



等核フェッシュバッハ分子による 多成分ボーズ凝縮体の相分離

首都大学東京大学院 理工学研究科
物理学専攻 柴藤亮介

共同研究者 西村拓史（お茶大） 鈴木徹（首都大）

目次

1. 研究背景

- 1-1, 原子BEC
- 1-2, 2成分BEC
- 1-3, フェッシュバッハ共鳴

2. 研究動機

- 2-1, 先行研究 (実験)
- 2-2, 研究動機

3. 本研究の模型

- 3-1, ハミルトニアン
- 3-2, 非線形波動方程式

4. 結果 (相構造)

- 4-1, 密度分布
- 4-2, カップリングの影響

5. 結果 (模型の有効範囲)

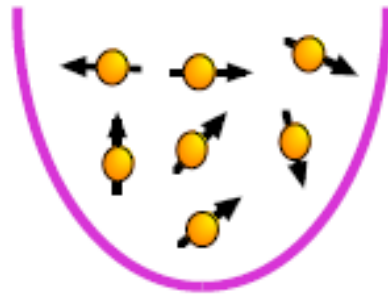
- 5-1, 1ch-2chの比較
- 5-2, 1ch-2chの関係

6. まとめ

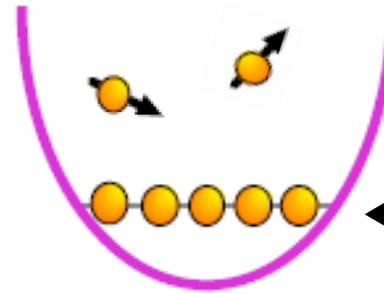
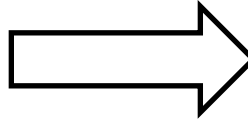


1-1. 原子BEC

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

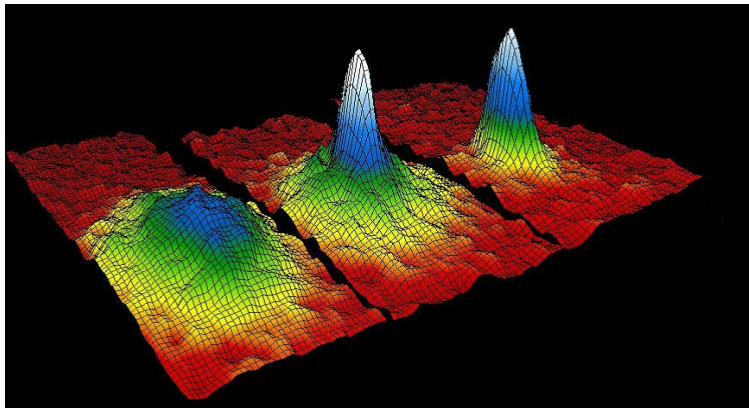


$T \sim 300[\text{K}]$



$T \sim 10^{-8} [\text{K}]$

初の原子BECの生成 (1995年)



【図1： ^{87}Rb で実現されたBEC】

M.H.Anderson et al., Science 269 P198-201(1995)

◎磁気トラップ
◎レーザー冷却
◎蒸発冷却

技術発展

トラップの大きさ

$\sim \mu\text{m}$

捕獲原子数

$\sim 10^6$ 個

1-2. 多成分BECと相分離

多成分BEC

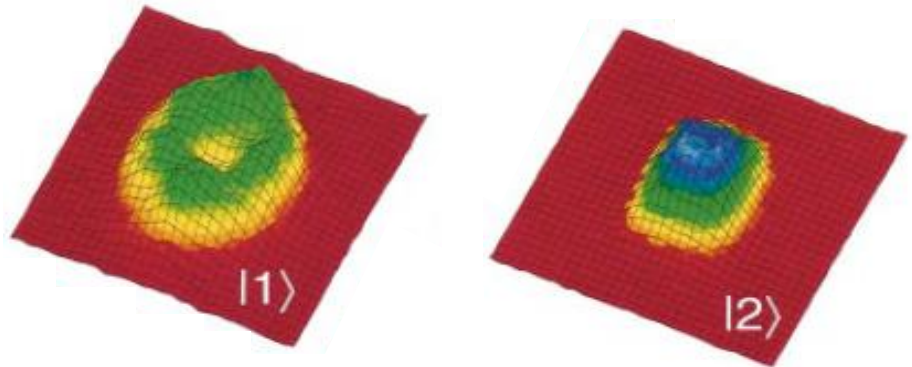
1995年	BEC実現
1998年	2成分BEC
1999年	スピノルBEC

多成分BECの研究が発展！

⇒ 『異種原子間相互作用』
による多彩な相構造

2成分BECの相分離

D.S.Hall et al., PRL 81 1539 (1998)



【図2: ^{87}Rb の異なるスピン状態間の相分離】

相分離現象…各成分が一様に混ざらず、場所ごとに局在化

液体Heの相分離

^3He & ^4He
(液体 & 液体)

原子BECの相分離

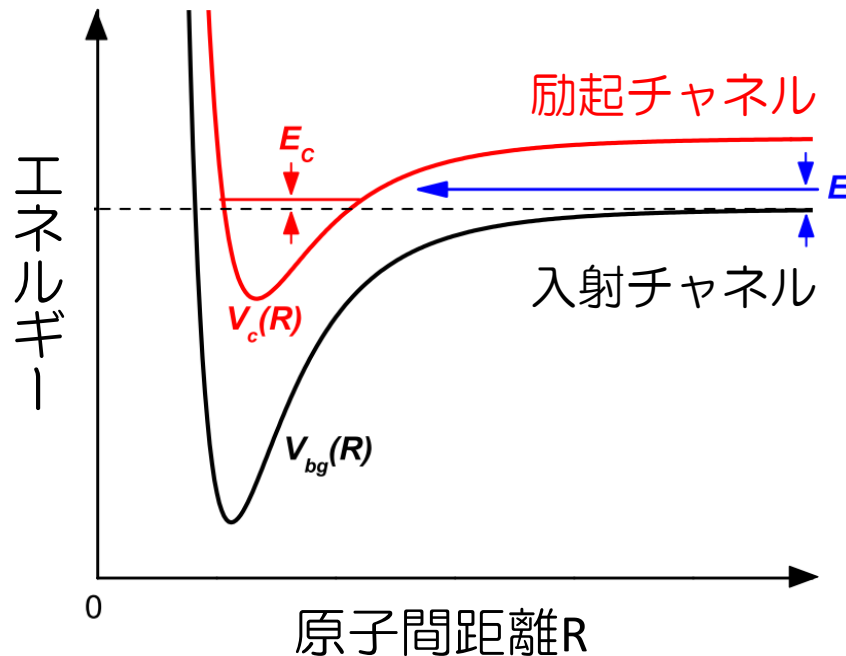
^{87}Rb 原子BEC & ^{87}Rb 原子BEC
(気体 & 気体)

1-3. Feshbach共鳴

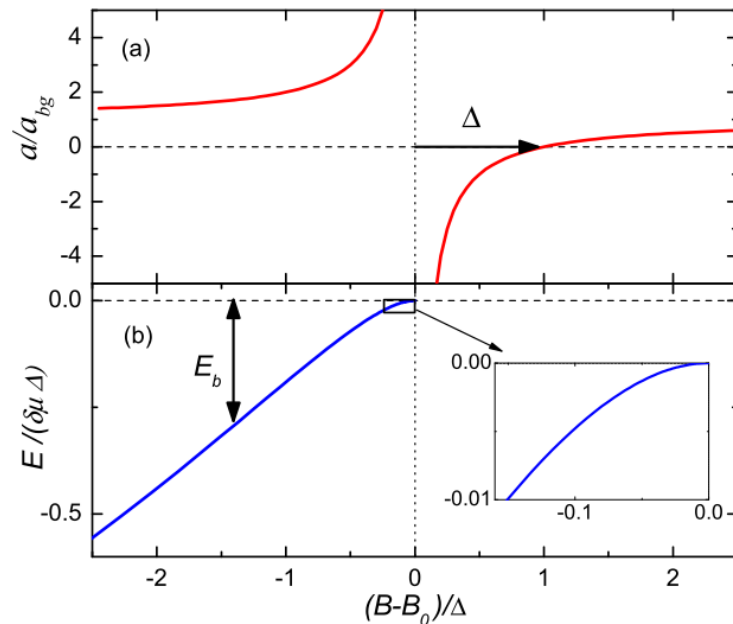
Feshbach共鳴

励起状態がゼーマン分裂した準位であれば、
共鳴エネルギーが磁場で調節可能

$$a(B) = a_{bg} \left(1 - \frac{\Delta B}{B - B_0} \right)$$



【図3: フェッシュバッハ共鳴の概念図】

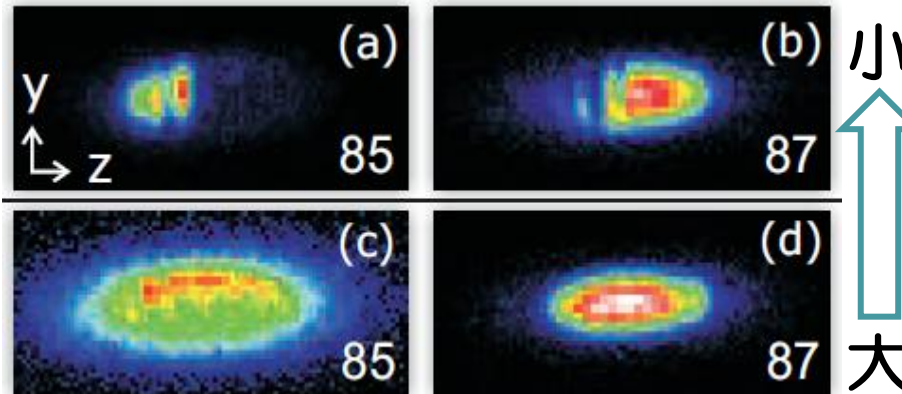


【図4: 各種パラメーターの振る舞い】

2-1. 先行研究（実験）

2成分BECの相分離（原子間斥力を弱めることで実現）

S.B.Papp et al., PRL **101** 040402 (2008)



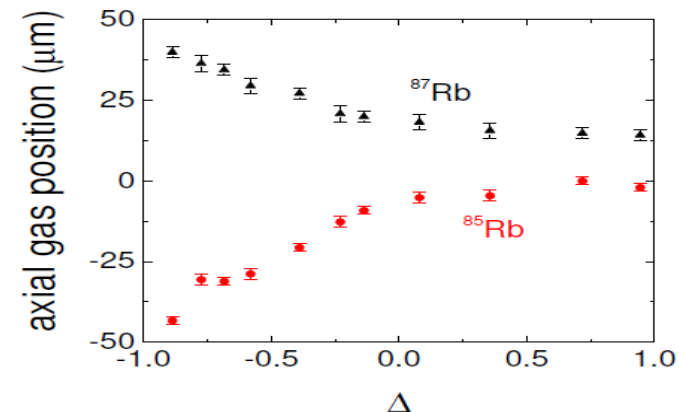
【図5: ^{85}Rb - ^{87}Rb の相分離】

- 葉巻型トラップ
- 粒子数 $^{85}\text{Rb} : ^{87}\text{Rb} = 1 : 2$
- ^{85}Rb - ^{85}Rb 間の原子間斥力を弱め相分離を観測

相分離条件（Hessian）

Hessianに対応した量

- $\Delta = \frac{a_{85} a_{87}}{a_{85-87}^2} - 1$ と定義
- $\Delta < 0$ で相分離が観測



【図6: 重心位置と Δ の関係】

2-2. 研究動機

①相分離機構の解明 (→結果①)



Feshbach分子は相分離に
どのような影響を与えているのか

Feshbach分子を含んだ模型から得られた
非線形波動方程式を解き**密度分布**を調べる。

②1ch模型の適用範囲 (→結果②)



2ch模型と異なる振る舞いをする
パラメター領域があるはず

原子-分子結合定数、Feshbach分子数を変化させ、
1ch-2chにどのような相違があるかを調べる。

3-1. 等核分子を含めた模型

$$\hat{H} = \hat{H}_s + \hat{H}_{int} + \hat{H}_{HFM},$$

$$\hat{H}_s = \sum_{i=a,b,m} \int d\mathbf{r} \Psi_i^\dagger(\mathbf{r}) h_i(\mathbf{r}) \Psi_i(\mathbf{r}) \quad h_i = -(\hbar^2 \nabla^2)/(2m_i) + V_i(\mathbf{r}) + m_i$$

原子間・分子間相互作用

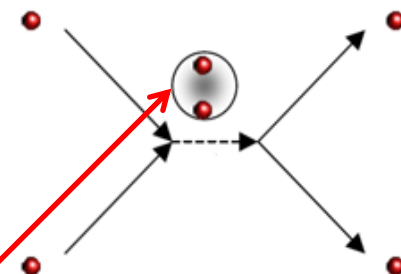
球対称トラップ

$$\begin{aligned} \hat{H}_{int} = & \sum_{i=a,b,m} \frac{g_{ii}}{2} \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \Psi_i^\dagger(\mathbf{r}) \Psi_i^\dagger(\mathbf{r}') \Psi_i(\mathbf{r}') \Psi_i(\mathbf{r}) \\ & + \sum_{i,j=a,b,m} \frac{g_{ij}}{2} \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \Psi_i^\dagger(\mathbf{r}) \Psi_j^\dagger(\mathbf{r}') \Psi_j(\mathbf{r}') \Psi_i(\mathbf{r}), \end{aligned}$$

$$\hat{H}_{HFM} = \lambda \int d\mathbf{r} (\Psi_m^\dagger(\mathbf{r}) \Psi_a(\mathbf{r}) \Psi_a(\mathbf{r}) + \Psi_a^\dagger(\mathbf{r}) \Psi_a^\dagger(\mathbf{r}) \Psi_m(\mathbf{r})),$$

分子の結合定数

等核Feshbach分子生成・消滅



3-2. 非線形波動方程式

2チャンネル模型 (分子自由度あり)

$$\left[\begin{aligned} (h_a + g_{aa}\phi_a^2 + g_{ab}\phi_b^2 + g_{ma}\phi_m^2 + 2\lambda\phi_m)\phi_a &= \mu_a\phi_a, \\ (h_b + g_{bb}\phi_b^2 + g_{ab}\phi_a^2 + g_{bm}\phi_m^2)\phi_b &= \mu_b\phi_b, \\ (h_m + g_{mm}\phi_m^2 + g_{am}\phi_a^2 + g_{bm}\phi_b^2)\phi_m + \lambda\phi_a^2 &= \mu_m\phi_m, \end{aligned} \right.$$

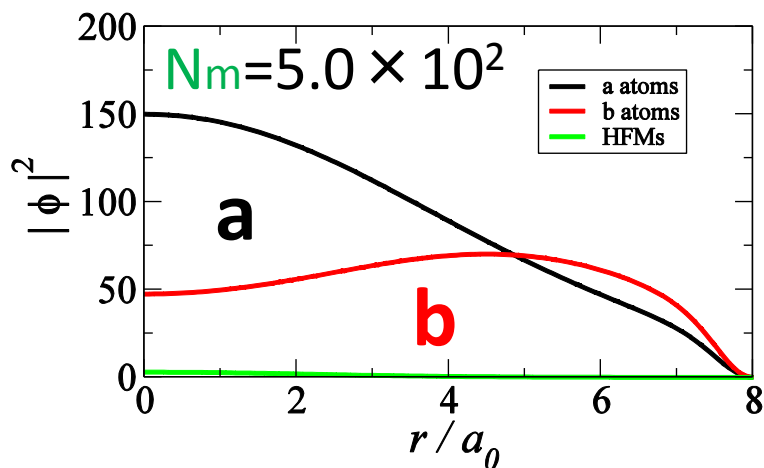
1チャンネル模型 (分子自由度なし)

$$\left[\begin{aligned} (h_a(\vec{r}) + \tilde{g}(\vec{r})\phi_a^2(\vec{r}) + g_{ab}\phi_b^2(\vec{r}))\phi_a(\vec{r}) &= \mu_a\phi_a(\vec{r}) \\ (h_b(\vec{r}) + g_{bb}\phi_b^2(\vec{r}) + g_{ab}\phi_a^2(\vec{r}))\phi_b(\vec{r}) &= \mu_b\phi_b(\vec{r}) \end{aligned} \right.$$

$$\tilde{g}(0) \equiv g_{aa} + \frac{2\lambda\sqrt{N_m}\phi_m(0) + g_{am}N_m\phi_m^2(0)}{N_a\phi_a^2(0)}$$

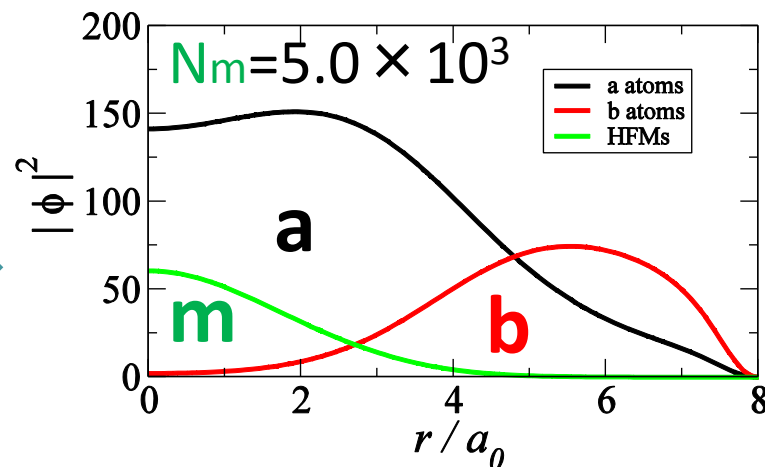
4-1. 密度分布

密度分布のFeshbach分子数依存性 ($g_{aa}=g_{ab}=g_{bb}=g$)



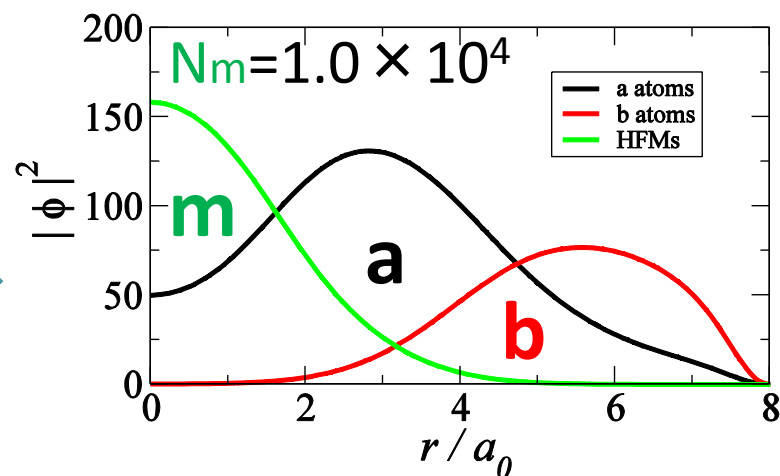
二層構造

①



三層構造

②

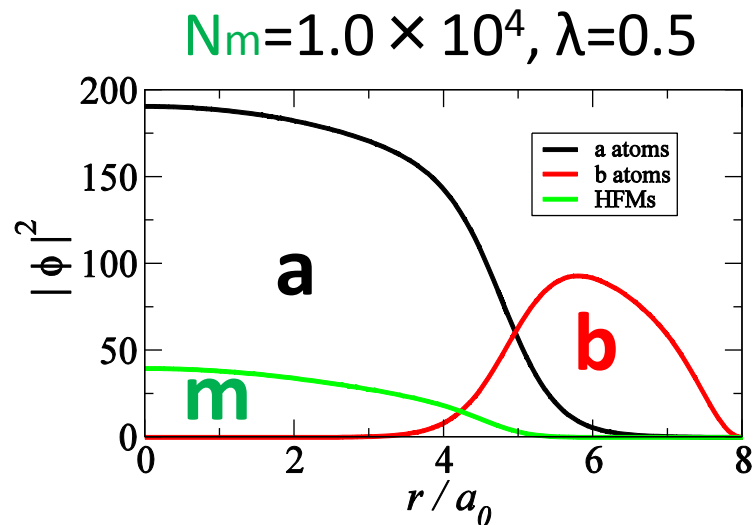
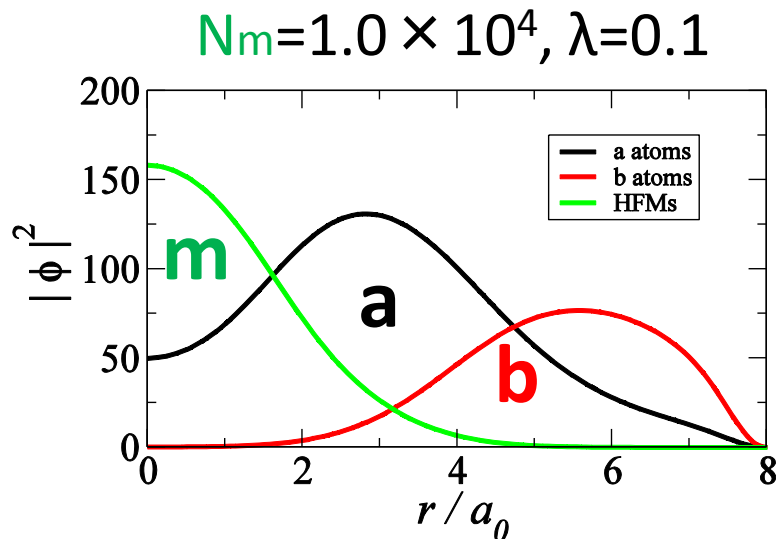


① 相対的斥力の増加
→ 二層構造

② 原子-分子相互作用
→ 三層構造

4-2. 結合定数

密度分布の結合定数依存性 ($g_{aa}=g_{ab}=g_{bb}=g$)

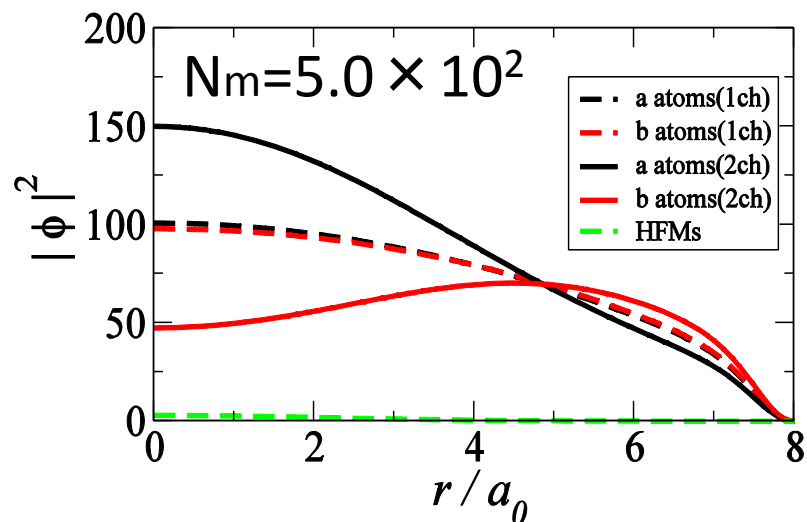
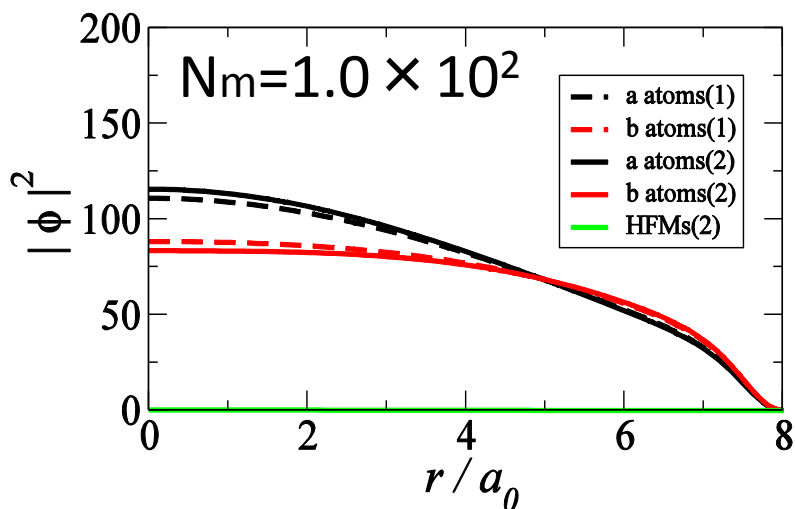


結合定数の違いにより密度分布が異なる。

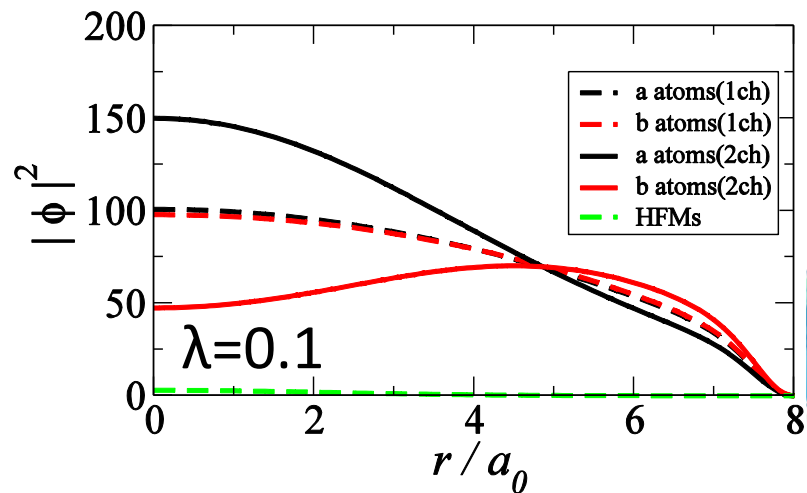
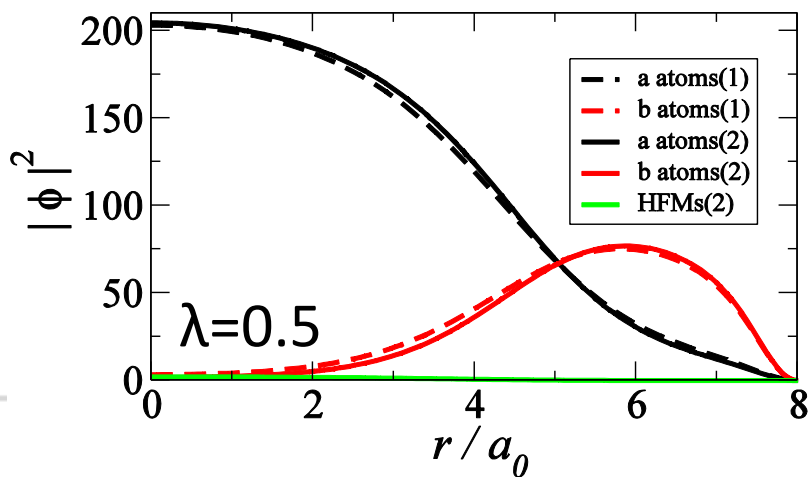
→ 原子・分子の重ね合わせ大きくすることで
エネルギー的に安定

5-1. 1ch-2chの比較

粒子数の比較 ($\lambda=0.1$)



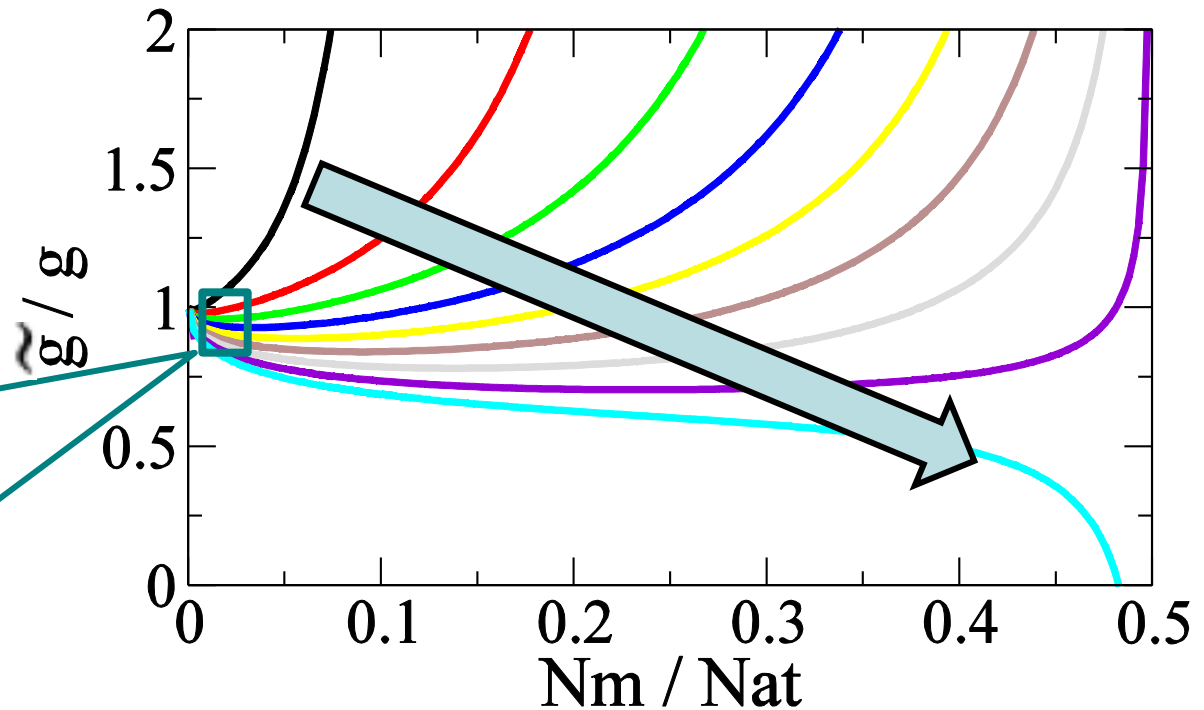
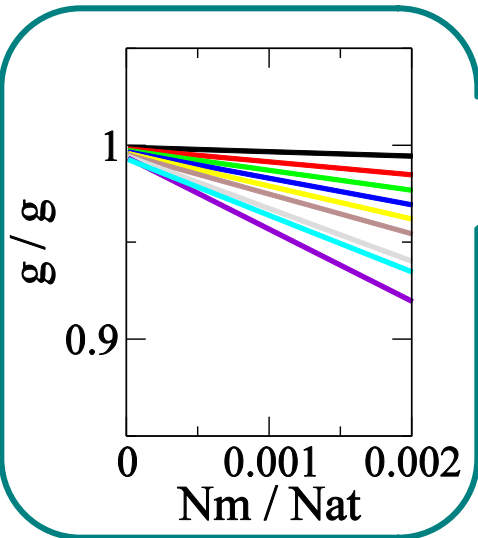
結合定数の比較 ($N_m=5.0 \times 10^2$)



5-2. 1ch模型の有効範囲

$$\tilde{g}(0) \equiv g_{aa} + \frac{2\lambda\sqrt{N_m}\phi_m(0) + g_{am}N_m\phi_m^2(0)}{N_a\phi_a^2(0)}$$

$$0.1 \leq \lambda \leq 0.9$$



まとめ

2成分ボース原子+HFM系の理論解析を行った。

結果①：相分離機構と新しい相構造

- Feshbach分子の増加 ($N_m \sim 10^2$)
→ 相対的に斥力増加 → 二相構造
- Feshbach分子の増加 ($N_m \sim 10^4$)
→ 三層構造の出現可能性

結果②：1ch模型の適用範囲

- HFM数が小さく、 λ が大きいパラメータ領域で有効

$$\tilde{g}(0) \equiv g_{aa} + \frac{2\lambda\sqrt{N_m}\phi_m(0) + g_{am}N_m\phi_m^2(0)}{N_a\phi_a^2(0)}$$



ご清聴ありがとうございました。

