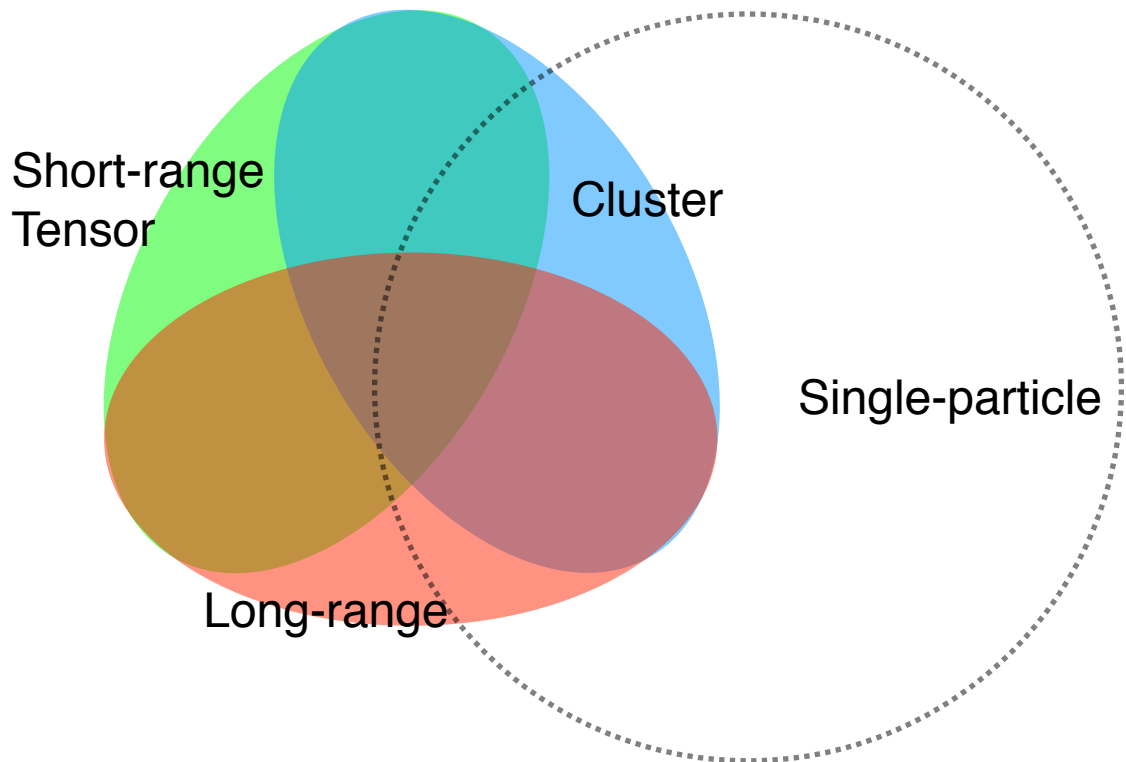


# 日本の核物理の将来ワーキンググループ

## 不安定核ワーキンググループ

### (核内)N-N相関



- トピックス
- (歴史)
- 現状
- 今後

川畑 貴裕 (京大)、近藤 洋介 (東工大)  
山口 英斉 (東大CNS)、**王 恵仁** (阪大RCNP)

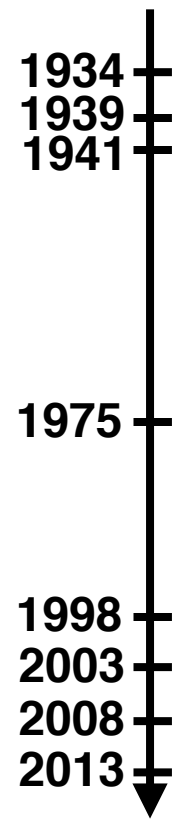
# トピックス

- 短距離相関、テンソル相関 (王)
- 長距離相関  
(近藤)
- ダイニュートロン相関、ダイプロトン相関
- テトラニュートロン  
(山口、川畑)
- アルファクラスター状態、クラスター状態

# 目次

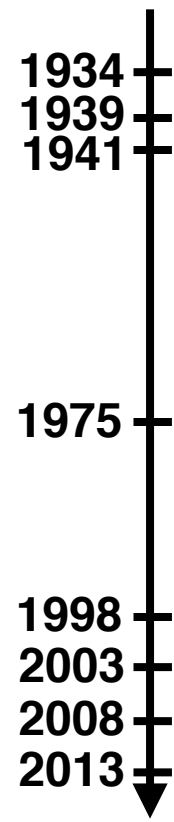
- テンソル・短距離相関の歴史を振り返る
- 現状
  - 実験手法、どこまで解明されているか
  - 課題、問題点
- 戦略及び今後の展望

# テンソル・短距離相関実験史



- (1) J.Chadwick *et al.*, Nature 134(1934)237
- (2) J.Kellogg *et al.*, Phys.Rev. 55(1939)318
- (3) J.Schwinger, Phys.Rev. 55(1939)235; H.A.Bethe, *ibid.* 57(1940)390
- (4) L.D.Knutson *et al.*, Phys.Rev.Lett. 35(1975)1570; S.Roman *et al.*, Nucl.Phys.A 289(1977)269; B.C.Karp *et al.*, Phys.Rev.Lett. 53(1984)1619; etc. etc.
- (5) C.J.G.Onderwater *et al.*, Phys.Rev.Lett. 81(1998)2213
- (6) A.Tang *et al.*, Phys.Rev.Lett. 90(2003)042301
- (7) R. Subedi *et al.*, Science 320(2008)1476
- (8) H.J.Ong *et al.*, Phys.Lett.B 725(2013)277

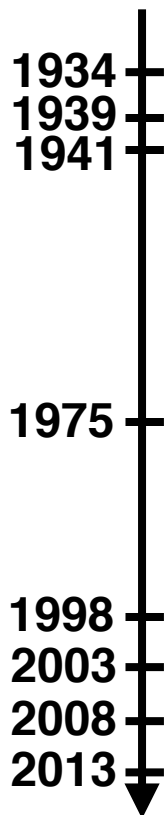
# テンソル・短距離相関実験史



- 重陽子(“diplon”)の束縛エネルギー(BE)測定 (1)
- 重陽子の電気四重極モーメント(Q<sub>2</sub>)の発見 (2)
- テンソル力(非中心力)による重陽子のBE、Q<sub>2</sub>の説明 (3)

(1) J.Chadwick *et al.*, Nature 134(1934)237  
 (2) J.Kellogg *et al.*, Phys.Rev. 55(1939)318  
 (3) J.Schwinger, Phys.Rev. 55(1939)235; H.A.Bethe, *ibid.* 57(1940)390  
 (4) L.D.Knutson *et al.*, Phys.Rev.Lett. 35(1975)1570; S.Roman *et al.*, Nucl.Phys.A 289(1977)269;  
 B.C.Karp *et al.*, Phys.Rev.Lett. 53(1984)1619; etc. etc.  
 (5) C.J.G.Onderwater *et al.*, Phys.Rev.Lett. 81(1998)2213  
 (6) A.Tang *et al.*, Phys.Rev.Lett. 90(2003)042301  
 (7) R. Subedi *et al.*, Science 320(2008)1476  
 (8) H.J.Ong *et al.*, Phys.Lett.B 725(2013)277

# テンソル・短距離相関実験史



- 重陽子(“diplon”)の束縛エネルギー(BE)測定 (1)
- 重陽子の電気四重極モーメント( $Q_2$ )の発見 (2)
- テンソル力(非中心力)による重陽子のBE、 $Q_2$ の説明 (3)
- 偏極重陽子( $\vec{d}$ )ビームを用いたテンソル偏極分解能( $T_{20}, T_{21}, T_{22}$ )の測定により $t$ 、 $^3, ^4\text{He}$ のD波成分の証明 (4)

(1) J.Chadwick *et al.*, Nature 134(1934)237

(2) J.Kellogg *et al.*, Phys.Rev. 55(1939)318

(3) J.Schwinger, Phys.Rev. 55(1939)235; H.A.Bethe, *ibid.* 57(1940)390

(4) L.D.Knutson *et al.*, Phys.Rev.Lett. 35(1975)1570; S.Roman *et al.*, Nucl.Phys.A 289(1977)269; B.C.Karp *et al.*, Phys.Rev.Lett. 53(1984)1619; etc. etc.

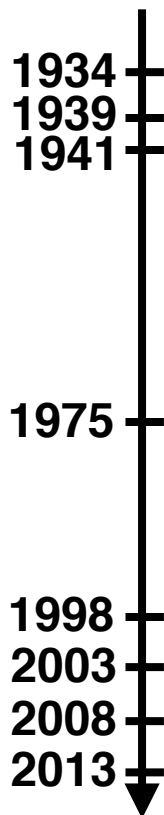
(5) C.J.G.Onderwater *et al.*, Phys.Rev.Lett. 81(1998)2213

(6) A.Tang *et al.*, Phys.Rev.Lett. 90(2003)042301

(7) R. Subedi *et al.*, Science 320(2008)1476

(8) H.J.Ong *et al.*, Phys.Lett.B 725(2013)277

# テンソル・短距離相関実験史



- 重陽子(“diplon”)の束縛エネルギー(BE)測定 (1)
- 重陽子の電気四重極モーメント( $Q_2$ )の発見 (2)
- テンソル力(非中心力)による重陽子のBE、 $Q_2$ の説明 (3)
- 偏極重陽子( $\vec{d}$ )ビームを用いたテンソル偏極分解能( $T_{20}, T_{21}, T_{22}$ )の測定により $t$ 、 $^3, ^4\text{He}$ のD波成分の証明 (4)
- $^{16}\text{O}(e, e'pp)$ から短距離相関を示唆するデータ (5)

(1) J.Chadwick *et al.*, Nature 134(1934)237

(2) J.Kellogg *et al.*, Phys.Rev. 55(1939)318

(3) J.Schwinger, Phys.Rev. 55(1939)235; H.A.Bethe, *ibid.* 57(1940)390

(4) L.D.Knutson *et al.*, Phys.Rev.Lett. 35(1975)1570; S.Roman *et al.*, Nucl.Phys.A 289(1977)269; B.C.Karp *et al.*, Phys.Rev.Lett. 53(1984)1619; etc. etc.

(5) C.J.G.Onderwater *et al.*, Phys.Rev.Lett. 81(1998)2213

(6) A.Tang *et al.*, Phys.Rev.Lett. 90(2003)042301

(7) R. Subedi *et al.*, Science 320(2008)1476

(8) H.J.Ong *et al.*, Phys.Lett.B 725(2013)277

# テンソル・短距離相関実験史

1934  
1939  
1941  
  
  
  
  
1975  
  
  
  
1998  
2003  
2008  
2013

- 重陽子(“diplon”)の束縛エネルギー(BE)測定 (1)
- 重陽子の電気四重極モーメント( $Q_2$ )の発見 (2)
- テンソル力(非中心力)による重陽子のBE、 $Q_2$ の説明 (3)
- 偏極重陽子( $\vec{d}$ )ビームを用いたテンソル偏極分解能( $T_{20}, T_{21}, T_{22}$ )の測定により $t$ 、 ${}^3, {}^4\text{He}$ のD波成分の証明 (4)
- ${}^{16}\text{O}(e, e'pp)$ から短距離相関を示唆するデータ (5)
- ${}^{12}\text{C}(p, 2pn)$ からp-n短距離相関を示唆するデータ (6)

(1) J.Chadwick *et al.*, Nature 134(1934)237

(2) J.Kellogg *et al.*, Phys.Rev. 55(1939)318

(3) J.Schwinger, Phys.Rev. 55(1939)235; H.A.Bethe, *ibid.* 57(1940)390

(4) L.D.Knutson *et al.*, Phys.Rev.Lett. 35(1975)1570; S.Roman *et al.*, Nucl.Phys.A 289(1977)269; B.C.Karp *et al.*, Phys.Rev.Lett. 53(1984)1619; etc. etc.

(5) C.J.G.Onderwater *et al.*, Phys.Rev.Lett. 81(1998)2213

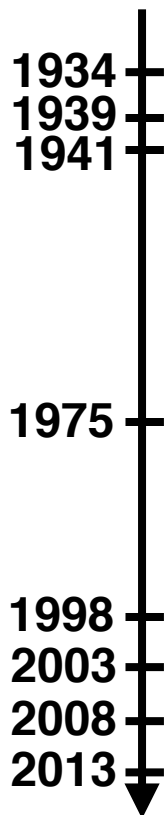
(6) A.Tang *et al.*, Phys.Rev.Lett. 90(2003)042301

(7) R. Subedi *et al.*, Science 320(2008)1476

(8) H.J.Ong *et al.*, Phys.Lett.B 725(2013)277



# テンソル・短距離相関実験史



- 重陽子(“diplon”)の束縛エネルギー(BE)測定 (1)
- 重陽子の電気四重極モーメント( $Q_2$ )の発見 (2)
- テンソル力(非中心力)による重陽子のBE、 $Q_2$ の説明 (3)
  
- 偏極重陽子( $\vec{d}$ )ビームを用いたテンソル偏極分解能( $T_{20}, T_{21}, T_{22}$ )の測定により $t$ 、 $^3, ^4\text{He}$ のD波成分の証明 (4)
  
- $^{16}\text{O}(e, e'pp)$ から短距離相関を示唆するデータ (5)
- $^{12}\text{C}(p, 2pn)$ から $p$ - $n$ 短距離相関を示唆するデータ (6)
- $^{12}\text{C}(e, e'pn)/^{12}\text{C}(e, e'pp) \sim 20$ の観測 (7)

(1) J.Chadwick *et al.*, Nature 134(1934)237

(2) J.Kellogg *et al.*, Phys.Rev. 55(1939)318

(3) J.Schwinger, Phys.Rev. 55(1939)235; H.A.Bethe, *ibid.* 57(1940)390

(4) L.D.Knutson *et al.*, Phys.Rev.Lett. 35(1975)1570; S.Roman *et al.*, Nucl.Phys.A 289(1977)269; B.C.Karp *et al.*, Phys.Rev.Lett. 53(1984)1619; etc. etc.

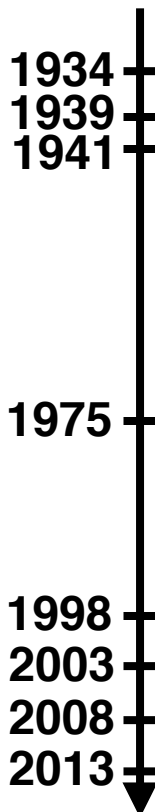
(5) C.J.G.Onderwater *et al.*, Phys.Rev.Lett. 81(1998)2213

(6) A.Tang *et al.*, Phys.Rev.Lett. 90(2003)042301

(7) R. Subedi *et al.*, Science 320(2008)1476

(8) H.J.Ong *et al.*, Phys.Lett.B 725(2013)277

# テンソル・短距離相関実験史

- 
- 重陽子(“diplon”)の束縛エネルギー(BE)測定 (1)
  - 重陽子の電気四重極モーメント( $Q_2$ )の発見 (2)
  - テンソル力(非中心力)による重陽子のBE、 $Q_2$ の説明 (3)
  
  - 偏極重陽子( $\vec{d}$ )ビームを用いたテンソル偏極分解能( $T_{20}, T_{21}, T_{22}$ )の測定により $t$ 、 $^3, ^4\text{He}$ のD波成分の証明 (4)
  
  - $^{16}\text{O}(e, e'pp)$ から短距離相関を示唆するデータ (5)
  - $^{12}\text{C}(p, 2pn)$ から $p$ - $n$ 短距離相関を示唆するデータ (6)
  - $^{12}\text{C}(e, e'pn)/^{12}\text{C}(e, e'pp) \sim 20$ の観測 (7)
  - $^{16}\text{O}(p, d)$ からテンソル相関を示唆する観測 (8)

(1) J.Chadwick *et al.*, Nature 134(1934)237

(2) J.Kellogg *et al.*, Phys.Rev. 55(1939)318

(3) J.Schwinger, Phys.Rev. 55(1939)235; H.A.Bethe, *ibid.* 57(1940)390

(4) L.D.Knutson *et al.*, Phys.Rev.Lett. 35(1975)1570; S.Roman *et al.*, Nucl.Phys.A 289(1977)269; B.C.Karp *et al.*, Phys.Rev.Lett. 53(1984)1619; etc. etc.

(5) C.J.G.Onderwater *et al.*, Phys.Rev.Lett. 81(1998)2213

(6) A.Tang *et al.*, Phys.Rev.Lett. 90(2003)042301

(7) R. Subedi *et al.*, Science 320(2008)1476

(8) H.J.Ong *et al.*, Phys.Lett.B 725(2013)277

# N-N 相関の"証拠"

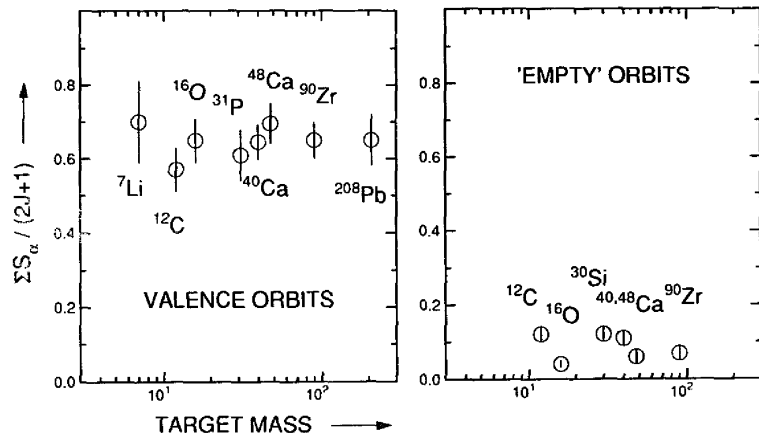
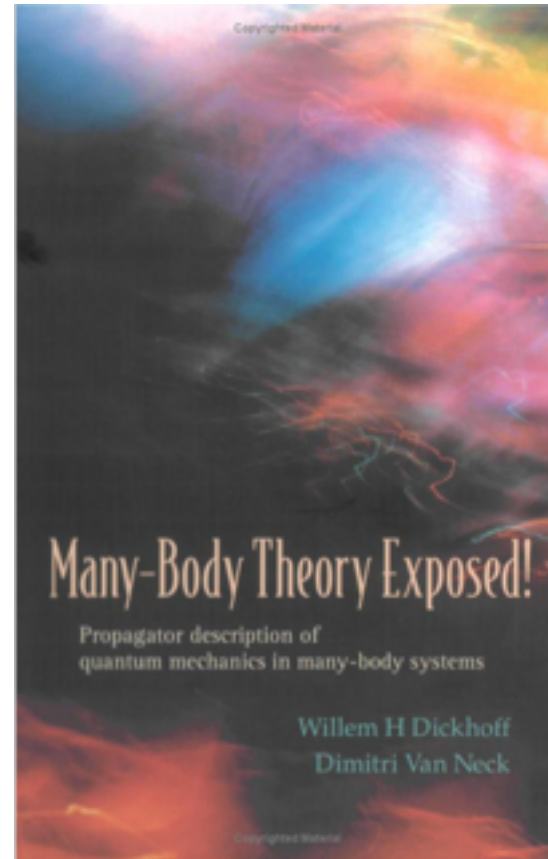


Fig. 9. Quasi-particle strength  $\Sigma S_{\alpha}/(2j+1)$  for valence orbitals (left panel) and for states just above the Fermi edge (right panel), observed in the reaction (e,e'p) as a function of the mass of the target nucleus. All strengths were integrated to an excitation energy of about 20 MeV.

L.Lapikas, Nucl.Phys.A553(1993)297c



# N-N 相関の"証拠"

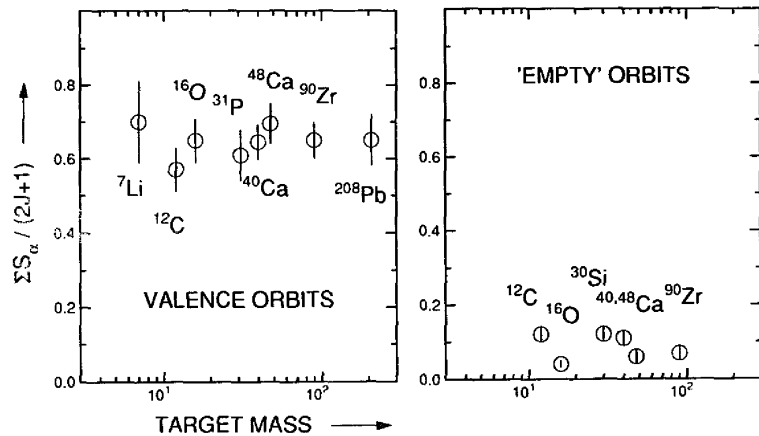
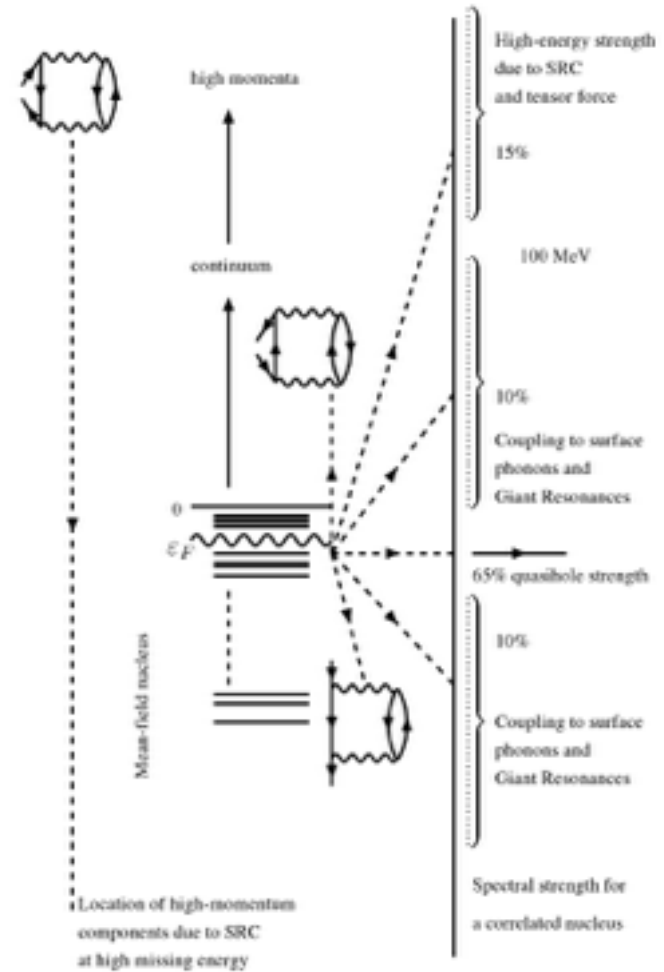


Fig. 9. Quasi-particle strength  $\Sigma S_{\alpha}/(2J+1)$  for valence orbitals (left panel) and for states just above the Fermi edge (right panel), observed in the reaction  $(e,e'p)$  as a function of the mass of the target nucleus. All strengths were integrated to an excitation energy of about 20 MeV.

L.Lapikas, Nucl.Phys.A553(1993)297c



# N-N 相関の"証拠"

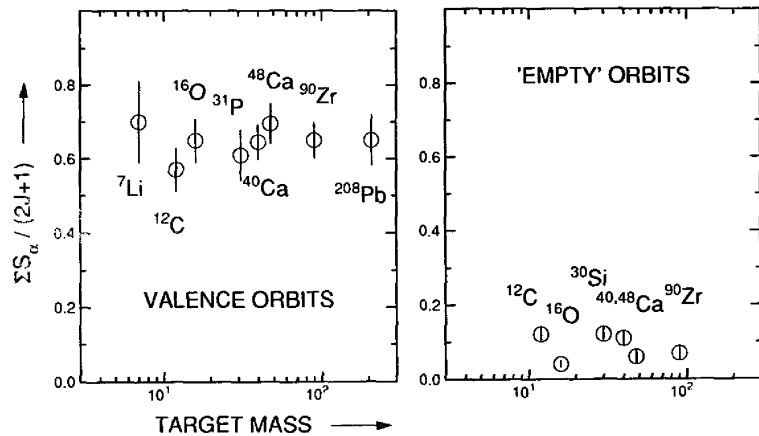
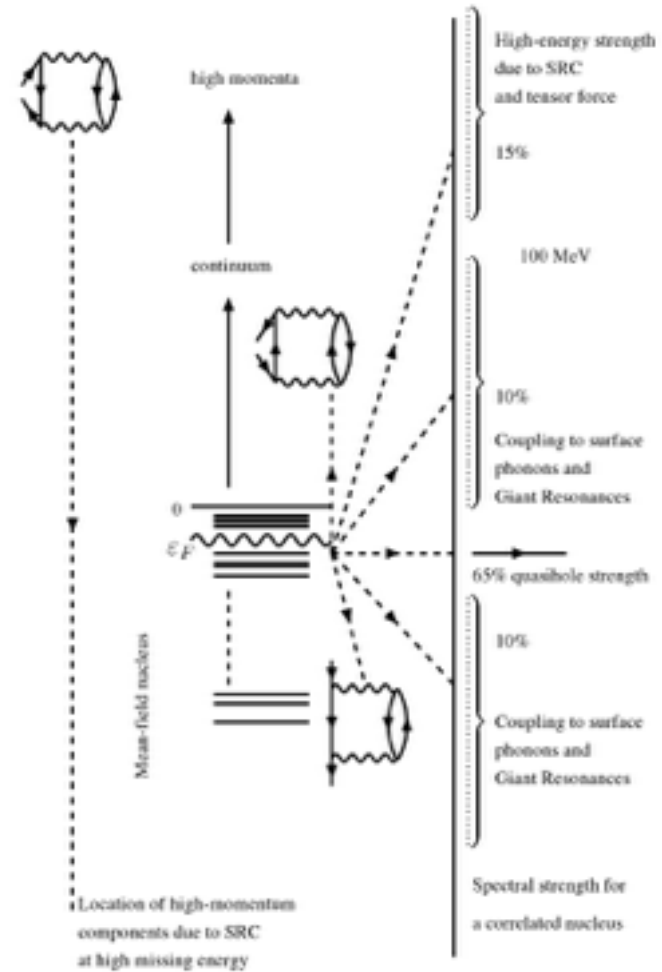
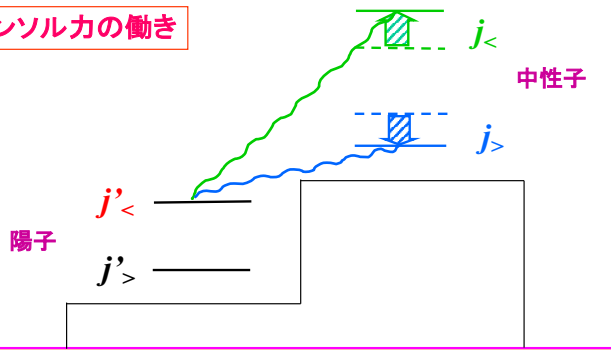


Fig. 9. Quasi-particle strength  $\Sigma S_{\alpha} / (2J+1)$  for valence orbitals (left panel) and for states just above the Fermi edge (right panel), observed in the reaction  $(e,e'p)$  as a function of the mass of the target nucleus. All strengths were integrated to an excitation energy of about 20 MeV.

L.Lapikas, Nucl.Phys.A553(1993)297c

TO et al., Phys. Rev. Lett. 95, 232502 (2005)

テンソル力の働き



# 実験手法

- $(\gamma, pN)$  丸山、須田、 etc.
- $(e, e'p), (e, e'pN)$  NIKHEF, MAMI, JLAB
- $(p, 2pn)$  BNL
- $(p, d), (p, dN)$  RCNP, GSI
- 偏極分解能、スピン観測量:
  - 偏極分解能、偏極移行量 若狭
  - $N=Z$  偶々核の  $IV/IS M1$  遷移 RCNP
  - $(p, dp)$  RCNP

# 電子散乱から分かったこと

- 高運動成分
- 分光学因子のクエンチング問題
- p-n : p-p  $\sim$  20:1 (300  $\sim$  600 MeV/c)
- $A > 12 / A = 12$  N-N 対の比
- pp/pn (短距離・テンソル相関)比の運動量依存性

# 電子散乱から分かったこと

- 高運動成分
- 分光因子のクエンチング問題

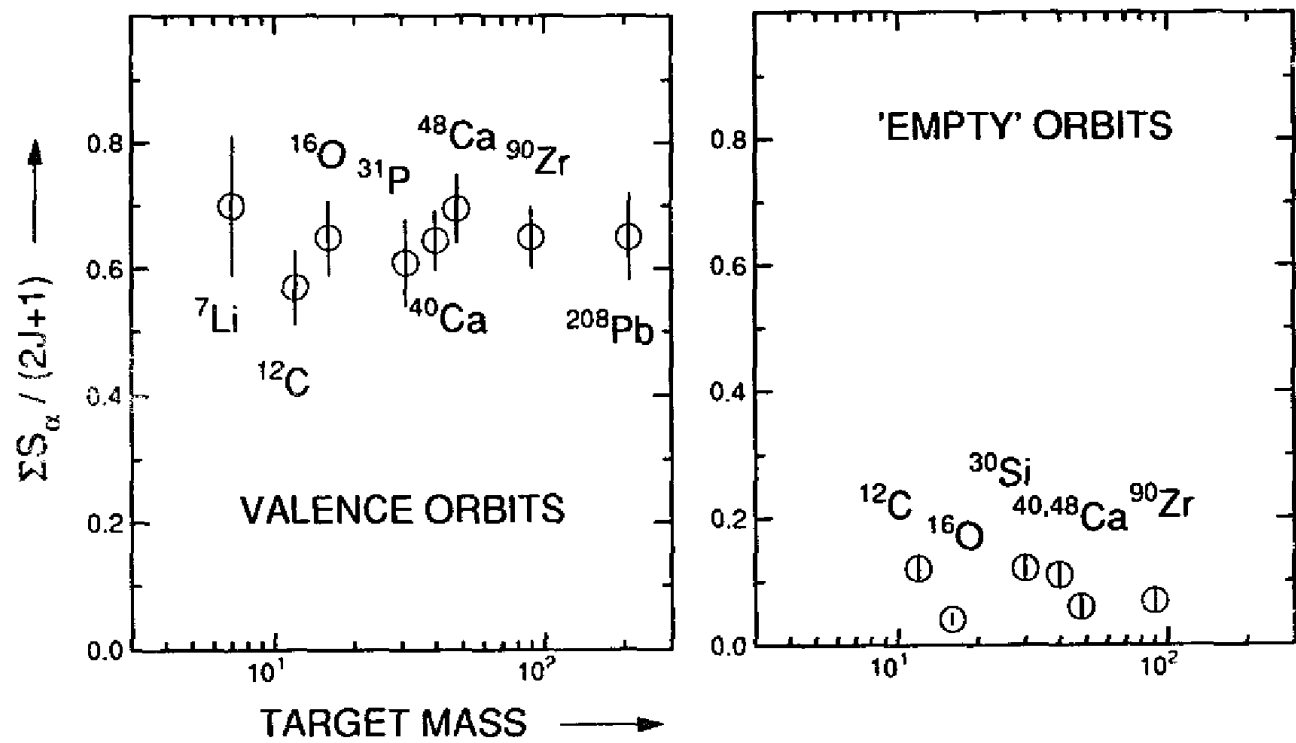


Fig. 9. Quasi-particle strength  $\Sigma S_{\alpha} / (2j+1)$  for valence orbitals (left panel) and for states just above the Fermi edge (right panel), observed in the reaction (e,p) as a function of the mass of the target nucleus. All strengths were integrated to an excitation energy of about 20 MeV.



# 電子散乱から分かったこと

- 高運動成分
- 分光学因子のクエンチング問題
- p-n : p-p ~ 20:1 (300 ~ 600 MeV/c)

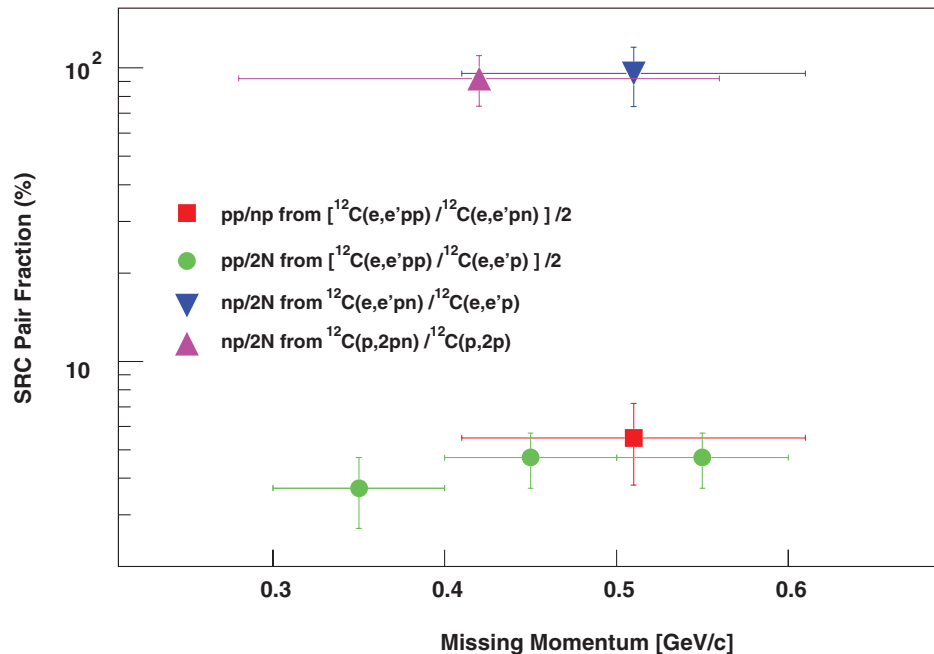


Fig. 2. The fractions of correlated pair combinations in carbon as obtained from the (e,e'pp) and (e,e'pn) reactions, as well as from previous (p,2pn) data. The results and references are listed in table S1.

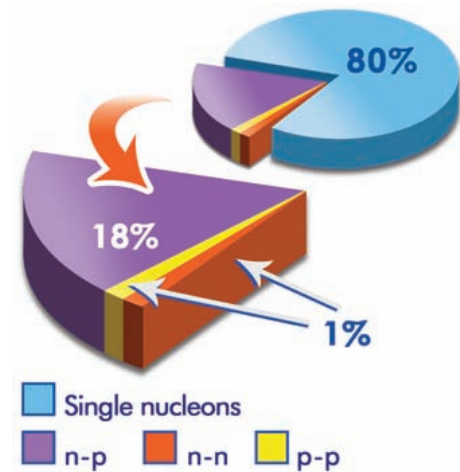
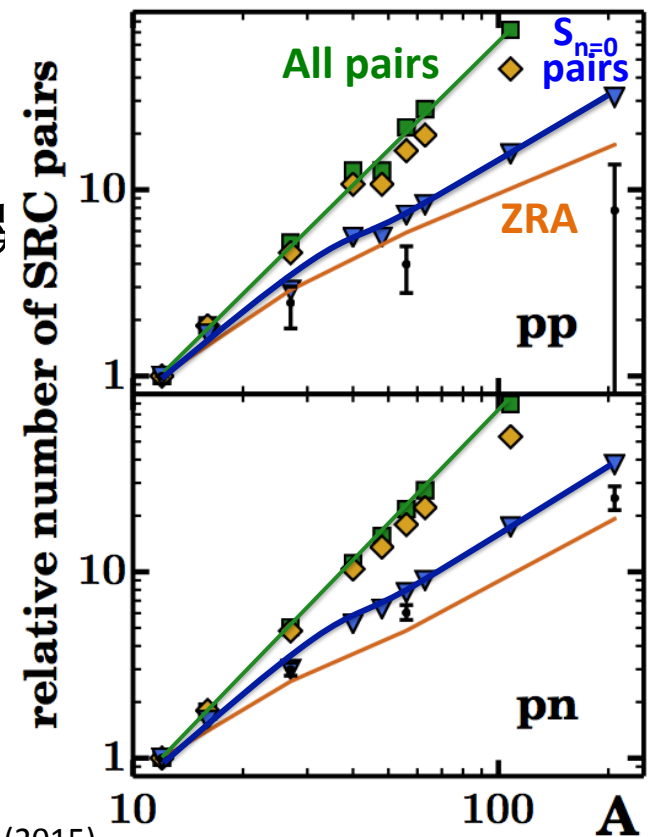


Fig. 3. The average fraction of nucleons in the various initial-state configurations of  $^{12}\text{C}$ .

# 電子散乱から分かったこと

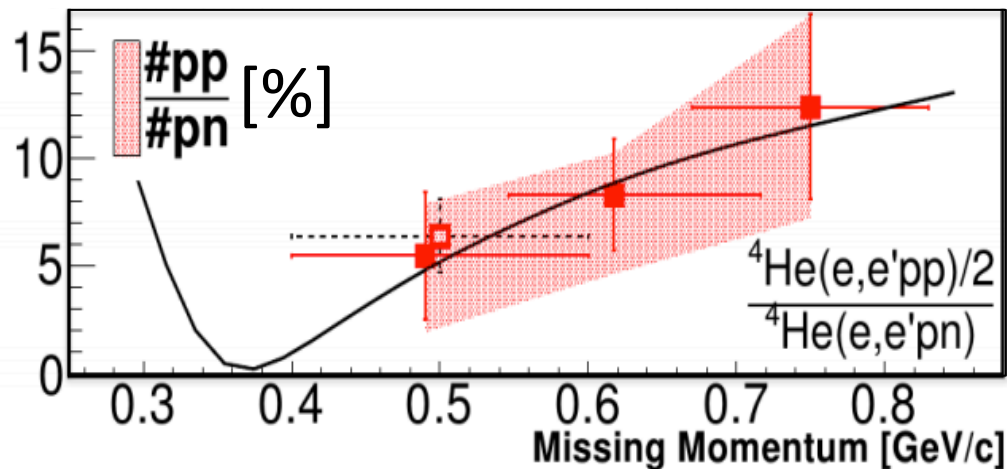
- 高運動成分
- 分光因子のクエンチング問題
- p-n : p-p ~ 20:1 (300 ~ 600 M)
- $A > 12 / A = 12$  N-N 対の比
- pp/pn (短距離・テンソル相関)



(2015)  
C.Coll *et al.*, Phys.Rev.C

# 電子散乱から分かったこと

- 高運動成分
- 分光学因子のクエンチング問題
- p-n : p-p ~ 20:1 (300 ~ 600 MeV/c)
- A>12/A=12 N-N 対の比
- pp/pn (短距離・テンソル相関)比の運動量依存性



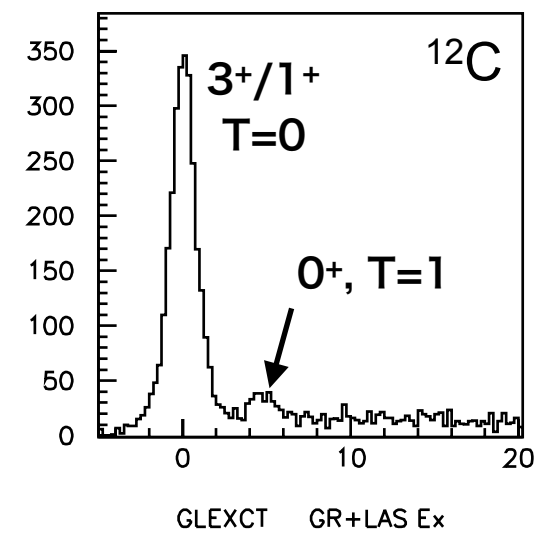
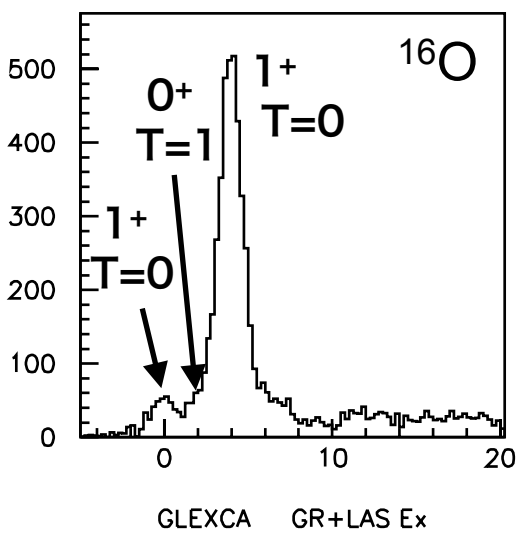
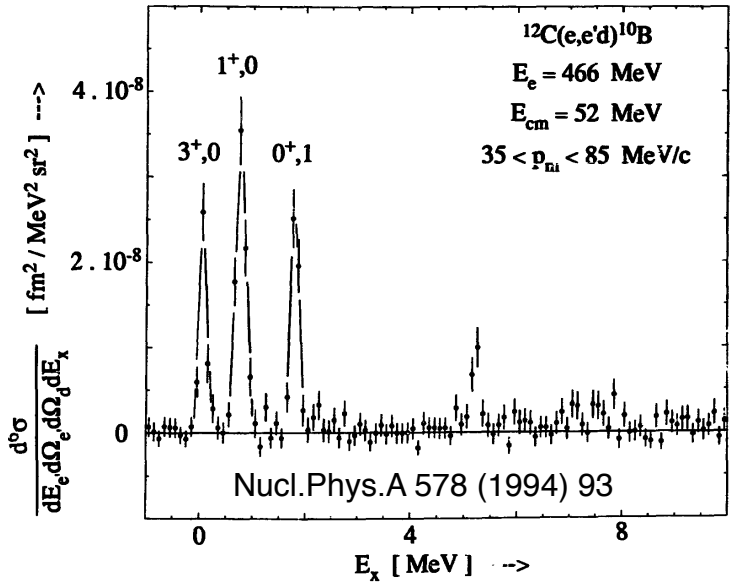
I. Korover, N. Muangma, and O. Hen et al., Phys. Rev. Lett 113, 022501 (2014).

## **(p,d) : 分かったこと、(p,dN) : 期待できること**

- 閉殻核(p,d) : 高運動成分
- 閉殻核(p,d) : テンソル力を示唆する遷移断面積
- (p,dN) : 終状態の分離  $\Rightarrow$  核構造の詳細な議論の可能性
- (p,dp) : スピン/アイソスピンの異なる終状態の選択則
- (p,dN) : p-n / p-p が大きい(JLAB結果と一致する)可能性
- (p,d),(p,dN) : FSI、MECの寄与はそれほど気にならない？

**(p,d) : 分かったこと、(p,dN) : 期待できること**

- 閉殻核(p,d) : 高運動成分
- 閉殻核(p,d) : テンソル力を示唆する遷移断面積
- (p,dN) : 終状態の分離 ⇒ 核構造の詳細な議論の可能性
- (p,dp) : スピン/アイソスピンの異なる終状態の選択則



S. Terashima *et al.*, RCNP-E443 (2015)

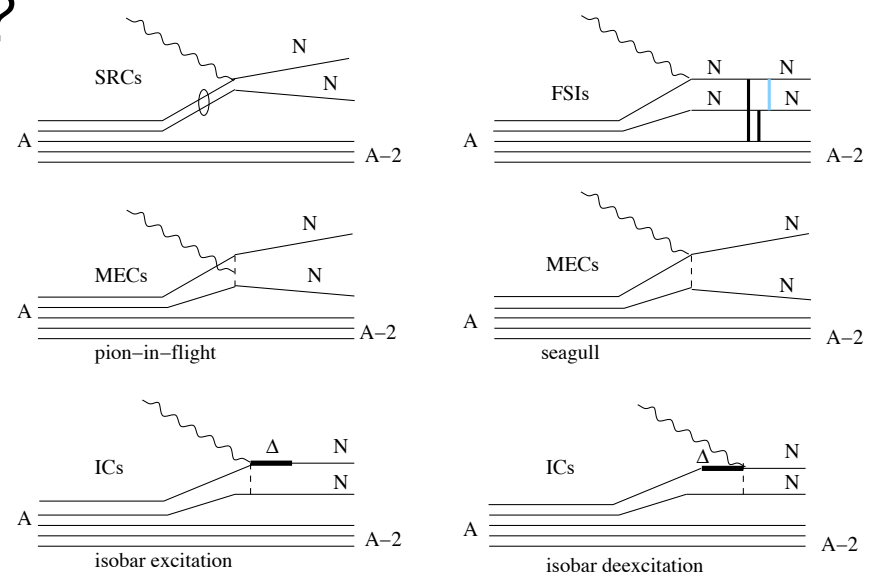
他:  $^4\text{He}(p,dp)$  K. Miki *et al.*, RCNP-E388 (2012)

## **(p,d) : 分かったこと、(p,dN) : 期待できること**

- 閉殻核(p,d) : 高運動成分
- 閉殻核(p,d) : テンソル力を示唆する遷移断面積
- (p,dN) : 終状態の分離  $\Rightarrow$  核構造の詳細な議論の可能性
- (p,dp) : スピン/アイソスピンの異なる終状態の選択則
- (p,dN) : p-n / p-p が大きい(JLAB結果と一致する)可能性
- (p,d),(p,dN) : FSI、MECの寄与はそれほど気にならない？

# 課題、問題点、疑問 (主に(p,d),(p,dN)につ

- テンソル・短距離相関を取り入れた波動関数がまだない
- (p,dN)反応計算はどうする？
- FSI、MEC、ICの寄与は本当に無視できる？どう決定する？
- エネルギーどんどん上げても見ているものは同じ？それでも核子の自由度でよい？



# 戦略、今後の展望

- (p,d)、(p,dN)測定を安定核標的に対し、広い運動量領域について測定を行い、テンソル・短距離相関の定量的な寄与を決定する  
⇒ **RCNP、GSI-FAIR、(Future-RCNP)**
- 不安定核について、(p,d)、(p,dN)測定により、安定核／その近傍核との比較で、テンソル・短距離相関のアイソスピン依存性を明らかにする  
⇒ **RIBF、GSI-FAIR**
- (p,pN)、(p,2pN)反応？
- 偏極ビームを使う？