

光学格子系における緩和過程の時間依存 密度行列繰り込み群法による解析

奥村雅彦^{1,3}

大西弘明²

山田進^{1,3}

町田昌彦^{1,3}

1) 日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター

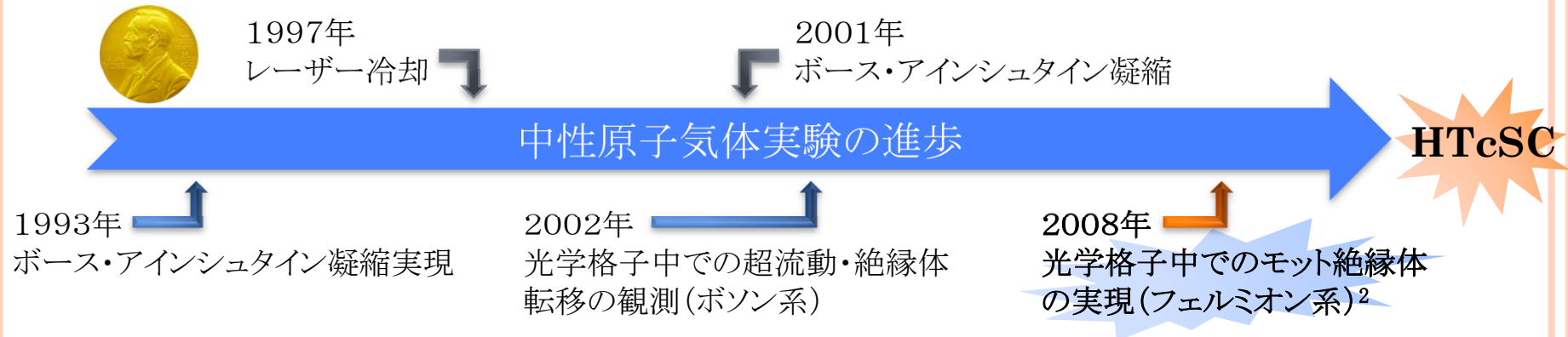
2) 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター

3) CREST(JST)




背景(対象:中性原子気体系)

○ 中性原子気体系の発展¹



○ 中性原子気体系の特徴¹

- 相互作用の引力・斥力とその大きさが外部磁場によって制御できる(フェッシュバツハ共鳴)
- 非平衡状態の生成・観測が容易である

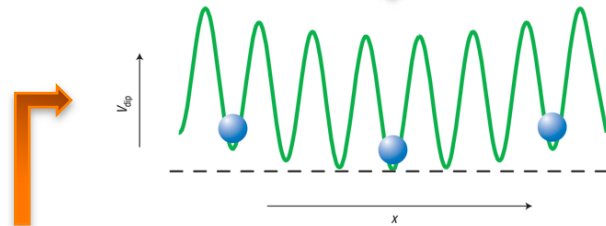
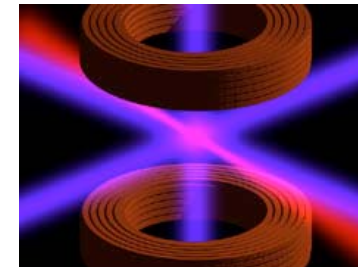
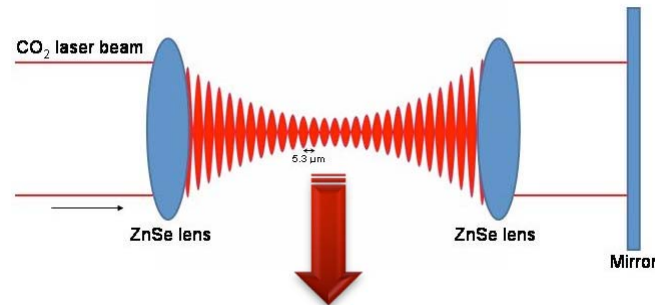
 **制御可能な強相関非平衡系！**

1. I. Bloch, J. Dalibard, and W. Zwerger, RMP **80**, 885 (2008).
2. R. Joerdens *et al.*, Nature **455**, 204 (2008); U. Schneider *et al.*, Science **322**, 1520 (2008).

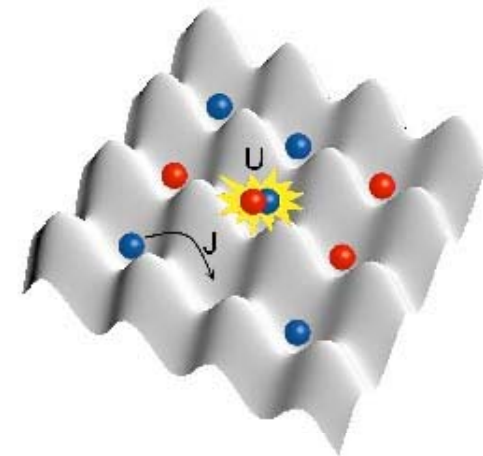


光学格子系

- レーザーの定在波の谷間に中性原子を捕獲した系¹



調和型閉じ込めポテンシャルが自然にかかる



- ハバード模型で記述される

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + \sum_{i, \sigma} V (i - i_c)^2 n_{i\sigma} + \sum_i U n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

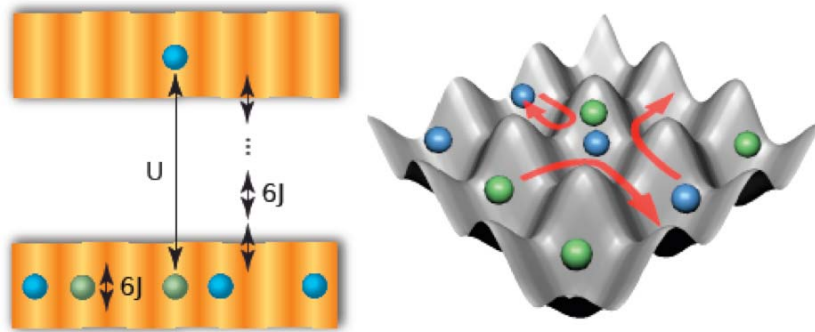
1. M. Lewenstein et al., Adv. Phys. **56**, 243 (2007).



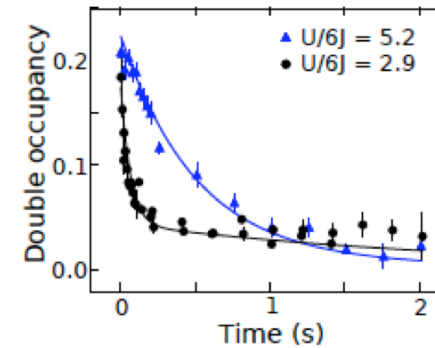
非平衡の実験 (ダブロン崩壊)

- 二重占有状態 (ダブロン) を励起し、その崩壊を観測¹

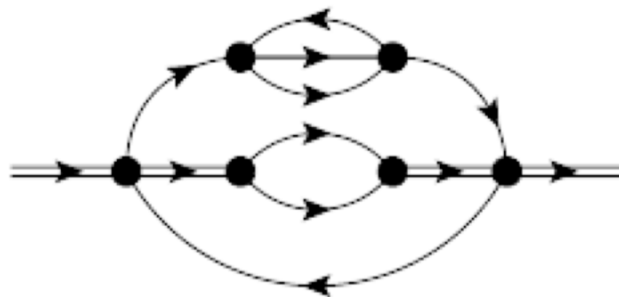
概念図



ダブロン崩壊の様子

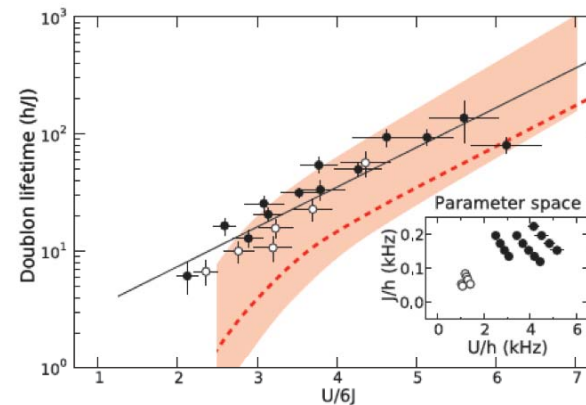


高次の散乱過程



$$E: U \rightarrow n \times 6J$$

理論と実験の比較

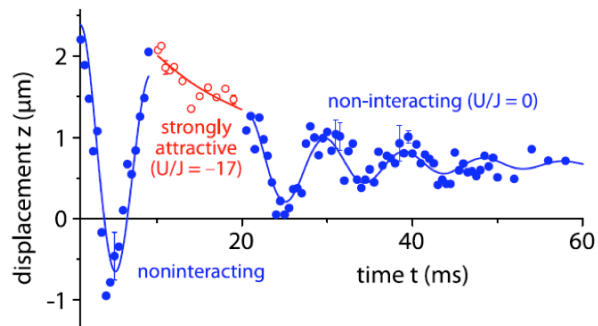


1. R. Sensarma *et al.*, arXiv:0905.2963.

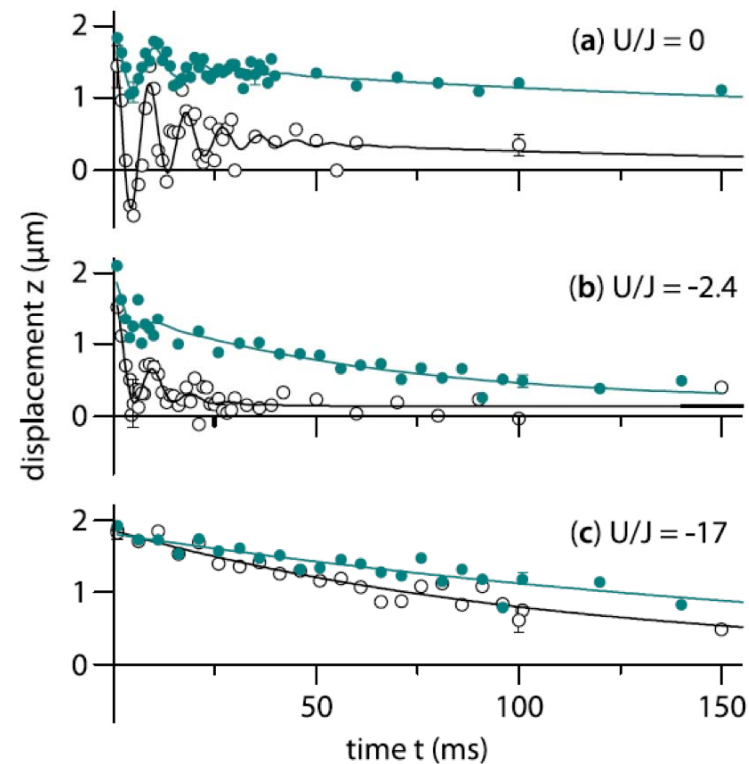
非平衡の実験 (重心運動)

○ 引力フェルミオン光学格子系における重心運動¹

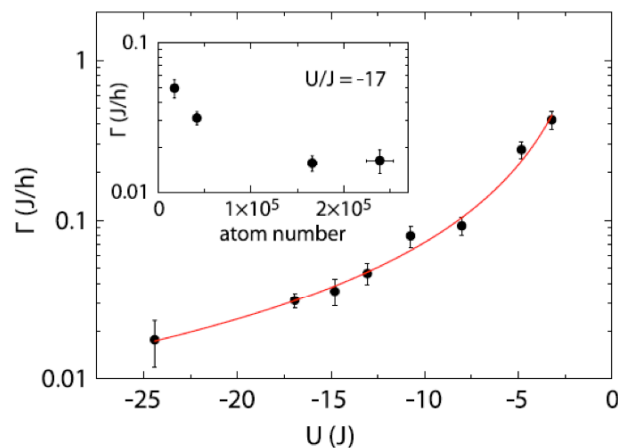
重心運動に対する相互作用効果1



重心運動に対する相互作用効果2



減衰率の相互作用依存性

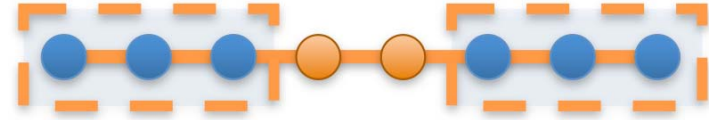


1. N. Strohmaier *et al.*, PRL **99**, 220601 (2007).

背景(手法:密度行列繰り込み群法)

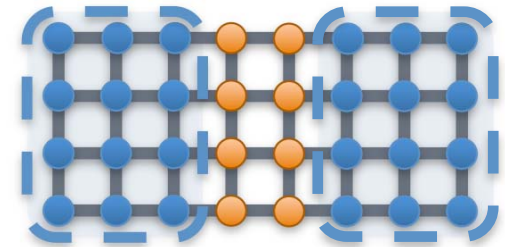
○ 密度行列繰り込み群法^{1,2}

- 行列積状態を用いた変分法
- “量子情報の圧縮”をうまく用いている
- 「時間依存密度行列繰り込み群法」という拡張手法もある³



○ 密度行列繰り込み群法によってできることできないこと

- 1次元強相関係の基底状態を求める
- 1次元強相関係の非平衡ダイナミクスを追う
- 高次元は苦手(拡張:並列化⁴、PEPS⁵、MERA⁶、・・・)



1. S.R. White, PRL **69**, 2863 (1992); PRB **48**, 10345 (1993).
2. U. Schollwoeck, RMP **77**, 259 (2005).
3. A.J. Daley *et al.*, J. Stat. Mech. P04005 (2004); S.R. White and A.E. Feiguin, PRL **93**, 076401 (2004).
4. S. Yamada, MO, and M. Machida, JPSJ **78**, 094004 (2009).
5. F. Verstraete and J.I. Cirac. arXiv:0407066.
6. G. Vidal, PRL **99**, 220405 (2007).



今回の発表

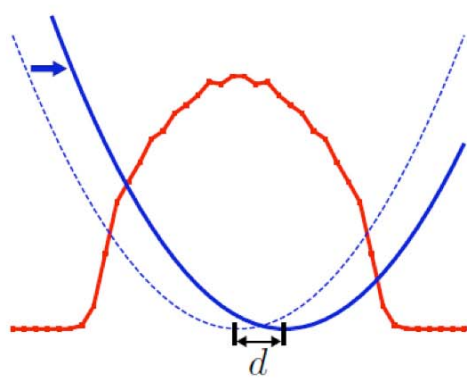
- 斥力フェルミオン光学格子系における重心運動
 - なぜ重心運動か？
 - 中性原子気体系における輸送問題の典型的観測量だから
 - なぜ光学格子系か？
 - コーンの定理¹(調和トラップ中の重心運動は相互作用の影響を受けない)が破れるので、相互作用効果を見る事ができるから
 - なぜ斥力フェルミオン系か？
 - 強相関電子系との比較
 - 金属・絶縁体転移が光学格子系のダイナミクスとしてどのように観測されるか

1. W. Kohn, PR **123**, 1242 (1961); S.-K. Yip, PRB **40**, 3682 (1989); L. Brey, N.F. Johnson, and B.I. Halperin, PRB **40**, 10647 (1989); J.F. Dobson, PRL **73**, 2244 (1994).



設定・パラメータ・物理量

- 調和型ポテンシャルを $t=0$ で d だけずらす



$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + \sum_{i,\sigma} V [x_i - x_c - d\theta(t)]^2 n_{i\sigma} + \sum_i U n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

$$\left[\sigma = \uparrow, \downarrow \quad n_{i\sigma} = c_{i\sigma}^\dagger c_{i\sigma} \quad x_i = ai \quad \text{格子定数: } a \right]$$

- パラメータ

系の大きさ: $L = 40$ トラップの強さ: $Va/J = 2.63 \times 10^{-3}$

粒子数: $N_\uparrow = N_\downarrow = 12$ トラップの中心: $x_c/a = 20.5$ ずらし: $d/a = 3$

- 物理量

重心: $X = \sum_{i=1}^L ian_i/N$ 重心の速度: $\mathcal{V} = \dot{X}$ $\mathcal{X} = X - x_c + d$

ダブロン密度: $n_i^d = \langle n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} \rangle$ ダブロンの個数: $N_d = \sum_{i=1}^L n_i^d$

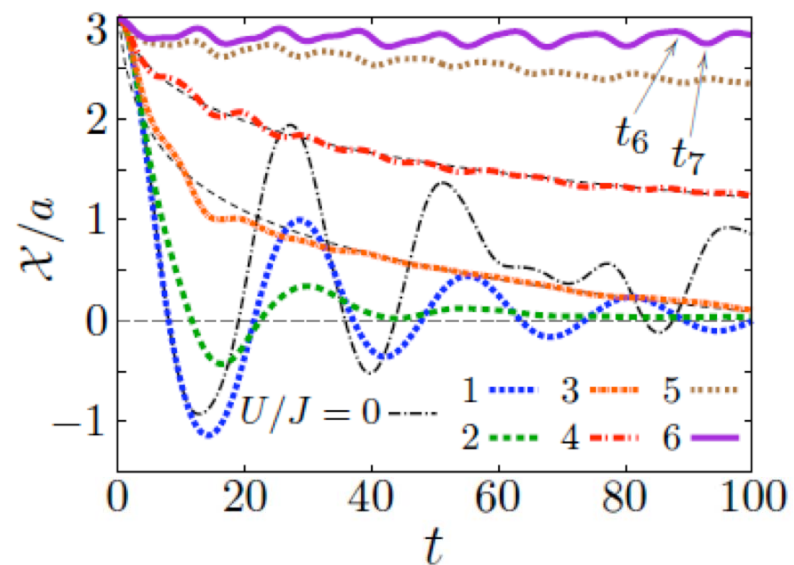


相互作用 U を変えて重心運動がどのように変わるか？

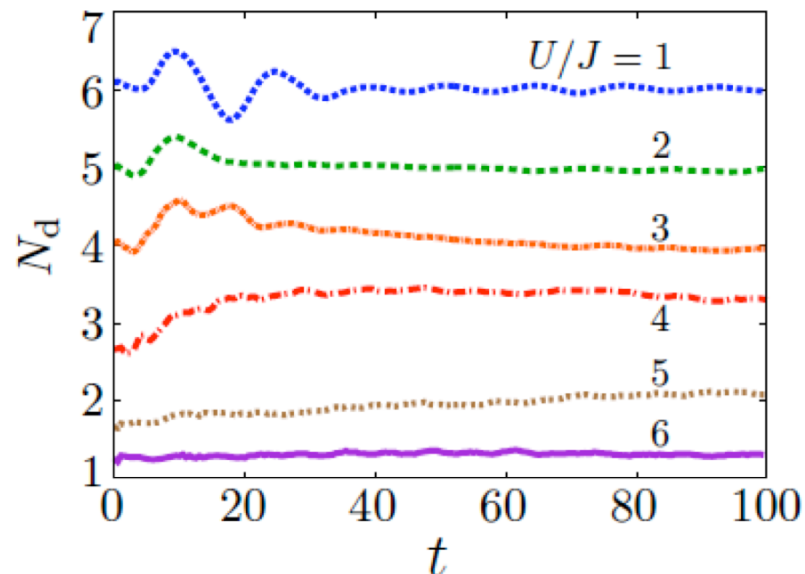


相互作用効果

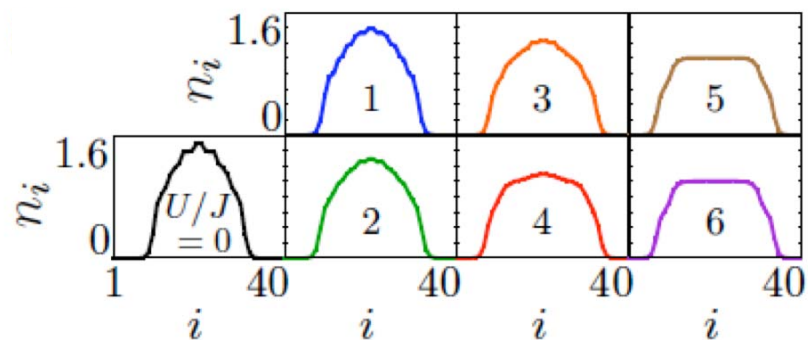
トラジェクトリー



ダブロン個数



初期状態

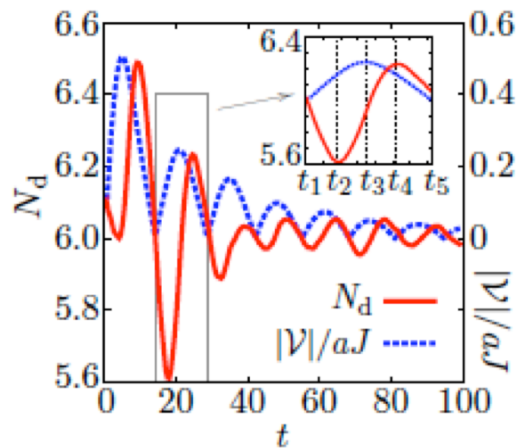


- 減衰振動、過減衰、絶縁体の3つの領域がある事が確認できる
- ダブロン個数の増減が関係しているように見える

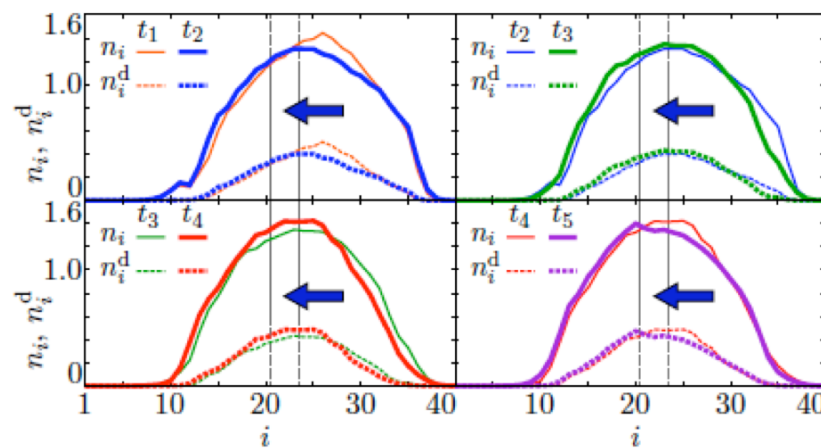


弱相互作用領域

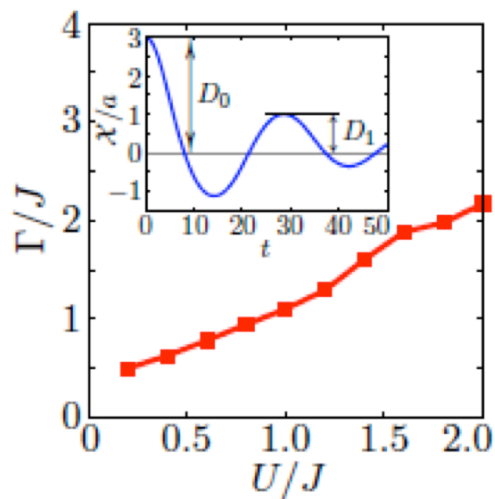
重心速度とダブロン個数



密度分布



減衰率 $\Gamma \equiv \ln(D_0/D_1)$

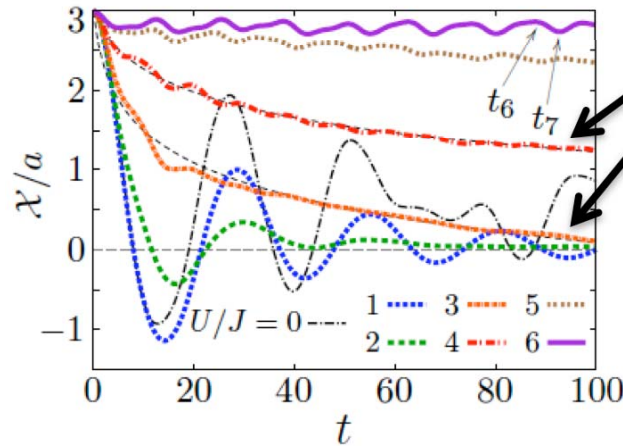


- 半周期あたりダブロンが増減が1周期
- 素早いダブロン生成と崩壊が重心運動の振動を可能にしている
- 減衰率は相互作用の強さに対して単調増加



強相互作用領域

トラジェクトリー

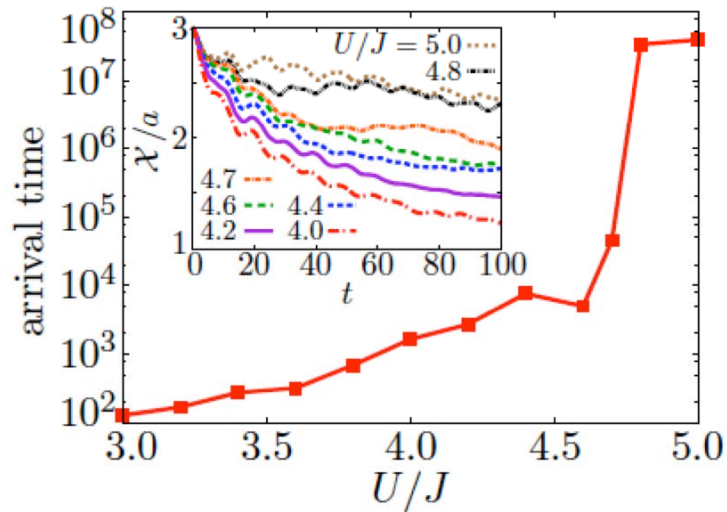


$$\bar{X}(t) = x_c - A \ln(1 + Bt)$$

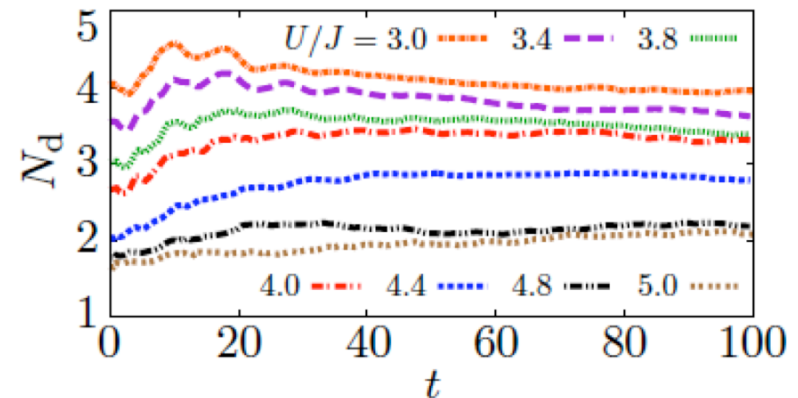
慣性抵抗: $\ddot{X} = -D\dot{X}^2$

- 非指数関数的な減衰
- “固い”モット絶縁相ができると急激に arrival time が遅くなる
- ダブロン崩壊が非常に遅い

arrival time ($\bar{X}(t) - x_c + d = 0$)

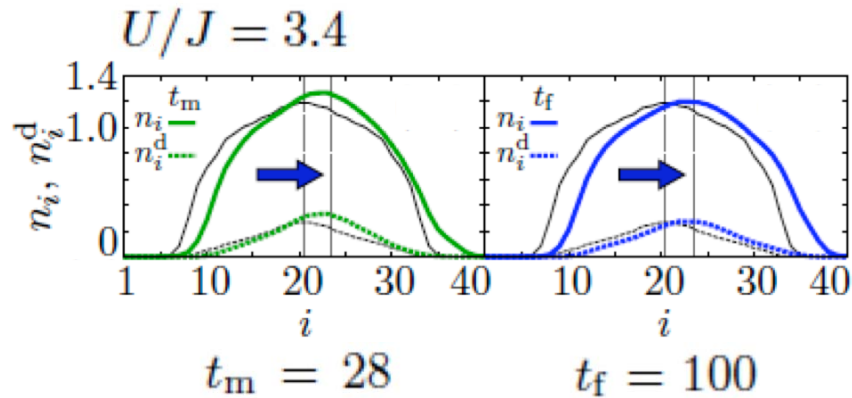


ダブロン個数

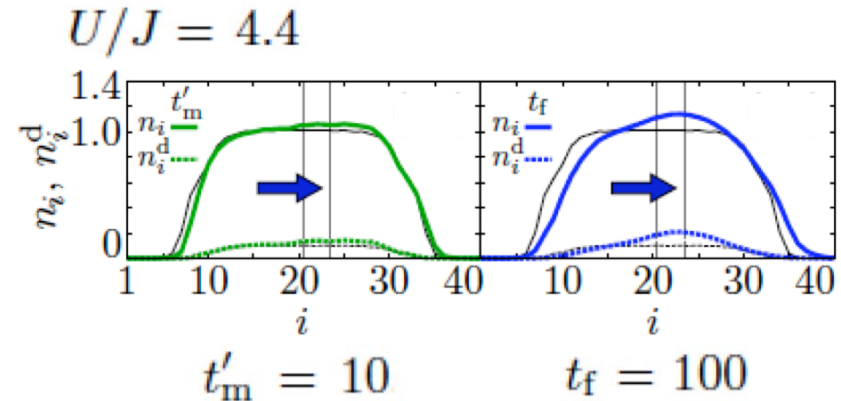


強相互作用領域

密度分布



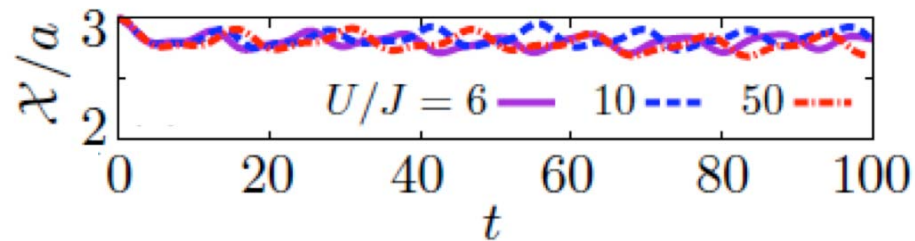
- 全体的に異動すると同時に真ん中のダブロンが増加する
- 右側のシングルフェルミオンが増加する



- モット絶縁体が壊れてダブロンが生成される
- 中心付近のダブロンが増えるとともに、左側のシングルフェルミオンが減り、右側のシングルフェルミオンが増える

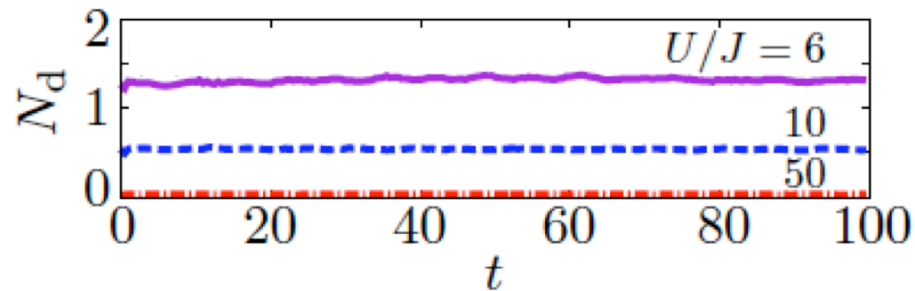
強相互作用領域(絶縁相)

トラジェクトリー



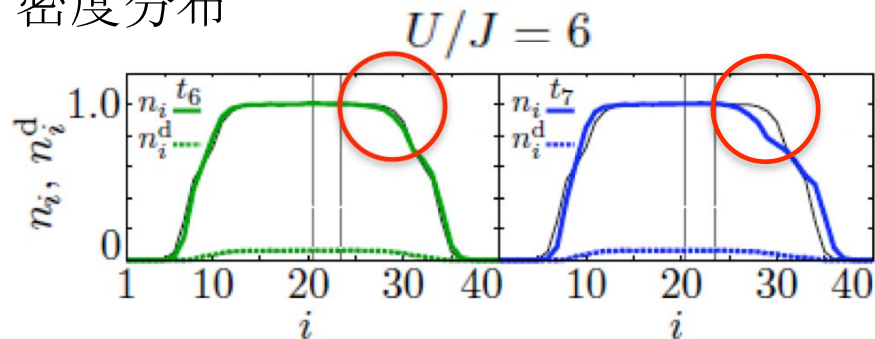
- ある程度相互作用が大きくなる($U/J > 6$)と運動はほとんど変わらない

ダブロン個数

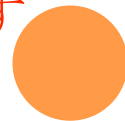


- ダブロン個数の増減はほとんどない

密度分布

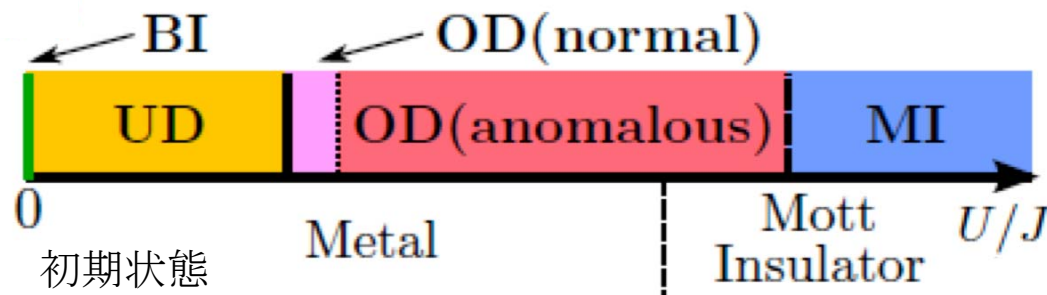


- 両側の金属相との境界付近にある絶縁相が、崩壊と再生を繰り返す



まとめ

- 弱相互作用領域 …… 通常の減衰振動
- 中間相互作用領域 …… 非指数関数的減衰 (慣性抵抗?)
- 強相互作用領域 …… 絶縁体形成の確認・絶縁相の崩壊と再生



BI: Bloch Insulator
UD: UnderDamping
OD: OverDamping
MI: Mott Insulator

今後

- 引力系
- スピンインバランス効果

