

蓄積リングにおける アイソスカラー型非弾性散乱

京都大学大学院理学研究科

川畠 貴裕

Motivation

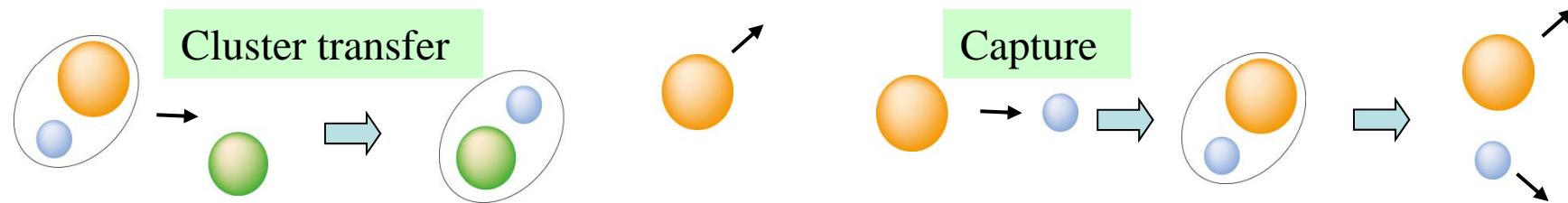
- ・これまでRCNPを中心に展開してきたのは非弹性散乱による核構造の研究。特に Low-q 領域。
初期 ... 陽子・重陽子を用いたスピノアイソスピノ励起の研究
 - ΔS , ΔT の自由度があると、モードの切り分けが大変。
- 現在 ... α を用いたクラスター励起の探索
 - 必ずしもクラスター状態に対する選択性はないが、意外に上手く行っている。
 - ΔS と ΔT を考えなくてもよいのが何と言っても楽チン。
- ・蓄積リング計画において発展させることはできないか?
 - 逆運動学条件化でのLow-q測定は、蓄積リング+internal target でのみ可能!。

アイソスカラー型非弾性散乱でできること

- ・ クラスター状態の探索
 - クラスター崩壊閾値近傍がターゲット。
 - 励起強度だけでなく、崩壊様式も重要。
 - 通常標的では、閾値近傍の粒子崩壊の測定はほぼ不可能。
 - 不安定核への展開を強く意識。分子的状態の探索。
 - 閾値より高いエネルギー領域はほぼ手付かず。
- ・ 圧縮性モードの探索 → 伊藤さん(東北大)の講演
 - ISGMR, ISGDR
 - 標的作成の問題から開放される
 - 化学的性質、存在比を心配しなくてよい。
 - 希ガス、 $^{16, 18}\text{O}$, ^{48}Ca , $^{204, 206, 210}\text{Pb}$, ^{238}U
(Sn安定同位体はすでにフルコンプしてしまってはいるが....)

How should we excite Cluster States?

Various reactions were devoted to excite cluster states.



✓ Cluster-transfer reaction

- ⌚ Complex reaction mechanism due to the low incident energy.
- ⌚ Small reaction cross section.
- ⌚ Limited energy resolution.

✓ Low-energy resonant capture reaction

- ⌚ Sensitive above the cluster-emission threshold only.
- ⌚ Coulomb barrier disturbs the reaction near the threshold.

Inelastic scattering can be a complementary probe.

- ⌚ Simple reaction mechanism at intermediate energies.
- ⌚ High resolution measurement is possible.
- ⌚ Sensitive to the entire E_x region.
- ⌚ Selectivity for the isoscalar natural-parity excitation..

E0 Strengths and α Cluster Structure

Large E0 strength could be a signature of spatially developed α cluster states.

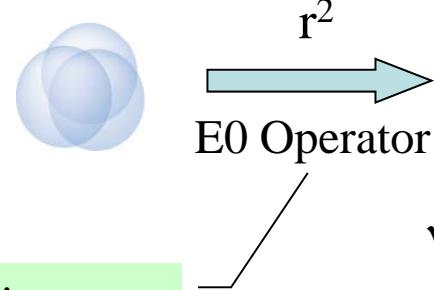
T. Kawabata *et al.*, Phys. Lett. B **646**, 6 (2007).

0^+_2 state in ^{12}C : $B(\text{E}0; \text{IS}) = 121 \pm 9 \text{ fm}^4$

Single Particle Unit: $B(\text{E}0; \text{IS})_{\text{s.p.}} \sim 40 \text{ fm}^4$

- ✓ SM-like compact GS w.f. is equivalent to the CM w.f. at SU(3) limit.
- ✓ GS contains CM-like component due to possible alpha correlation.

✓ SM-like Compact GS.



✓ Developed Cluster State

Monopole operators excite
inter-cluster relative motion.

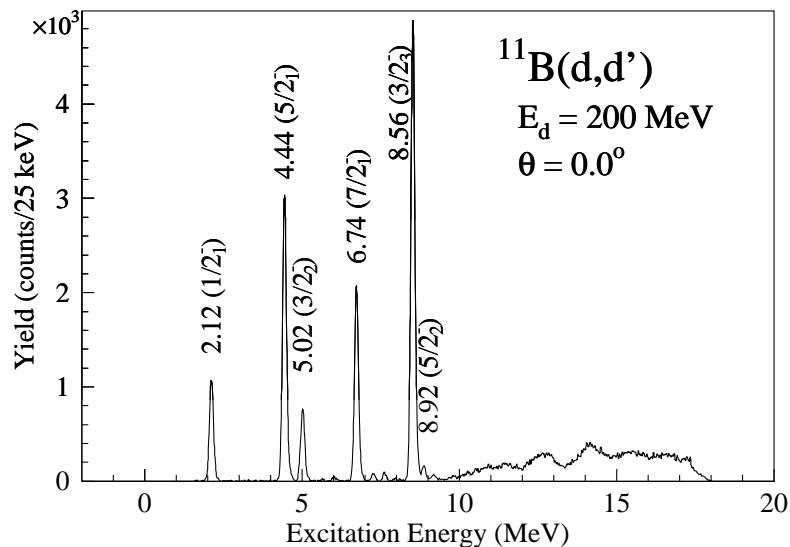
T. Yamada *et al.*,
Prog. Theor. Phys. 120, 1139 (2008).

E0 strength is a key observable to examine α cluster structure.

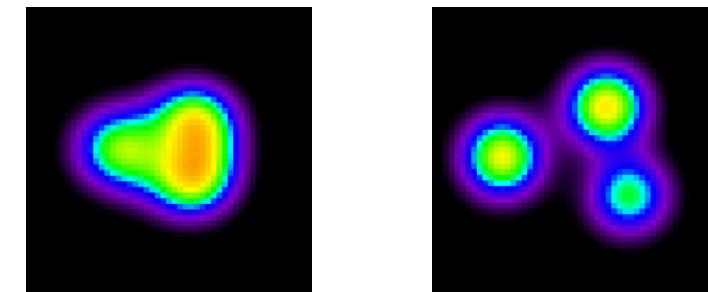
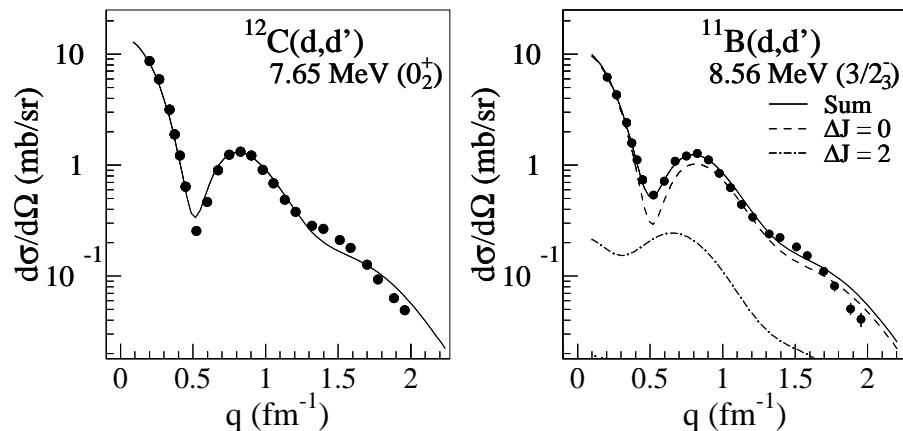
Cluster State in ^{11}B

A dilute $2\alpha + t$ cluster state is excited by E0 transition with $B(E0; \text{IS}) = 96 \pm 16 \text{ fm}^4$.

T. Kawabata *et al.*, Phys. Lett. B **646**, 6 (2007).



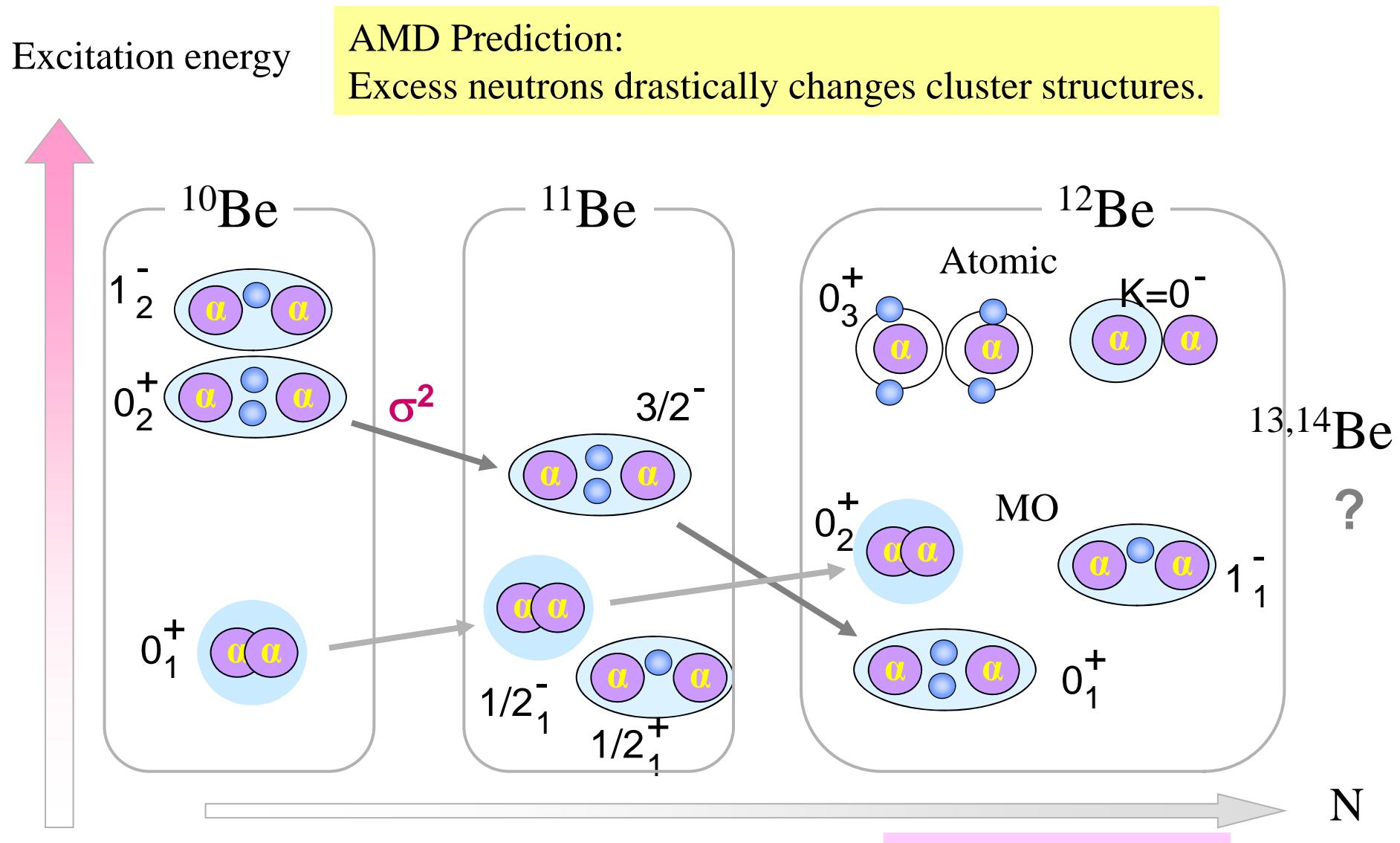
- $3/2_-^3$ state in ^{11}B is strongly excited by the E0 transition in the (d, d') reaction.
- Analogies between the $3/2_-^3$ state and the 0_2^+ state in ^{12}C (dilute-gas-like 3α cluster state) have been observed.
 - Similar excitation energies and E0 strengths.
 - Locates near the α decay thresholds.
 - Not predicted in SM calculations.
- AMD (VAP) successfully describes the $3/2_-^3$ state with a dilute $2\alpha + t$ cluster wave function.



$\langle r^2 \rangle^{1/2} = 2.5 \text{ fm}$ $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 3.0 \text{ fm}$
 Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **75**, 024302 (2007).

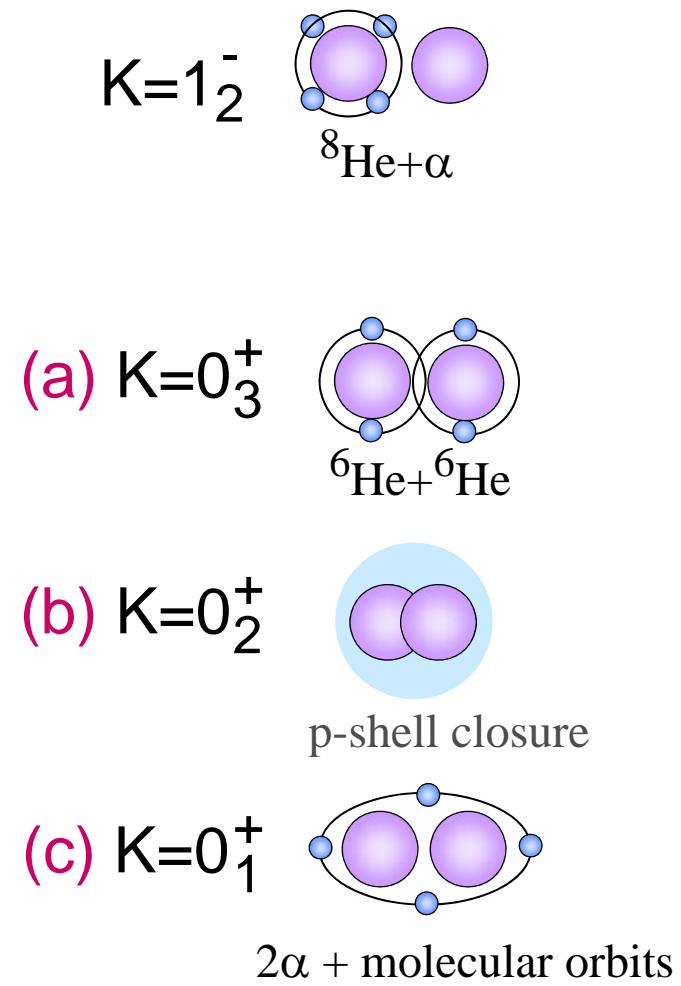
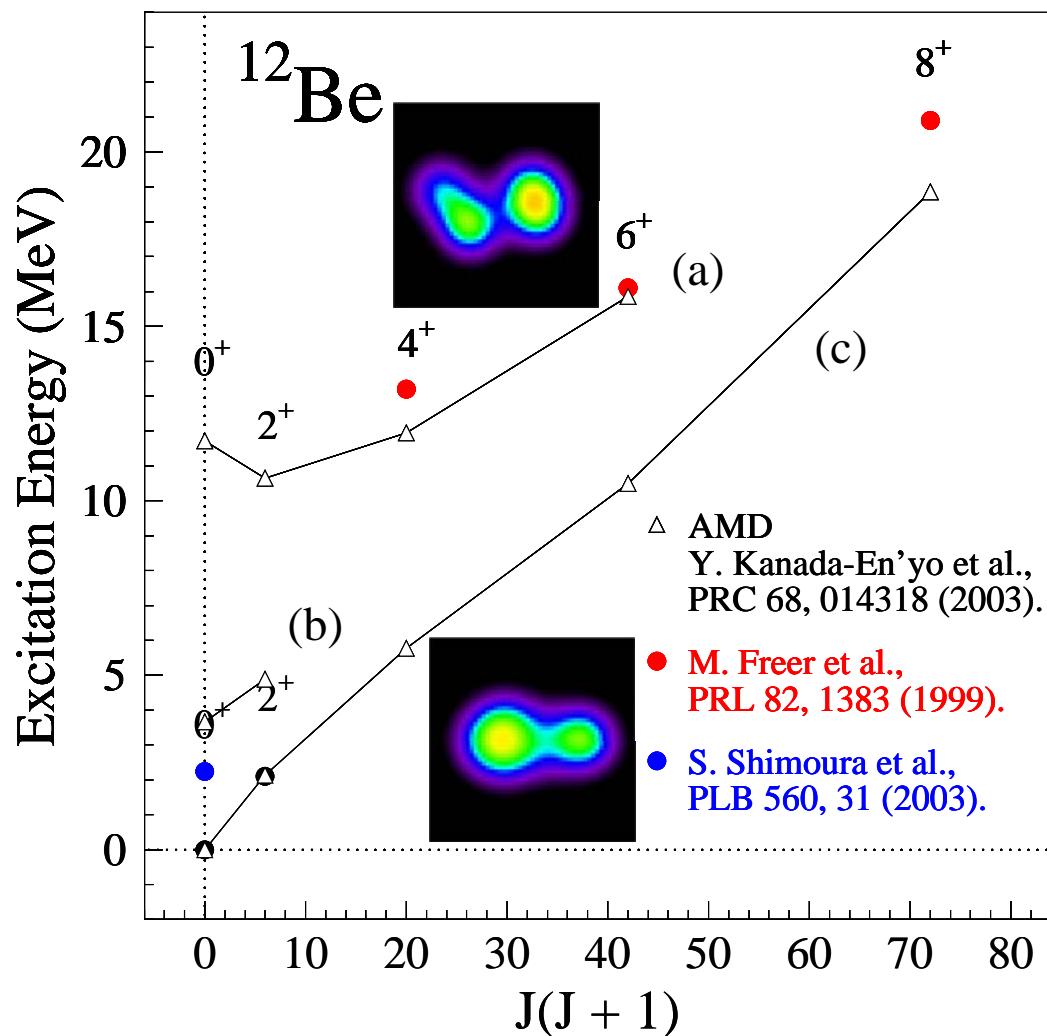
E0 measurement is a new useful spectroscopic tool to search for α cluster states.

α Cluster Structures in Be Isotopes

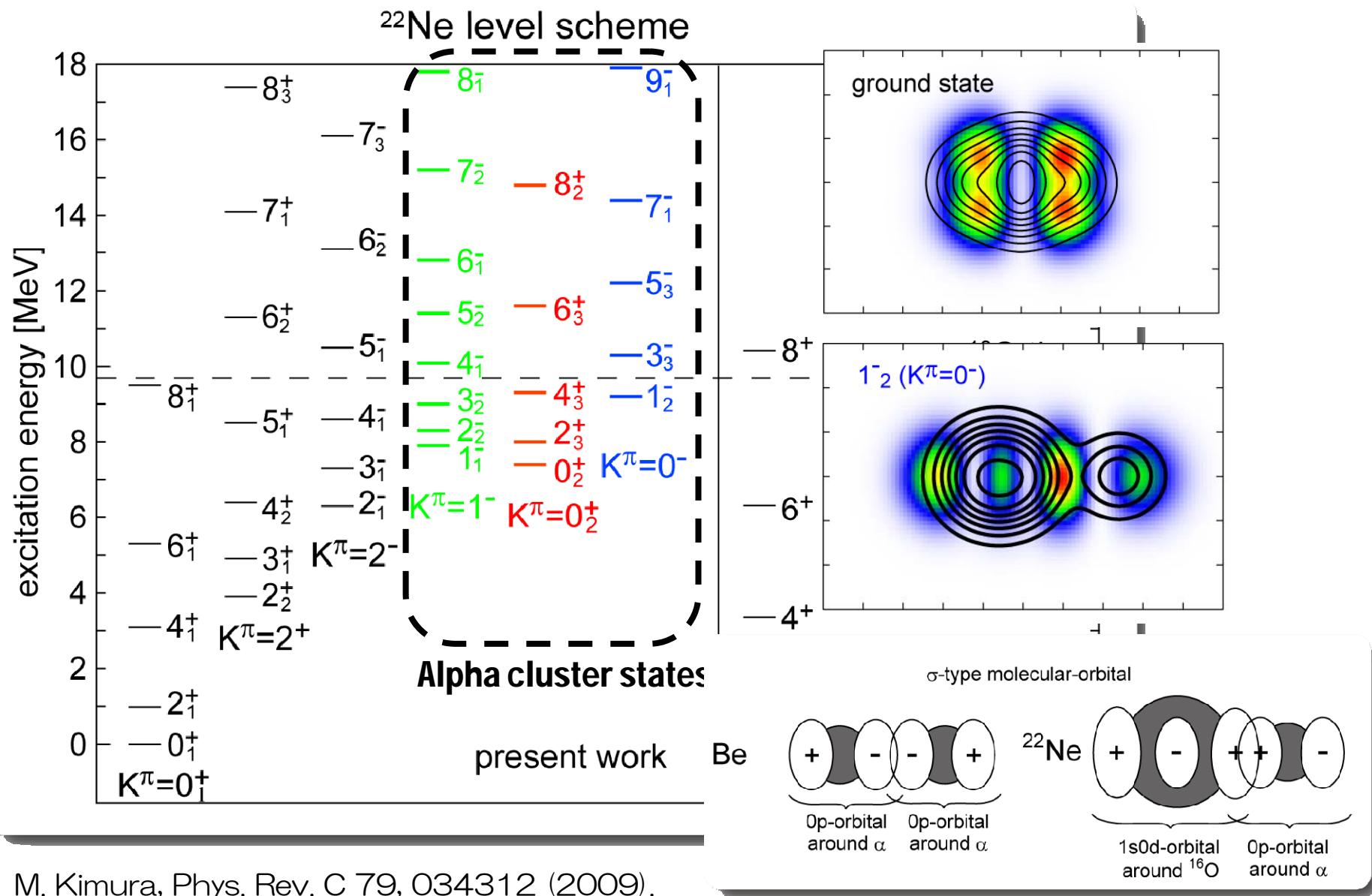


α Cluster Structures in ^{12}Be

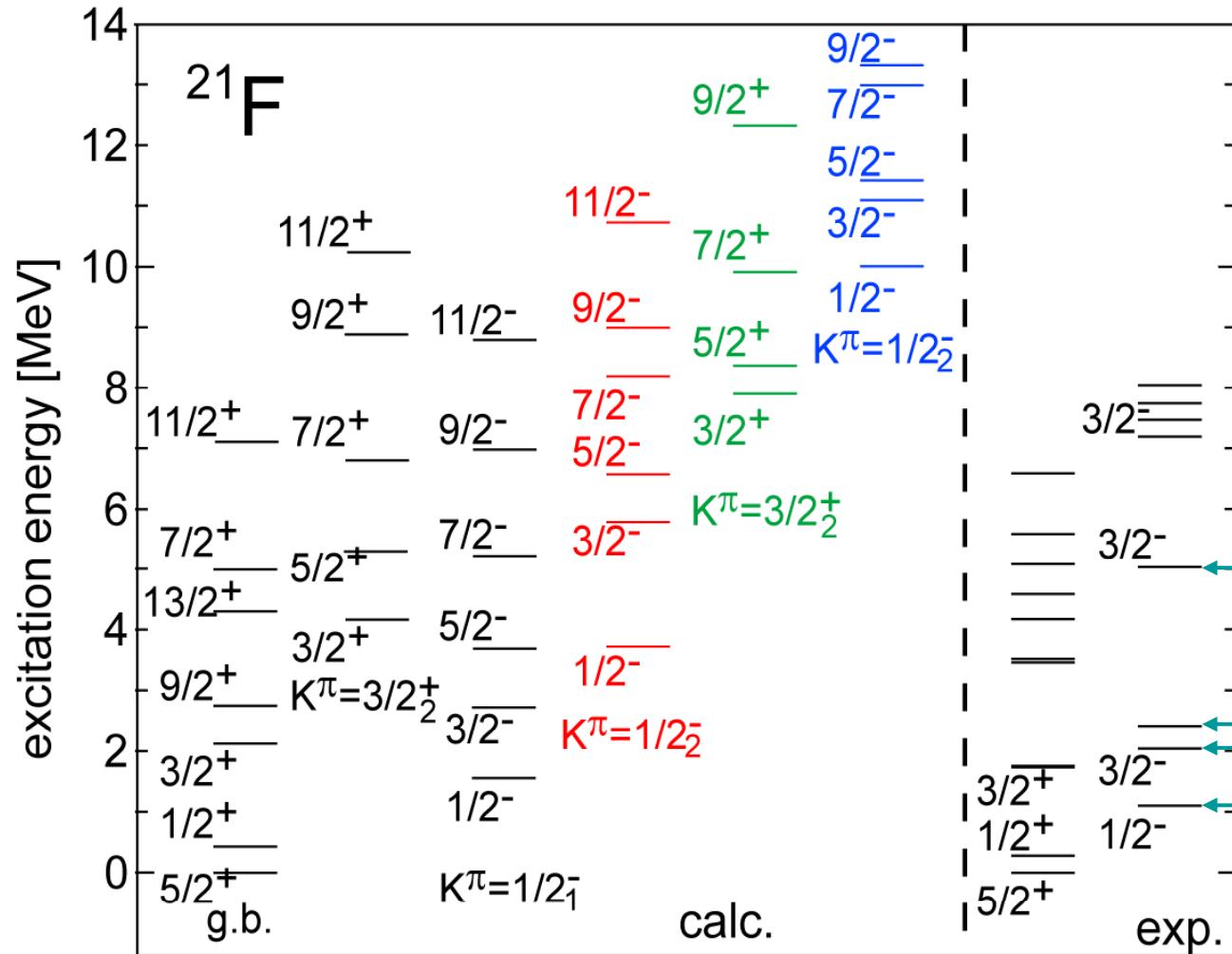
Candidates for the Atomic and Molecular states were observed.



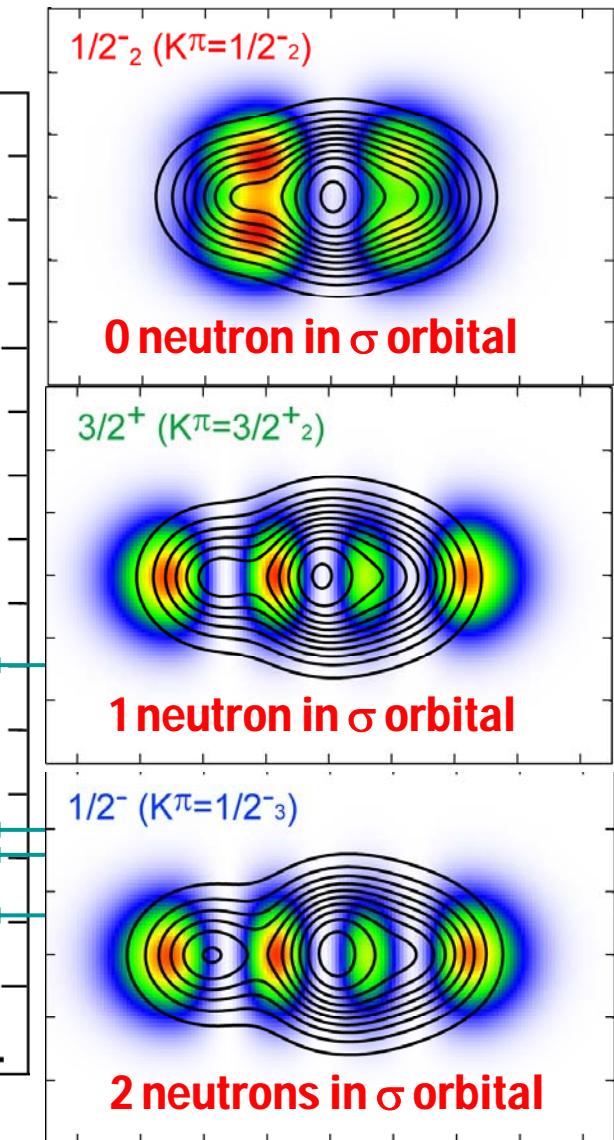
^{22}Ne における分子的状態



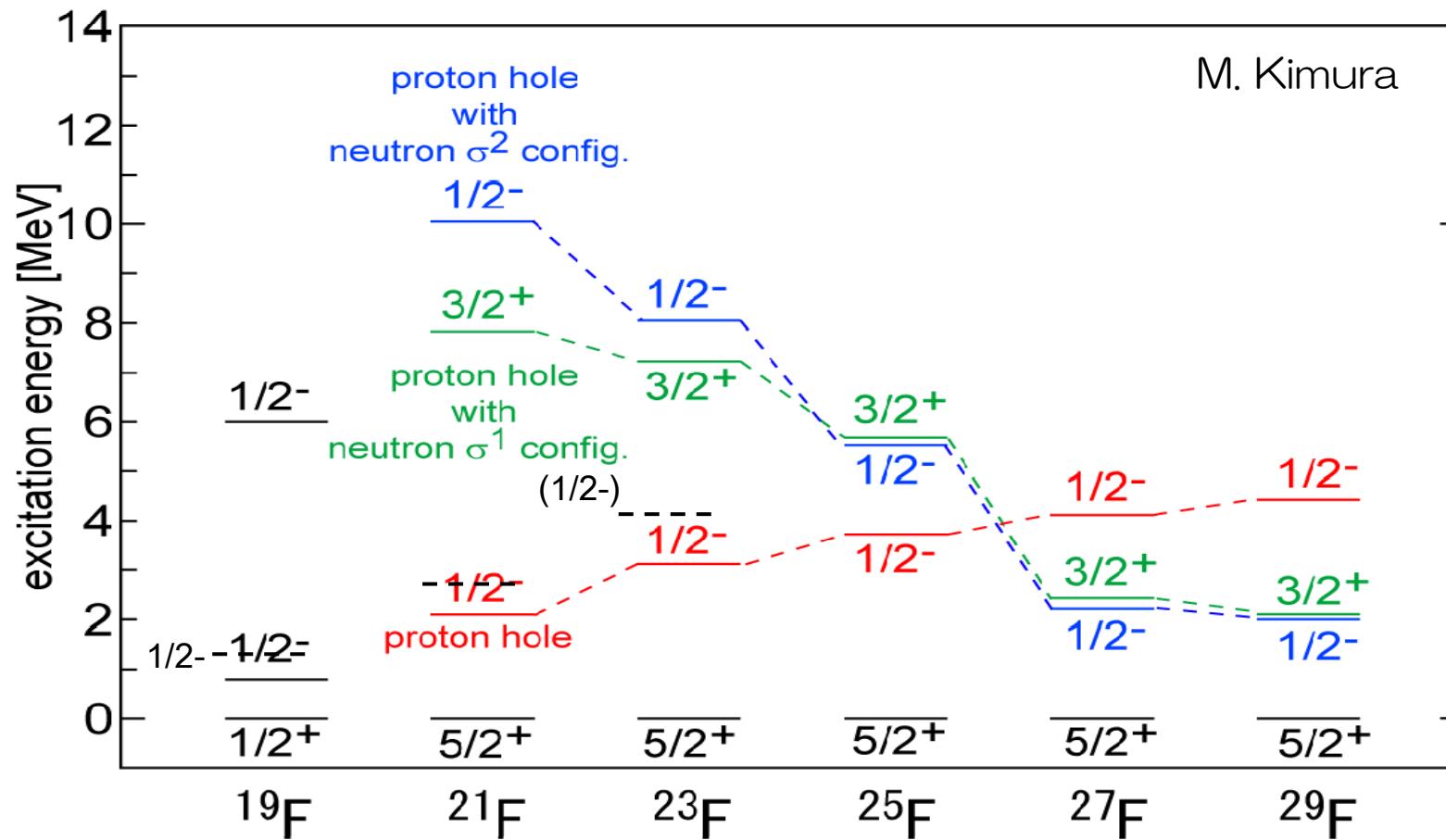
^{21}F における分子的状態



M. Kimura



F同位体における分子的状態の変化

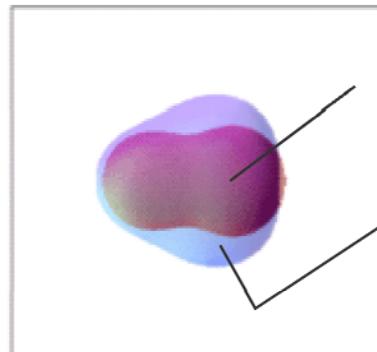


基底状態の構造変化

Y. Kanada-En'yo

13B

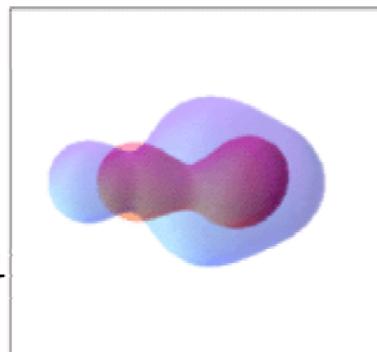
5個の陽子
8個の中性子



陽子の密度分布

15B

5個の陽子
10個の中性子

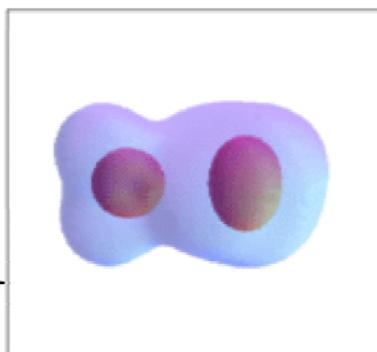


中性子の密度分布

+
○○
中性子を
2個加える

17B

5個の陽子
12個の中性子



クラスター構造が
発達!!

+
○○
中性子を
2個加える

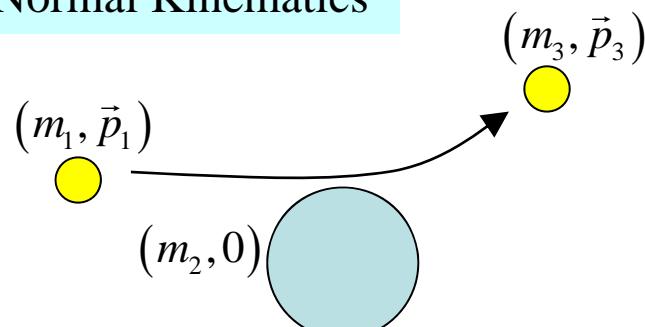
蓄積リングにおけるクラスター状態探索

- ・ アイスカラー型非弾性散乱 (α ? d ?)
 - ☺励起強度(E0, E2)の精密測定。
 - ☺断面積は1—100 mb/Sr。
 - ☺薄い標的を使うことで低エネルギー崩壊粒子を原理的には測定可能。
 - ☹選択性には乏しい。
- ・ クラスター移行反応
 - ☺基底状態におけるクラスター相関に有力？
 - ☹断面積は 1—100 μb /Sr。
 - ☹クラスターの核内運動量分布に対する感度があるか？
- ・ クラスターノックアウト反応
 - ☺クラスター移行に比べ核内運動量決定には有効かも。
 - ☹400 MeV/u ぐらいはエネルギーが欲しい所。

不安定核ビームを用いた非弾性散乱

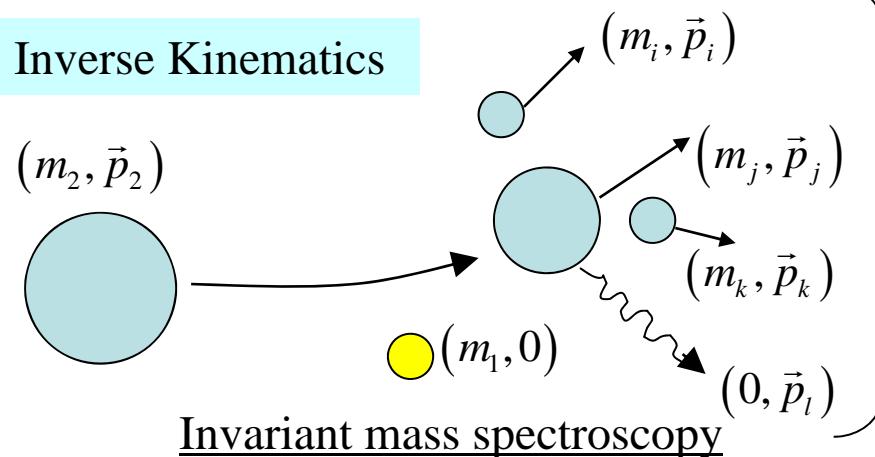
Inverse kinematics must be employed in RI-beam experiments.

Normal Kinematics



Missing mass spectroscopy

Inverse Kinematics

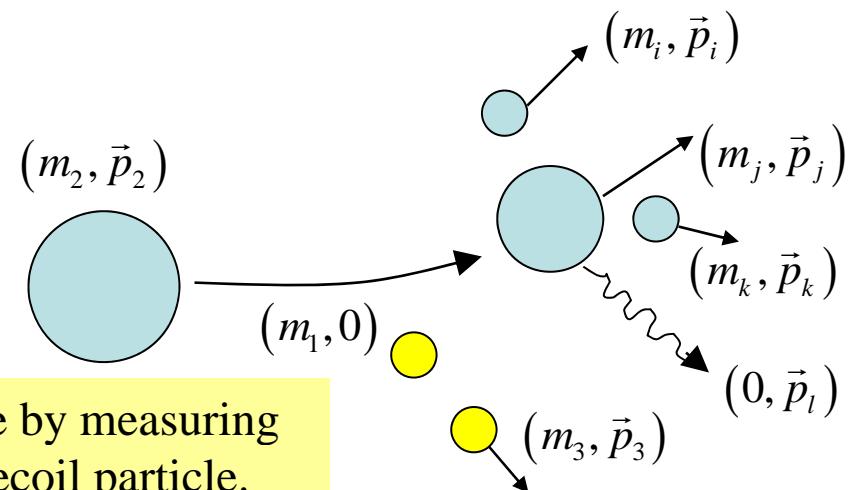


Inverse kinematics comes with difficulties

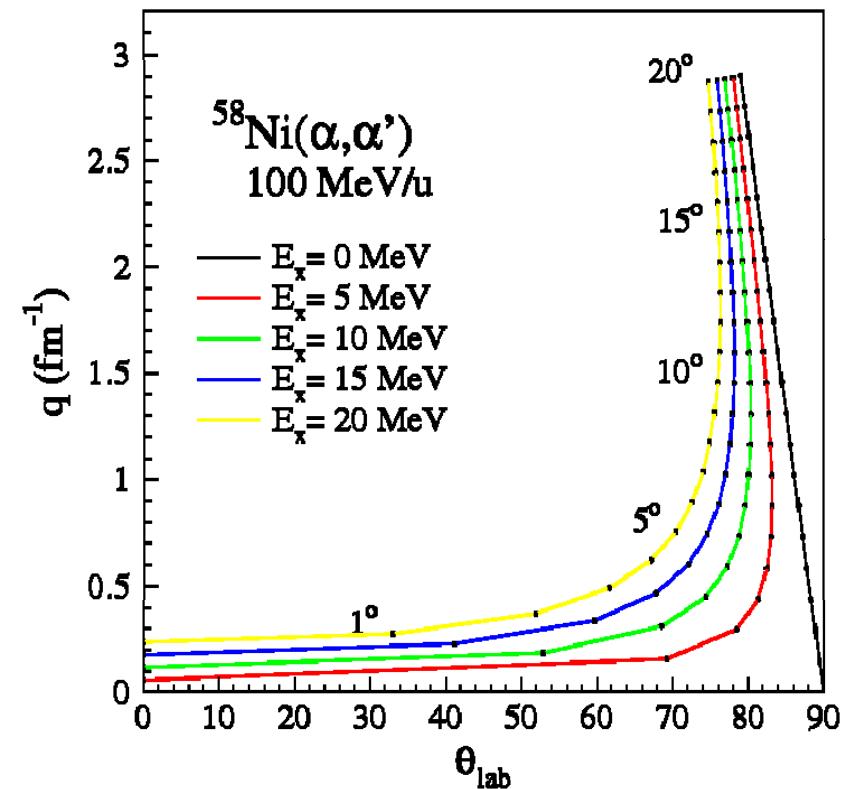
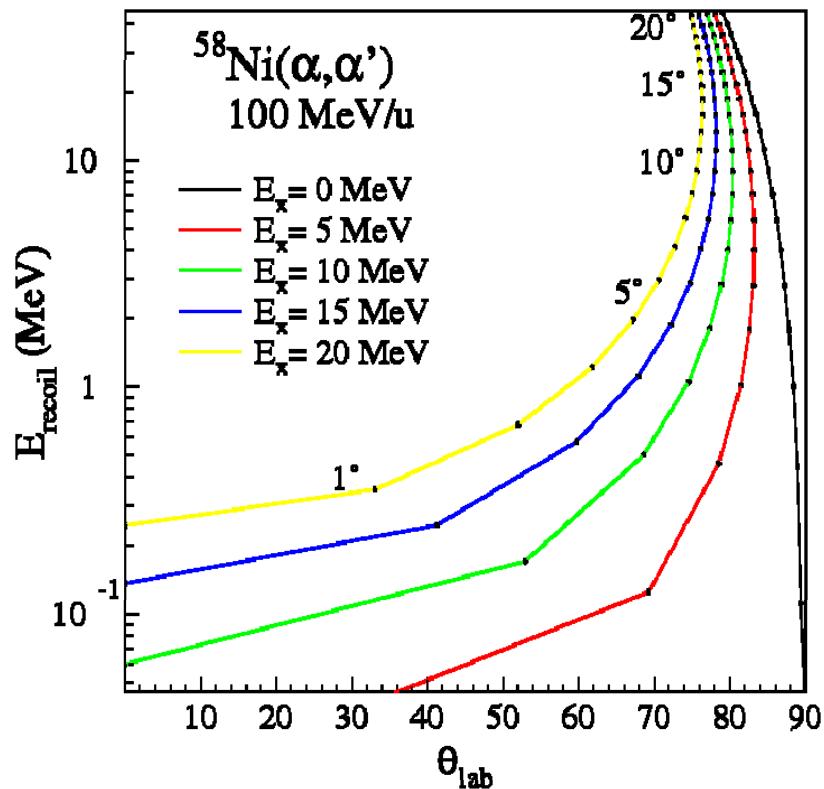
- ⌚ Decay particles (n, γ, \dots) carry away energy information.
- All particles must be measured to construct excitation energy spectra.

Missing mass spectroscopy is possible by measuring the low-energy (100 keV to 2 MeV) recoil particle.

→ Active target is needed.

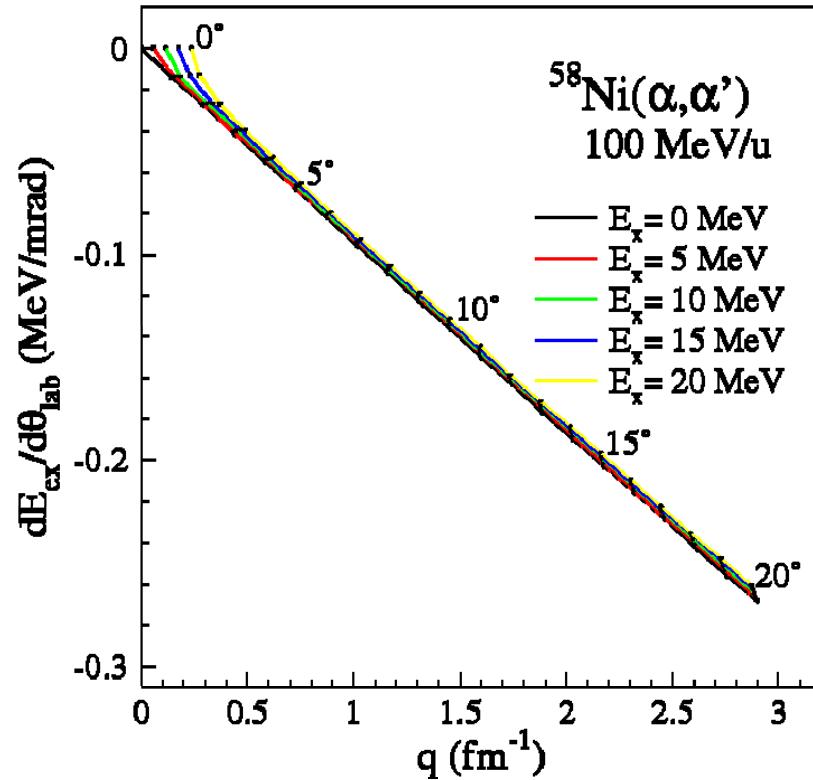
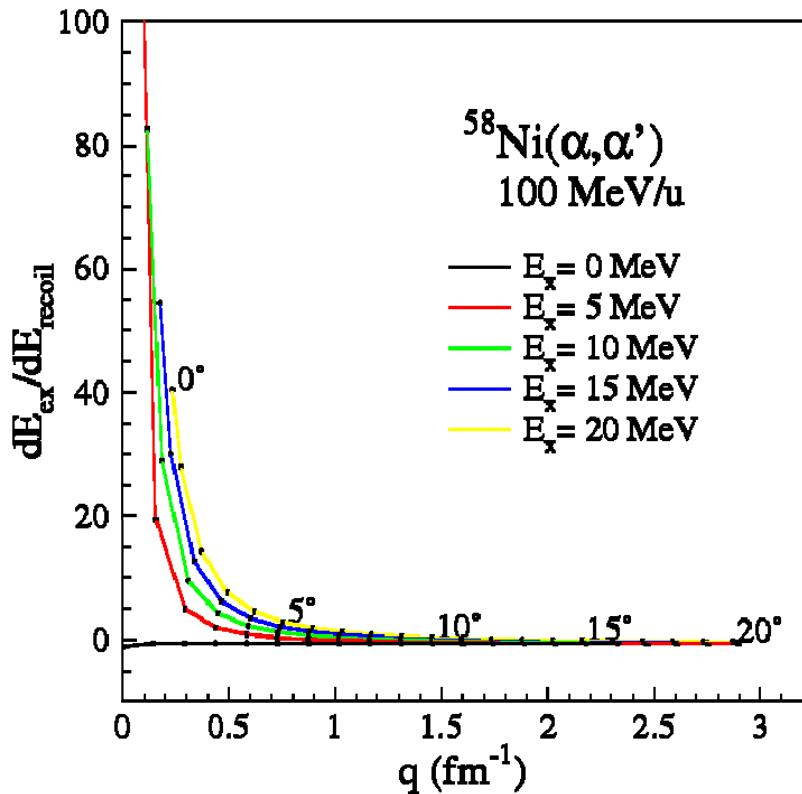


運動学的条件



- ・ 実験室系において、30—90度を覆う必要がある。
- ・ 崩壊粒子を測定するなら磁石のあとに検出器が必要。
- ・ 検出エネルギーは ほぼ0—50 MeV ぐらい。

励起エネルギー分解能



- ・ 前方角度ではエネルギー分解能が重要。
 - 300 keVの分解能を得るために必要なエネルギー分解能@ $\theta_{cm} = 1^\circ$
170 keV の α に対して 10 keV @ $q = 0.19$ fm $^{-1}$
- ・ 後方角度では角度分解能が重要。
 - 300 keV の分解能を得るために ~1 mrad の角度分解能が必要。

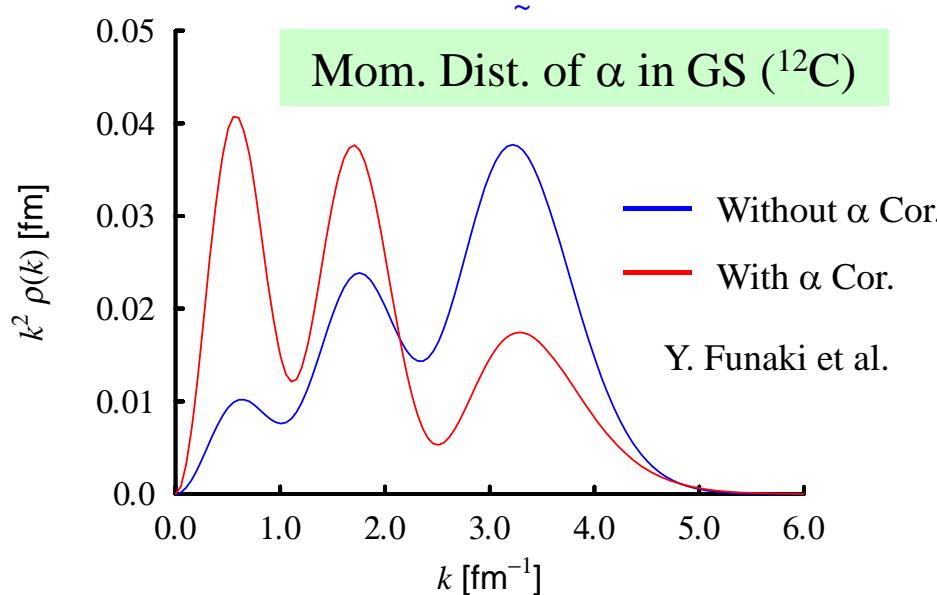
基底状態におけるクラスター相関

Sizable E0 strengths show existence of cluster correlation in GS.

Cluster component (CM) should exist in the GS wave function.

$$|G.S.\rangle = |SM\rangle + \delta |CM\rangle \quad \delta \ll 1 ??$$

↑
Equivalent to α cluster
w.f. at SU(3) Limit. ↑
Spatially well developed.

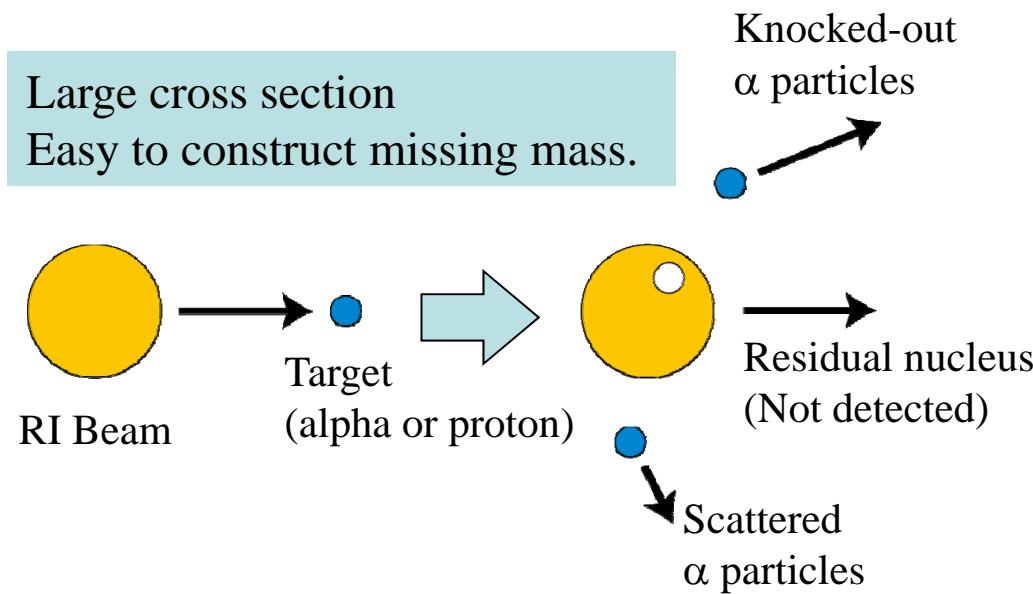


Momentum Dist. of α should be a good measure of α correlation in GS.

ノックアウト反応

Momentum dist. of α in GS can be determined by measuring α knock-out reactions.

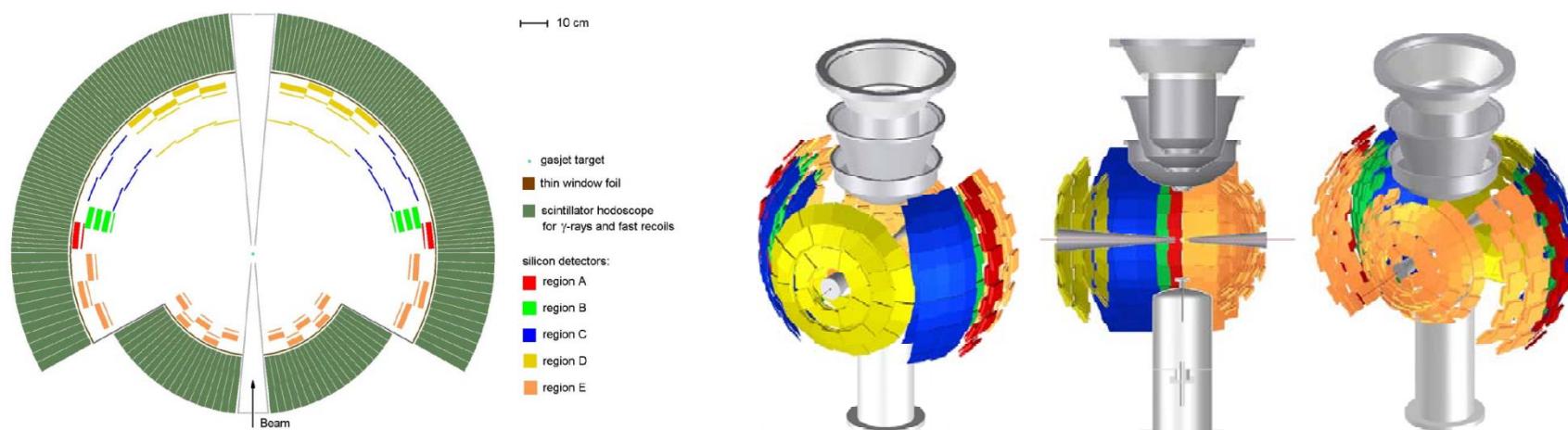
Knock-out reaction is relatively easy to perform even in inverse kinematics.



- ✓ Momentum Dist. of α could be a measure of cluster correlation in GS.
- ✓ α -cluster correlation should enhance α knock-out cross sections.
- ✓ Test experiment on stable nuclei might be needed.

収量見積もり

- 1 mb/Sr , $\Delta\Omega = 1 \text{ mSr}$ を仮定すると、 10^{-2} cps 得るのに、 $L = 10^{28} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 必要。
- 標的厚は 10^{14} cm^{-2} ぐらい？
- 繰り返しを 10^6 sec^{-1} と仮定すると 10^8 個必要。
 - 無理？
- 厚い標的。大立体角($\sim 2\pi$)を覆う検出器が必要。
 - それって、GSIのEXLそのもの？



まとめ

- 蓄積リング計画を想定して、クラスター物理がどう展開しうるかを検討してみた。
- アイスカラー型非弾性散乱
 - 低エネルギー反跳粒子の検出には、蓄積リングと内部標的の組み合わせが有効。
 - 安定線からどれほど遠くへ行けるか？
 - 崩壊粒子を測るなら、ひと工夫いる。
- ノックアウト反応
 - 基底状態をプローブするのに有効。
- 薄い標的ゆえ、統計の問題は頭が痛いところ。