

パイオンが主役の原子核と これからの実験 (将来計画)

土岐博(RCNP/Osaka)

共同研究(謝辞):

池田、杉本、小川、明、保坂、Hu、Shen。。。。

パイオンが主役の原子核

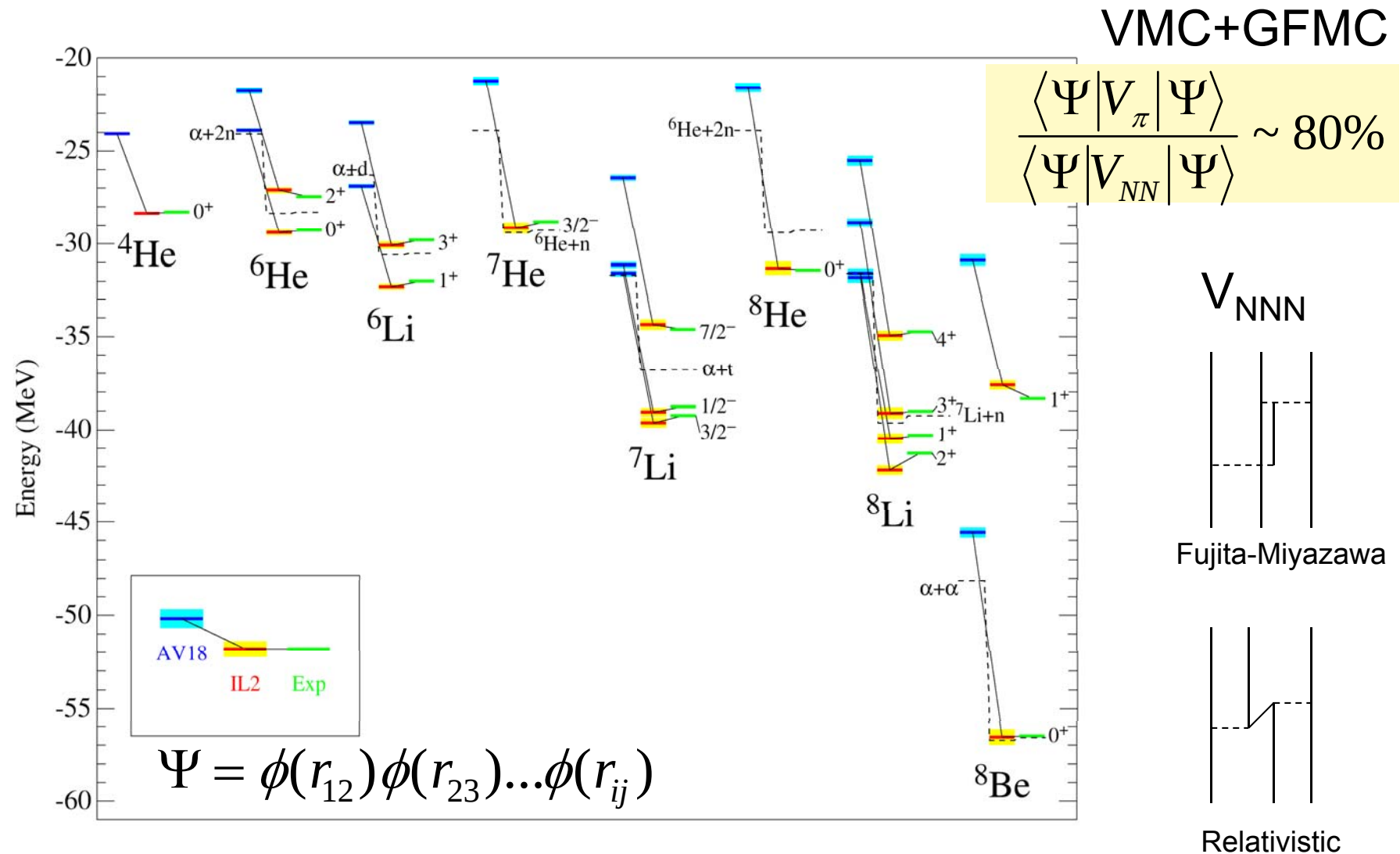
- 湯川博士（1934）はパイ中間子が原子核を形成する相互作用を与える粒子であるとしてその存在を予言した
- メイヤー・ヤンセン（1949）がシェルモデルを提唱した（現象論）
— 原子核物理の幕開け
- 南部博士（1960）はカイラル対称性を導入しその破れから粒子の質量の起源を見だし、パイ中間子の本質を見つけた
- しかし、パイオンは陽には取り扱われていない??

その理由はひとえに パイオンを取り扱う方法が存在しなかった

- 少数多体系では少数系の方法でパイオン(テンサー力)の重要性が指摘された(日本のグループ)
- アルゴンヌ・イリノイグループがほぼ10体系迄の変分計算を実行した(～2000)
- 3体力を導入して軽い核の質量や性質を再現した
- パイオンは引力全体の80%の寄与をしている

- 重い核($A > 10$)や無限系の計算をしたい
- パイオンが主役の原子核を作る作業が必要
- ハドロン物理と統一される

Variational calculation of few body system with NN interaction



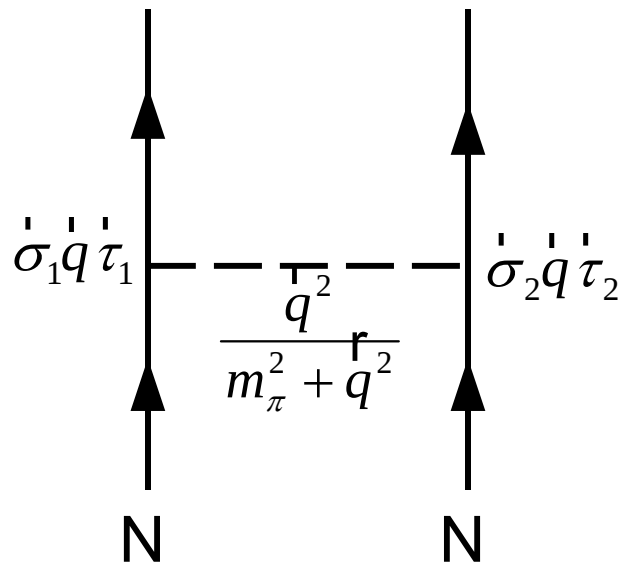
C. Pieper and R. B. Wiringa, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.51(2001)

Heavy nuclei (Super model)

Pion is key

パイオンが作る核子間相互作用

- パイオンはアイソベクトル粒子である
- パイオンは擬スカラー粒子である (0^-)



$$S_{12}(\hat{q}) = \sqrt{24\pi} [Y_2(\hat{q}) [\sigma_1 \sigma_2]_2]_0$$

$$\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{q} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{q} = \frac{1}{3} q^2 S_{12}(\hat{q}) + \frac{1}{3} \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 q^2$$

Pion	Tensor	spin-spin
------	--------	-----------

重水素

NN interaction

QuickTimeý Ç²
êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉÉÉ`ÉÉÇ³¼â©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÕïKónÇ-ÇÂB

Wave function

QuickTimeý Ç²
êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉÉÉ`ÉÉÇ³¼â©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÕïKónÇ-ÇÂB

$$\sum_{ij} \left[Y_2(r_{ij}) \cdot [\sigma_i \sigma_j] \right]$$

QuickTimeý Ç²
êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉÉÉ`ÉÉÇ³¼â©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÕïKónÇ-ÇÂB

テンソル力の取り扱いが鍵 テンサー最適化シェルモデル(TOSM)

$$\Psi = C_0|0\rangle + \sum_i C_i|2p-2h:i\rangle_T$$

Myo,Ikeda,Toki

1体場の空間(ハートレーフォック理論)では取り扱いえない(スピンの状態が詰まっている状態)

$$\left\langle 0 \left| \sum_{ij} \left[Y_2(r_{ij}) \cdot [\sigma_i \sigma_j]_1 \right] \right| 0 \right\rangle = 0$$

テンソル演算子が
オーダーパラメータ

2p-2h状態では有限になる

$$\left\langle \Psi \left| \sum_{ij} \left[Y_2(r_{ij}) \cdot [\sigma_i \sigma_j]_1 \right] \right| \Psi \right\rangle \neq 0$$

テンソル凝縮

10.9.25

toki@osa

表面パイオン凝縮を内包している

相対論的カイラル平均場法

Energy minimization with respect to meson and nucleon fields

QuickTime® 6.0.2
TIFF (LZW) 500K 41 BLUEVIEW 6.0.0.0
© 1999 Apple Computer, Inc. All rights reserved.

$$\delta \frac{\langle \Psi | H | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle} = 0$$

$$\frac{\delta E}{\delta \sigma} = 0 \quad \frac{\delta E}{\delta \omega} = 0$$

(Mean field equation)

$$\Psi = C_0 |0\rangle + \sum_i C_i |2p-2h : i\rangle_T$$

$$\frac{\delta E}{\delta \psi_i(x)} = 0 \quad \frac{\delta E}{\delta C_i} = 0$$

数値計算はセルフコンシステントに行う
| 0 > の状態の計算に | 2p-2h > の効果を取り込む

相対論的カイラル平均場法

Ogawa Toki (2010)

$$\Psi = C_0|0\rangle + \sum_i C_i|2p-2h:i\rangle_T$$

全エネルギー

QuickTimeý Ç²
êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNE`ÉÉÇ³¼â©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÖiKónÇ-ÇÂB

変分

QuickTimeý Ç²
TIFFÄitÖaèkÄj êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNE`ÉÉÇ³¼â©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÖiKónÇ-ÇÂB

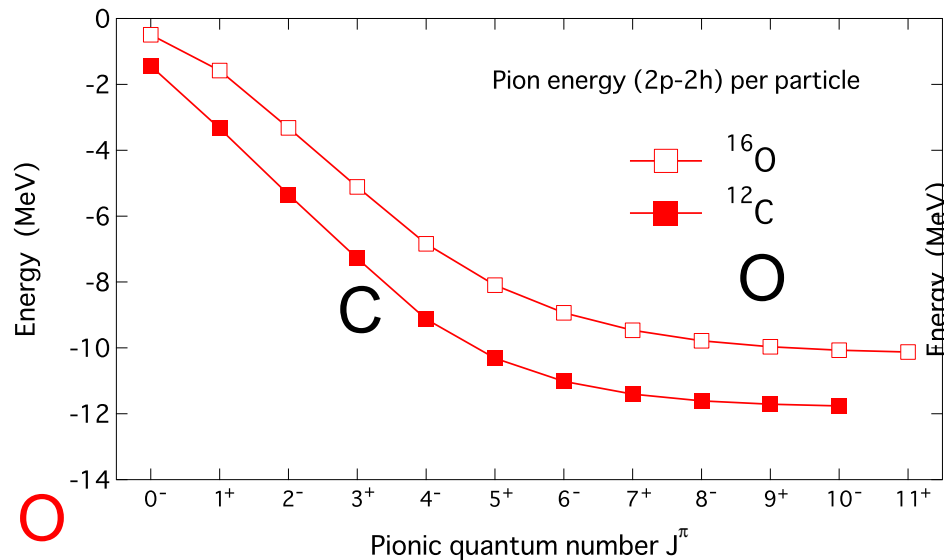
10.9...

$$\langle 0|V|2p-2h:i\rangle = \sqrt{2J+1}\langle [ij]_{JM}|V|[kl]_{JM}\rangle$$

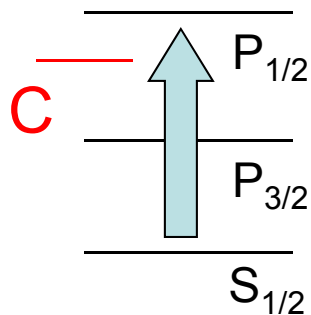
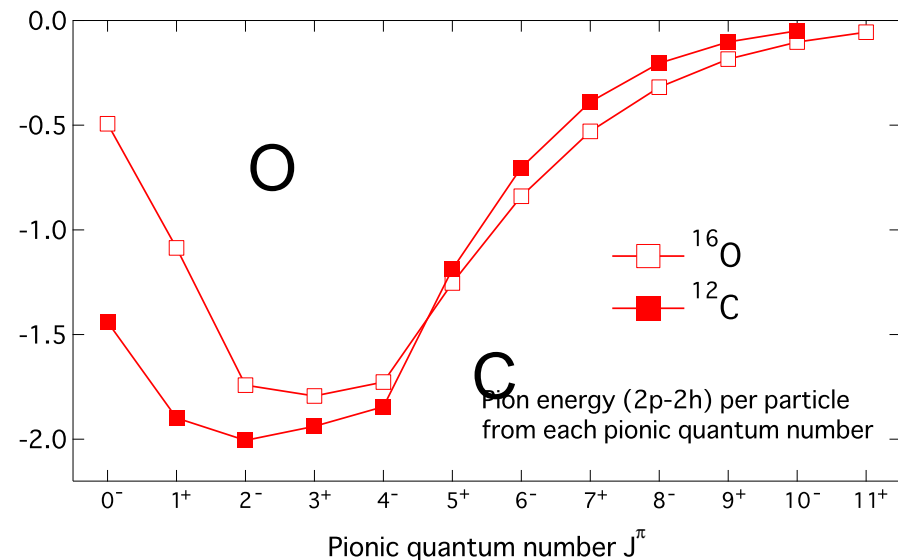
相対論的カイラル平均場近似

Ogawa-Toki

パイオンの寄与



個々の2p-2h励起の寄与



The difference between ^{12}C and ^{16}O is 2MeV/N.

The difference comes from low pion spin states ($J < 2$). This is the Pauli blocking effect.

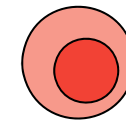
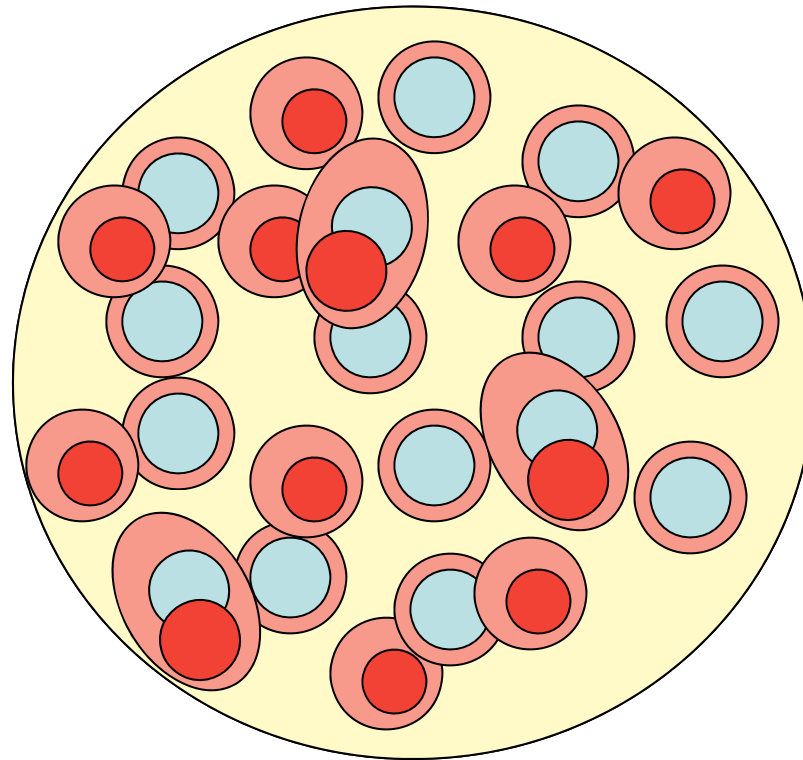
Pion energy

Pion provides larger attraction for ^{12}C than ^{16}O

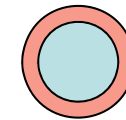
Picture of nucleus

Tensor condensed state

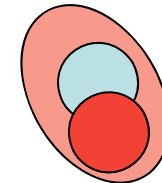
Snapshot



proton



neutron



tensor pair
(deuteron)

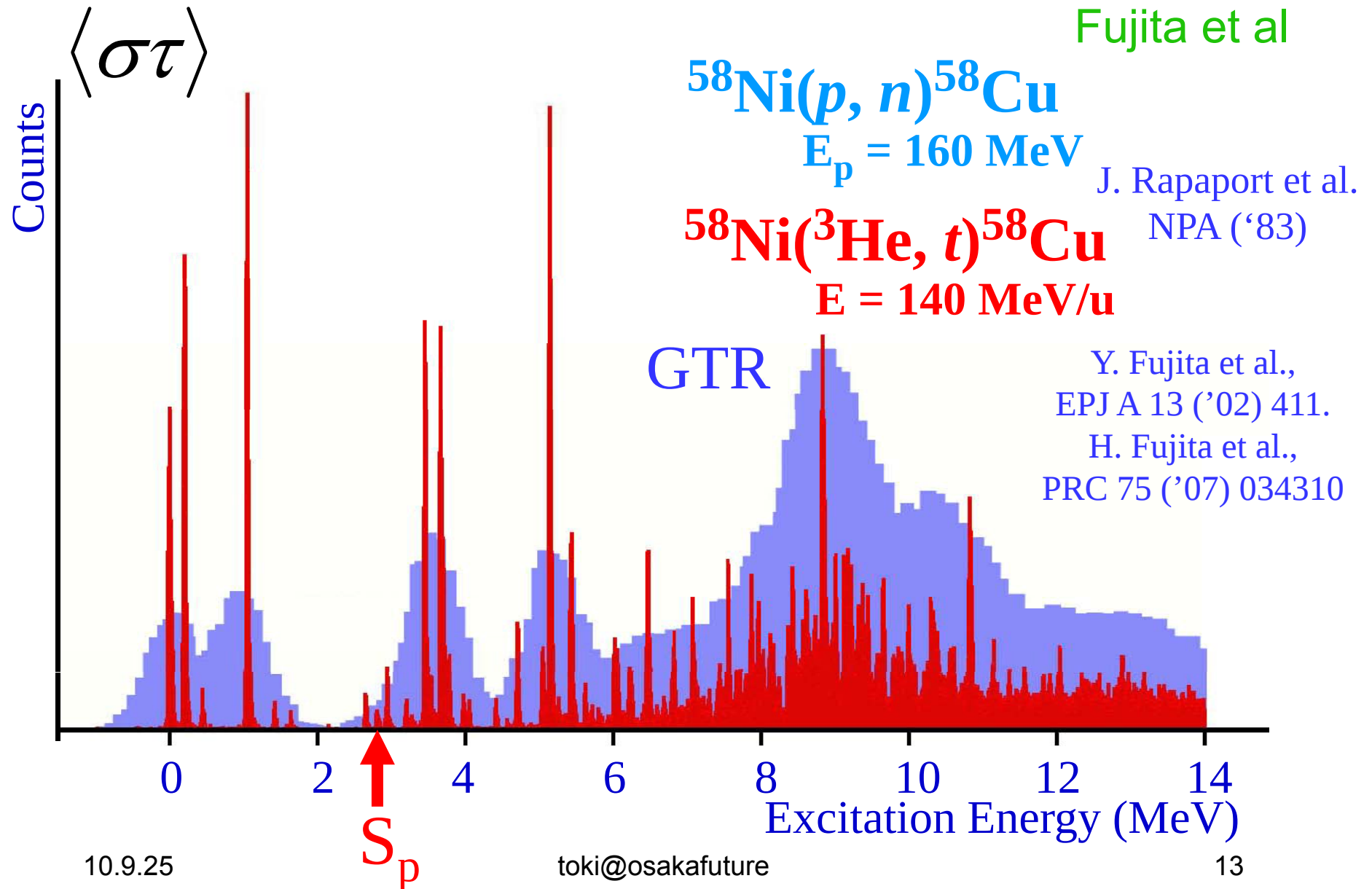
$$\Psi = C_0|0\rangle + \sum_i C_i|2p-2h:i\rangle_T$$

テンソル凝縮が引き起こす現象

- シェルモデル的な物理量は20%減
- 磁気能率やM1遷移はまずは20%減
- 粒子状態が使われているのでその状態には入れない(ブロッキング)ースピン軌道力の効果
- マジック数(テンソル力が重要:陽子と中性子)
- 狭い幅の高いガモフテラー状態
- 狭い幅の高い励起状態($\sim 20\text{MeV}$)
- 高い運動量成分を持つ状態の励起
- ○○○

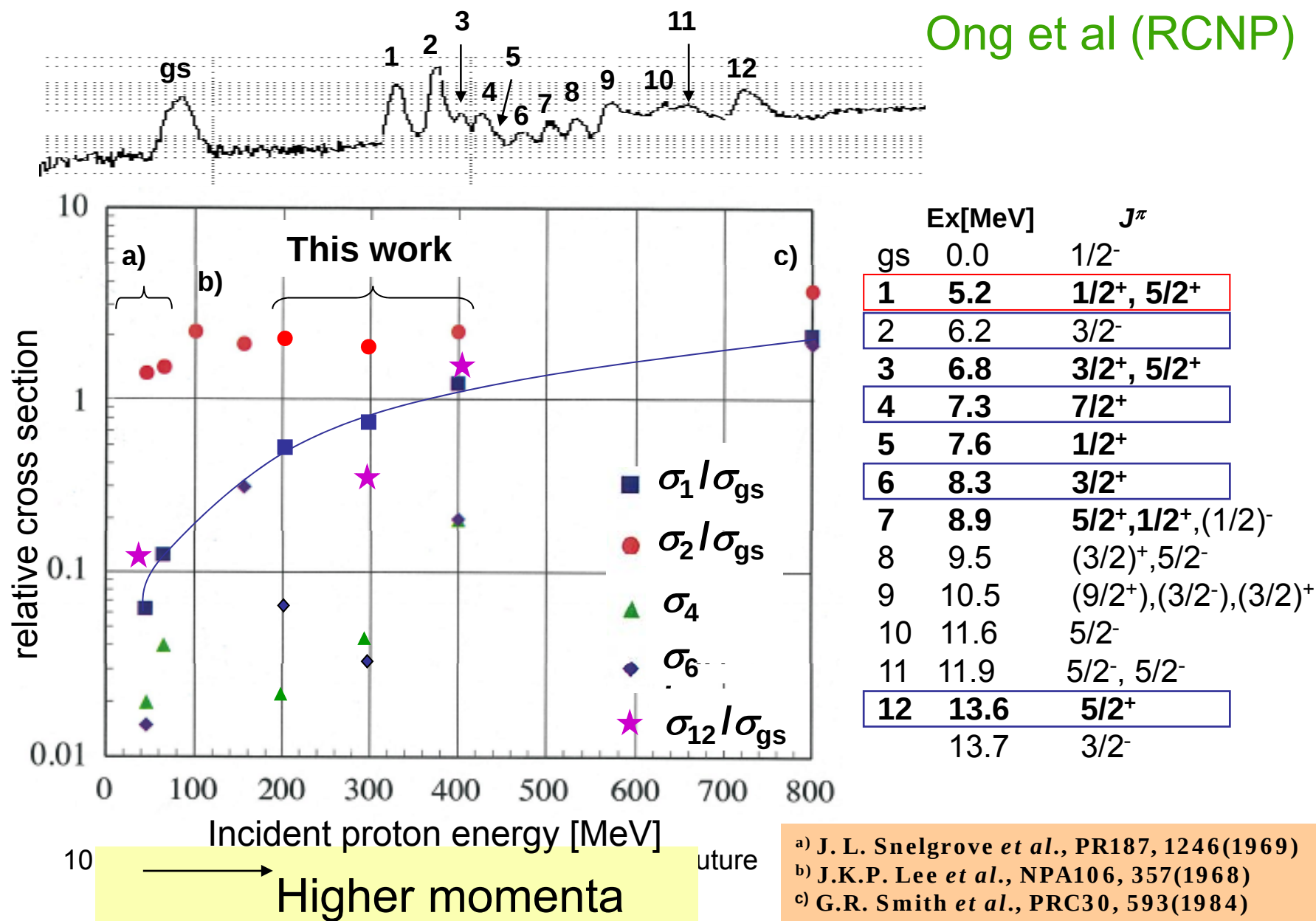
Comparison of (p, n) and ($^3\text{He}, t$), 0° spectra

Fujita et al



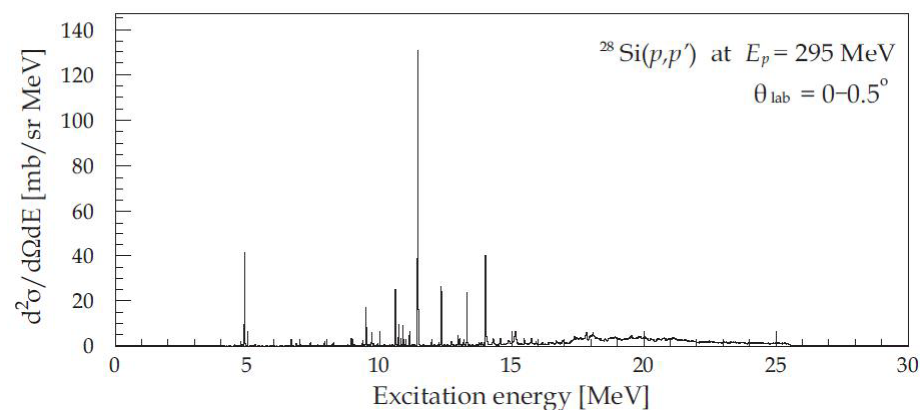
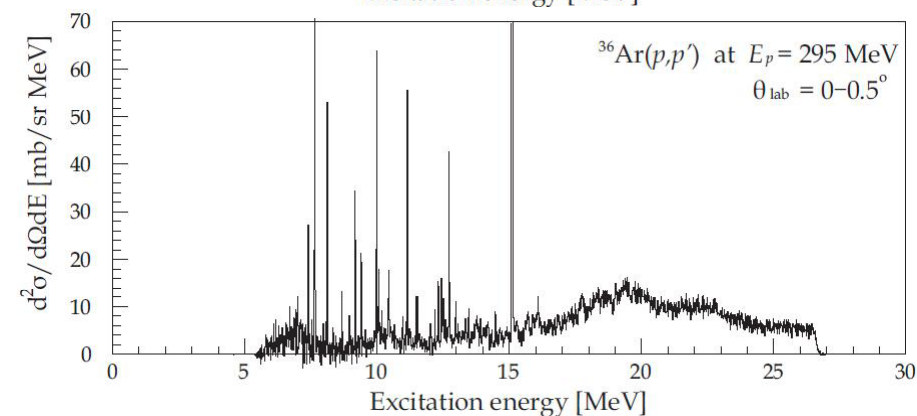
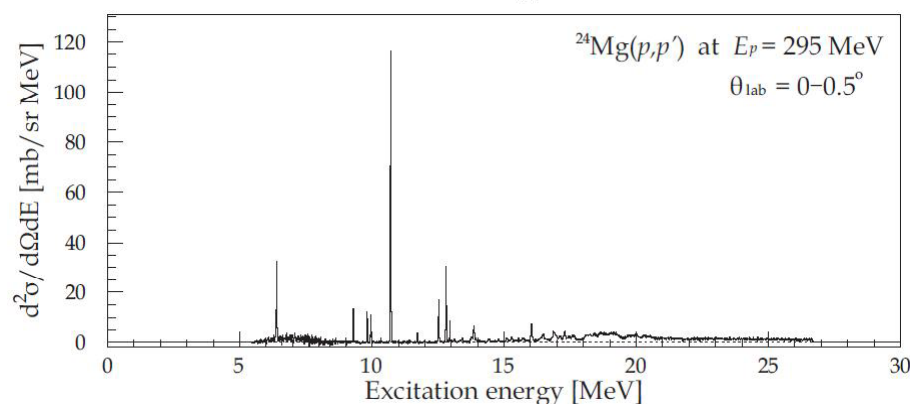
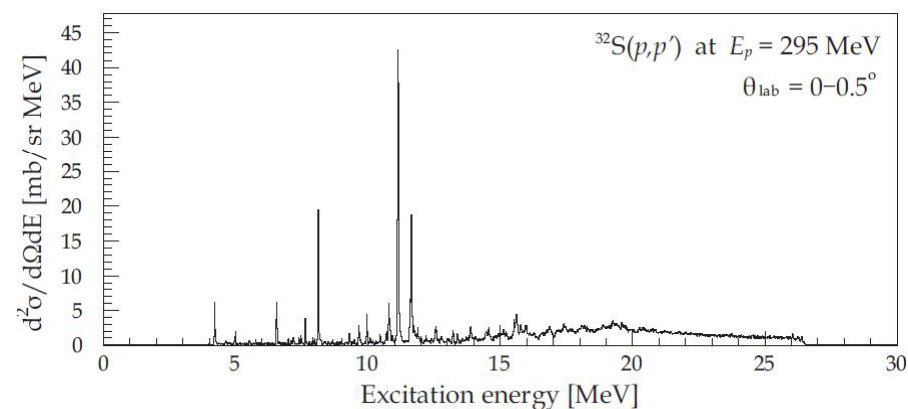
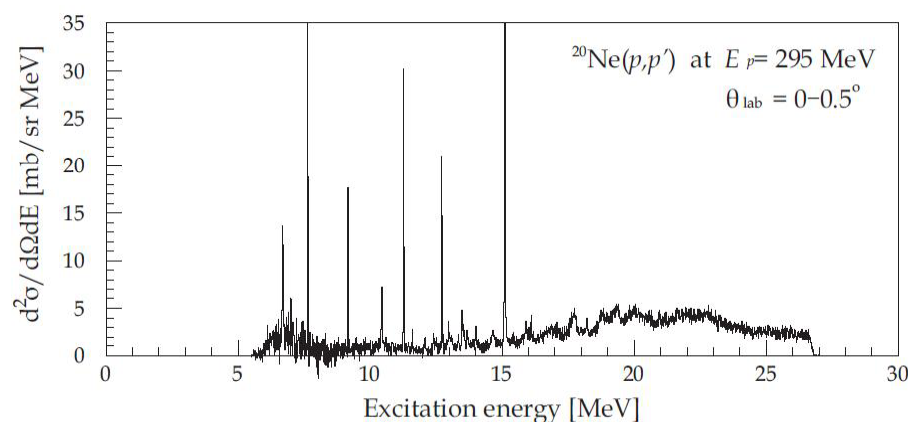
Relative $^{16}\text{O}(p,d)$ Cross Section

Ong et al (RCNP)



(p,p') at 295 MeV at 0 deg

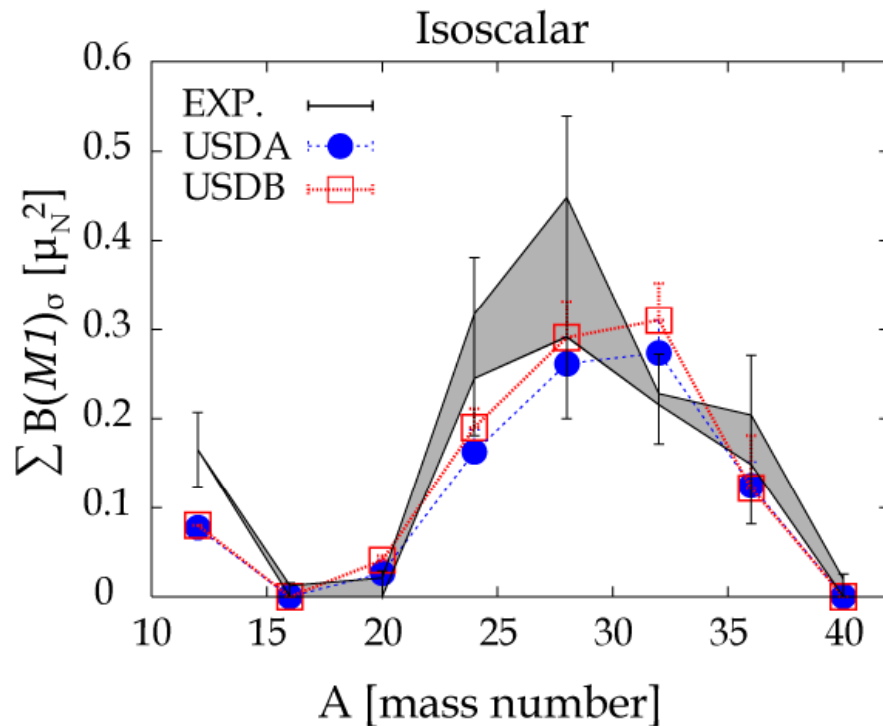
Tamii et.al.



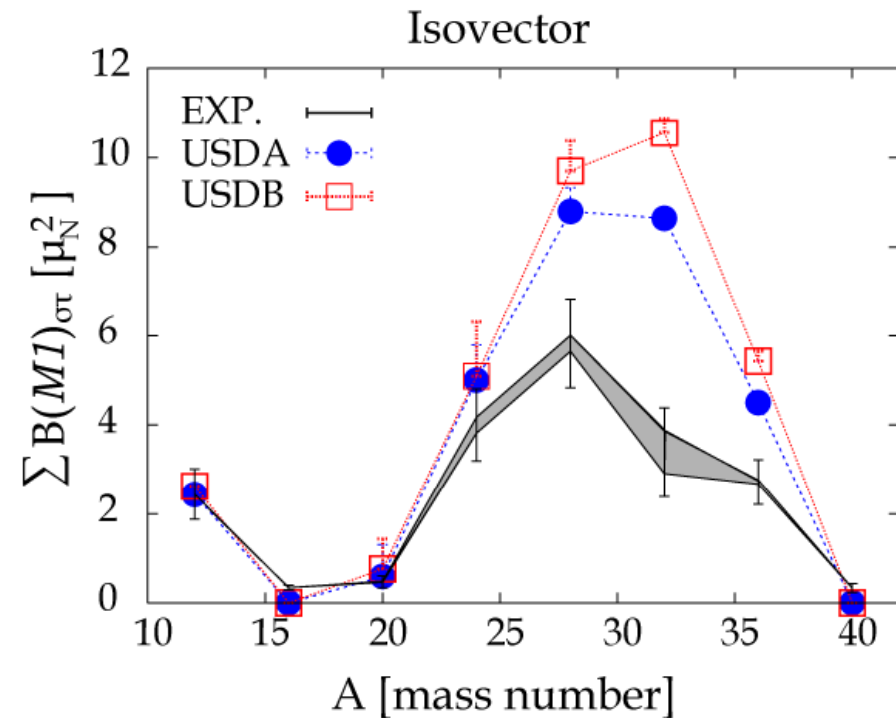
これらのスペクトルからM1と
同定されたピークの断面積を
遷移強度に変換する

スピン $M1$ 強度積算値 (Tamii et.al.)

遷移強度の累積の質量依存を殻模型計算 (free g_s -factor, sd 殻) と比較
(0-16 MeVまでの和)



実験値と計算値が同程度



クエンチングの傾向が見える

$$\mathbf{S}_p = \sum_{k=1}^Z \mathbf{s}_k, \quad \mathbf{S}_n = \sum_{k=Z+1}^A \mathbf{s}_k,$$

$$\begin{aligned} R_{IS/IV} &= \frac{\sum |M(\sigma)|^2}{\sum |M(\sigma\tau)|^2} \\ &= \frac{\sum B(M1)_\sigma / (g_s^{IS})^2}{\sum B(M1)_{\sigma\tau} / (g_s^{IV})^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IS} \quad \sum B(M1)_\sigma &= \frac{1}{2J_i + 1} \frac{3}{4\pi} \sum_f \left| \langle 1_f^+ | \frac{g_s^{IS}}{2} (\mathbf{S}_p + \mathbf{S}_n) | 0^+ \rangle \right|^2 \mu_N^2 \\ &= \frac{1}{2J_i + 1} \frac{3}{4\pi} \left(\frac{g_s^{IS}}{2} \right)^2 \langle 0^+ | (\mathbf{S}_p + \mathbf{S}_n)^2 | 0^+ \rangle, \end{aligned}$$

$$\text{IV} \quad \sum B(M1)_{\sigma\tau} = \frac{1}{2J_i + 1} \frac{3}{4\pi} \left(\frac{g_s^{IV}}{2} \right)^2 \langle 0^+ | (\mathbf{S}_p - \mathbf{S}_n)^2 | 0^+ \rangle.$$

$$R_{IS/IV} = \frac{\langle |(\mathbf{S}_p + \mathbf{S}_n)^2| \rangle}{\langle |(\mathbf{S}_p - \mathbf{S}_n)^2| \rangle}. \quad (\text{基底状態に対する期待値})$$

$$= \frac{\langle |(\mathbf{S}_p^2 + \mathbf{S}_n^2 + 2\mathbf{S}_p \cdot \mathbf{S}_n)| \rangle}{\langle |(\mathbf{S}_p^2 + \mathbf{S}_n^2 - 2\mathbf{S}_p \cdot \mathbf{S}_n)| \rangle}.$$

(Tamii et.al.)

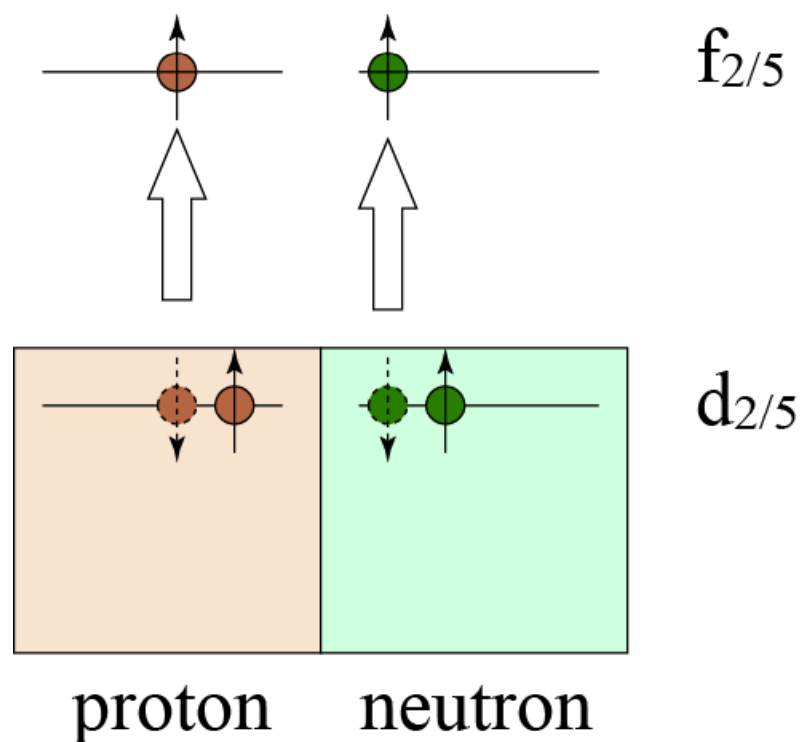
$$\frac{R_{IS/IV} - 1}{R_{IS/IV} + 1} = \frac{2 \langle |\mathbf{S}_p \cdot \mathbf{S}_n| \rangle}{\langle |\mathbf{S}_p^2 + \mathbf{S}_n^2| \rangle}$$

~ 0 shell-model (in sd-shell)

~ +1/3 > 0 exp.

例えば、こんなConfigurationがGround-Stateに
混ざっているのが見えているのではないか？

(Tamii et.al.)



$$\Psi = C_0|0\rangle + \sum_i C_i|2p-2h:i\rangle$$

パイオンが主役の原子核

- 2p-2h空間で扱う状態はテンソル凝縮相にある
- パイオンが作る原子核はテンソル凝縮相にある
- これまで理論的(平均場)に計算してきたのは低い運動量の成分のみである(20%減)
- 高い運動量成分(テンソル相関)を必然的に含む(20%分)
- テンソル凝縮相は全く未開拓な状態である
- パイオンが作る原子核の理解はハドロン物理との統合を意味する

Nobel prize (2008)

He was motivated by the BCS theory (1958).

$$E_i = \pm(\varepsilon_i^2 + \Delta^2)^{1/2} \longleftrightarrow E_p = \pm(p^2 + m^2)^{1/2}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i \psi_i + \Delta \psi_i^* &= E_i \psi_i \\ -\varepsilon_i \psi_i^* + \Delta^* \psi_i &= E_i \psi_i^* \end{aligned}$$

Δ is the order parameter

Particle number

$$\begin{aligned} \vec{\sigma} \cdot \vec{p} \psi_R + m \psi_L &= E_p \psi_R \\ -\vec{\sigma} \cdot \vec{p} \psi_L + m \psi_R &= E_p \psi_L \end{aligned}$$

m is the order parameter

Chiral symmetry

Nambu-Jona-Lasinio Lagrangian (現象論)

$$L_{NJL} = i\bar{\psi}\gamma_{\mu}\partial^{\mu}\psi + G\left[(\bar{\psi}\psi)^2 + (\bar{\psi}i\gamma_5\psi)^2\right]$$

$$L_{Dirac} = i\bar{\psi}\gamma_{\mu}\partial^{\mu}\psi + m\bar{\psi}\psi$$

Mean field approximation; Hartree approximation

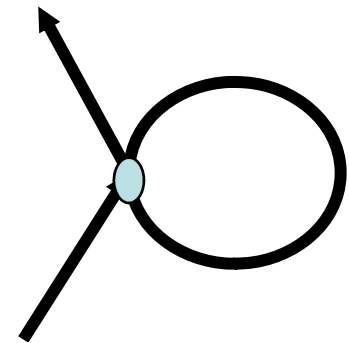
$$\left[i\gamma_{\mu}\partial^{\mu} + 2G\langle\bar{\psi}\psi\rangle\right]\psi(x) = 0$$

$$m = -2G\langle\bar{\psi}\psi\rangle \quad \text{Fermion gets mass.}$$

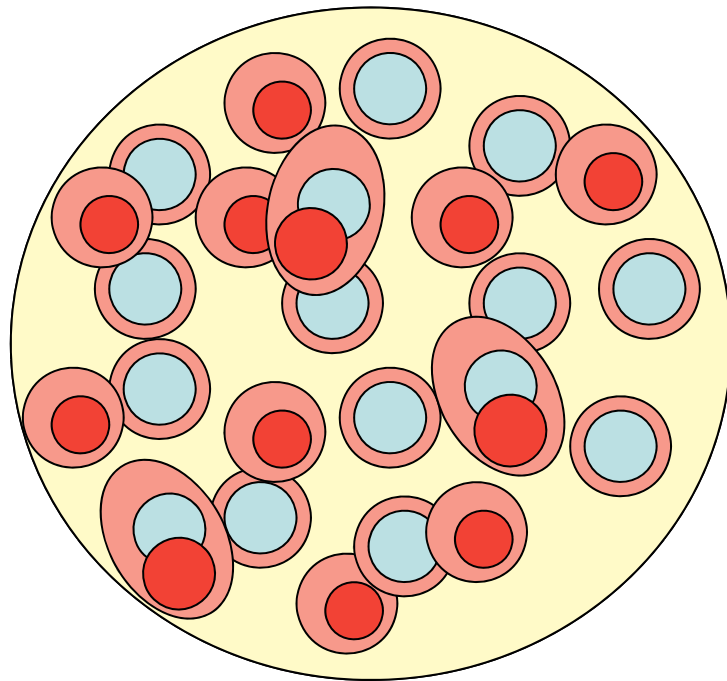
The chiral symmetry is spontaneously broken.

Pion appears as a Nambu-Goldstone boson.

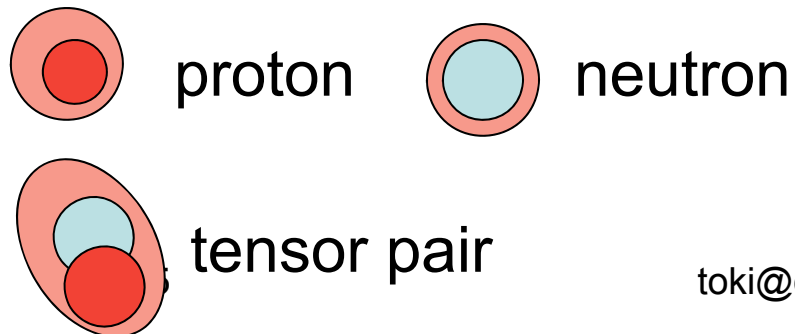
RPAで $(\bar{\psi}i\gamma_5\psi)^2$ の項を取り扱う → パイの質量は小さい



パイオンが作る核構造



- パイオンがテンソル凝縮を引き起こす
- テンソル励起が20%くらいある
- 高い運動量成分を持ち込む
- 低い運動量成分（シェルモデル成分）は20%減少する



$$\Psi = C_0|0\rangle + \sum_i C_i|2p-2h:i\rangle_T$$

toki@osakafuture

$$|C_0|^2 \approx 80\%$$