

「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

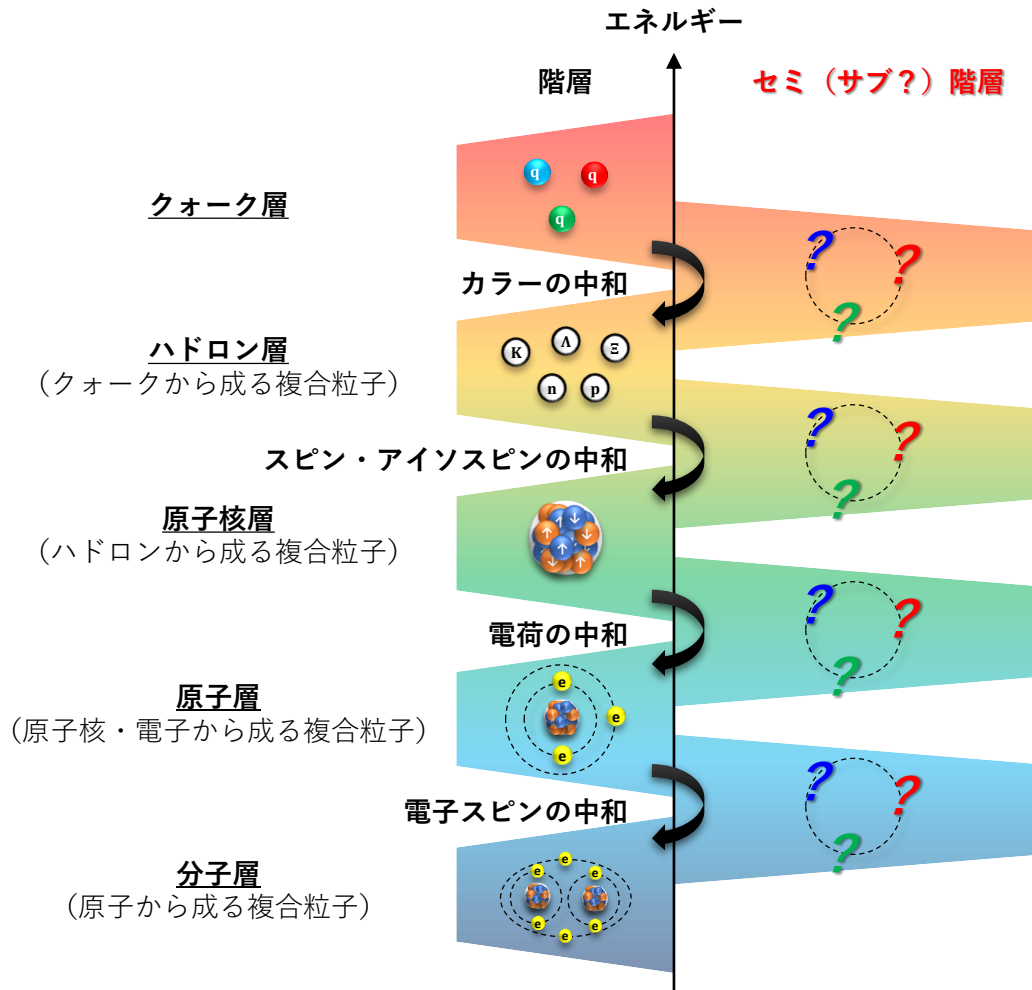
東京大学理学系研究科フotonサイエンス研究機構

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」

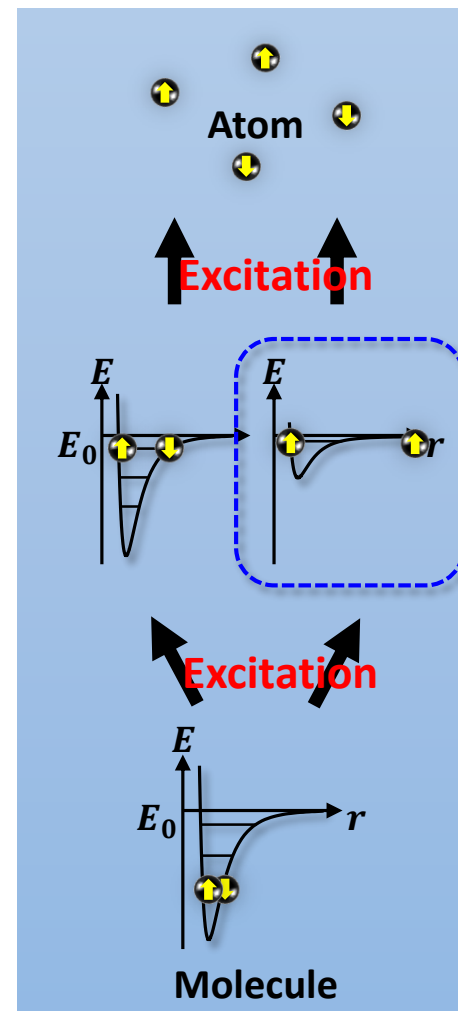
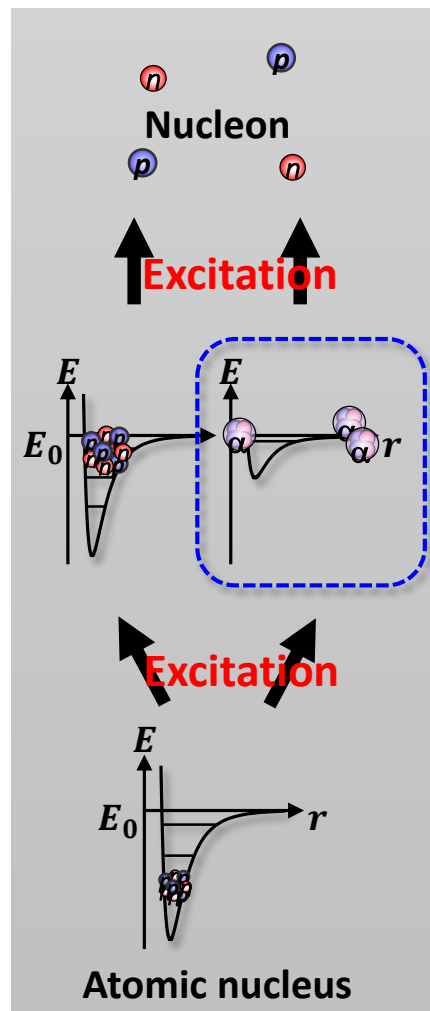
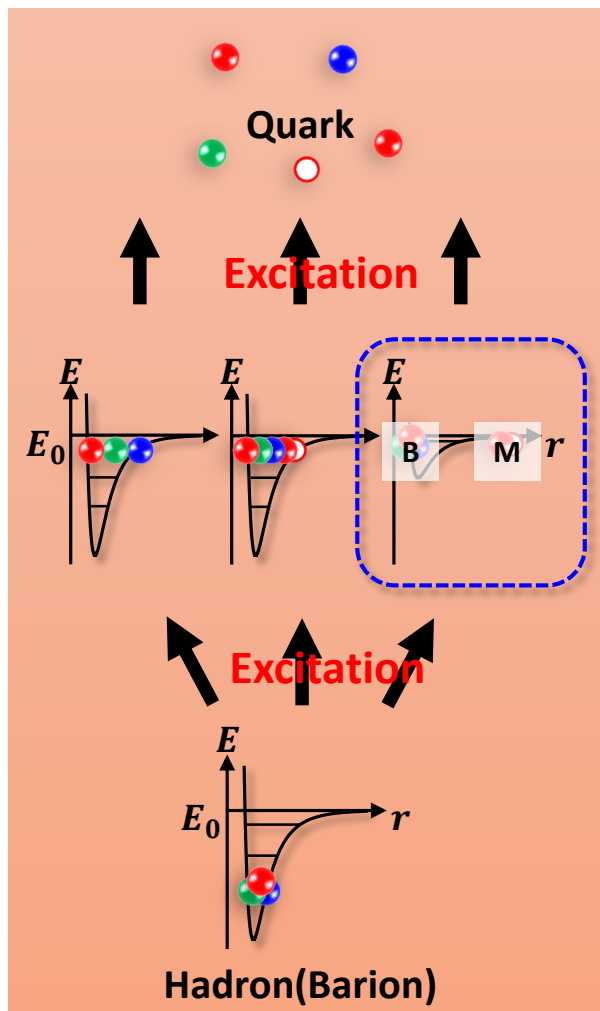
1. 量子クラスター形成過程の普遍的物理法則
2. 構成粒子の持つ自由度の消失(中和)過程
3. 粒子階層間の分離度



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

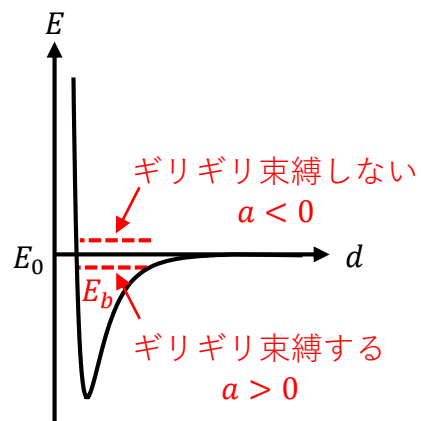
学術的な「3つの問い」

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

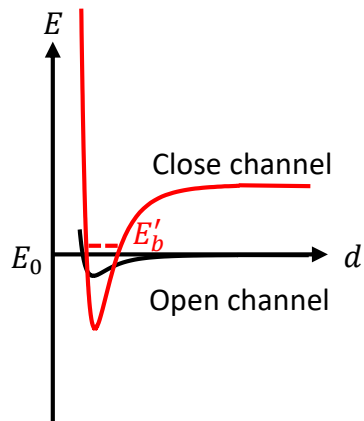


自分の散乱ポテンシャルの束縛状態との共鳴散乱

Feshbach resonance Two channel model

$$E_0 \sim E'_b$$

- cold atoms
- $\Lambda(1405)$

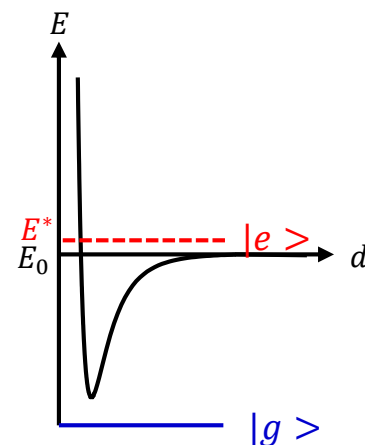


異なる散乱ポテンシャルの束縛状態との共鳴散乱

Ikeda threshold rule

$$E_0 \sim E^*$$

- α 粒子-Hoyle状態

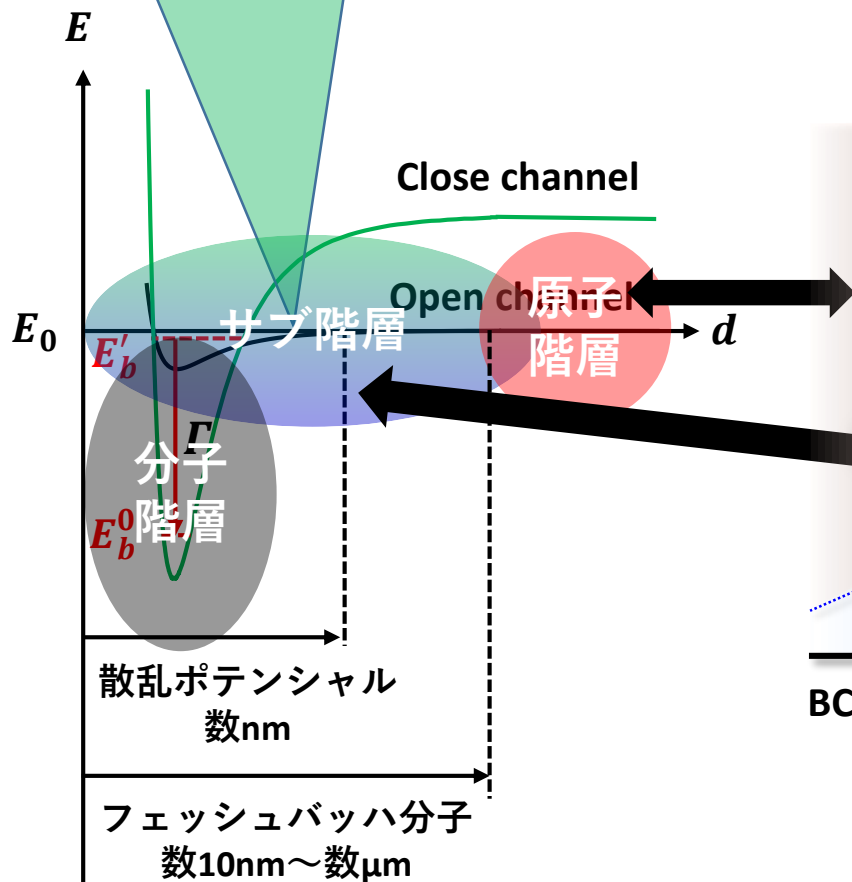


複合粒子の励起状態との共鳴散乱

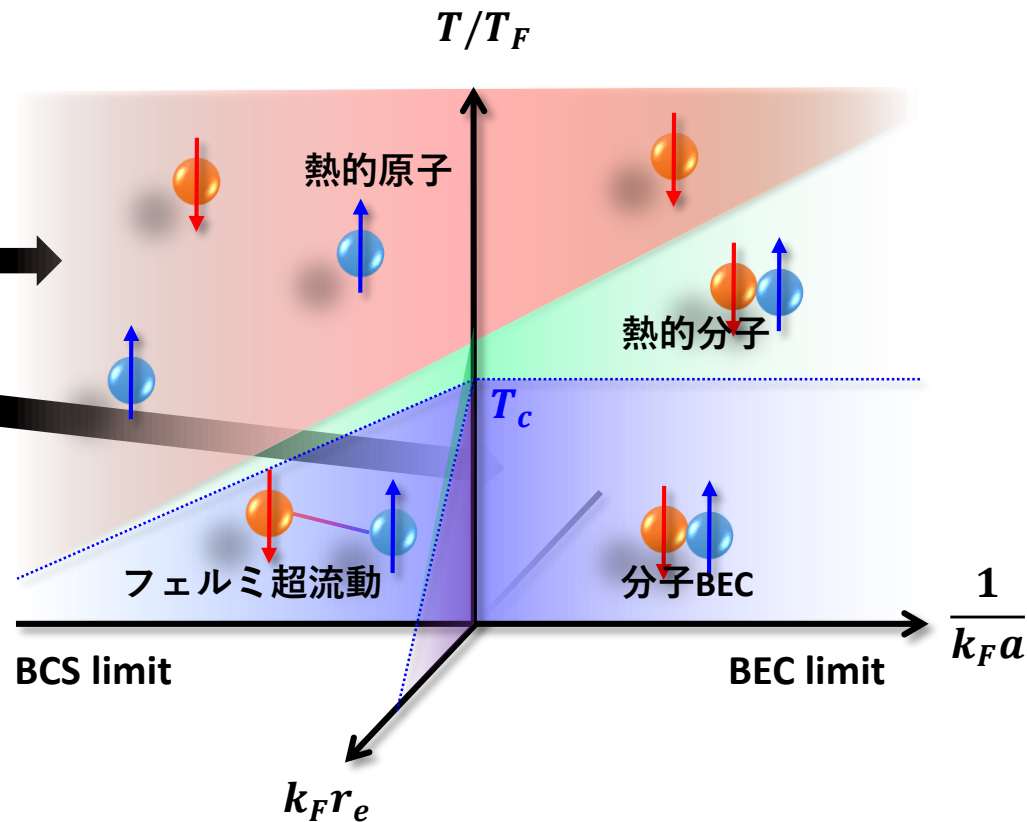
C02班の位置付け：量子シミュレーション

フェッシュバツハ分子

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

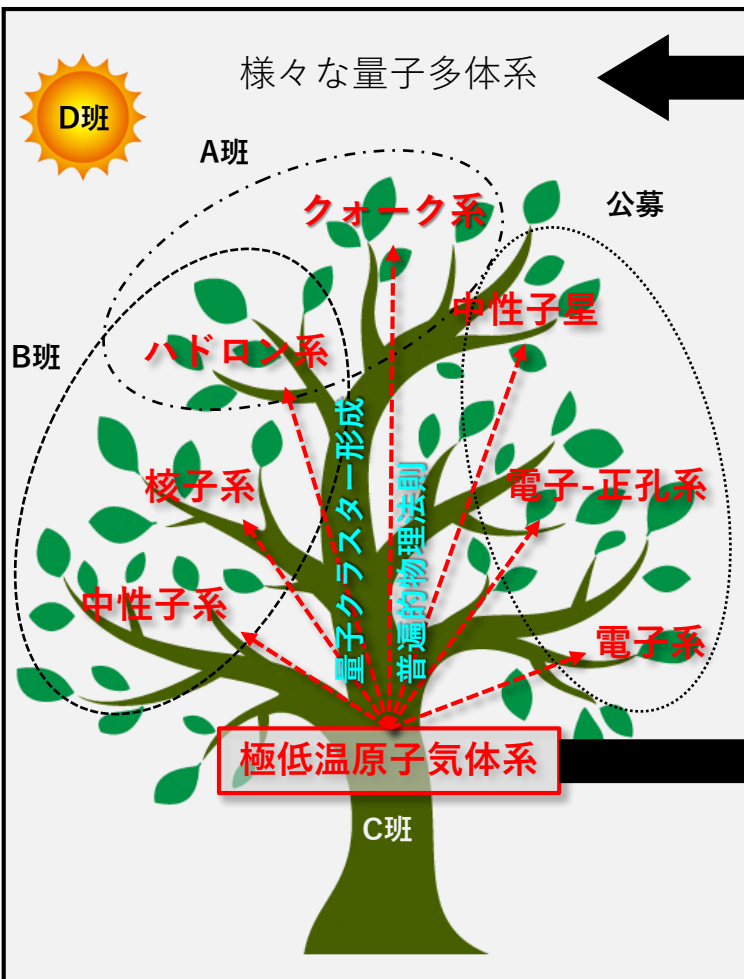


質量差のないスピン1/2フェルミ粒子系

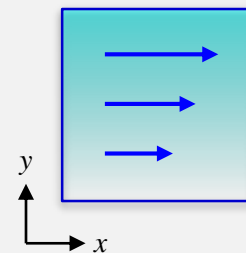
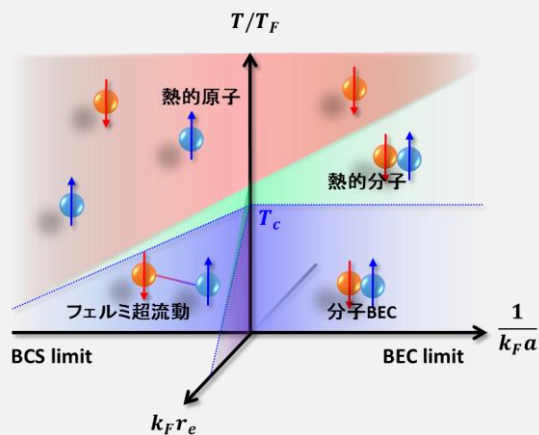


C02班の位置付け：量子シミュレーション

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

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

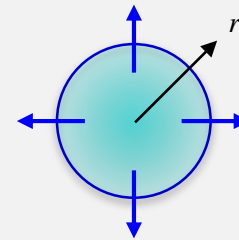
状態方程式： $P = P(T, \mu_\uparrow, \mu_\downarrow, a_s^{-1}, r_e)$

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



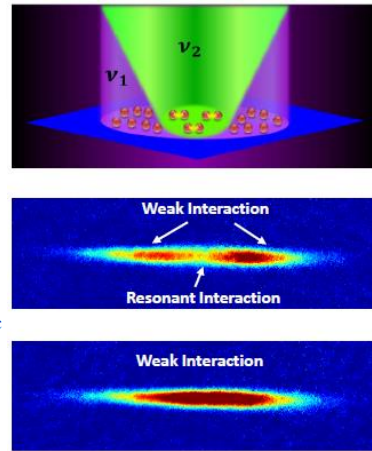
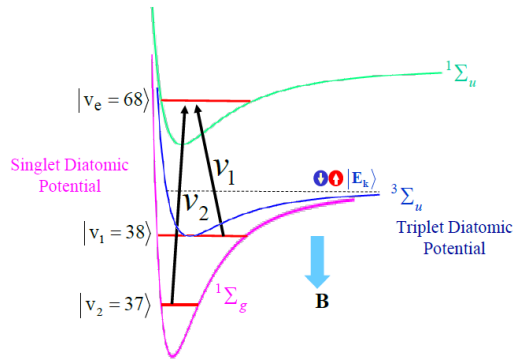
体積粘性率

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

成功への鍵：実験技術融合

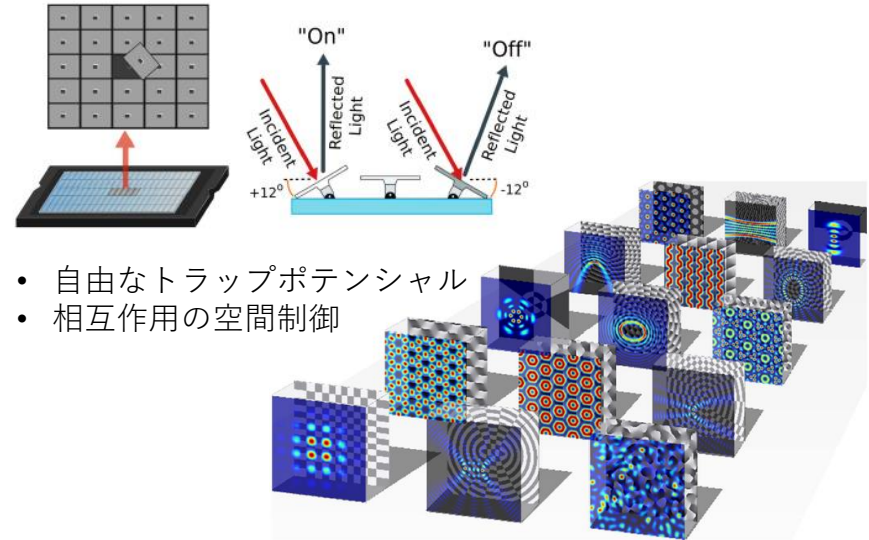
フェッシュバッハ共鳴の光操作

- 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



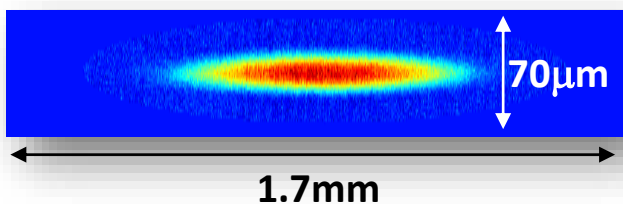
LattePanda Alpha 864 (DFRobot)

フル機能のWindows10+Aduino標準装備

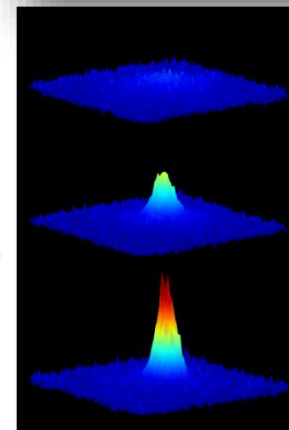
- 量子シミュレーション実験の長期安定化(24h実験)
- 複雑実験の簡易化
- 高速制御、自動制御、AI制御

冷却原子実験

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



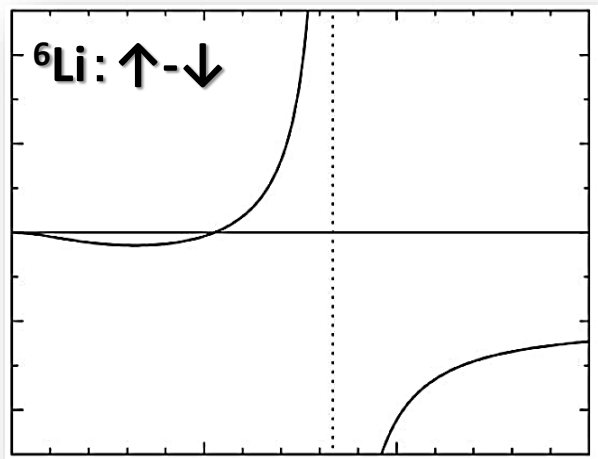
Laser cooling



Superfluid transition

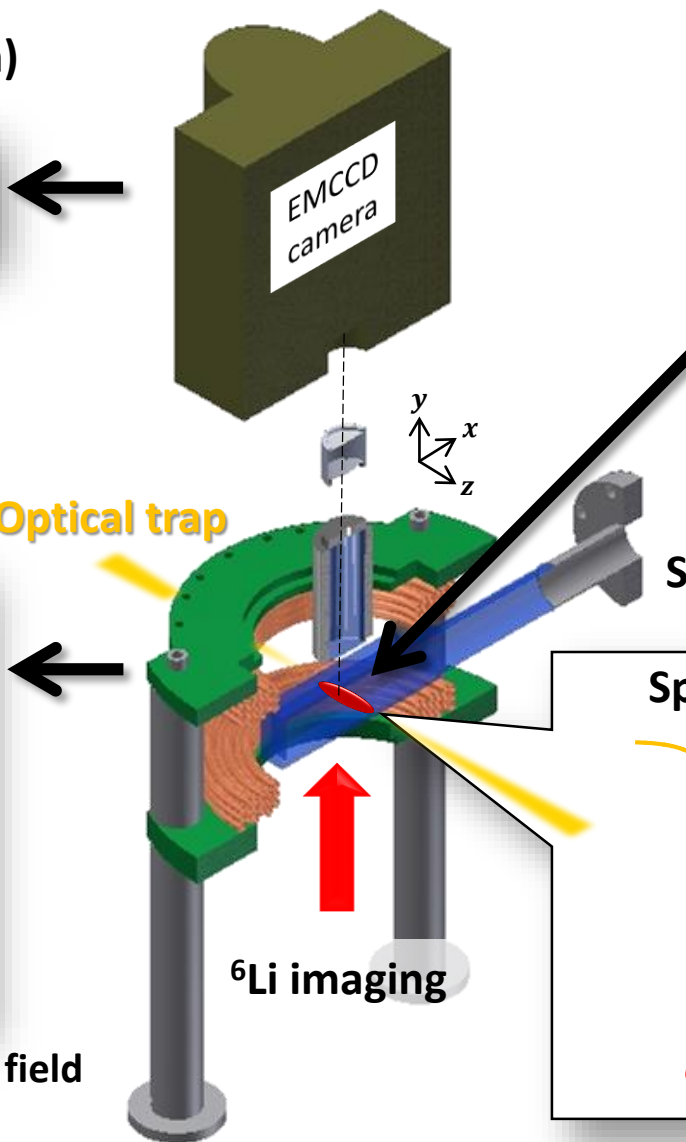
Feshbach resonance

Scattering length : $a(B)$



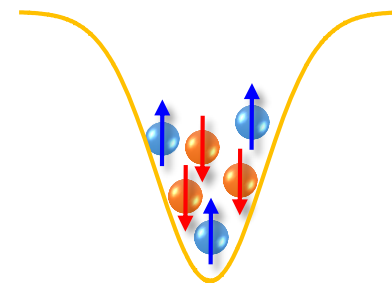
832Gauss Magnetic field

Optical trap



${}^6\text{Li}$ imaging

Spin 1/2 fermions

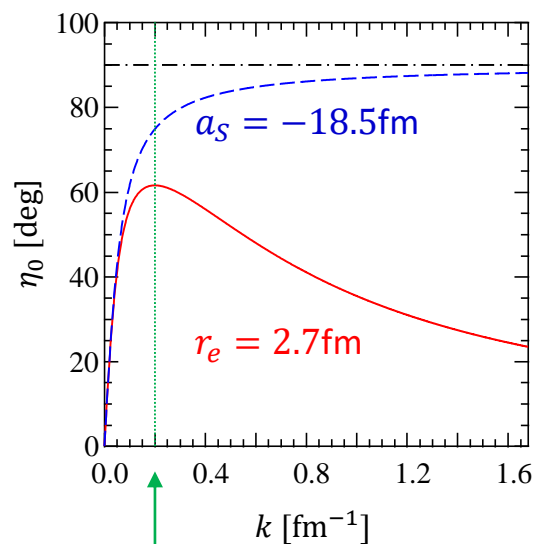


$U_{\text{trap}}(x, y, z)$

これまでの研究：希薄中性子物質の状態方程式

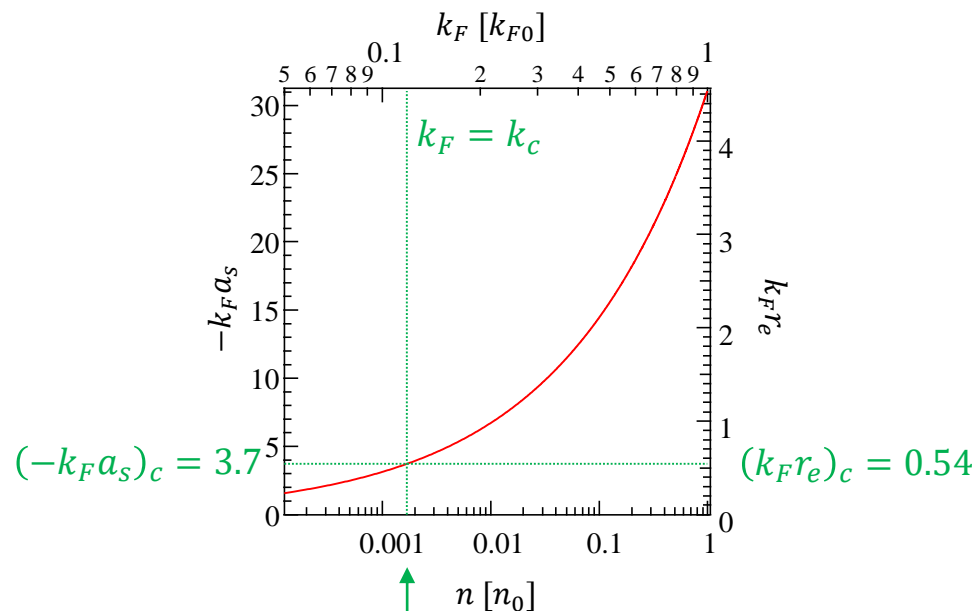
$$\text{中性子のs波散乱} : \cot \eta_0 = -\frac{1}{a_S k} + \frac{1}{2} r_e k$$

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

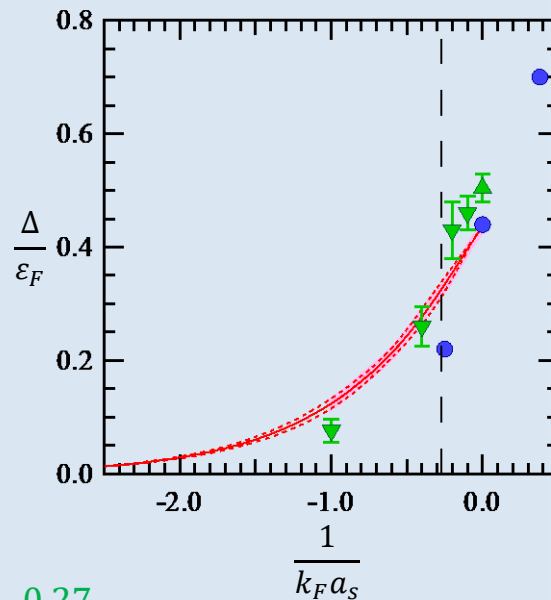
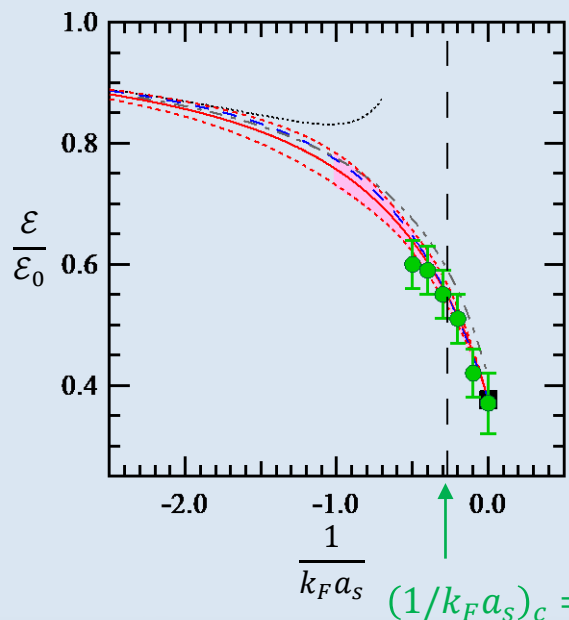


$$n_c = 1.7 \times 10^{-3} n_0$$

これまでの研究：希薄中性子物質の状態方程式

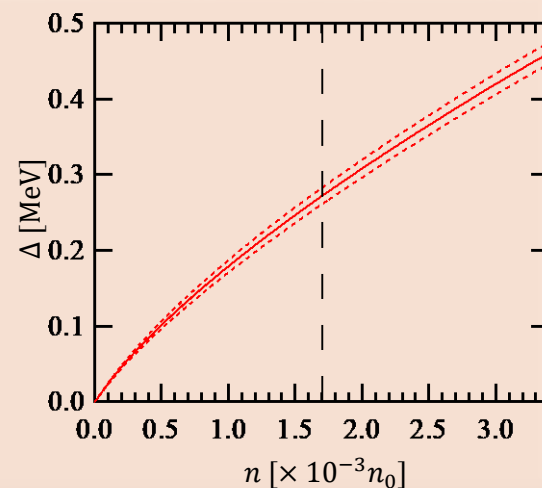
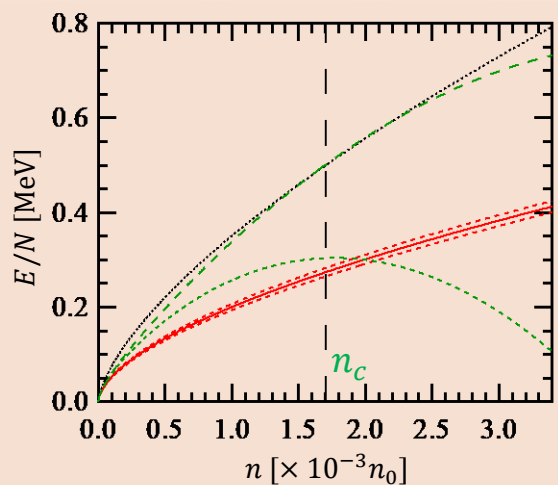
冷却原子量子
シミュレーション

[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

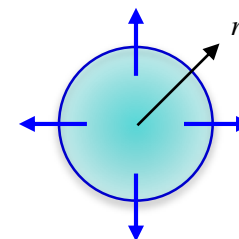
3次元一様系でs波相互作用しているフェルミ気体の状態方程式

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



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

λ 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 λ 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：
$$\mathcal{F}\left(\frac{T}{\lambda^2}, \frac{n}{\lambda^3}, a_s^{-1}, r_e\right) \neq \frac{1}{\lambda^5} \mathcal{F}(T, n, a_s^{-1}, r_e) \quad \blackrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{不可逆} \\ \text{体積変化によるエントロピー生成} \\ \zeta(a_s^{-1} \neq 0, r_e \neq 0) > 0 \end{array}$$

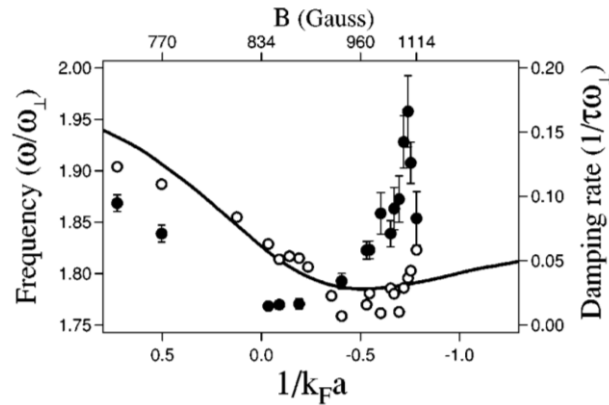
ユニタリー極限の場合相互作用パラメータが無ければ：
$$\mathcal{F}\left(\frac{T}{\lambda^2}, \frac{n}{\lambda^3}\right) = \frac{1}{\lambda^5} \mathcal{F}(T, n) \quad \blackrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{可逆} \\ \text{体積粘性率はゼロでなければならない} \\ \zeta(a_s^{-1} = 0, r_e = 0) = 0 \end{array}$$

∴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



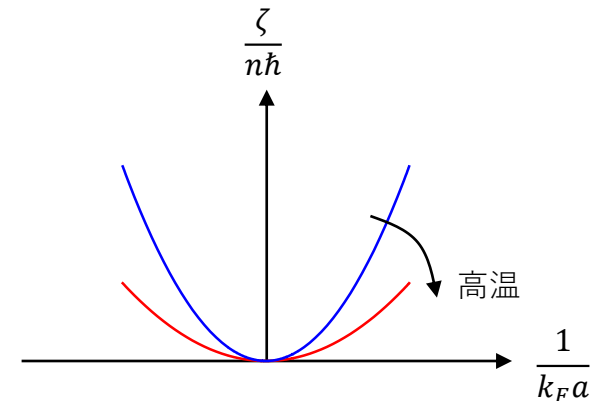
J. Kinast, A. Turlapov, and J. E. Thomas,
Phys. Rev. A 70, 051401(R) (2004)

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”

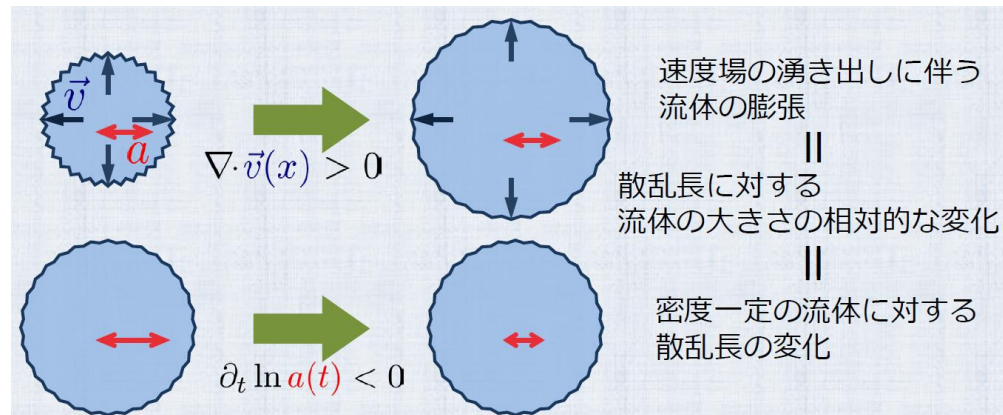
Keisuke Fujii, Yusuke Nishida, arXiv:1807.07983

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

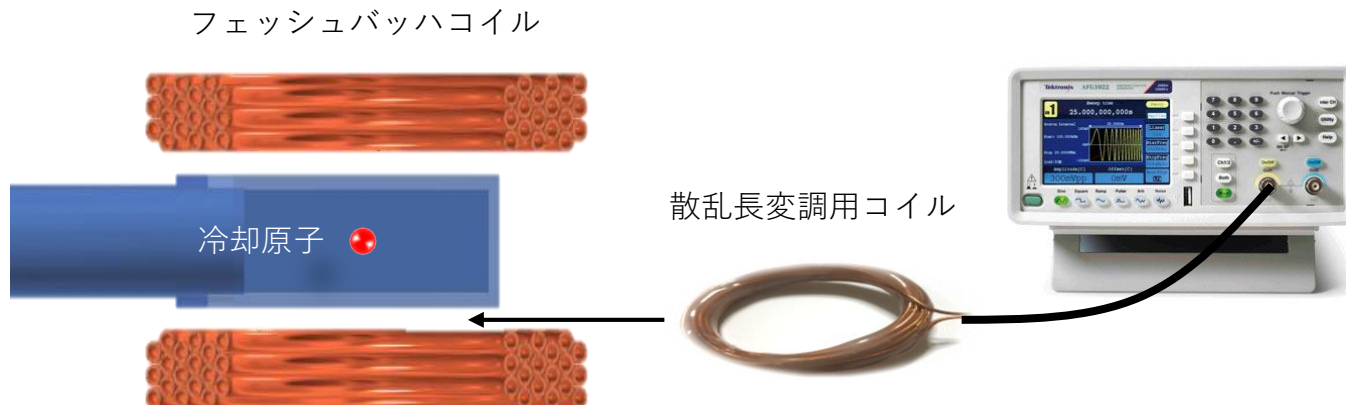
原理：散乱長の時間変化によるエネルギー散逸の測定

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

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

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

実験セットアップ



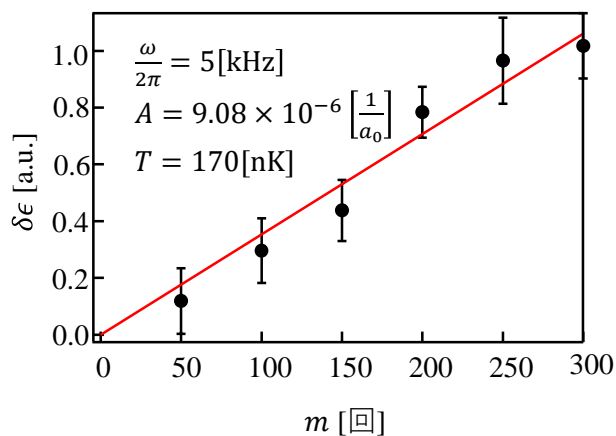
最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

実験結果

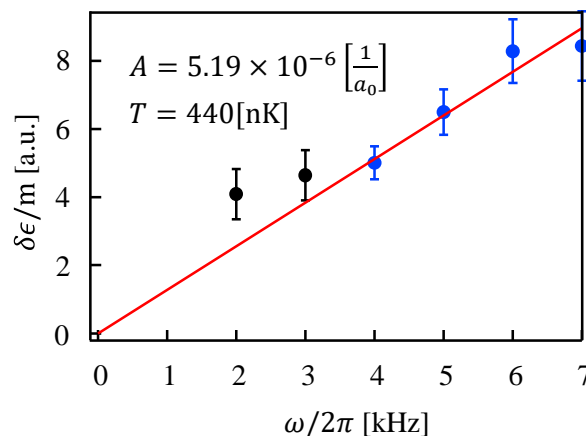
$$\text{散乱長の時間変化} : \frac{1}{a_s(t)} = A \sin(\omega t)$$

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

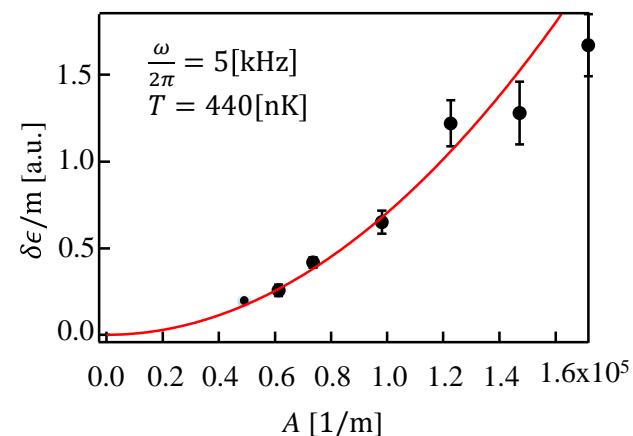
サイクル数依存



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

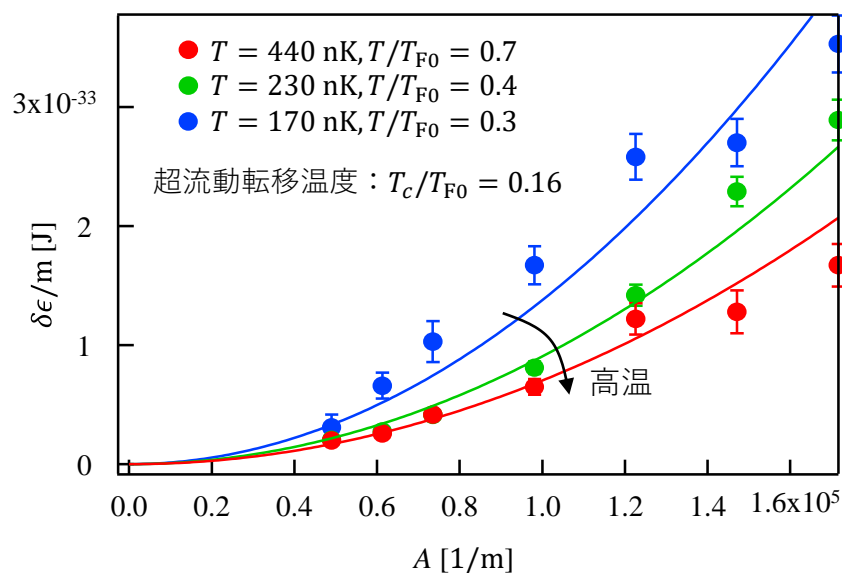


散乱長変化による仮想的な膨張・収縮
体積粘性率によるエネルギー上昇

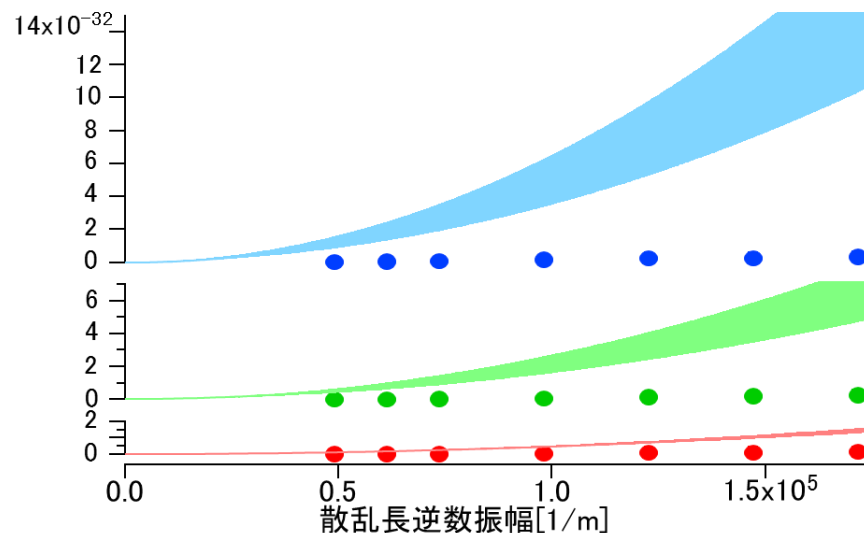
最近の実験の紹介：ユニタリー極限の体積粘性係数の測定

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

温度依存性



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



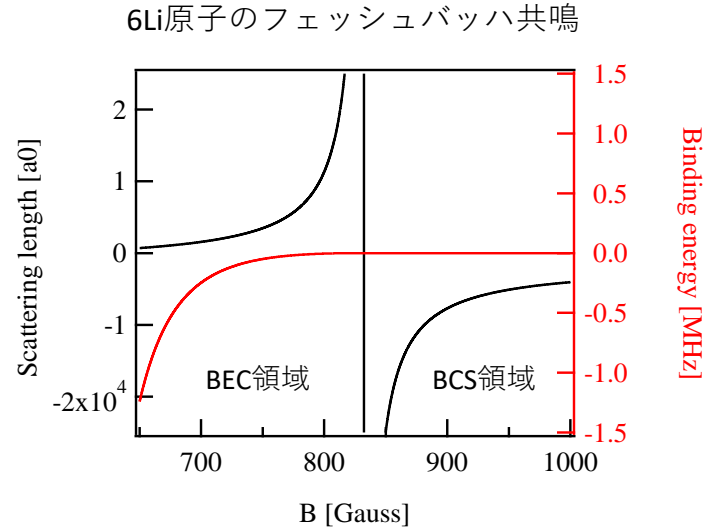
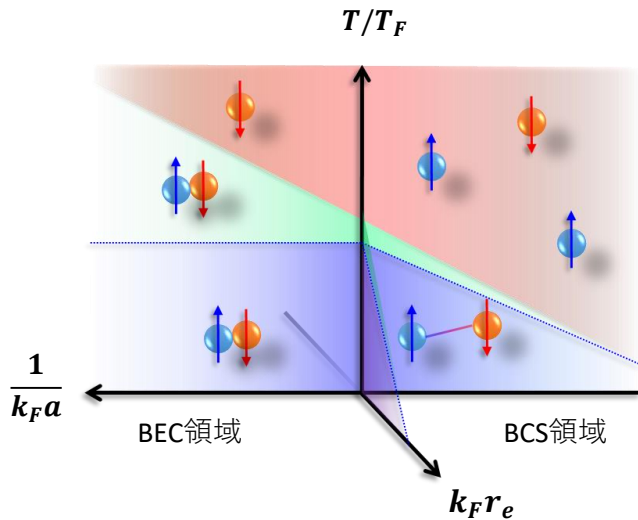
我々の実験データは2次のビリアル展開では説明できない低温領域

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
↑ 飽和強度

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

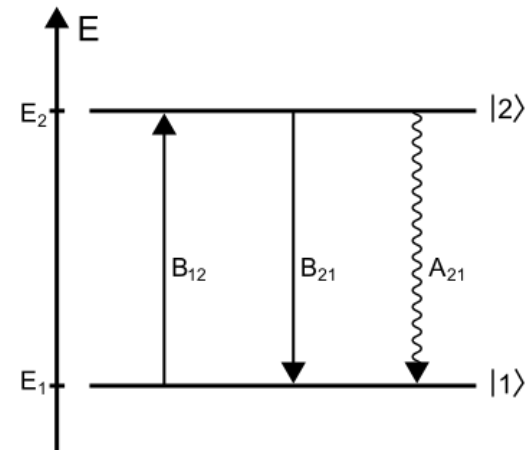
閉じた遷移の吸収断面積： $\sigma_{abs} = \frac{3\lambda^2}{2\pi}$ ← 波長のみ依存

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

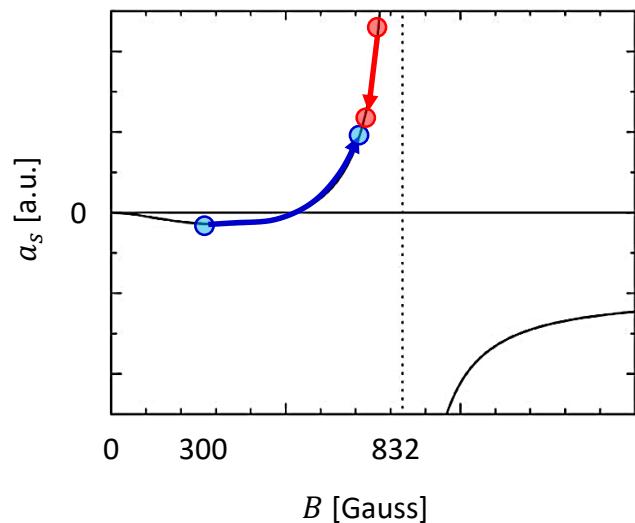
微細構造定数： $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$

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

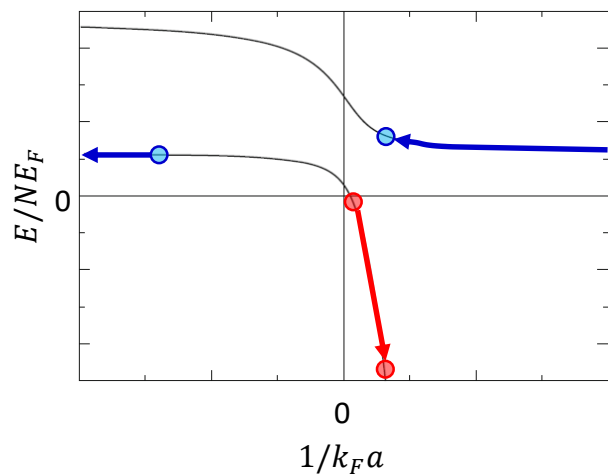


原子と分子の光学応答の違い

6Li原子のフェッシュバツハ共鳴

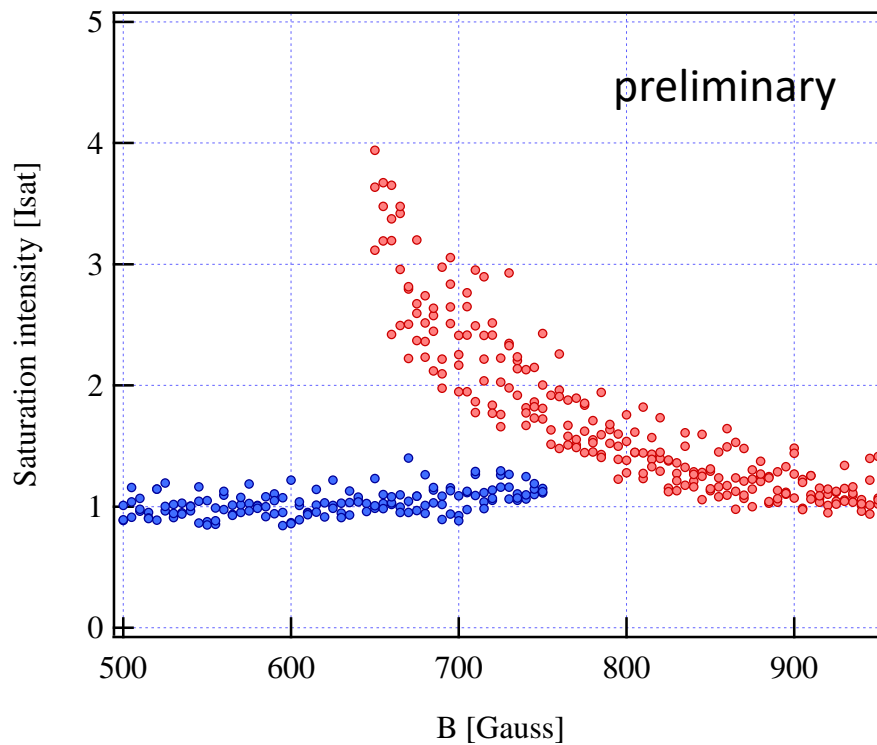


多体系の基底状態と第一励起状態



飽和強度の評価

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

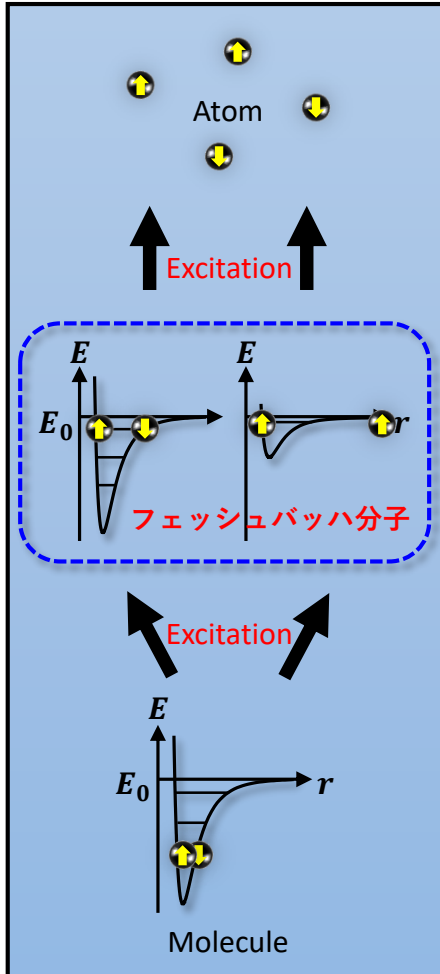


原子と分子で異なる振る舞い

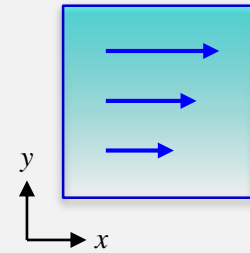
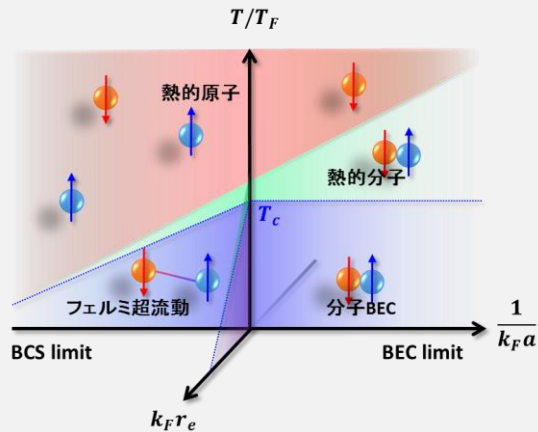
クラスター形成の検波に使えるか？

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

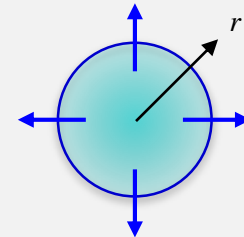


C02班：物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理



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

