

エキゾチック集団励起： 異常対振動とピグミー双極共鳴

M. Matsuo (Niigata U.)

H. Shimoyama (Niigata U)

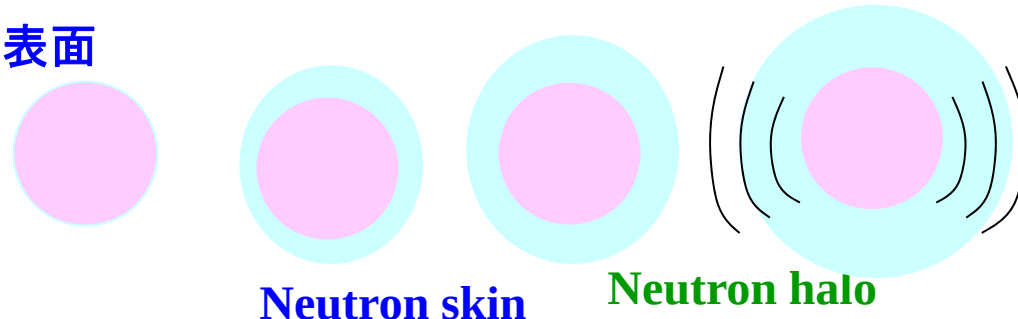
T. Yoshida (Niigata U)

Y. Serizawa

原子核における”新しい”自由度

1. スキン、ハロー、低密度表面

希薄核物質
不飽和核物質

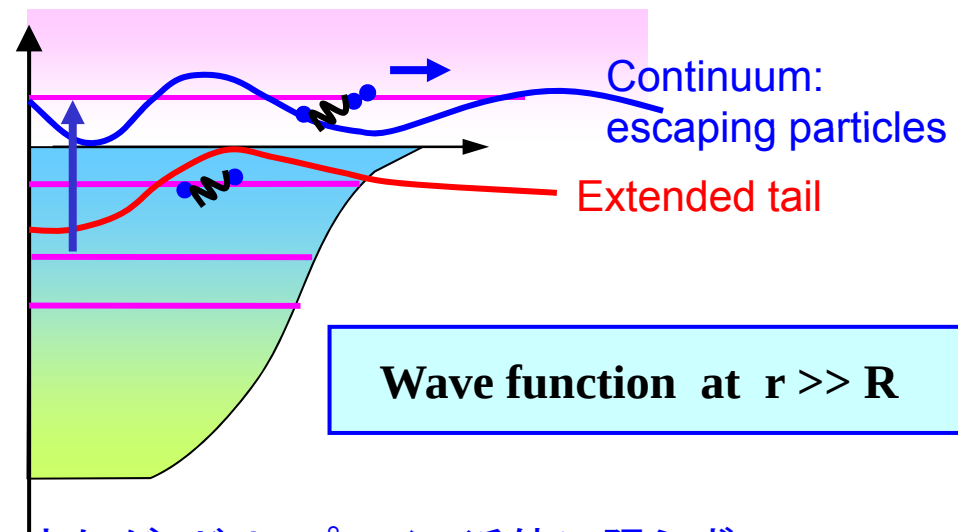


$$\rho_n/\rho_0 \ll 1$$

$$\rho_n/\rho_p \gg N/Z$$

2. 弱束縛の核子

弱束縛軌道
非束縛軌道



Wave function at $r \gg R$

不安定核研究から浮かびあがってきたが、ドリップライン近傍に限らず、多数の原子核で役割を果たしているのでは？

新自由度とエキゾチック集団励起

池田さん(1988)

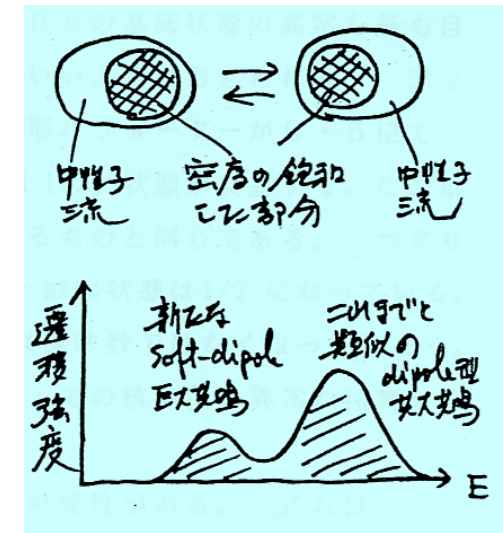
1. ピグミー双極共鳴・ソフト双極励起 (時間の範囲内で)

日本発のアイデア。エキゾチック励起の代表格

Ikeda 1988, Suzuki, et al 1990

実験は活発化しており、理論計算も多数あるが、基本的なことが解明されていない

原子核応答の研究で実績のあるRCNPにふさわしい？

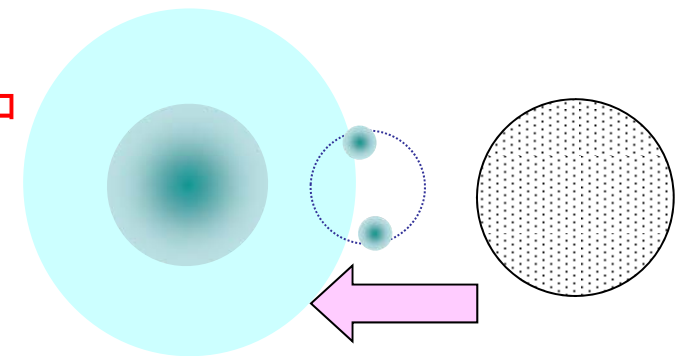


2. 異常対振動励起・2中性子移行反応(最近の研究)

希薄核物質への手がかり

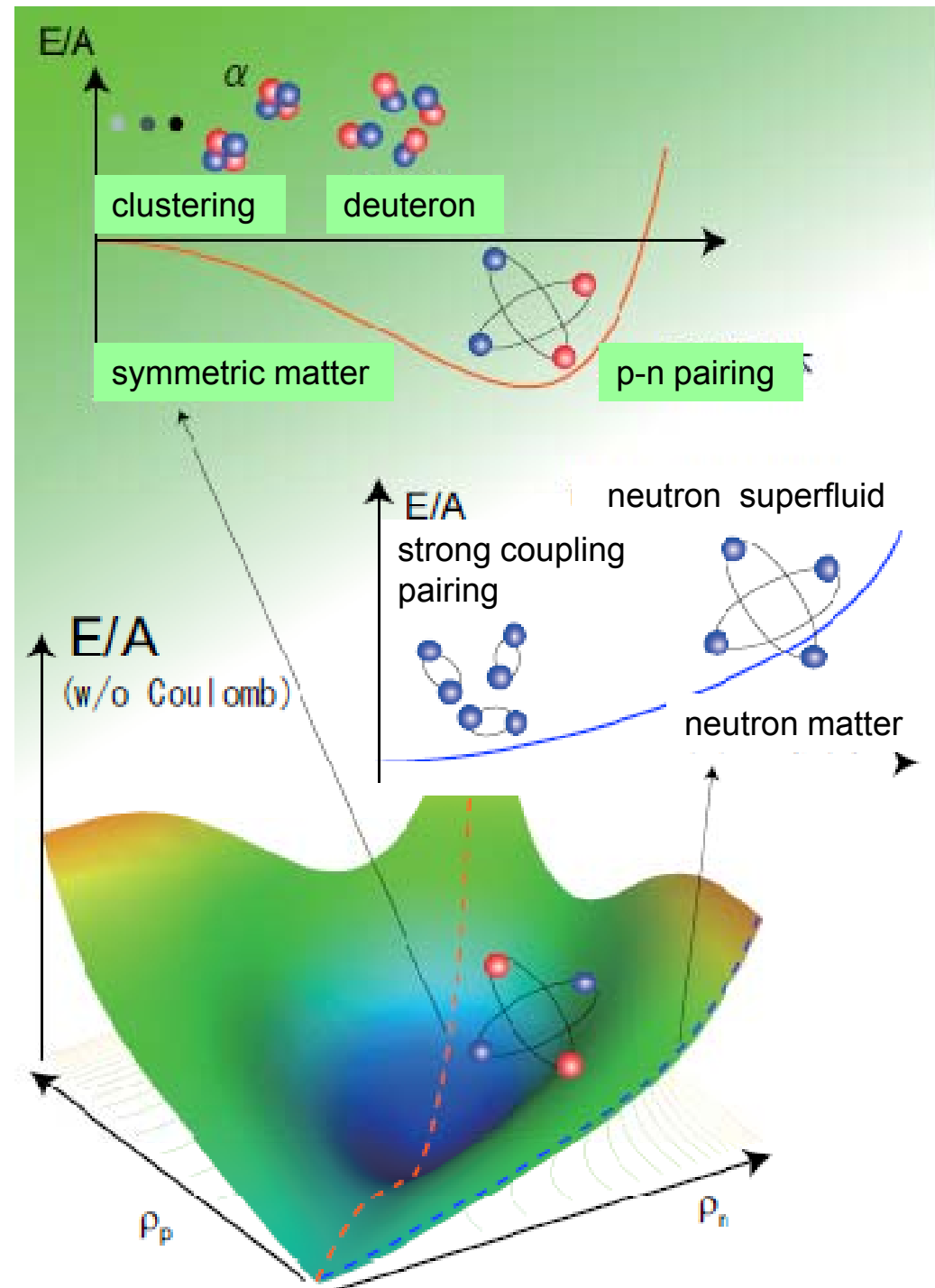
核子相関の新しい側面(強結合超流動、ダイニュートロン相関)への手がかり。

中低エネルギー実験がよい？



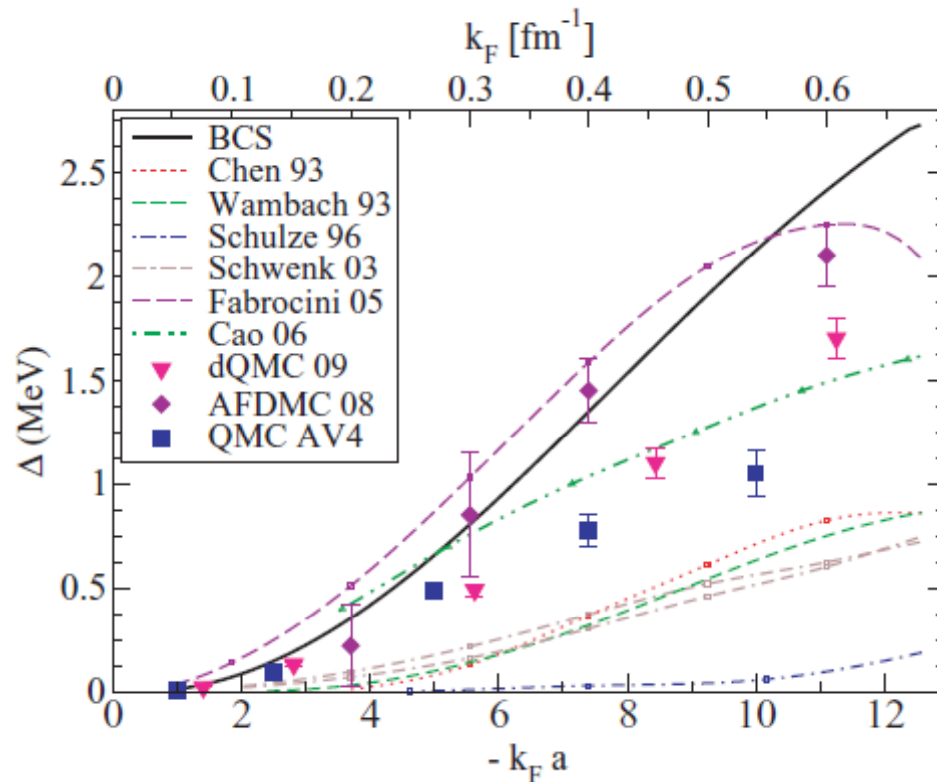
3. その他のエキゾチック励起モード(こんかいは議論しないが、いろいろある)

Correlations in dilute matter

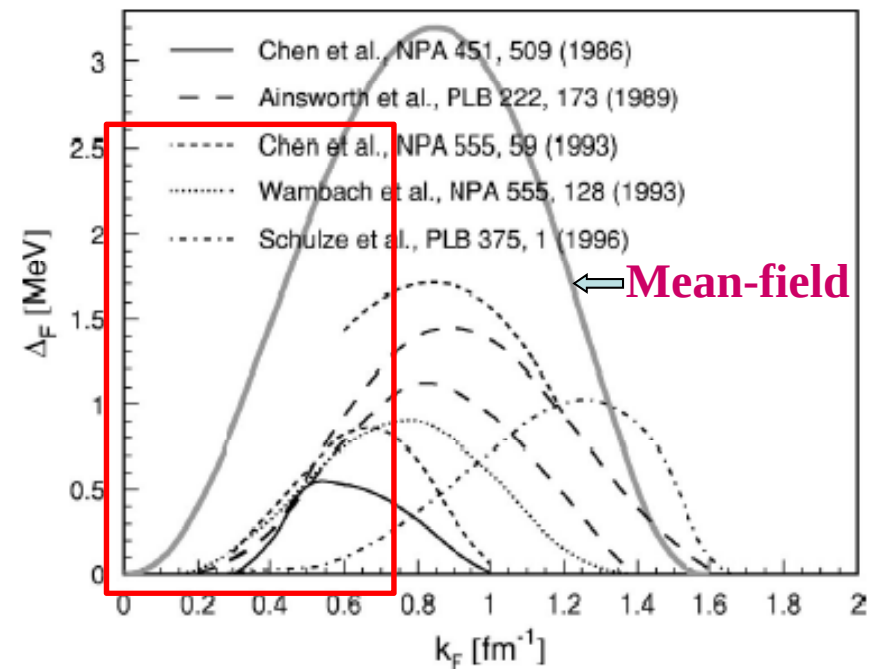


pairing gap in dilute neutron matter

$\Delta = (1 \sim 0.5) \Delta_{\text{mean-field}}$ in recent calculations



Gezerlis & Carlson, PRC81 (2010)



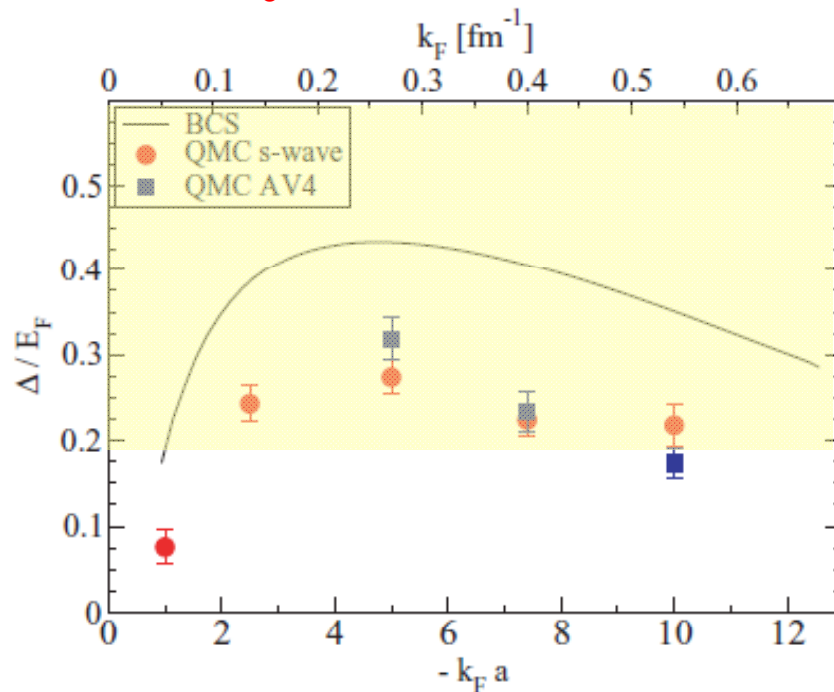
Lombardo & Schulze 2001

Strong coupling pairing & BCS-BEC crossover

“Large” pair gap vs. Fermi energy $\Delta/e_F > 0.2$ at low-densities

Monte-Carlo calculation

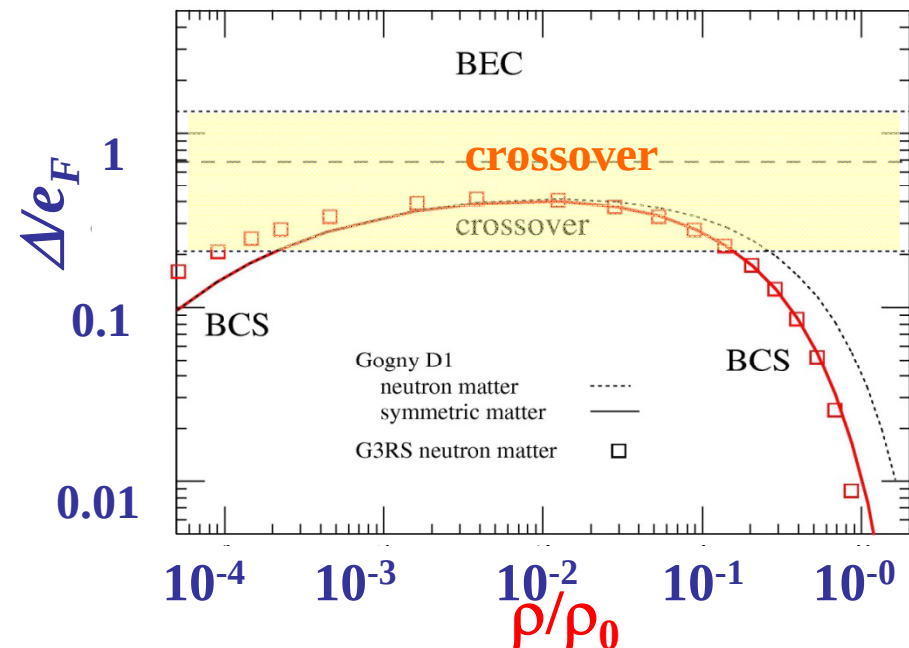
$$\rho/\rho_0 = 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-1}$$



Gezerlis & Carlson, PRC81 (2010)

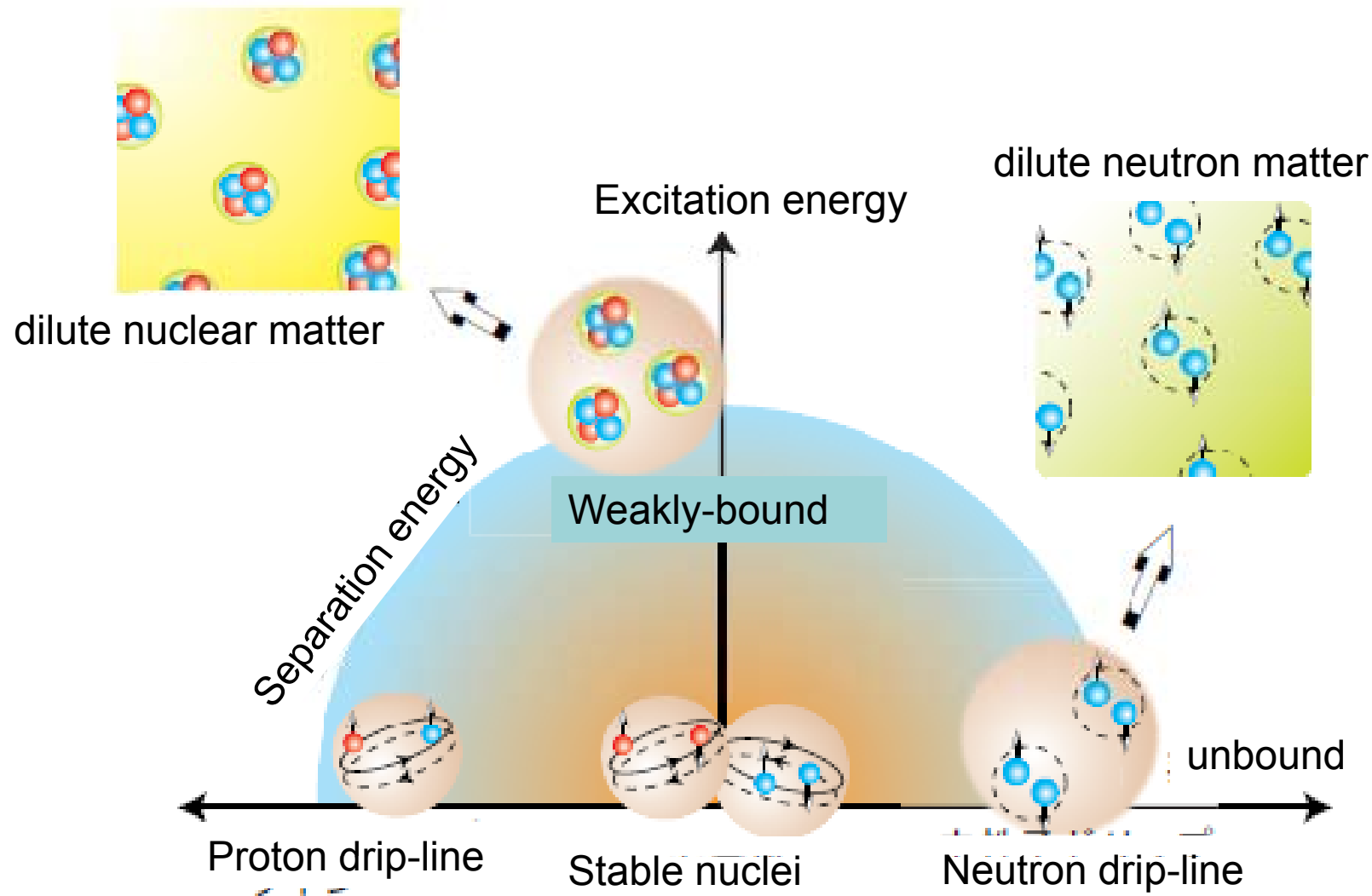
Mean-field calculation (BCS approx.)

$$\rho/\rho_0 = 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-1}$$



MM, PRC73,044309(2006)

Dilute matter vs. Weakly-bound nuclei / excited states near separation energies

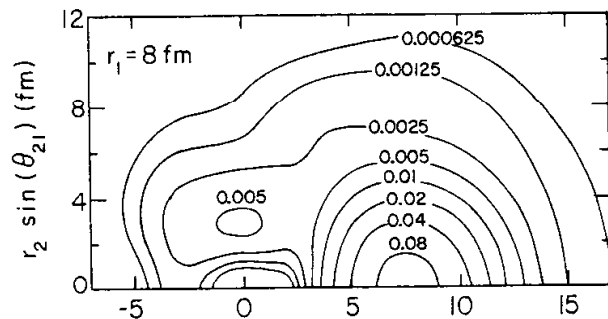


Spatial pair correlation & surface-enhanced pairing in n-rich nuclei

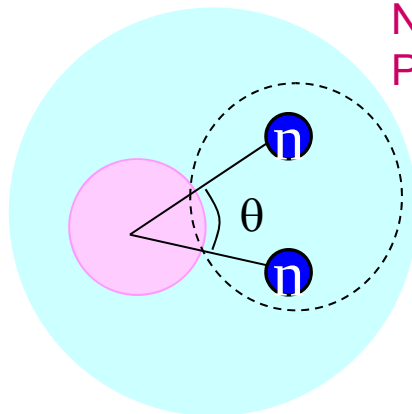
Spatially compact pair in nuclei

2n-halo nucleus ^{11}Li

G.F.Bertsch, H.Esbensen, Ann. Phys. 209(1991) 327



Recent Coulomb break-up exp.



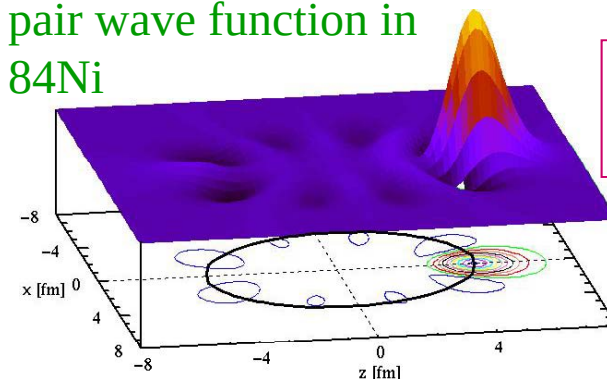
Nakamura et al.
PRL30,252502 (2006)

$$\theta_{nn} = 48^{+14}_{-18} \text{ deg}$$

$$R_{c,2n} = 5.01 \pm 0.32 \text{ fm}$$

neutron skin nuclei in medium mass region

pair wave function in
 ^{84}Ni

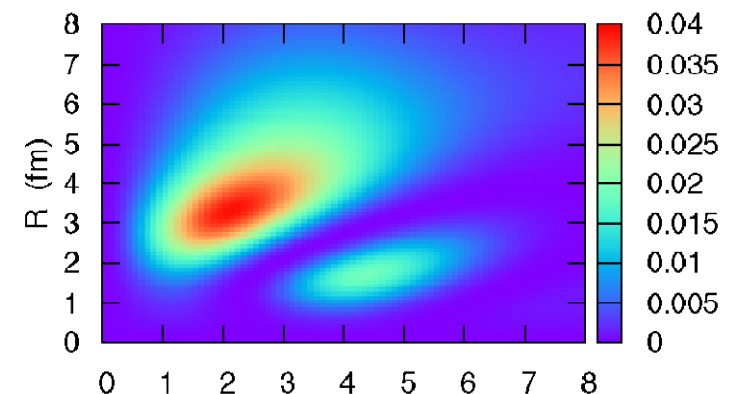
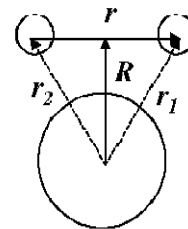


HFB calc.
Using DDDI

Matsuo et al PRC71,064326(2005)

Pillet, Sandulescu, Schuck, PRC76, 024310 (2007)

K.Hagino et al., Phys.Rev. Lett.99, 022506(2007)

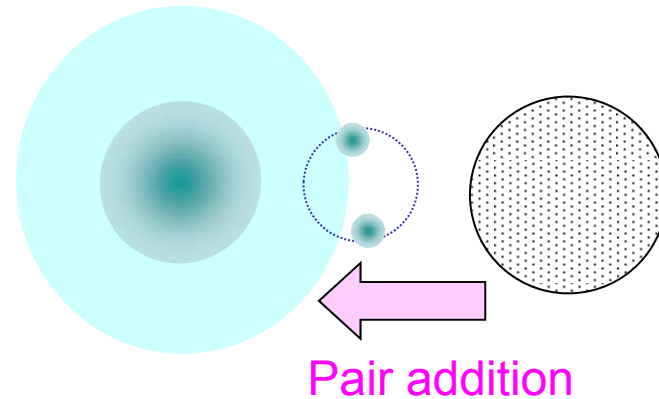
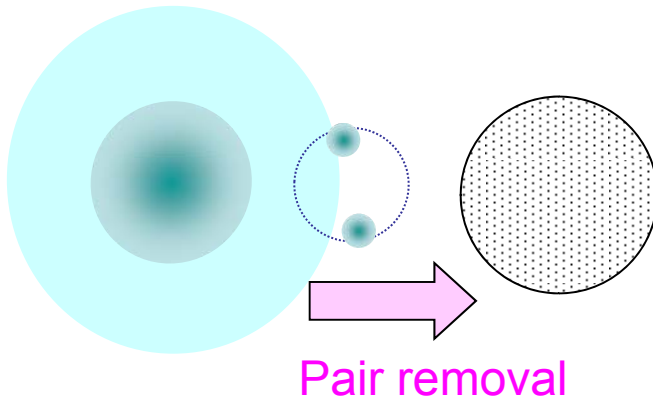


Two-neutron transfer as a probe of surface pairing

Pair transfers

Bohr & Mottelson Vol.2

Broglia, Hansen, Riedel, Advances in Nucl. Phys. Vol.6, 1973
von Oertzen and Vitturi, Rep. Prog. Phys. 64, 1247 (2001)



Collectivity due to pair correlation: pair vibration & pair rotation
+ surface-enhanced spatial correlation ??

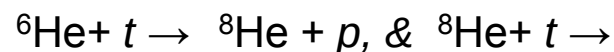
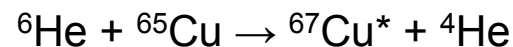
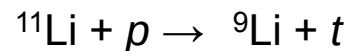
⇒ **medium & heavy n-rich nuclei, e.g. O, Sn**

Khan et al. PRC69, 014314 (2004); ibid 80, 044328 (2009)

Avez et al. PRC78, 044318 (2008)

Matsuo, Serizawa arXiv:1007.1705

Cf. Experiments on light n-rich nuclei ${}^6,8\text{He}, {}^{11}\text{Li}$,



I. Tanihata et al. PRL 100, 192502 (2008)

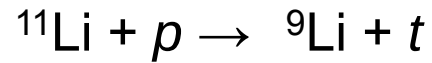
A. Chatterjee et al. PRL 101, 032701 (2008)

M.S. Golovkov et al. PL B101, 032701 (2008)

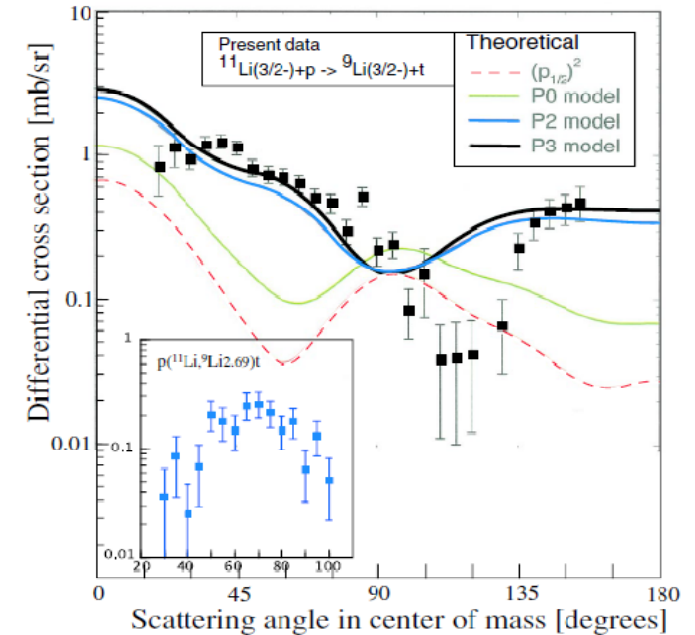
Pair transfer exp. of 2n-halo nuclei

^{11}Li

I. Tanihata et al. PRL 100, 192502 (2008)

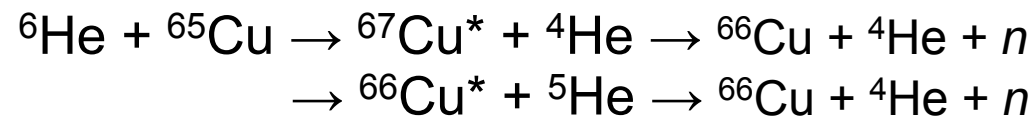


Sensitivity to nn-correlation



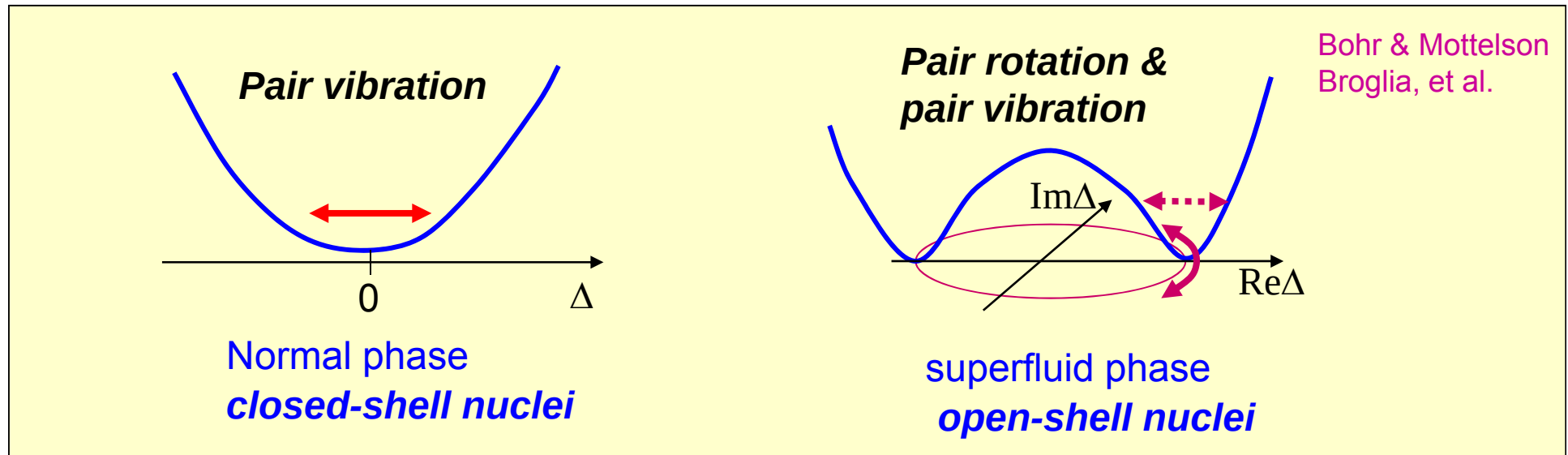
^6He

A. Chatterjee et al. PRL 101, 032701 (2008)

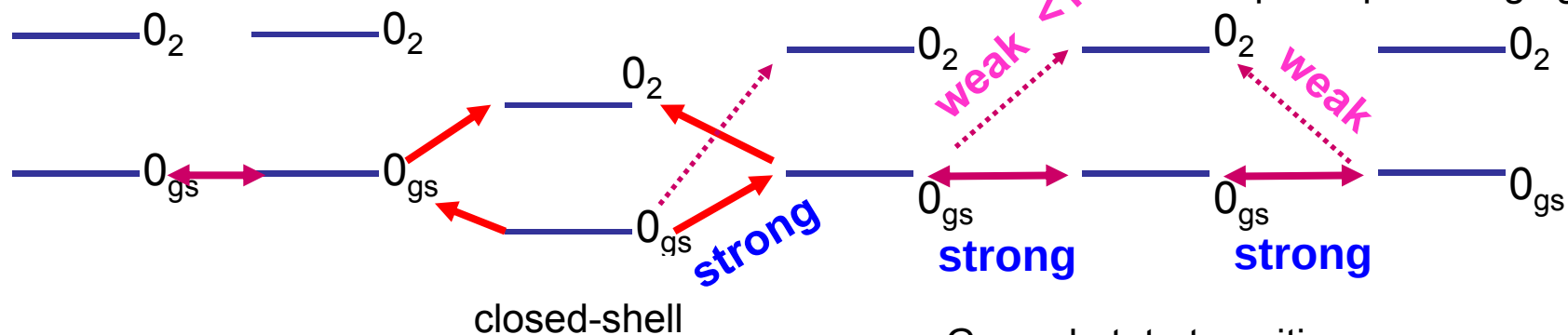


Dominance of 2n-transfer

Pairing collectivity & pair transfers



$2n$ transfer cross section /strength



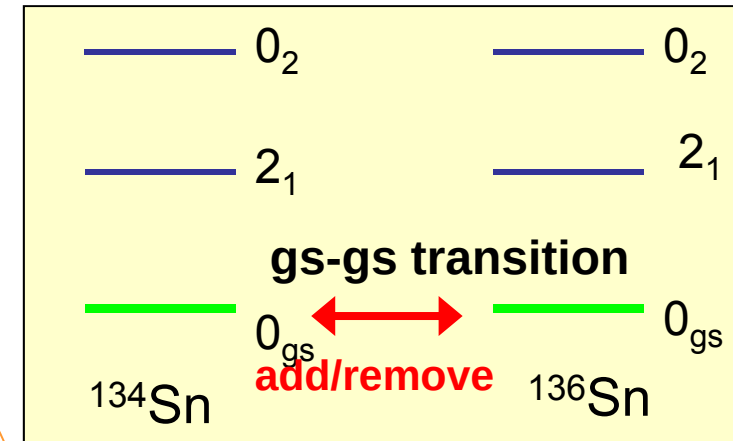
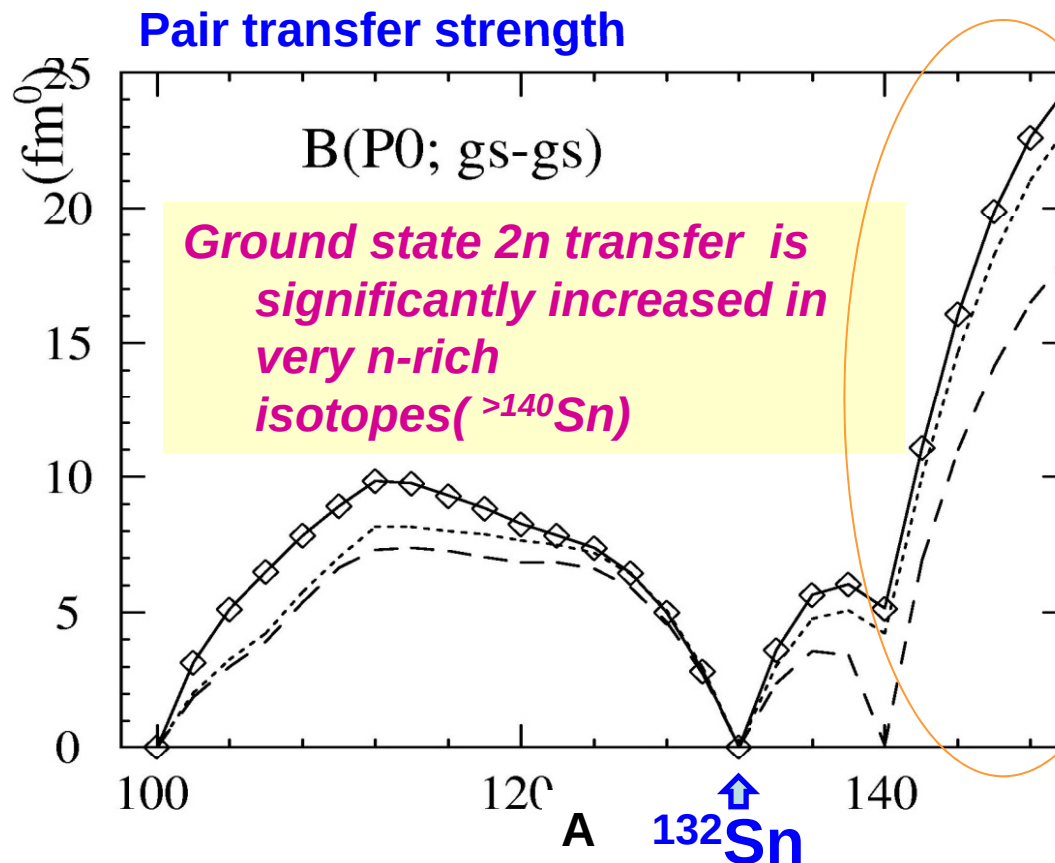
0_2^+ pair vibrational state is populated only weakly except shape changing nuclei

Ground-state transition
"pair rotation" dominates, prop. to Δ^2

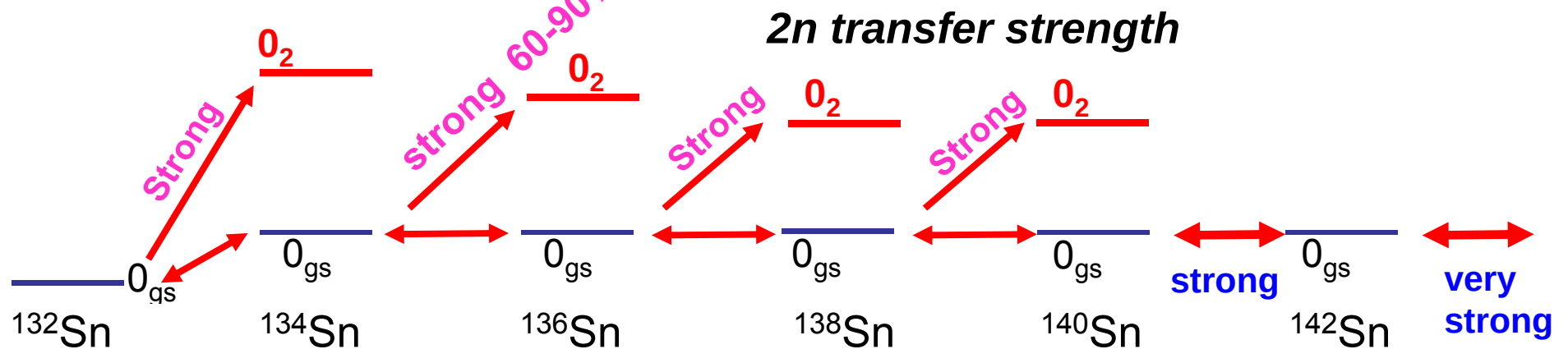
$0_{gs}-0_{gs}$ pair transfer strength in $^{>132}\text{Sn}$

2n-add/removal transfer amplitude and strength

$$B(P0) = \left\langle 0_{gs} \left| \int Y_{00} \psi^+(\vec{r}) \psi^+(\vec{r}) d\vec{r} \right| 0_{gs} \right\rangle^2$$

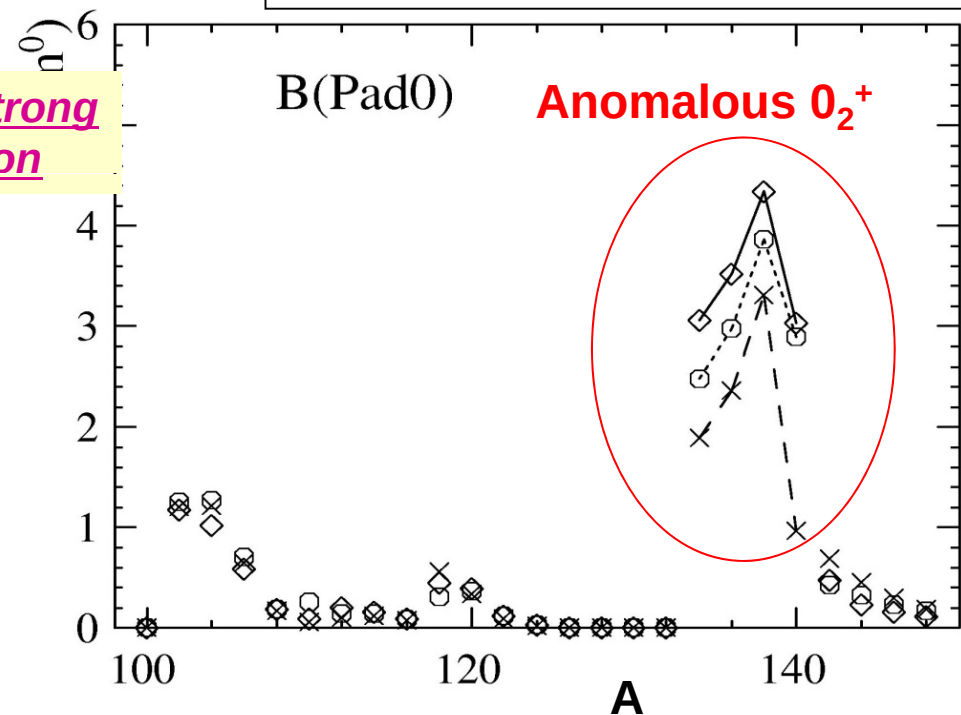
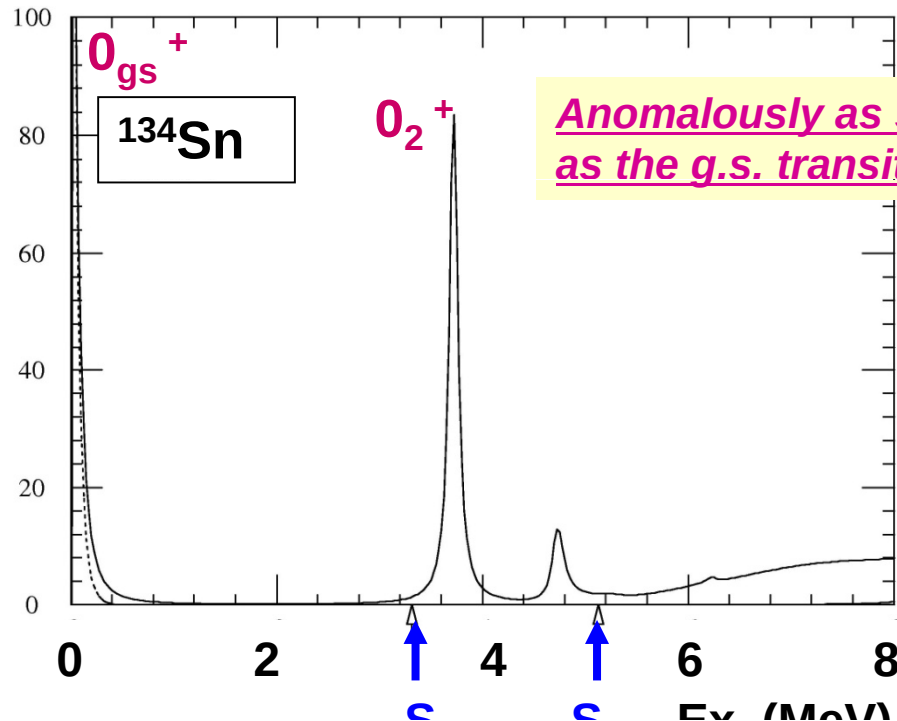


Anomalous 0_2^+ pair transfer

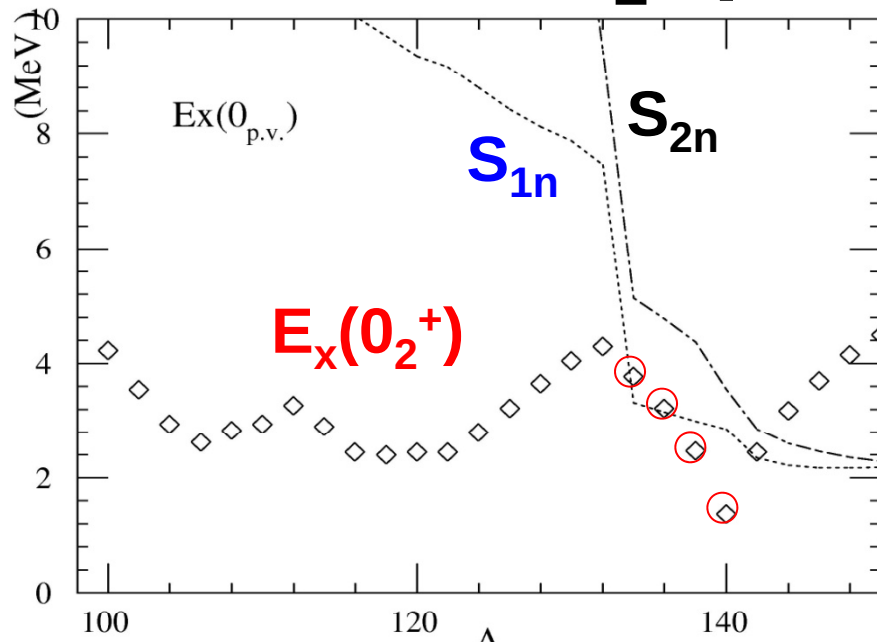


Pair-addition strength function to excited 0^+ states

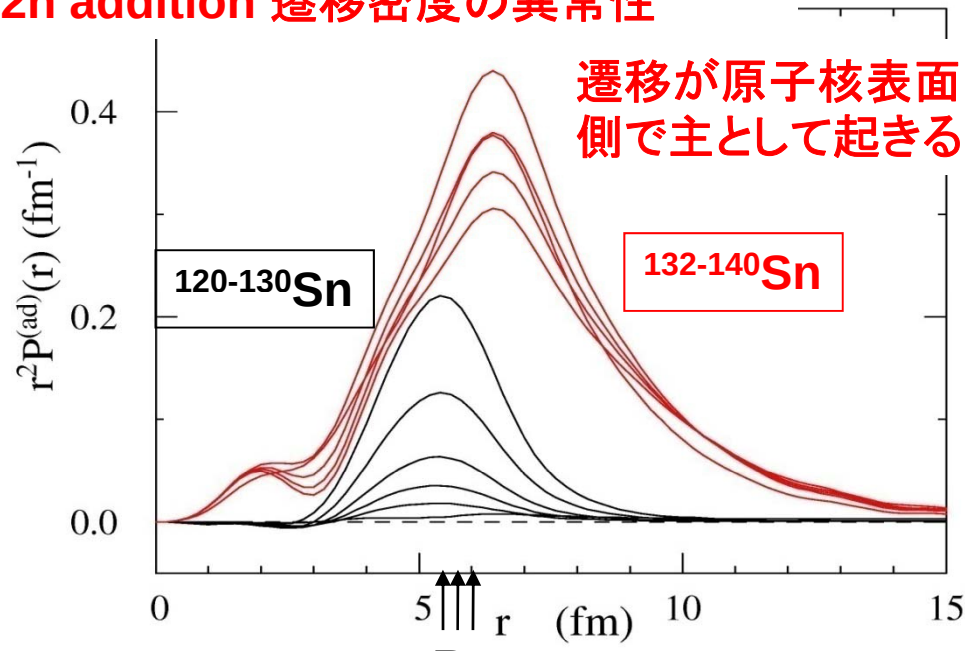
$$B(P0) = \left\langle 0_i \left| \int Y_{00} \psi^+(\vec{r}) \psi^+(\vec{r}) d\vec{r} \right| 0_{gs} \right\rangle^2$$



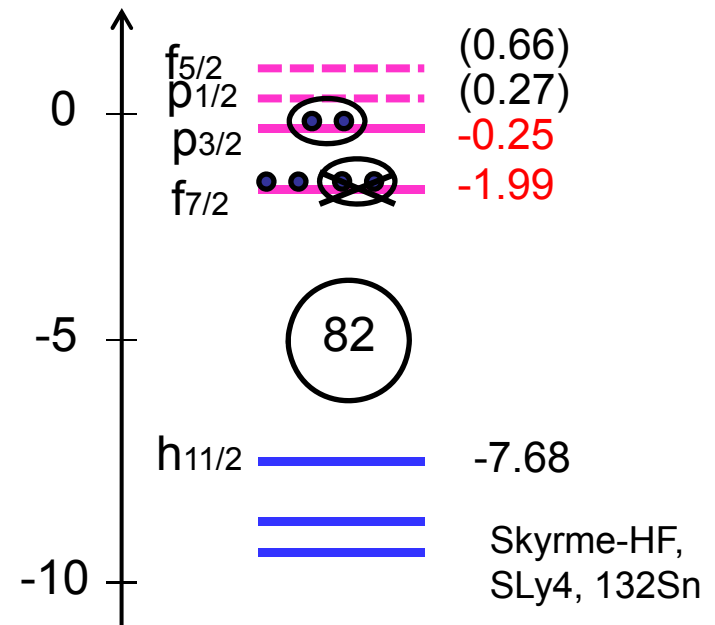
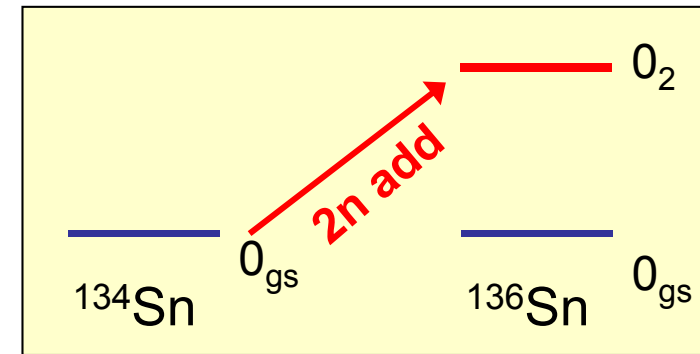
Anomalous 0_2^+ pair transfer in $^{132-140}\text{Sn}$ ¹⁴



2n addition 遷移密度の異常性



遷移が原子核表面の外側で主として起きる。



弱束縛軌道「への」遷移が重要
ドリップライン近傍でなくても現れる！

外部遷移2中性子移行の候補

Sn 同位体

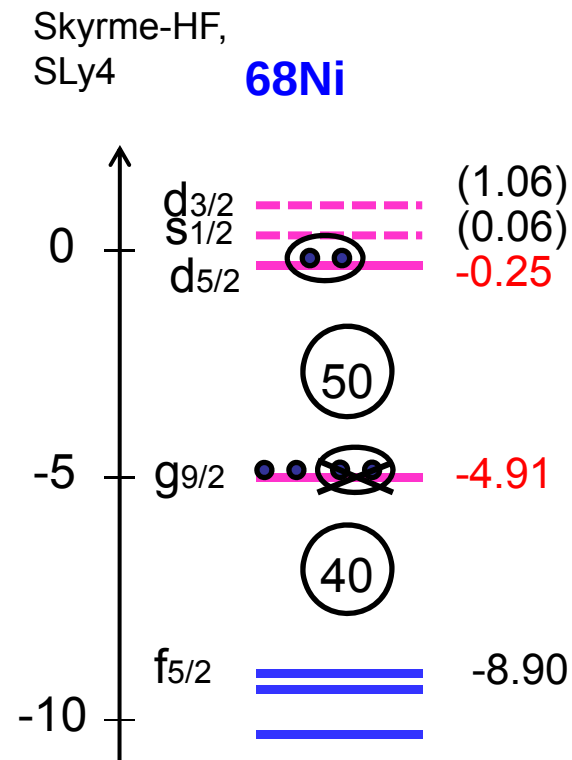
¹⁴⁰-Sn gs-gs 遷移

¹³²⁻¹³⁶Sn 励起0⁺ 遷移

$E_x \sim S_{1n} = 2-4 \text{ MeV}$

^{132-136,140}-Sn 2₁⁺ 遷移

MM,Y.Serizawa, P
RC82,024318(2010)



Ni 同位体 (in progress)

⁷⁸-Ni gs-gs 遷移

⁷⁰⁻⁷⁶Ni 励起0⁺ 遷移

$E_x \sim S_{1n} = 6-7 \text{ MeV}$

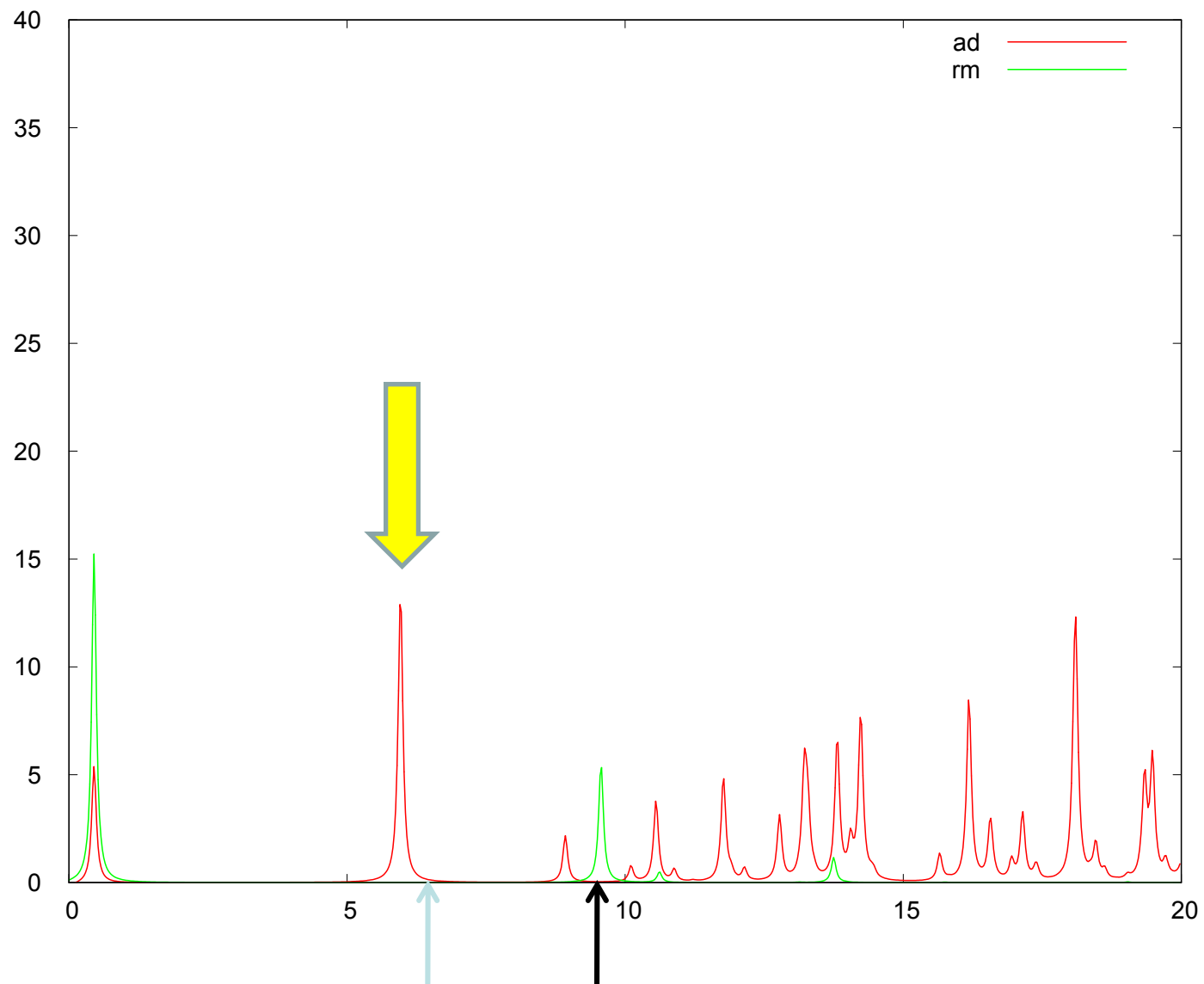
(70-76),80-Ni 2₁⁺ 遷移

Island of Inversion A=30-40近傍領域(speculation)

異常K=0⁺ バンド

K. Yoshida et al, NPA779 (2006),99

box 1/4.0 strength function Ni76 DDDI-mix



ピグミー双極共鳴・ソフト双極励起

1. “ドリップライン原子核から安定核まで”の多くの原子核で存在しているらしい
2. その性質はなぞだらけ

呼称も整理されていない

ソフト双極励起、 ソフト双極共鳴、 ピグミー双極共鳴

1. $J=1, \pi=-$
2. 励起エネルギー
 - GDR の低エネルギーテール領域
or 非常に低エネルギー
 - S_n の近く??
3. GDR(のテール)とは異質のE1強度分布
4. 強度は、TRK和則の10%以上(ドリップライン近傍)から1%以下(安定核)

3. R過程元素合成に重要な役割

ピグミー双極共鳴・ソフト双極励起

どのような励起モードなのか？

相関がない場合も(単一粒子励起)

□ 1中性子ハロー核 ^{11}Be のブレイクアップ

弱束縛s軌道から連続状態p軌道への単一粒子遷移

相関(あるいは集団性)が関与しているか？ どのような？

□ ダイニュートロン相関

^{11}Li , ^6He etc. 中重領域のドリップライン近傍核も？

□ スキンの集団運動

EOS (symmetry energyとその密度依存性)との関係

□ コアから分離した余剰中性子の集団運動

弱束縛軌道の役割？

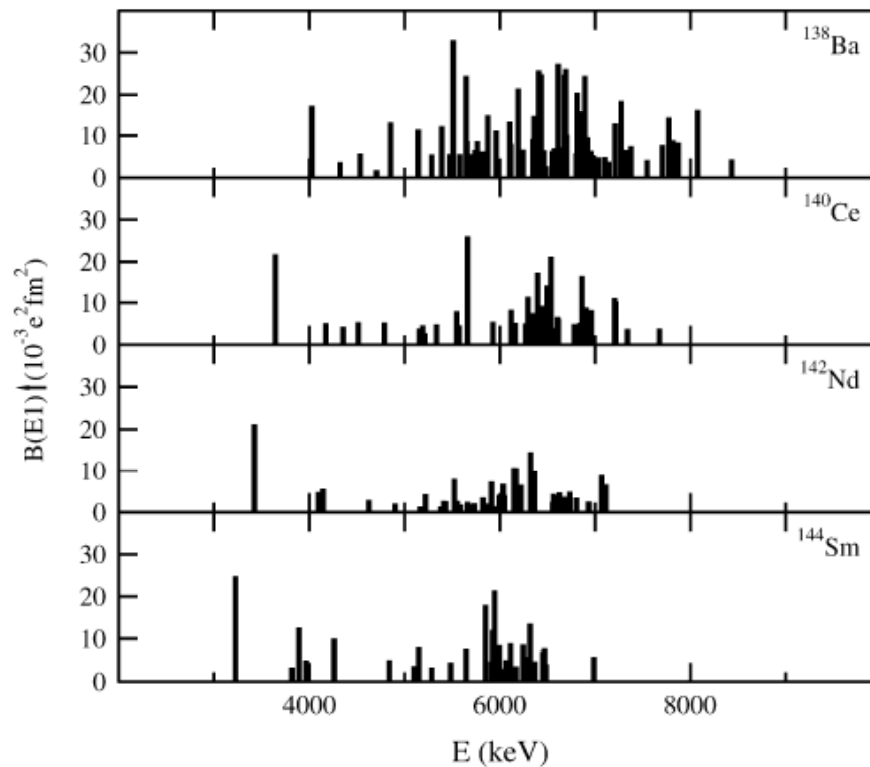
殻効果？(低エネルギー励起では特定の軌道の位置関係がしばしば重要)

最重要: E1 strength を測定すること

安定核

Darmstadt (γ, γ') on stable N=82 isotones

Volz et al. NPA779,1 (2006)

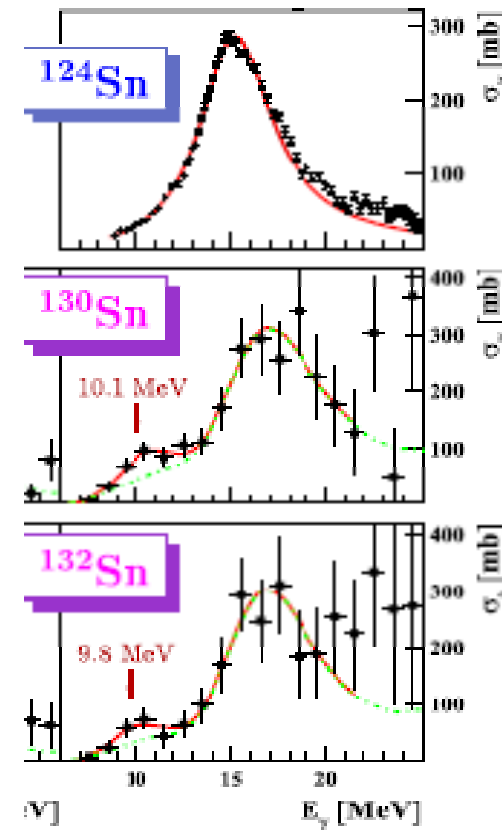


RCNP (p, p') on ^{208}Pb

不安定核

GSI Coulomb breakup of ^{132}Sn

Adrich et al. PRL95,13205 (2005)



Also, GSI Coulex on ^{68}Ni

Wieland et al, PRL 102,092501 (2009)

PDRのE1強度とEDF+RPA理論

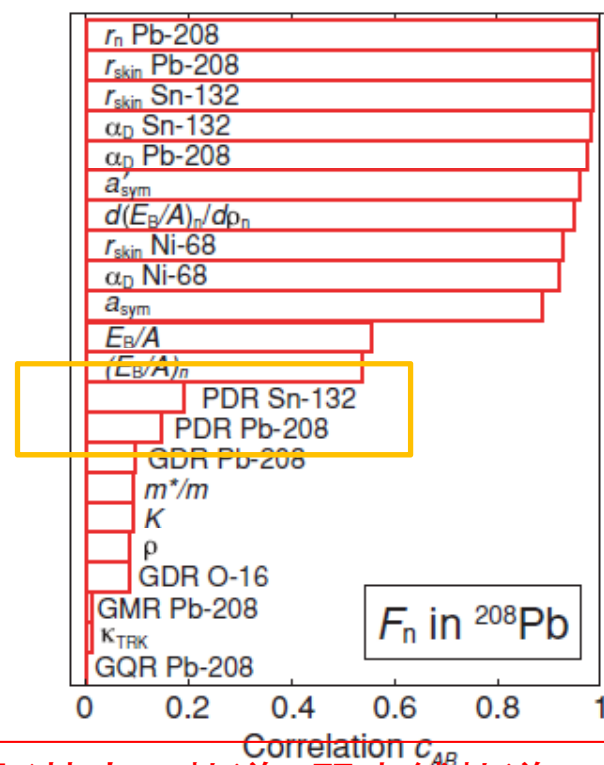
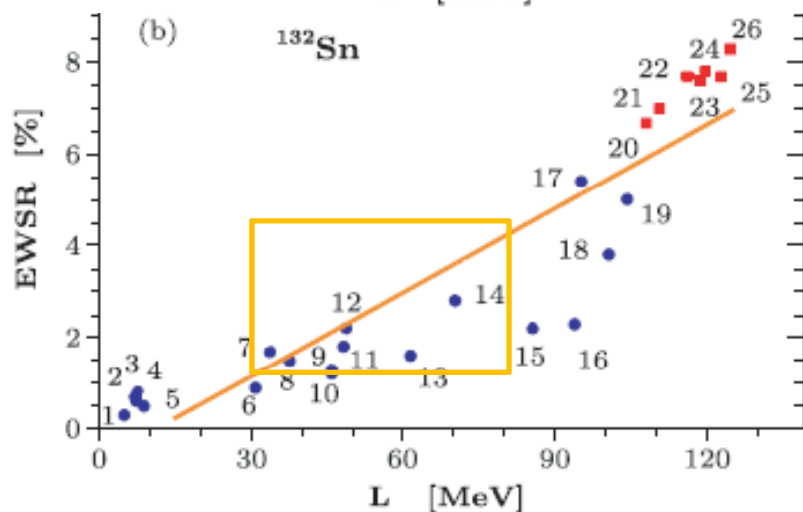
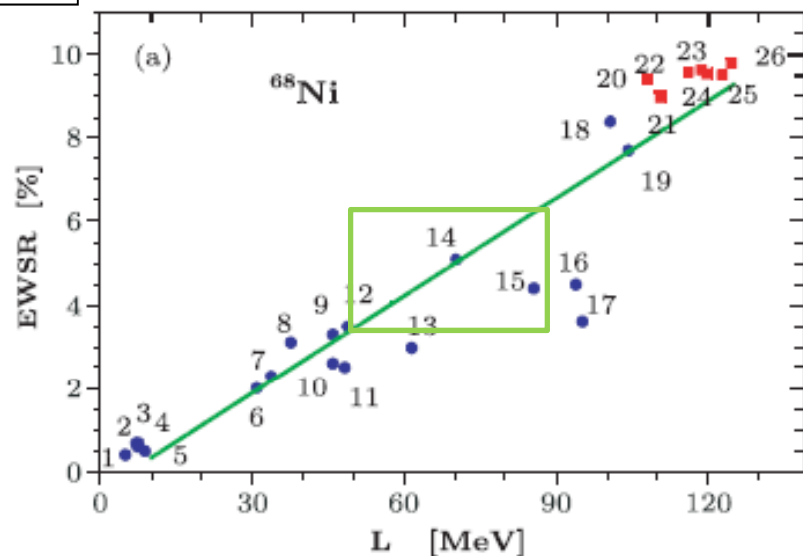
密度汎関数(EDF)のパラメータ、EOSの対称エネルギー項が決定できる？

YES

Carbone et al, PRC81, 041301 (2010)

NO

Reinhard, Nazarewicz, PRC81, 051303 (2010)



殻効果(特定の軌道、弱束縛軌道の位置関係)を理解することが不可欠だろう

→ 系統研究の重要性

PDRの集団性と微視的構造

Terasaki, Engel, PRC74, 044301 (2006)

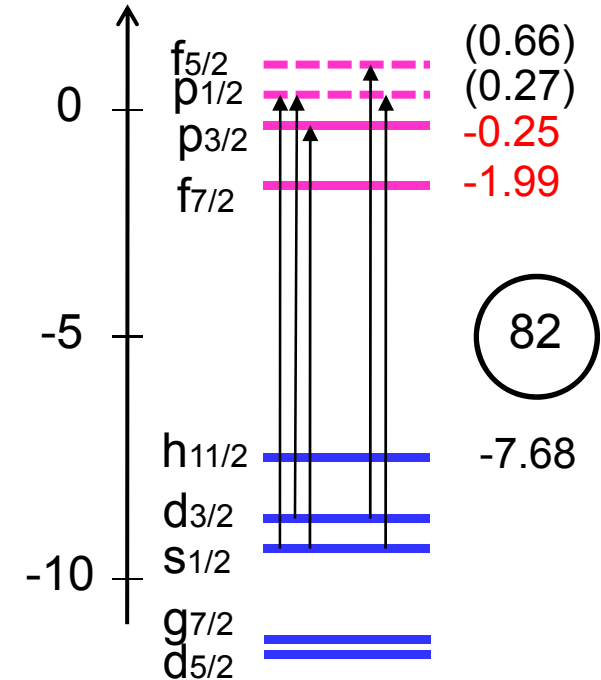
TABLE II. Two quasineutron components of strong low-energy IV 1^- excited states in ^{132}Sn . The relativistic RPA results are from Ref. [8]. The percentages are the differences between the squared RPA forward amplitudes and backward amplitudes; only those larger than 1% are shown.

This work		Ref. [8]
8.0 MeV	8.6 MeV	8.6 MeV
$3s_{1/2} \rightarrow 3p_{1/2}$ (28.1%)	$2d_{3/2} \rightarrow 2f_{5/2}$ (63.0%)	$2d_{3/2} \rightarrow 2f_{5/2}$ (28.2%)
$2d_{3/2} \rightarrow 3p_{1/2}$ (26.6%)	$3s_{1/2} \rightarrow 3p_{1/2}$ (14.6%)	$2d_{5/2} \rightarrow 2f_{7/2}$ (21.9%)
$3s_{1/2} \rightarrow 3p_{3/2}$ (11.1%)	$1g_{7/2} \rightarrow 1h_{9/2}$ (5.6%)	$2d_{3/2} \rightarrow 3p_{1/2}$ (19.7%)
$1h_{11/2} \rightarrow 1i_{13/2}$ (6.9%)	$2d_{5/2} \rightarrow 2f_{7/2}$ (4.5%)	$1h_{11/2} \rightarrow 1i_{13/2}$ (10.5%)
$1g_{7/2} \rightarrow 2f_{7/2}$ (6.2%)	$2d_{3/2} \rightarrow 3p_{1/2}$ (1.7%)	$2d_{5/2} \rightarrow 3p_{3/2}$ (3.5%)
$2d_{3/2} \rightarrow 3p_{3/2}$ (5.5%)	$2d_{5/2} \rightarrow 3p_{3/2}$ (1.5%)	$1g_{7/2} \rightarrow 2f_{5/2}$ (1.9%)
$1g_{7/2} \rightarrow 2f_{5/2}$ (3.7%)	$3s_{1/2} \rightarrow 3p_{3/2}$ (1.4%)	$1g_{7/2} \rightarrow 1h_{9/2}$ (1.5%)
$2d_{5/2} \rightarrow 2f_{7/2}$ (2.0%)		
$2d_{3/2} \rightarrow 2f_{5/2}$ (1.6%)		

Skyrme-HF +RPA

RMF +RPA

弱束縛low-L軌道への遷移



Skyrme-HF,
SLy4, ^{132}Sn

最重要2:PDRのプロファイル

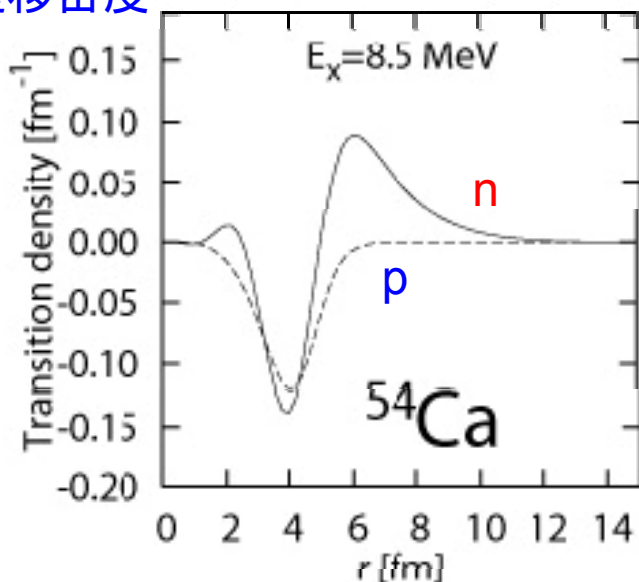
ピグミー双極共鳴・ソフト双極励起の大きな特徴

ISでもIVでもない

外部: 中性子的
表面: IS的

逆位相

遷移密度



Mizuyama, MM. Serizawa, PRC79, 024313 (2009)

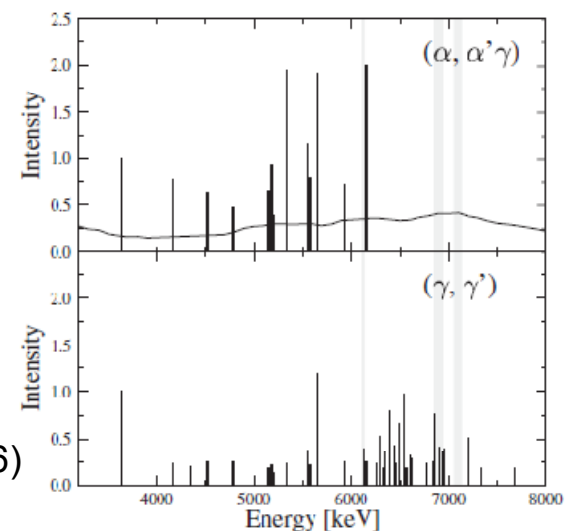
(PDRの概形については多くの理論、核種で共通)

El.magプローブでは、proton部分のみ見ている。
ハドロンプローブで、neutron部分を見ることが重要。

1. (p,p') & (α , α') etc
2. different Energies: Coulomb vs. nuclear Surface profile

Cf. A. Vitturi, Pramana 75, 73 (2010)

例 Groningen
(α , $\alpha'\gamma$) on ¹⁴⁰Ce



Savran et al., PRL97, 172502 (2006)

まとめ： エキゾチック集団励起

1. ピグミー双極共鳴・ソフト双極励起

ハドロンプローブで、pnプロファイル、動径プロファイルを見る

原子核応答の研究で実績のあるRCNPにふさわしい？

2. 異常対振動励起・2中性子移行反応

低密度系での対相関

それほど中性子過剰でなくても、励起状態に特長が表れる。

反応計算はこれから。RCNPで可能か？

補足. エキゾチック集団励起の系統研究・詳細研究に必要な理論ツール
(密度汎関数理論+RPA)は、国内の各グループで大進展中。今後の理論実験
間協力の基盤あり。