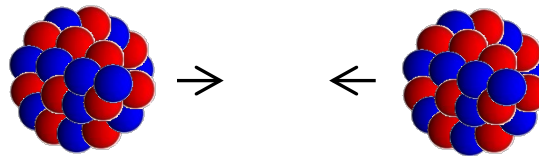


量子多体現象としての核反応の魅力

萩野浩一

京都大学大学院理学研究科



- ✓ ツールとしての核反応
- ✓ 量子多体現象としての核反応



1. はじめに
2. 原子核反応の物理:何が面白いのか?
3. 核反応のイメージング(可視化)
4. まとめ

はじめに

河合光路(九大)

上村、櫻木、八尋、
緒方....

福井、古本、渡辺、
吉田、小川、....

- 軽～重イオン
- 直接反応
- CDCC



吉田思郎(東北大)

滝川、仁井田....

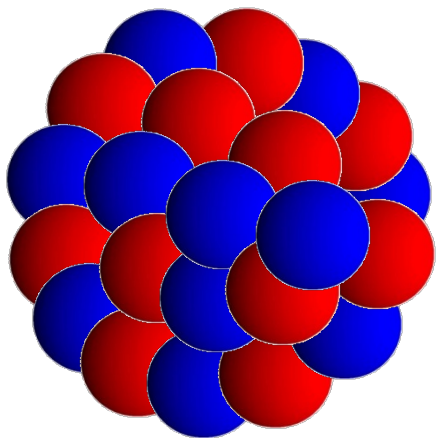
萩野、鷲山、湊....

- 重イオン
- 複合核反応
- 輸送方程式、CC

湊

新生九大核理、おめでとうございます。

低エネルギー原子核物理学のめざすもの



□ 核子多体系としての原子核の振る舞い

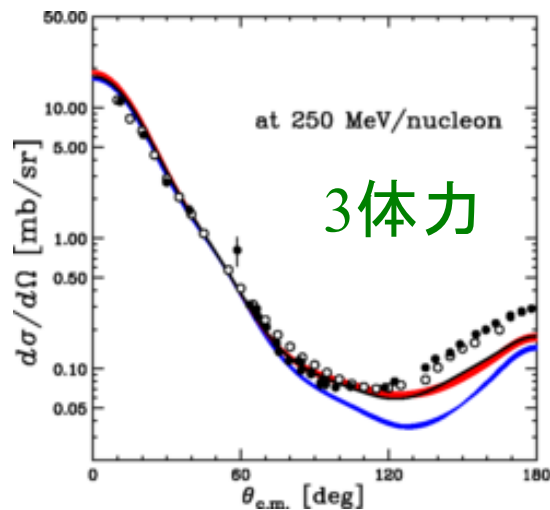
← 核子間相互作用から理解する

- 静的な振る舞い: 原子核構造 $E < 0$
- ダイナミックス: 原子核反応 $E > 0$

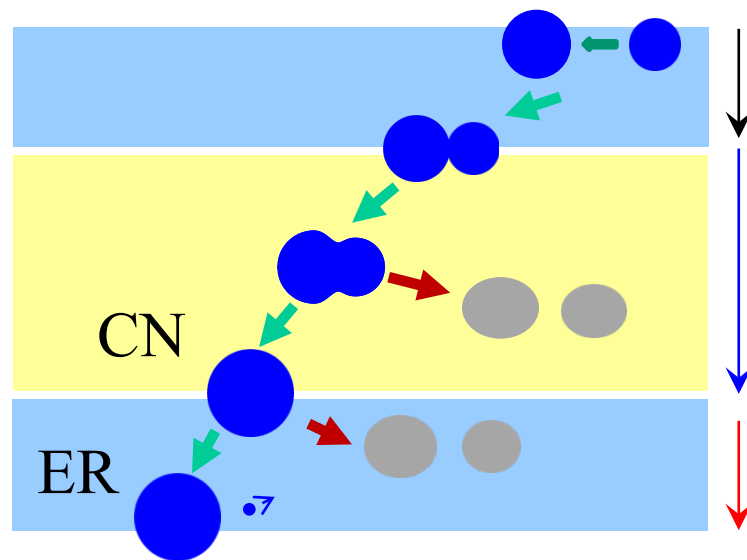
✓ ツールとしての原子核反応



緒方さんのHPより



K. Sekiguchi et al.,
PRC89('14)064007

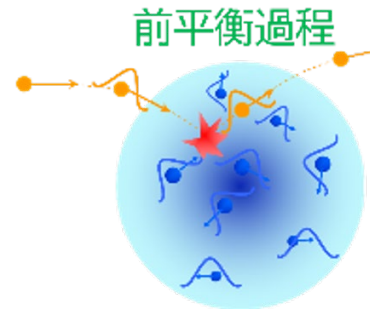
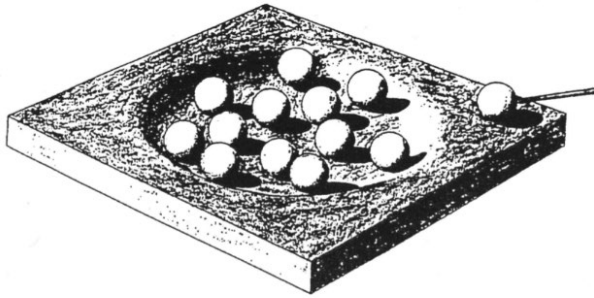


超重元素生成反応

原子核反応の2つの側面

✓ ツールとしての原子核反応 ← こちら側が強調されがちだが...

✓ 反応ダイナミクス自体としての面白み ← 今日はこちら



緒方さんのHPより

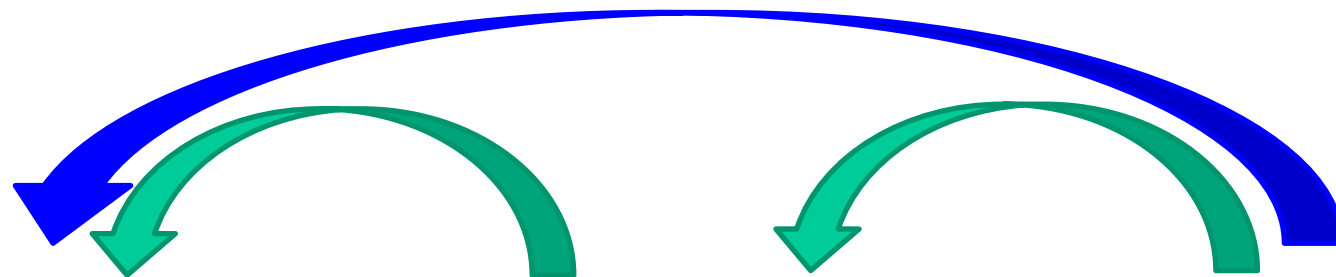
原子核は複合粒子

- ✓ 豊富な反応様式
- ✓ 核構造と核反応の織り成す様々なインタープレイ

- ✓ 弾性散乱
- ✓ 非弾性散乱
- ✓ 核子移行反応
- ✓ 核融合反応

- ✓ 基底状態の性質(質量、大きさ、形など)
- ✓ 励起状態の性質

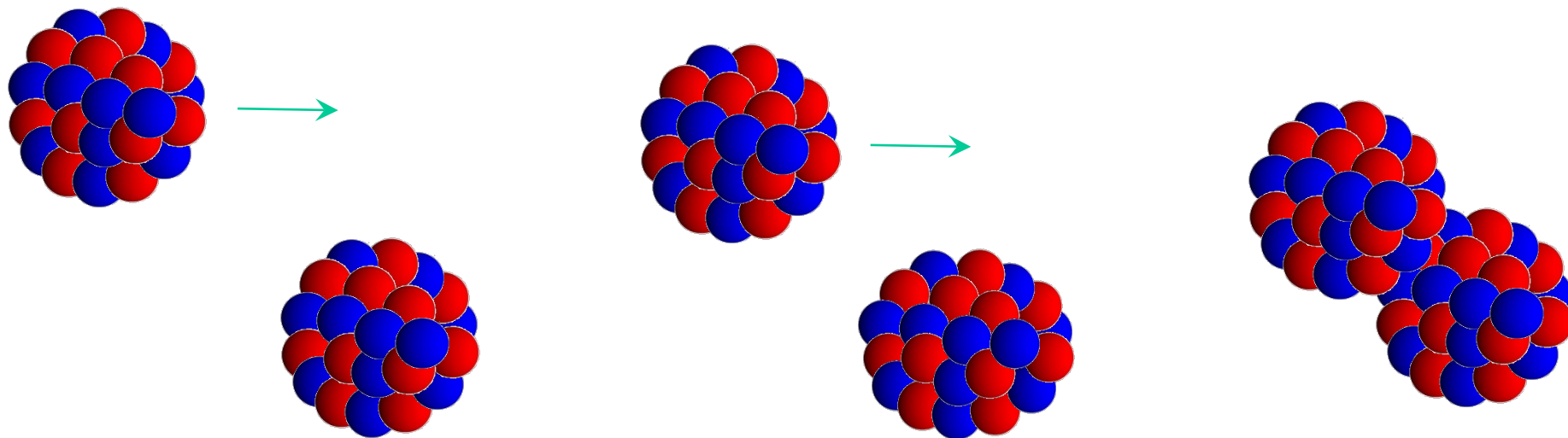
量子多体系のダイナミクス(原子核反応)



弾性散乱

非弾性散乱

核融合

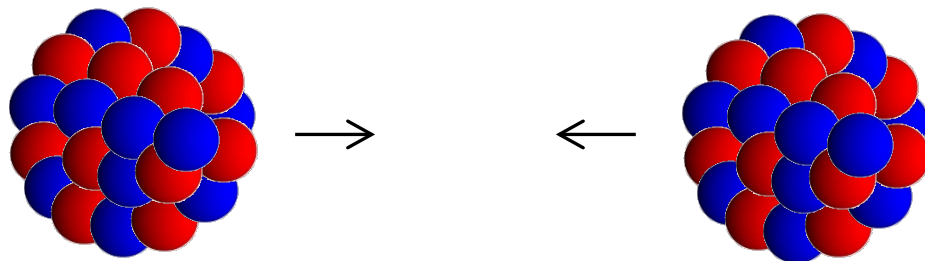


これらを統一的に記述するのが
核反応論の醍醐味



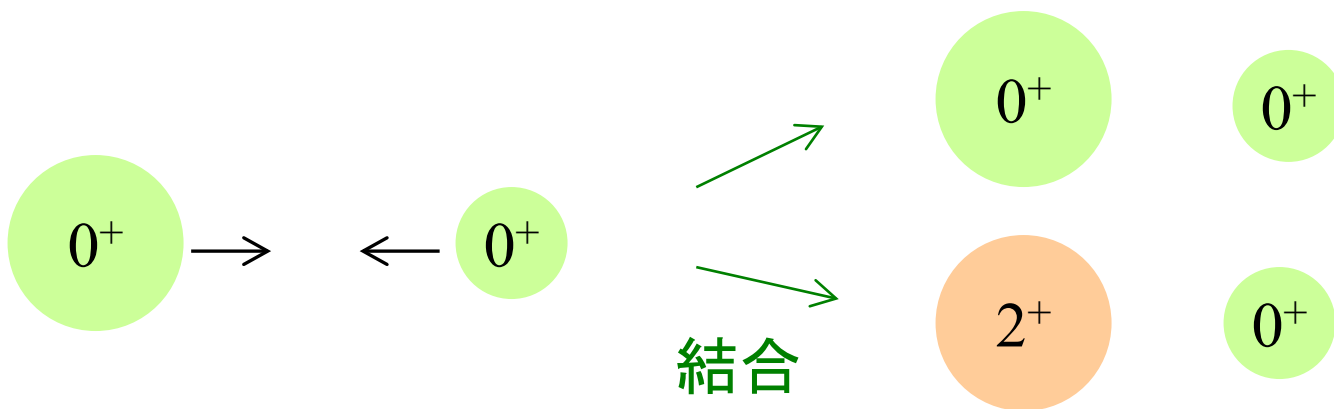
結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論

多体問題

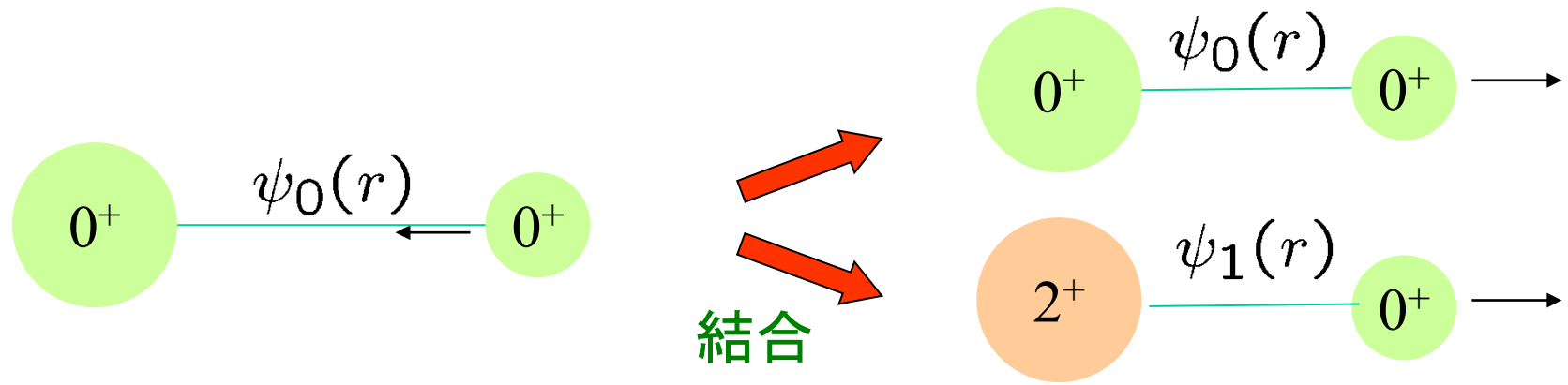


低エネルギー反応では未だに超難問題
cf. 多粒子トンネルの記述

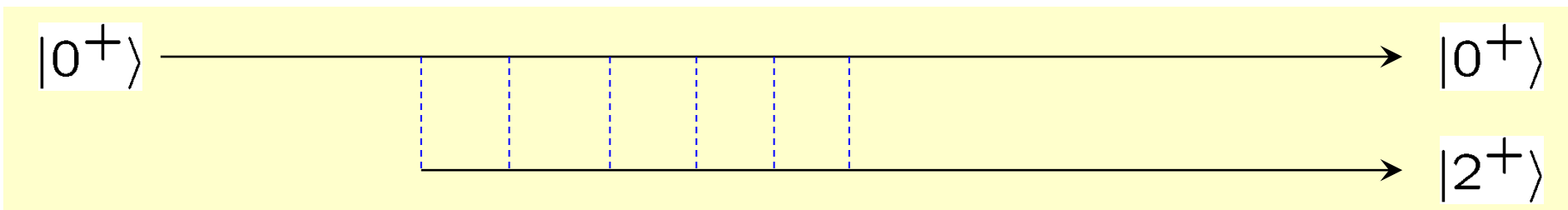
➡ 2体問題 + 原子核の励起 (結合チャンネル・アプローチ)



結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論



$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + \overleftarrow{V}(r) - \overleftarrow{E} \right] \overrightarrow{\psi}(r) = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{S行列 } S_{ab}$$



反応途中の励起・脱励起のダイナミクス (連続状態への励起→分解)

- ✓ 非摂動的 (フルオーダー)
- ✓ 非断熱的 (励起エネルギー)

結合チャンネル法の最新のまとめ(萩野、緒方、Moro)

Prog. Part. Nucl. Phys. 125 (2022) 103951

Progress in Particle and Nuclear Physics 125 (2022) 103951



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Progress in Particle and Nuclear Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ppnp



Review

Coupled-channels calculations for nuclear reactions: From exotic nuclei to superheavy elements

K. Hagino ^{a,*}, K. Ogata ^{b,c,d}, A.M. Moro ^{e,f}

^a Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

^b Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Ibaraki 567-0047, Japan

^c Department of Physics, Osaka City University, Osaka 558-8585, Japan

^d Nambu Yoichiro Institute of Theoretical and Experimental Physics (NITEP), Osaka City University, Osaka 558-8585, Japan

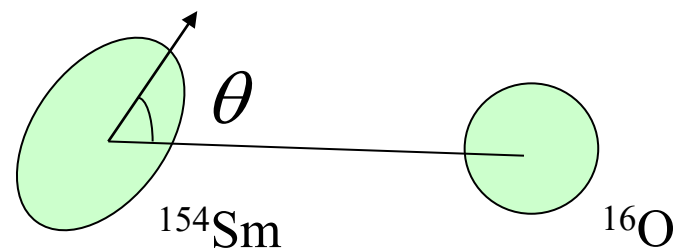
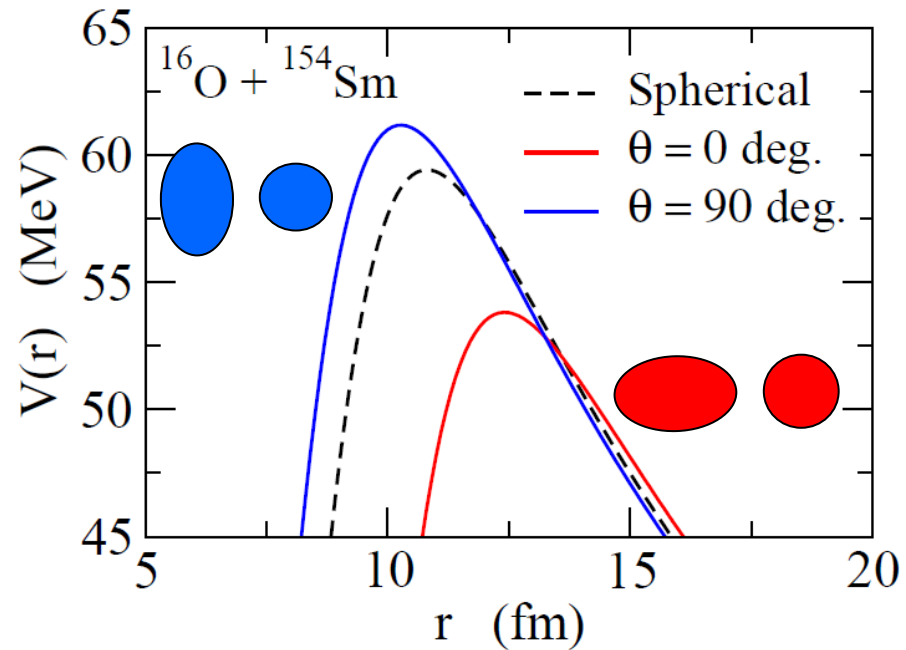
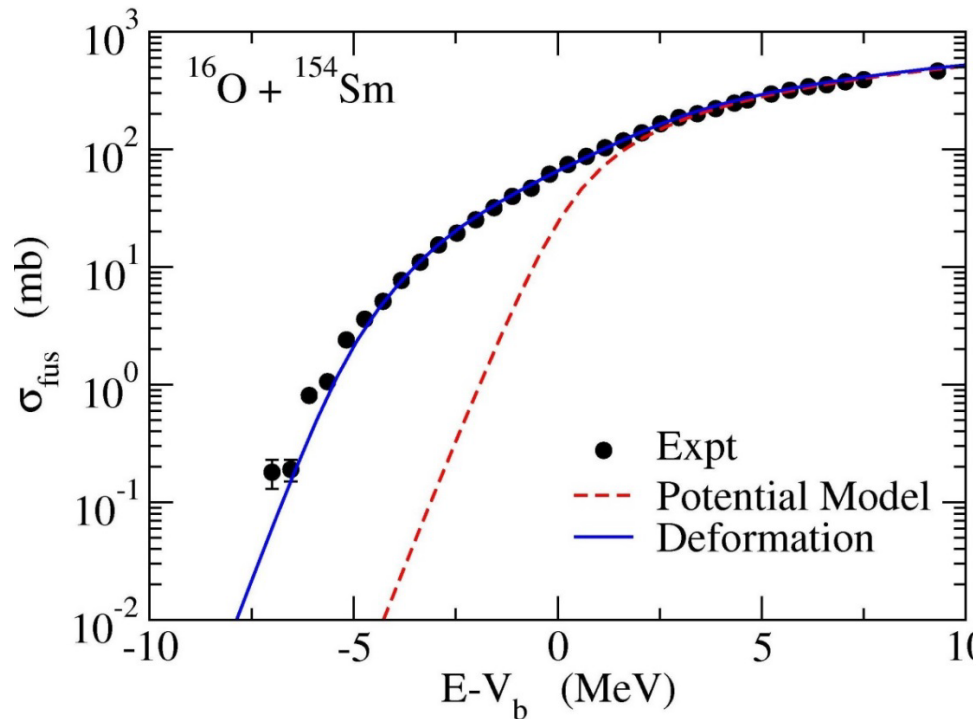
^e Departamento de FAMN, Universidad de Sevilla, Apartado 1065, E-41080 Sevilla, Spain

^f Instituto Interuniversitario Carlos I de Física Teórica y Computacional (iC1), Apdo. 1065, E-41080 Sevilla, Spain



広い意味での九大・東北大コラボレーション

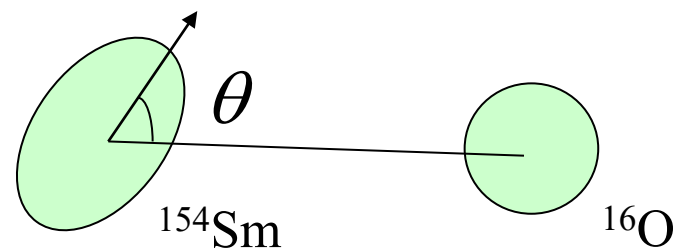
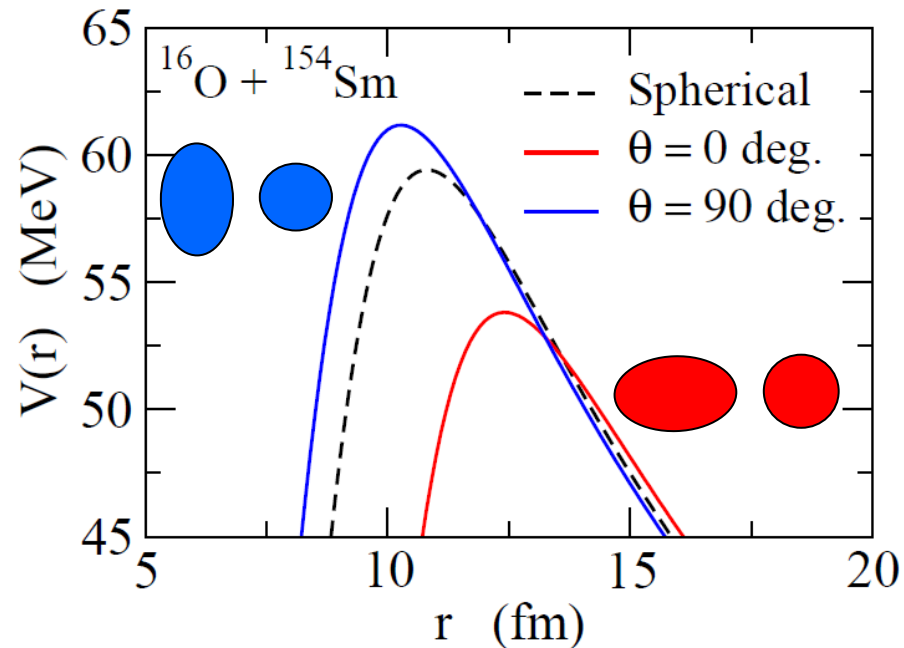
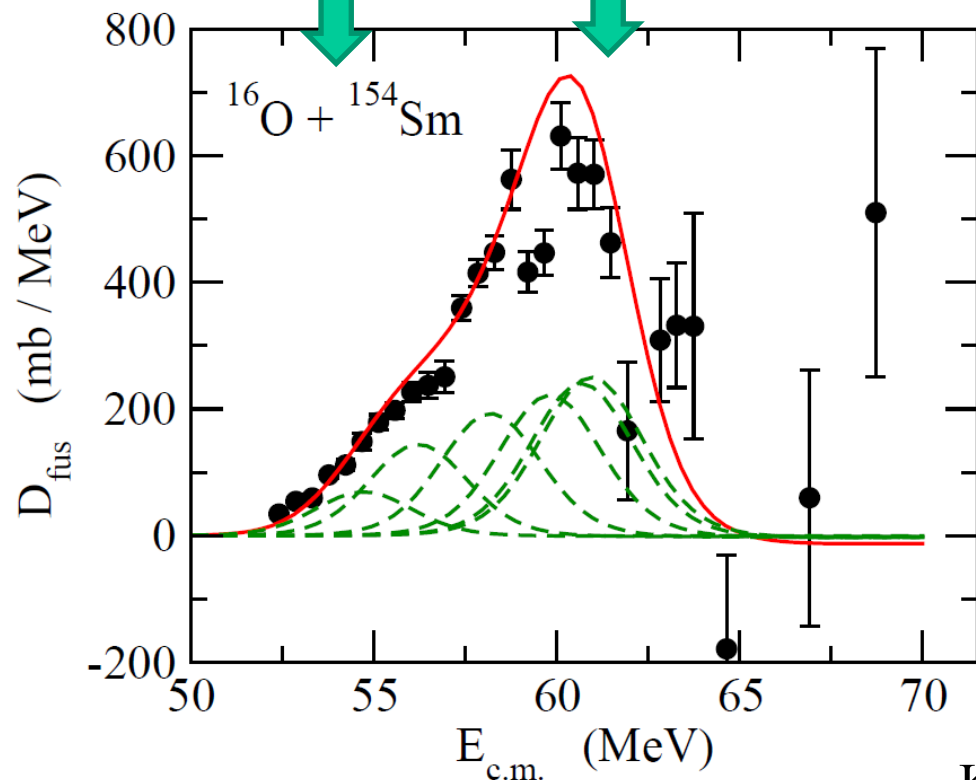
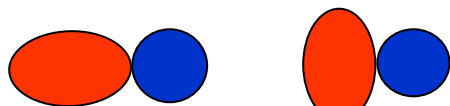
結合チャンネル効果の顕著な例：重イオン核融合反応



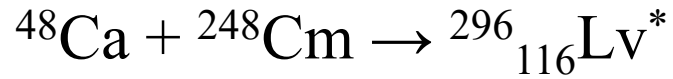
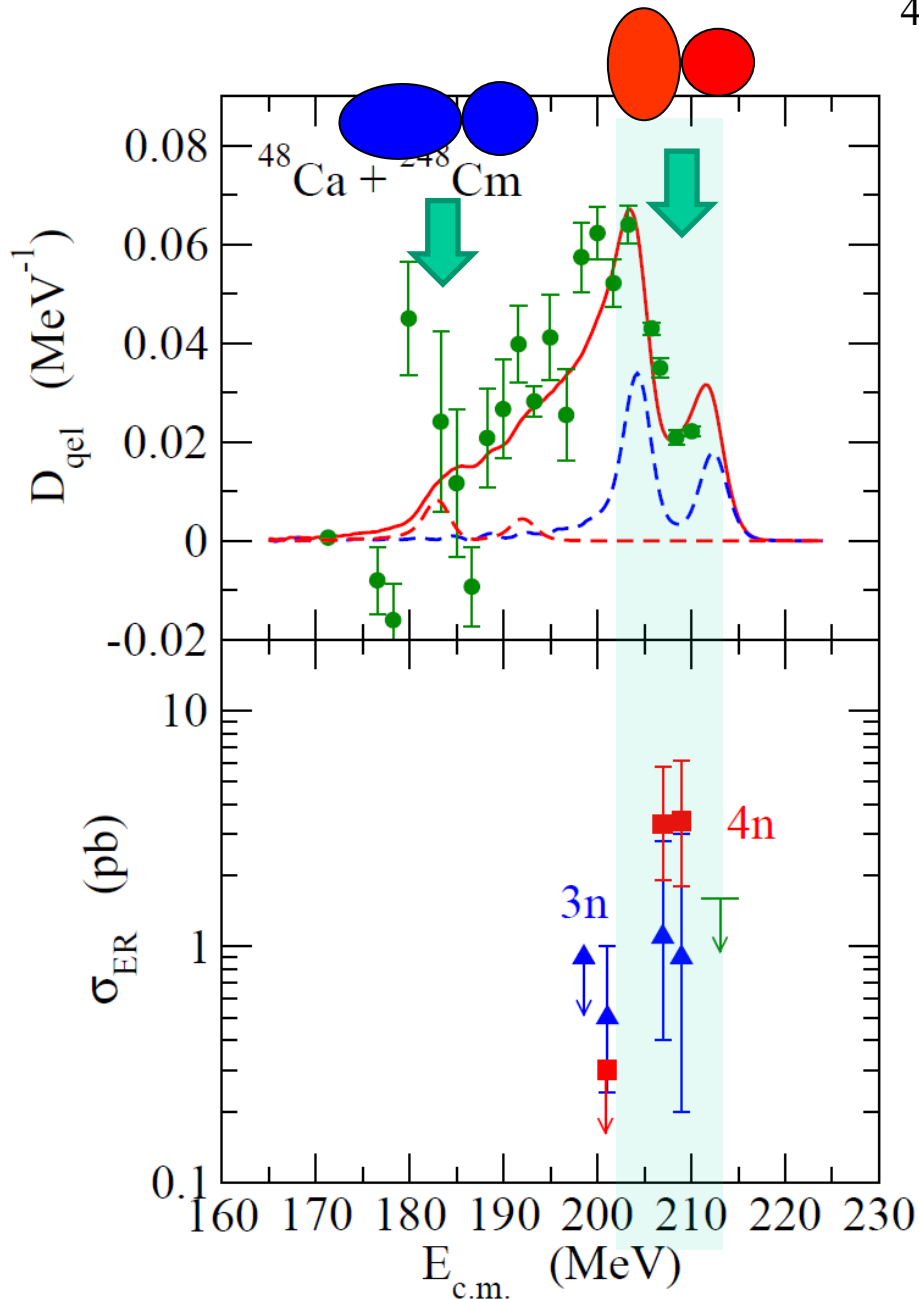
結合チャンネル効果の顕著な例：重イオン核融合反応

障壁分布法

$$D_{\text{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\text{fus}})}{dE^2}$$



超重元素生成反応への応用



T. Tanaka, K. Morita,..., K.H., et al.,
JPSJ 87 ('18) 014201
PRL124 ('20) 052502



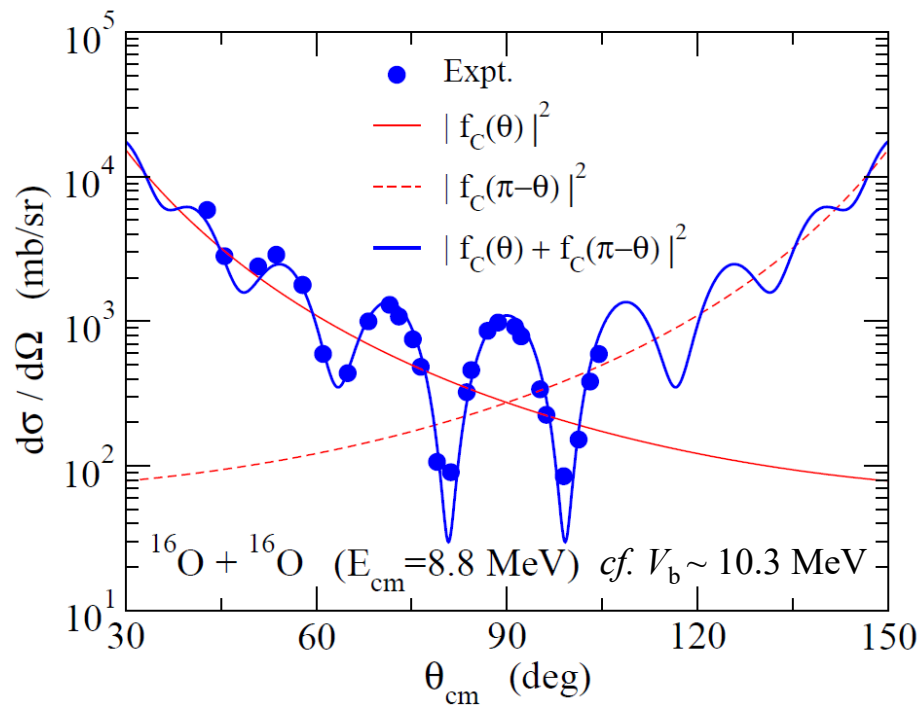
M. Tanaka, K. Morita,..., K.H., et al.,
JPSJ 91 ('22) 084201

最適エネルギーの決定

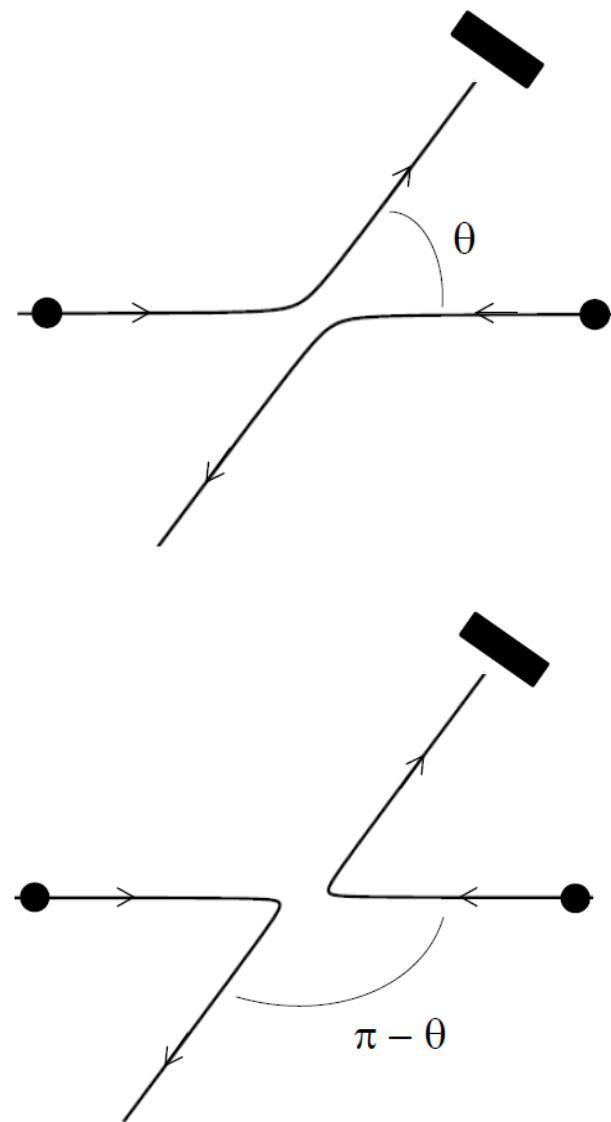
核反応は宝の山: 核反応に見られる量子性

例) モット散乱: 同種粒子の散乱

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta) + f(\pi - \theta)|^2$$

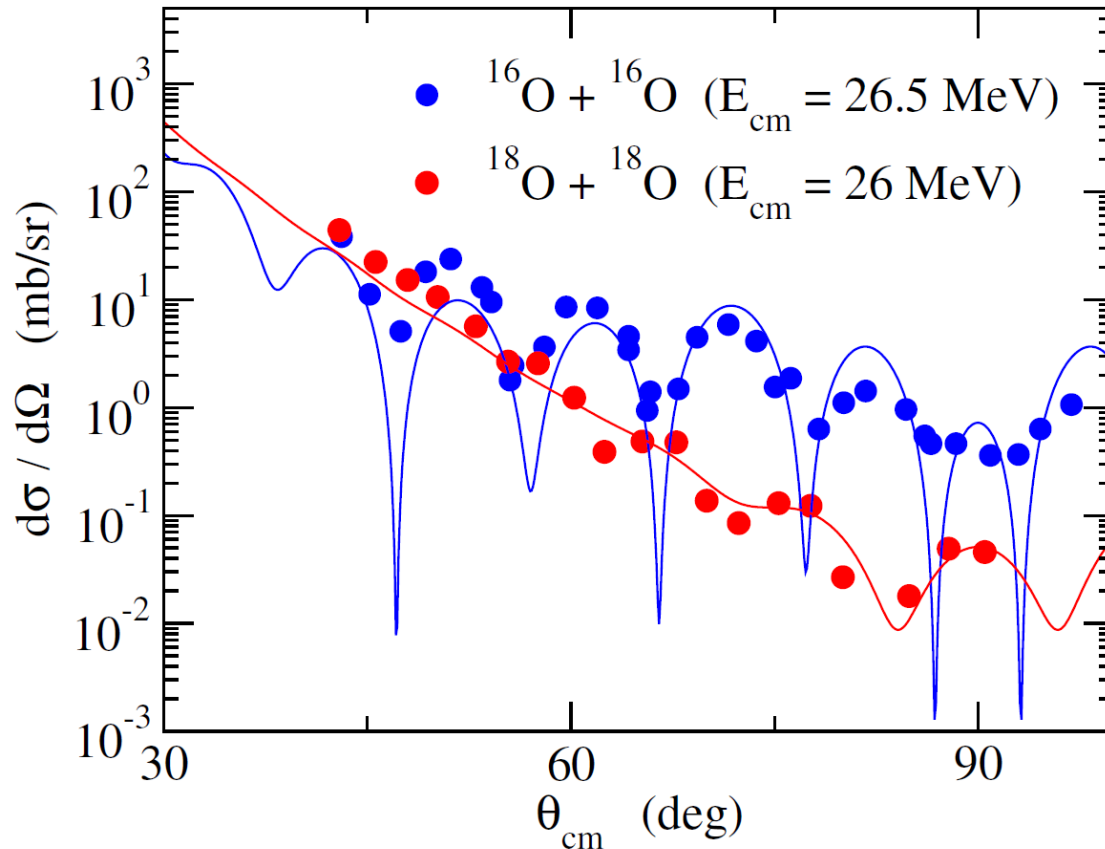


expt: D.A. Bromley et al., Phys. Rev. 123 ('61)878



核反応は宝の山: 核反応に見られる量子性

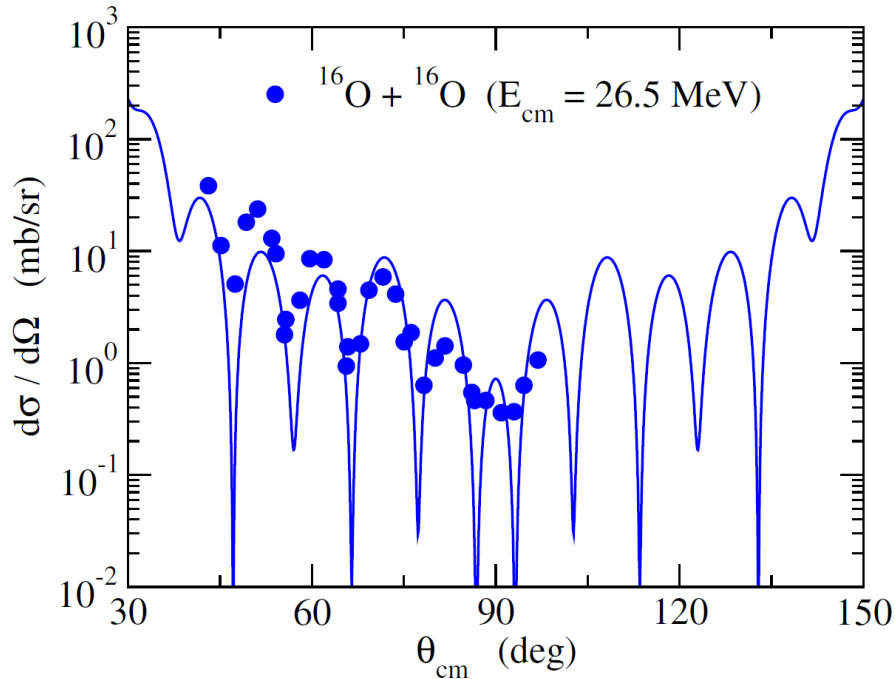
$^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ と $^{18}\text{O}+^{18}\text{O}$ の比較 ($E_{\text{cm}} \sim 2.5 V_b$)



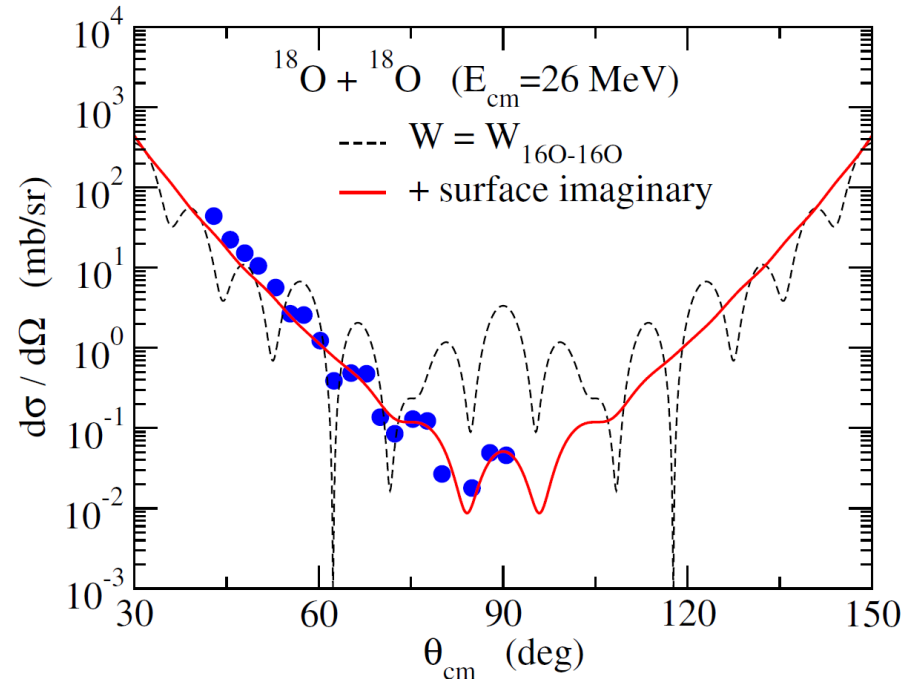
$^{18}\text{O}+^{18}\text{O}$: 干渉パターンが大分弱くなっている

$^{18}\text{O} = ^{16}\text{O} + 2n \rightarrow$ 非弾性チャンネルとの強い結合
(\rightarrow 量子デコヒーレンス?)

光学ポテンシャル計算



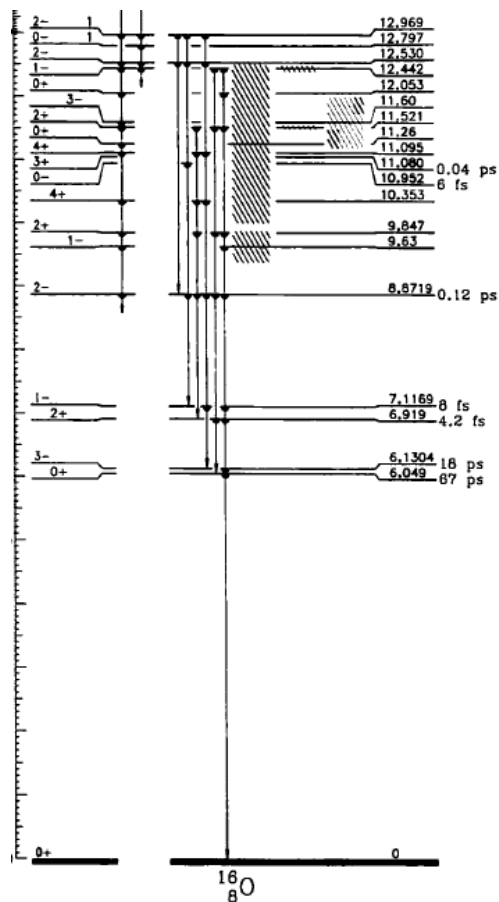
深い WS^2 型ポテンシャル
によるフィット



同じポテンシャルで $^{18}\text{O}+^{18}\text{O}$
はフィットできず

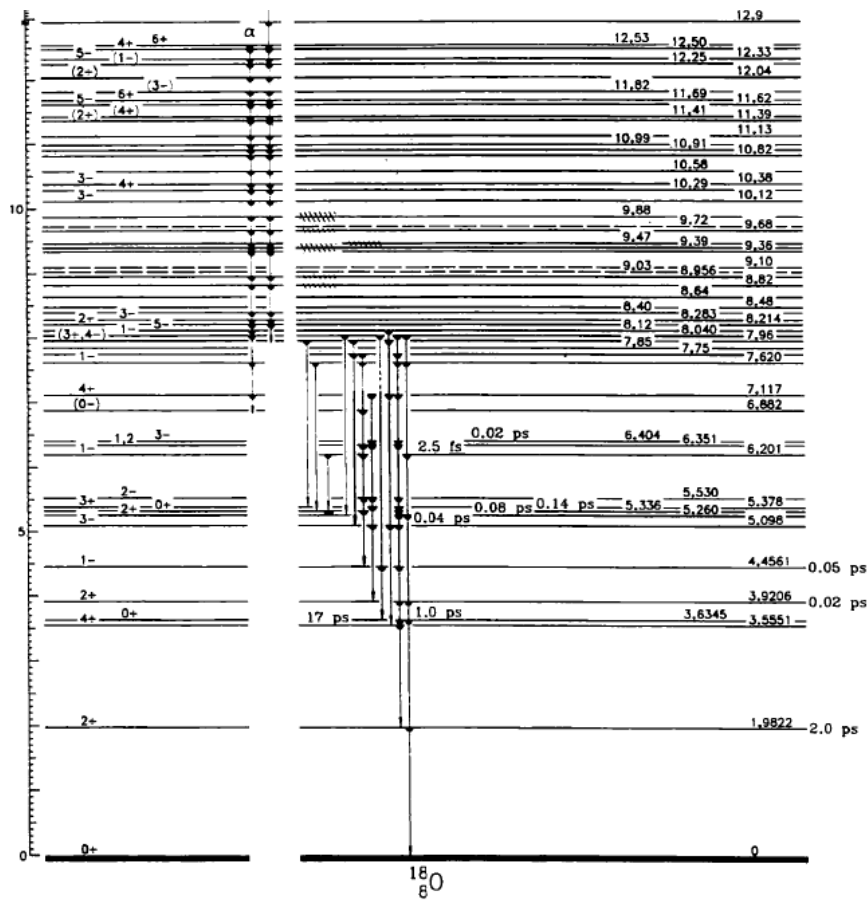
→吸収を強くする必要あり
(ここでは表面型吸収
ポテンシャルを導入)

Spectra up to $E^* = 13$ MeV



^{16}O

20 levels

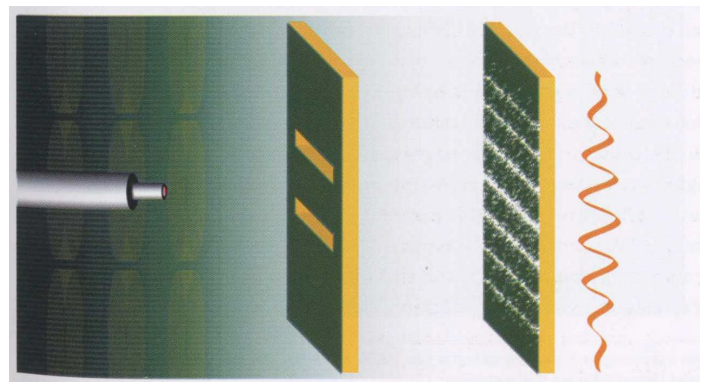
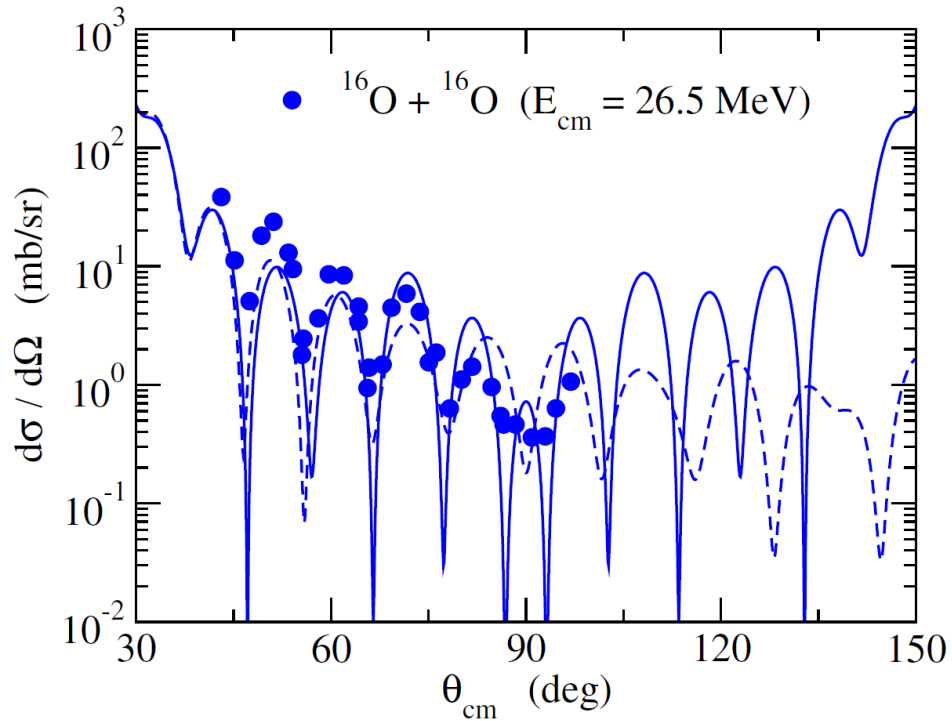


^{18}O

56 levels

cf. オープン・チャンネルの数: F. Haas and Y. Abe, PRL46('81)1667

干渉の起源

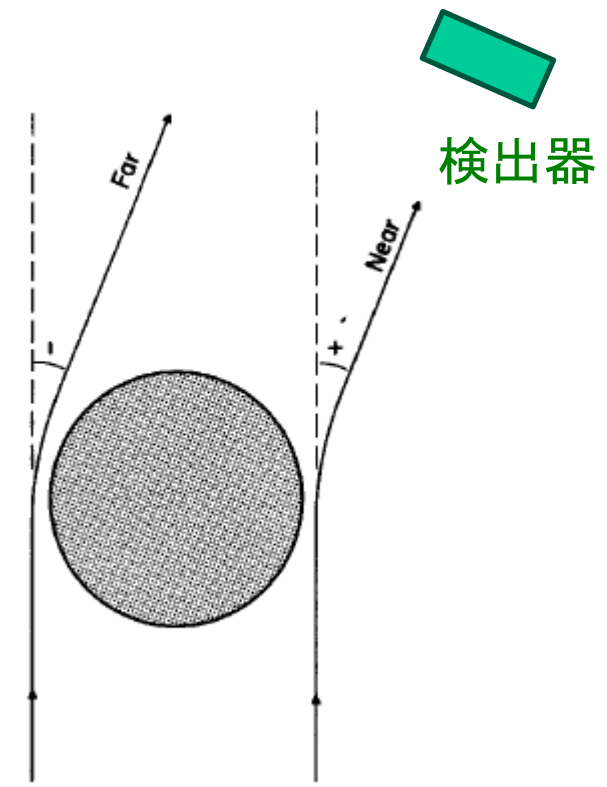


cf. 二重スリット

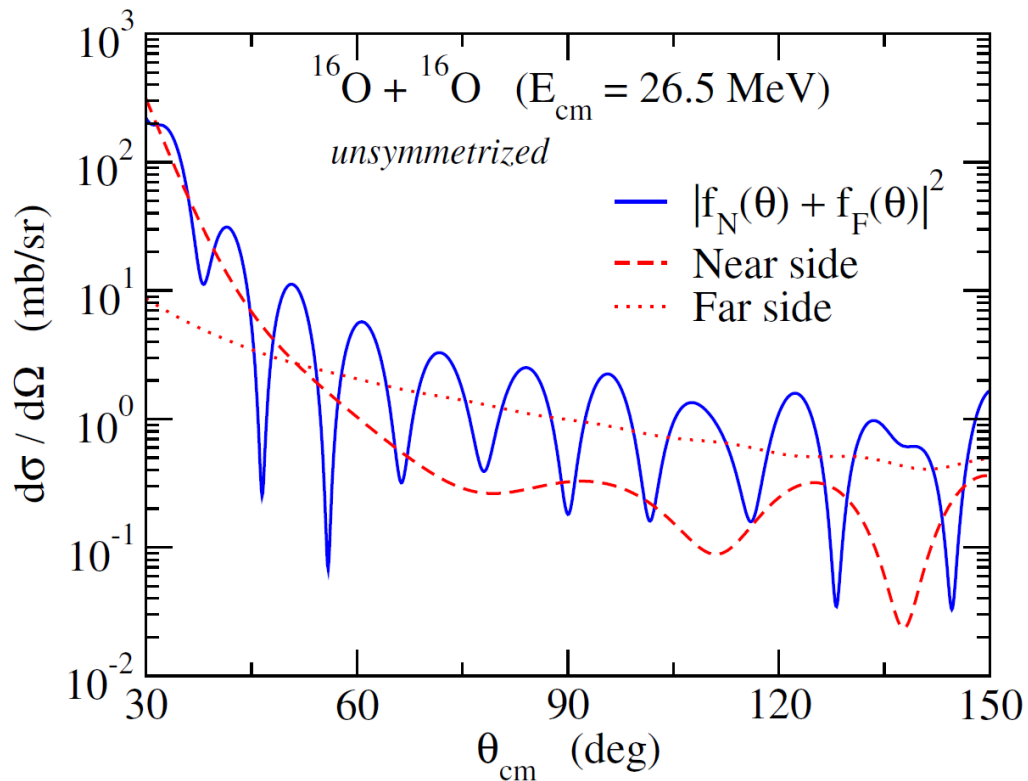
対称化しなくても強い振動



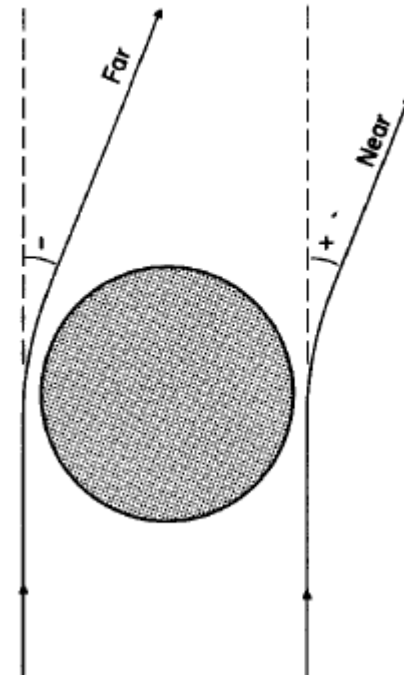
- ✓ 対称化による干渉はマイナー
- ✓ near-sideとfar-sideの干渉が主



M.S. Hussein and K.W. McVoy,
PPNP 12 ('84)103.



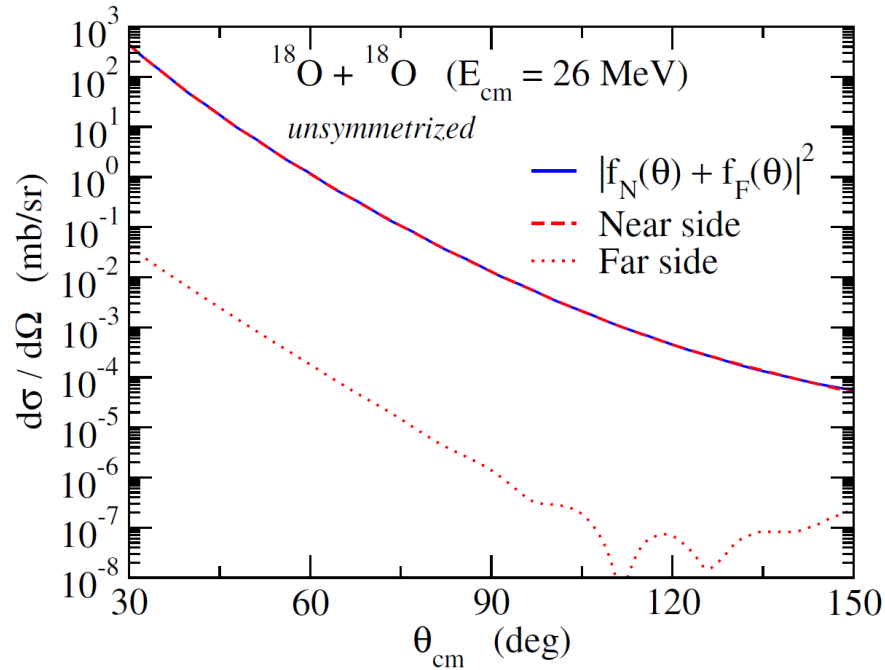
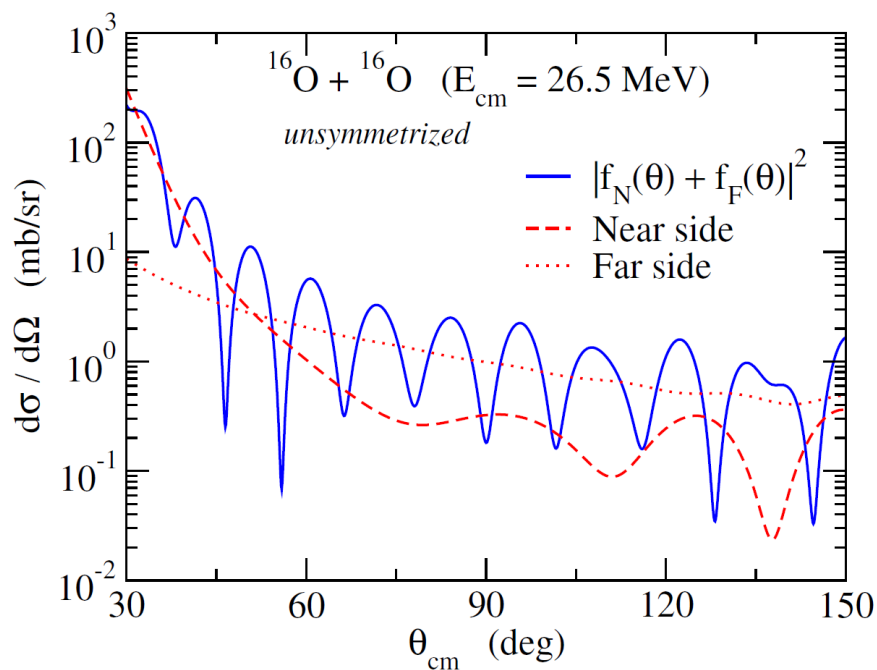
near side-far side interference



$$P_l(\cos \theta) \rightarrow \frac{1}{2} \left[P_l(\cos \theta) \mp i \frac{2}{\pi} Q_l(\cos \theta) \right]$$

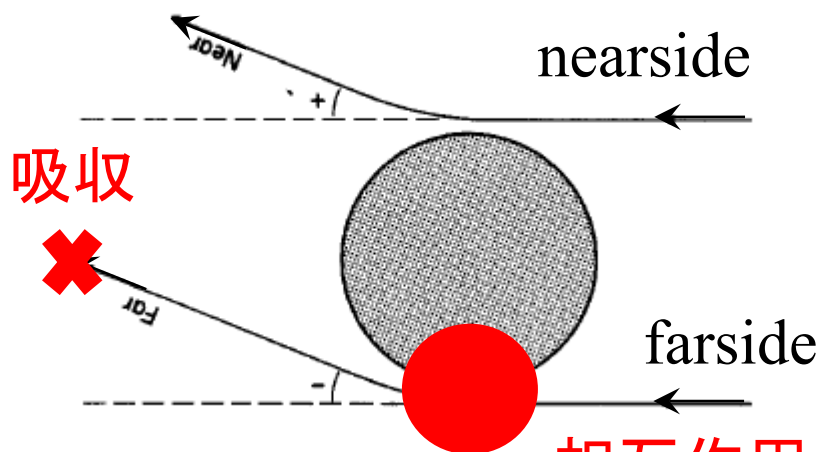
↗ N
↘ F

Q_l : 第2種ベッセル関数



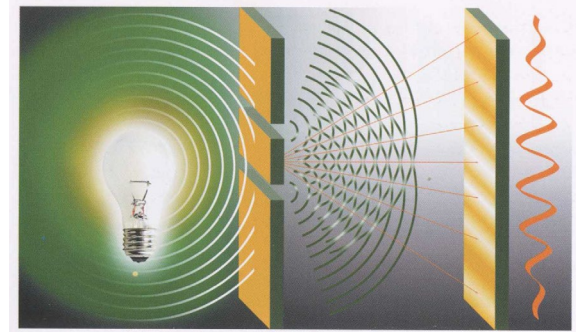
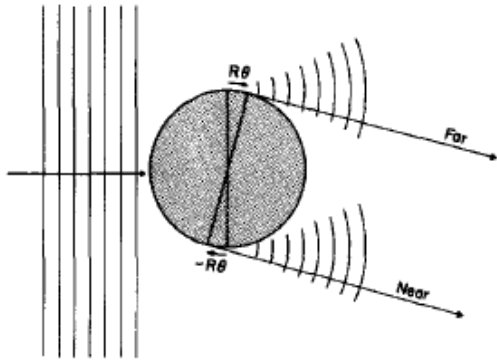
強い吸収のため、 $^{18}\text{O}+^{18}\text{O}$ では far-side 成分が大きく減衰
 → 干渉パターンがほとんど消えている

cf. 一重スリット



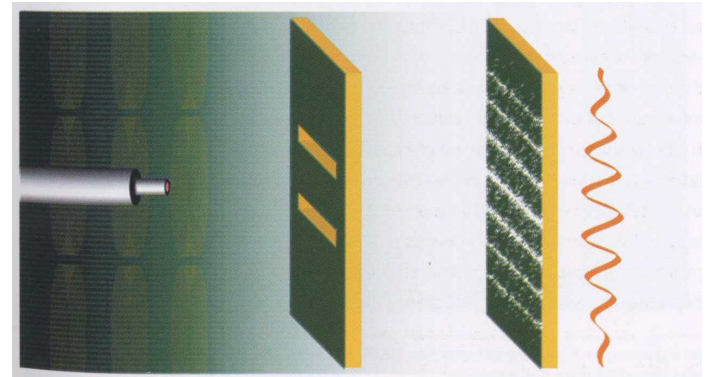
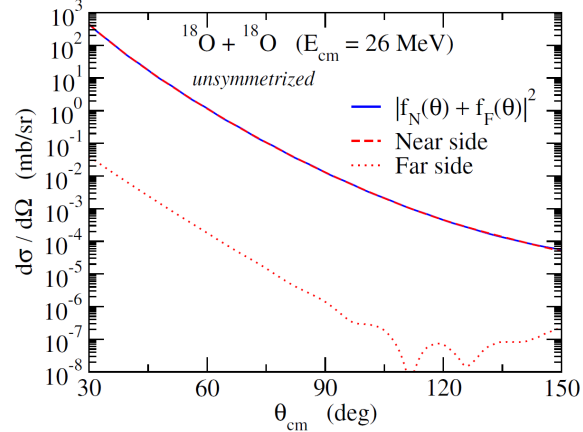
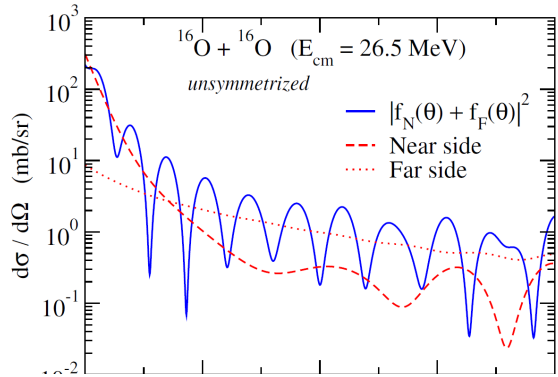
相互作用→デコヒーレンス

analogy to the double slit problem



M.S. Hussein and K.W. McVoy,
 Prog. in Part. and Nucl. Phys. 12 ('84)103

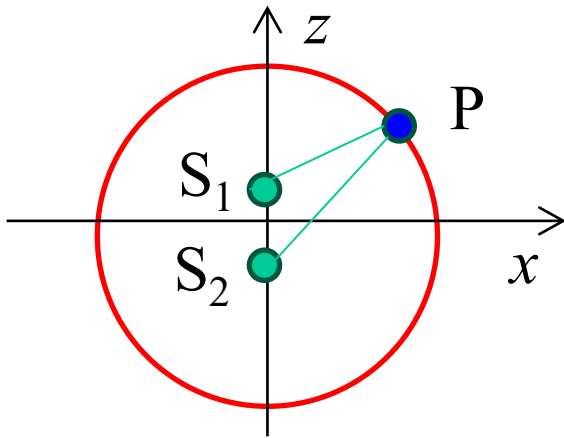
J. Al-Khalili, "Quantum"



核反応のイメージング

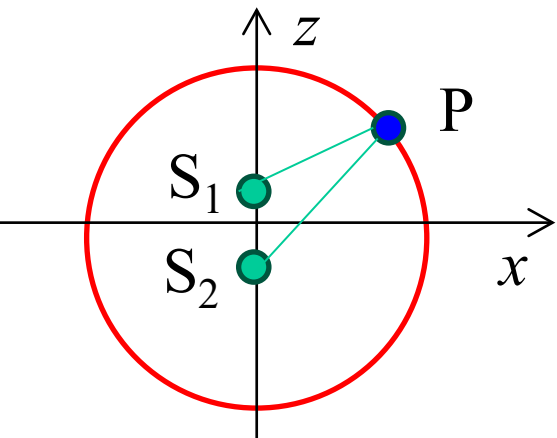
K. Hagino and T. Yoda, in preparation

点Pにレンズをおき、スクリーン上に「集光」する
散乱振幅のフーリエ変換



$$\Phi(X, Y) \propto \int_{\theta_0 - \Delta\theta}^{\theta_0 + \Delta\theta} \sin \theta d\theta \int_{\varphi_0 - \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} d\varphi \times e^{ik((\theta - \theta_0)X + (\varphi - \varphi_0)Y)} f(\theta, \varphi)$$

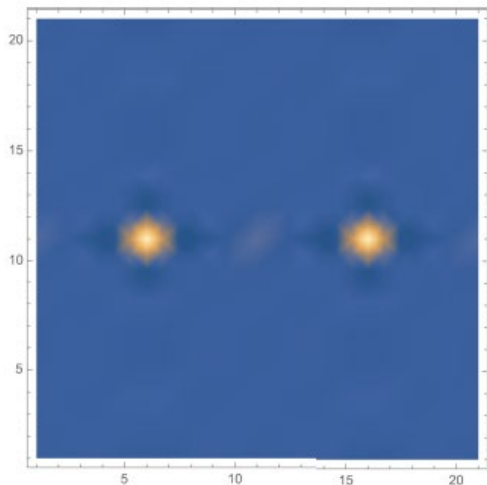
$$I(X, Y) = |\Phi(X, Y)|^2$$



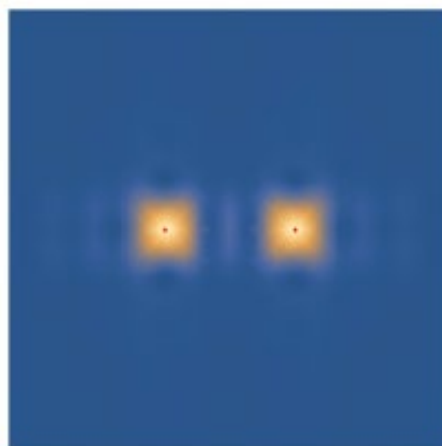
散乱振幅のフーリエ変換

$$\Phi(X, Y) \propto \int_{\theta_0 - \Delta\theta}^{\theta_0 + \Delta\theta} \sin \theta d\theta \int_{\varphi_0 - \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} d\varphi \times e^{ik((\theta - \theta_0)X + (\varphi - \varphi_0)Y)} f(\theta, \varphi)$$

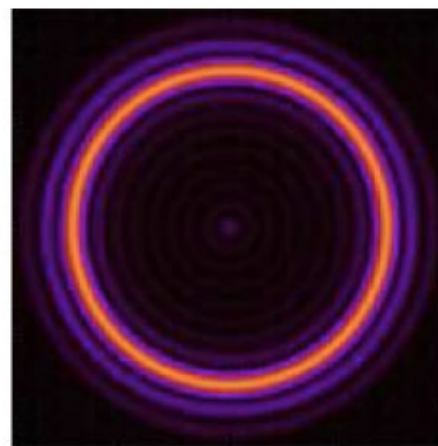
$$I(X, Y) = |\Phi(X, Y)|^2$$



二重スリットの問題



弦の散乱



AdS/CFTによるブラックホールのイメージング

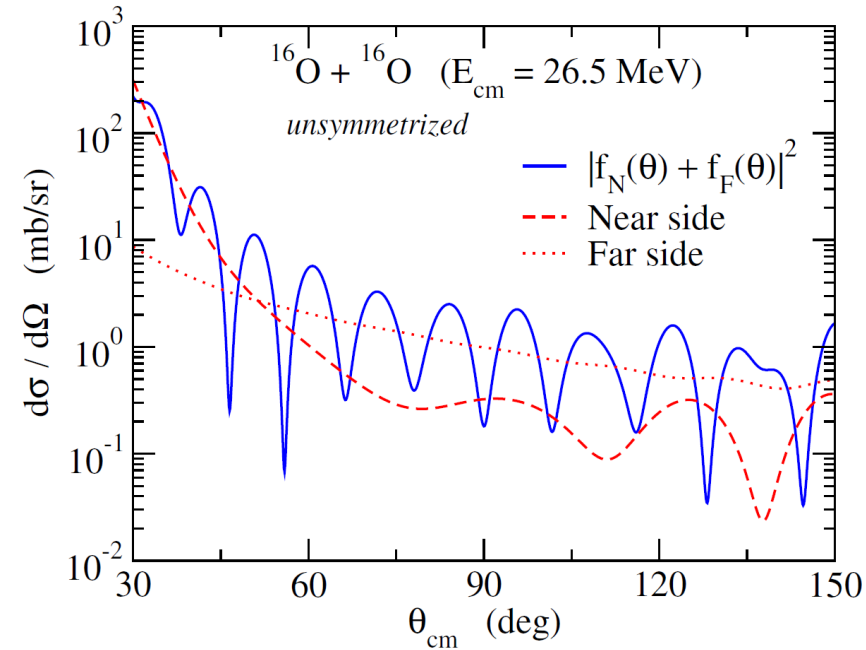
K. Hashimoto, Y. Matsuo, and T. Yoda, PTEP2023, 043B04 (2023)

K. Hashimoto, S. Kinoshita, and K. Murata, PRL123, 031602 (2019)

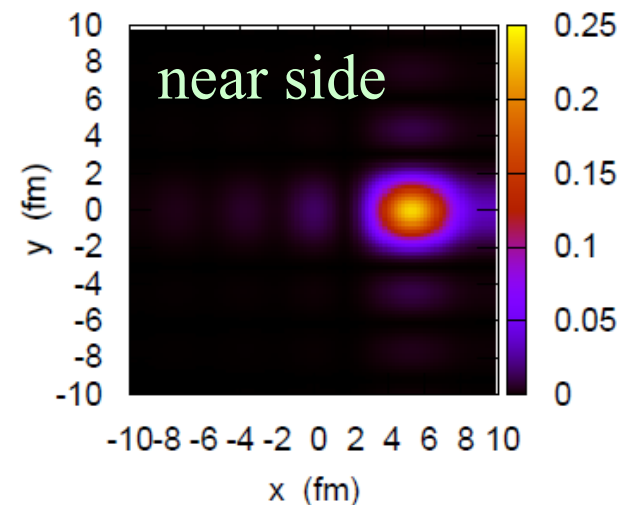
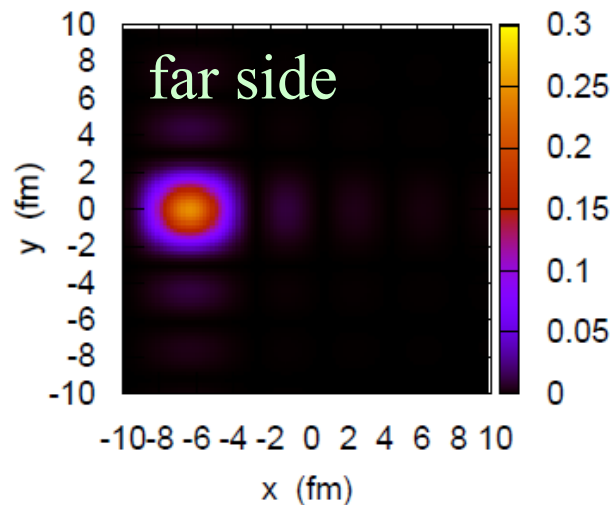
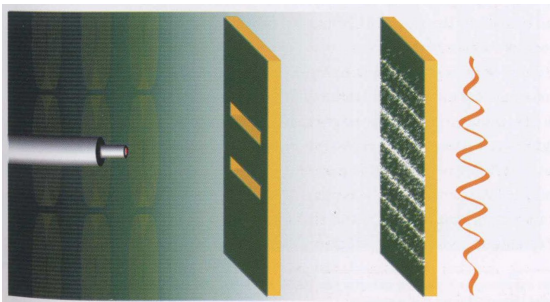
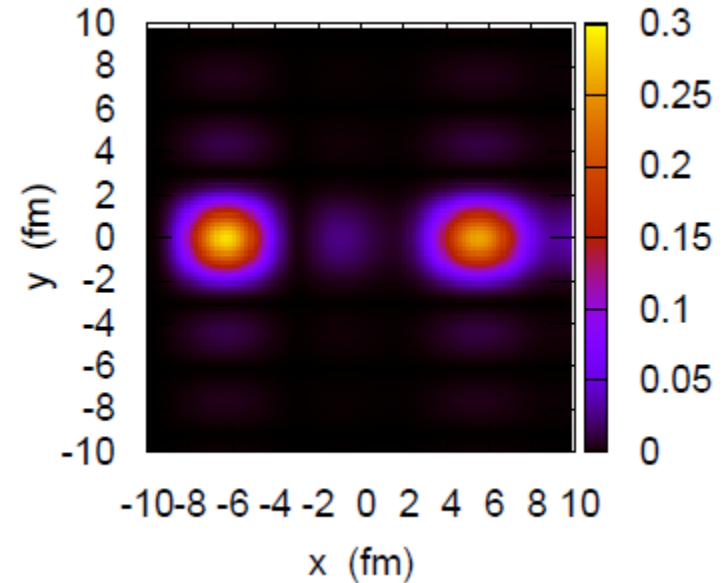
PRD101, 066018 (2020)

核反応のイメージング

K. Hagino and T. Yoda, in preparation

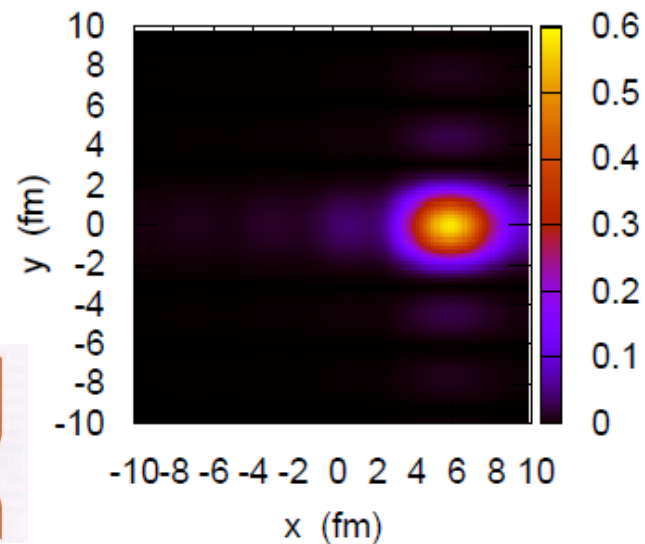
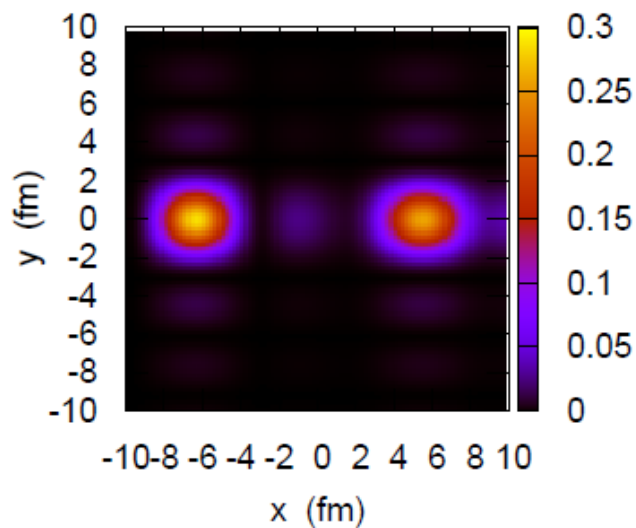
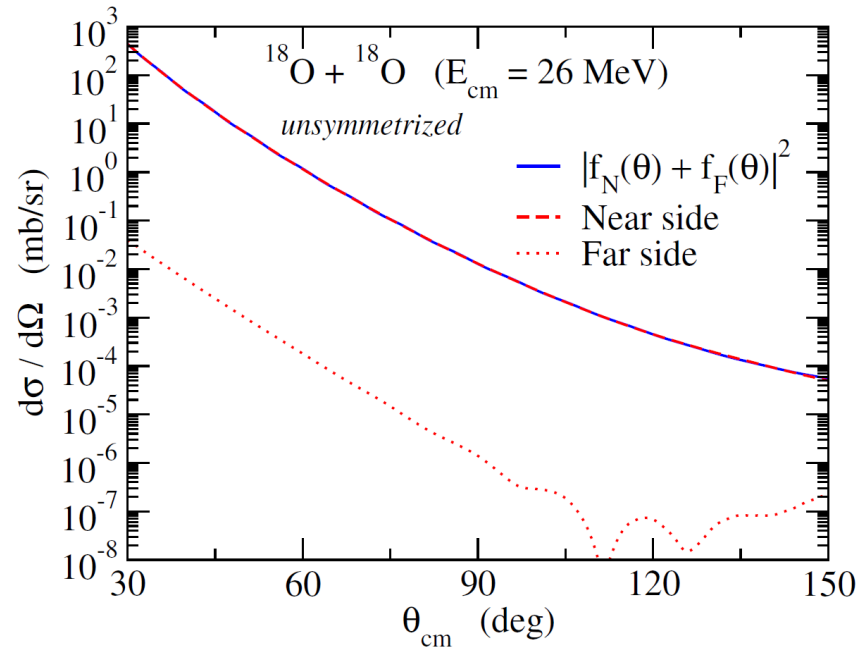
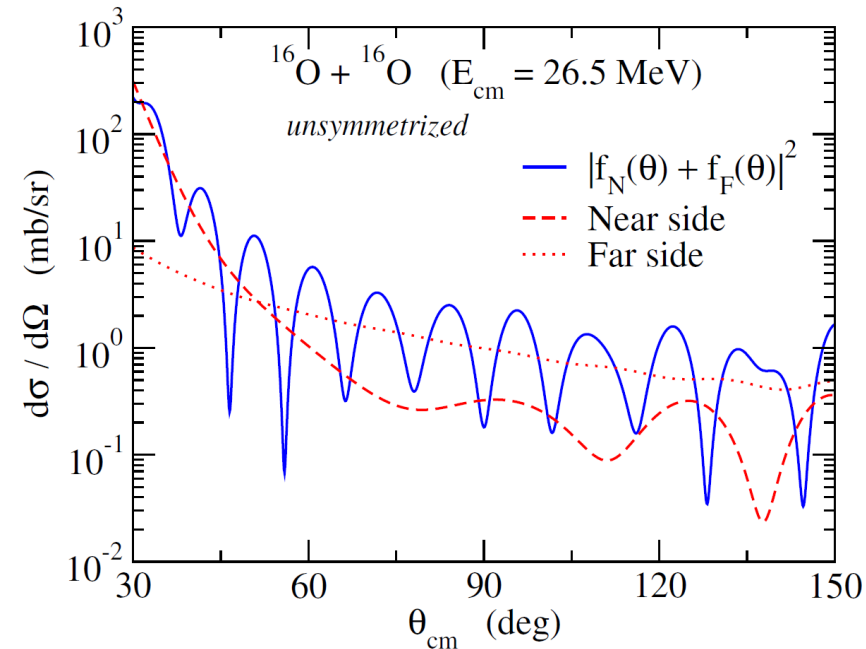


$\theta_0 = 55$ deg., $\Delta\theta = 15$ deg.

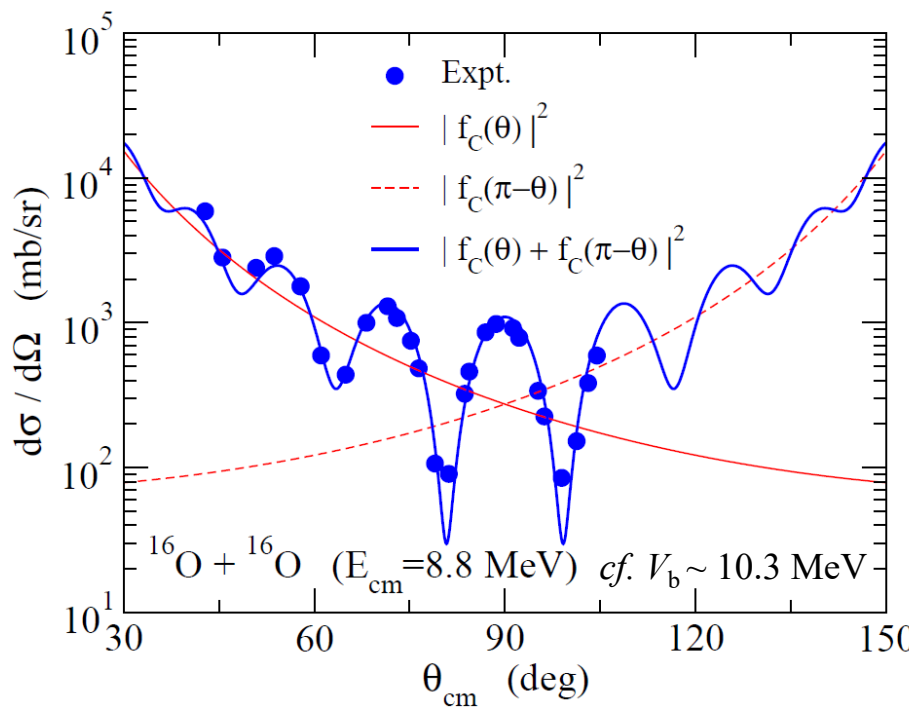


核反応のイメージング

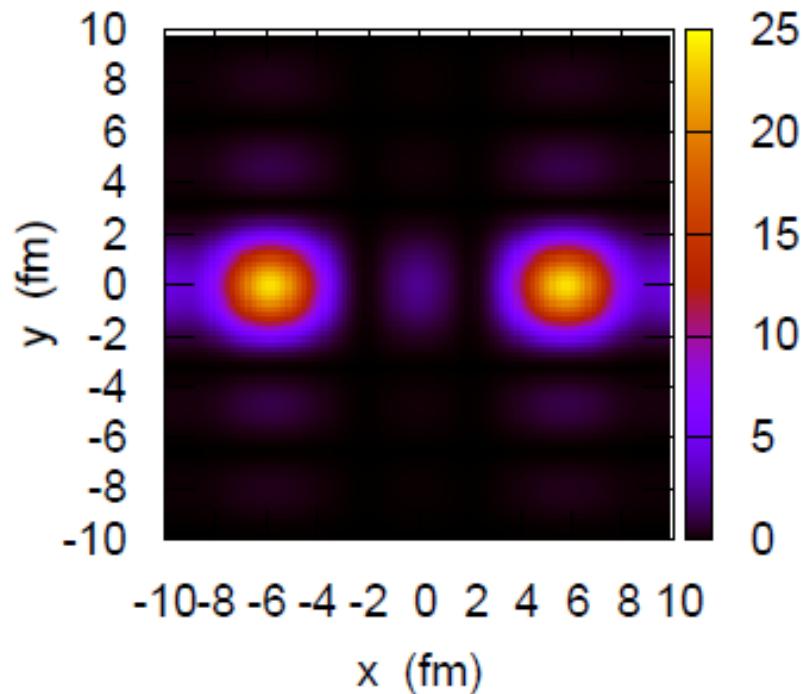
K. Hagino and T. Yoda, in preparation



Mott 散乱のイメージング



$\theta_0 = 90$ deg., $\Delta\theta = 30$ deg.

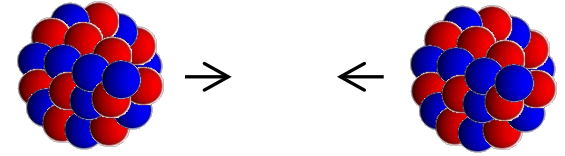


expt: D.A. Bromley et al., Phys. Rev. 123 ('61)878

まとめ

量子多体现象としての核反応

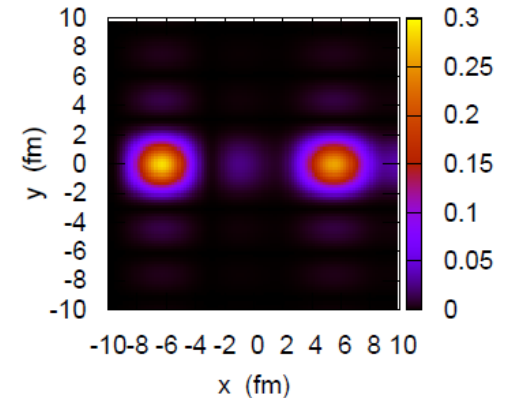
- ✓核構造との強いつながり、インタープレイ
- ✓種々の内部自由度
- ✓結合チャンネル法の発展



✓種々の干渉現象

- 同種粒子の入れ替えに対する(反)対称性
- farside-nearside の干渉
- barrier-wave と internal-wave の干渉

✓イメージング:新しい試み



残された課題:

- 微視的記述(多粒子系の量子トンネル現象を含む)
- (多)核子移行反応と核子相関
- 超重元素生成反応、核分裂