原子分子混在量子気体の動力学

Takushi NISHIMURA (西村 拓史)[A]

collaborated with 丸山智幸[B]

[A] お茶大アカプロ, [B] 日大生物資源

22-24 August 2011 at 基研研究会「熱場の量子論とその応用」

概要

- ボース原子分子混在量子気体がFeshbach共鳴(FR)により結合している時、その動力学はどうなるか？

A. FR衝突項の非平衡動力学への寄与

B. トラップ系BECの動力学

背景

- 冷却原子系(1995〜)における分子形成の研究の発展

動機

- 量子多体問題の一つのアプローチとして

⋆ 分子は量子多体系の強相関の一つの極限、その理論的研究

- 古典的な気体・化学の冷却極限の問題として

TN, A. Matsumoto, and H. Yabu, PRA 77, 063612 (2008)

TN and T. Maruyama, JPSJ 79, 083001 (2010)

R. Shibato, TN, T. Watanabe, and T. Suzuki, arXiv:1104.4408

模型

- 1成分ボース原子(A)と等核ボース分子(M): $A + A \leftrightarrow M$
- 分子は2原子とスピン状態が異なり、共鳴遷移する(FR)
- $H = H_A + H_M + H_{AA} + H_{MM} + H_{FR} \quad (\hbar = 1,\ m_A = \frac{1}{2} m_M = 1)$

★ $H_A = \int dr\ \Psi_A^\dagger (-\frac{1}{2}\nabla^2 + V_A)\Psi_A$

★ $H_M = \int dr\ \Psi_M^\dagger (-\frac{1}{4}\nabla^2 + V_M + \Delta E)\Psi_M$

★ $H_{\alpha\alpha} = \frac{g_{\alpha\alpha}}{2} \int dr\ \Psi_\alpha^\dagger(r)\Psi_\alpha^\dagger(r)\Psi_\alpha(r)\Psi_\alpha(r), \quad g_{\alpha\alpha} = \frac{2\pi a_{\alpha\alpha}}{m_{\alpha\alpha}}$

★ $H_{FR} = \lambda \int dr \left[\Psi_M^\dagger(r)\Psi_A(r)\Psi_A(r) + \text{h.c.}\right], \quad \tilde{a}_{AA} \approx a_{AA} - \frac{1}{2\pi}\frac{\lambda^2}{\Delta E}$

A. FR衝突項の非平衡動力学への寄与

- 一様$(V_A = V_M = 0)$で$H_{AA} = H_{MM} = 0$の場合を考える

- 非平衡動力学は量子力学的ボルツマン方程式に従うとする

$$\frac{df_A}{dt} = \Gamma^A_{FR}, \quad \frac{df_M}{dt} = \Gamma^M_{FR}$$

- 転移温度以下ではBECの寄与は？

$$f_\alpha(p) = \delta_p f_{0\alpha} + \tilde{f}_\alpha(p)$$

A-1. FR衝突項

- 衝突項は量子統計性に依存する（ここでは全てボソン）

$$\Gamma^{A}_{FR}(p_1) = 2\sum_{p_2}\sum_{p_m} A_{FR}, \quad \Gamma^{M}_{FR}(p_m) = -\sum_{p_1}\sum_{p_2} A_{FR}$$

★ $A_{FR} \equiv 4\pi\lambda^2\ \delta_{p_1+p_2-p_m}\ \delta(\varepsilon^A_1 + \varepsilon^A_2 - \varepsilon^M_m)\ (\Lambda_{in} - \Lambda_{out})$

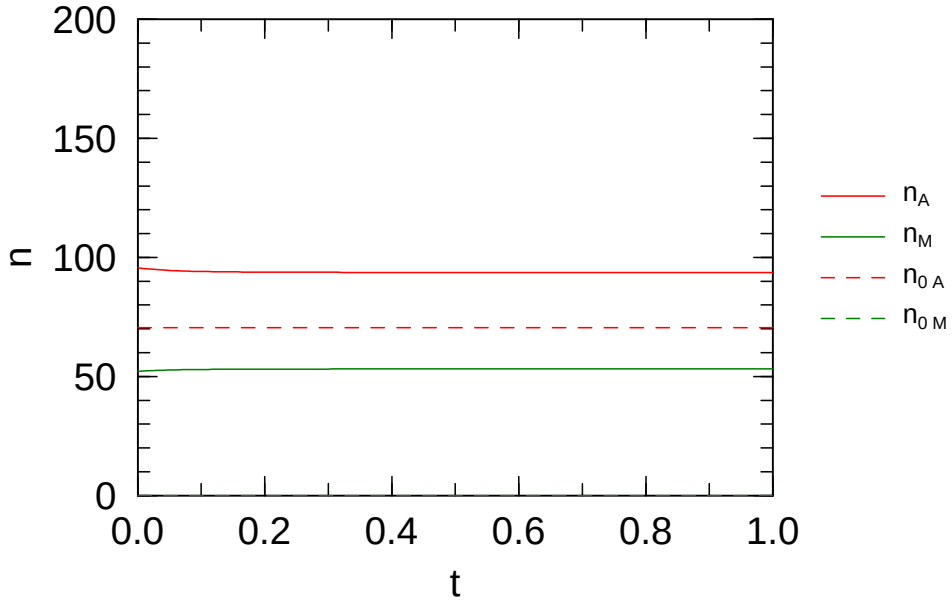
★ $\Lambda_{in} \equiv (1 + f_A(p_1))\ (1 + f_A(p_2))\ f_M(p_m)$

★ $\Lambda_{out} \equiv (1 + f_M(p_m))\ f_A(p_1)\ f_A(p_2)$

A-2. 典型的な状況における振る舞い

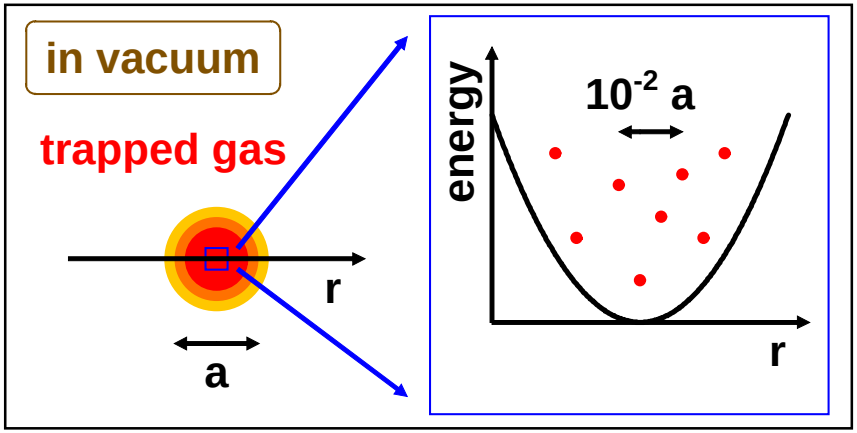
- BEC転移温度以上では速やかに化学平衡状態へ移行(H定理)
- 転移温度以下ではFR衝突項の直接の寄与は小さい

⋆ BECは衝突しない !? (凝縮数は固定)



$\Delta E = 2.15,\ T = 30$の平衡状態から$\Delta E = 0.872$にしてスタート、$\lambda = 0.2$

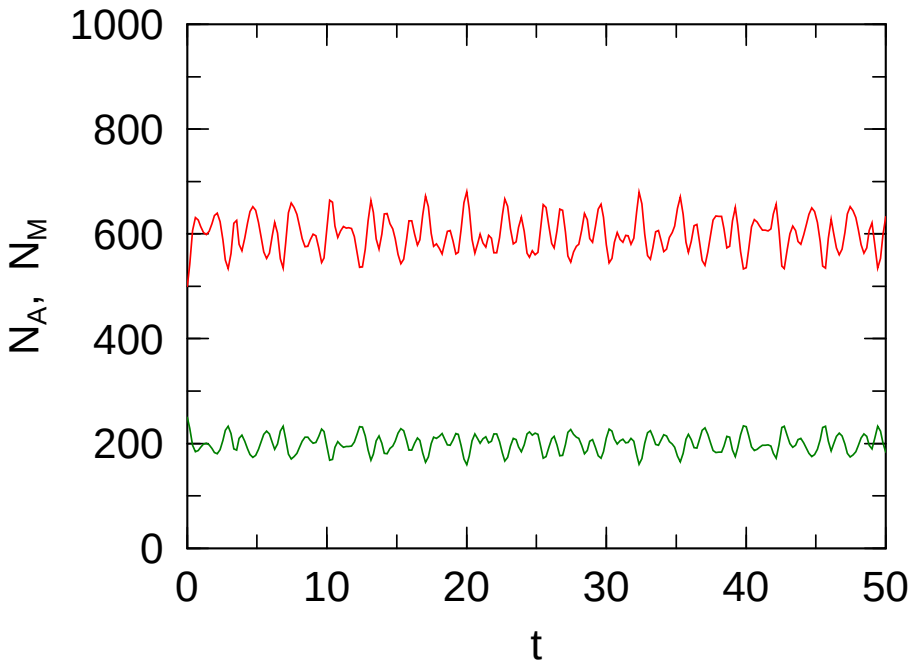
B. トラップ系BECの動力学

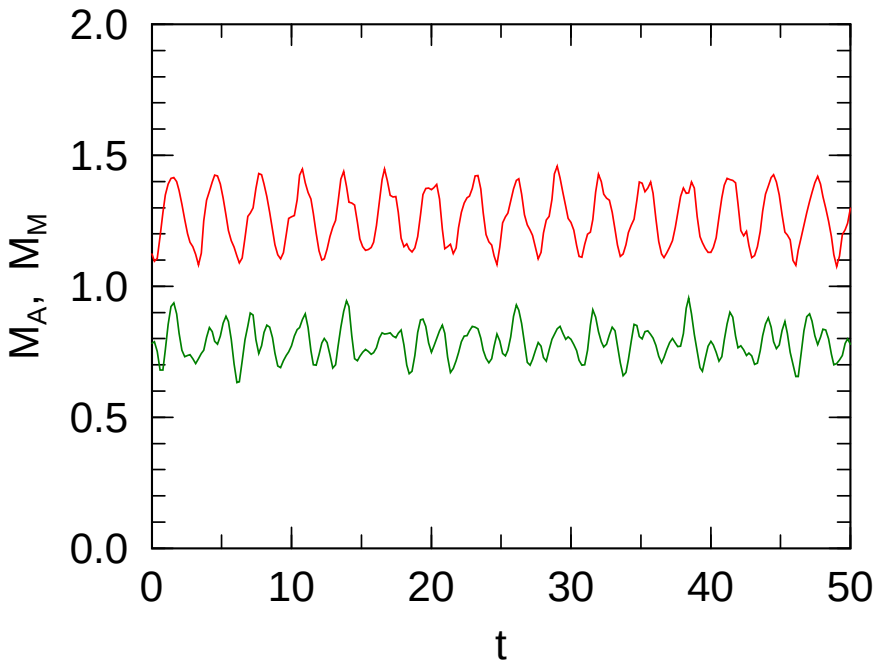


- 調和振動子トラップ: $V_A = \frac{1}{2}r^2,\ V_M = r^2,\ \omega = 1$
- ゼロ温度TDGP方程式: $i\frac{d\phi_\alpha}{dt} = \frac{\delta\langle H\rangle}{\delta\phi_\alpha^*},\ \Psi_\alpha \approx \langle\Psi_\alpha\rangle \equiv \phi_\alpha$
- 設定: $t = 0$でΔEを突然変える

B-1. 典型的な状況での振舞い(1)

- 粒子数振動(左)とモノポール振動(右)が同時に起こる



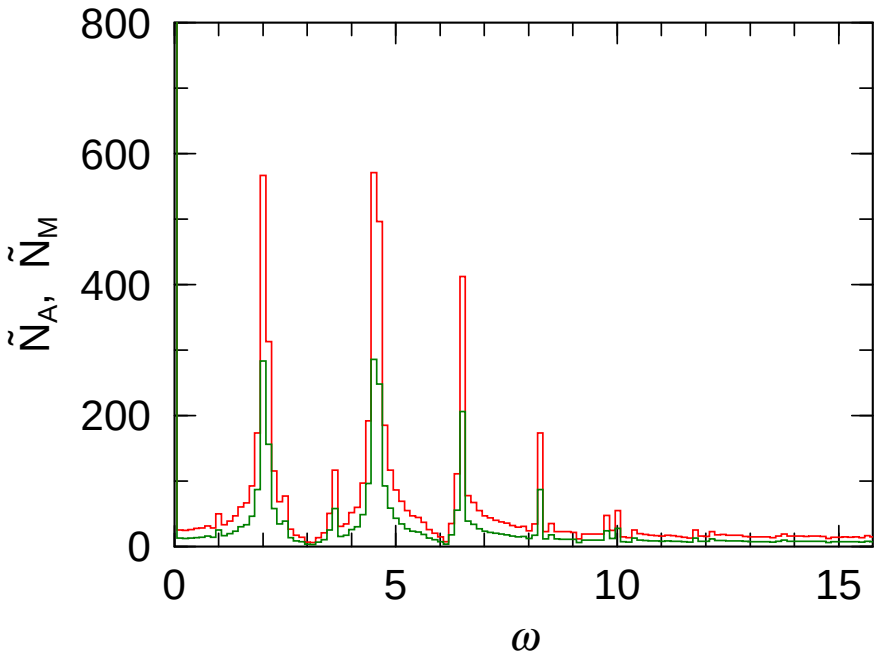


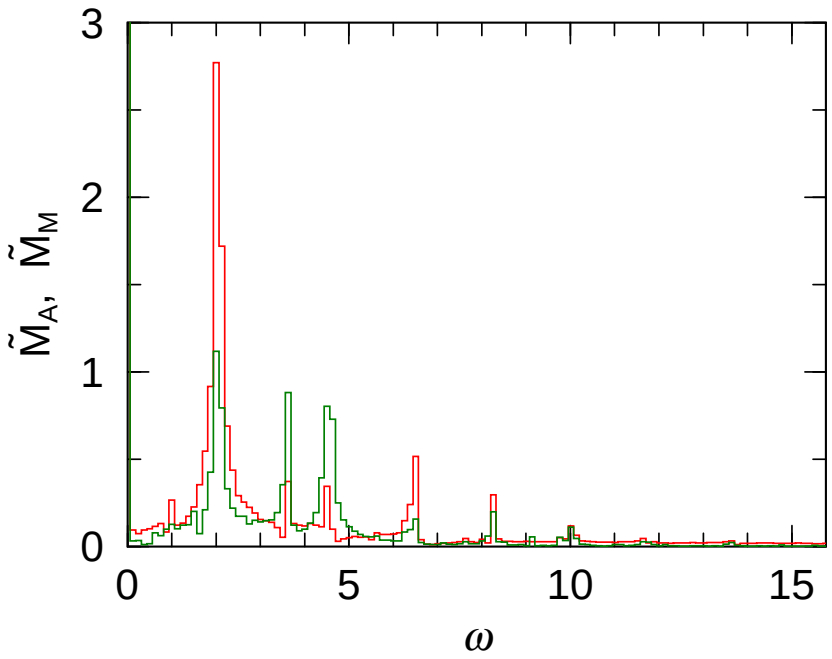
$N_{Atot} = 10^3$, $\Delta E = 2.15$ の平衡状態から $\Delta E = 0.872$ にしてスタート

$$\lambda = 0.2, \quad g_{AA} = g_{MM} = 0.02, \quad M_\alpha \equiv \langle r^2 \rangle / N_\alpha$$

B-1. 典型的な状況での振舞い(2)

- フーリエ変換した係数の絶対値





- 分子数振動とモノポール振動が連結することで集団運動が形成
- また、モノポール励起によっても分子数振動が誘起される

まとめ

A. FR衝突項の非平衡動力学への寄与

- 量子統計性を反映しながら、化学平衡状態を生み出す
- 転移温度以下ではBECの影響で特異な振る舞いを見せる

B. トラップ系BECの動力学

- 分子数振動とモノポール振動が連結した集団運動が発生
- この集団運動はBECのコヒーレンスによる

⋆ Thank you for your attention.