

冷却原子系における有限温度超流動体の 超流動流の減衰

京都大学基礎物理学研究所

國見 昌哉



References:

MK and I. Danshita, Phys. Rev. A **95**, 033637 (2017).

MK and I. Danshita, arXiv:1712.09403.

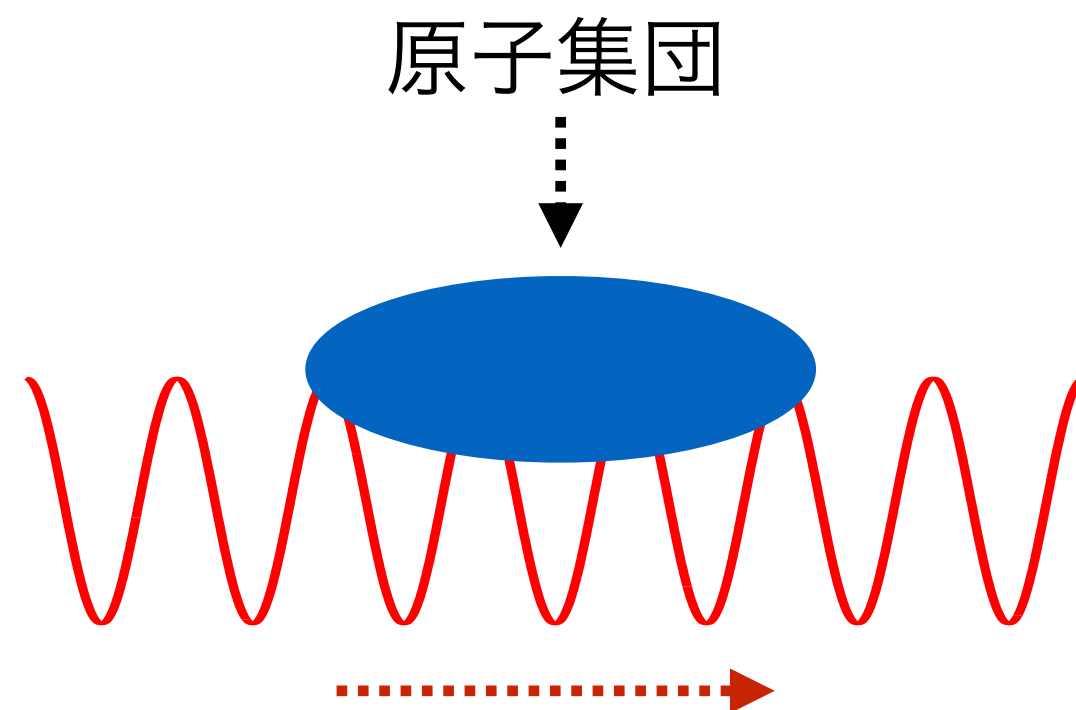
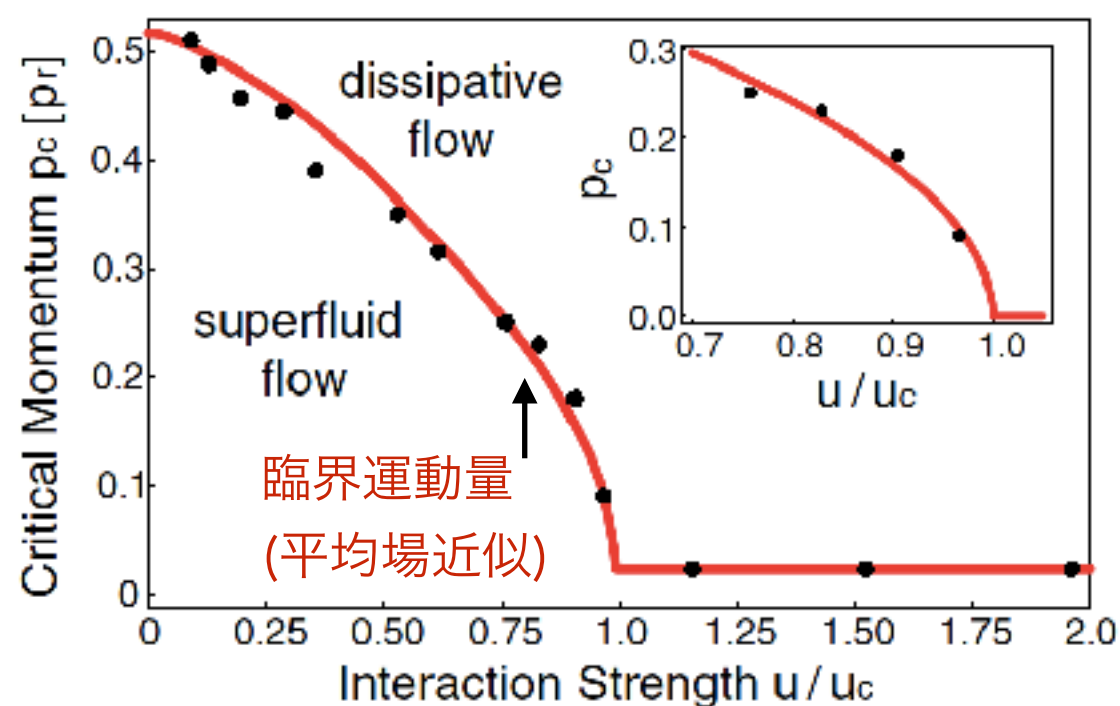
共同研究者： 段下一平 (京大基研→近畿大学)

Introduction : Superfluidity

超流動状態：散逸の無い流れが安定に存在する状態。

流れの速度が大きくなると、流れが不安定になる速度
(=**臨界速度**)が存在する。

3次元動く光格子中のBEC (MIT group)



J. Mun, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 150604 (2007).

ゆらぎが無視できる領域では、実験と理論の比較がうまくいっている。

Introduction : Phase slip

ゆらぎが無視できない領域(有限温度、低次元系)では、

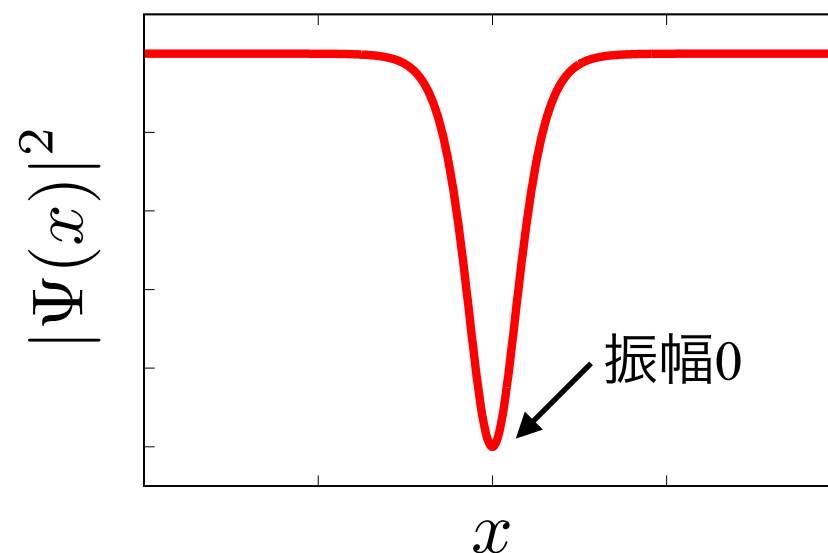
位相すべり (phase slip)が主要な減衰機構

⇒ソリトンや量子渦などの位相欠陥が生成することにより、超流動流が減衰する現象

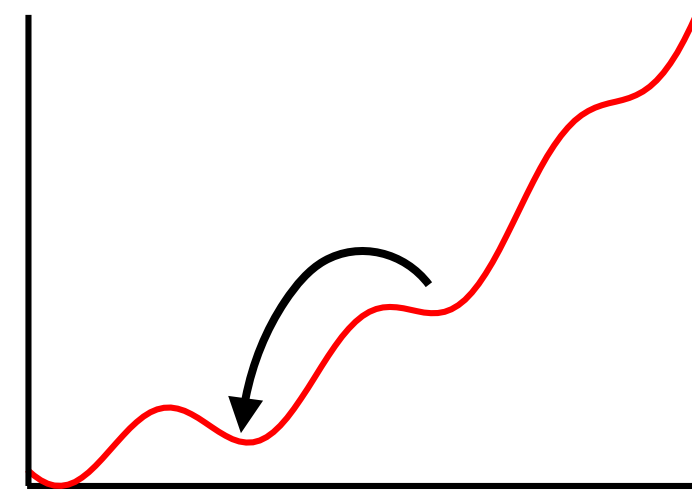
例：長さ L のリング系 波数： $k_W \equiv \frac{2\pi W}{L}$

$$\Psi_W(x) = \sqrt{n_0} e^{ik_W x} \xrightarrow{\text{減衰}} \Psi_{W-1}(x) = \sqrt{n_0} e^{ik_{W-1} x}$$

ソリトン

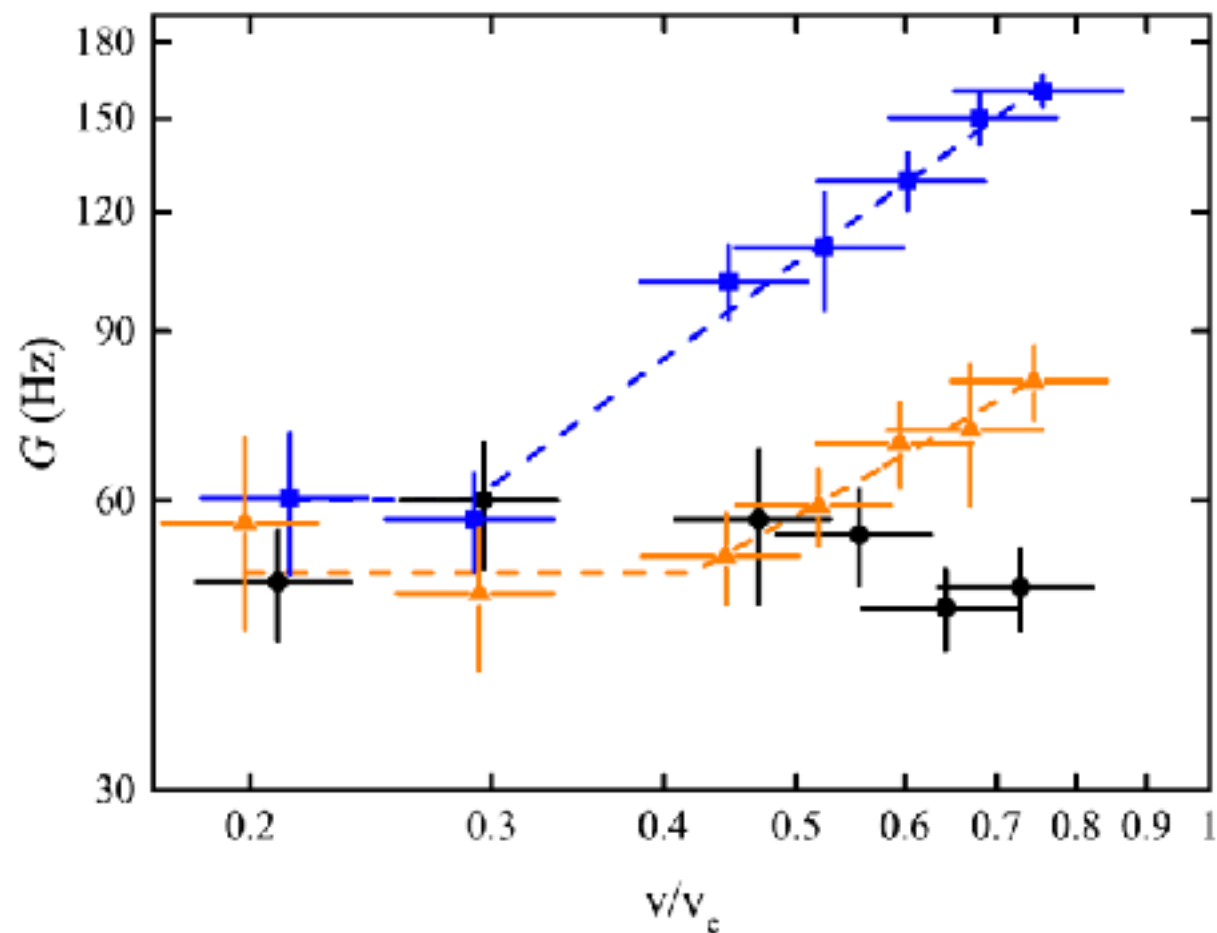


波動関数の振幅を 0
にすることで位相の
 2π の変化を許す。



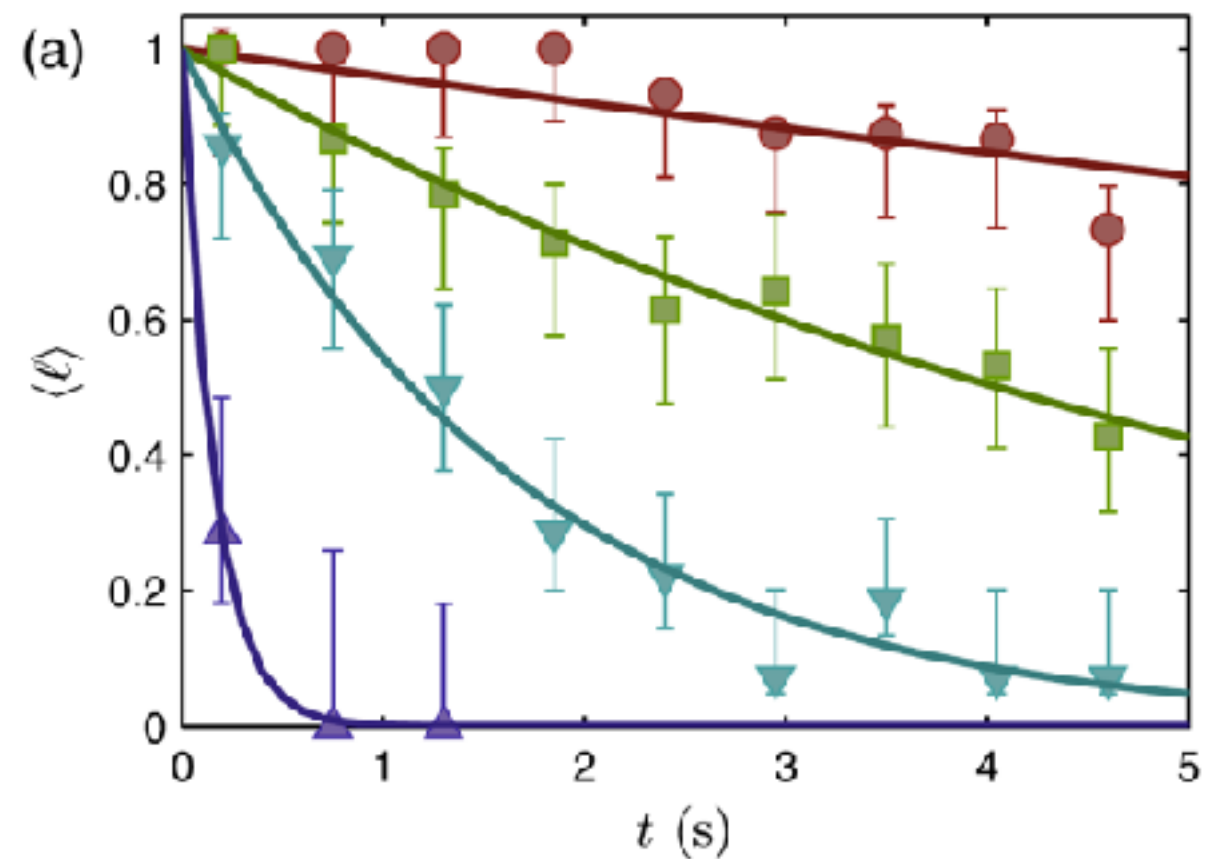
Introduction : Experiments

LENSグループの実験



L. Tanzi, *et al.*, Sci. Rep. **6**, 25965 (2016).

NISTグループの実験



Kumar *et al.*, PRA **95**, 021602(R) (2017).

両者ともに超流動流の減衰が観測された。

ただ、**減衰の起源については議論の余地がある**

Introduction : Motivation

研究目的

LENSとNISTで観測された超流動流の起源を明らかにする。

研究結果

LENS : 低速領域では熱的活性化による位相すべりが支配的

MK and I. Danshita, Phys. Rev. A **95**, 033637 (2017).

NIST : 有限温度効果と3体ロス誘起の超流動流の減衰を提案

MK and I. Danshita, arXiv:1712.09403.

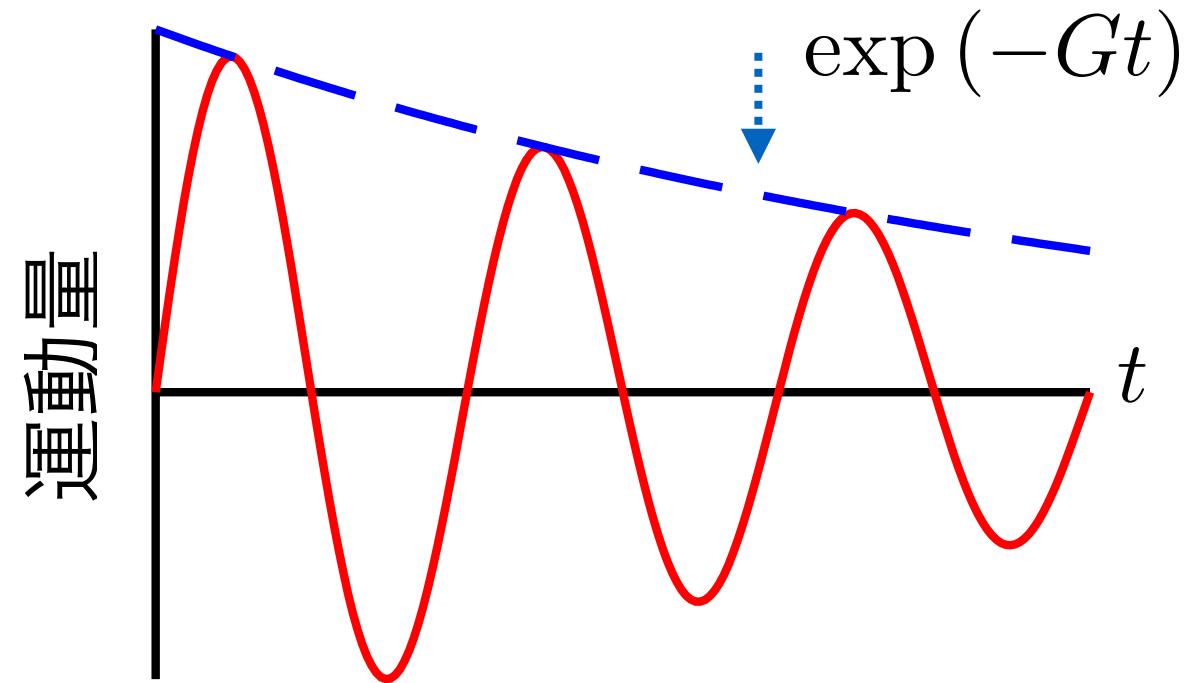
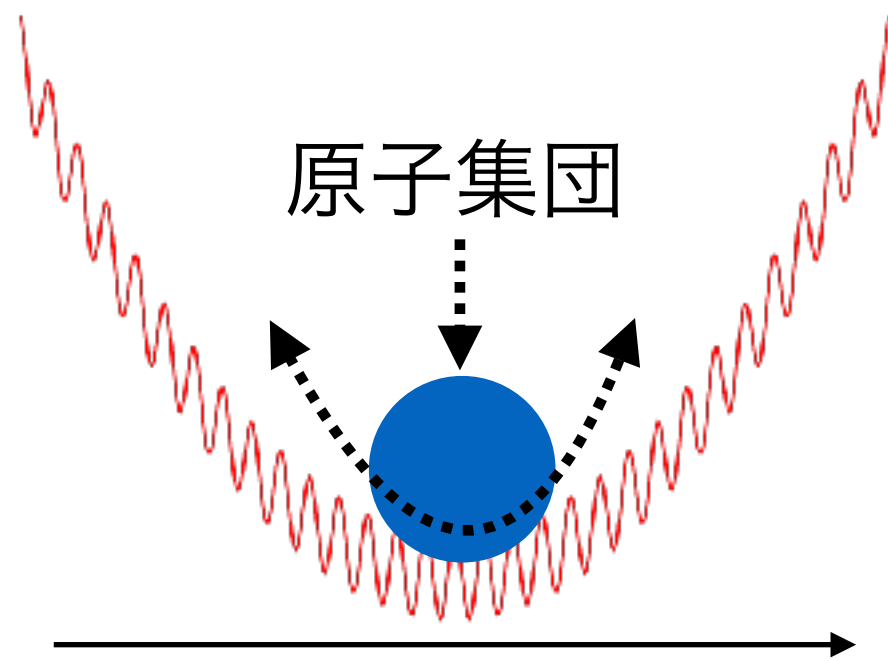
1 次元光格子中の熱的活性化による位相すべり (LENSグループの実験の解析)

MK and I. Danshita, Phys. Rev. A **95**, 033637 (2017).

リングトラップ中の超流動流の減衰 (NISTグループの実験の解析)

MK and I. Danshita, arXiv:1712.09403.

LENS experiment : 1D optical lattice



調和ポテンシャル+1次元光格子に ^{39}K (Boson) を50個程度閉じ込め
調和ポテンシャルを動かし、二重極振動を誘起
二重極振動の減衰率 G を実験的に観測

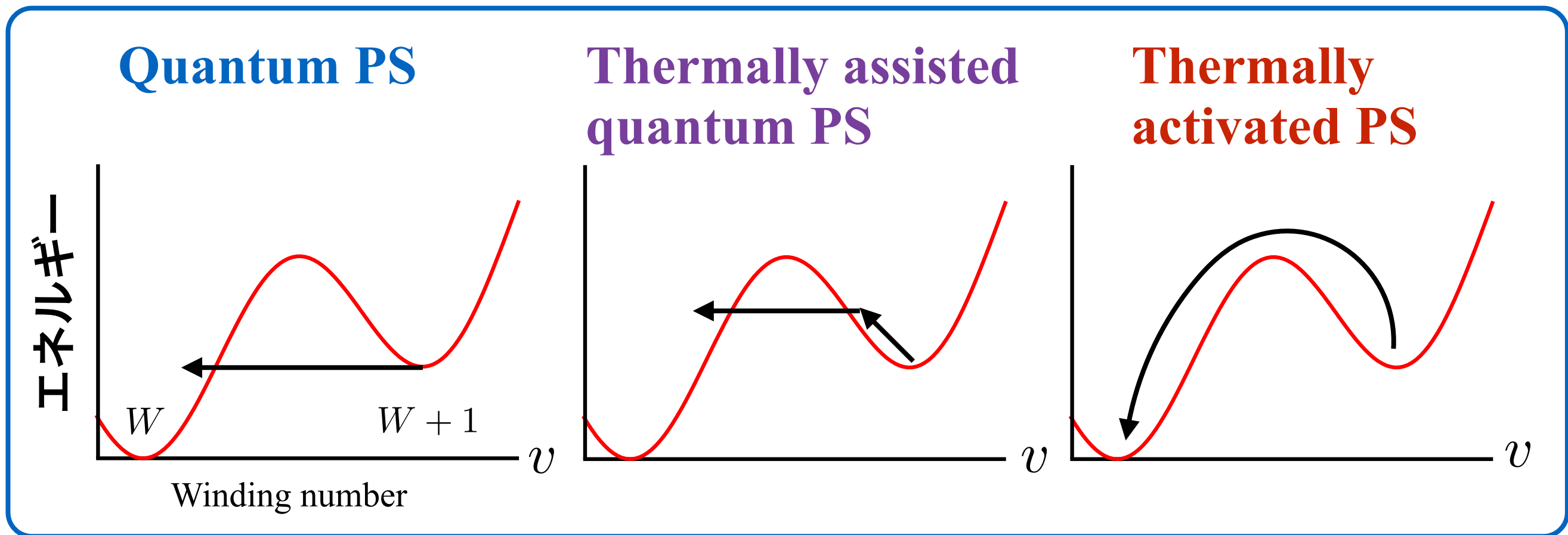
減衰率と生成率の関係式 $G(v) \sim \Gamma(v)/v$ Γ : 位相すべりの生成率

⇒二重極振動から超流動の減衰の情報が得られる

ID, Phys. Rev. Lett. **111**, 025303 (2013).

Phase slips : quantum and thermal

Phase slip (PS) はゆらぎの効き方により3種類存在する。

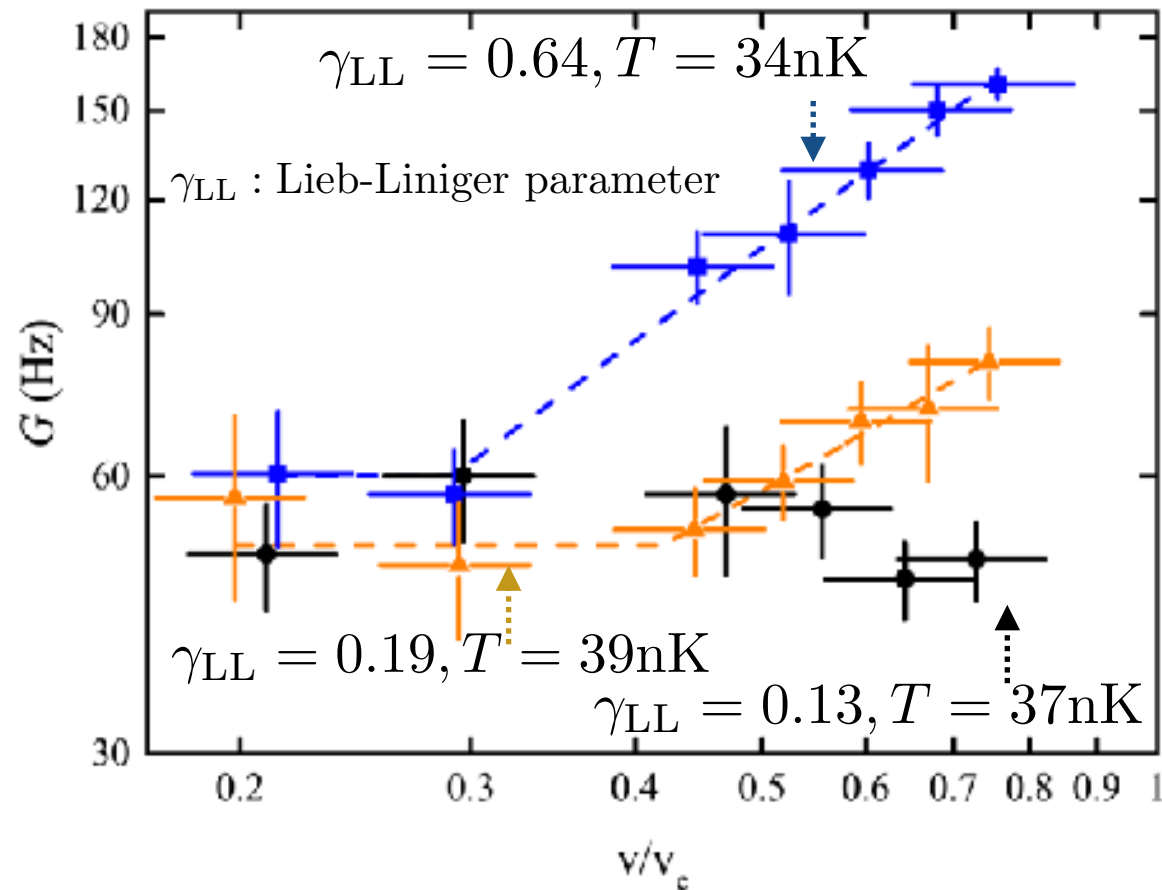


位相すべりの生成率 (単位時間当たりのPSの発生率)

$$\Gamma_{\text{QPS}} \sim v^{2K-1} \quad \Gamma_{\text{TAQPS}} \sim vT^{2K-2} \quad \Gamma_{\text{TAPS}} \sim e^{-E_B/(k_B T)}$$

Y. Kagan *et al.*, Phys. Rev. A **61**, 045601 (2000). H. P. Büchler, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 100403 (2001).

LENS experiment : 1D optical lattice



低速領域 : $G \sim \text{const}$

$\Rightarrow$ **Thermally assisted quantum PS**

高速領域 : $G \sim v^\alpha$

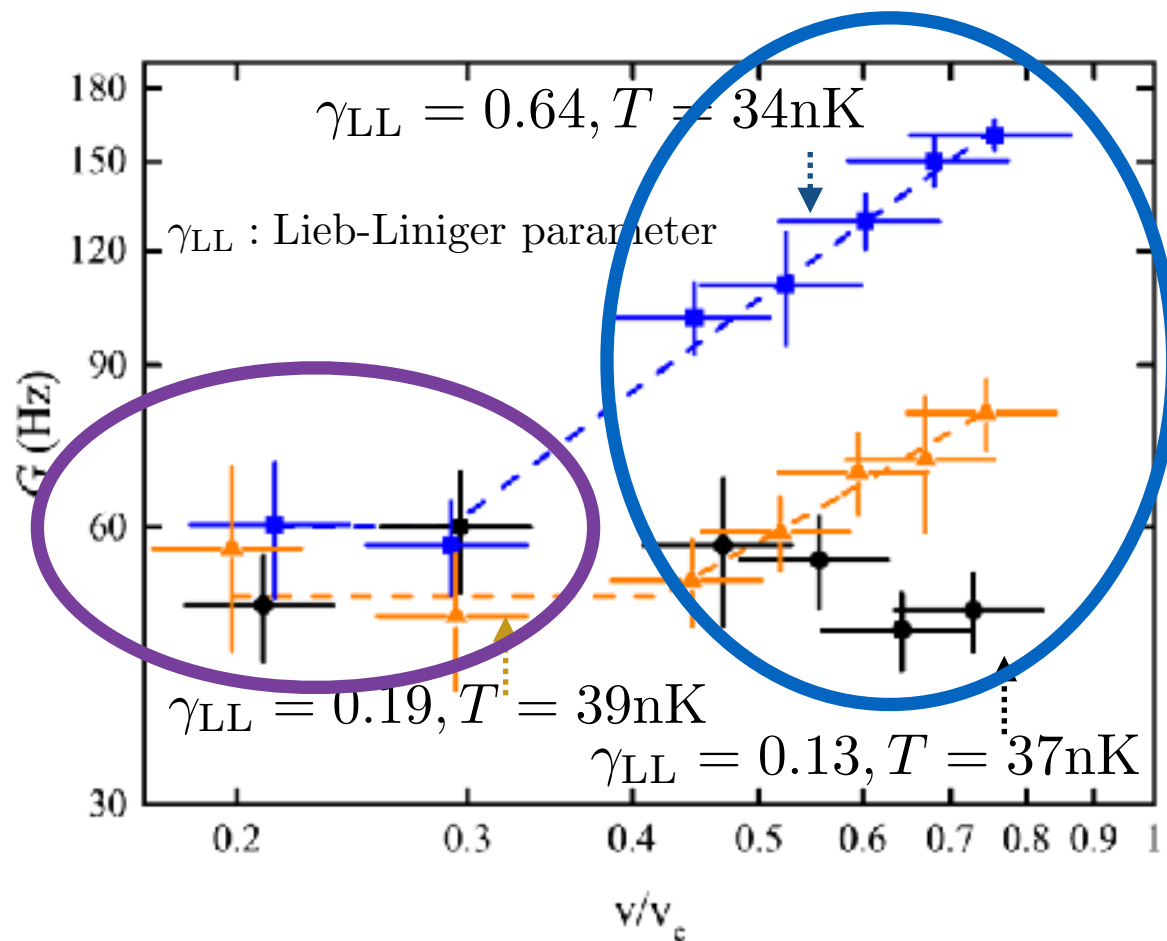
$\Rightarrow$ **Quantum PS**

L. Tanzi, *et al.*, Sci. Rep. **6**, 25965 (2016).

問題点

定性的には良いが、定量的にどうか？ べきの値の理論とのずれ
熱的活性化による位相すべりが考えられていない。

LENS experiment : 1D optical lattice



低速領域 : $G \sim \text{const}$

$\Rightarrow$ **Thermally assisted quantum PS**

高速領域 : $G \sim v^\alpha$

$\Rightarrow$ **Quantum PS**

L. Tanzi, *et al.*, Sci. Rep. **6**, 25965 (2016).

問題点

定性的には良いが、定量的にどうか？ べきの値の理論とのずれ
熱的活性化による位相すべりが考えられていない。

Method : Kramers formula + LDA

熱的活性化による位相すべりの生成率をKramers公式を用いて計算

Kramers公式

$$\Gamma_{\pm} \equiv N_{\text{Lat}} \frac{|\text{Im}(\epsilon^{\text{DI}}/\hbar)|}{2\pi} \prod_n \sqrt{\frac{\lambda_n^{(\text{m})}}{|\lambda_n^{(\text{u}\pm)}|}} e^{-\beta E_{\text{B}}^{\pm}}$$

J. S. Langer, Ann. Phys.
54, 258 (1969).

Kramers公式の計算に必要な物理量はGross-Pitaevskii方程式から得られる。

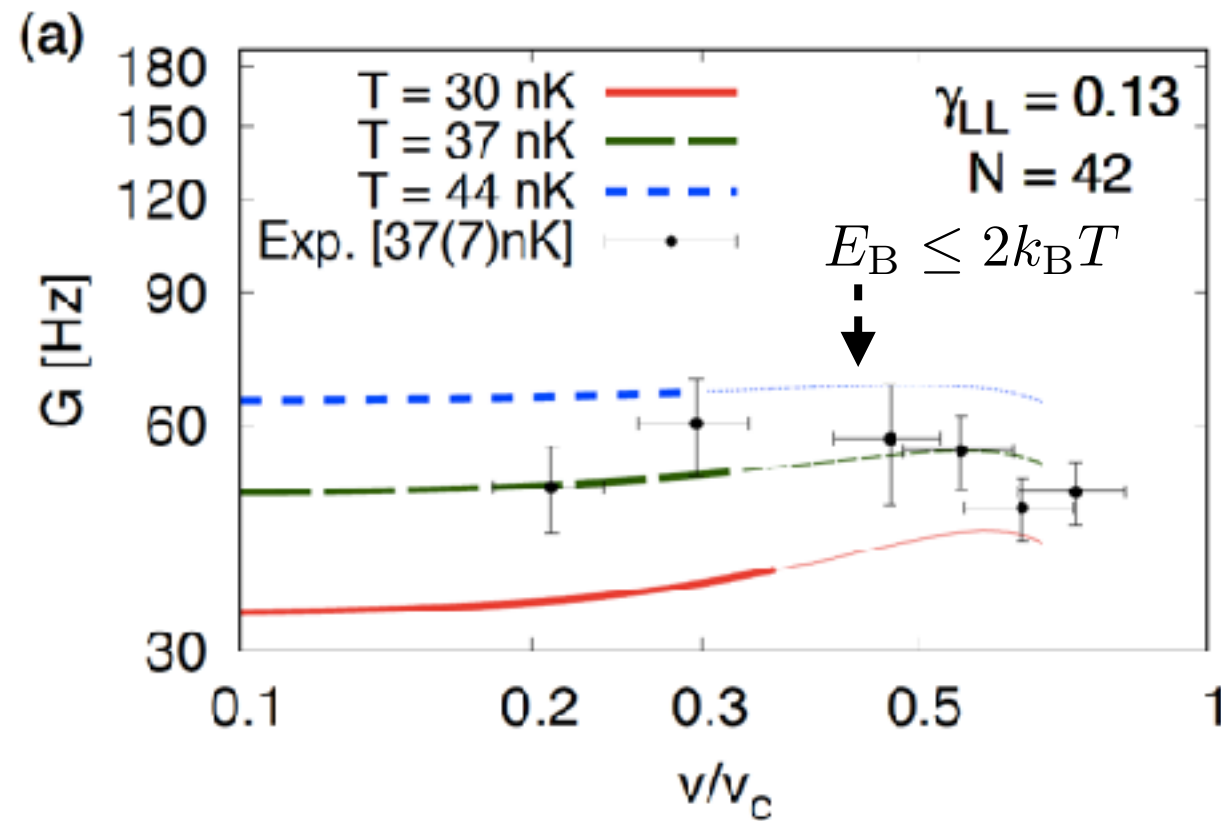
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + E_{\text{R}} \cos^2 \left(\frac{\pi x}{d} \right) + g_{1\text{D}} |\Psi(x, t)|^2 \right] \Psi(x, t)$$

トラップポテンシャルの効果はLDAで取り込む。

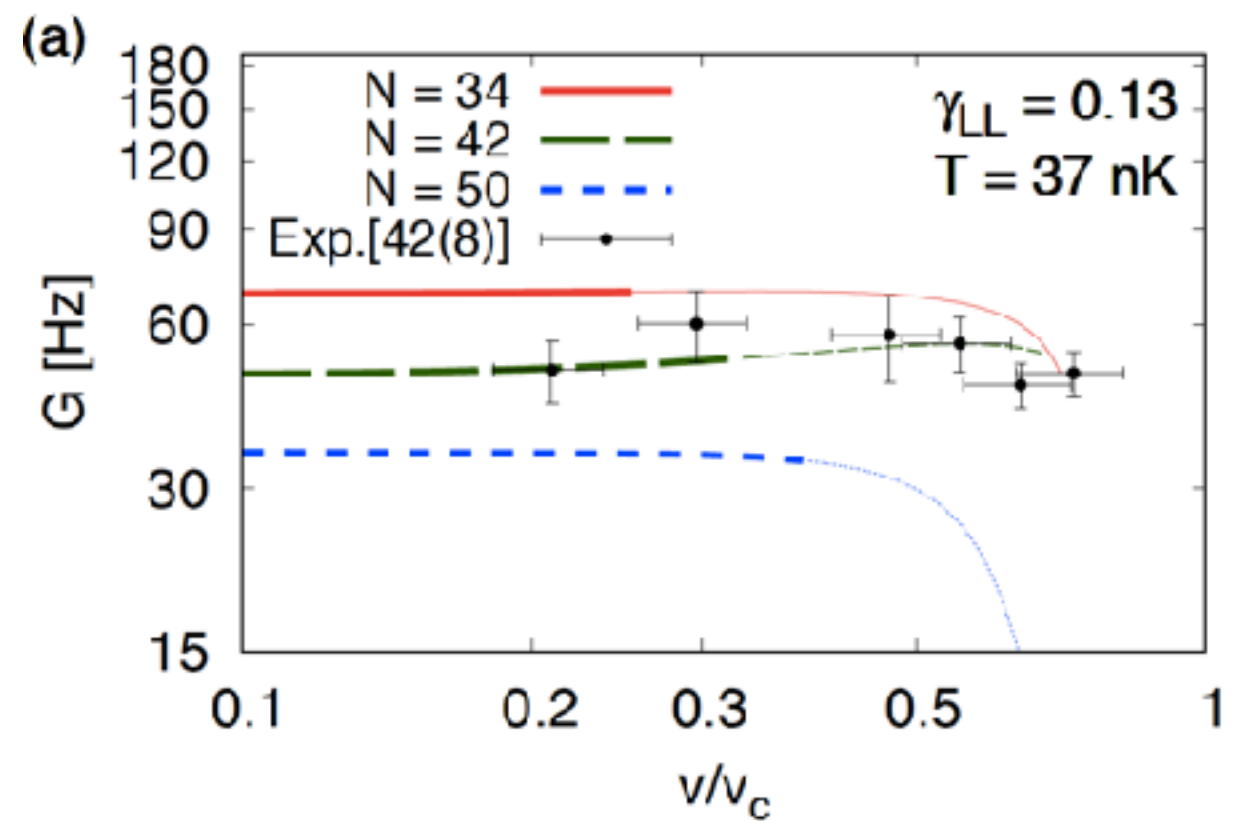
⇒ 二重極振動の減衰率Gを計算し、実験と比較。

詳細はMK and I. Danshita, Phys. Rev. A **95**, 033637 (2017).

Results : Velocity Dependence of G $\gamma_{LL} = 0.13$



粒子数を固定



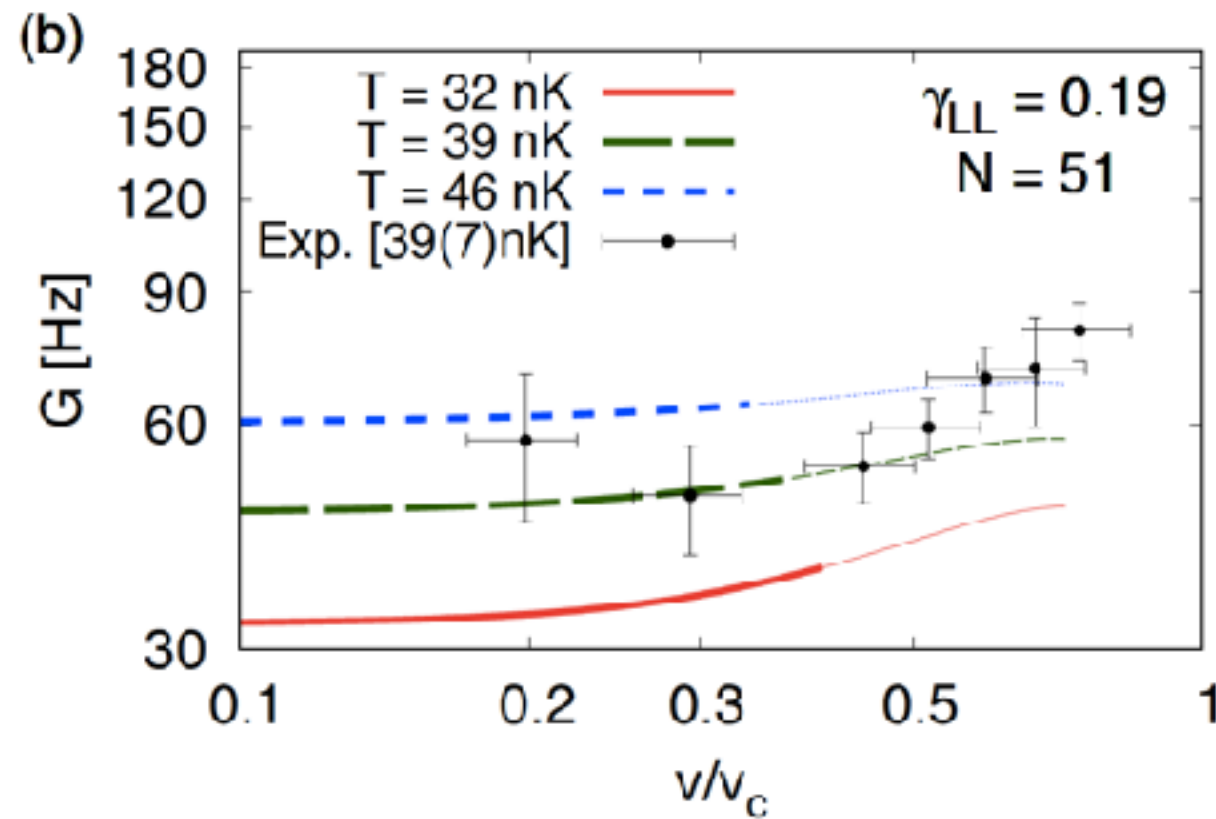
温度を固定

実験との良い一致が見られる。

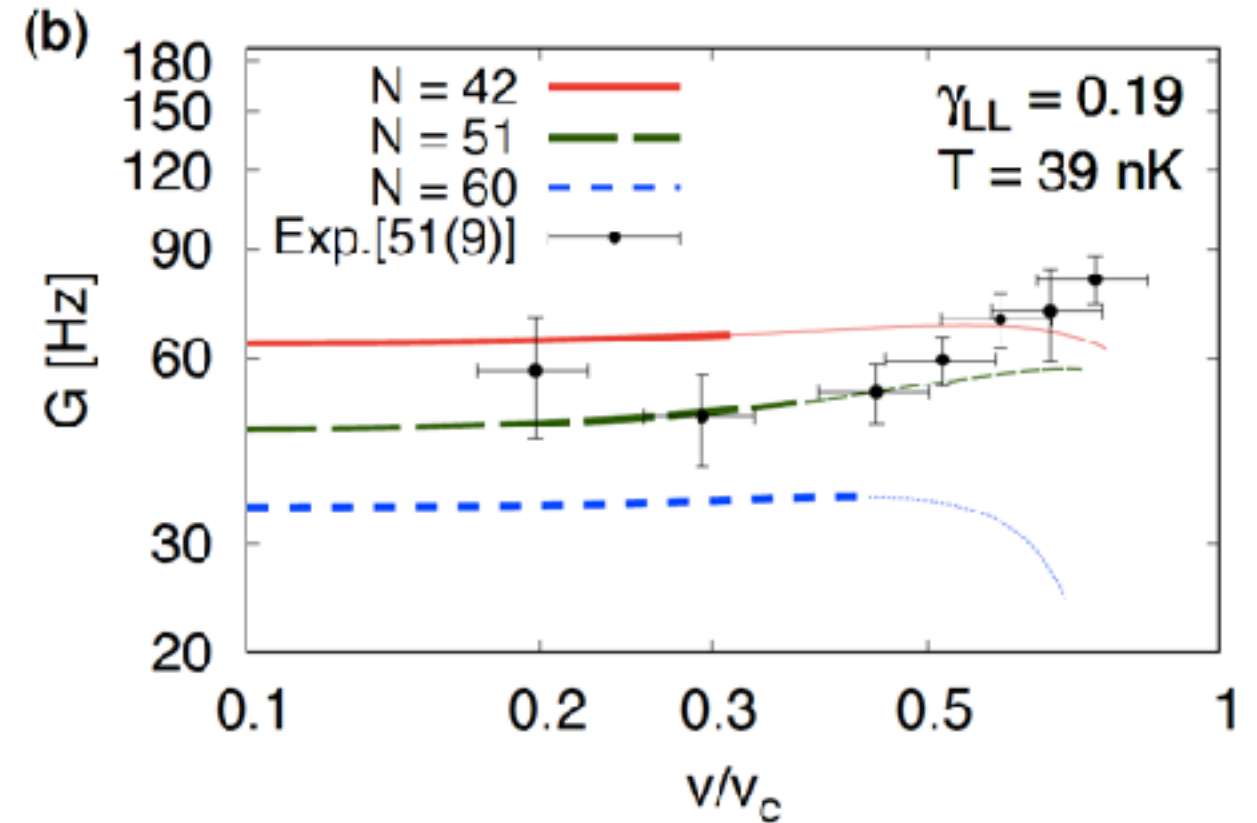
理論で計算したはThermally activated phase slipの寄与。

実験で見えたのはQuantumではなく、**Thermal**を示唆。

Results : Velocity Dependence of G $\gamma_{LL} = 0.19$



粒子数を固定



温度を固定

別のパラメータでも実験との良い一致が見られる。

結論：低速領域では熱的活性化による位相すべりが支配的
高速領域はopen problem

1 次元光格子中の熱的活性化による位相すべり (LENSグループの実験の解析)

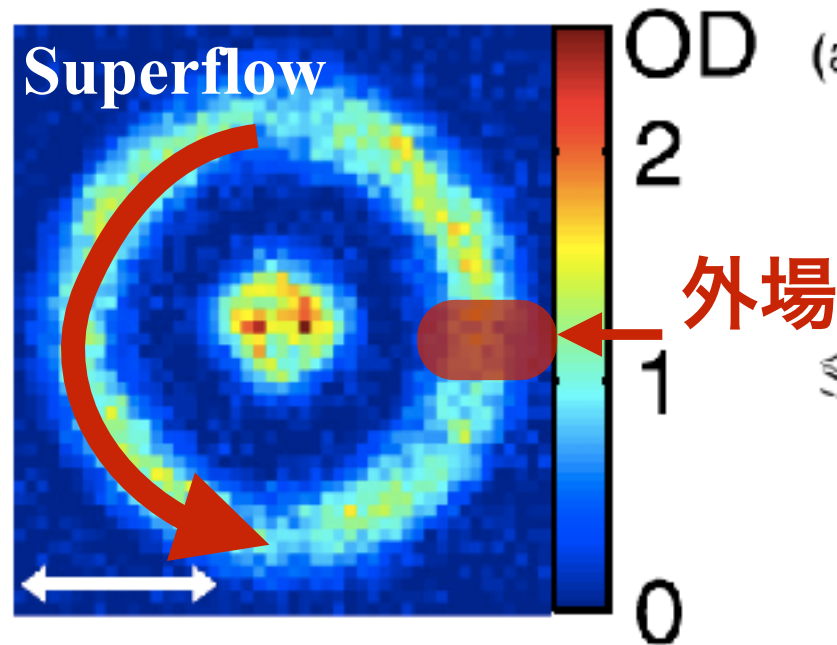
MK and I. Danshita, Phys. Rev. A **95**, 033637 (2017).

リングトラップ中の超流動流の減衰 (NISTグループの実験の解析)

MK and I. Danshita, arXiv:1712.09403.

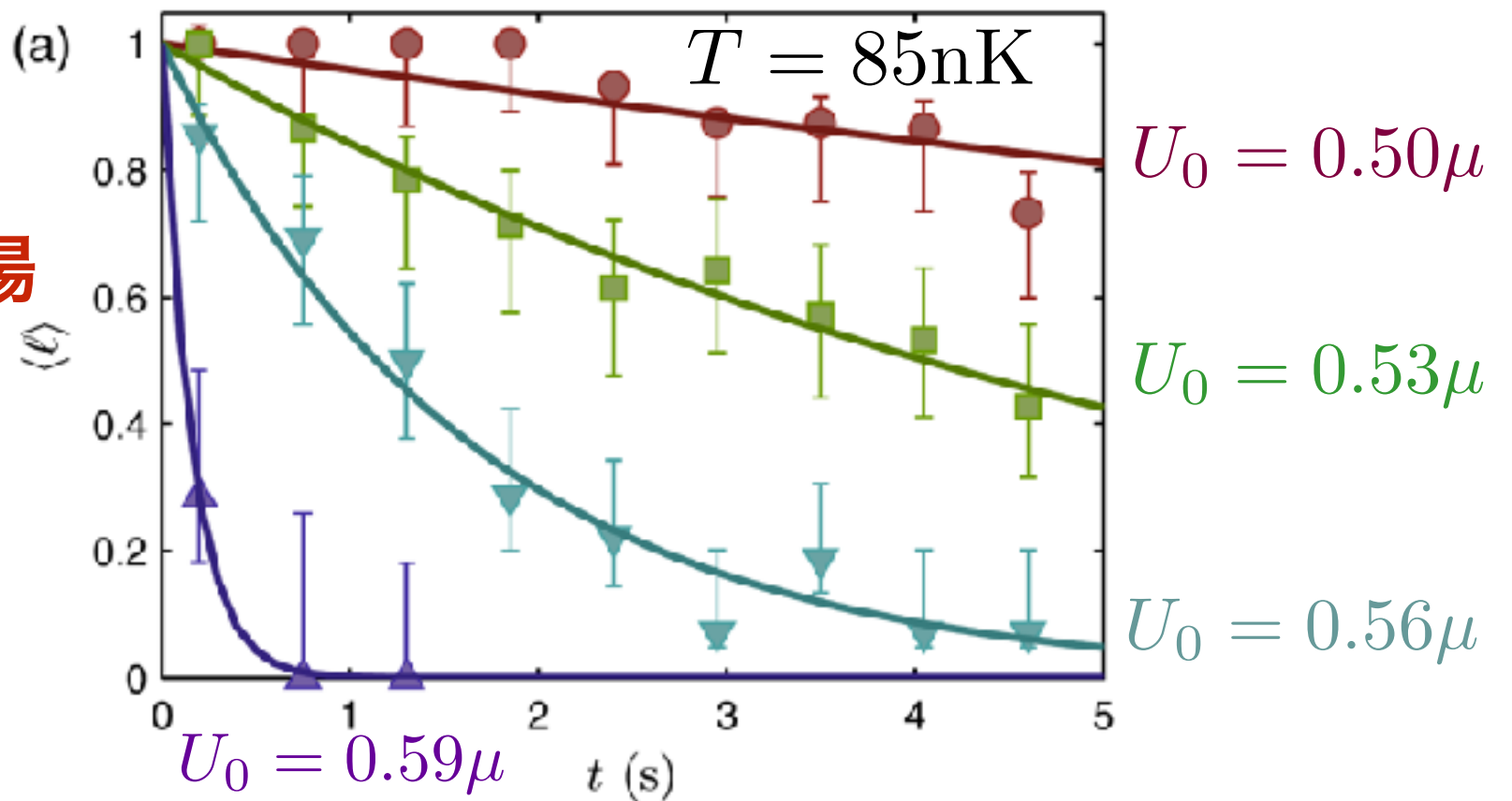
NIST experiments (Kumar *et al.*, 2017)

リングトラップ中BECの密度



U_0 : ポテンシャルの強さ

角運動量の時間発展

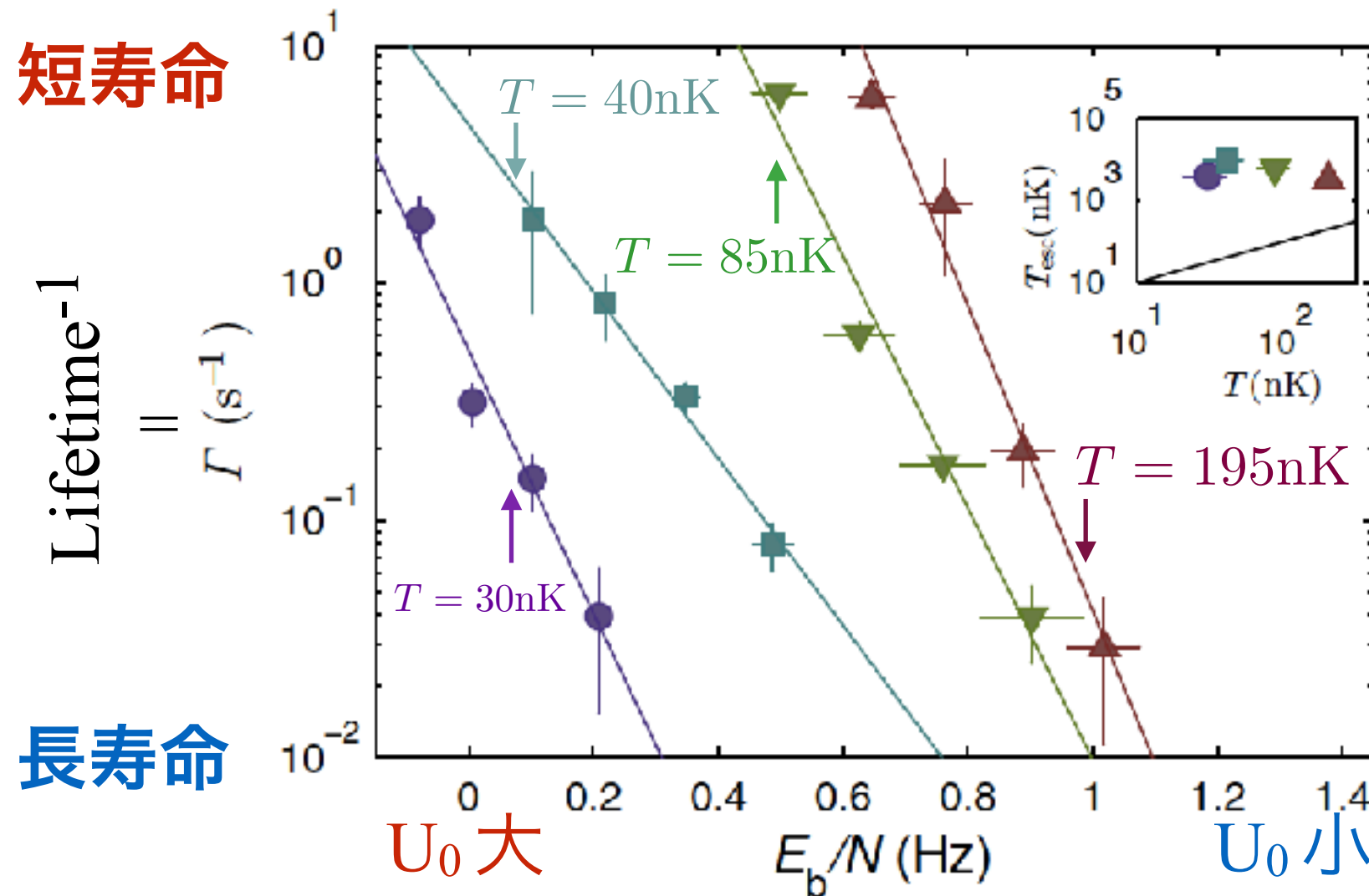


リング型のトラップにBECを閉じ込め、winding number 1の状態を用意。その後の角運動量の変化を観測。

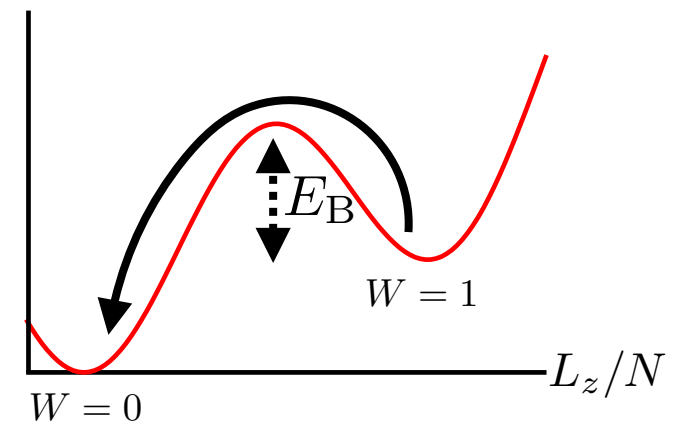
おおよそ、**1秒のオーダーで流れが減衰。**

Kumar *et al.*, PRA **95**, 021602(R) (2017).

NIST experiment : Decay rate of superflow



$$E_B = E_B(U_0)$$



Kumar *et al.*, PRA **95**,
021602(R) (2017).

寿命が温度とポテンシャルの強さに依存。

⇒ 熱的活性化による位相すべりと、思いたくなるがこれは否定されている。アレニウス則へのフィットが失敗している。

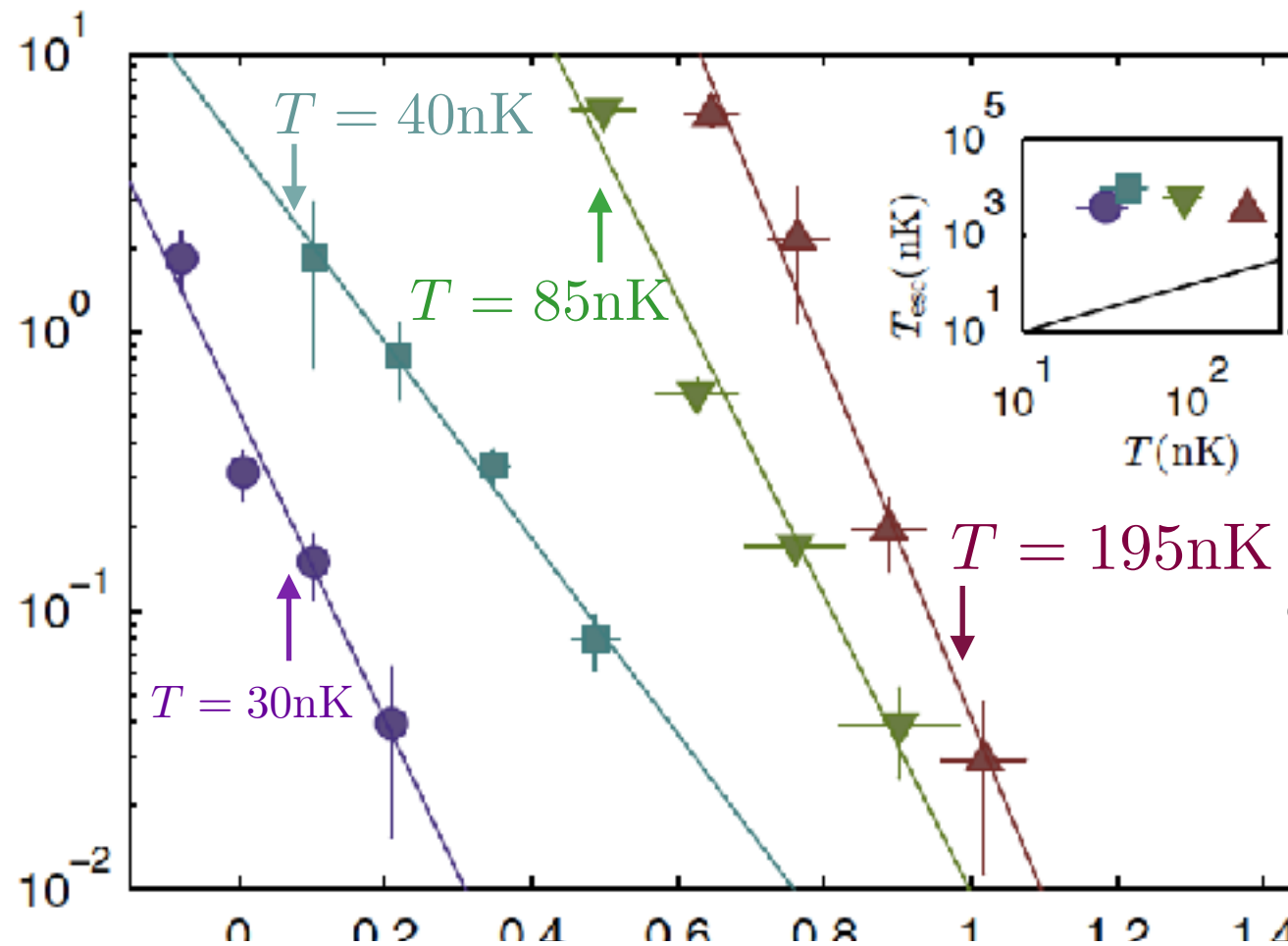
NIST experiment : Decay rate of superflow

短寿命

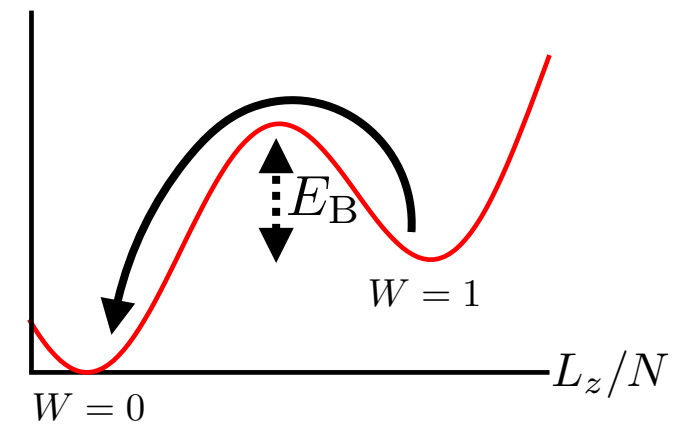
Lifetime⁻¹

Γ (s⁻¹)

長寿命



$$E_B = E_B(U_0)$$



問題：では減衰の起源はなにか？^{15,}

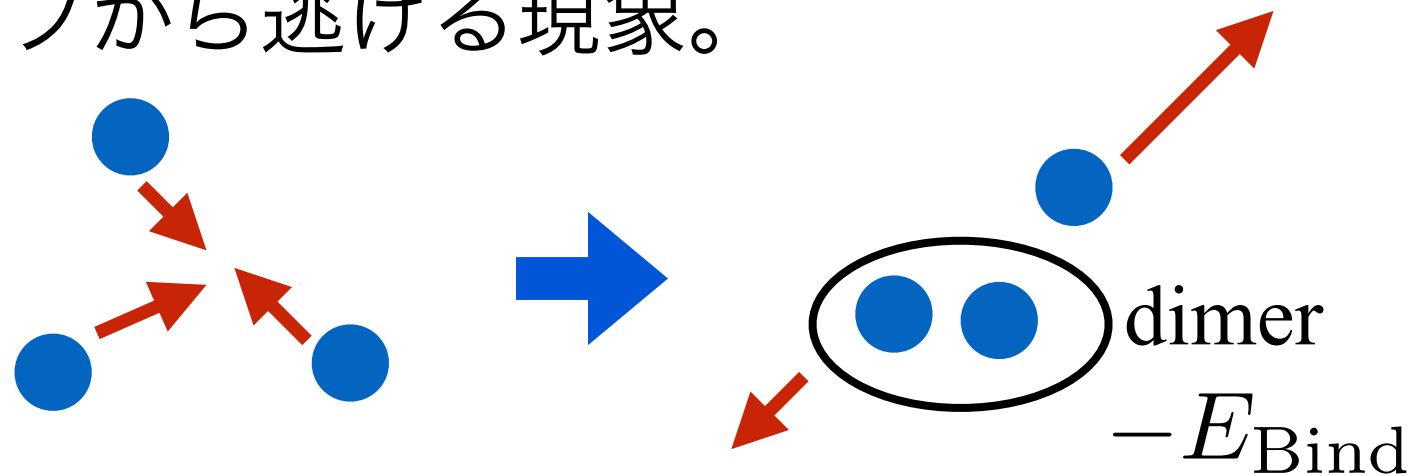
寿命が温度とポテンシャルの強さに依存。

⇒ 熱的活性化による位相すべりと、思いたくなるがこれは否定されている。アレニウス則へのフィットが失敗している。

Three-body loss induced superflow decay

3体ロス：3原子による非弾性散乱

3つの原子のうち2個がdimerを組むことで、運動エネルギーを獲得し、トラップから逃げる現象。



エネルギーバリアーは粒子数の関数

⇒ 粒子数が減ると、エネルギーバリアーがいつか消滅し、減衰が起き得る。

⇒ このシナリオの検証が必要。

Numerical simulation with three-body loss term

Simulation : Gross-Pitaevskii方程式 + 3体ロス項

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(\mathbf{r}) + g_{2D} |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 \right] \Psi(\mathbf{r}, t) - \frac{i\hbar}{2} L'_3 |\Psi(\mathbf{r}, t)|^4 \Psi(\mathbf{r}, t)$$

$$L'_3 = \frac{L_3}{\sqrt{3}\pi a_z^2} \quad L_3 = 1.1 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s} \quad : \text{three-body loss rate}$$

Stamper-Kurn *et al.*, PRL. **80**, 2027 (1998).
Kagan *et al.*, PRL **81**, 933 (1998).

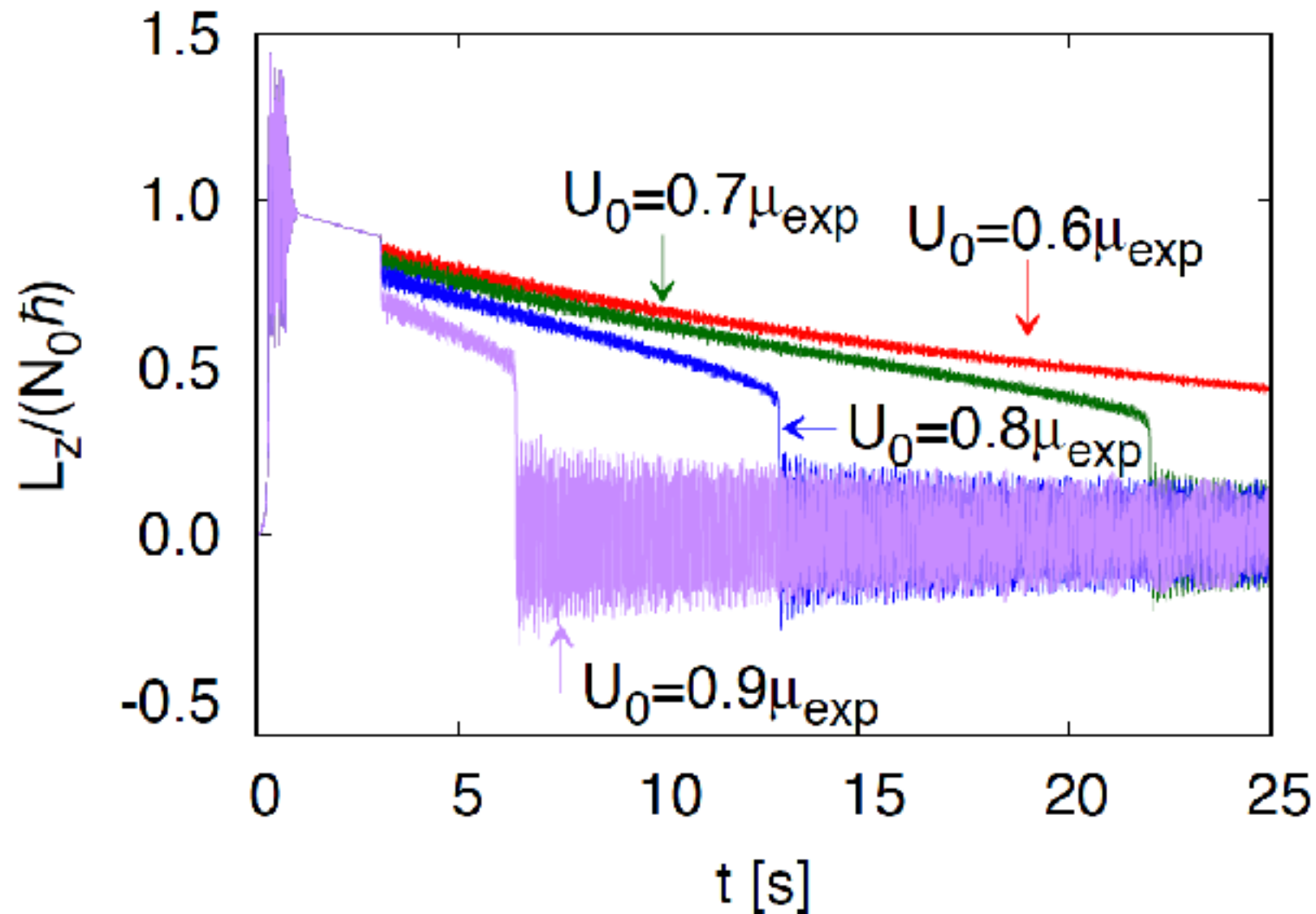
連続の方程式 :

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\mathbf{r}, t) + \nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = -L_3 n(\mathbf{r}, t)^3$$

粒子数保存を破る項

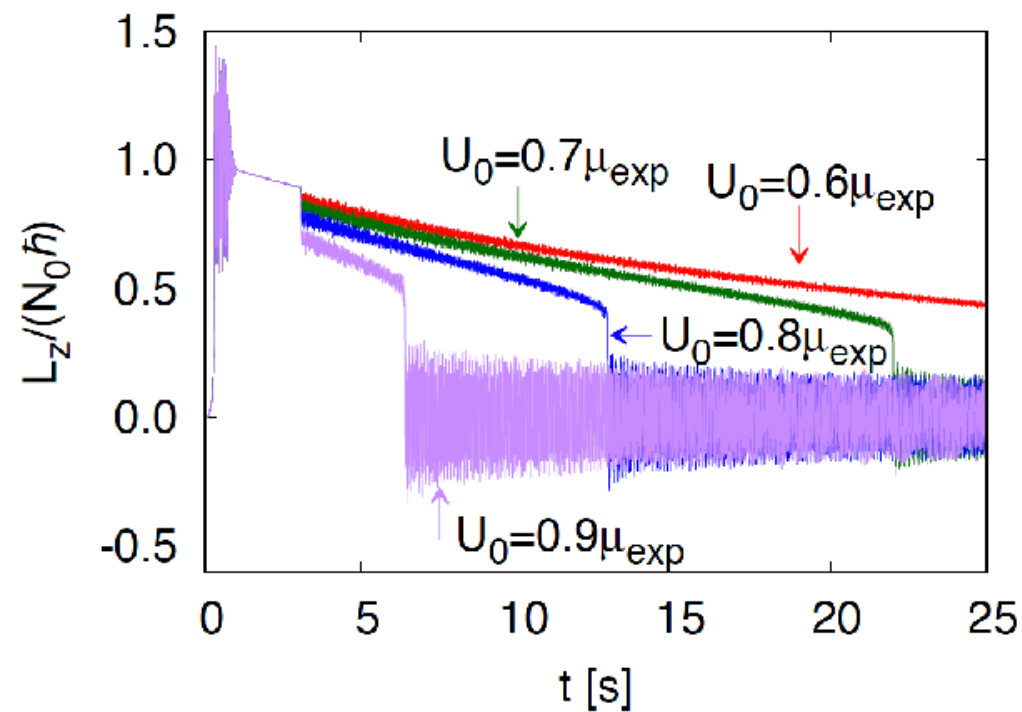
Results : three-body loss induced decay

3体ロス項を有するGP方程式の数値計算(T=0)



3体ロスにより減衰することを確認めた。
実験を定量的に説明できるか？

Results : Comparison with experiments



理論計算の結果 $U_0 = 0.6884\mu_{\text{exp}}$

$$T_{\text{decay}} \sim 23.3\text{s}$$

実験結果

$$T_{\text{decay}} \sim 6.7\text{s}$$

実験で観測された寿命は理論計算のおよそ3.5倍。

ただ、理論には有限温度効果が入っていない。

有限温度効果は、減衰を加速させるはず。

提案：有限温度効果と3体ロスの組み合わせで減衰が起きているのではないか。

Summary

- LENSとNISTの実験の解析を行った。
- LENSの実験では**低速領域では熱的活性化による位相すべりが支配的**であることを示した。
- NIST実験の減衰の起源として**有限温度効果と3体ロスの合わせた効果**を提案した。

