



異なる質量をもつ2バンド系における 超伝導/超流動BCS-BECクロスオーバー

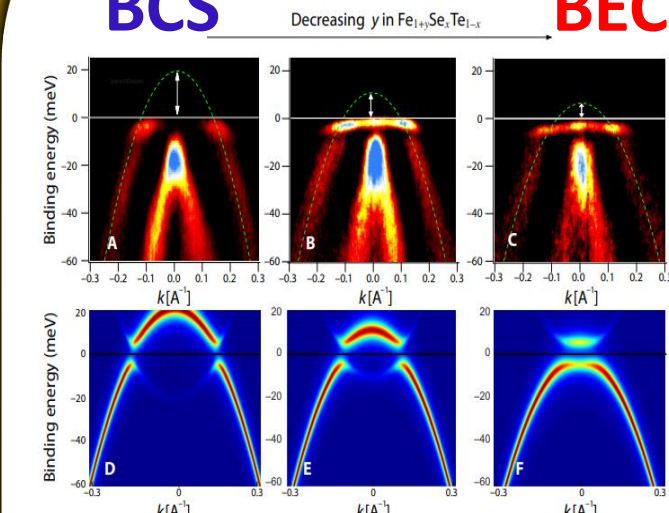
越智一成(高知大理工) 共同研究者: 田島裕之、飯田圭(高知大理工)、青木秀夫(東大理、産総研)

引力相互作用の変化に伴い起きる、BCS超流動/超伝導から束縛分子のBECへ移行するBCS-BECクロスオーバーが冷却フェルミ原子気体や鉄系超伝導体に対して議論されている。2バンド系ではこのクロスオーバーが多彩になることが期待され、本研究では異なる質量とバンドオフセットをもつ2バンド系での超伝導/超流動を調べた。特に、バンド間でペア交換を引き起こすペア散乱相互作用がある時に、バンド1に対してバンド2がどのような有効相互作用を及ぼすかを2本のバンド質量比を変えながら調べ、Feshbach共鳴的な特徴を明らかにした。

イントロダクション

マルチバンド系

鉄系超伝導体



Rinott et al., Sci. Adv. 2017;3:e1602372

G. Pagano, et al., Phys. Rev. Lett. 115,265301 (2015).

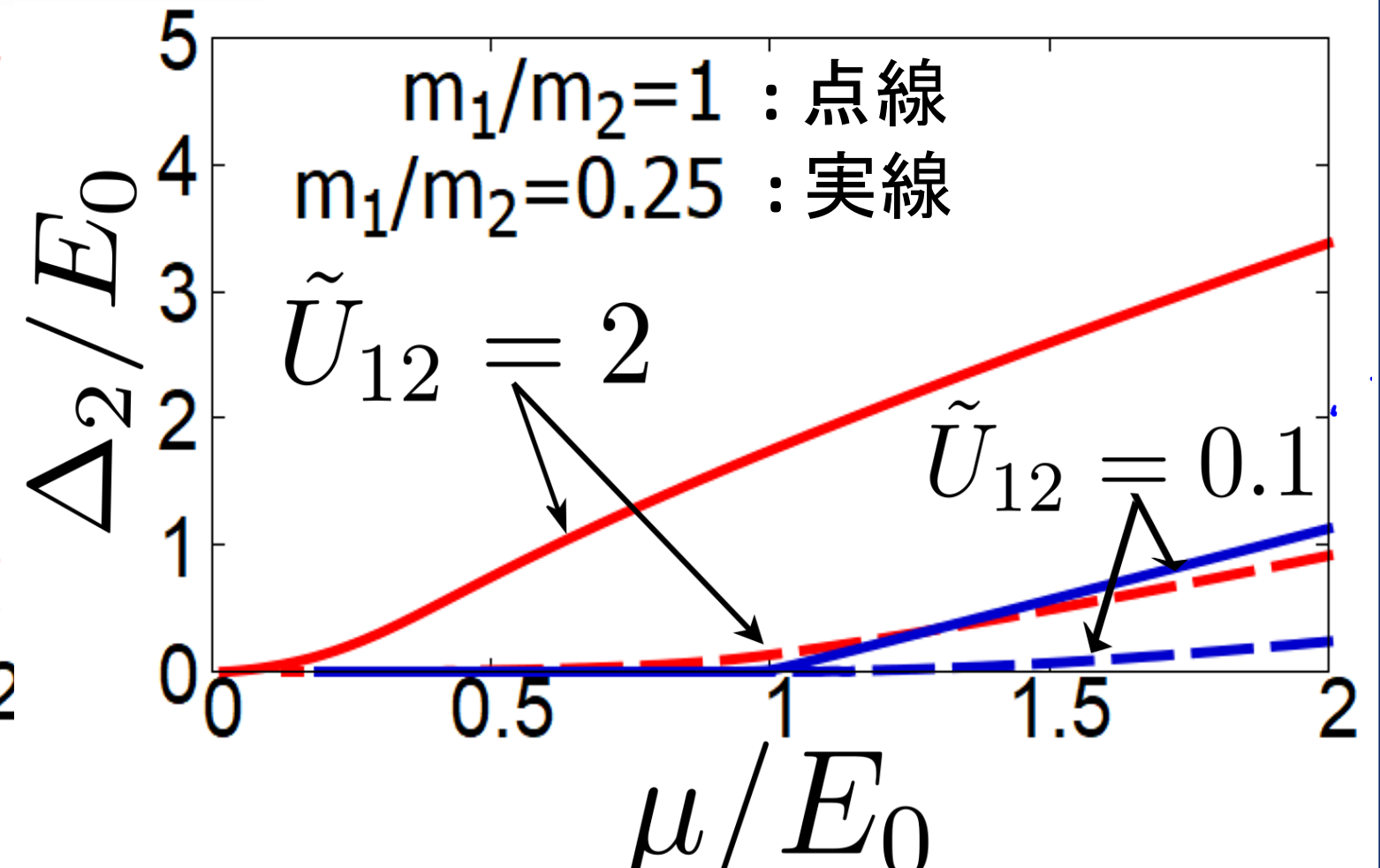
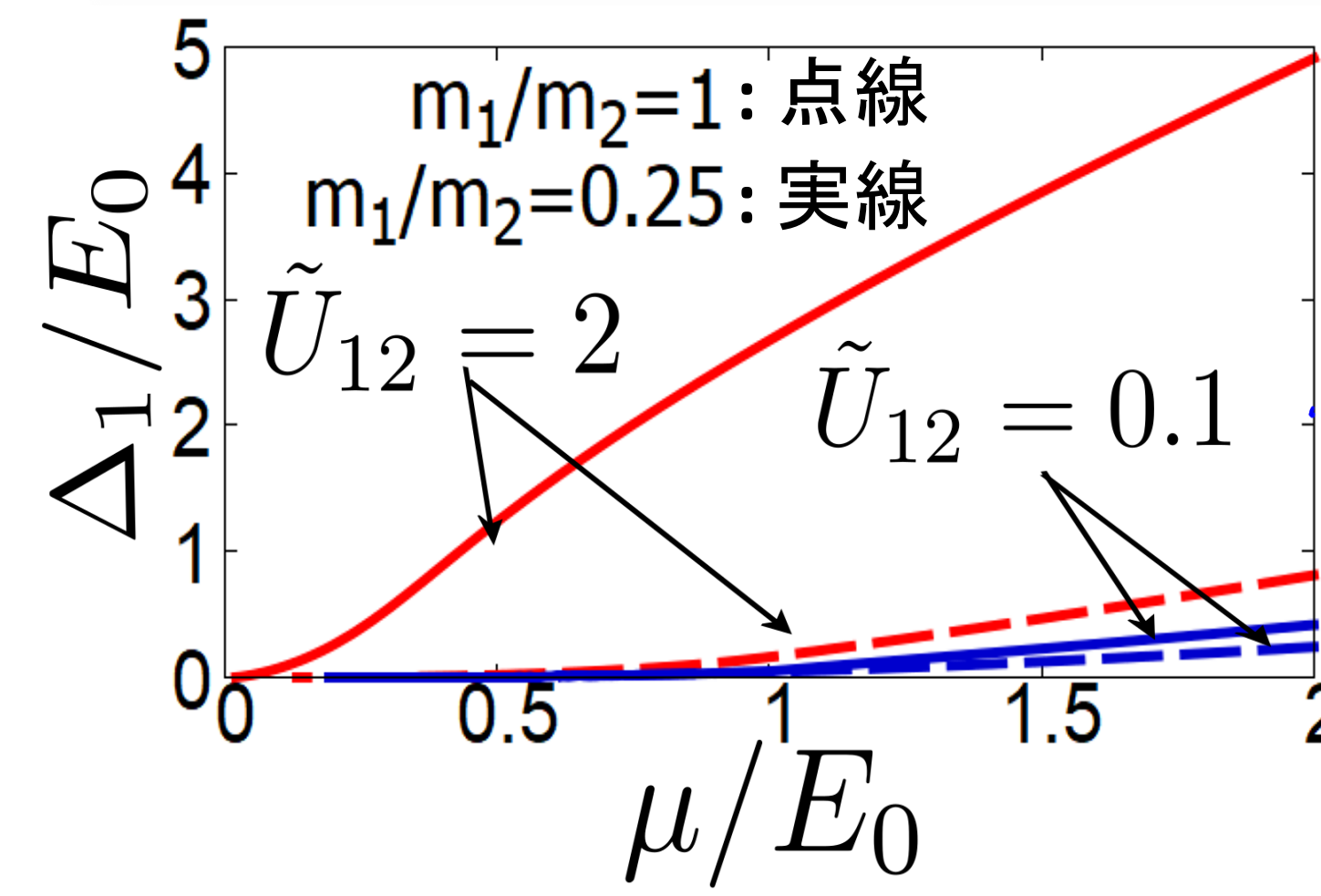
Orbital Feshbach共鳴

物質系、冷却原子系ともに、マルチバンド系においてユニタリティ極限、強結合領域への変化がみられる。

結果

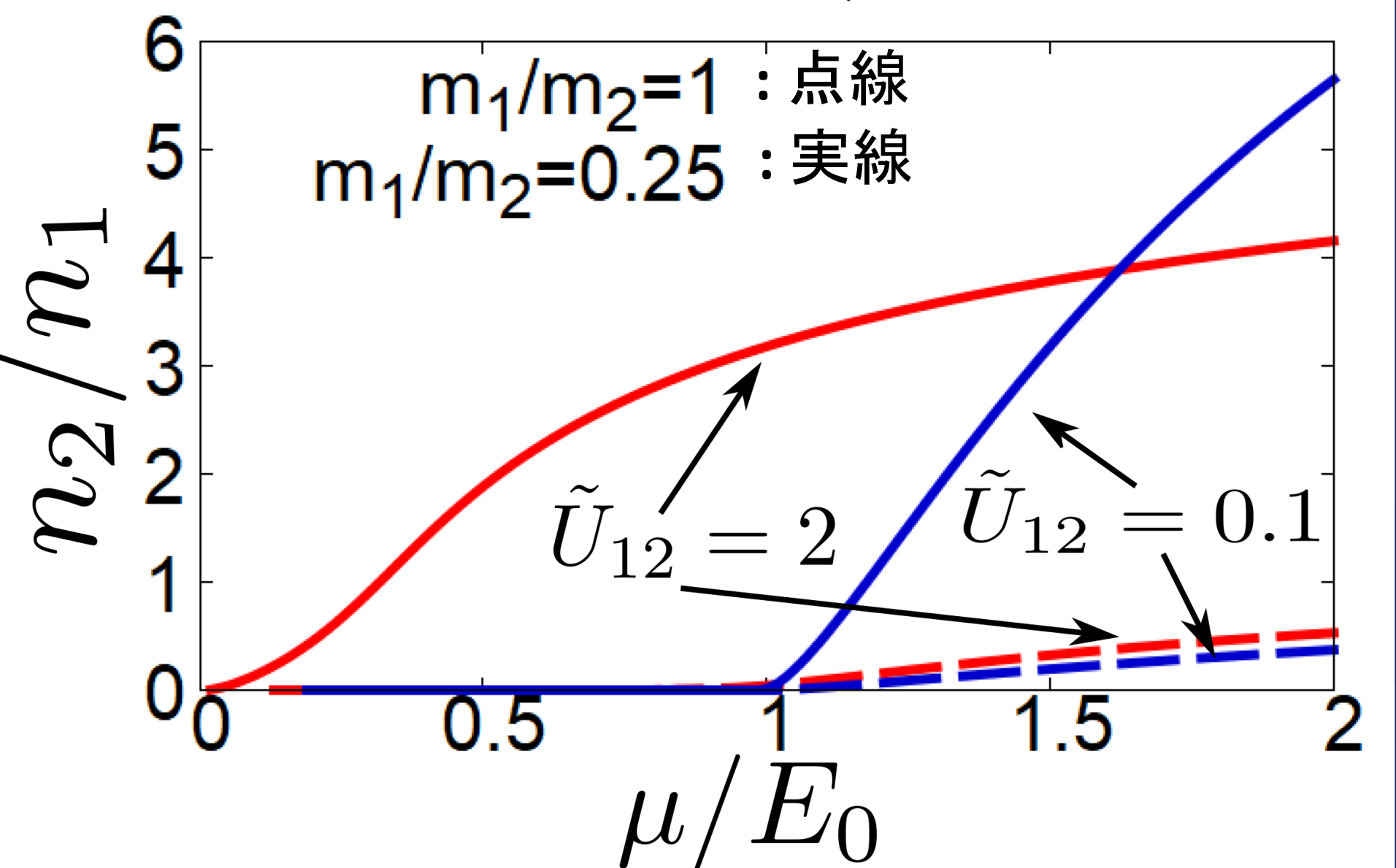
超伝導/超流動ギャップ

バンド1,2での超伝導/超流動ギャップ

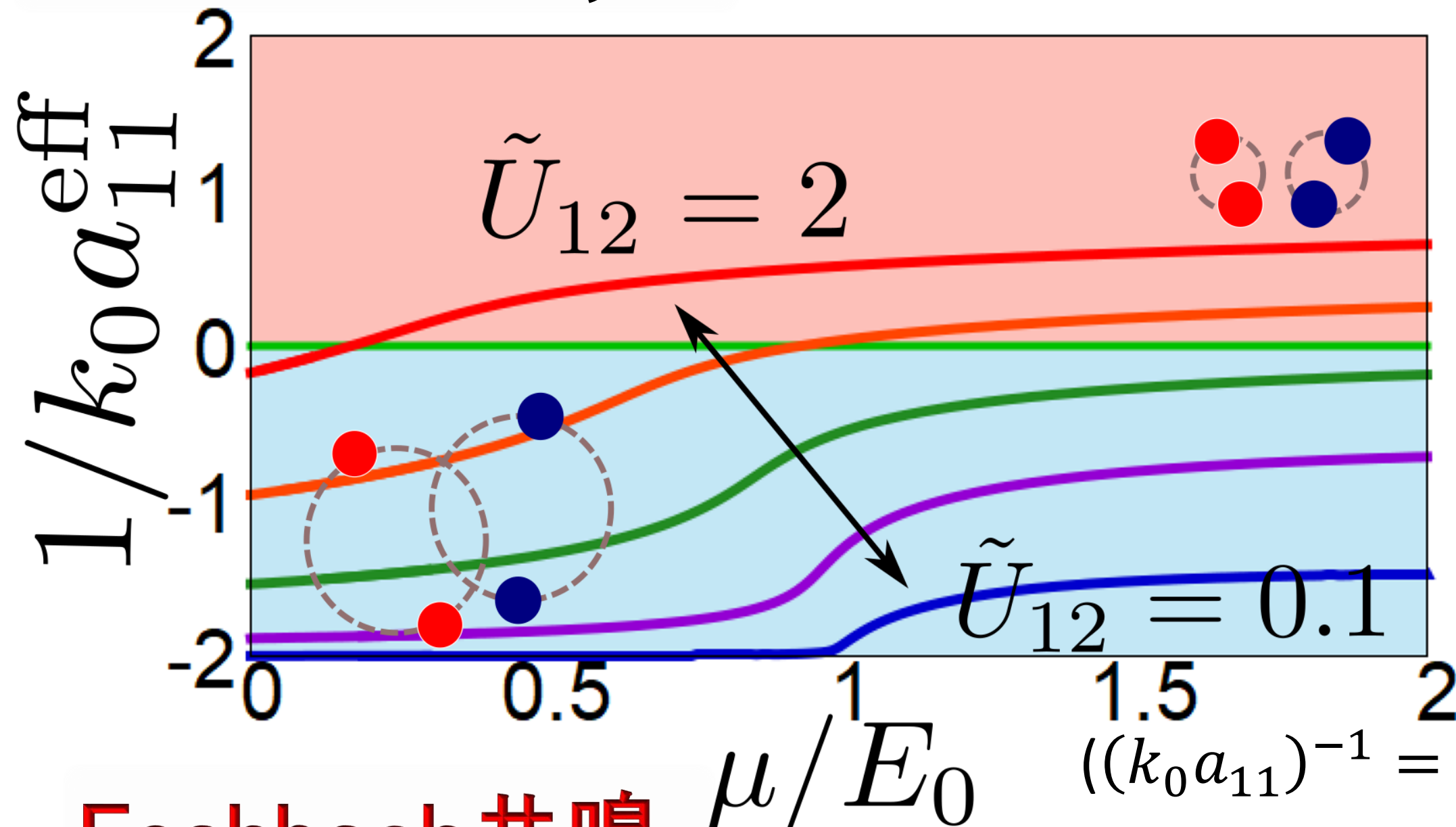


粒子数密度比

クロスポイントはバンド2を占有する単調な増加と U_{12}, U_{21} の寄与が生じることによる。

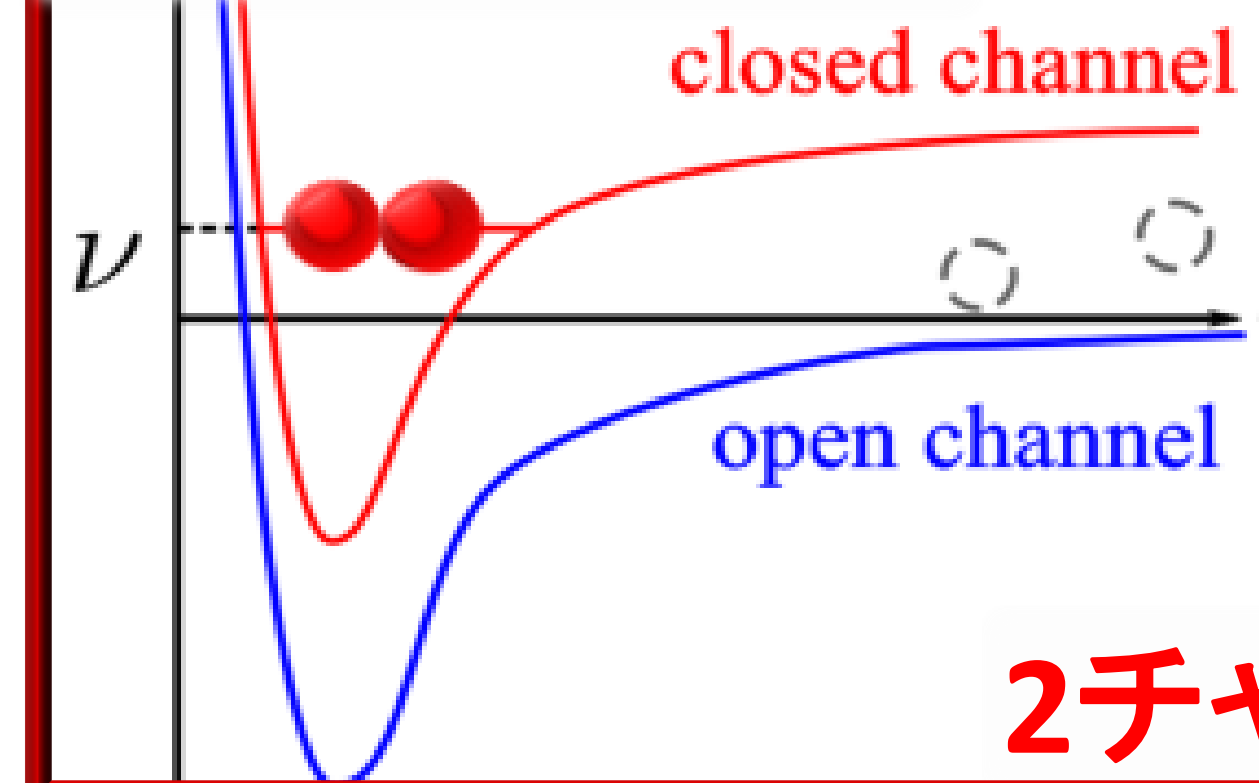


(有効散乱長)⁻¹



強結合
ユニタリティ
極限
弱結合

Feshbach共鳴



チャンネル間の混成を引き起こす g
 $\nu \leftrightarrow \mu - E_0$
 $g \leftrightarrow U_{12}$

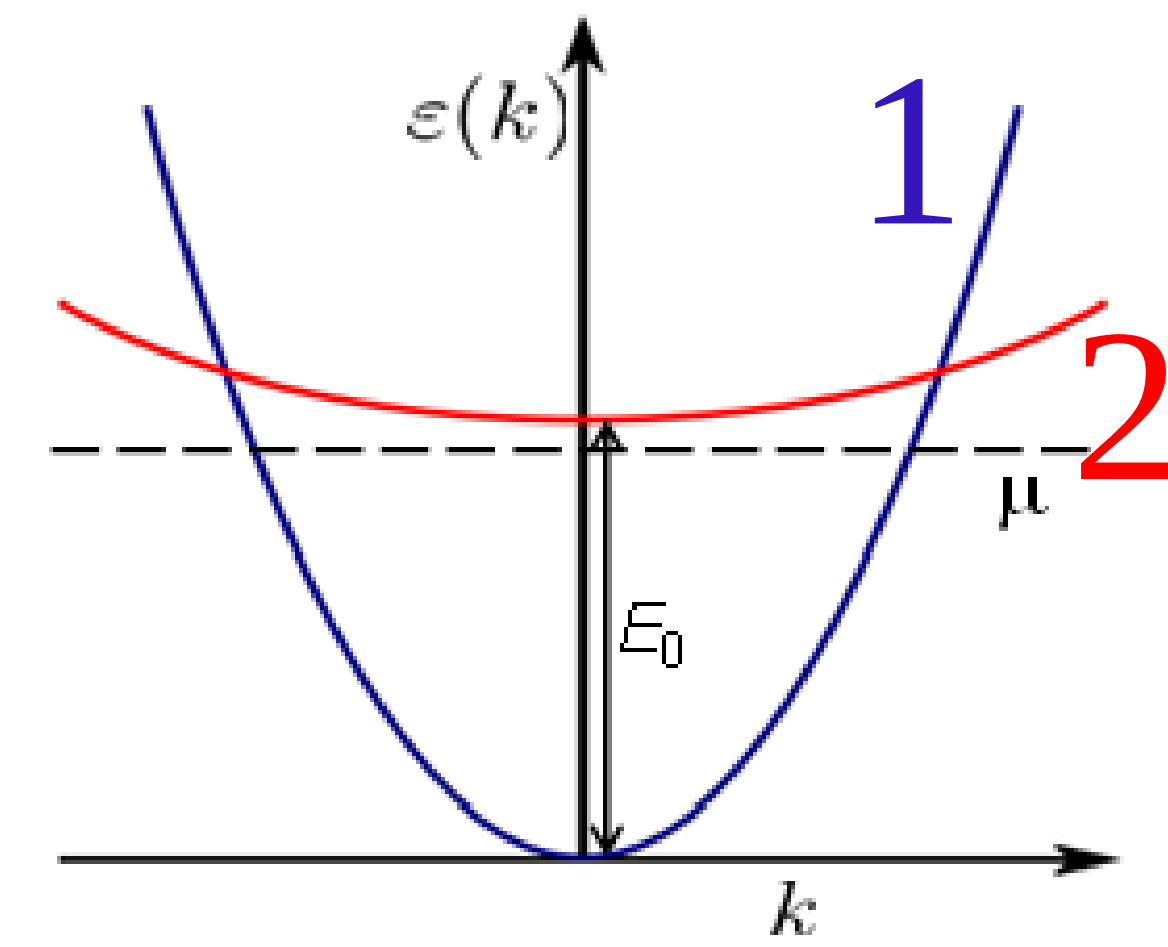
2チャンネル ↔ 2バンド

定式化

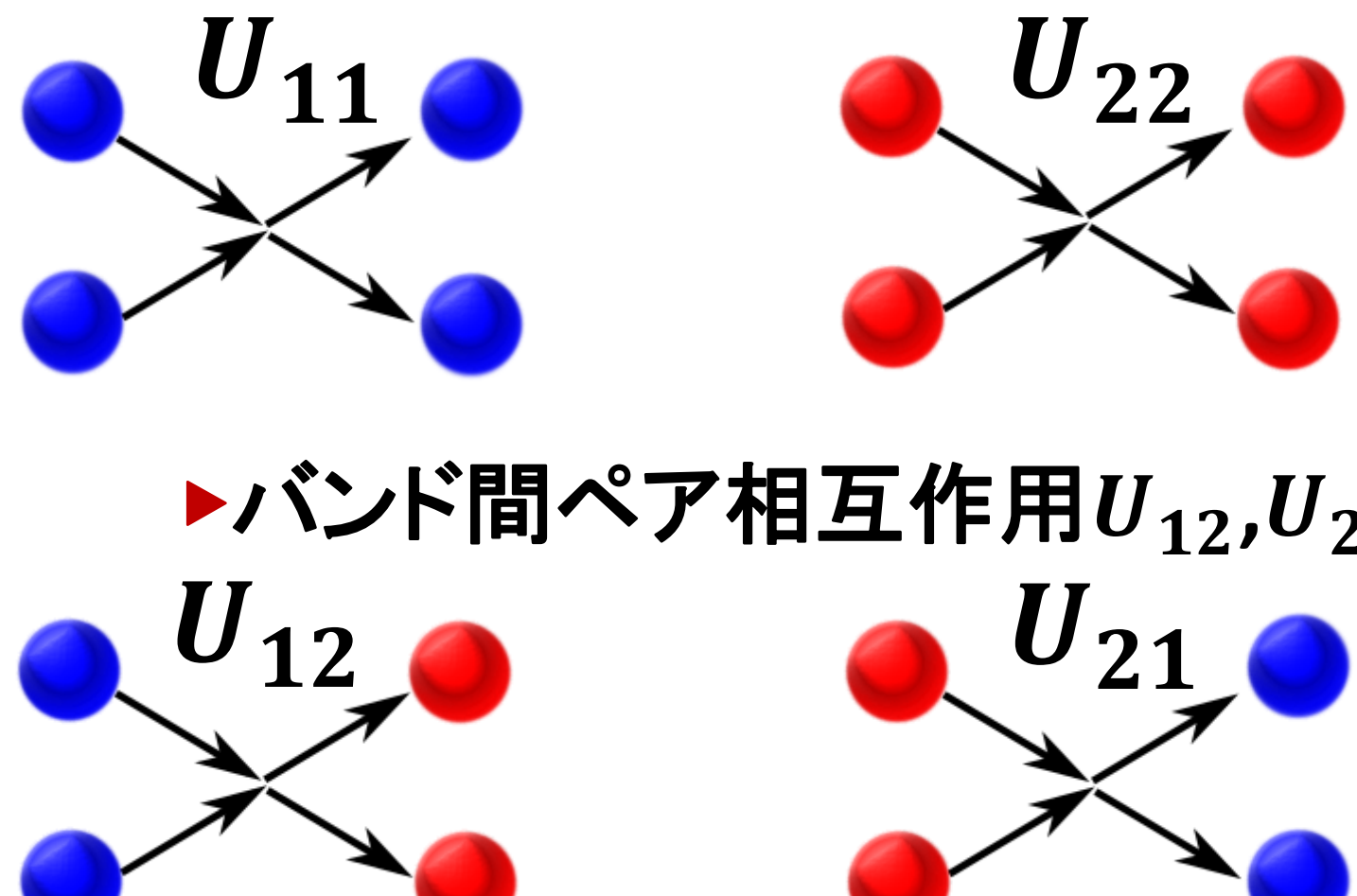
ハミルトニアン

$$H = \sum_{i,k,\sigma} \xi_{ki} C_{k\sigma i}^\dagger C_{k\sigma i} - \sum_{i,j} U_{ij} \sum_{k,k',q} C_{k+q/2,i}^\dagger C_{-k+q/2,i}^\dagger C_{-k'+q/2,j} C_{k'+q/2,j}$$

2バンド系の概念図



バンド内ペア相互作用 U_{11}, U_{22}



バンド間ペア相互作用 U_{12}, U_{21}



● バンド添え字 $i,j=1,2$

● バンド i のフェルミオンの消滅演算子 $C_{k,\sigma,i}$

● バンドオフセットのエネルギー E_0

● バンド1,2の粒子の質量 m_1, m_2

● 各バンドでの運動項

● 化学ポテンシャル μ

● カットオフ Λ

$$\xi_{ki} = \frac{k^2}{2m_i} - \mu + E_0 \delta_{i2}$$

BCS平均場理論

ギャップ方程式

$$\Delta_i = \sum_{j=1,2} U_{ij} \Delta_j \sum_{k'} \frac{\tanh \frac{E_{k'j}}{2T}}{2E_{k'j}} \quad (E_{ki} = \sqrt{\xi_{ki}^2 + \Delta_i^2})$$

粒子数方程式

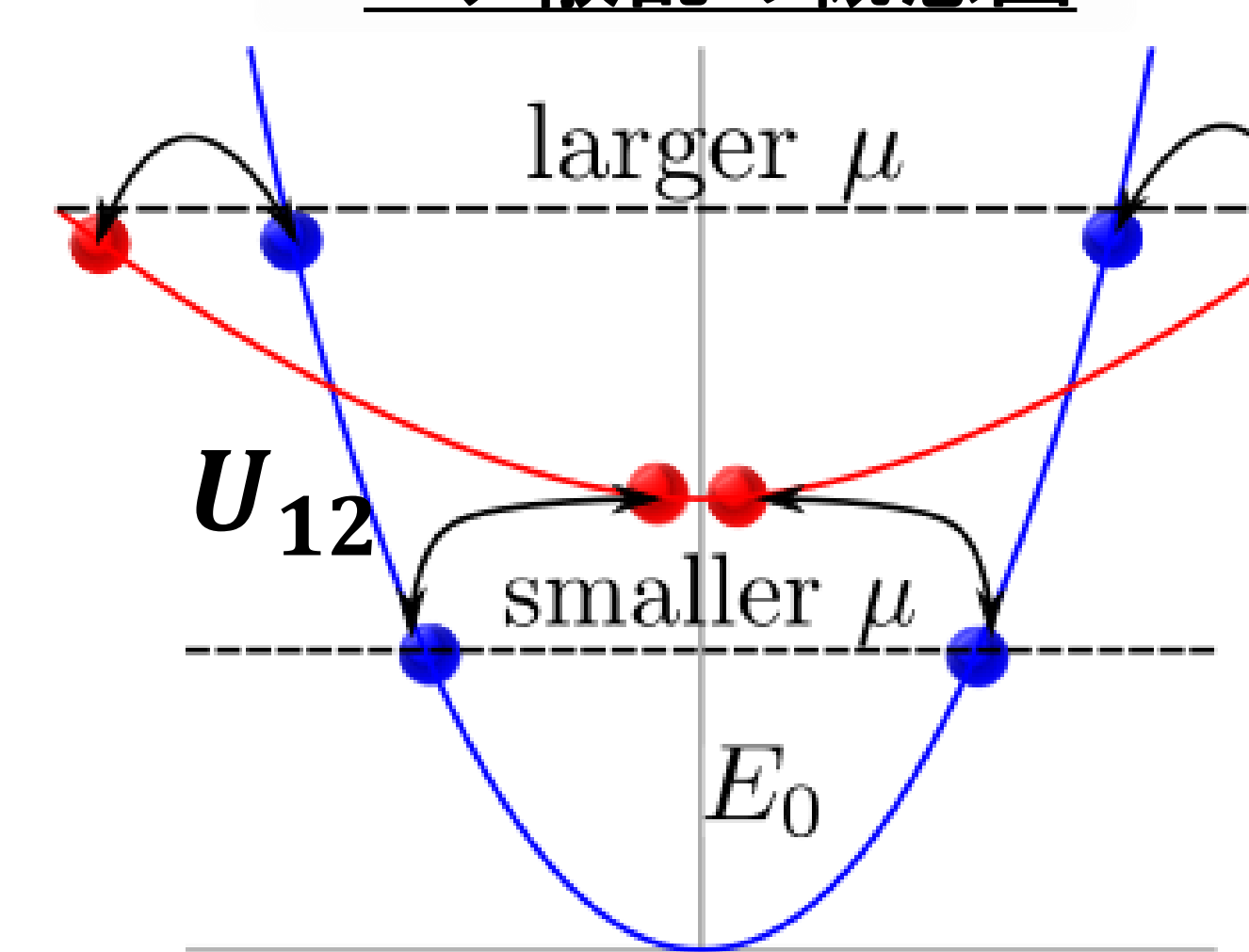
$$n_i = 2 \sum_k [v_i^2(k) f(-E_{ki}) + u_i^2(k) f(E_{ki})]$$

有効相互作用、散乱長

$$\Delta_1 = \left(U_{11} + \frac{U_{12} U_{21} \Sigma_p \frac{1}{2E_{p2}}}{1 - U_{22} \Sigma_p \frac{1}{2E_{p2}}} \right) \sum_p \frac{\Delta_1}{2E_{p1}} = U_{11}^{\text{eff}} \sum_p \frac{\Delta_1}{2E_{p1}} \quad (U_{12} \propto \frac{1}{\Lambda^2} \tilde{U}_{12})$$

ペア散乱の概念図

有効相互作用



有効散乱長の定義

$$\frac{m_1}{4\pi a_{11}^{\text{eff}}} = -\frac{1}{U_{11}^{\text{eff}}} + \sum_p \frac{1}{2E_{p1}}$$

まとめ

- 超伝導/超流動ギャップはペア散乱の大きさが強いほど増加し、さらにバンド2がフラットに近づくにつれて増加傾向にある。
- 質量比が大きい時にバンド1での有効散乱長は負から正に変化しており、それがユニタリティをまたいで弱結合から強結合へのクロスオーバーを引き起こす。これがFeshbach共鳴とアナログに理解することができる。
- 冷却原子系では、¹⁷³Yb原子を用いて最外殻電子の基底状態と励起状態(軌道自由度)を用いて2バンド系のorbital Feshbach共鳴が実現されている。現在この引力機構を用いての超流動は実現されていないが今後期待されている。また物質系ではマルチバンド系の鉄系超伝導体で実験により Δ/E_F を調べることでクロスオーバー領域にあることが観測されている。一般には、今回の結果からマルチバンドによる寄与が系を強結合領域にシフトさせる要因の一つとなり得ることが示唆される。

$m_1/m_2 = 1$ での2バンド系: Y. Yerin, et al., Phys. Rev. B 100, 104528 (2019).

orbital Feshbach共鳴: G. Pagano, et al., Phys. Rev. Lett. 115,265301 (2015).