カイラル有効理論とG行列理論による、QCDに基づいた核反応の理解に向けて

九大院理, 九歯大[A]
豊川将一,蓑茂工将,河野通郎[A],八尋正信

RCNP/九大研究会
「ハドロン物理と原子核物理のクロスオーバー」
5 September, 2013

現在までの研究

- 微視的手法を用いた核子-原子核弾性散乱の系統的解析
  - 弾性散乱は最も基本的な原子核の反応
  - 光学ポテンシャルによってよく記述される

入射核-標的核間の複素ポテンシャル

$$[K + U(R) - E]\chi(\boldsymbol{R}) = 0$$

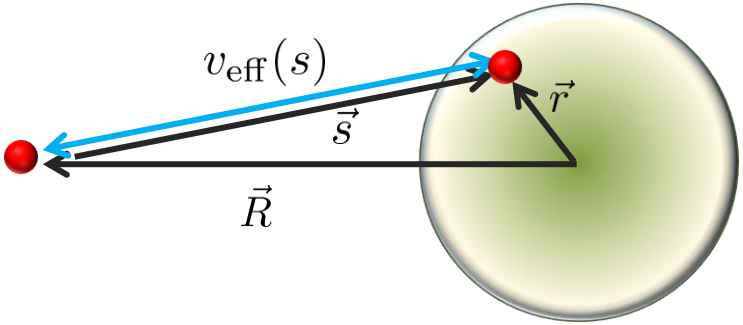
  - ただし信頼出来る光学ポテンシャルを用いる必要がある

- 畳み込み模型により微視的に光学ポテンシャルを構築
  - 核力から出発した弾性散乱の記述
  - 核反応の微視的な理解は重要な課題

畳み込み模型

- 微視的光学ポテンシャルの構築
  - 2核子間有効相互作用を標的核密度で畳み込む

$$U(R) = \int d\boldsymbol{r} v_{\mathrm{eff}}(s)\rho(r)$$



- 有効相互作用
  - 裸の核力から得られる、多重散乱の効果を取り入れた相互作用

$$v_{\mathrm{eff}} = v + v\frac{1}{E - K + i\varepsilon}v_{\mathrm{eff}}$$

真空中での有効相互作用（T行列）

  - ただし標的核内の核子は真空中ではなく“有限密度”中にある

    ⇒ 媒質効果を含む有効相互作用を用いる

G行列

- G行列はBethe-Goldstone方程式を解くことで得られる

核物質中での2核子散乱を記述

(核物質：一様密度で無限に広がった原子核)

$$G = v + v\frac{Q}{E - K - U + i\varepsilon}G$$

Pauli 演算子

フェルミ運動量以下の状態に入ることを禁止

平均ポテンシャル

Gを用いて求められる

⇒ GとUは自己無撞着に解かれる

- Pauli演算子と平均ポテンシャルによって G行列に媒質効果が取り入れられている

(密度依存性)

注目した物理量

- 微分断面積　$d\sigma/d\Omega$
  - 入射核子がある角度にどの程度の割合で散乱されるか
  - 光学ポテンシャルの形を如実に反映 ⇒ 標的核の密度分布を反映

- 偏極分解能　A_y
  - 入射核子のスピンの向きで微分断面積がどれだけ異なるか

$$A_y = \frac{(d\sigma/d\Omega)_\uparrow - (d\sigma/d\Omega)_\downarrow}{(d\sigma/d\Omega)_\uparrow + (d\sigma/d\Omega)_\downarrow}$$

- 反応断面積　σ_{R}
  - 入射核子によって“弾性散乱以外の反応”がどれだけ起こるか

    分解反応, 非弾性散乱など
  - 標的核の半径を反映

- 有効相互作用
  - Melbourne G行列　K. Amos *et al.*,*Adv. in Nucl. Phys.*, Vol. 25, p. 275 (2000).
  - Franey Love T行列　M. A. Franey and W. G. Love, Phys. Rev. C**31**, 488 (1985).

    2核子散乱の位相差を合わせるように決定

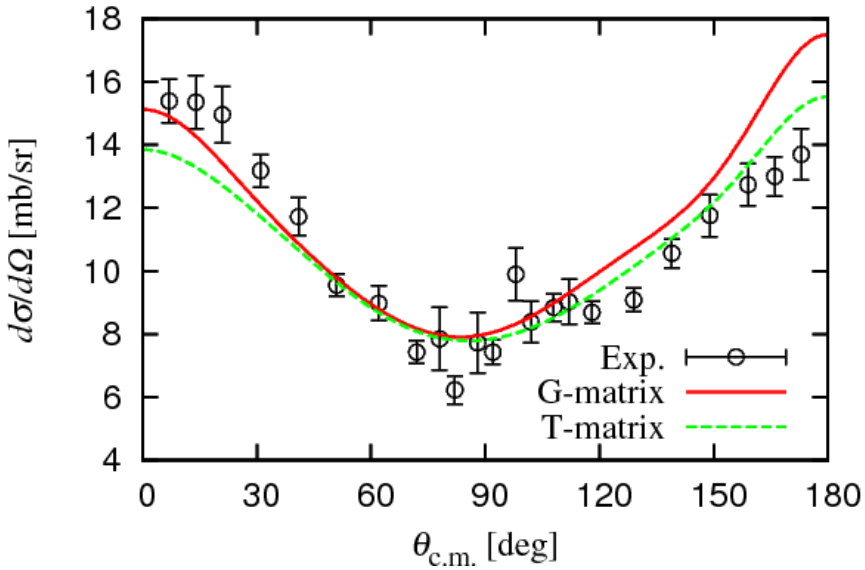
    ⇒ 核子-核子散乱に対して高い信頼性

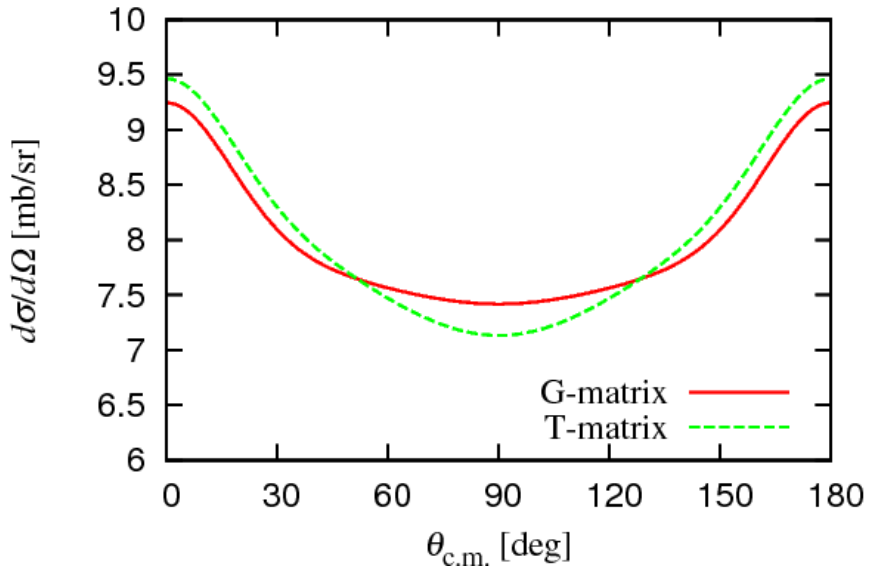
- 標的核密度
  - 軽い核 (A ≦ 40) ⇒ 現象論的 (電子散乱)
  - 重い核 (A ＞ 40) ⇒ 理論的 (HF with Gogny D1S)

核子-核子弾性散乱

- 核子-核子弾性散乱の微分断面積
  - 入射エネルギー　E=63MeV

p-n 散乱　J. P. Scanlon *et al.*, Nucl. Phys. 41, 401 (1963)　*n-n* 散乱



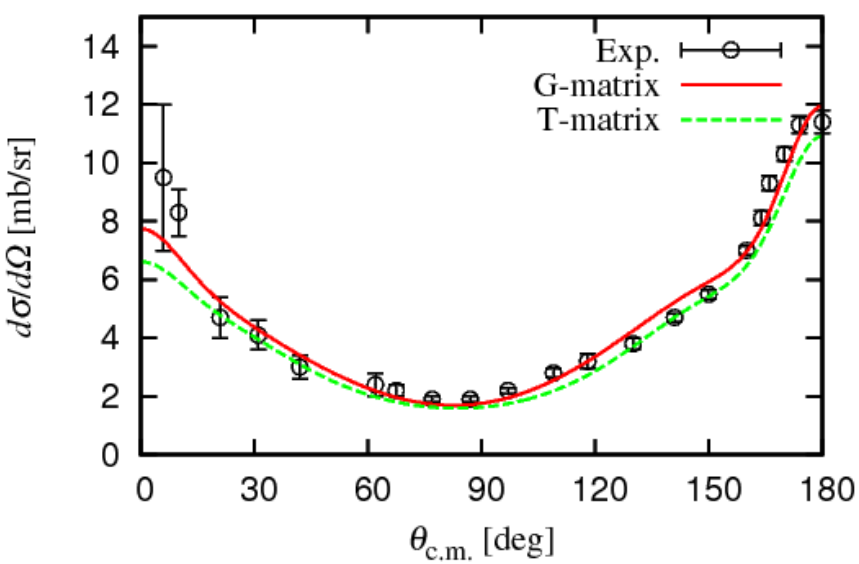


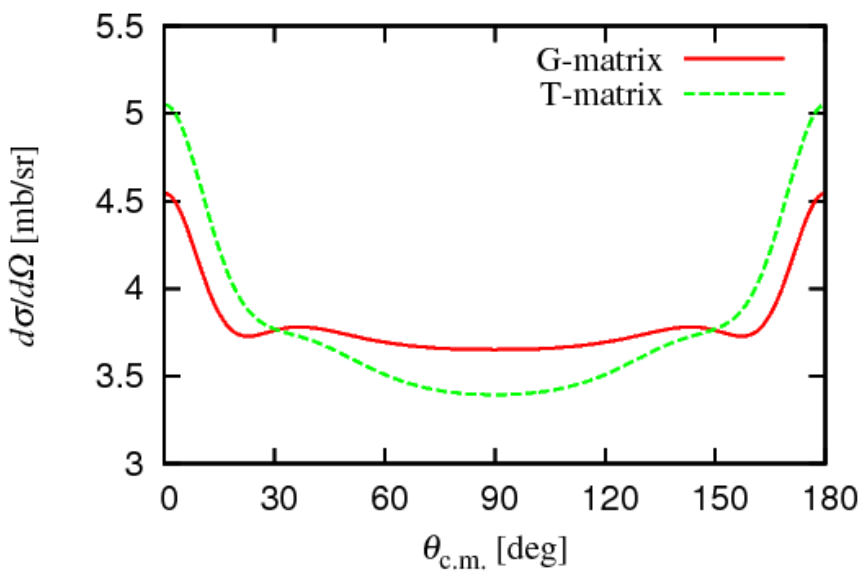
・G行列とT行列は同程度に実験を再現
・核子-核散乱でどれだけ差が見えるか

核子-核子弾性散乱

- 核子-核子弾性散乱の微分断面積
  - 入射エネルギー　E=200MeV

p-n 散乱　Yu. M. Kazarinov *et al.*, ZET, 43, 35 (1962)　*n-n* 散乱

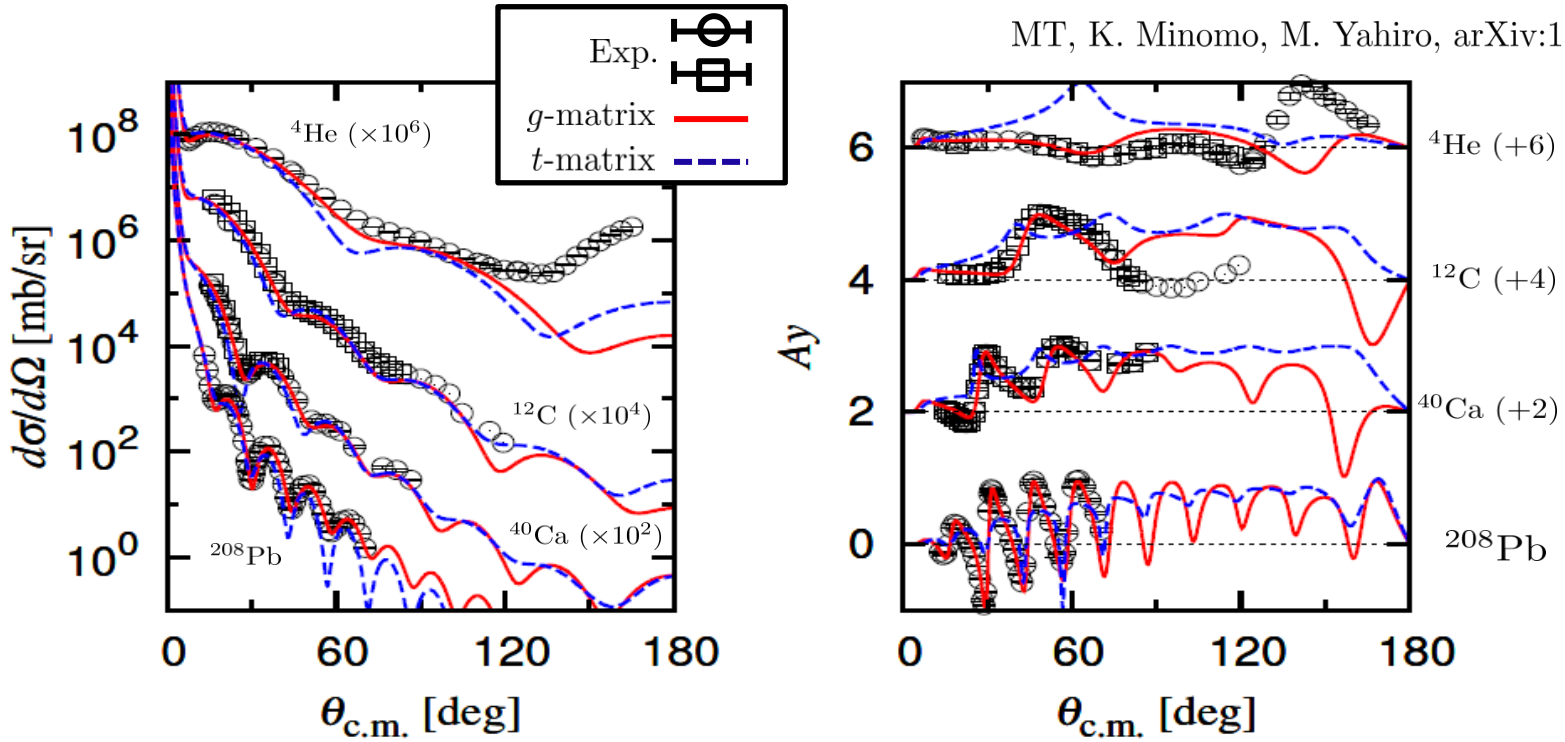




陽子-安定核散乱

- 陽子-安定核弾性散乱の微分断面積(左)と偏極分解能(右)
  - 標的核は^{4}He,^{12}C,^{40}Ca,^{208}Pb　,　入射エネルギー　E=65MeV

MT, K. Minomo, M. Yahiro, arXiv:1304.7884

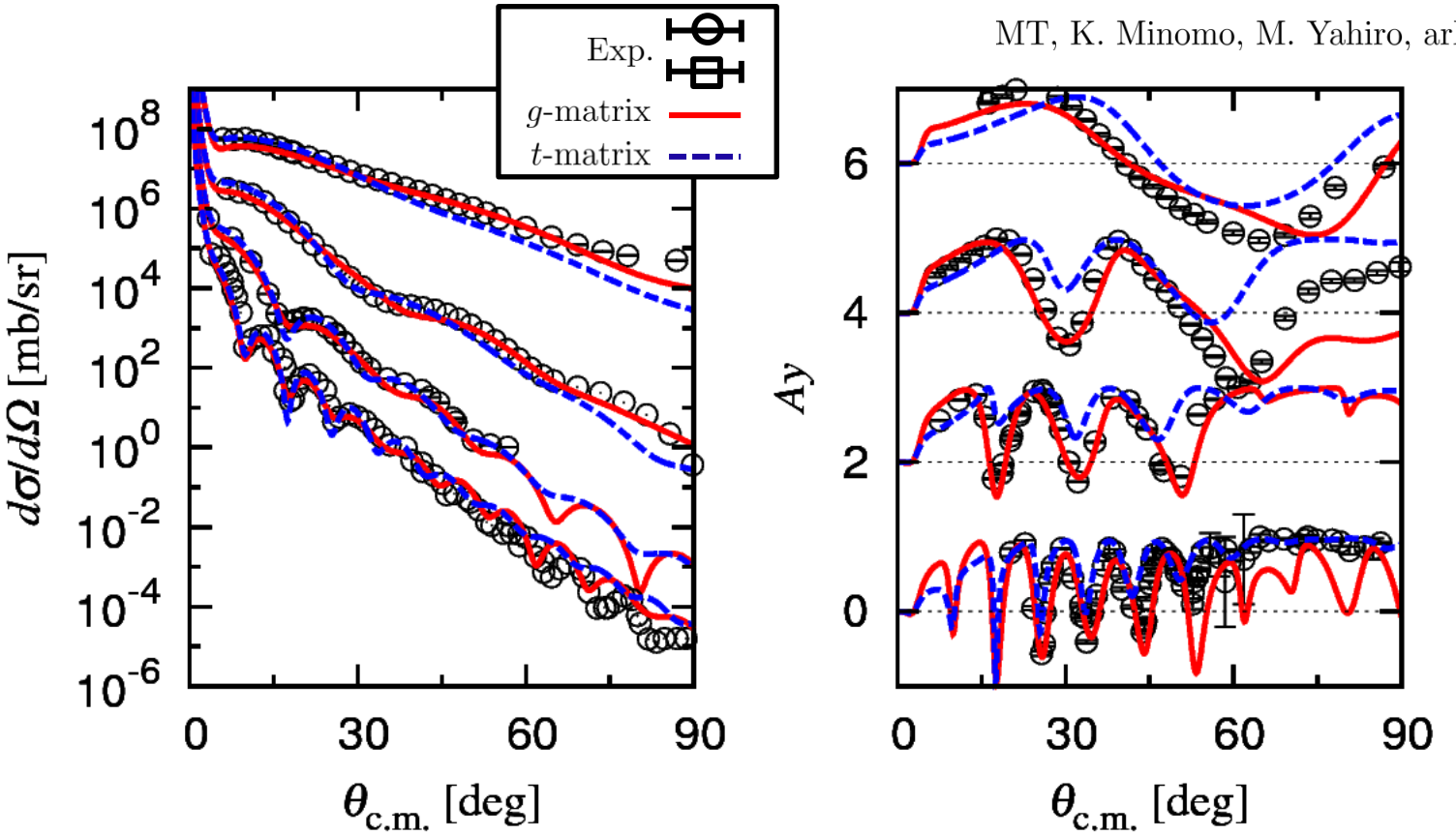


・G行列は調整パラメータなしに実験をよく再現
・G行列とT行列の違い(媒質効果)は偏極分解能で顕著

陽子-安定核散乱

- 陽子-安定核弾性散乱の微分断面積(左)と偏極分解能(右)
  - 標的核は^{4}He,^{12}C,^{40}Ca,^{208}Pb　,　入射エネルギー　E=200MeV

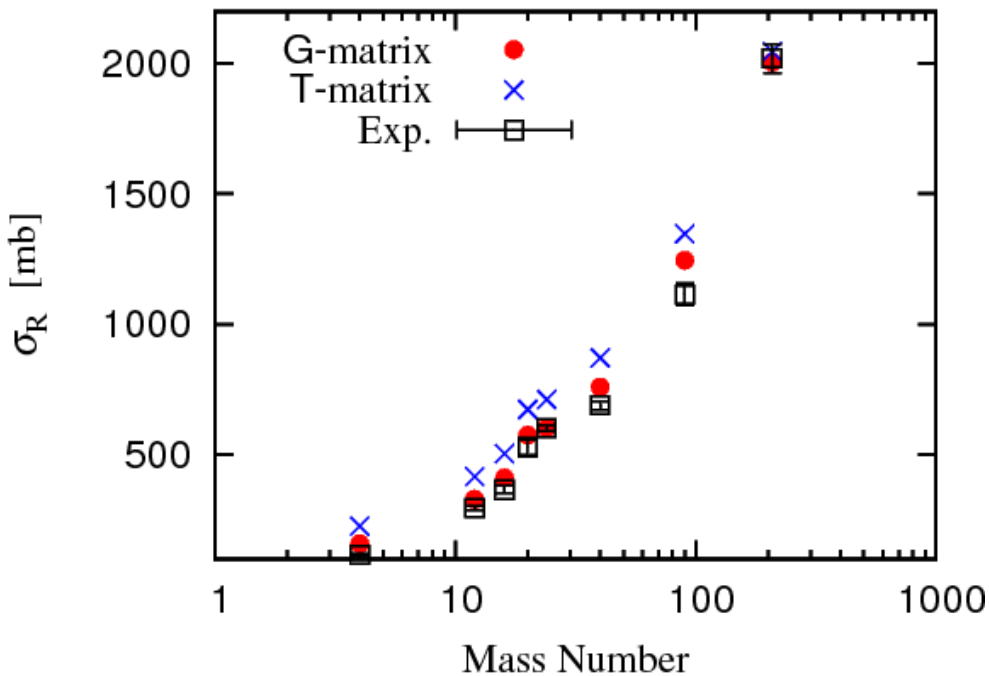
MT, K. Minomo, M. Yahiro, arXiv:1304.7884



陽子-安定核散乱

- 陽子-安定核散乱の反応断面積
  - 標的核は^{4}He,^{12}C,^{16}O,^{20}Ne,^{24}Mg,^{40}Ca,^{90}Zr^{208}Pb
  - 入射エネルギー　E～60MeV

MT, K. Minomo, M. Yahiro, arXiv:1304.7884

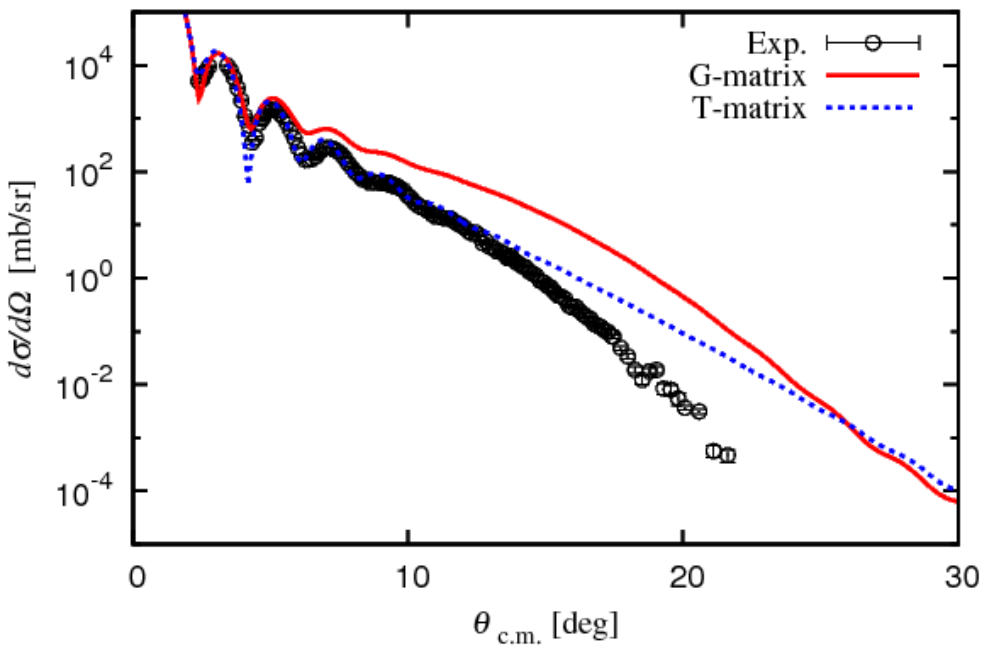


・G行列と実験の差は大きくても10%程度
・反応断面積でも媒質効果がよくみえる

安定核-安定核散乱

- ^{16}O-^{16}O弾性散乱の微分断面積
  - 入射エネルギー　E=70MeV/A

Dao T. Khoa *et al.*, Nucl. Phys. A 672, 387 (2000)



・二重畳み込み模型による解析　$U(R) = \int d\boldsymbol{r}_{\mathrm{T}} d\boldsymbol{r}_{\mathrm{P}} G(s,\rho)\rho_{\mathrm{T}}(r_{\mathrm{T}})\rho_{\mathrm{P}}(r_{\mathrm{P}})$

・G行列は後方で実験を過大評価

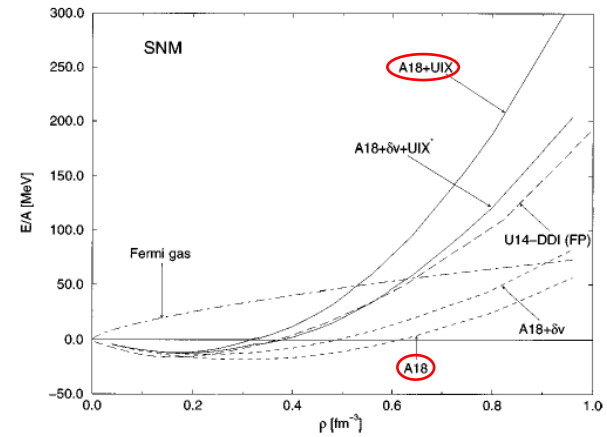
⇒ 3体力の効果で改善の可能性

(T. Furumoto *et al.*,PRC 80,-44614(2009) で主張されている)

3体力

- 3体力は核物理における大きなテーマの1つ
  - 原子核の束縛エネルギーの説明　ex.) ^{4}He
  - 核物質の飽和性は2体力だけでは推定値を再現しない

A. Akmal *et al.*, Phys. Rev. C 58,1804 (1998)



- 核反応における3体力の効果
  - 3体力を含むG行列を構築・反応解析
  - ただし3体力のそのままの取り扱いは困難

  ⇒3体力を2体力化(密度依存型)して取り入れる

- 既存のG行列は現象論的核力(+現象論的3体力)から構築

  ⇒　統一された理論的枠組で決定された
  核力+3体力を用いてG行列を構築したい

カイラル有効理論と核力

- QCDに基づいて核力を決定する盛んな試み
  - カイラル有効理論（Ch-EFT）
    QCDと等価な低エネルギー有効理論
    2体力と3体力を同じ枠組みで決定

Ch-EFTから決定された核力

↓

G行列の構築

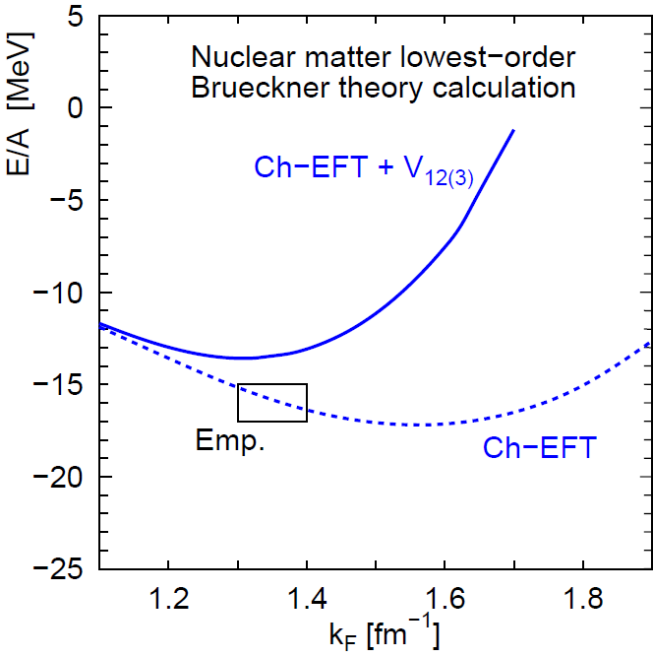
↓

反応解析へ適用

↓

QCDに基づいた核反応の理解
3体力の定量的理解

対称核物質の飽和性



まとめ

- 畳み込み模型による核子-核弾性散乱の解析
  - Melbourne G行列は実験を良く再現
  - 媒質効果は偏極分解能や反応断面積で顕著

- 核-核弾性散乱では後方で実験を過大評価
  - 3体力の必要性

- カイラル有効理論の核力から新しいG行列を構築し、反応解析に適用することで
  - QCDに基づいた核反応の理解
  - 核反応における3体力の役割の定量的理解　を目指す