

原子核移行反応・分解反応の視点

筑波大学数理物質科学研究科
計算科学研究センター

矢花一浩

私の最近の研究分野は、「フェルミオン多体系の量子ダイナミクス」

日本物理学会2010年秋季大会
大阪府立大学中百舌鳥キャンパス
2010年9月24日

時間依存密度汎関数理論による高強度パルス光伝播の記述

矢花一浩

筑波大学計算科学研究センター
数理物質科学研究科

共同研究者:

篠原康(筑波大数理)

杉山健(筑波大数理)

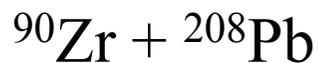
G.F. Bertsch (ワシントン大)

原子核反応を調べることの目的は？

- ・原子核構造を調べるツール。
- ・元素の起源を調べるために、宇宙や星で起こる核反応の断面積が必要。
- ・量子ダイナミクスへの興味。
- ・応用に関わること。(原子炉、核廃棄物処理、放射線損傷、・・・)

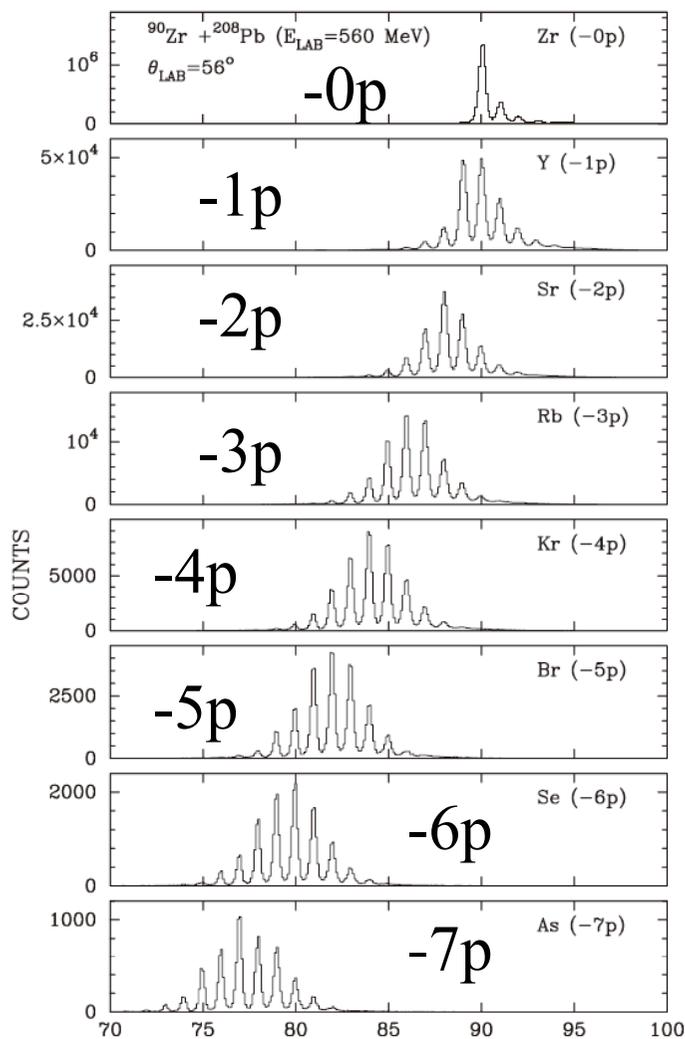
1. 移行反応の捉え方。
トンネル現象、ネック形成、フロー、・・・
2. 分解反応の捉え方。
3. 強い場の科学(?)

多核子移行反応



($E_{\text{lab}}=560\text{MeV}$, $\theta_{\text{lab}}=56^\circ$)

S. Szilner et.al, Phys. Rev. C76, 024604 (2007)



質量数

1核子移行

⇒ 多核子移行

⇒ 深部非弾性散乱

- トンネル現象 (1核子、クラスター)
- ネットク形成
- 対相関の影響
- 核子の流れ

多核子移行反応の理論的記述

GRAZING: A. Winther, Nucl. Phys. A572, 191 (1994)

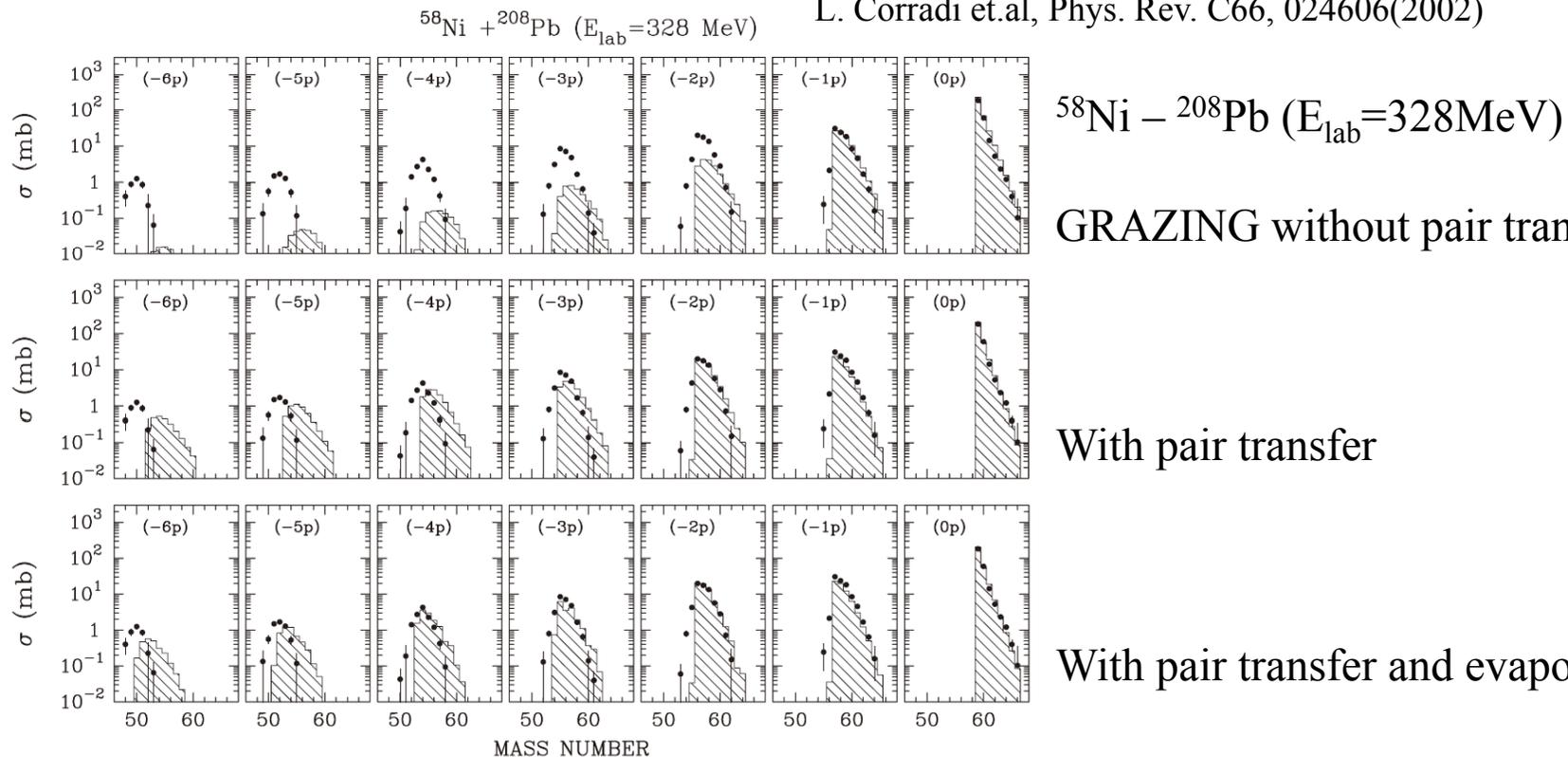
- ・直接反応理論を拡張した枠組み
- ・多核子移行反応を用いた中性子過剰核生成に関する議論

C.H. Dasso, G. Pollarolo, A. Winther, PRL73, 1907 (1994)

“Systematics of Isotope Production with Radioactive Beams”

- ・経験的パラメータを含む。核子移行は統計的扱い、「平均移行確率 × 状態密度」

L. Corradi et.al, Phys. Rev. C66, 024606(2002)



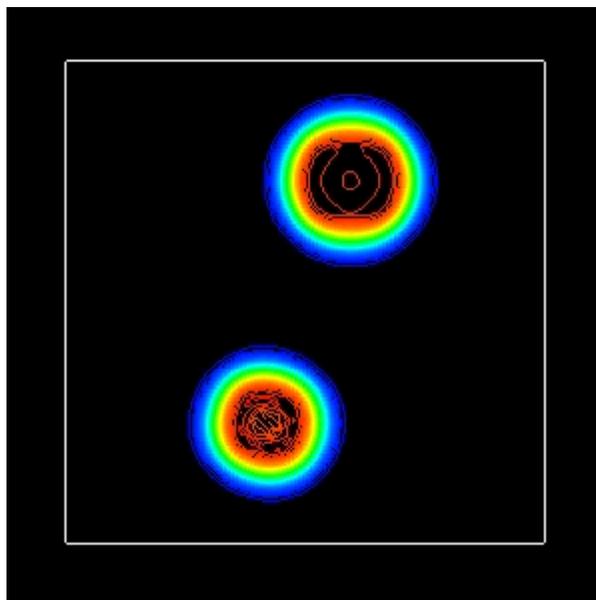
重い中性子過剰と安定核の衝突計算に向けて



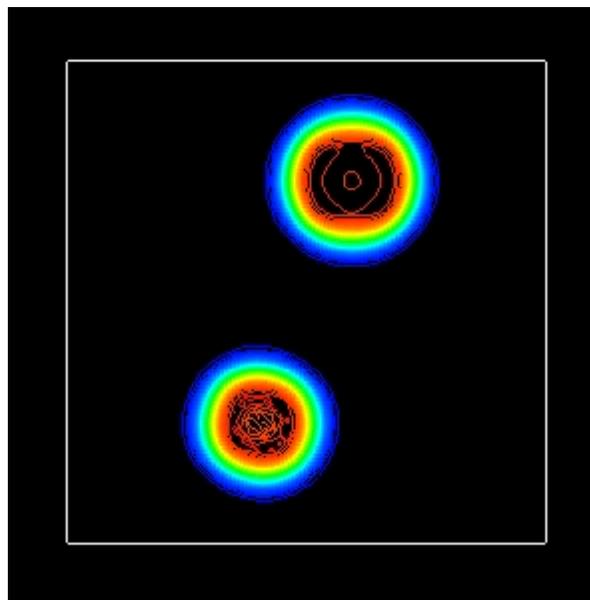
$Z=54$ $Z=78$

$N=90$ $N=120$

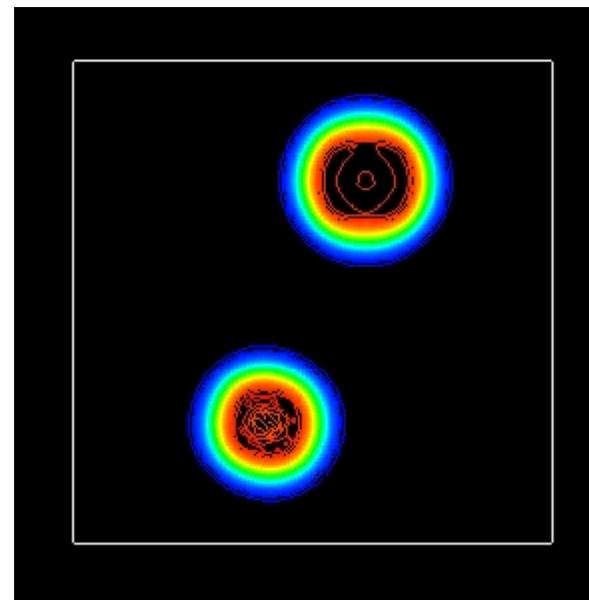
900MeV(Lab)



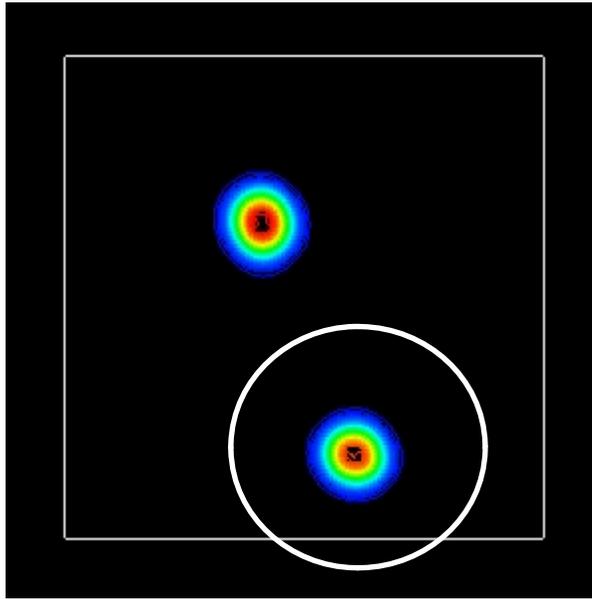
$b=8.8\text{fm}$



$b=9.6\text{fm}$



$b=10.4\text{fm}$



ゲージ変換によって不変な量

移行核子数

$$\langle N \rangle = \int_T d\vec{r} \rho(\vec{r}, t) \quad \rho(\vec{r}, t) = \sum_i |\psi_i(\vec{r}, t)|^2$$

移行核子数のゆらぎ

$$\sigma^2 = \langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2 = \langle N \rangle - \sum_{ij} \left| \langle \psi_i | \psi_j \rangle_T \right|^2$$

↑
標的核領域で内積をとる

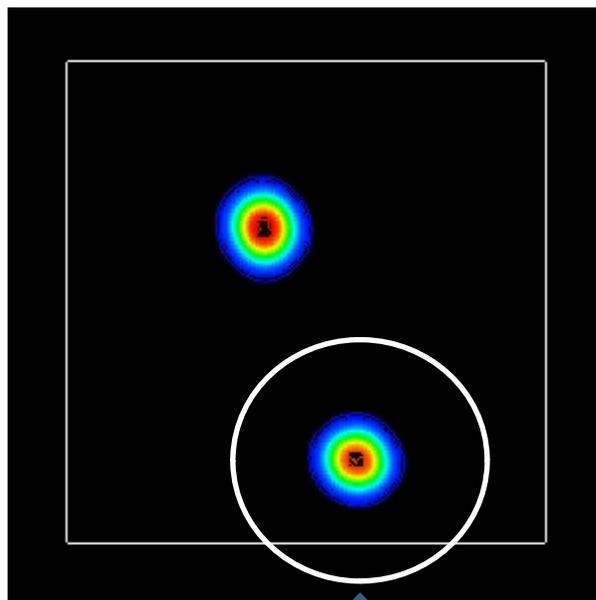
移行粒子数分布

標的核領域の粒子数演算子 $\hat{N} = \int_T d\vec{r} \hat{\psi}^\dagger(\vec{r}) \hat{\psi}(\vec{r})$

➡ 移行粒子数分布

$$P_n = \langle \Psi(t) | \delta(\hat{N} - n) | \Psi(t) \rangle \quad \Psi(t) = \det[\psi_i(\vec{r}_j, t)]$$

移行粒子数分布 の計算



領域 T

$$P_n = \langle \Psi(t) | \delta(\hat{N} - n) | \Psi(t) \rangle \quad \Psi(t) = \det[\psi_i(\vec{r}_j, t)]$$

$$\hat{N} = \int_T d\vec{r} \hat{\psi}^\dagger(\vec{r}) \hat{\psi}(\vec{r})$$

$$P_n = \sum_{\tau_1 \tau_2 \dots \tau_N} \begin{vmatrix} \langle \psi_1 | \psi_1 \rangle_{\tau_1} & \langle \psi_1 | \psi_2 \rangle_{\tau_2} & \dots & \langle \psi_1 | \psi_N \rangle_{\tau_N} \\ \langle \psi_2 | \psi_1 \rangle_{\tau_1} & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \langle \psi_N | \psi_1 \rangle_{\tau_1} & & & \langle \psi_N | \psi_N \rangle_{\tau_N} \end{vmatrix}$$

$$\tau_i = T \text{ or } \bar{T}$$

T は n 個、 \bar{T} は $N-n$ 個

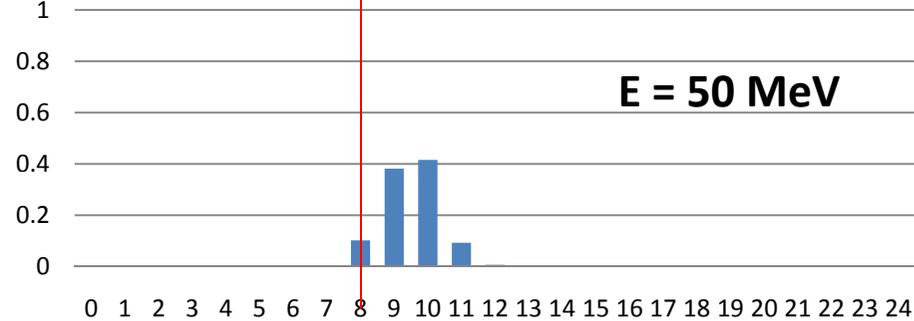
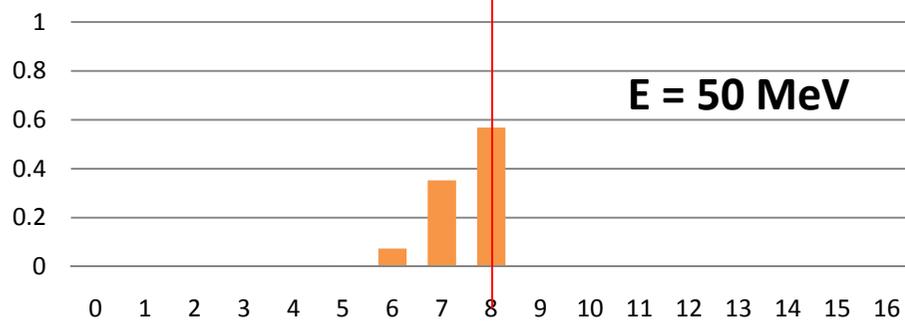
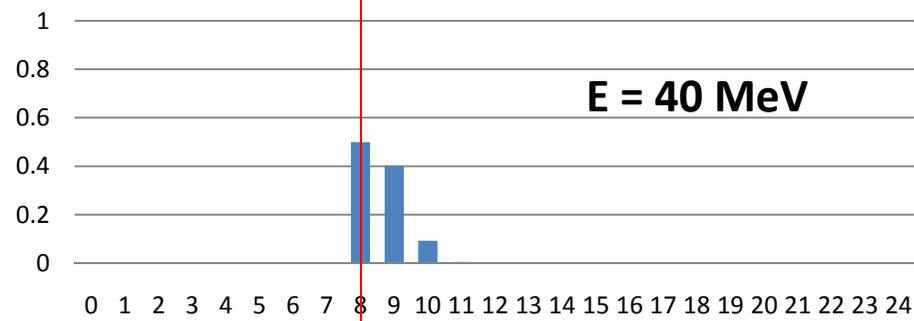
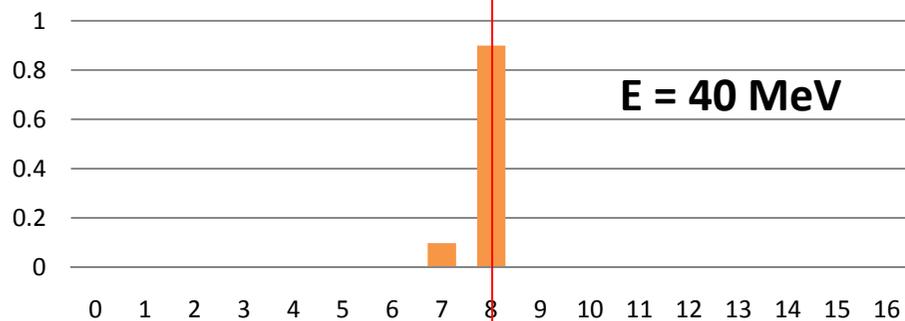
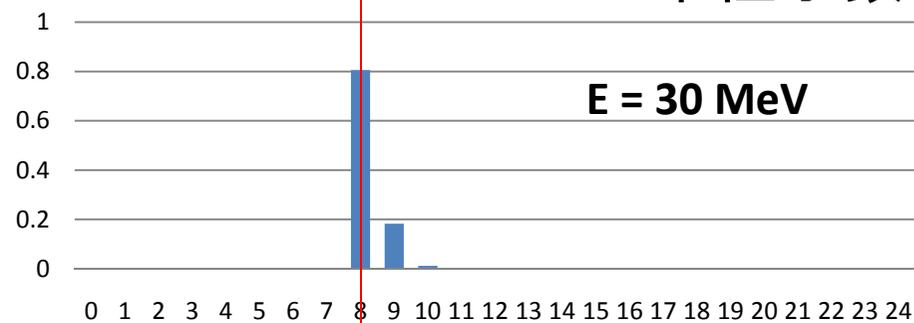
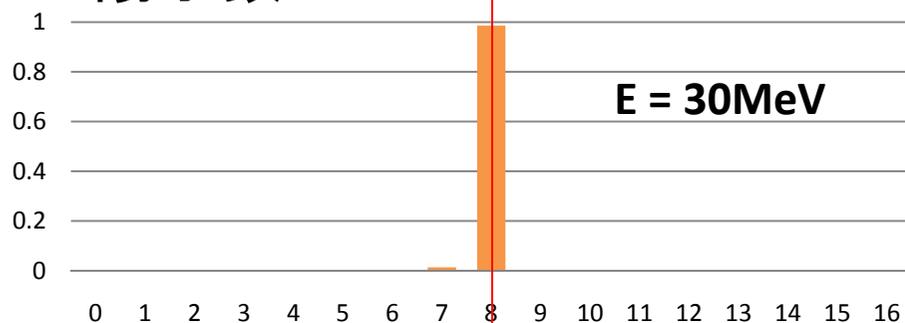
全ての可能な組み合わせに関する和を取る。
(N 粒子であれば、 2^N の場合)

終状態の陽子・中性子数分布(標的核 ^{16}O)

$^{24}\text{O}-^{16}\text{O}$ $E_{\text{cm}}=50\text{MeV}$ $b=7.2\text{fm}$

陽子数

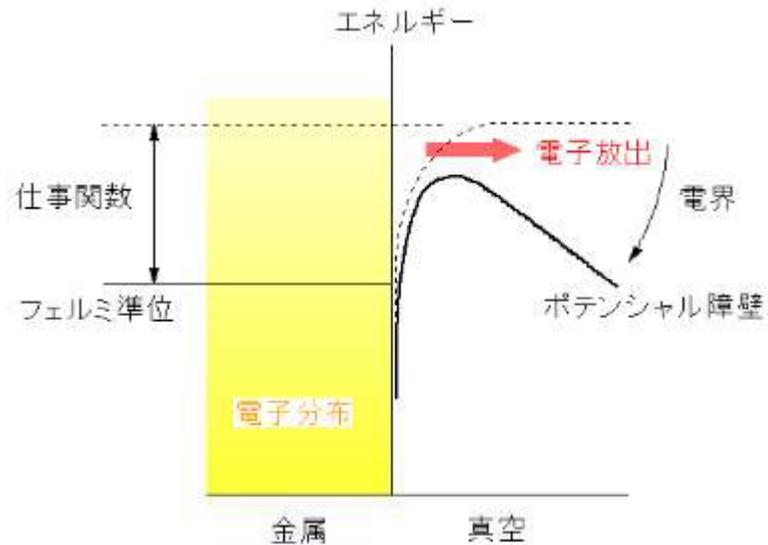
中性子数



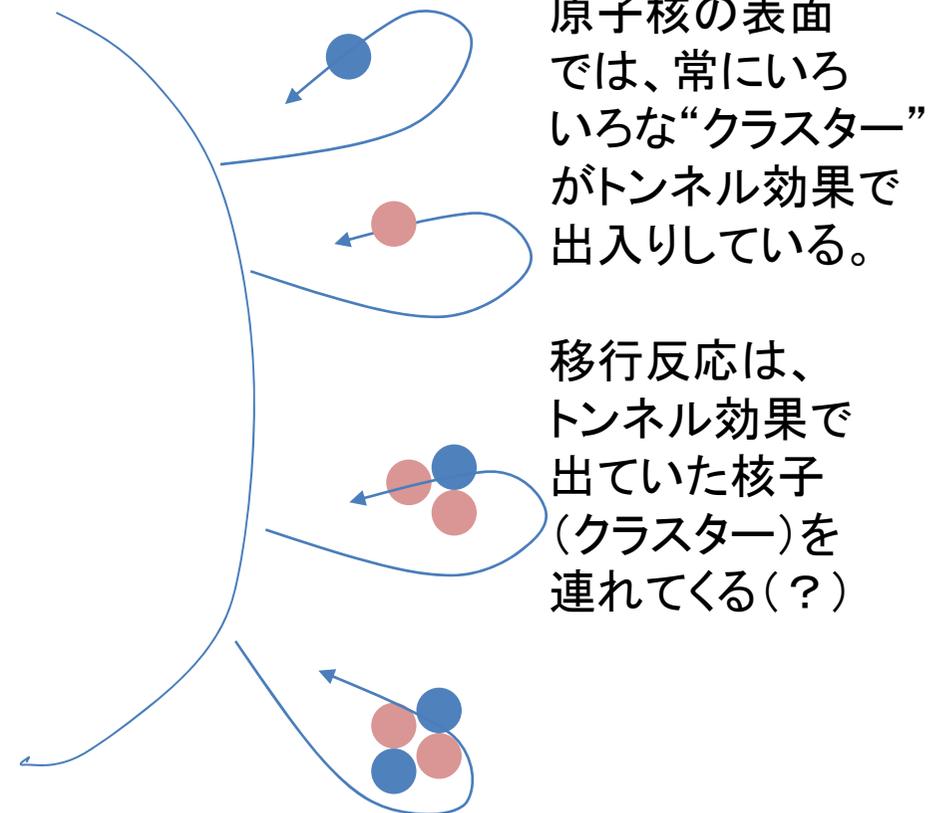
トンネル現象として捉えた移行反応

物性分野:

トンネル効果の利用
走査型電子顕微鏡、
電界電子放出



原子核では、様々な相関を持った複合粒子のトンネル過程が存在している。

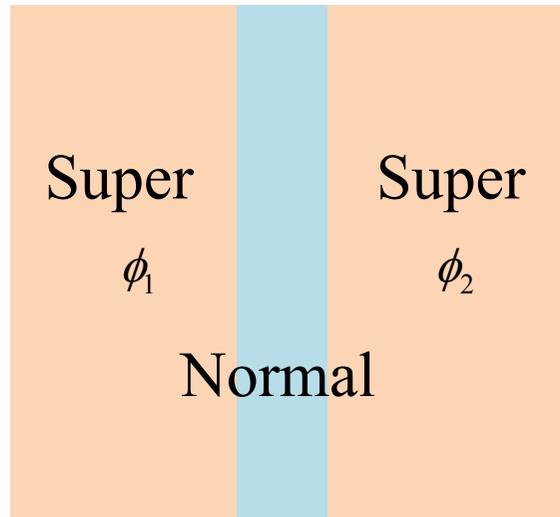


原子核の表面では、常にいろいろな“クラスタ”がトンネル効果で出入りしている。

移行反応は、トンネル効果で出ていた核子(クラスタ)を連れてくる(?)

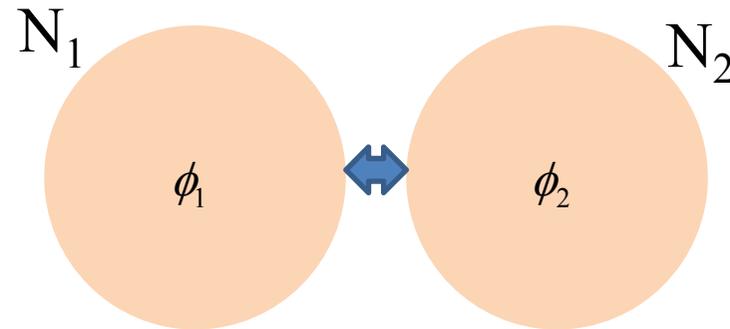
ジョセフソン効果: 対相関と移行反応 (全くの門外漢ですが)

ジョセフソン効果

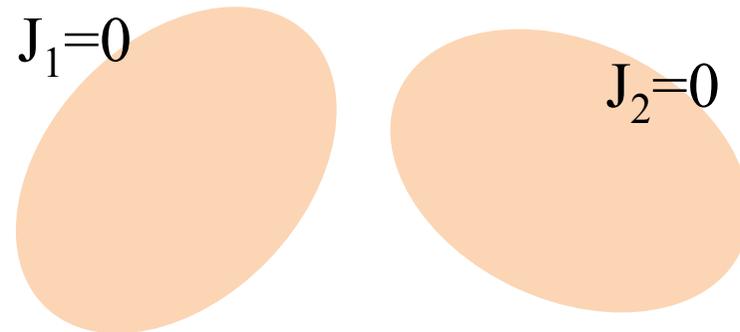


超伝導状態の位相差に起因してトンネル対電流が流れる。

粒子数の固有状態である原子核は、様々なゲージ位相の重ね合わせ



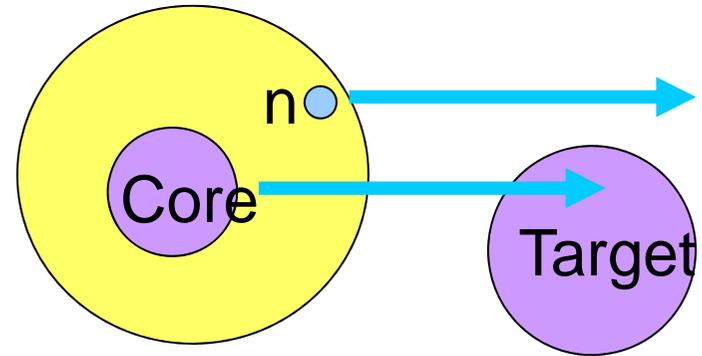
角運動量の固有状態である原子核は、様々な方向を向いた変形状態の重ね合わせ



分解反応とは、どのようなプロセスか？

ハロー核の反応

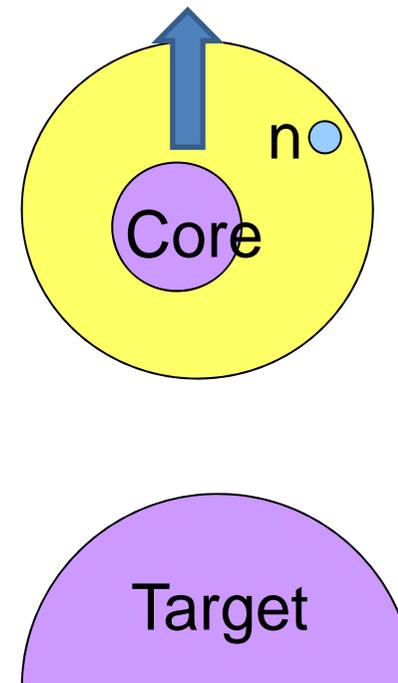
- ・弱く束縛した入射核の構成要素の各々が標的核と独立に散乱した結果分解する。



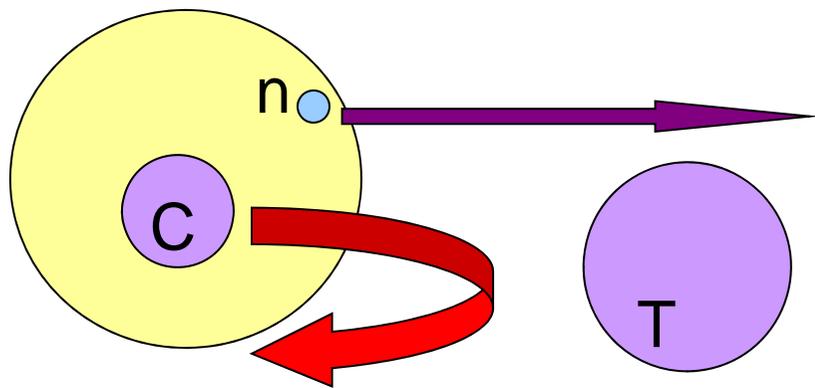
クーロン分解

- ・重い標的核から受けるクーロン力により分解する。

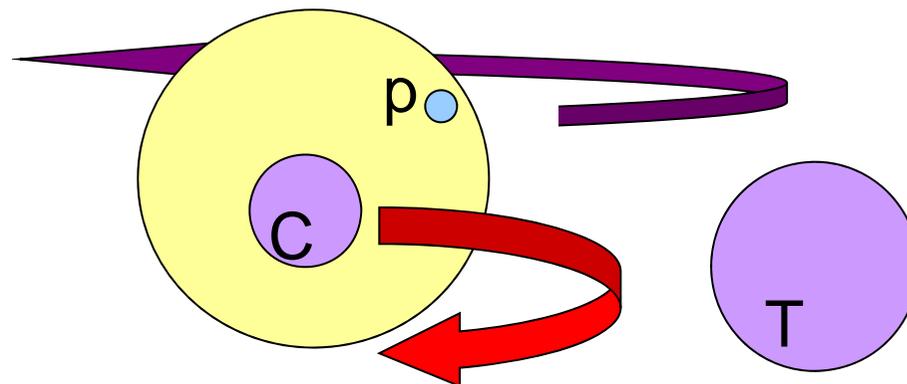
- ・摂動論が成り立つ \Rightarrow 両側への分解
- ・強い場 (非摂動) \Rightarrow 片側への分解



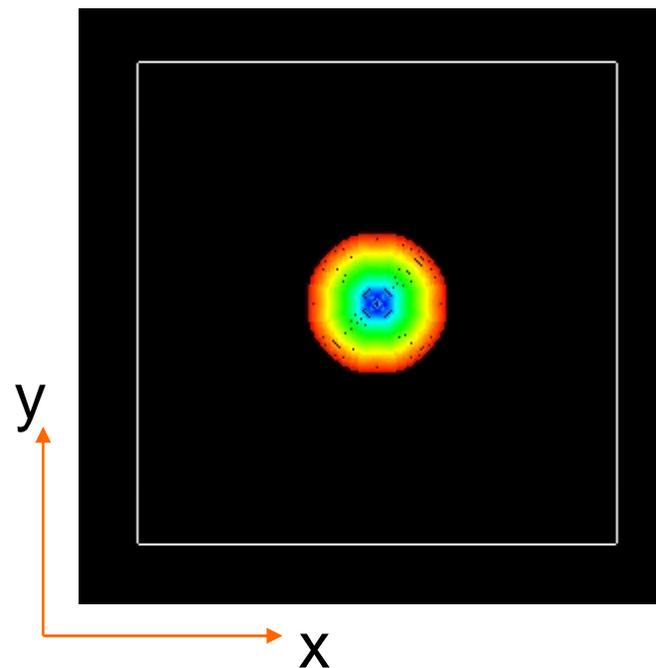
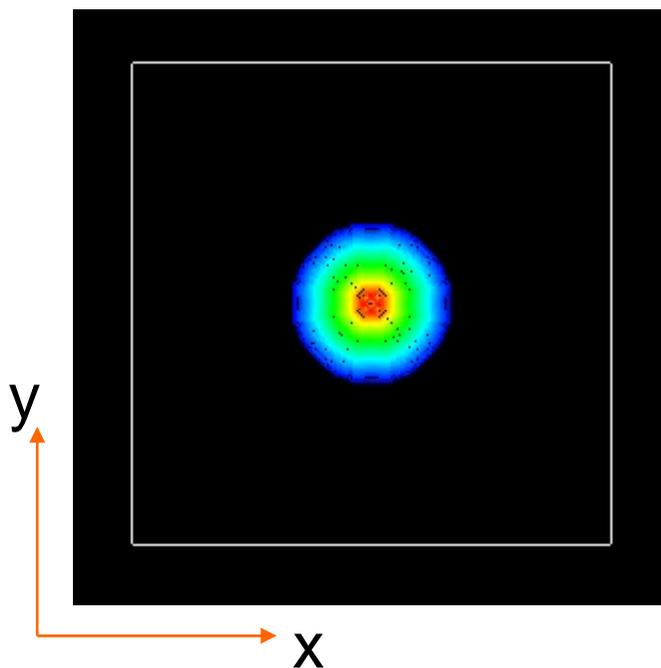
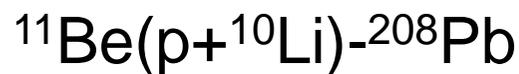
低エネルギーでのクーロン分解反応： 3体反応

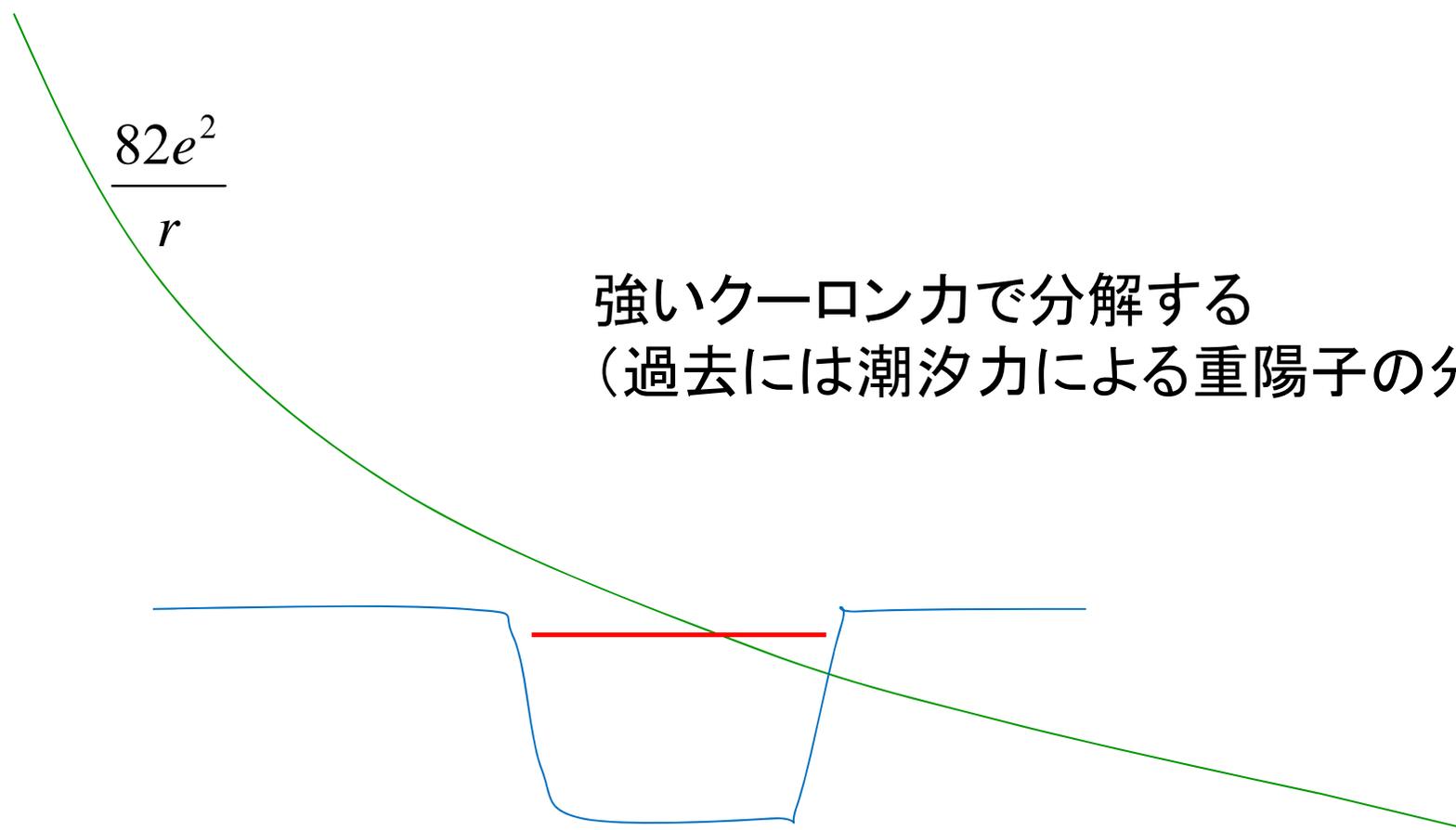


中性子ハロー



陽子ハロー



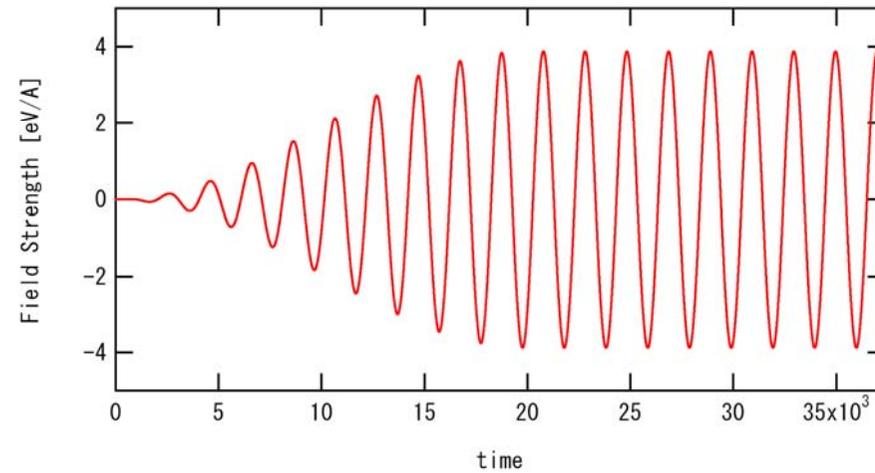
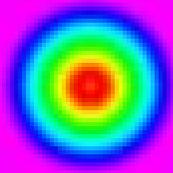


強いクーロン力で分解する
(過去には潮汐力による重陽子の分解)

強い場の科学： レーザー科学との接点？

原子物理の新しい反応機構： 再散乱

強レーザー場中にある原子：
電子の密度分布の時間発展



Ar atom
 $2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$,
800nm laser, 50fs

再散乱： 光子のエネルギーとは別のエネルギースケール

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -eE_0 \sin \omega t$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{eE_0}{m\omega} \cos \omega t$$

$$U_p = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = \frac{e^2 E_0^2}{4m\omega^2}$$

光子のエネルギー $\hbar\omega = 1.55\text{eV}$
とは別のエネルギースケール
(ポンデロモーティブエネルギー)

$$U_p = \frac{e^2 E_0^2}{4m\omega^2} \approx 10\text{MeV} \quad I = 10^{23} \text{W/cm}^2$$

2000

- ・レーザーによるウランの核分裂
- ・重陽子クラスターの核融合

- ・レーザー加速

Dynamic nuclear Stark shift in superintense laser fields

Thomas J. Bürvenich*

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg, Germany and Frankfurt Institute for Advanced Studies, Johann Wolfgang Goethe University, Max-von-Laue-Str. 1, D-60438 Frankfurt am Main, Germany

Jörg Evers† and Christoph H. Keitel‡

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg, Germany

(Received 20 June 2006; published 3 October 2006)

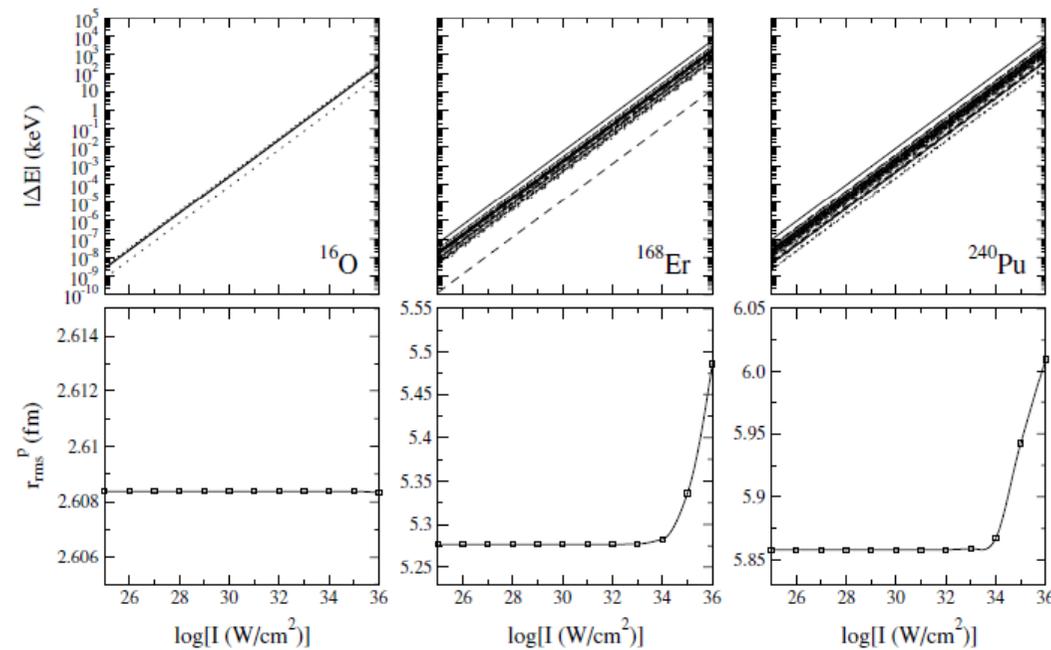


FIG. 1. AC-Stark shifts of the proton single-particle states in the laser field (upper row, displayed on a \log_{10} scale) as a function of laser intensity in the nuclear rest frame for the nuclei as indicated, and proton rms radii (lower row) as a function of laser intensity in the nuclear rest frame. Each line in the upper figures corresponds to a Stark shift of a proton single-particle level. The widths of these bands characterize the spread in these shifts. In the lower figure, the square dots indicate the calculated results, which for convenience are connected by the thin line.

静電場による原子核のサイズ変化

まとめ

核子移行反応の面白さは何か？

- ・原子核表面のトンネル効果を知る手段
- ・超伝導性を直接検証？
- ・様々なメカニズムの共存：トンネル過程と核子の流れ

分解過程とは？

- ・弱く束縛した系で重要になる。
- ・古典的なクーロン場による分解＝強い場による崩壊

レーザー科学との接点？