

殻構造進化の実証に向けて

原子力機構・先端基礎研究センター
宇都野穰

はじめに

- 「実証」について考えてみた
 - Googleで検索すると、「実在」と対比される概念らしい
 - 実証論:「コト」を中心とする立場
 - 実在論:「モノ」を中心とする立場
- 原子核の殻構造云々を例えば物性の人にとすると、
→ そんなこともわかっていないの？
 - このあたりの認識の差は、電子系と核子系の殻構造の実在というものに大きな差があるからではないか、と(この講演ファイルを準備していて)感じた

原子と原子核の殻構造

- 原子

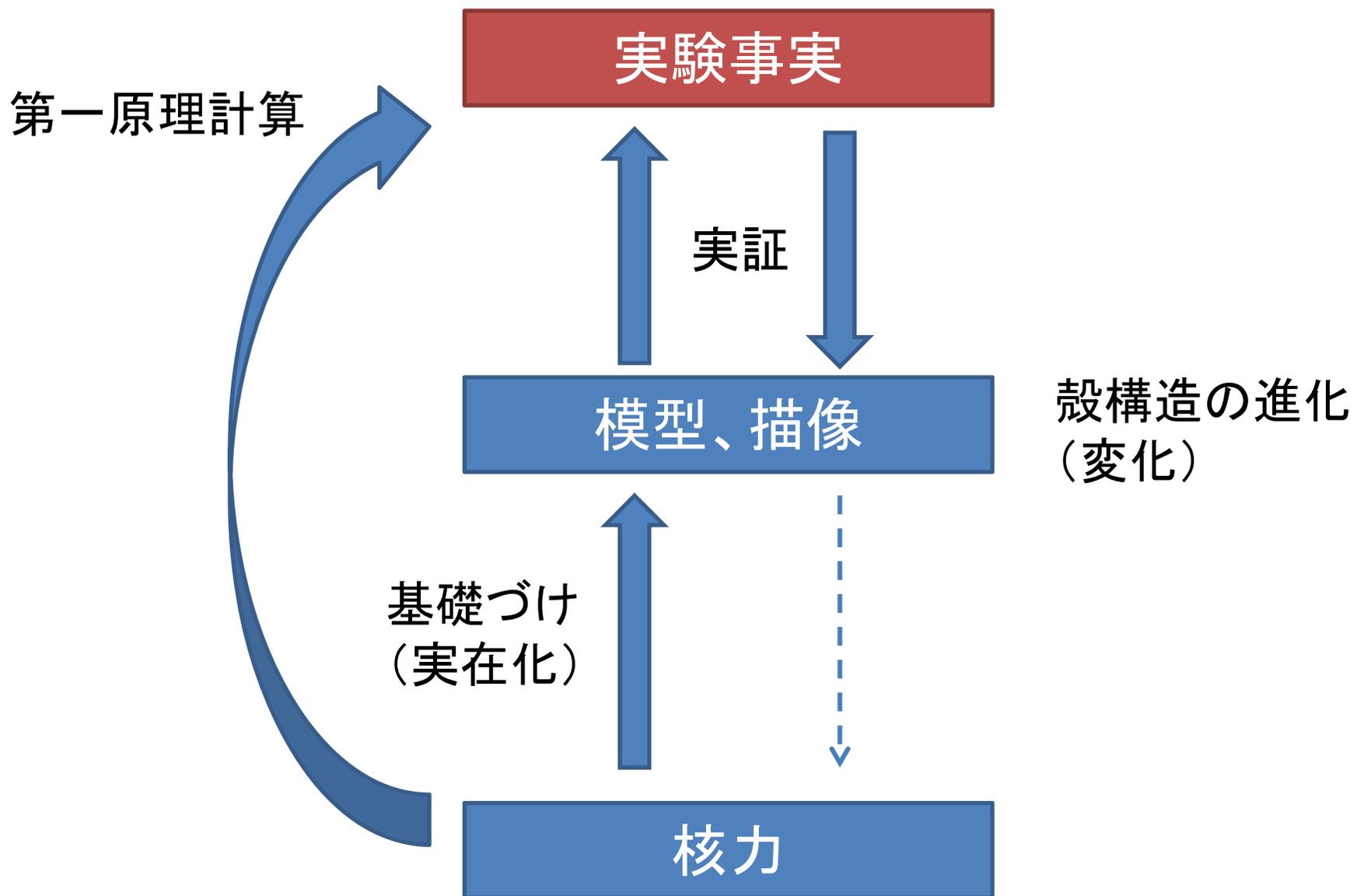
- 中心となる場は原子核からのクーロン力
(多電子系ならばハートリーフォックのような平均場)
- 一粒子エネルギーは一意に決まる

「実在」としての疑問がない

- 原子核

- 中心となる場は核子からの「平均場」
- しかし、生の核力をそのままハートリーフォックで解いたような平均場ではない
- 模型空間という概念を経て、初めて意味のある殻構造が出現する
 - 平均場模型の殻構造と殻模型の殻構造は同じとは限らない

「実在」として必ずしもはっきりしない



本講演の内容

- 殻模型とは
- “island of inversion”研究に基づく殻進化描像
- 二重閉殻核は二重閉殻？
- V_{MU} (monopole-based universal interaction)による殻進化の記述
- 分光学的因子をめぐって: 核構造と核反応の課題

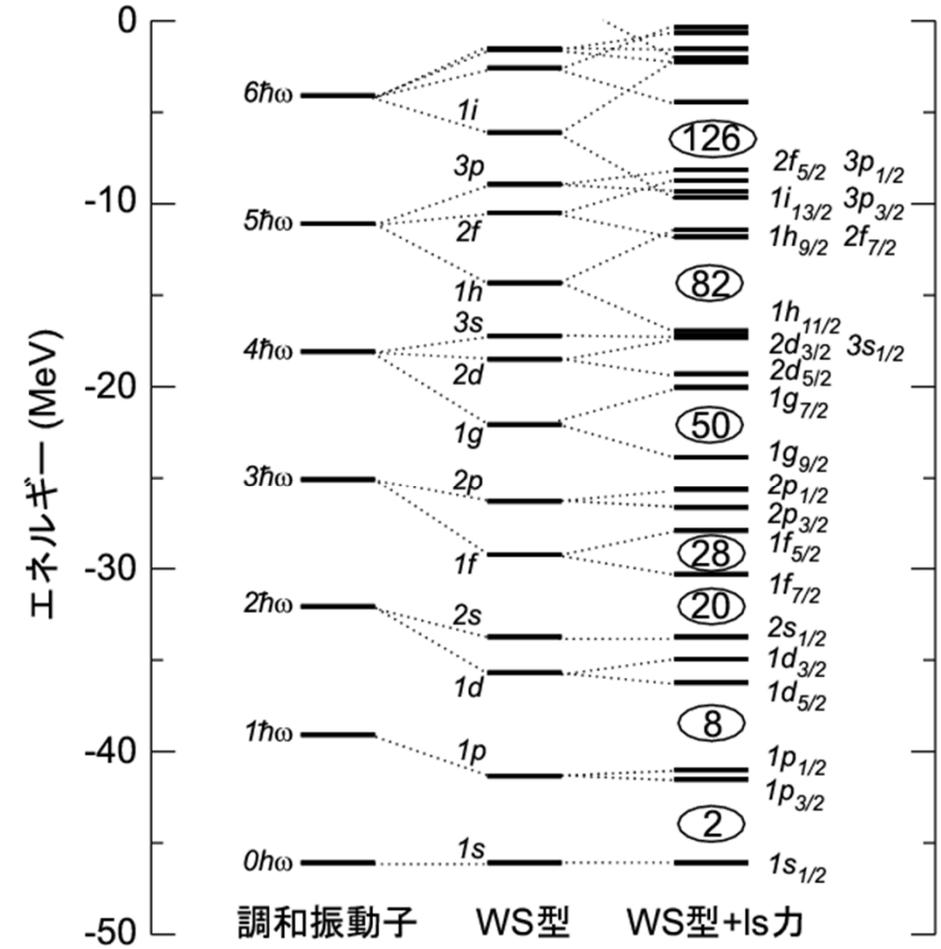
殻模型とは

基本的な考え方

- (低励起) 多体状態を記述するのに重要な自由度は？
 - 平均場描像の有効性
 - 一粒子エネルギーによる状態空間の切断
 - 近似的縮退した軌道(同じ主殻内)は大きく混合する

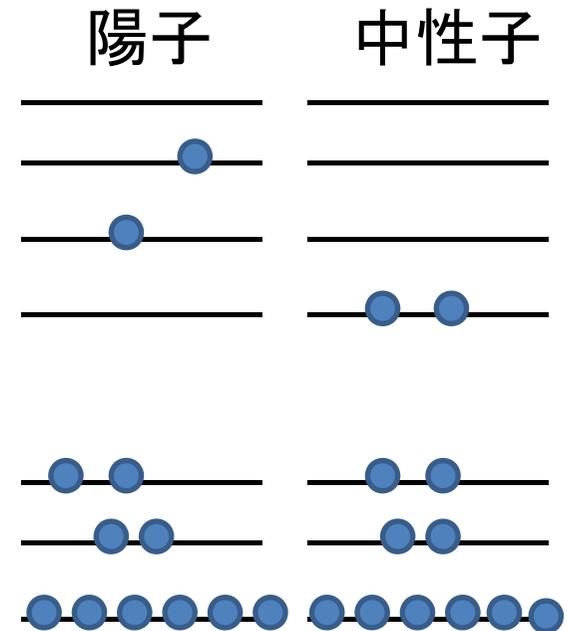


比較的少数の一粒子軌道の自由度であるが、その中の相関(配位混合)はできるだけ完全に取り入れよう



計算の手順

1. 適切な一粒子状態のセットをバレンス殻とする
 - 典型的には一主殻
2. 考え得る多体状態を多体ハミルトニアン
の基底とする
 - この次元数が實際上問題
3. 適切な有効相互作用でハミルトニアンを
対角化する
 - 本来なら一粒子状態とconsistentであるべき
4. 得られた多体波動関数(配位混合の係
数)を用いて物理量を計算する
 - E2なら $r^2Y^{(2)}$ など



殻模型の長所と短所

- 長所

- 配位混合を非常に良く表現する

- 多くの分光学的性質

E2, M1, Gamow-Teller, 分光学的因子など

- 低励起状態の状態数、高状態密度に伴う状態のdamping
特定の状態間の行列要素だけでなく、分布も良い

- 短所

- 一粒子波動関数を多体問題の中で決定する方法論を持たない

- 一粒子波動関数に強くする物理量

半径、E0など

(適当な一粒子波動関数を仮定すれば何らかの解が出るが、意味があるかどうかは別問題)

monopole相互作用と有効一粒子エネルギー

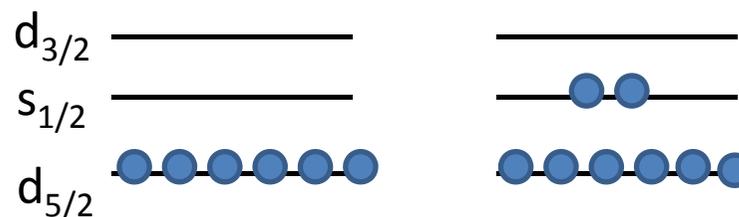
- (仮想的)閉殻配位のエネルギー:
一粒子エネルギーとボンドの数で
簡単に見積もられる

$$\langle \Psi | H | \Psi \rangle = \sum_i n_i \varepsilon_i + \sum_{i,j} n_{i,j} V_{i,j}$$

- V_{ij} : monopole interaction
2体力のJ依存性を平均化したもの

- 閉殻配位+1配位も同様

- この最後の1個の軌道の有効一粒子エネルギーを $E(A+1)-E(A)$ で定義する
- 最後の1個と他の核子とのmonopole interactionで決まる

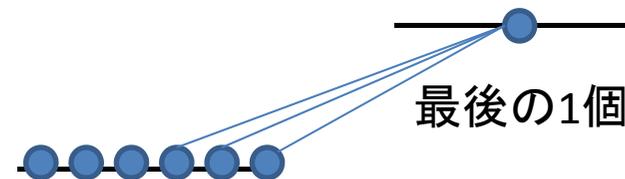


n_{ij} : $V_{i,j}$ のボンドの数

$d_{5/2}-d_{5/2}$: p-pが15本、n-nが15本、
p-nが36本

$s_{1/2}-s_{1/2}$: n-nが1本

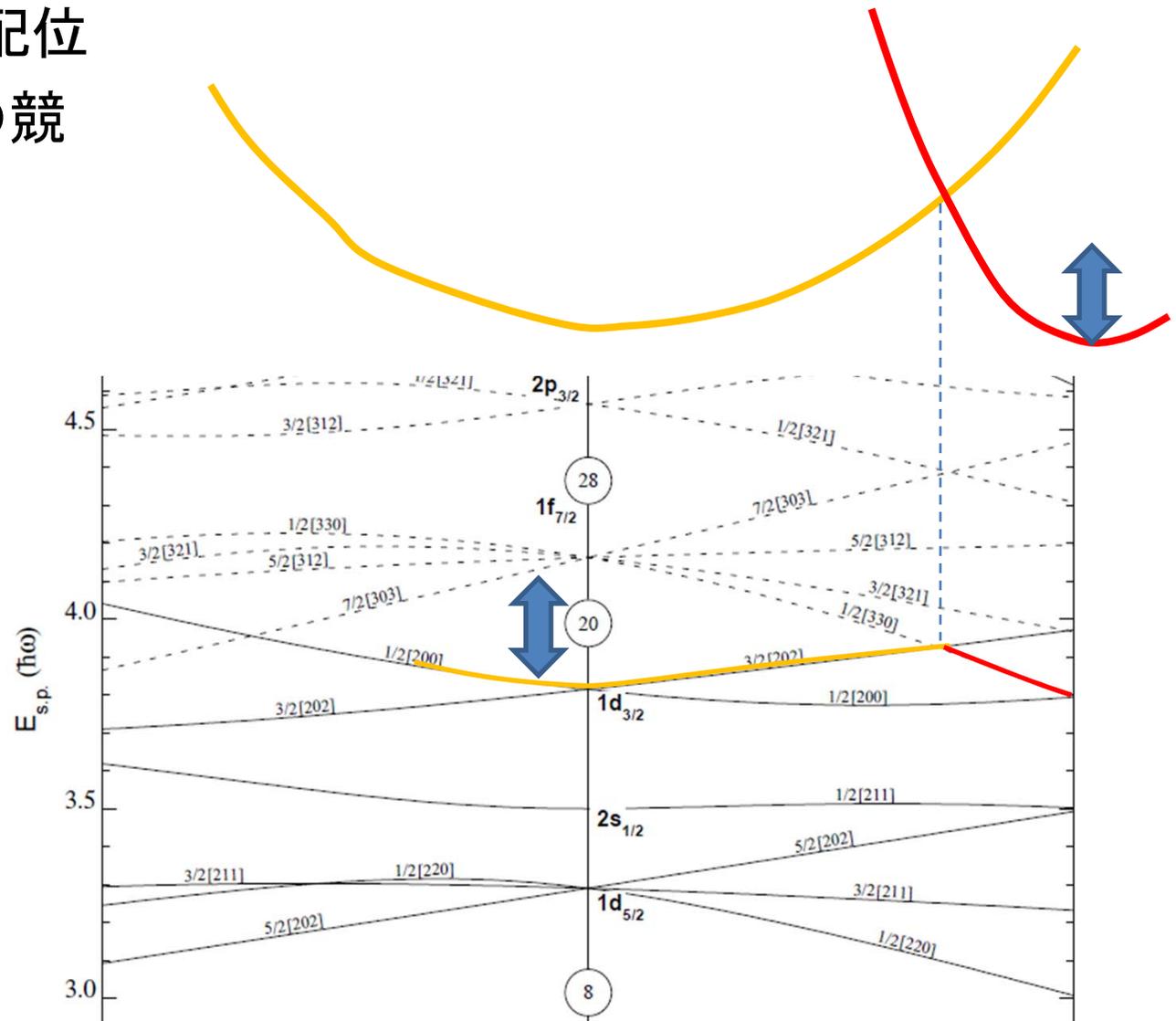
$d_{5/2}-s_{1/2}$: n-nが12本、p-nが12本



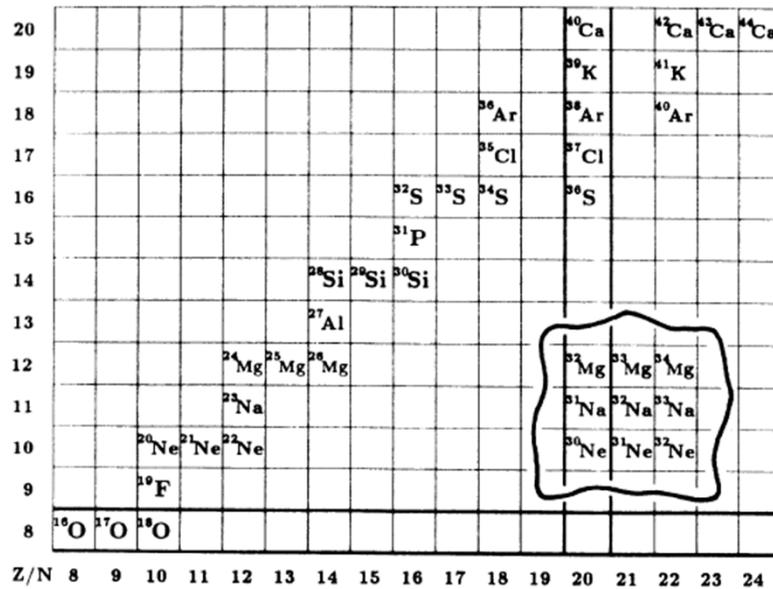
“island of inversion”研究に基づく
殻進化描像

“island of inversion”: 二つの配位競合

- Shell gap: normal配位 vs. intruder配位の競合に重要

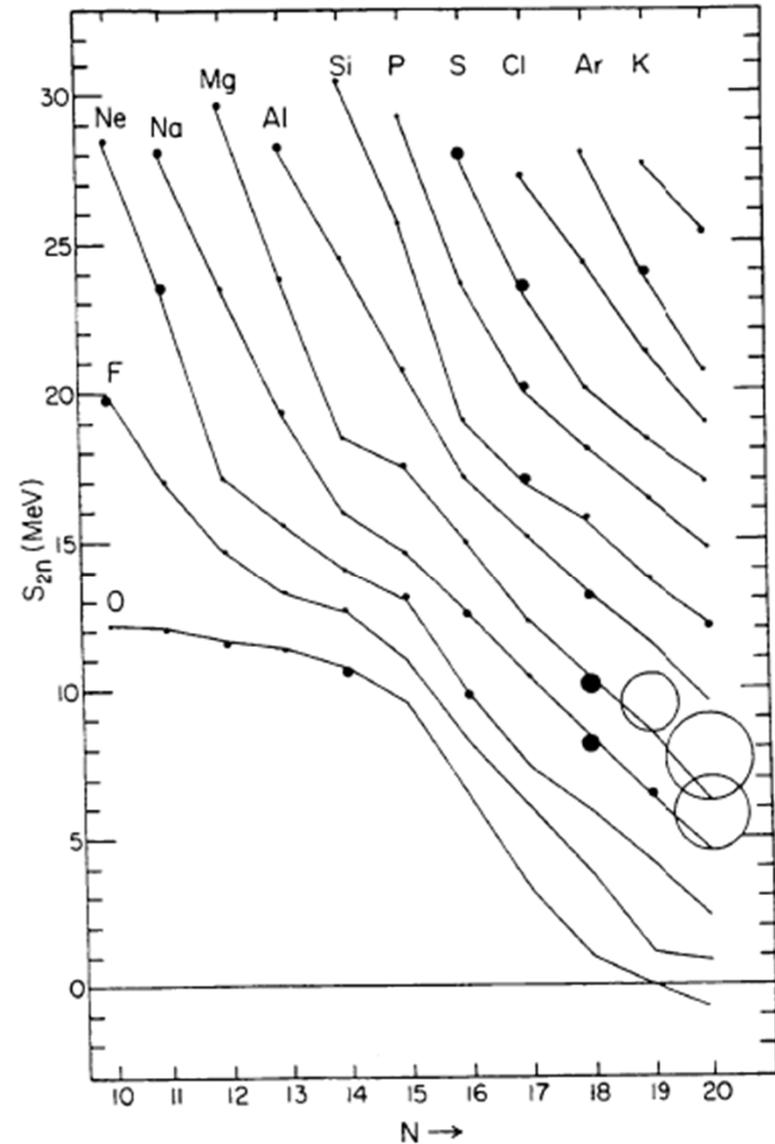


island of inversion: USDに基づく理論予測



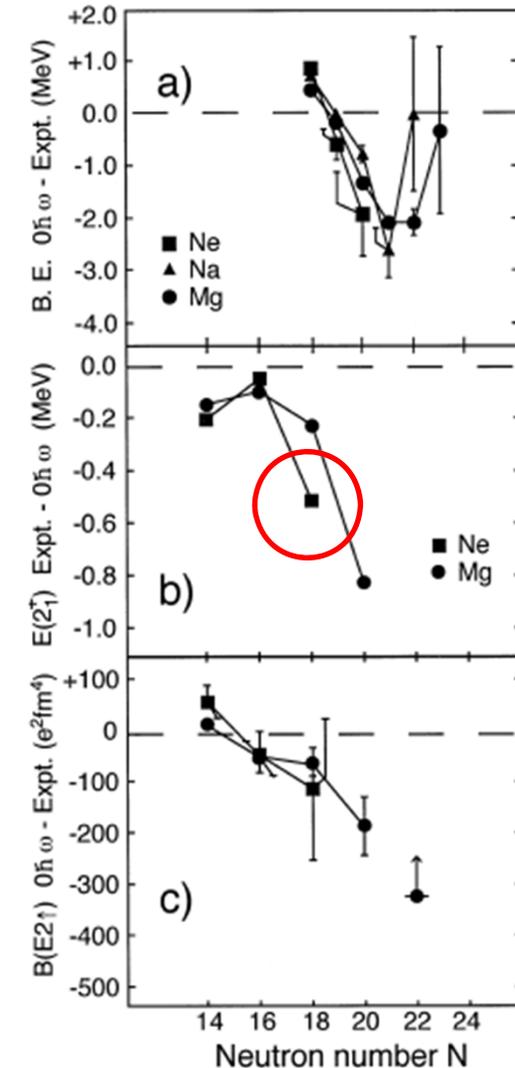
E.K. Warburton et al., Phys. Rev. C 41, 1147 (1990).

- 0p0h vs. 2p2h
 - 2p2hの方がエネルギーが下がる9核の領域を”island of inversion”と呼んだ
 - USDでunderbindingになる核と良く対応していた

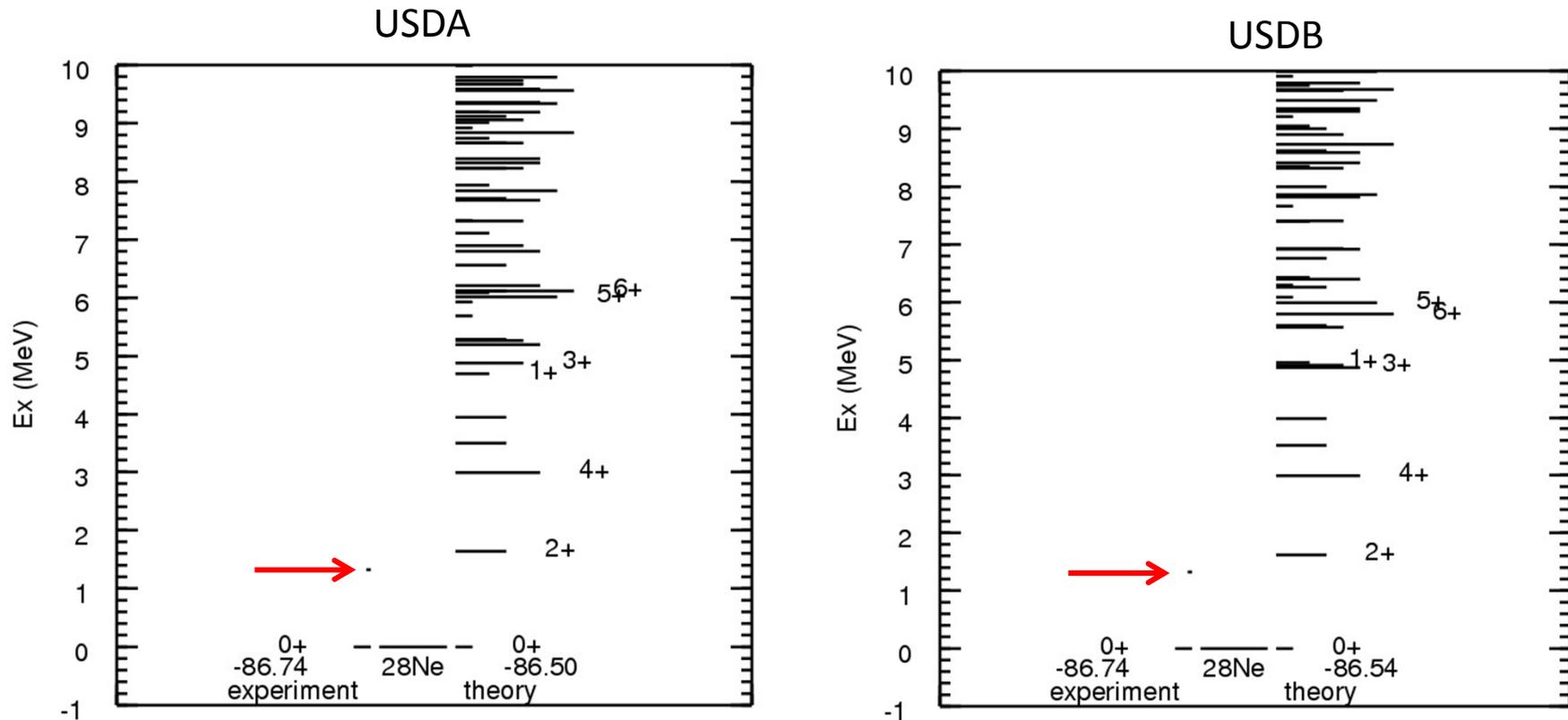


1990年代後半の状況： ^{28}Ne puzzle

- In-beam γ -ray experimentで、多くの核の励起エネルギーが測定された
- 多くの場合、USDは良い精度で実験値を説明してきた → sd配位が主
- ところが、
 1. ^{28}Ne (N=18) の 2^+ の励起エネルギーはUSDから大きくずれることが判明
 - intruder state?
 2. ^{28}Ne の束縛エネルギーはUSDに近い
 - normal state?
 3. ^{30}Mg (N=18 isotone)はUSDに近い
 - Mgではnormal state?



新しいUSD相互作用でも...

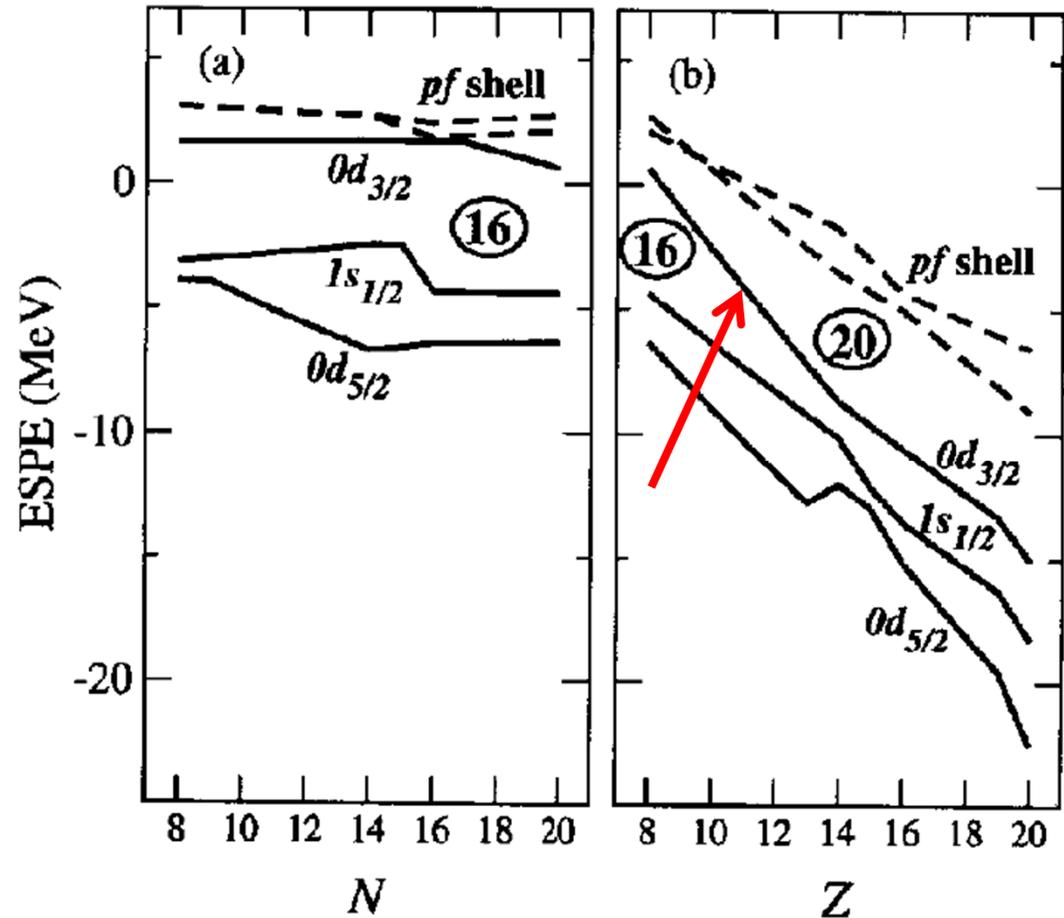


Alex Brownのホームページより

- sd殻内では 2^+ を合わせることは難しい
→ 模型空間の問題

変化する殻構造による説明

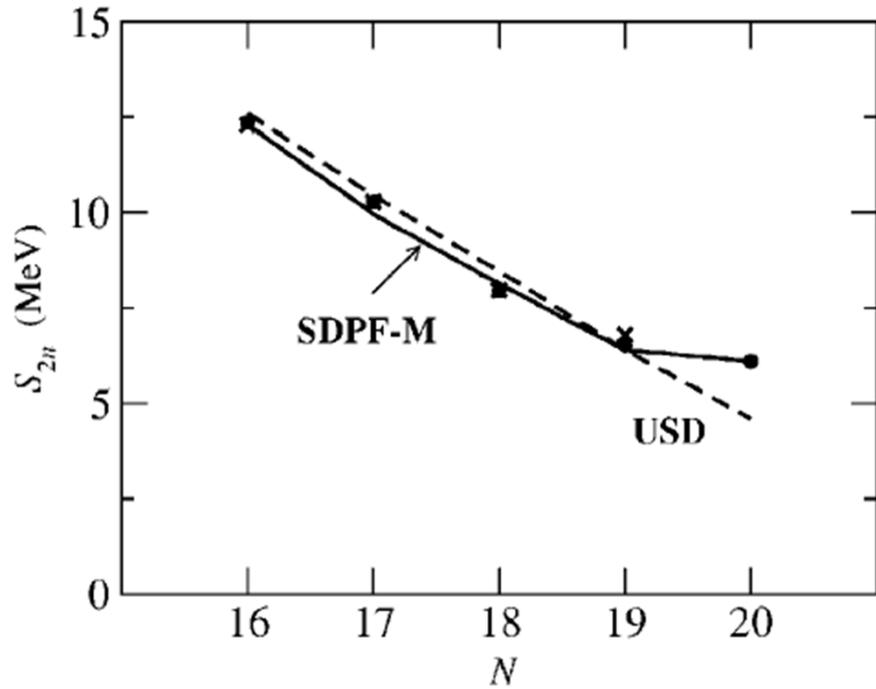
- 陽子数が少ないときは $d_{3/2}$ 軌道がUSDよりも高い
 - 酸素の drip line を説明
 - 魔法数の変化
 - MgよりもNeの方が shell gap が狭い
 - ^{28}Ne で intruder state が大きく混ざる



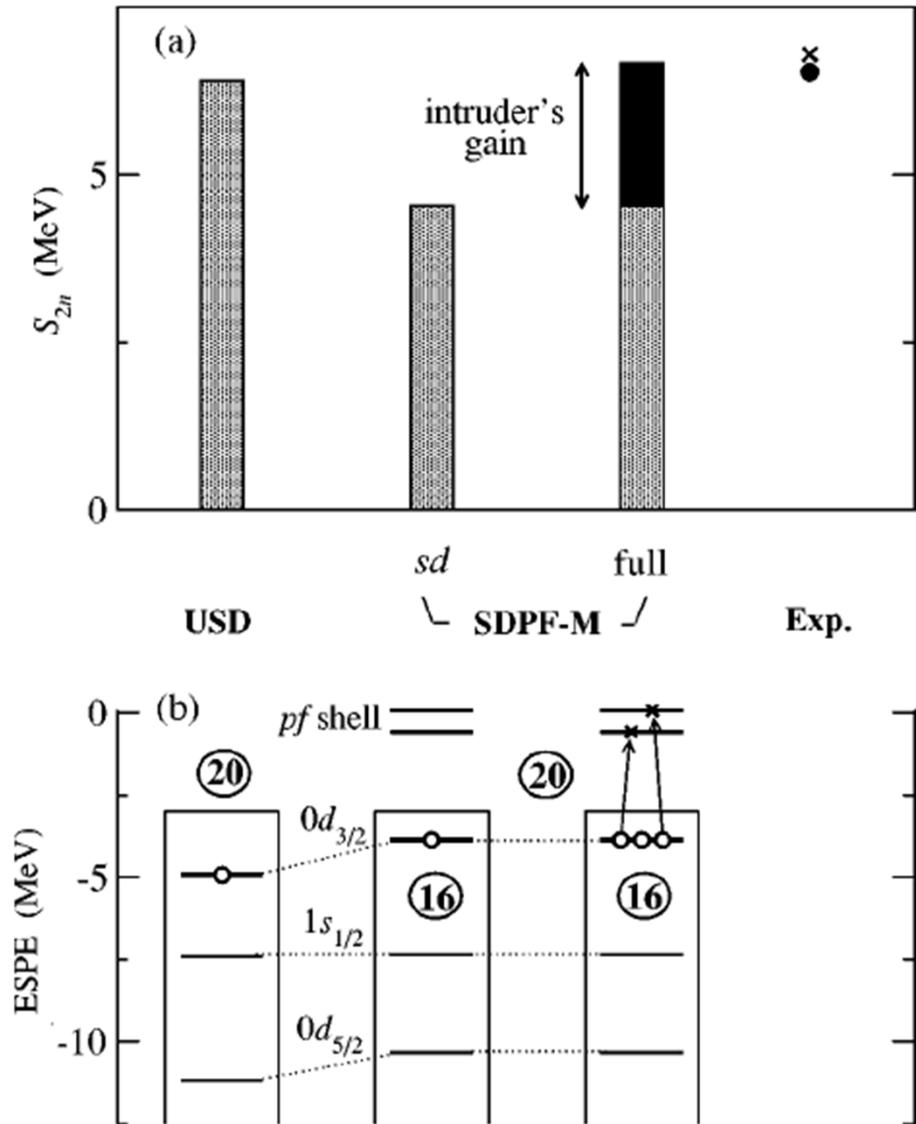
Y. Utsuno et al., Phys. Rev. C 60, 054315 (1999).

T. Otsuka et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 47, 319 (2001).

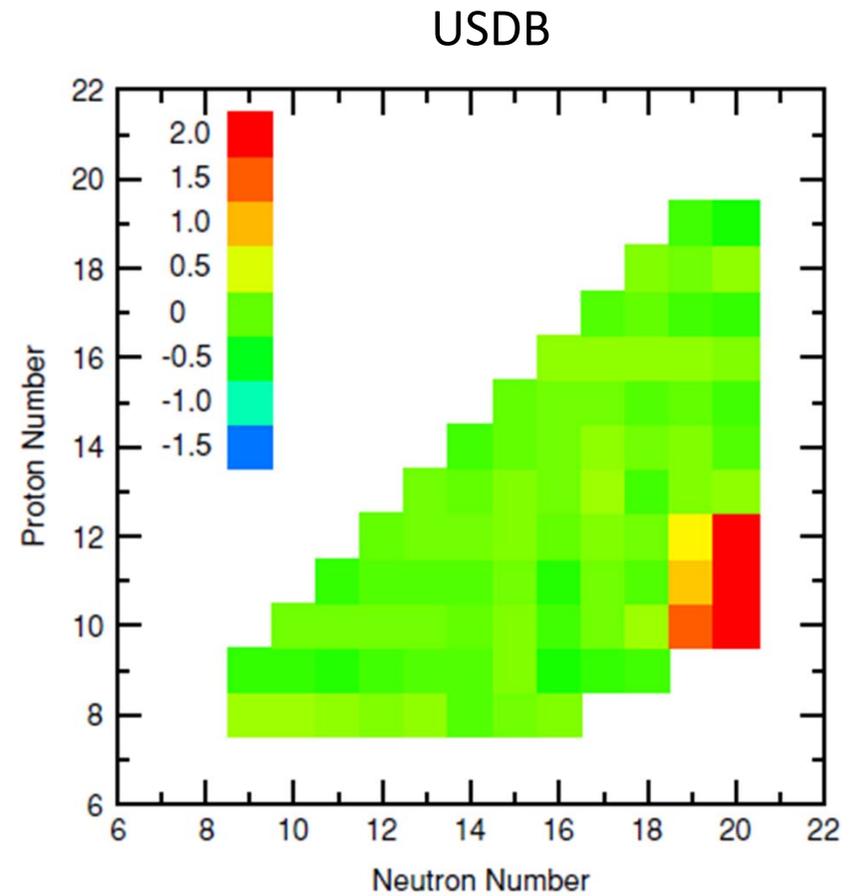
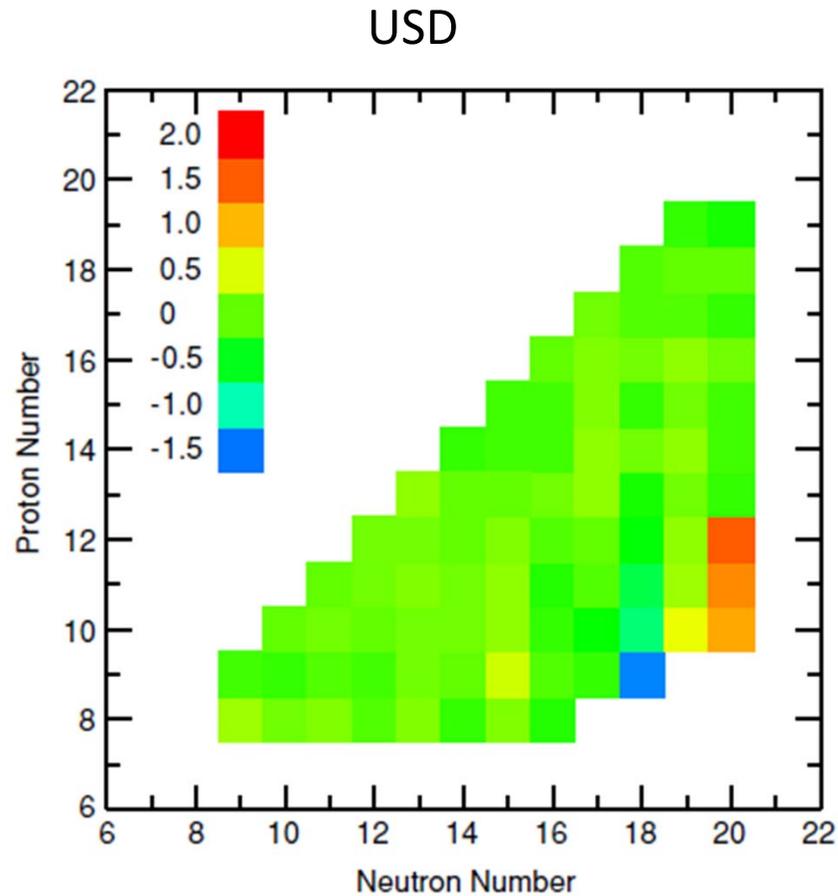
束縛エネルギー



- USDは $d_{3/2}$ が低すぎるため、intruderなしでもunderbindingにならなかった。



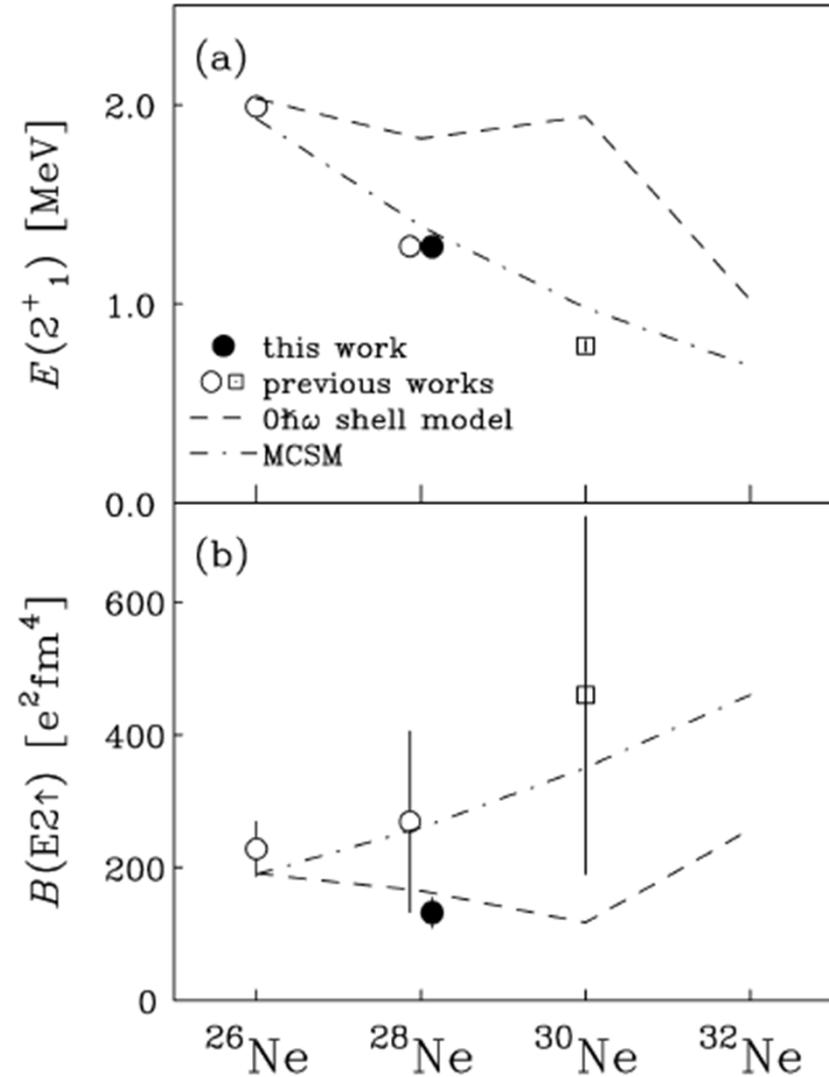
新しいUSDでは



- $d_{3/2}$ の有効一粒子エネルギーが上がったことにより、underbindingとなる領域が拡大した

^{28}Ne puzzle再び

- より精度の高い $B(E2)$
 - USDの値に近い
 - 普通のeffective chargeを使うと、intruderが大きく混ざると $B(E2)$ を過大評価してしまう
 - effective charge?

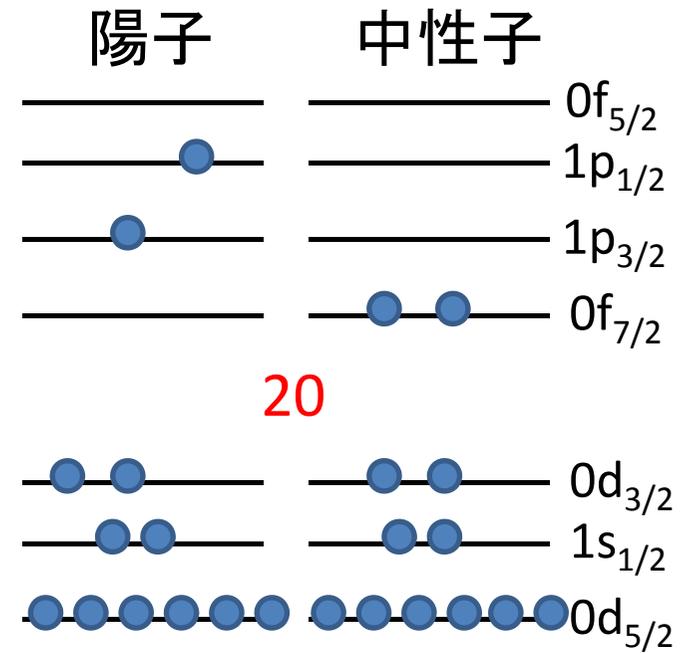
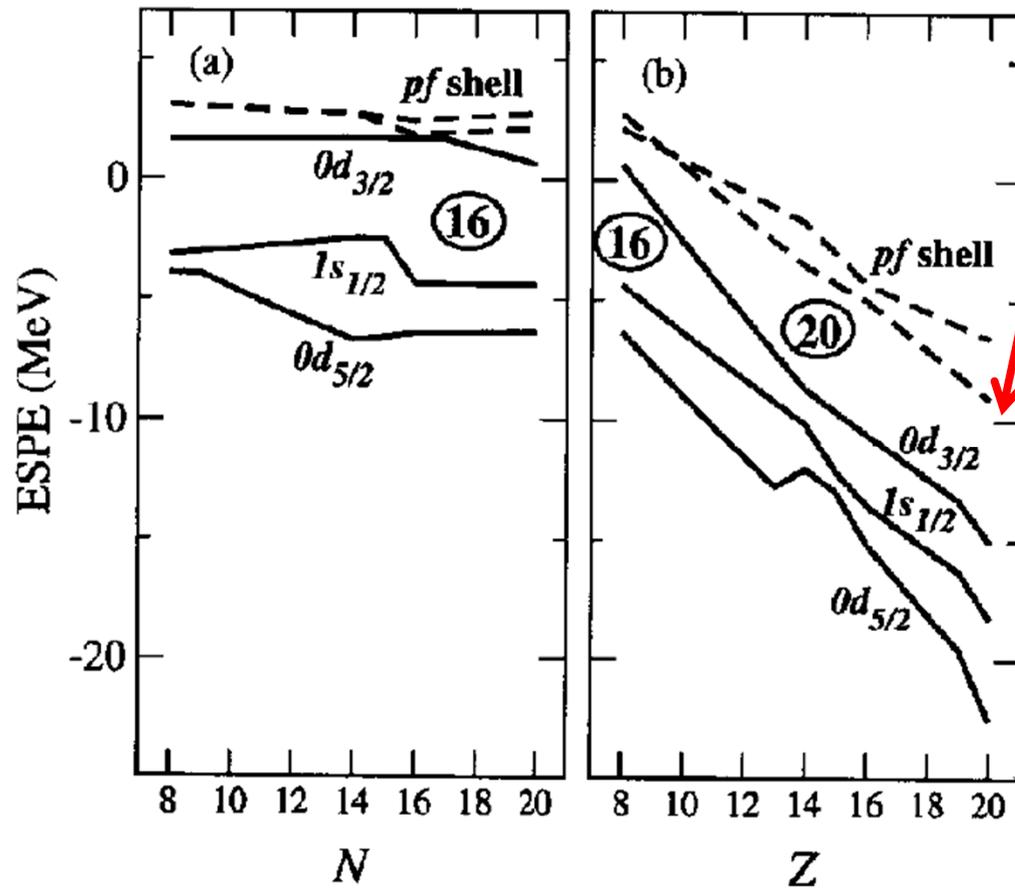


残された課題

- 結局、“island of inversion”の出現メカニズムは？
 - 殻構造の要素
 - Shell gapはどれくらいであるべきか？またそのわけは？
 - 二体力、弱束縛など
 - 模型依存性がある上に、観測量として直接見えにくい
 - 殻構造以外の要素
 - ハミルトニアンの変形のしやすさ
 - QQ力の強さ、表面エネルギー、pairingなど
 - 様々な要素があり、一意的に還元するのは困難
- 個人的な方向性
 - 着目する要素(殻進化など)以外の模型的要素を固定し、安定核から不安定核にかけての系統的理解をしたい

二重閉殻核は二重閉殻？

二重閉殻：殻進化の基点



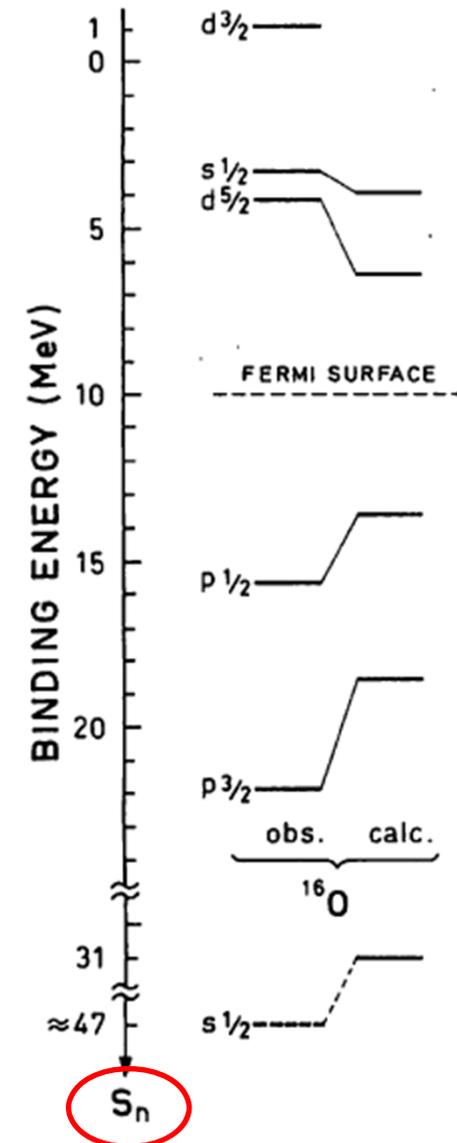
可能な組み合わせの数の例：
(=ハミルトニアン行列の次元)

1.5×10^{15} (^{40}Ca の場合)
→ 厳密対角化不可能

- ^{40}Ca は今のところ荷が重いので、 ^{16}O を調べてみる

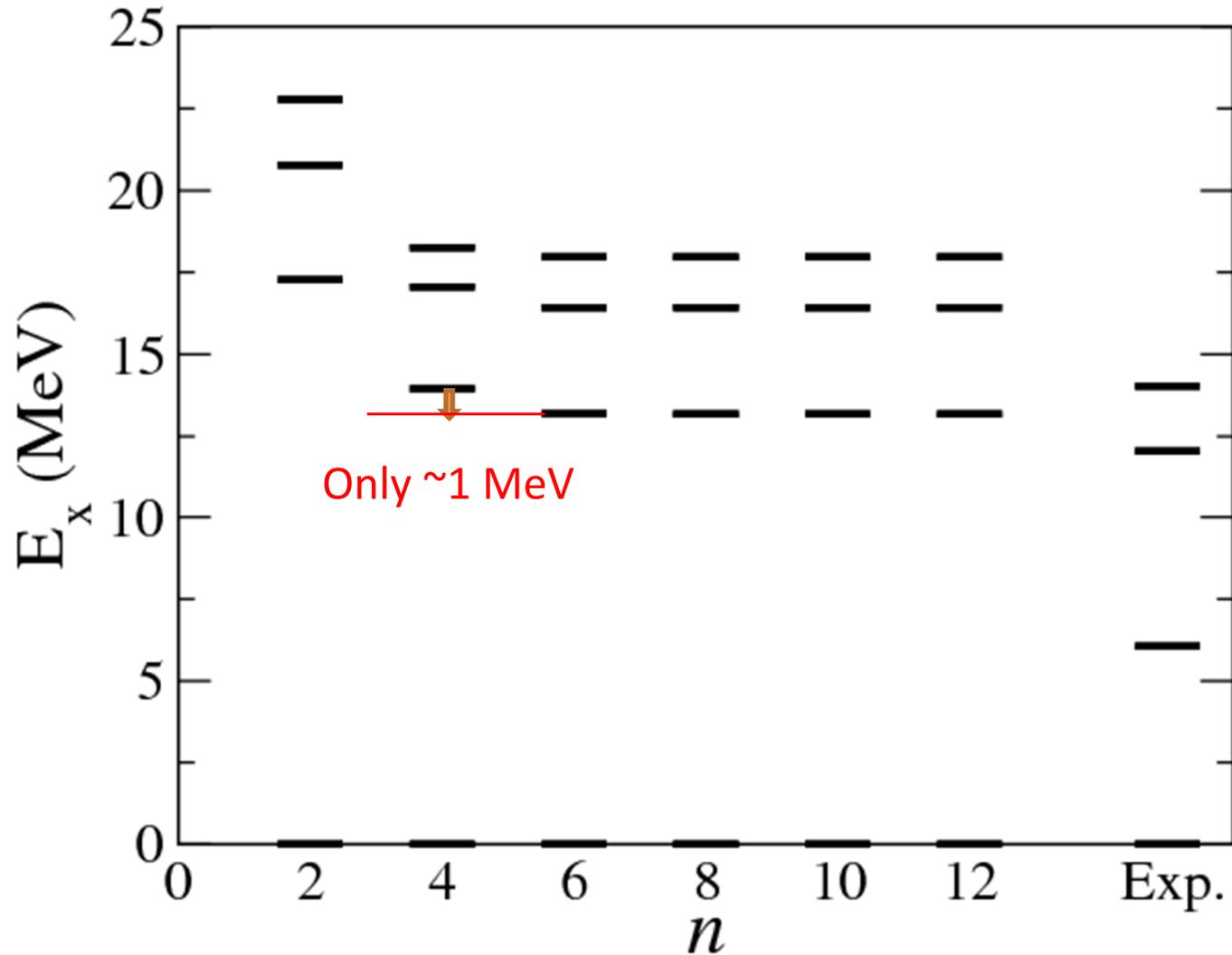
^{16}O の二重閉殻性と励起状態

- 「実験的」殻ギャップ = 11.5 MeV
 - $S_n(^{16}\text{O}) - S_n(^{17}\text{O})$
 - ^{16}O のコアが十分良い場合、 ^{16}O ポテンシャルの一粒子エネルギーギャップとみなされる
- 系統的な低い励起状態の存在
 - ^{16}O の 0^+_2 ($E_x = 6.05$ MeV): クラスタ状態あるいは4p-4h状態
- 従来の殻模型計算 (p, sdを活性化した)
 - ^{16}O の励起状態は4hw計算にて記述可能。ただし、一粒子エネルギーはフィット (Waxton and Johnson, 1990) あるいは標準的なギャップよりも3 MeV狭める (Warburton et al., 1992) 必要あり。そのoriginは？



4p-4h以上の励起の影響

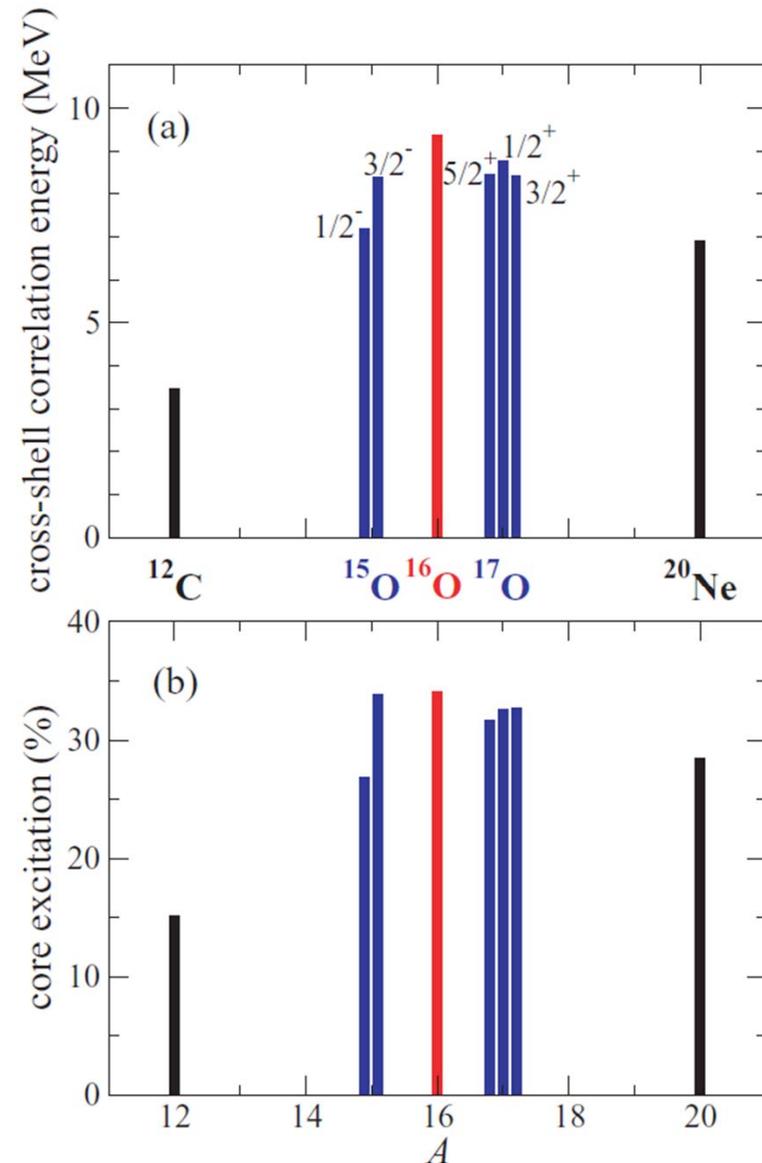
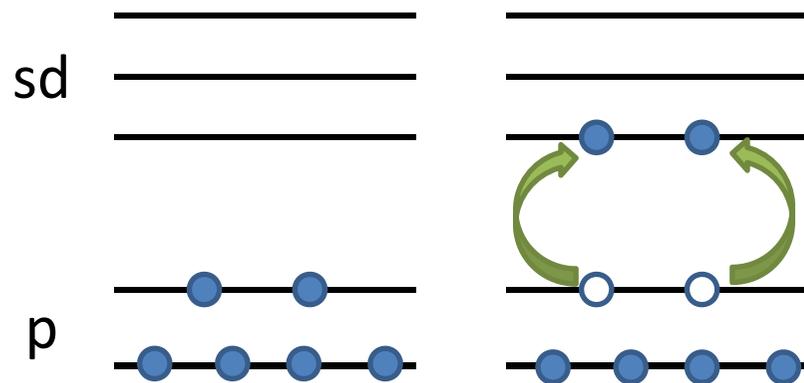
0^+ of ^{16}O with PSDWBT (in full p-sd shell)



^{16}O 近辺の相関エネルギー

- p→sd shellの励起を許した際のエネルギーゲイン

- p-sd空間、PSDWBT相互作用
- ^{16}O でピーク、遠いほど小さい。
 - ブロッキング、 $p_{1/2}$ で顕著
- 「実験的」殻ギャップ = $S_n(^{16}\text{O}) - S_n(^{17}\text{O})$ が増大してしまう。

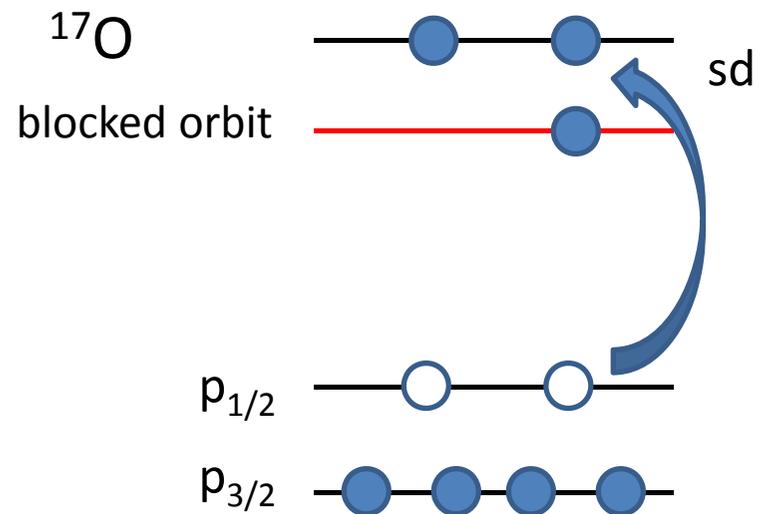
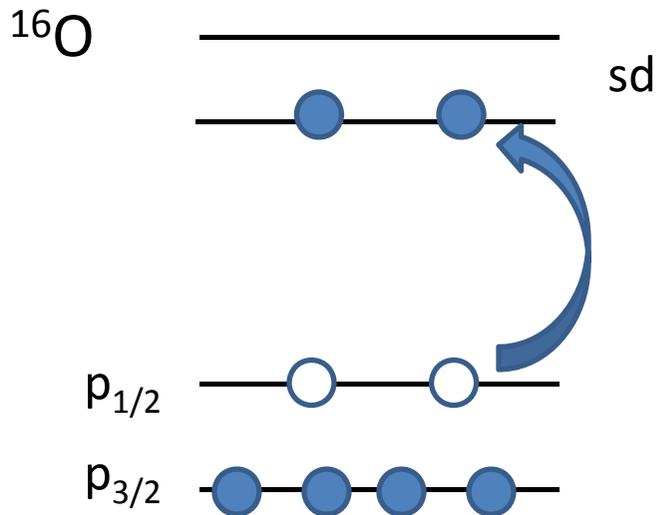


^{16}O で相関エネルギーが最大化するのは？

Component of
the wave function (%)

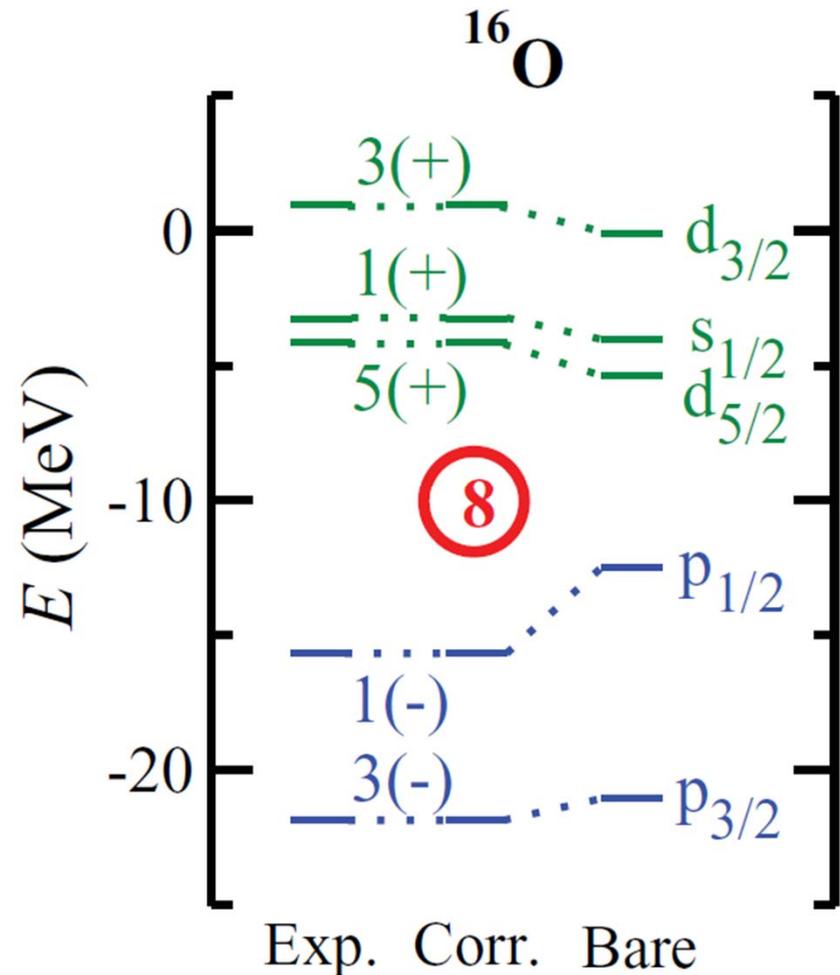
PSDWBT interaction

excitation		^{16}O	^{15}O	^{17}O
p	n			
0	0	65.9	73.1	68.3
1	1	23.9	20.1	22.8
0	2	2.9	1.4	2.5
2	0	2.9	3.3	3.0



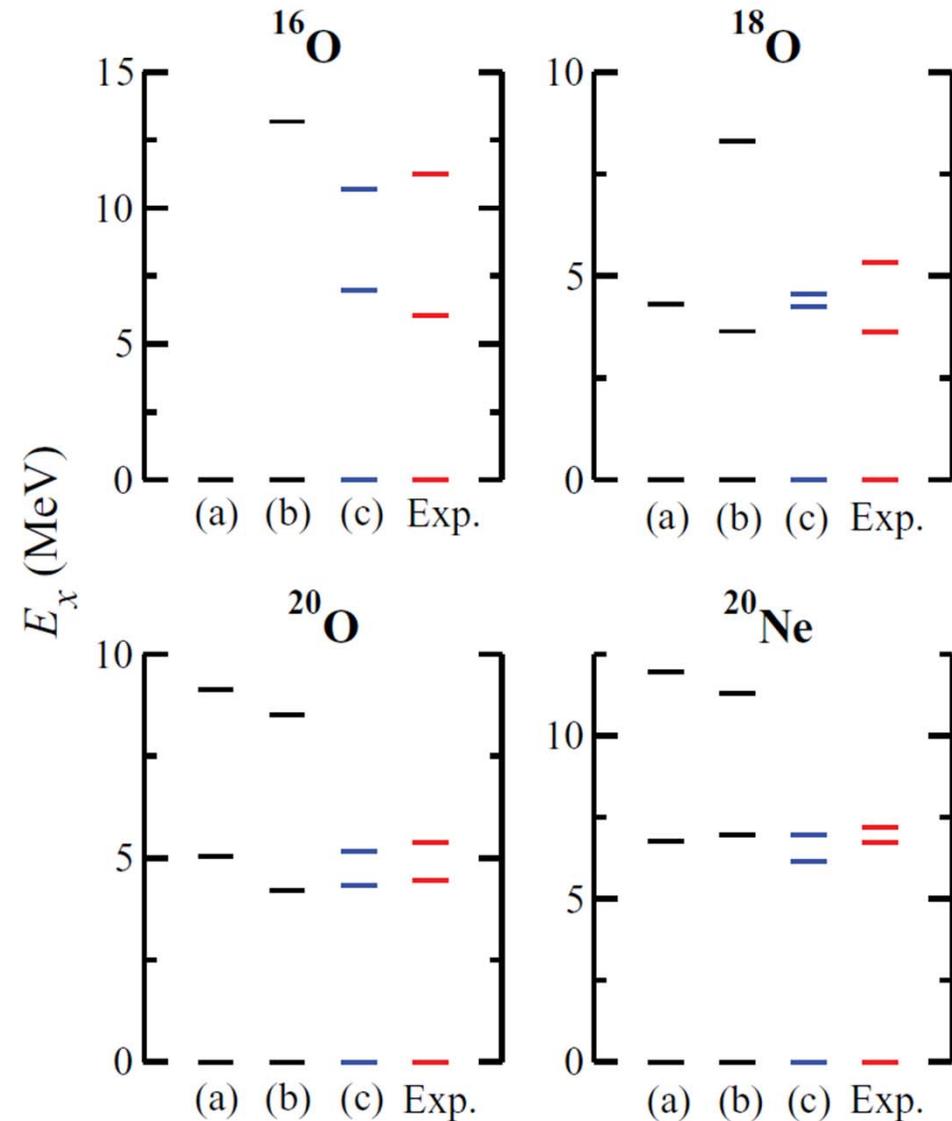
相関を考慮した正しい殻エネルギー

- 方針: p-sd空間のエネルギー固有値(相関エネルギー込み)として、separation energyが正しく出るようにSPEを決め直す。
- bare SPE(相関なし)による N=8 shell gapは、「実験的」gapよりもかなり狭まっていてはならない。



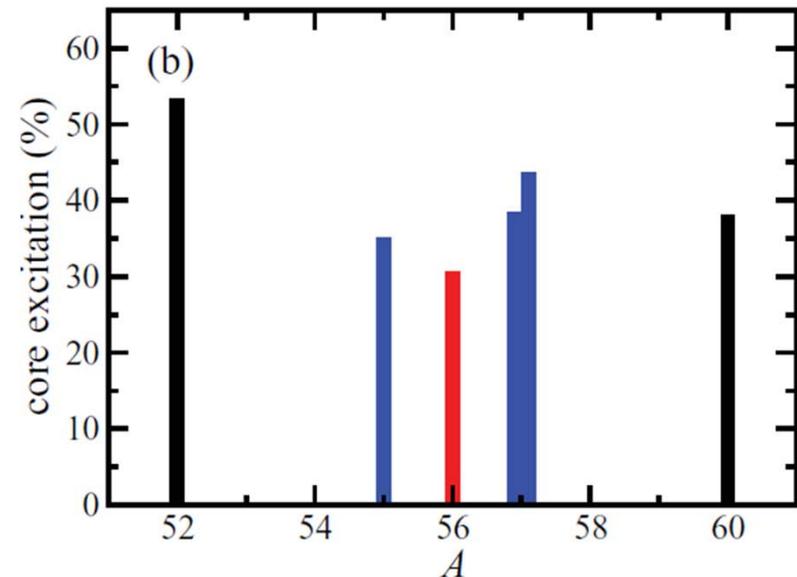
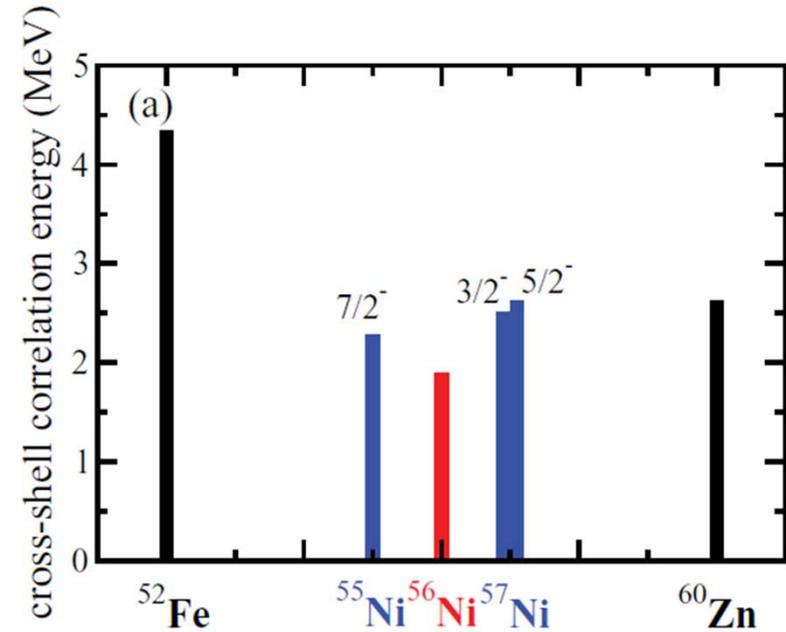
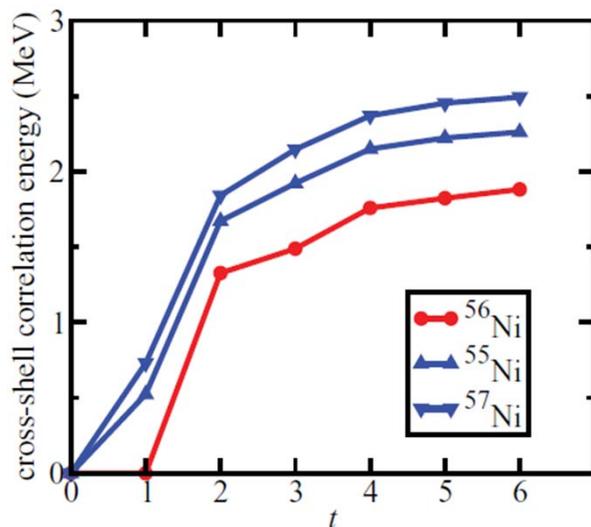
多粒子多空孔状態の記述

- 励起 0^+ 状態の系統性
 - (a): $p \rightarrow sd$ 励起なし、(b) $p \rightarrow sd$ 励起あり、PSDWBT、(c) $p \rightarrow sd$ 励起あり、変更された PSDWBT
 - ^{16}O の 0^+_2 など、多粒子多空孔状態とされている状態を良く再現



^{56}Ni コアの場合

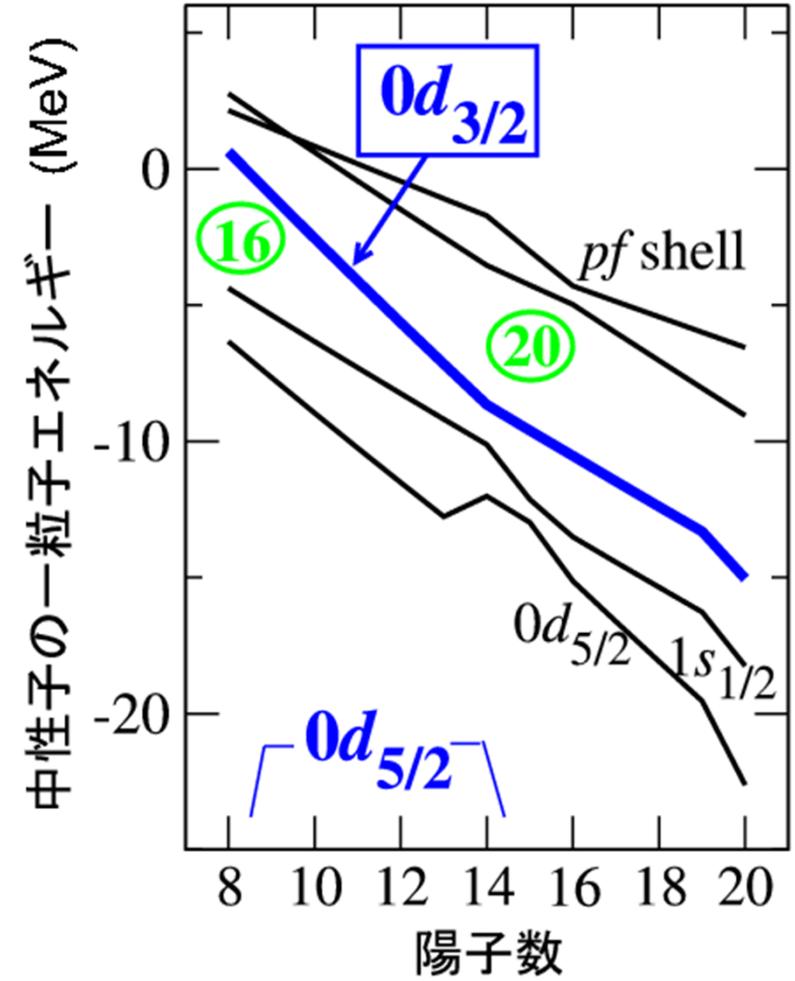
- j-j閉殻 (^{16}O はL-S閉殻)
- 相関エネルギー: ^{16}O コアとは質的な違い = ^{56}Ni で最小
 - 奇数個の励起(下図)。
 - 変形に伴い、平均場解で殻ギャップを超えられる(^{52}Fe)。



V_{MU} (monopole-based universal interaction)による殻進化の記述

二体力による殻進化

- SDPF-Mの特徴
 - T=0 $d_{3/2}$ - $d_{5/2}$ が強い引力であることによる、魔法数16から20への移動
- 強い引力の起源
 - 同じ軌道間の大きなspatial overlap (Heyde)
 - 2001年に $(\tau \cdot \tau)(\sigma \cdot \sigma)$ を提唱
 - 中心力
 - 長距離力の極限では望ましい性質になったが、現実的には目立った変化が出なかった



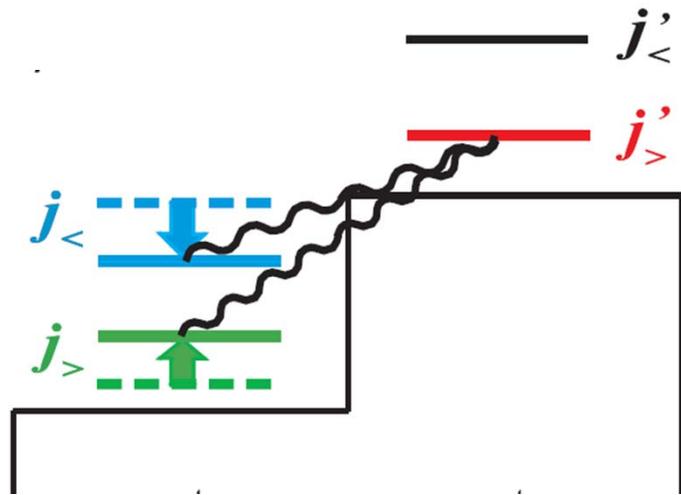
テンソル力: スピン依存性の本質

- テンソル力

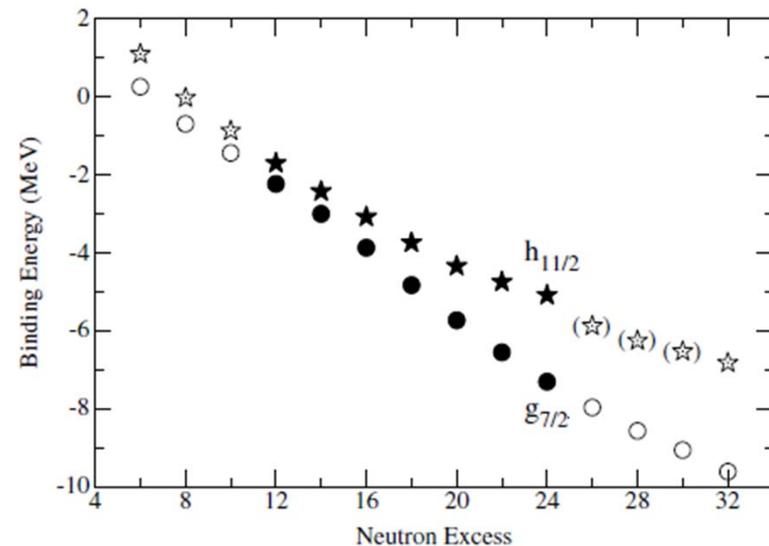
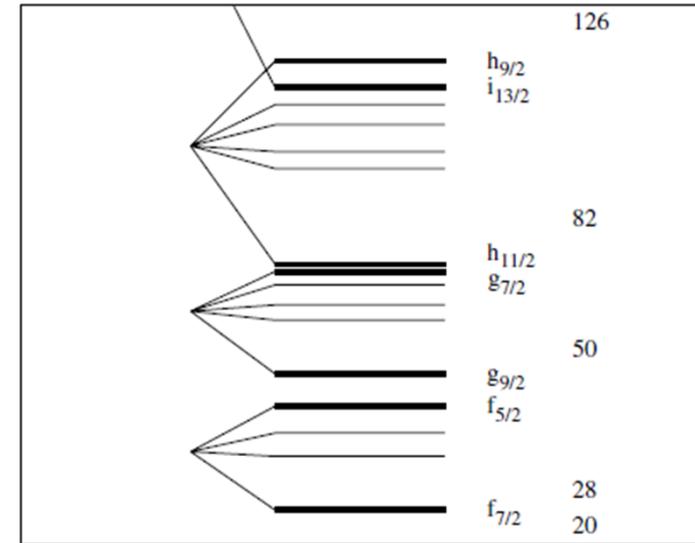
$$(2j_{>} + 1)V_{j_{>},j'}^T + (2j_{<} + 1)V_{j_{<},j'}^T = 0,$$



Is splittingに大きな影響を与える



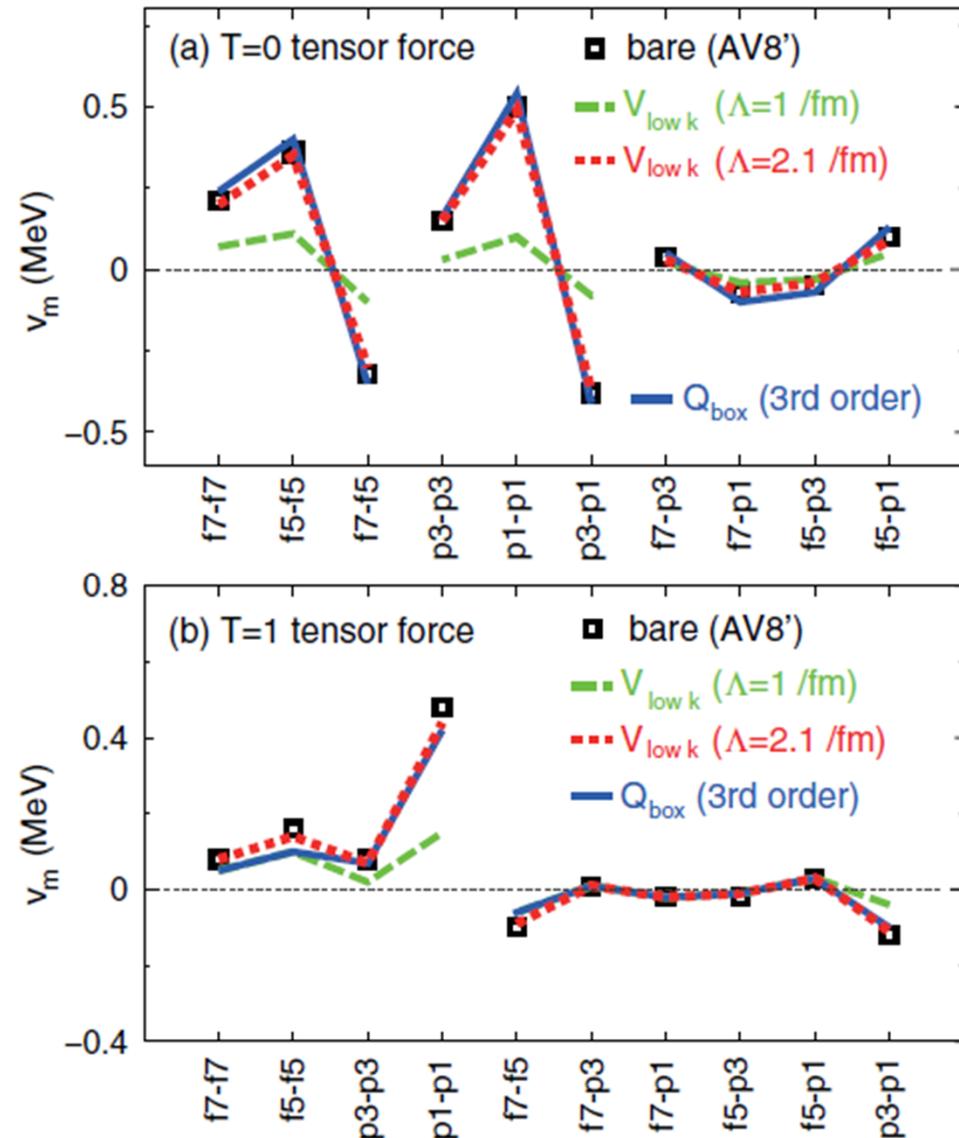
T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. 95, 232502 (2005).



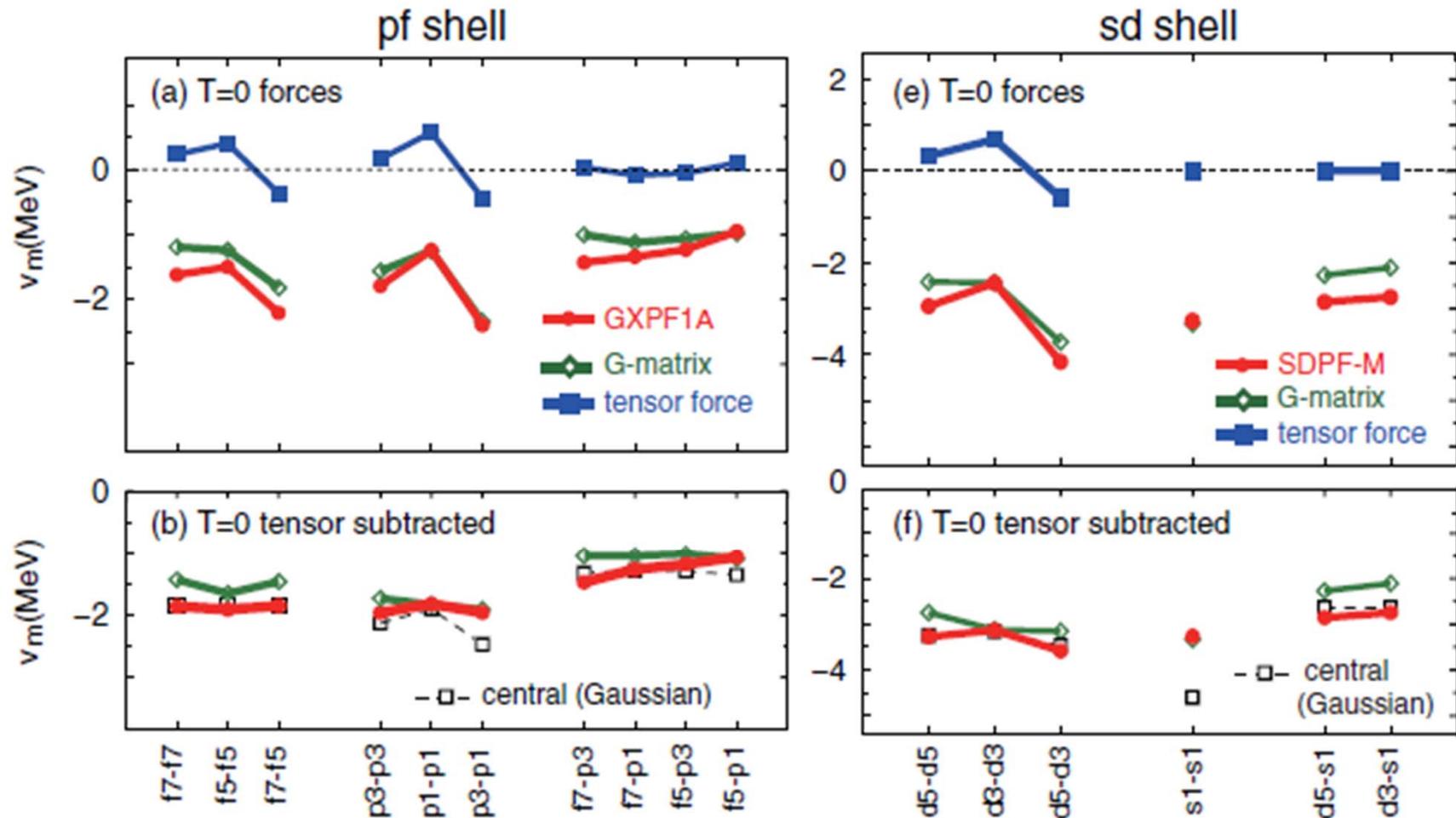
Robustness of $\pi+\rho$ as the effective int.

T=0 tensor monopole interaction (MeV)

i	j	GXPF1	$\pi+\rho$
f7	f7	0.223	0.210
f7	p3	0.036	0.035
f7	f5	-0.335	-0.315
f7	p1	-0.073	-0.070
p3	p3	0.092	0.150
p3	f5	-0.048	-0.046
p3	p1	-0.229	-0.376
f5	f5	0.382	0.360
f5	p1	0.097	0.093
p1	p1	0.306	0.501

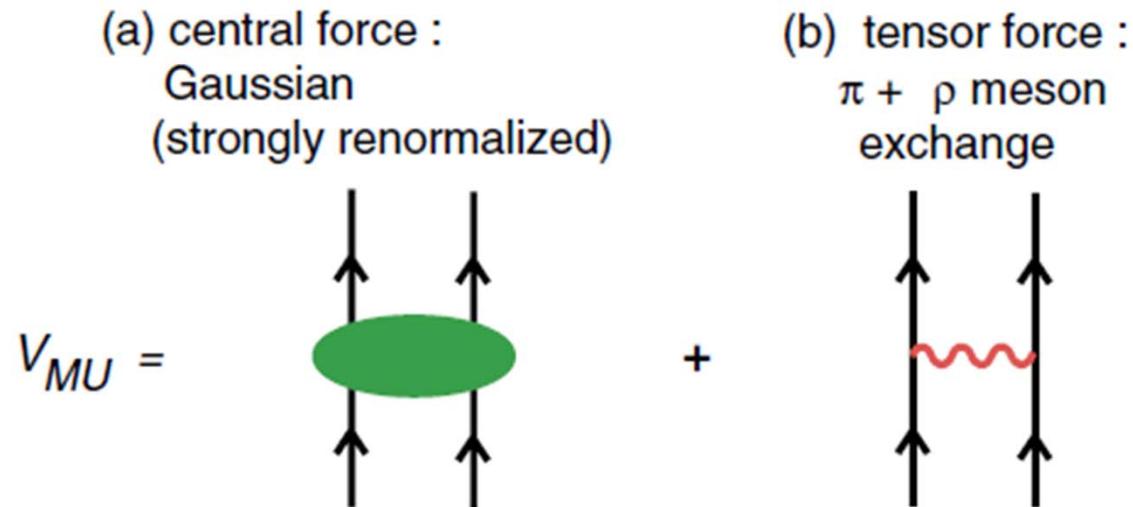


tensor以外のmonopole interaction



テンソルを引いたmonopoleは非常におとなしい振る舞い→Gaussianなどでfit可能

monopole-based universal interaction



T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. 104, 012501 (2010).

- V_{MU} : 複雑な部分は(少なくともmonopoleに関しては)、ガウシアンに押し込めても良い
 - やはり現象論であるが、monopole interactionをパラメータとしてチューンするのに比べ、はるかにコントロールされた現象論となっている。

V_{MU} ベースの殻模型相互作用

- Tensor: fixed by $\pi+\rho$
- LS: fixed by M3Y
- Central: to be close to GXPF1



V_{MU} -based cross-shell interaction

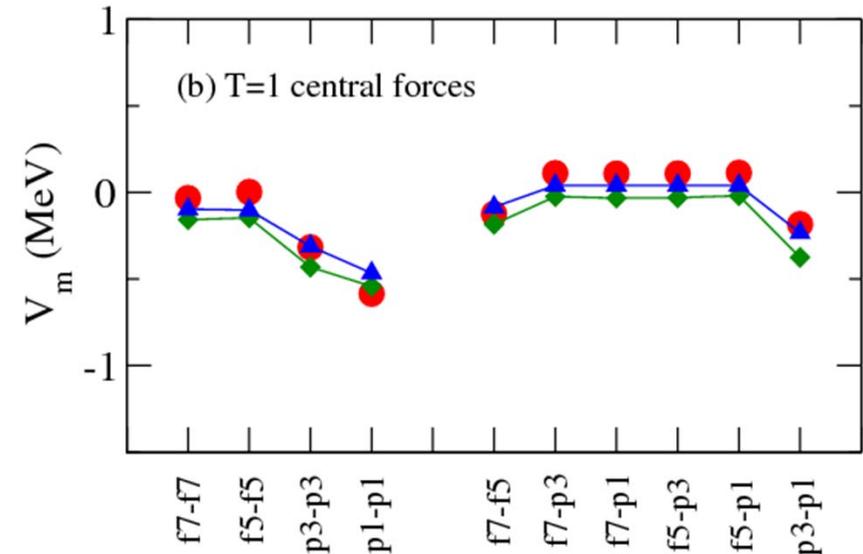
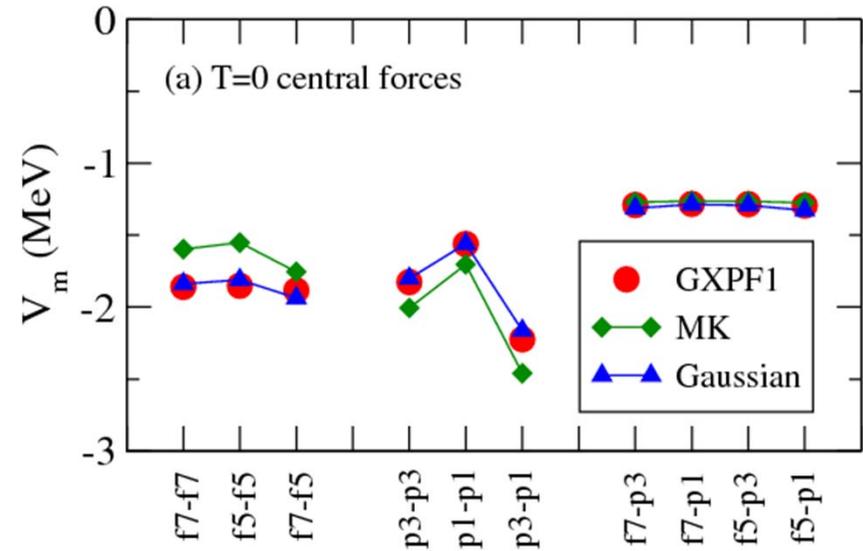
+

Existing intra-shell interactions:
USD, GXPF1B with small modifications

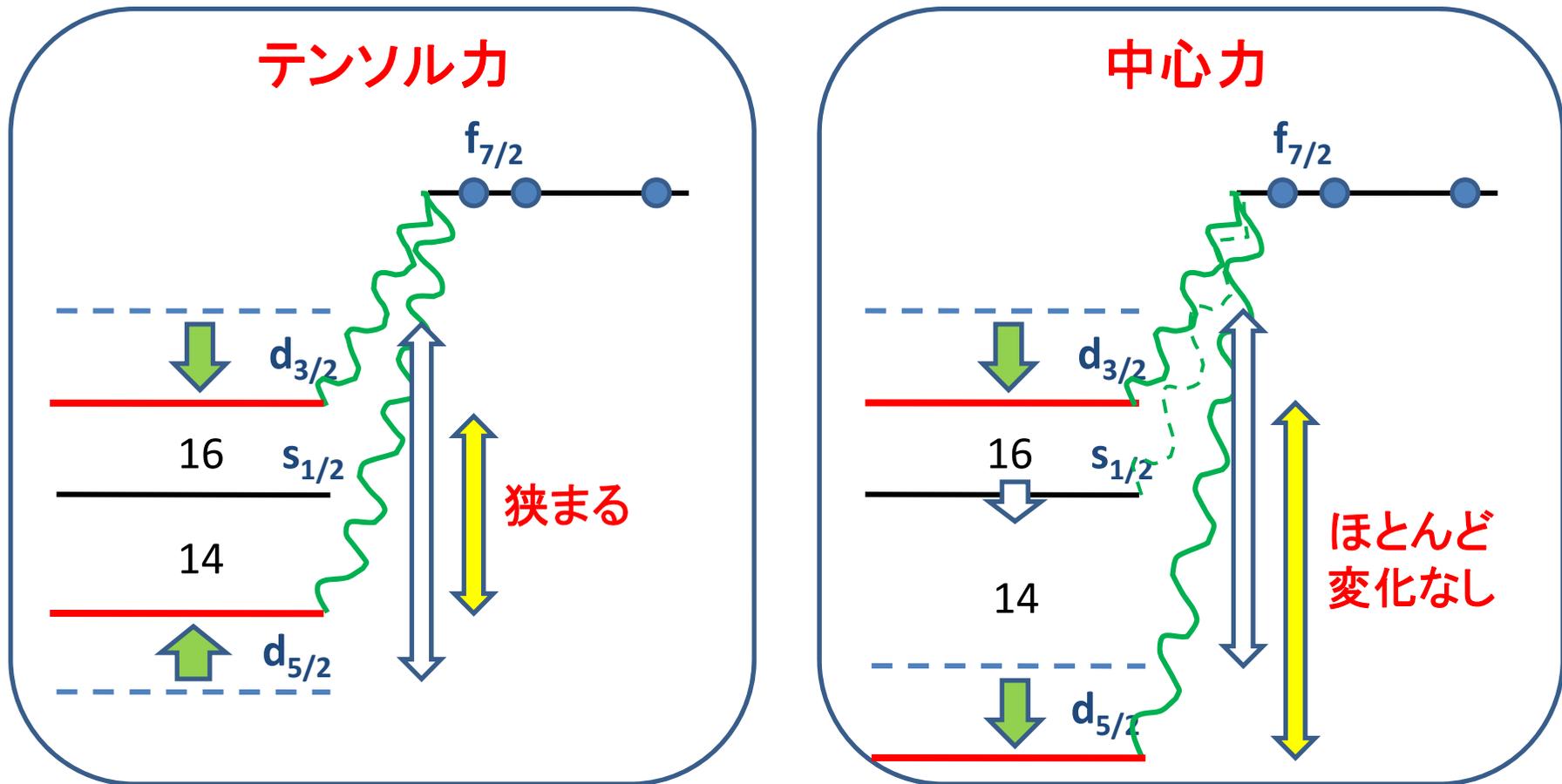


An sd-pf shell interaction for pure 0hw and 1hw states **without direct fitting to experiment**

Monopole centroids for the central



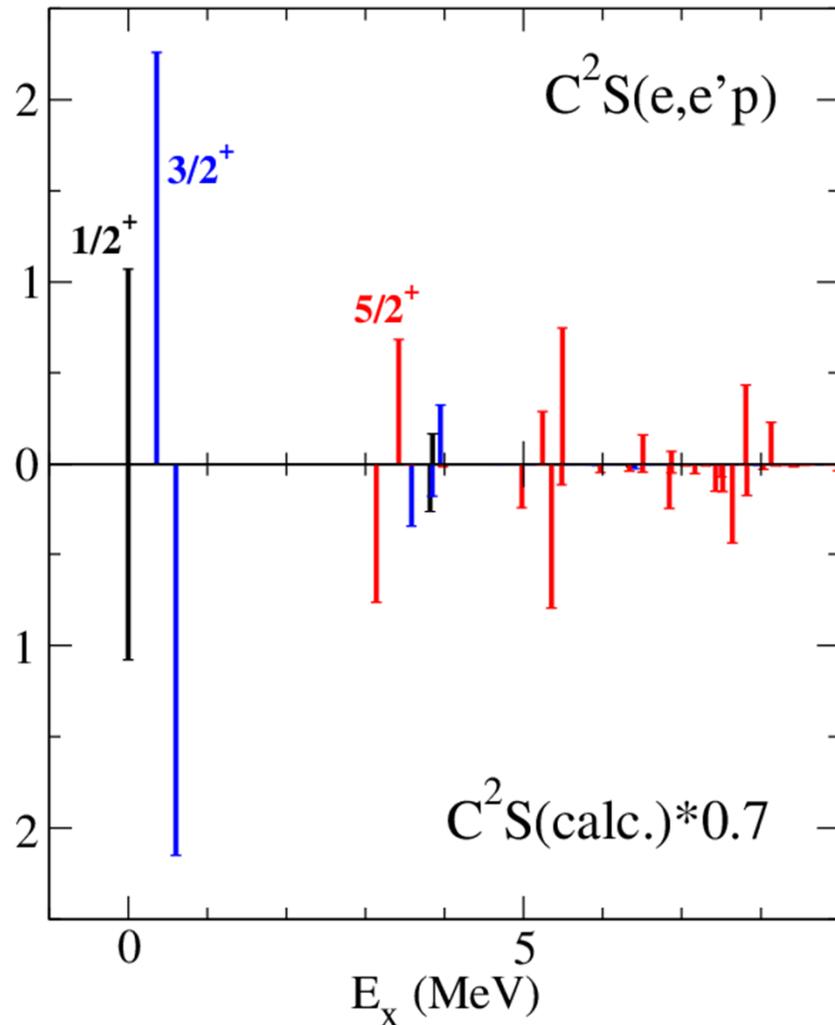
中心力とテンソル力の殻進化への影響



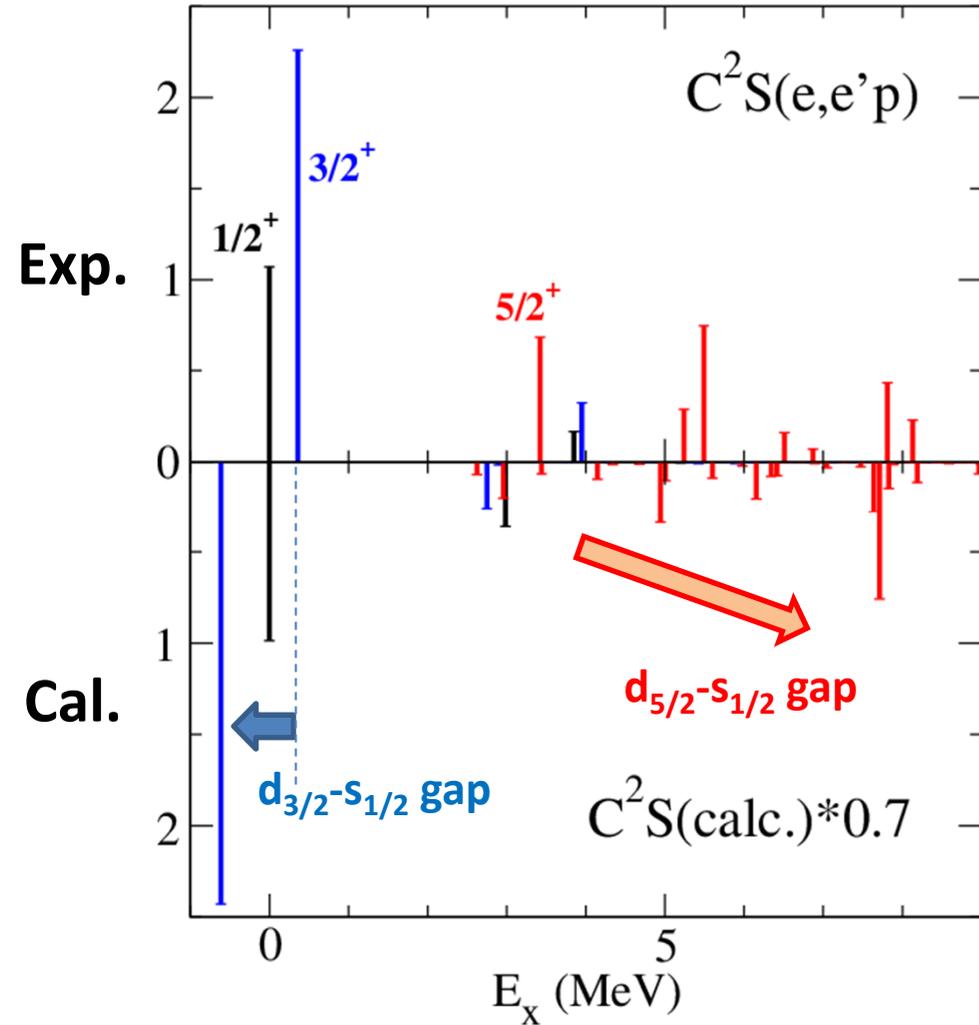
- Is splittingの変化によってテンソル力の影響を抽出
- N=20から28への変化を追うことで、8倍に「拡大」

^{48}Ca の1陽子分離反応の分光学的因子

with tensor



without tensor

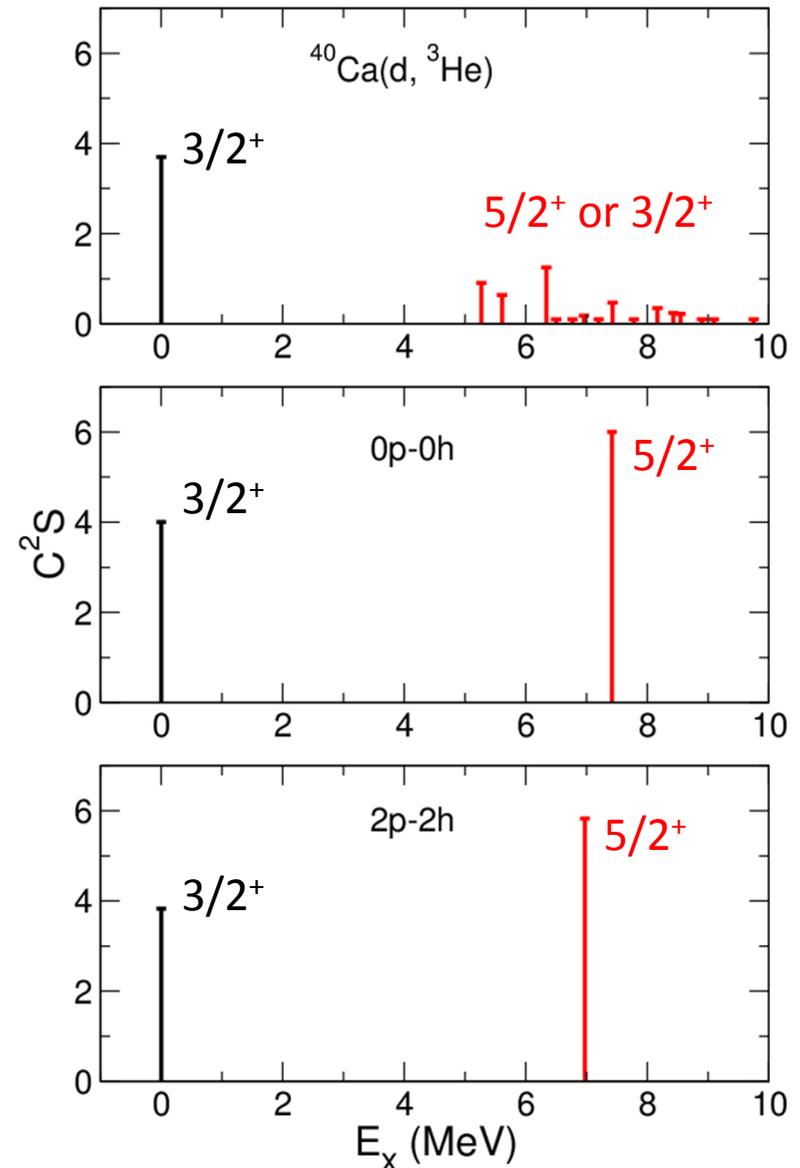


(e,e'p) exp.: G.J. Kramer et al., Nucl. Phys. A 679, 267 (2001).

「基点」となる ^{40}Ca の分光学的因子

- $d_{5/2}$ の分光学的因子
 - 実験的に多くのスピンの不確定
 - 非常にフラグメントしている
 - 2p-2h空間内では一つのピークに集中: そもそも準位数が全く足りない → 4p-4h以上と結合してフラグメントする

^{40}Ca	M=0 dimension
up to 4p-4h	2.5×10^7
up to 6p-6h	9.9×10^9
up to 8p-8h	9.0×10^{11}
full	1.5×10^{15}



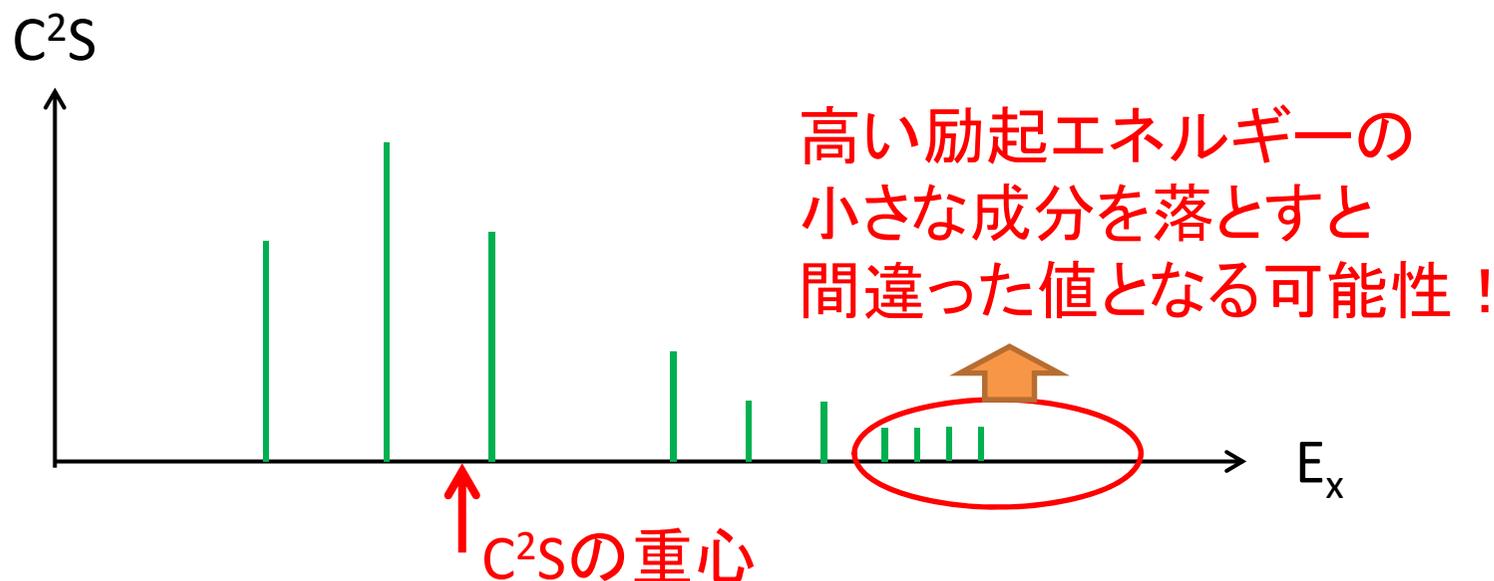
分光学的因子をめぐって：
核構造と核反応の課題

一粒子エネルギー(SPE)と分光学的因子(C²S)

- 一粒子エネルギー: ある「コア核」に一粒子を乗せた状態のエネルギー $|\Psi\rangle = a_j^+ |\Psi_{\text{core}}\rangle$

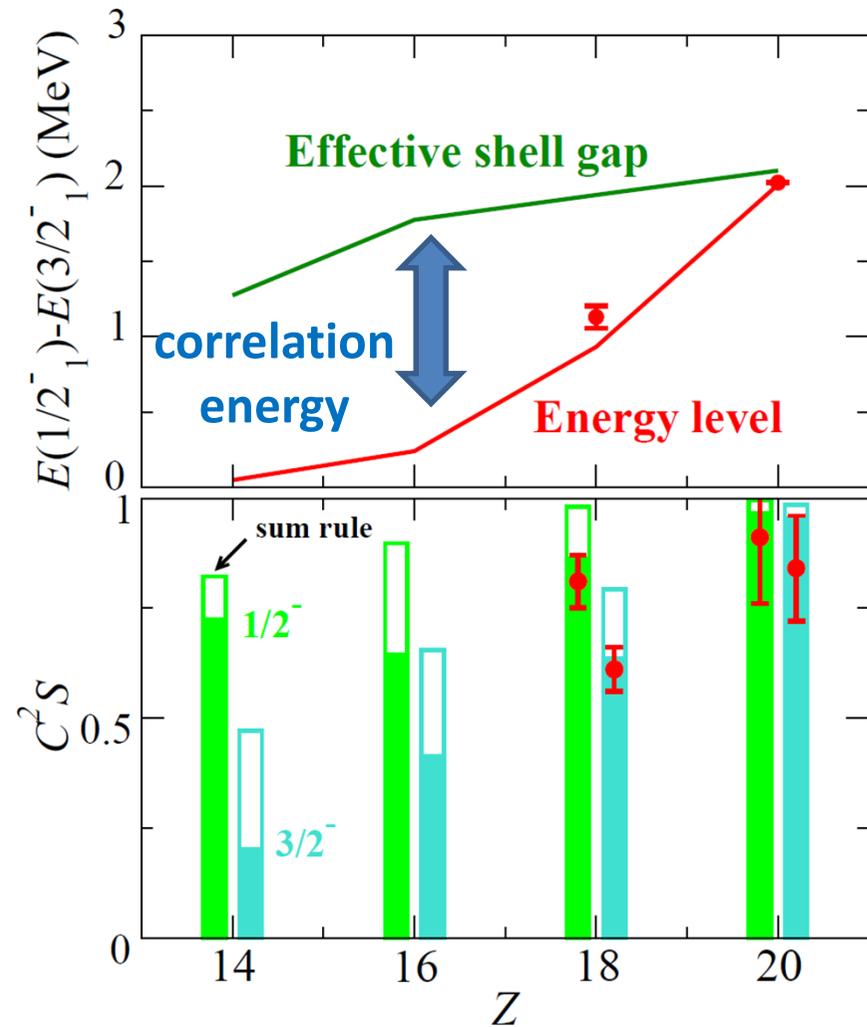
$$\frac{\langle \Psi | H | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle} = \frac{\sum_k C^2 S_j(k) E(k)}{\sum_k C^2 S_j(k)}$$

$$C^2 S_j(k) = \frac{\left| \langle \Psi_k || a_j^+ || \Psi_{\text{core}} \rangle \right|^2}{2J_k + 1}$$



エネルギー準位と一粒子準位

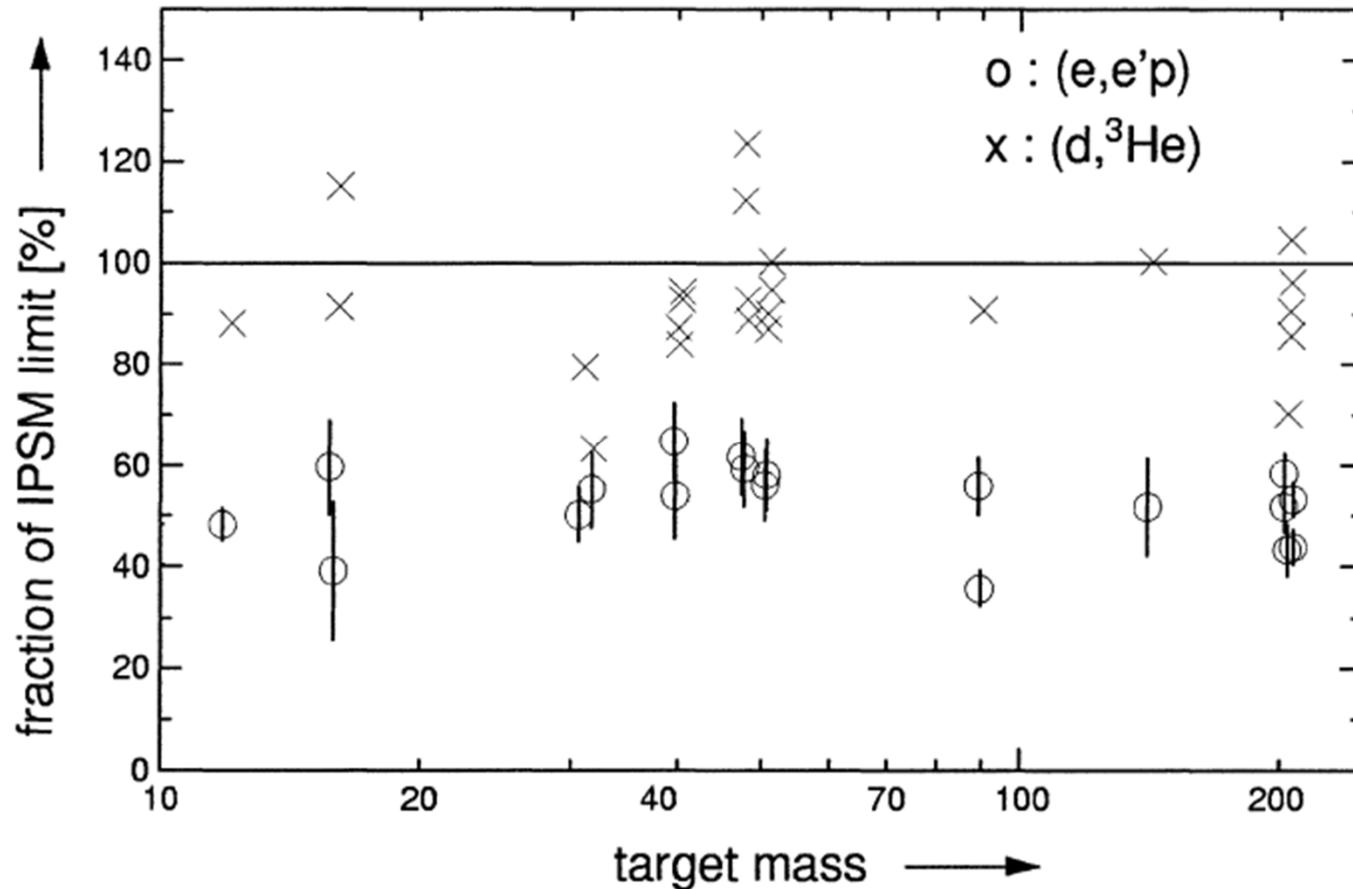
- 例: $N=29$ の $3/2^-$ と $1/2^-$ のエネルギー差
 - 単純な一粒子描像では $p_{3/2^-}$ - $p_{1/2^-}$ のsplitting
 - ^{47}Ar : ^{49}Ca よりも著しく差が小さい
 C_2S もかなり大きい
 → Is splittingの減少を意味するのか?
 → 必ずしもshell gapが減少しなくても再現できる
 - 分光学的因子が大きいからといってすぐに一粒子準位に結び付けるのは危険



分光学的因子の大きさについて

A consistent analysis of $(e,e'p)$ and $(d,^3\text{He})$ experiments

G.J. Kramer^{a,1}, H.P. Blok^{b,a}, L. Lapikás^{a,*}



分光学的因子のnormalization

- IPSM (independent particle shell model)とのずれ
 - 短距離相関
 - 長距離相関 (coupling with collective states, configuration mixing)
- 「本当の」波動関数では、いわゆるsingle particle limitでも分光学的因子は1にはならない
 - しかし、核子移行反応から引き出せれた値は、1でnormalizeされているようである。
 - Knockoutでは、そのnormalizaion factorが束縛エネルギーに大きく依存するとか色々議論がある。私にはよくわからないが、重要そう。

例：閉殻構造の議論

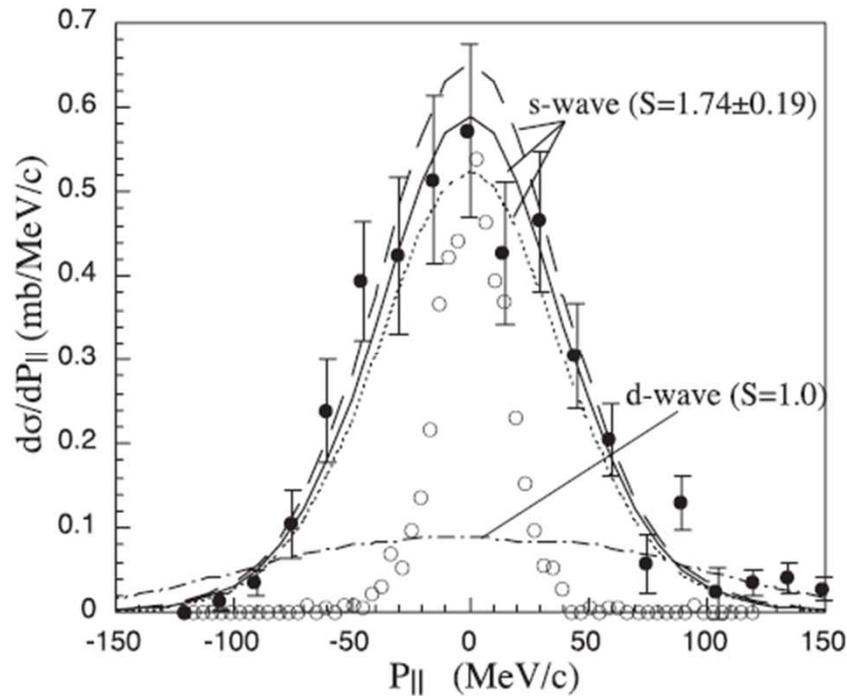


TABLE I. Spectroscopic factors for $^{24}\text{O} \rightarrow ^{23}\text{O}$ and energies of levels in ^{23}O using the SDPF-M and USDB interactions compared to that obtained from this experiment.

Spin	SDPF-M Energy (MeV)	SDPF-M C^2S	USDB Energy (MeV)	USDB C^2S	Exp S
$1/2^+$	0.0	1.769	0.0	1.810	1.74(19)
$5/2^+$	2.586	5.593	2.593	5.665	

R. Kanungo et al., Phys. Rev. Lett. 102, 152501 (2009).

- 問題提起：分光学的因子の大きさ自体を問題にしている議論（閉殻のパーセンテージなど）では、そのnormalizationをどうとっているのかが重要では？

まとめ(話した内容一覧)

- 殻模型とは
- “island of inversion”研究に基づく殻進化描像
- 二重閉殻核は二重閉殻？
- V_{MU} (monopole-based universal interaction)による殻進化の記述
- 分光学的因子をめぐって:核構造と核反応の課題