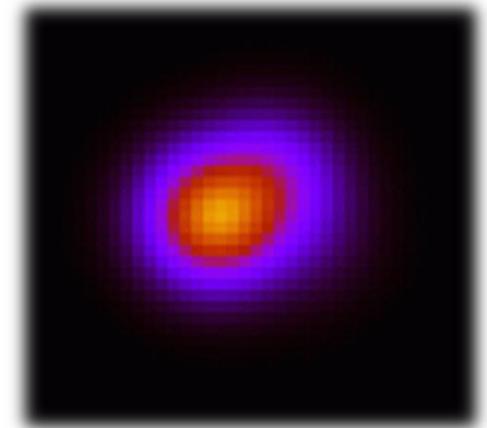
- 巨大共鳴からのクラスター崩壊の計算
- アイソスピン選択則と混合の検討

進捗: 実時間発展法による系統的計算

◎ 微視的Hamiltonian (密度汎関数)

$$H = \sum_{i=1}^A t(i) - t_{cm} + \sum_{i<j}^A v(ij)$$

${}^6\text{He}$ (6核子系)



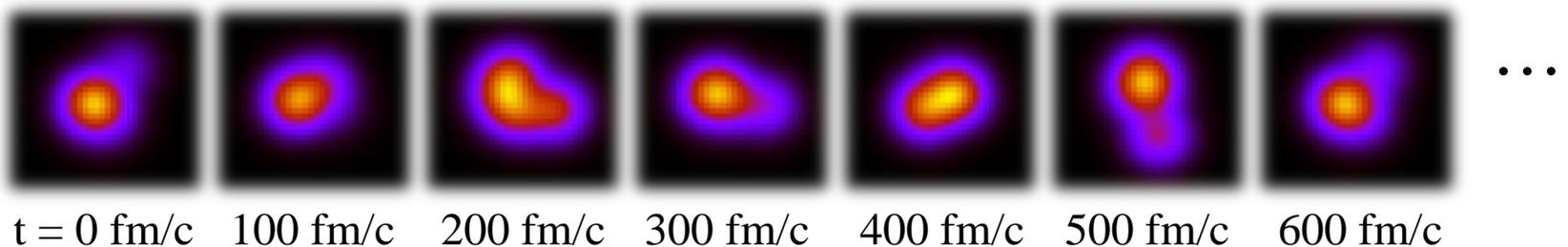
◎ 模型波動関数 (時間依存する波束)

$$\Phi(t) = \mathcal{A} \{ \phi(\mathbf{Z}_1(t)), \dots, \phi(\mathbf{Z}_A(t)) \}$$

$$\phi(\mathbf{Z}_i(t)) = \exp \{ -\nu(\mathbf{r} - \mathbf{Z}_i(t))^2 \} (\alpha_i(t) |\uparrow\rangle + \beta_i(t) |\downarrow\rangle)$$

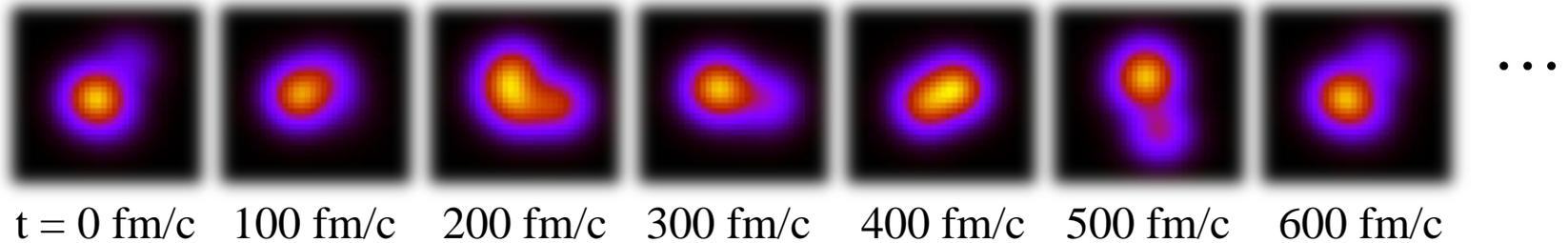
◎ 波束中心に対する運動方程式を解き, 系の状態のアンサンブルを得る

$$i\hbar \frac{d\mathbf{Z}_i(t)}{dt} = \sum_j C_{ij}^{-1} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{Z}_j^*(t)}$$



進捗: 実時間発展法による系統的計算

◎ アンサンブルはエルゴード性を持ち，量子統計に従う



充分長い時間時間発展を行えば，すべての可能な状態が現れる。
設定した温度の量子状態がより頻繁に出現する

J. Schnack and H. Feldmeier, NPA601, 181 (1996).

A. Ono and H. Horiuchi, PRC53, 845 (1996), PRC53, 2341 (1996).

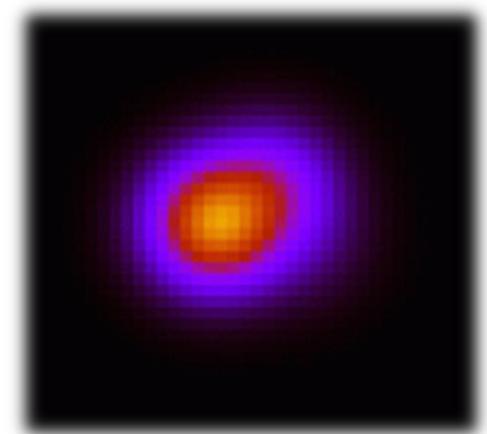
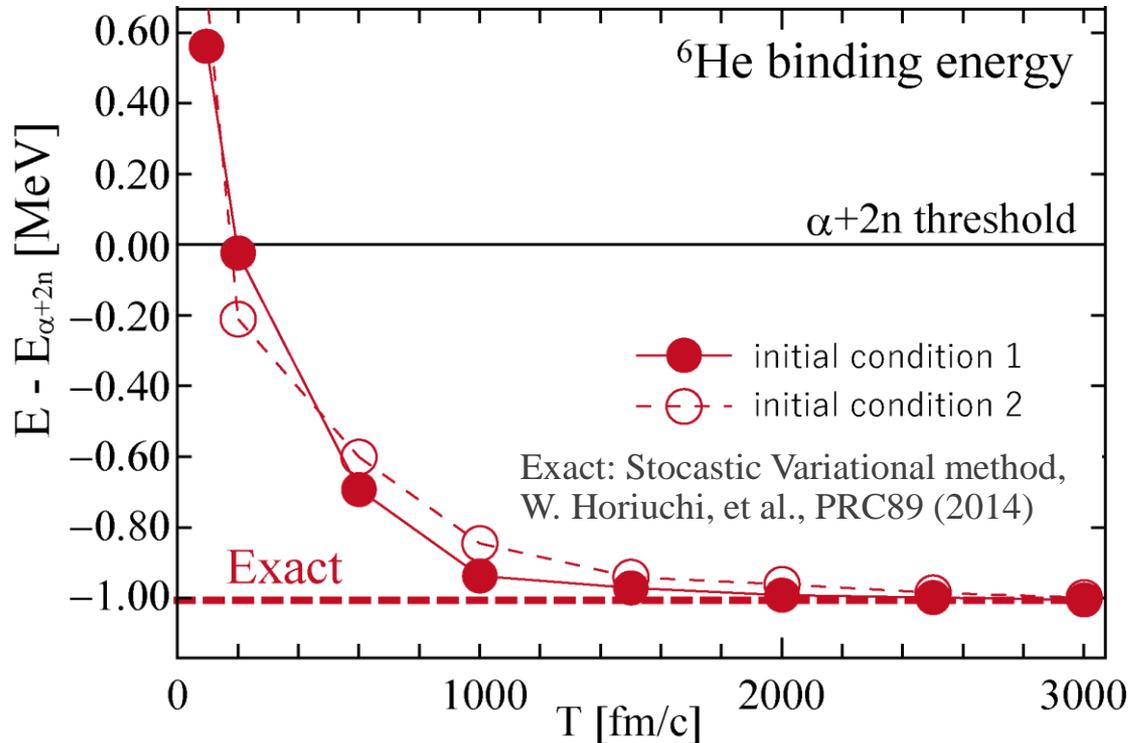


アンサンブルの波動関数を重ね合わせることで，
量子多体系を非経験的かつ正確に記述できるだろう

進捗: 実時間発展法による系統的計算

厳密計算との比較

M. Kimura, submitted to PRC



${}^6\text{He}$ (6 nucleons)

	S_{2n}	proton radius	neutron radius
実時間発展法	-1.01 MeV	1.83 fm	2.64 fm
Exact	-1.01 MeV	1.83 fm	2.65 fm

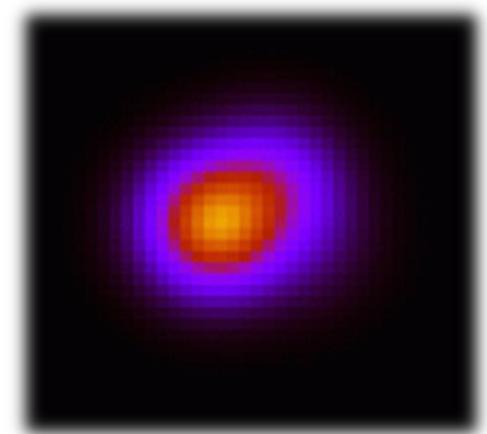
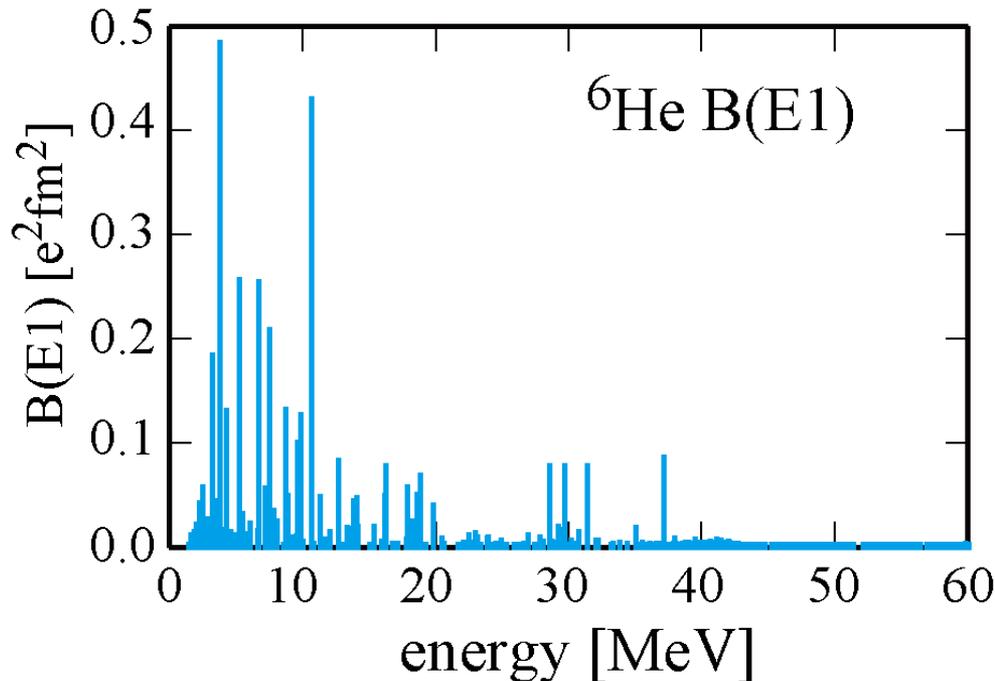
進捗: 実時間発展法による系統的計算

E1強度関数

M. Kimura, submitted to PRC

離散化された非束縛状態も同じアンサンブルから求められる。
基底状態から、非束縛状態へのE1遷移強度を直接計算する

$$B(E1; 0_1^+ \rightarrow 1_n^-) = \sum_{\mu} |\langle \Psi_n^{1-\mu} | \mathcal{M}_{\mu}(E1) | \Psi_1^{0+0} \rangle|^2$$

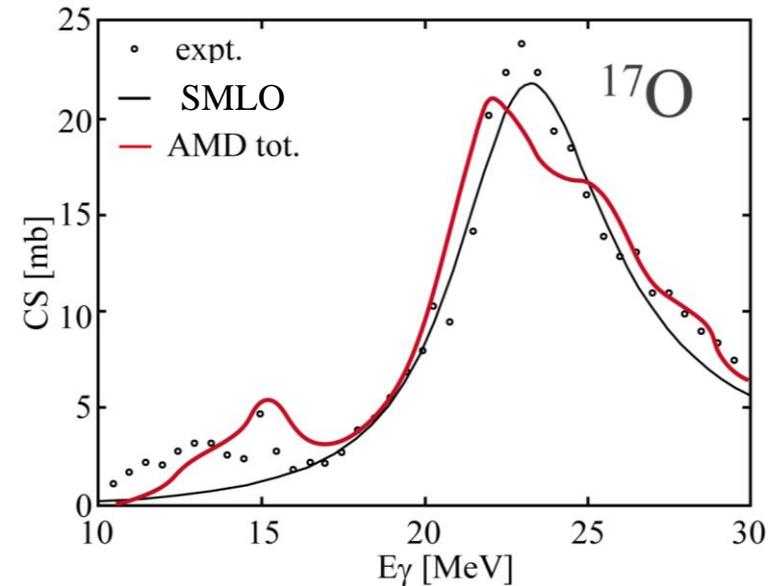
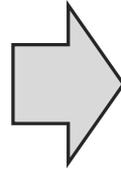
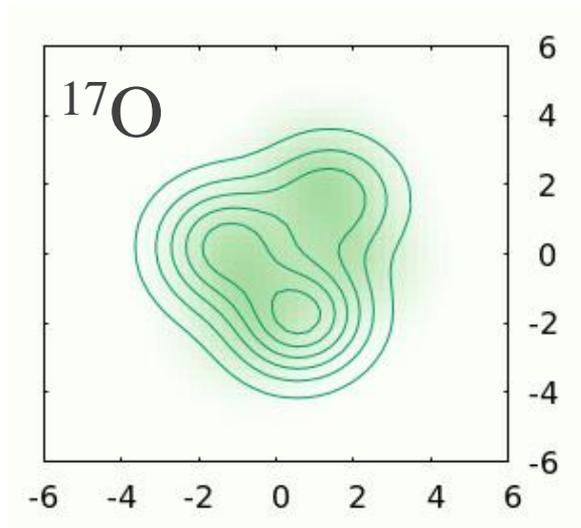


${}^6\text{He}$ (6 nucleons)

進捗: 実時間発展法による系統的計算

E1強度分布計算の例

Hamiltonian: Minnesota Pot. + 有限レンジLS + 有限レンジ3体力
「 ^{17}O の準位」と「共鳴の和則と位置」を再現するようにFitting.



今後の展望

- 鉄などA~60核の記述に難あり ⇒ 密度汎関数の使用
- 密度汎関数のパラメータを、機械学習アルゴリズムで最適化

進捗: 崩壊幅と分岐比の見積もり

換算幅振幅を求め、崩壊幅と分岐比を見積もる

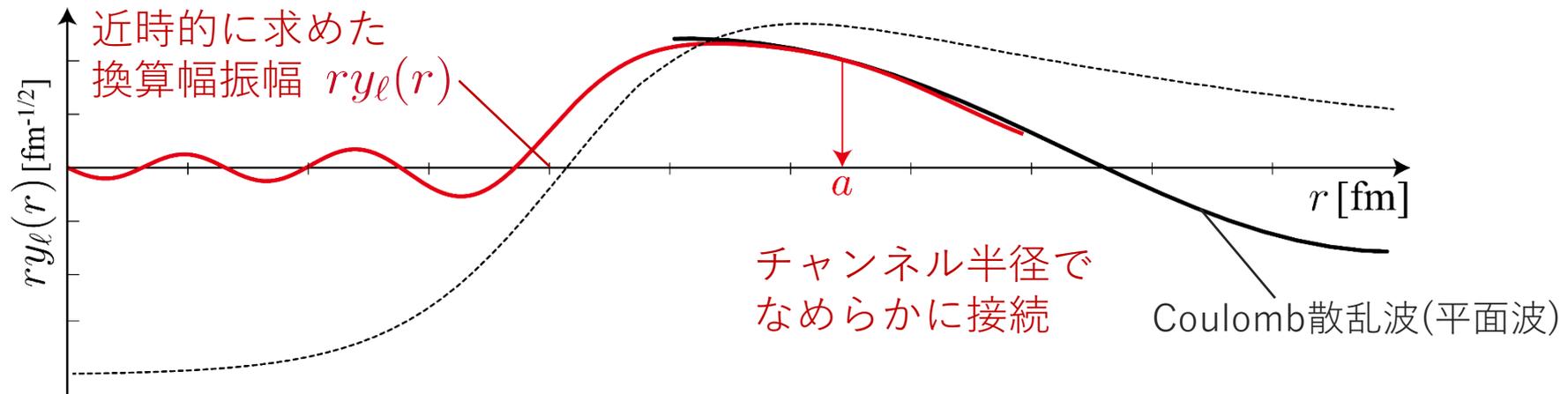
$$A \rightarrow A_1 + A_2 \quad \text{崩壊の部分幅} \quad \Gamma = 2P_\ell(a) \frac{\hbar^2}{2\mu a} |ay_\ell(a)|^2$$

透過率
換算幅振幅

透過率 $P_\ell(a) = \frac{ka}{F_\ell^2(ka) + G_\ell^2(ka)}$

換算幅振幅 $ry_\ell(r) = r \sqrt{\frac{A!}{A_1!A_2!}} \langle Y_\ell(\hat{r}) \phi_{A_1} \phi_{A_2} | \Psi \rangle$

(共鳴の波動関数と、崩壊チャンネルの重なり積分)



© Laplace展開法を用い、任意の崩壊を計算可能

進捗: 崩壊幅と分岐比の見積もり

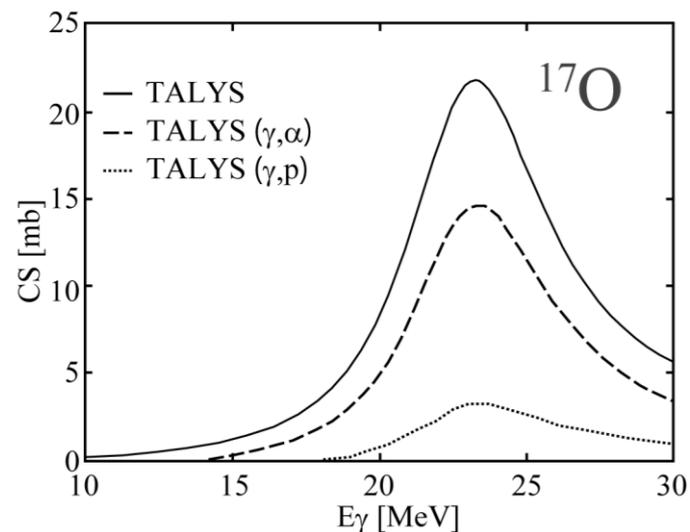
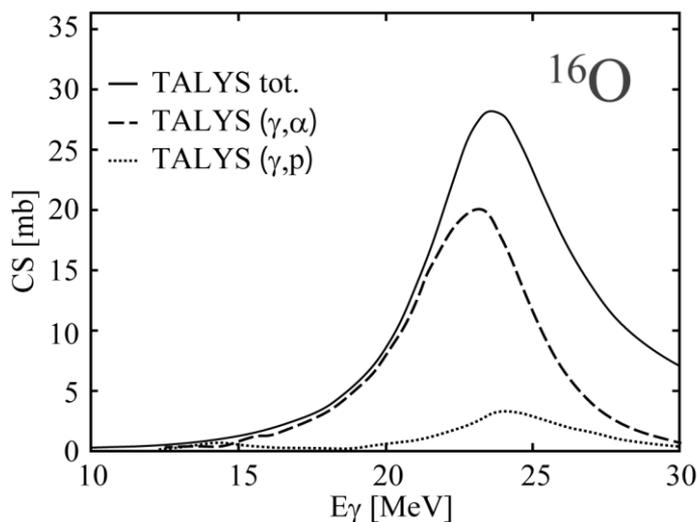
^{16}O と ^{17}O の比較 (崩壊分岐比)

崩壊分岐比の実験データはほとんどない

TALYSコードによる見積もりには問題が多い。

◎ 重核でfitした準位密度を用いて
統計模型計算を行うため軽核に対する精度がない

◎ アイソスピン選択則を無視した見積もり



→ 核模型計算によって、軽い核の傾向を見る

まとめ

研究背景と目的

◎ 研究の動機付け

- 超高エネルギー宇宙線と核の光吸収断面積
- 巨大共鳴のエネルギー，強度，崩壊分岐比
- 崩壊分岐比の議論は既存の枠組みを超える挑戦的課題

○ 軽核の光吸収断面積(E1巨大共鳴)

- 実時間発展法を用いた系統的計算の実行
- 密度汎関数の再fit (機械学習アルゴリズムの利用)

○ 共鳴の崩壊分岐比

- 巨大共鳴からのクラスター崩壊の計算
- アイソスピン選択則と混合の検討