

「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」 キックオフシンポジウム

冷却原子量子シミュレーションで探る量子クラスターの基礎科学  
:C02班「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」の紹介

堀越宗一

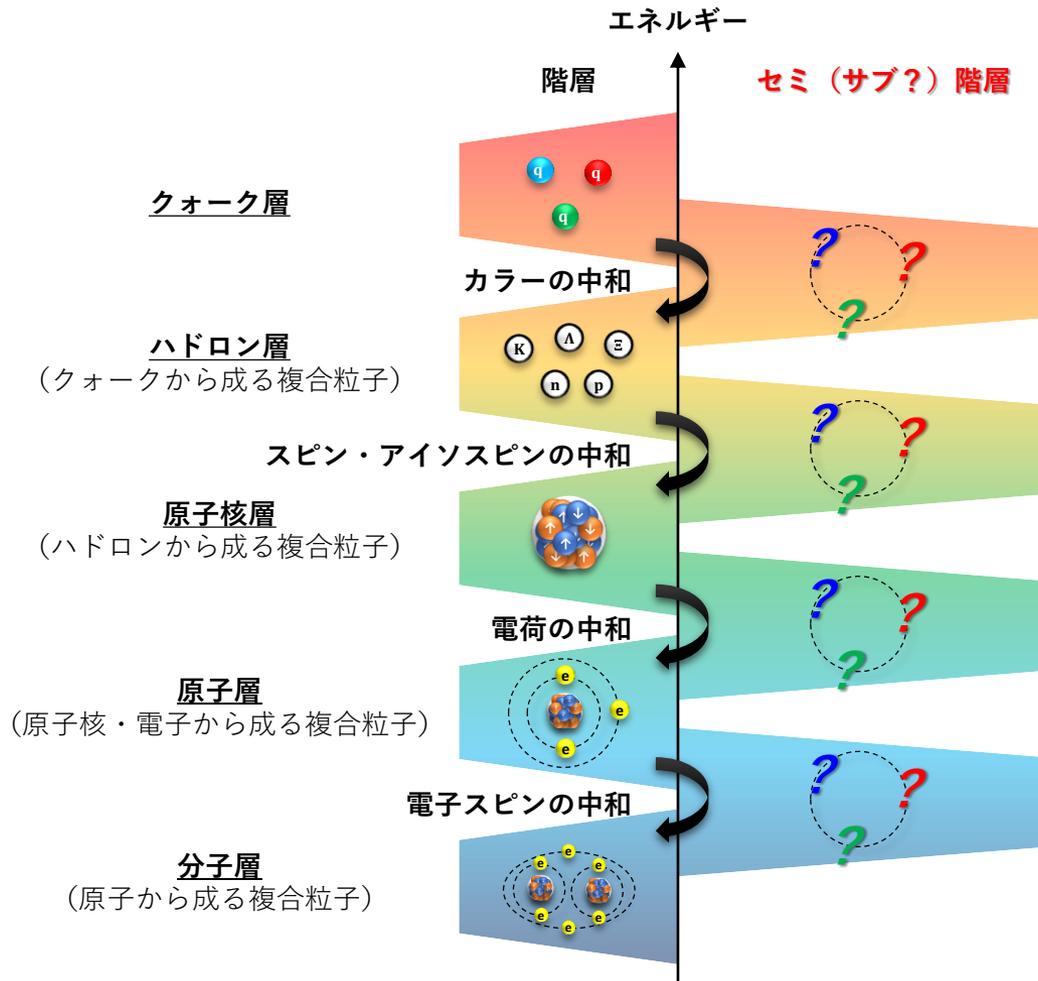
東京大学理学系研究科フotonサイエンス研究機構

2018年11月19,20日 東工大

# C02班の位置付け

## 学術的な「3つの問い」

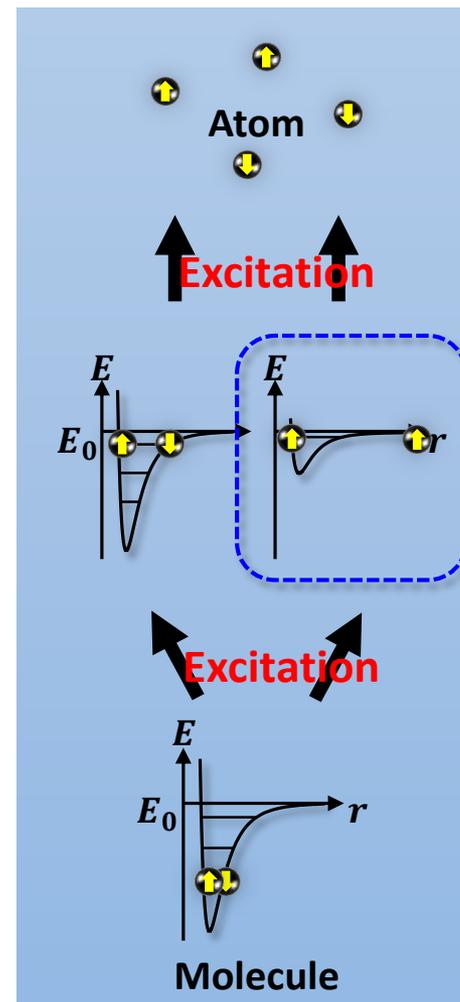
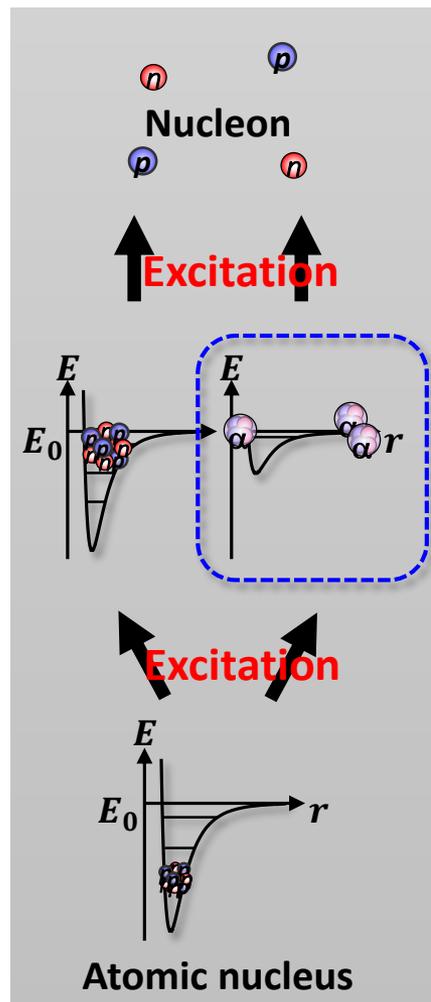
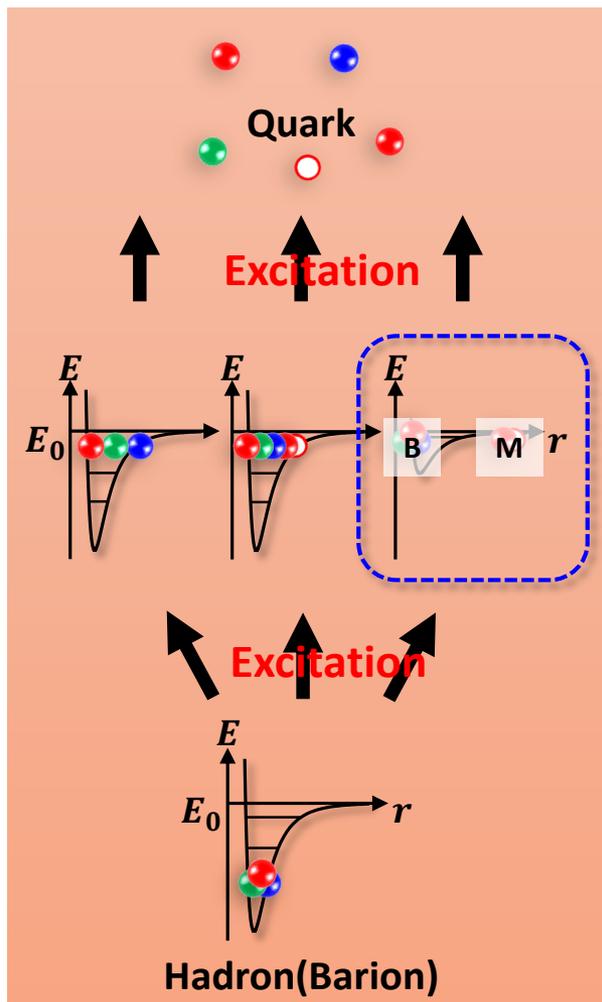
1. 量子クラスター形成過程の普遍的物理法則
2. 構成粒子の持つ自由度の消失(中和)過程
3. 粒子階層間の分離度



# C02班の位置付け

## 学術的な「3つの問い」

1. 量子クラスター形成過程の普遍的物理法則
2. 構成粒子の持つ自由度の消失(中和)過程
3. 粒子階層間の分離度



# C02班の位置付け

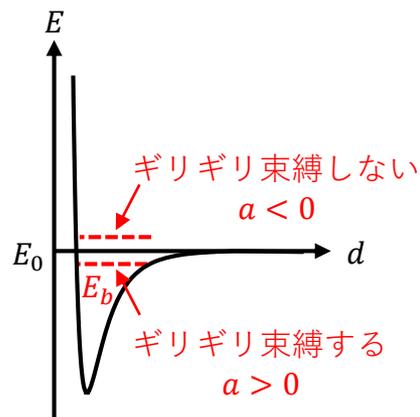
## 学術的な「3つの問い」

1. 量子クラスター形成過程の普遍的物理法則
2. 構成粒子の持つ自由度の消失(中和)過程
3. 粒子階層間の分離度

### Shape resonance

$$E_0 \sim E_b$$

- n-p
- n-n

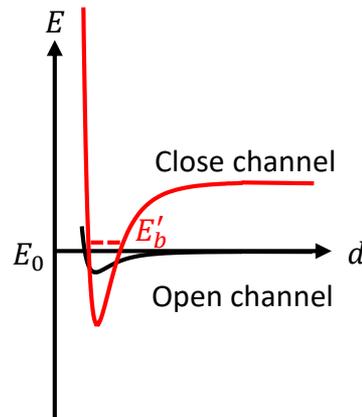


自分の散乱ポテンシャルの束縛状態との共鳴散乱

### Feshbach resonance Two channel model

$$E_0 \sim E'_b$$

- cold atoms
- $\Lambda(1405)$

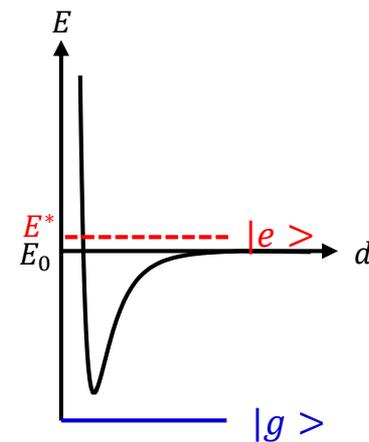


異なる散乱ポテンシャルの束縛状態との共鳴散乱

### Ikeda threshold rule

$$E_0 \sim E^*$$

- $\alpha$ 粒子-Hoyle状態

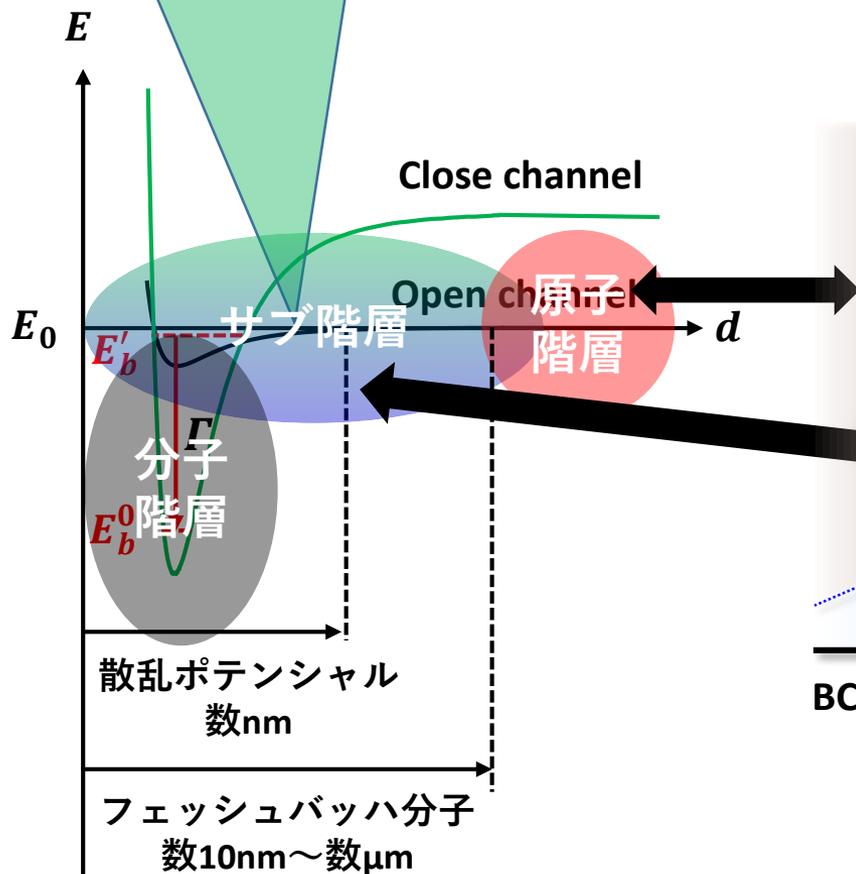


複合粒子の励起状態との共鳴散乱

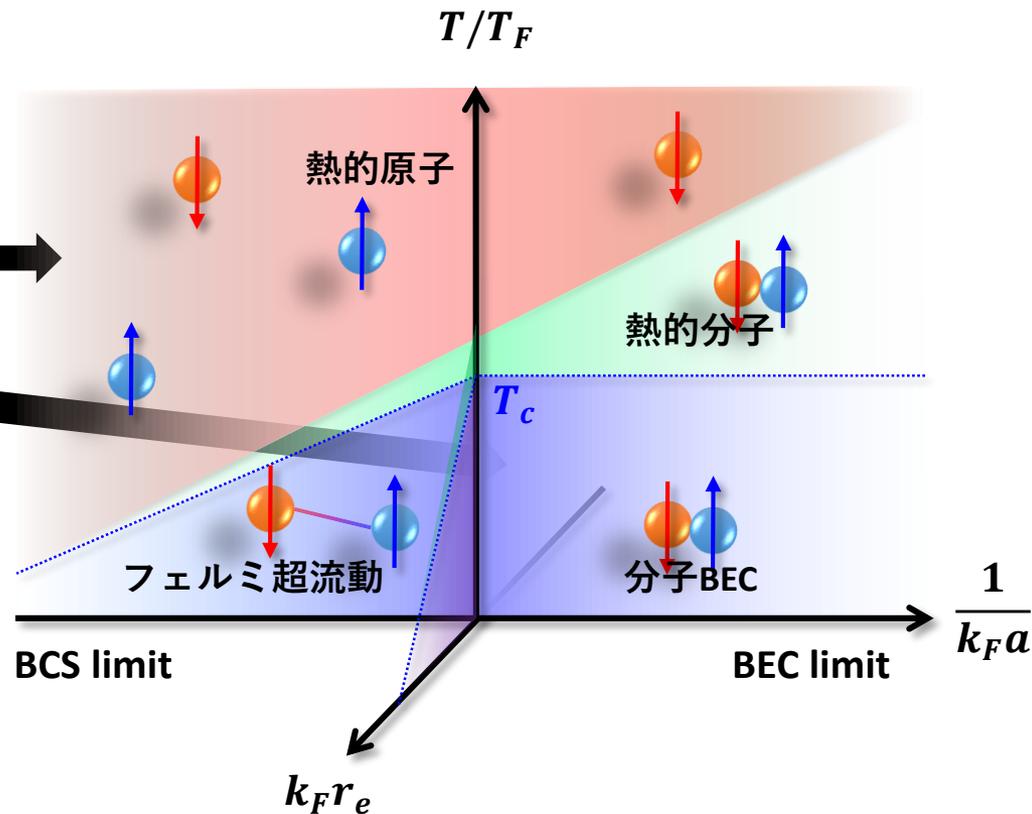
# C02班の位置付け：量子シミュレーション

フェッシュバツハ分子

$$|\psi\rangle = \sqrt{Z}|Close\rangle + \sqrt{1-Z}|Open\rangle$$

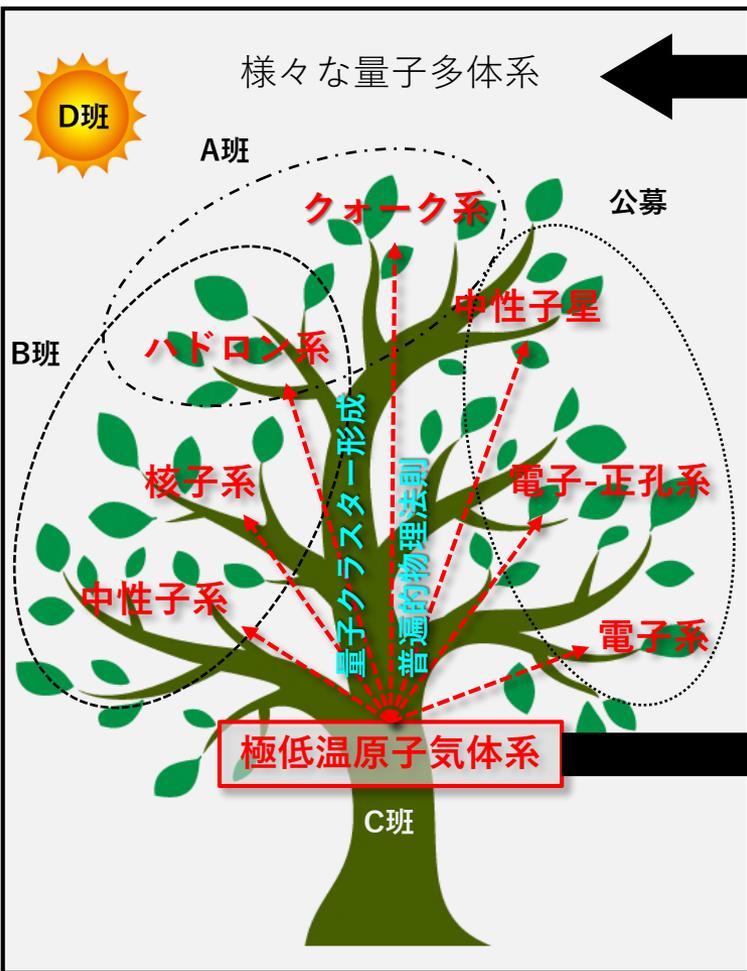


質量差のないスピン1/2フェルミ粒子系

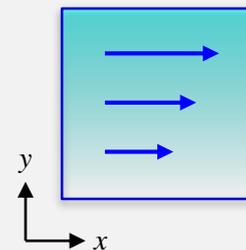
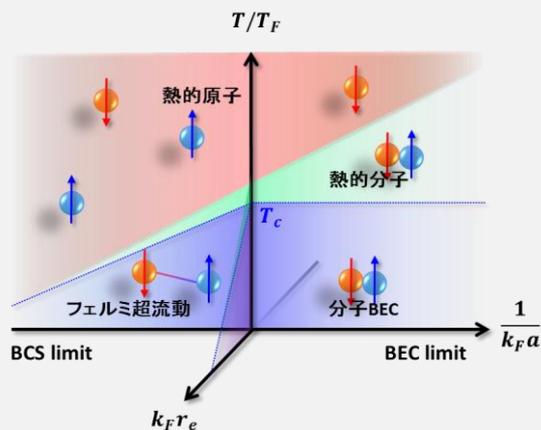


# C02班の位置付け：量子シミュレーション

組織：堀越(冷却原子実験)、大橋(物性理論)、飯田(原子核理論)



C02班：物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理



剪断粘性率

$$m \frac{\partial j_x}{\partial t} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}$$

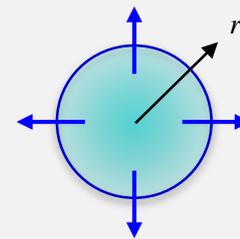
状態方程式：  $P = P(T, \mu_\uparrow, \mu_\downarrow, a_s^{-1}, r_e)$

スピン感受率：  $\chi = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{h}$ ,  $h = \frac{\mu_\uparrow - \mu_\downarrow}{2}$

圧縮率：  $\kappa_T = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial P} \right)_T$

比熱：  $C_V = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V$

不符号問題



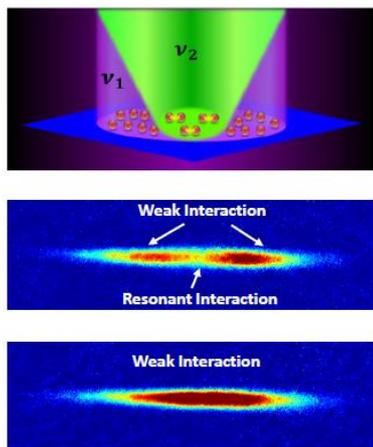
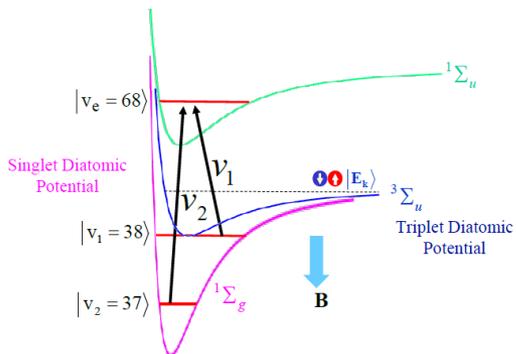
体積粘性率

$$m \frac{\partial j_r}{\partial t} = \zeta \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2}$$

# 成功への鍵：実験技術融合

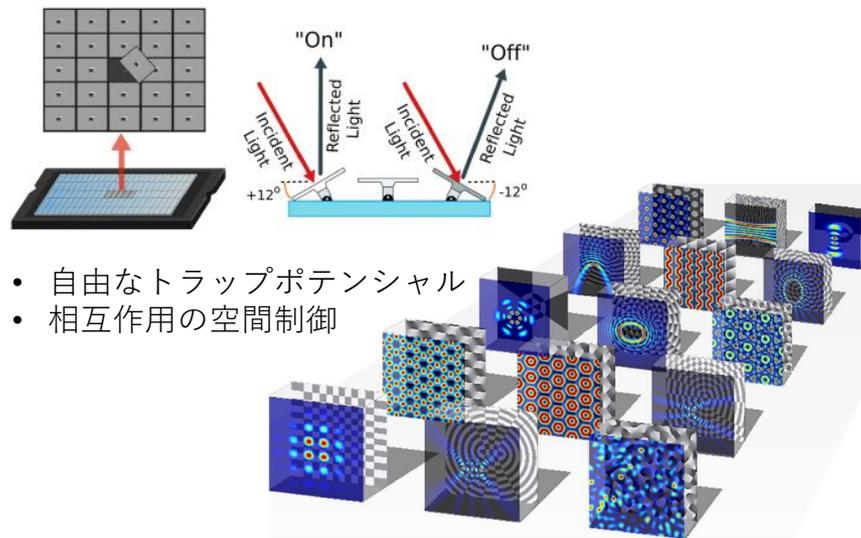
## フェッシュバッハ共鳴の光操作

- 散乱長と有効長の独立制御
- 相互作用の空間制御



Haibin Wu and J. E. Thomas, PRA **86**, 063625 (2012)

## 任意光パターンの生成



- 自由なトラップポテンシャル
- 相互作用の空間制御

“Roadmap on structured light”, J. Opt. 19 013001 (2017)

## 超スマート実験



多機能FPGAボード

- 14bitアナログ入出力
- 125 MS/s
- オシロスコープ
- 発信器
- スペアナ
- PID制御

redpitaya STEMLAB 125-14



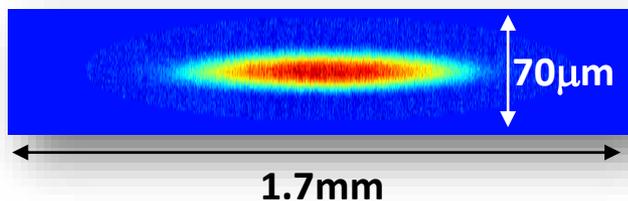
LattePanda Alpha 864 (DFRobot)

フル機能のWindows10+Aduino標準装備

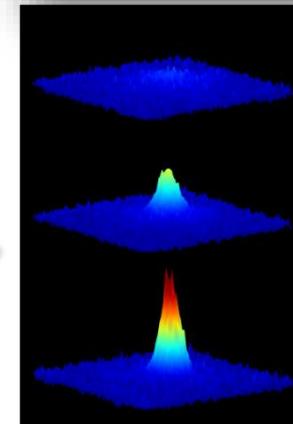
- 量子シミュレーション実験の長期安定化(24h実験)
- 複雑実験の簡易化
- 高速制御、自動制御、AI制御

# 冷却原子実験

Density distribution of  ${}^6\text{Li}$  (Fermion)



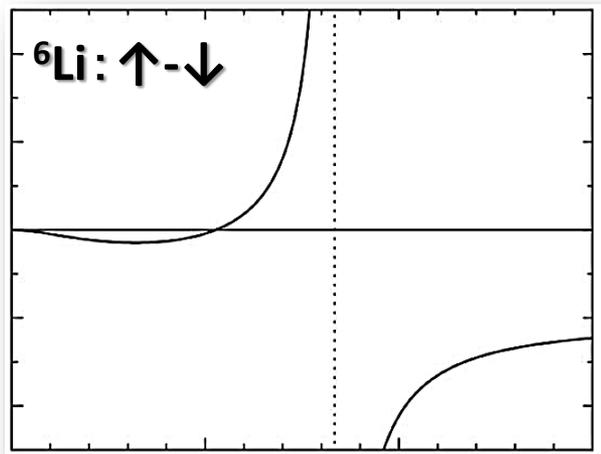
Laser cooling



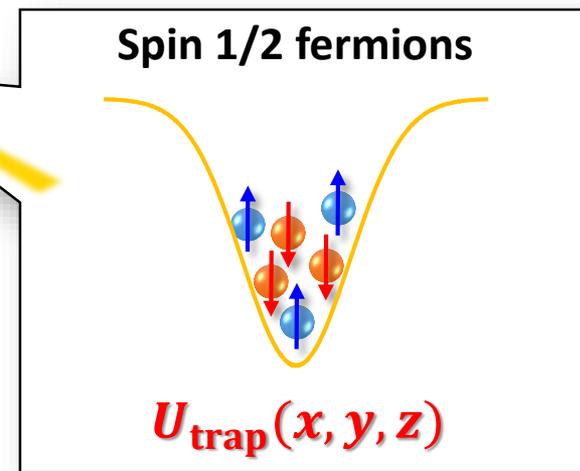
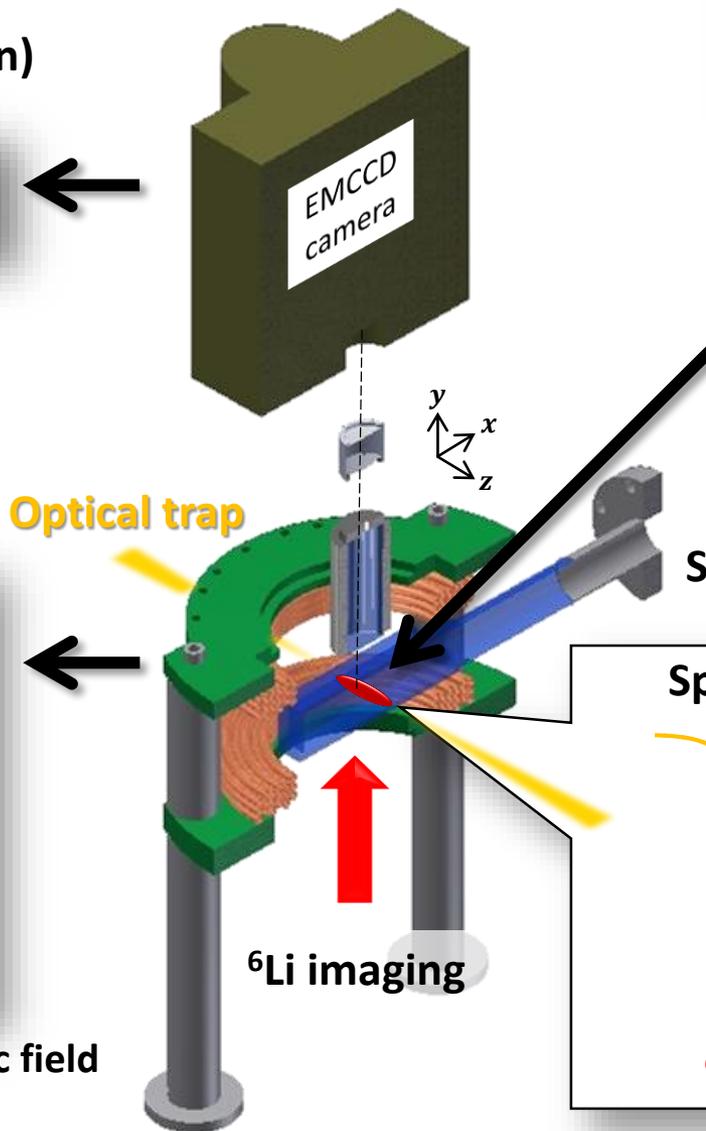
Superfluid transition

Feshbach resonance

Scattering length :  $a(B)$



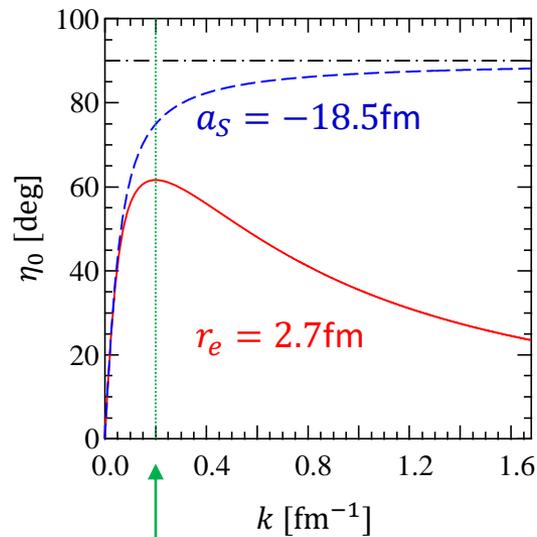
832Gauss Magnetic field



# これまでの研究：希薄中性子物質の状態方程式

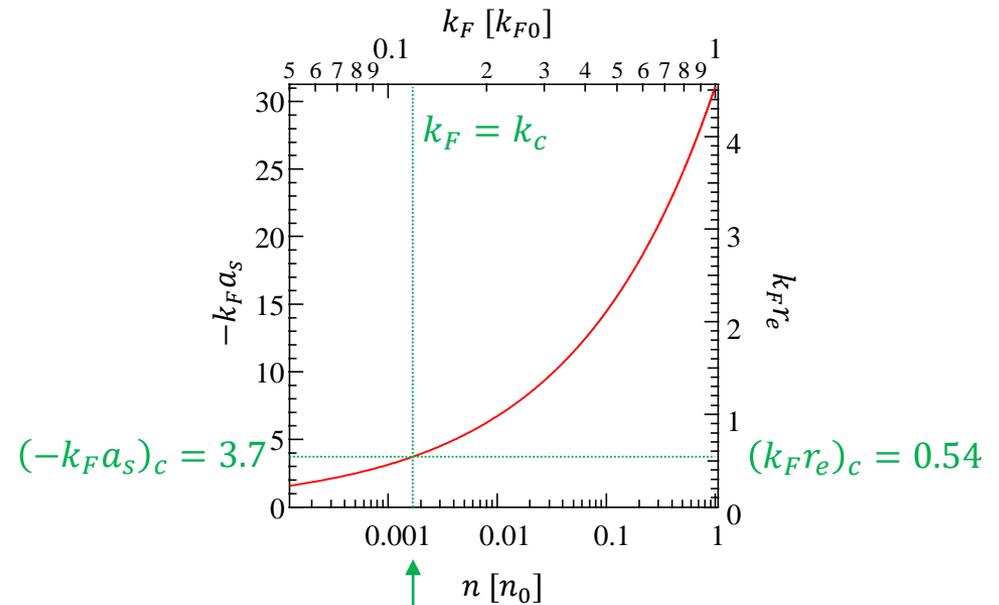
$$\text{中性子のs波散乱} : \cot \eta_0 = -\frac{1}{a_S k} + \frac{1}{2} r_e k$$

位相シフトのエネルギー依存



$$k_c = \sqrt{\frac{2}{|a_S| r_e}} = 0.2 \text{ fm}^{-1}$$

相互作用パラメータの密度依存

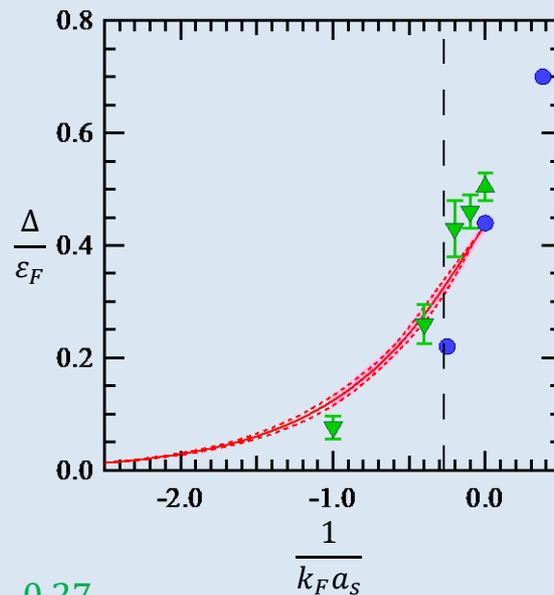
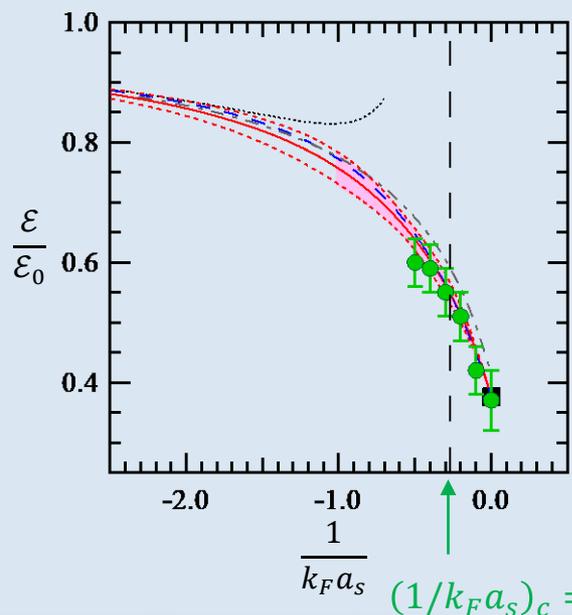


$$n_c = 1.7 \times 10^{-3} n_0$$

# これまでの研究：希薄中性子物質の状態方程式

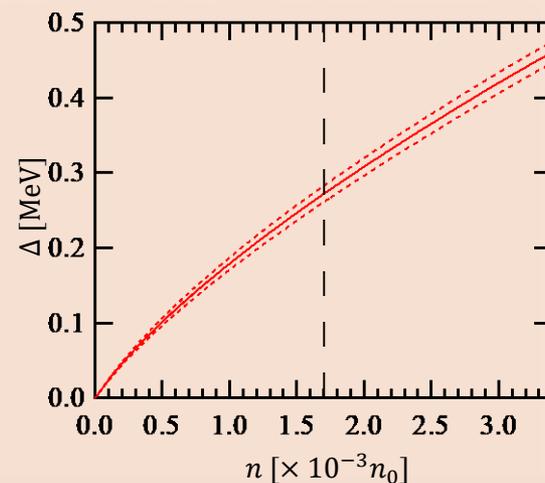
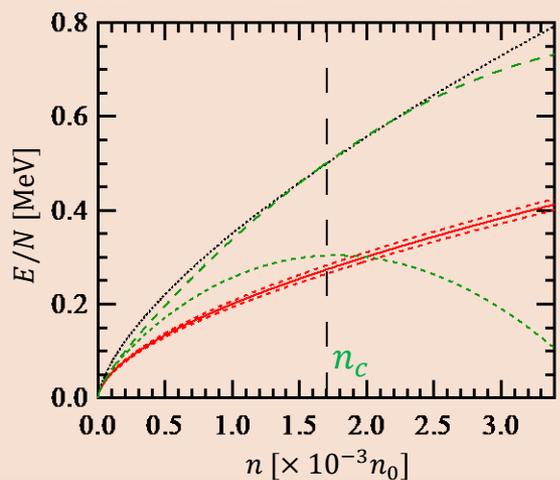
冷却原子量子  
シミュレーション

[Horikoshi, Ohashi, *et al.*,  
Phys. Rev. X **7**, 041004 (2017) ]



希薄中性子物質

レビュー論文投稿準備中



# 最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

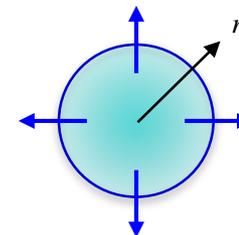
3次元一様系でs波相互作用しているフェルミ気体の状態方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{自由エネルギー密度： } F/V \equiv \mathcal{F} = \mathcal{F}(T, n, a_s^{-1}, r_e) \\ \text{スケール普遍性： } \mathcal{F}\left(\frac{T}{\lambda^2}, \frac{n}{\lambda^3}, \frac{a_s^{-1}}{\lambda}, r_e \lambda\right) = \frac{1}{\lambda^5} \mathcal{F}(T, n, a_s^{-1}, r_e) \end{array} \right.$$



密度 $n$ で無次元化された普遍的状态方程式：
$$\frac{\mathcal{F}}{n \varepsilon_F(n)} = f_{\mathcal{F}}\left(\frac{T}{T_F(n)}, \frac{1}{k_F(n) a_s}, k_F(n) r_e\right)$$

$\lambda$ を動かす操作をしても元に戻る（可逆） → エントロピーの生成は無い



体積粘性率

$$m \frac{\partial j_r}{\partial t} = \zeta \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2}$$

次に粒子を閉じ込めている箱の長さを $\lambda$ 倍に変化させた場合を考える（ただし全て常流動か超流動）

粒子の相互作用パラメータは変わらない：
$$\mathcal{F}\left(\frac{T}{\lambda^2}, \frac{n}{\lambda^3}, a_s^{-1}, r_e\right) \neq \frac{1}{\lambda^5} \mathcal{F}(T, n, a_s^{-1}, r_e) \rightarrow \text{不可逆}$$
  
 体積変化によるエントロピー生成  
 $\zeta(a_s^{-1} \neq 0, r_e \neq 0) > 0$

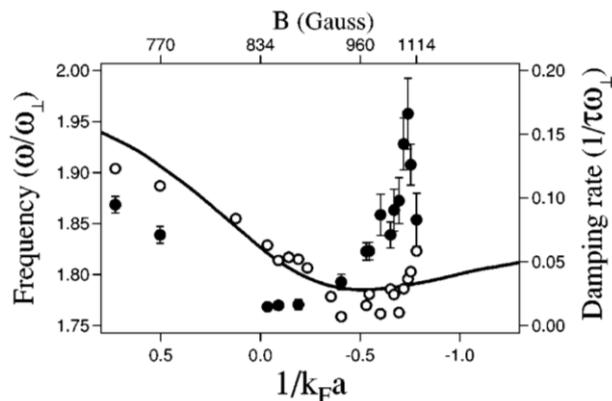
ユニタリー極限の場合相互作用パラメータが無い：
$$\mathcal{F}\left(\frac{T}{\lambda^2}, \frac{n}{\lambda^3}\right) = \frac{1}{\lambda^5} \mathcal{F}(T, n) \rightarrow \text{可逆}$$
  
 体積粘性率はゼロでなければならない  
 $\zeta(a_s^{-1} = 0, r_e = 0) = 0$

∴ユニタリー極限近傍の常流動の体積粘性率：
$$\zeta(T, n, a_s^{-1}, r_e) = \frac{\zeta''(T, n)}{a_s^2} + \dots$$

# 最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

## 先行研究

実験：散乱長に依存したradial breathing 集団モードの減衰レートの測定



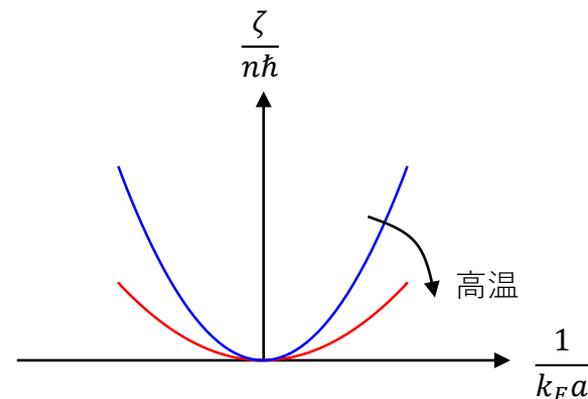
J. Kinast, A. Turlapov, and J. E. Thomas,  
Phys. Rev. A 70, 051401(R) (2004)

理論：ゼロレンジ高温ボルツマン領域における体積粘性率

$$\zeta = \zeta(T, n, a_s^{-1})$$

$$\frac{\zeta}{n\hbar} = f_\zeta \left( \frac{T}{T_F}, \frac{1}{k_F a_s} \right) = \frac{1}{9\sqrt{2\pi}} \frac{1}{(k_F a_s)^2} \left( \frac{T_F}{T} \right)^{5/2}$$

Kevin Dusling and Thomas Schäfer  
Phys. Rev. Lett. 111, 120603 (2013)



# 最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

体積粘性率を測定できる新しい理論提案

“Hydrodynamics with spacetime-dependent scattering length”

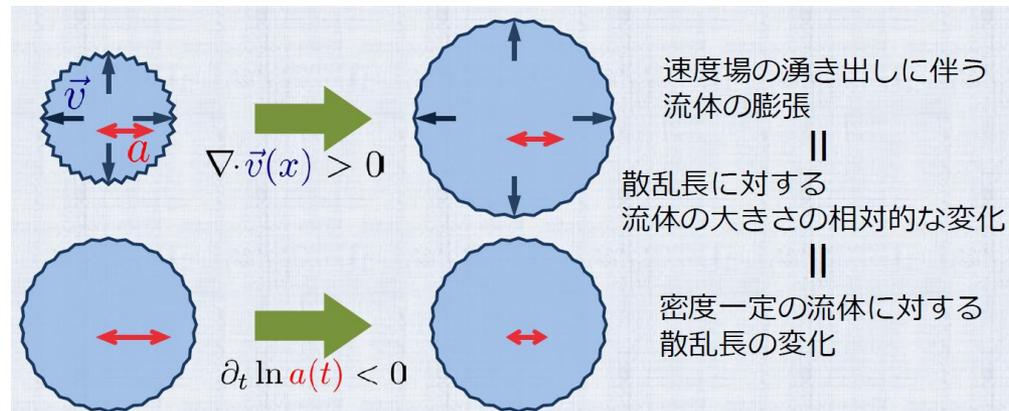
Keisuke Fujii, Yusuke Nishida, arXiv:1807.07983

散乱長で相互作用している流体は、応力テンソルの体積粘性項に散乱長依存性を持つ

$$\pi_{ij}(x) = -\eta(x)V_{ij}(x) - \zeta(x)\delta_{ij}V_a(x)$$

$$V_a(x) = \partial_k v_k(x) - d \cdot [\partial_t \ln a_s(x) + v_j(x)\partial_j \ln a_s(x)]$$

$$(x) = (t, \vec{x})$$



# 最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

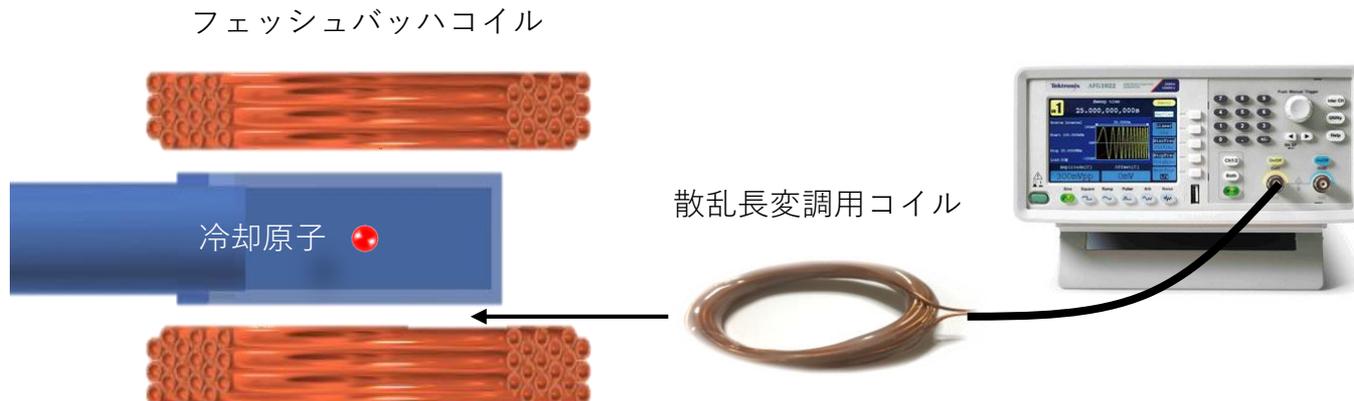
原理：散乱長の時間変化によるエネルギー散逸の測定

$$\text{散乱長の時間変化： } \frac{1}{a_s(t)} = A \sin(\omega t)$$

$$\text{1粒子あたりの全エネルギーの変化量： } \epsilon\left(t = \frac{2\pi}{\omega} m\right) - \epsilon(t = 0) \simeq \frac{18\pi^2}{N} A^2 \omega m \cdot \left[ \int \zeta''(T, n(\mathbf{r})) d^3\mathbf{r} \right], m \in \mathbb{N}$$

$$\text{体積粘性： } \zeta = \zeta''(T, n(\mathbf{r})) \frac{1}{a_s^2}$$

## 実験セットアップ



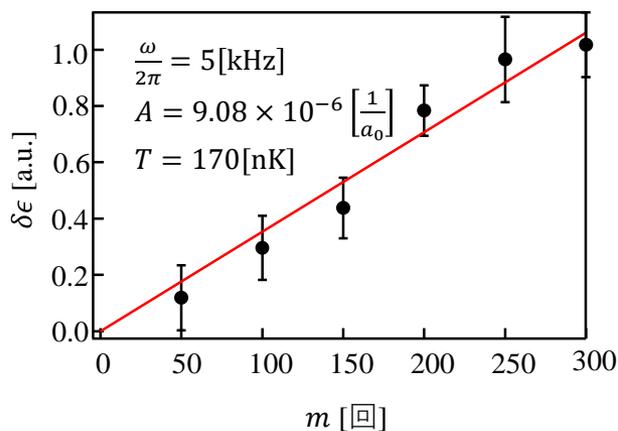
# 最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

## 実験結果

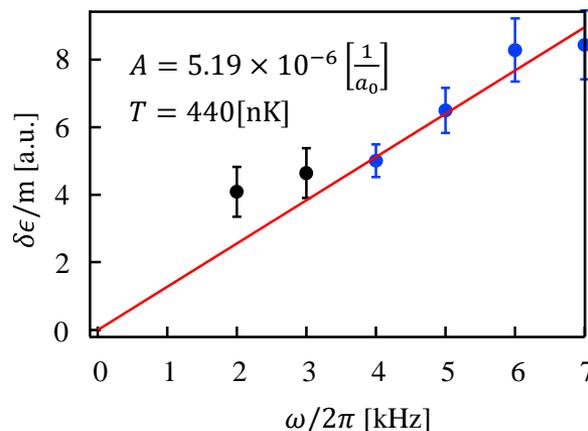
$$\text{散乱長の時間変化} : \frac{1}{a_s(t)} = A \sin(\omega t)$$

$$\text{全エネルギー増加量} : \delta\epsilon \left( t = \frac{2\pi}{\omega} m \right) \propto A^2 \omega m, m \in \mathbb{N}$$

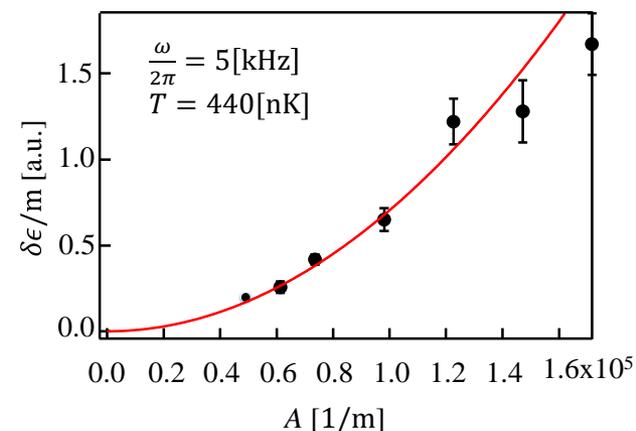
サイクル数依存



周波数依存



振幅依存



(低周波数でトラップ周波数との共鳴が起きる)

理論的に予想されるエネルギー上昇を確認

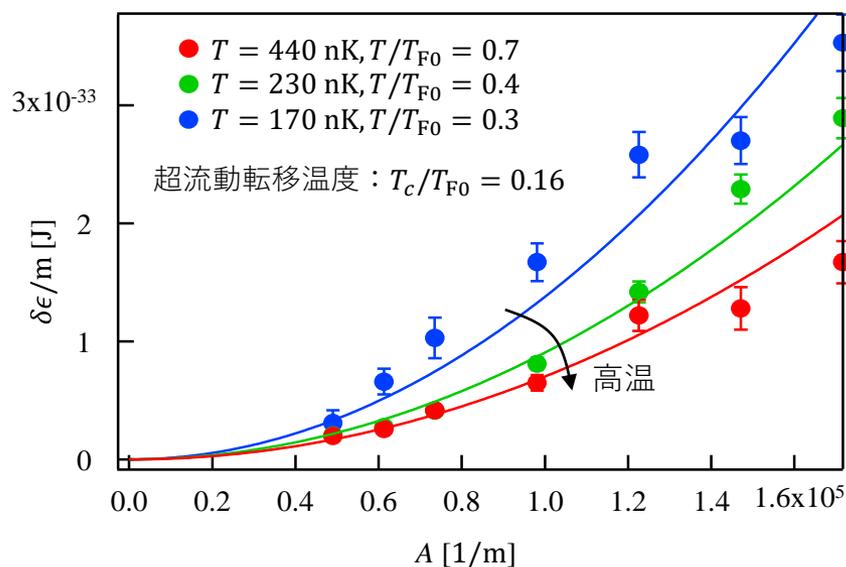


散乱長変化による仮想的な膨張・収縮  
体積粘性率によるエネルギー上昇

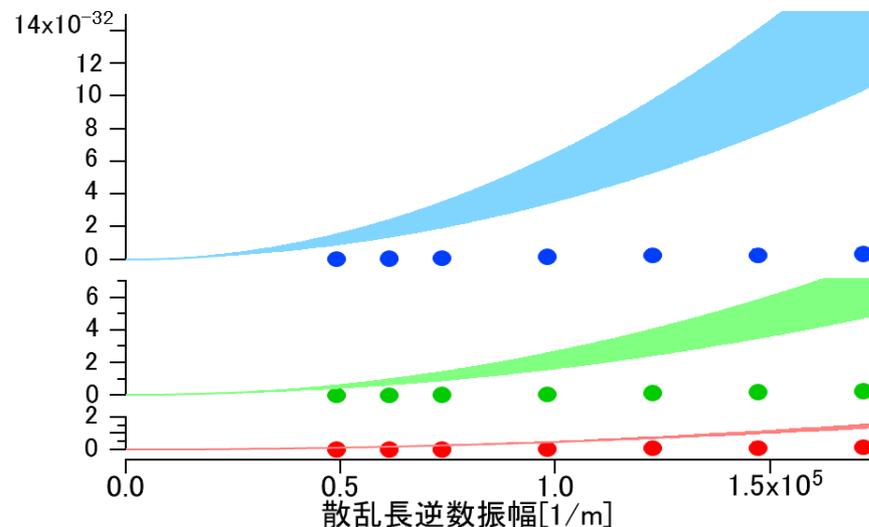
# 最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

$$\text{全エネルギー増加量} : \delta\epsilon \left( t = \frac{2\pi}{\omega} m \right) = \frac{18\pi^2}{N} A^2 \omega m \cdot \left[ \int \zeta''(T, n(\mathbf{r})) d^3\mathbf{r} \right], m \in \mathbb{N}$$

温度依存性



$$\frac{\zeta}{n\hbar} = \frac{1}{9\sqrt{2\pi}} \frac{1}{(k_F a_s)^2} \left( \frac{T_F}{T} \right)^{5/2} \text{ との比較}$$



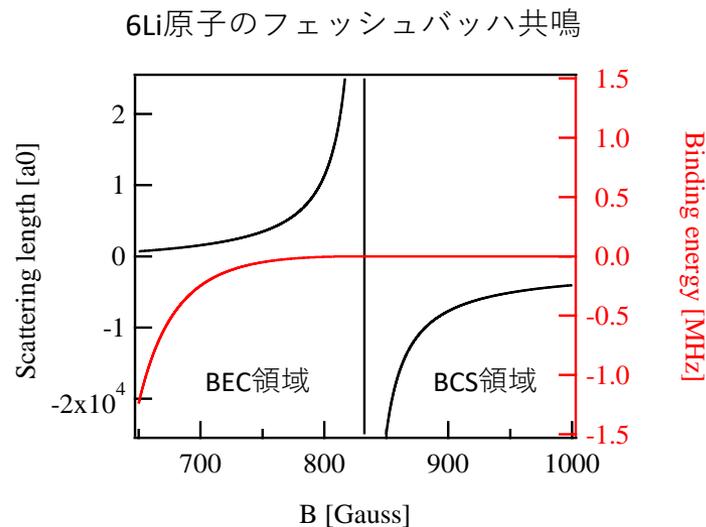
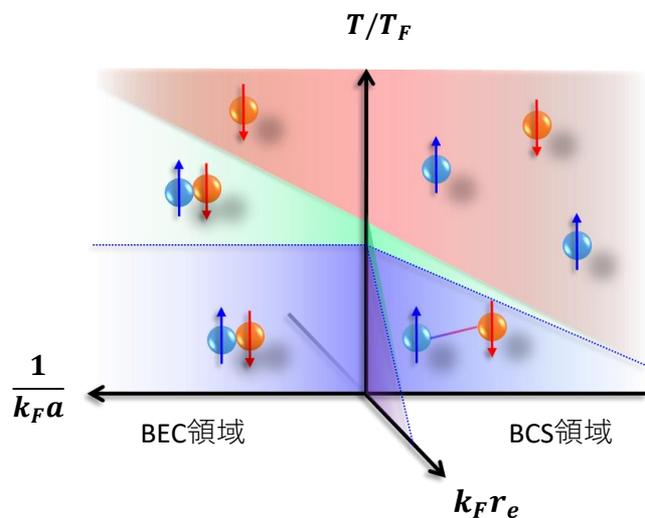
我々の実験データは2次のビリアル展開では説明できない低温領域

低温 ( $\frac{T}{T_F} < 1$ ) で常流動領域の体積粘性率を与える初めての実験データ

# 準備状況：BEC領域の精密測定へ向けて

要求：どの相互作用領域でも正しい密度分布を得る必要がある

量子クラスター形成（分子形成）が起きても同じ観測方法を用いて問題ないのか？



Beer-Lambert law : 
$$\frac{dI(x, y, z)}{dy} = -n_{3D}(x, y, z) \frac{\sigma_{abs}}{1 + \frac{I(x, y, z)}{I_{sat}}} I(x, y, z)$$

吸収断面積 (Absorption cross-section) points to  $\sigma_{abs}$ .

飽和強度 (Saturation intensity) points to  $I_{sat}$ .

# 飽和強度とは？

二準位系で吸収、誘導放出、自然放出のバランスが、 $|c_1|^2 = |c_2|^2$ となる光強度

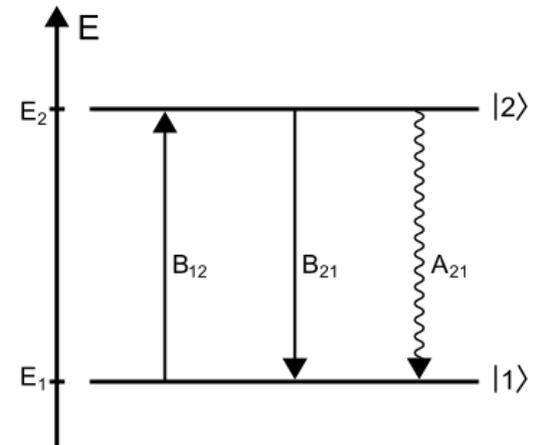
閉じた遷移の吸収断面積： $\sigma_{abs} = \frac{3\lambda^2}{2\pi}$  ← 波長のみ依存

飽和強度： $I_{sat} = \frac{\hbar\omega A_{21}}{2\sigma_{abs}} = \frac{\pi \hbar c}{3 \lambda^3 \tau}$  ← A係数に依存

A係数： $A_{21} = \frac{4\alpha}{3c^2} \times \omega^3 |D_{12}|^2$

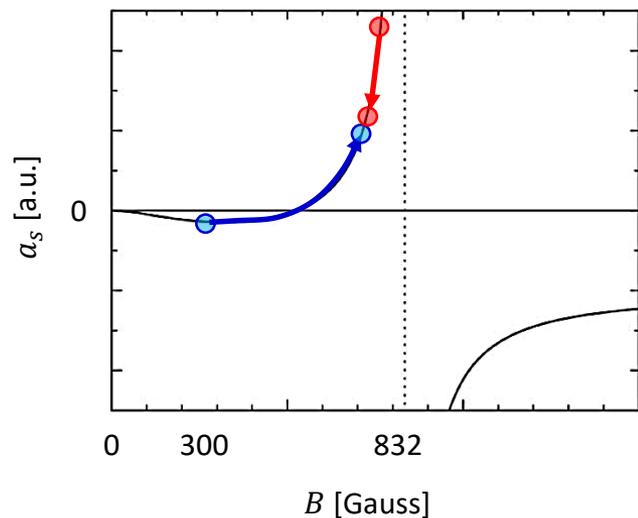
微細構造定数： $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$

双極子： $D_{12} = \int \psi_e^* \mathbf{r} \psi_g d^3r$

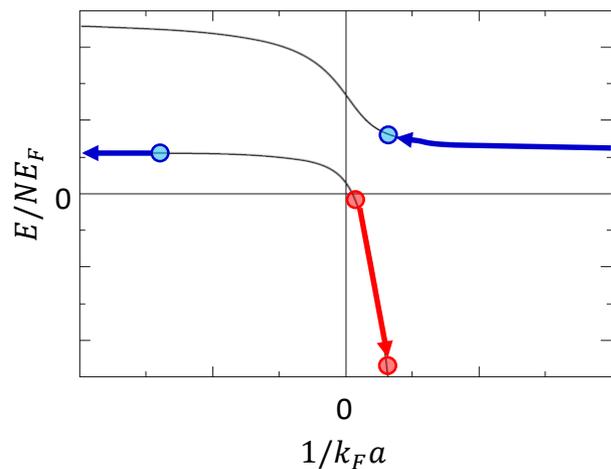


# 原子と分子の光学応答の違い

6Li原子のフェッシュバツハ共鳴

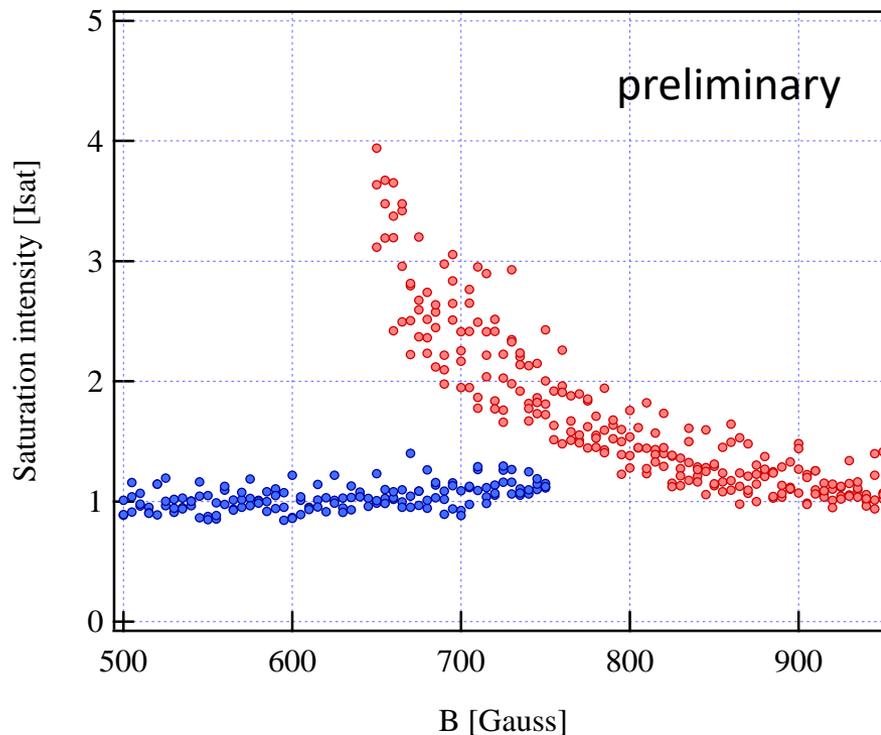


多体系の基底状態と第一励起状態



## 飽和強度の評価

手法： Horikoshi, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 104301 (2017)

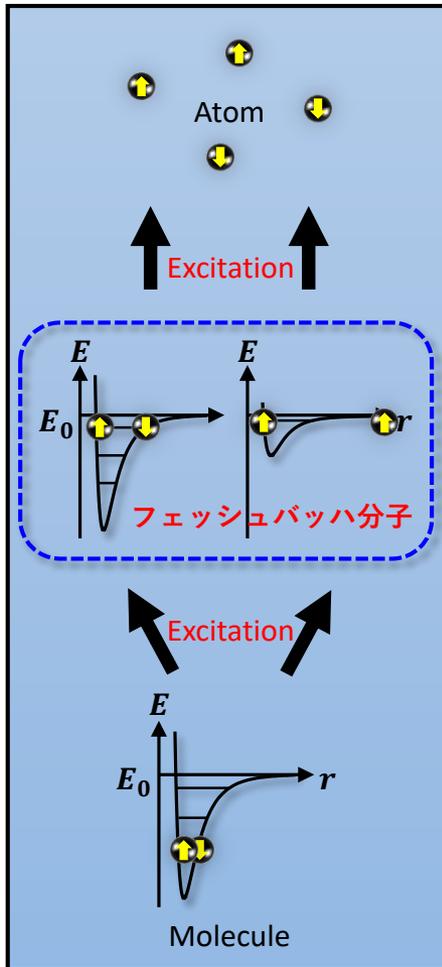


原子と分子で異なる振る舞い

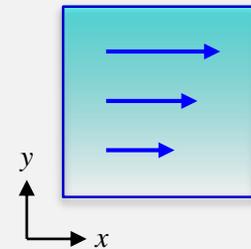
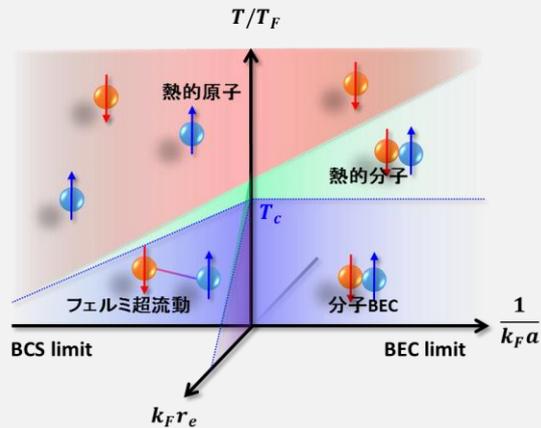
クラスター形成の検波に使えるか？

# まとめ

## 冷却原子量子シミュレーションで探る量子クラスターの基礎科学

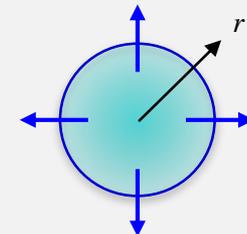


C02班：物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理



剪断粘性率

$$m \frac{\partial j_x}{\partial t} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}$$



体積粘性率

$$m \frac{\partial j_r}{\partial t} = \zeta \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2}$$

状態方程式：  $P = P(T, \mu_\uparrow, \mu_\downarrow, a_s^{-1}, r_e)$

スピン感受率：  $\chi = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{h}$ ,  $h = \frac{\mu_\uparrow - \mu_\downarrow}{2}$

圧縮率：  $\kappa_T = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial P} \right)_T$

比熱：  $C_V = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V$

不符号問題

# まとめ

進行中（マシンタイム待ち）

- 体積粘性率測定
- ユニタリー極限スピンインバランス系の状態方程式  
→スピン感受率、ポーラロン、不符号問題
- 理想ボース粒子のBEC相転移

準備中

- BEC領域の精密測定
- 散乱長と有効長の独立制御用レーザー光源の開発
- トラップポテンシャルの次空間制御
- 超スマート実験による装置の長期安定化

