

カラー超伝導相転移と 低不変質量領域の レプトン対生成の異常生成

北沢正清

(阪大理)

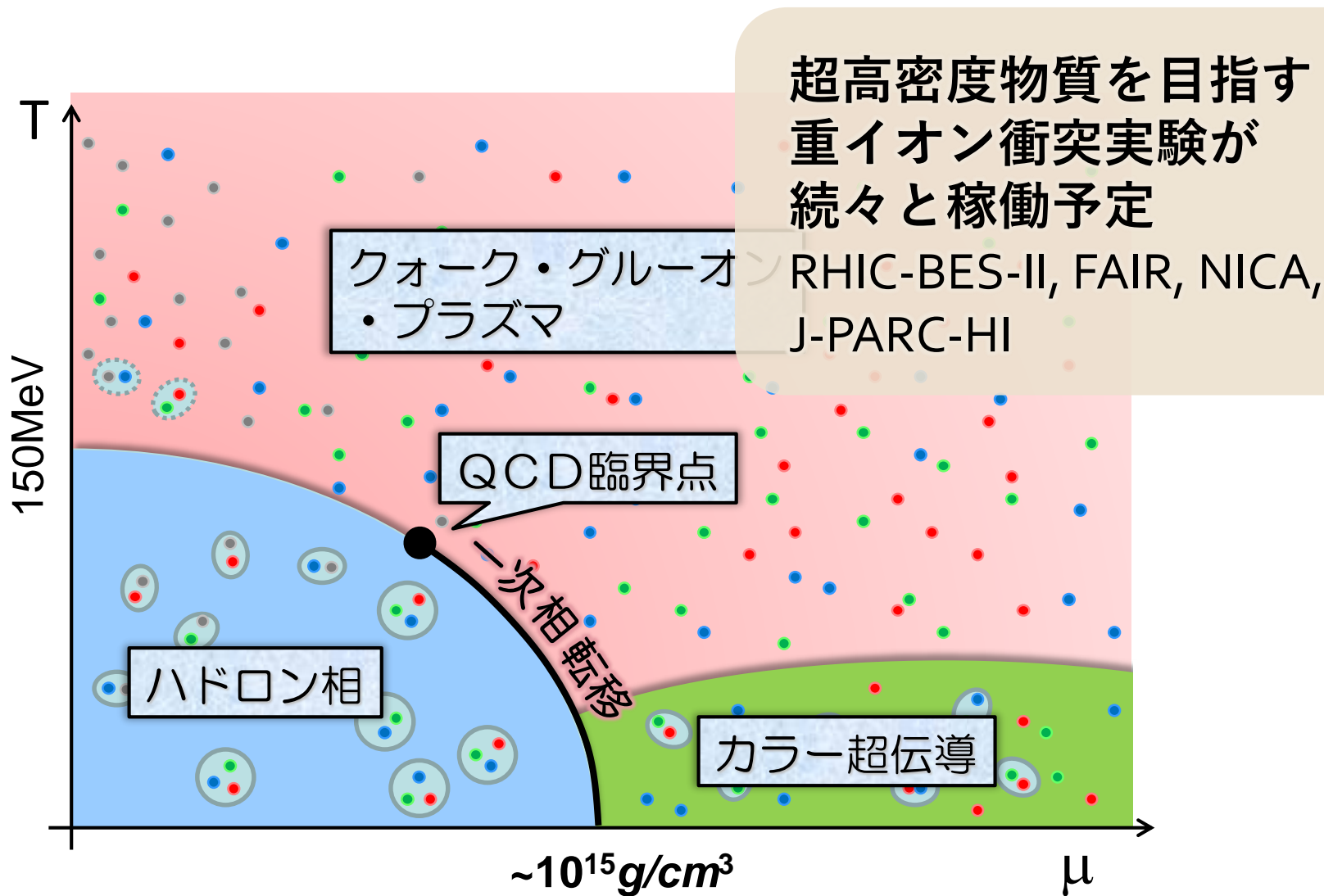
国広悌二

(京大基研)

MK, PhD Thesis, Kunihiro+, 0711.4429

日本物理学会2019年度秋季大会、山形大学、2019年9月18日

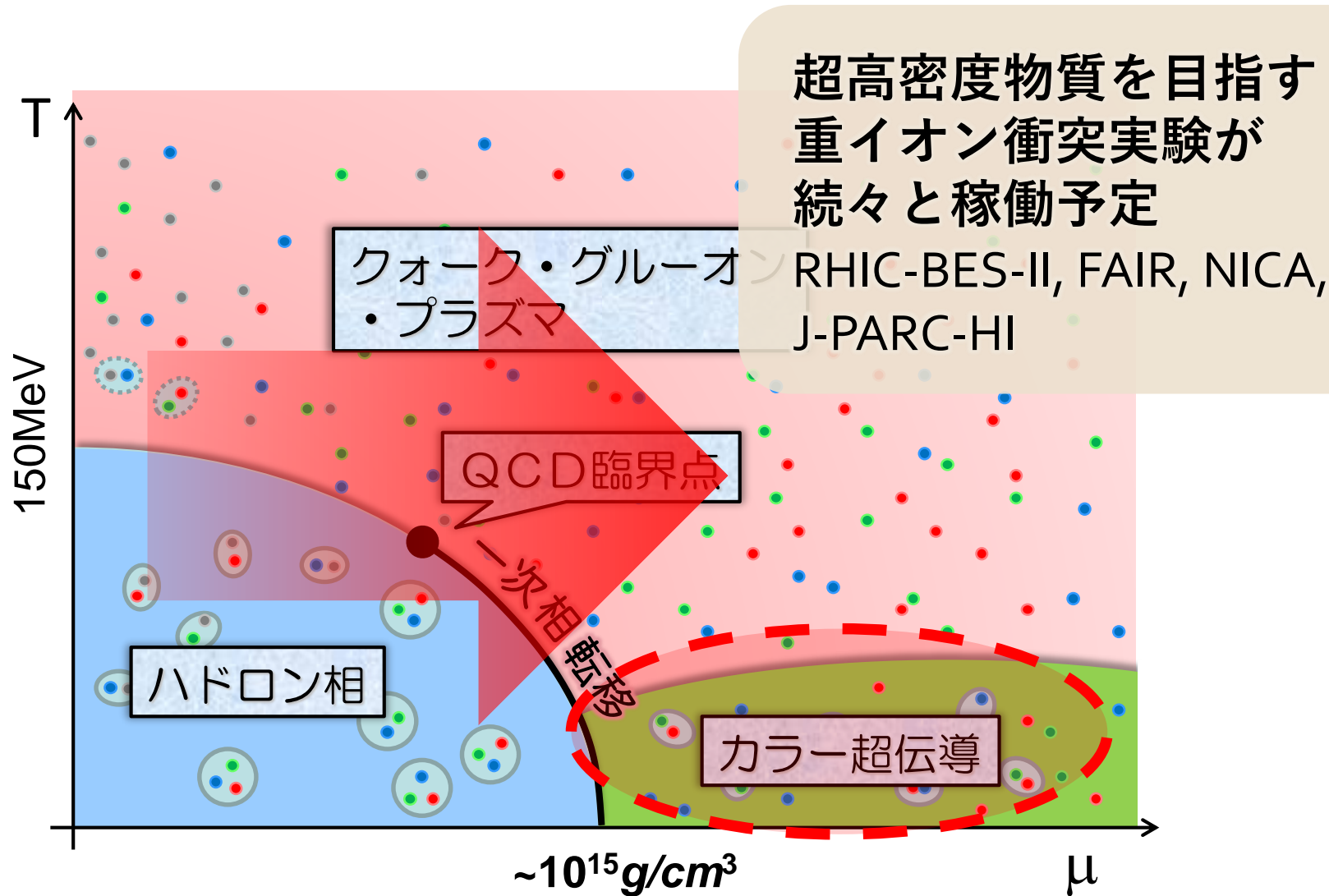
超高密度物質探索



超高密度物質を目指す
重イオン衝突実験が
続々と稼働予定

RHIC-BES-II, FAIR, NICA,
J-PARC-HI

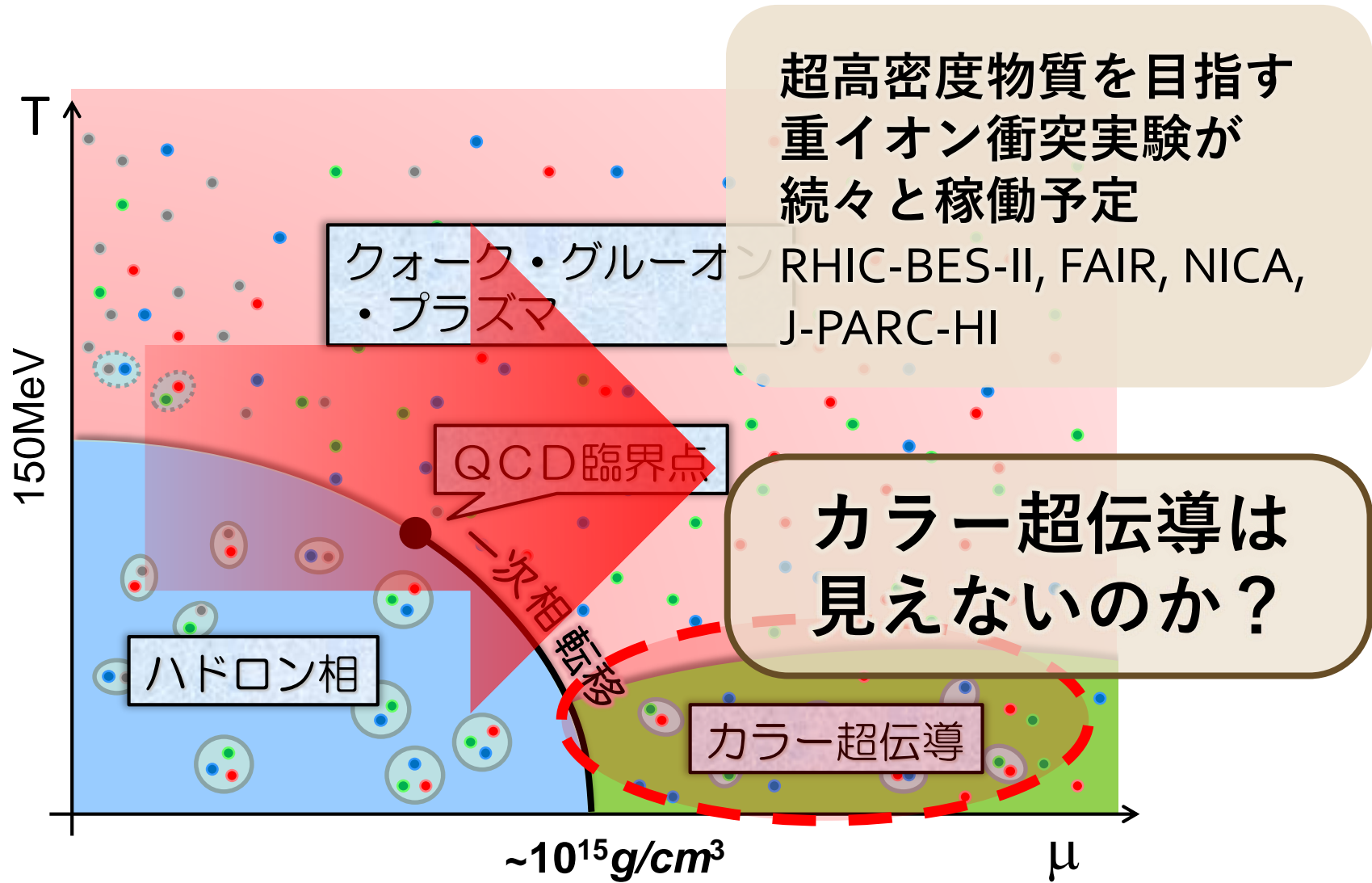
超高密度物質探索



超高密度物質を目指す
重イオン衝突実験が
続々と稼働予定

RHIC-BES-II, FAIR, NICA,
J-PARC-HI

超高密度物質探索



カラー超伝導の観測に向けて

衝突後の最初期状態を探索する必要性

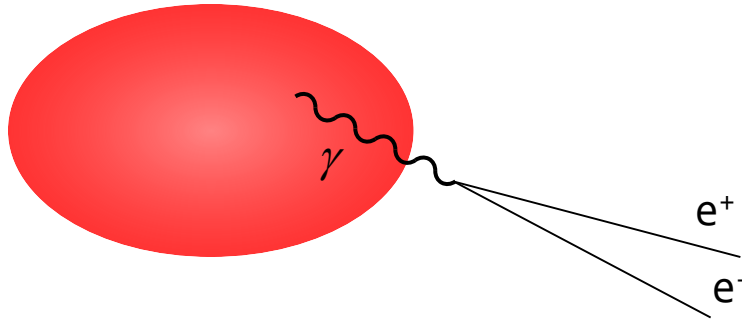
- ハドロンのシグナルは終期時間発展で消失
 - 例: ダイクオーク相関
- 十分な熱平衡に至るかも不明
- 状態方程式・比熱などの効果は一次相転移との峻別が困難か。

衝突最初期の直接的探針



電磁プローブ（光子・レプトン対）が唯一の可能性？

レプトン対生成量



メリット

- 一度生成されると、物質を透過
- 初期状態のシグナルも観測可能

デメリット

- 時空発展の各段階で生成
- シグナルを分離抽出する必要性

本研究

高密度物質が二次相転移線上を
通過する際のレプトン対生成

MK, PhD Thesis, Kunihiro+, 0711.4429



CSC中のレプトン対生成率

Litim, Manuel (01); Jaikumar, Rapp, Zahed (02)

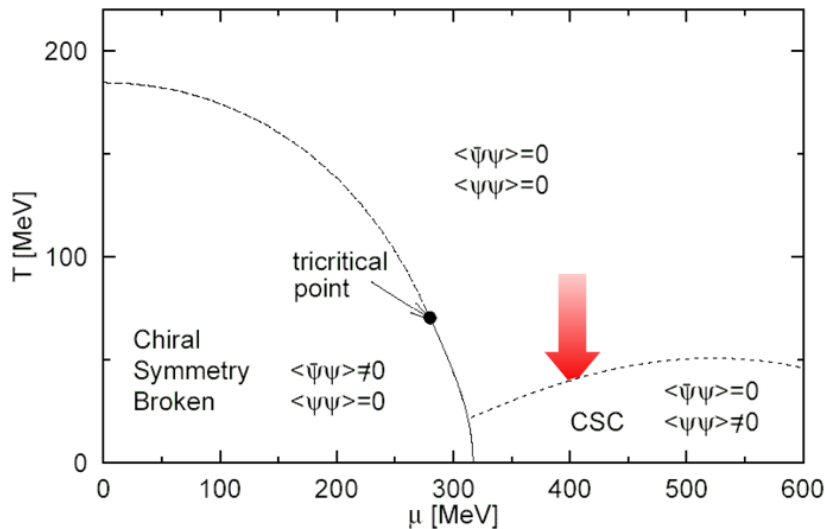
ソフトモード

$$\varepsilon = \frac{T - T_c}{T_c}$$

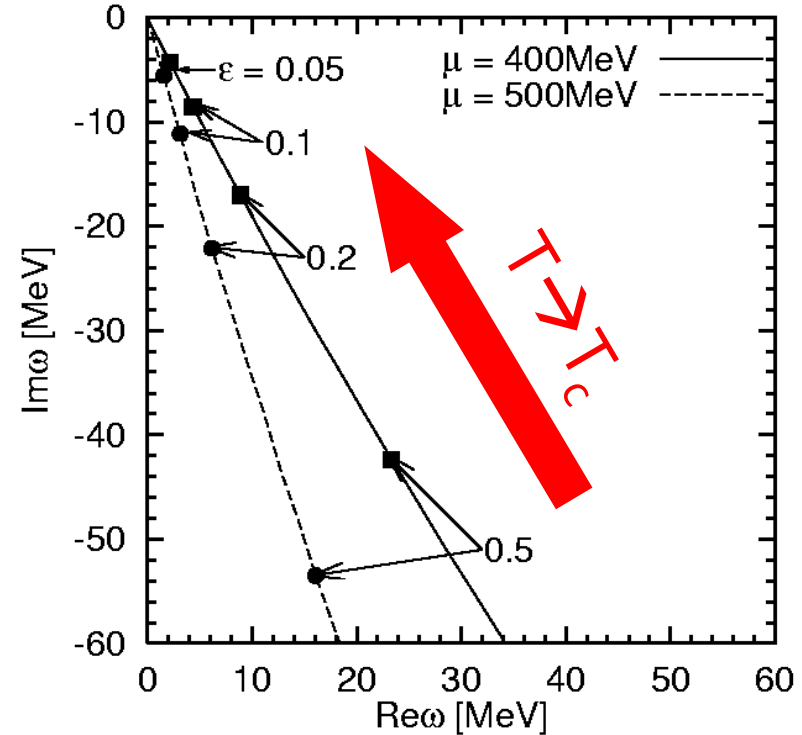
二次相転移点で発達する秩序変数ゆらぎモード

カラー超伝導ではクォーク対相関

$$\Xi(\omega, k) = G_D + \text{loop diagrams} + \dots$$



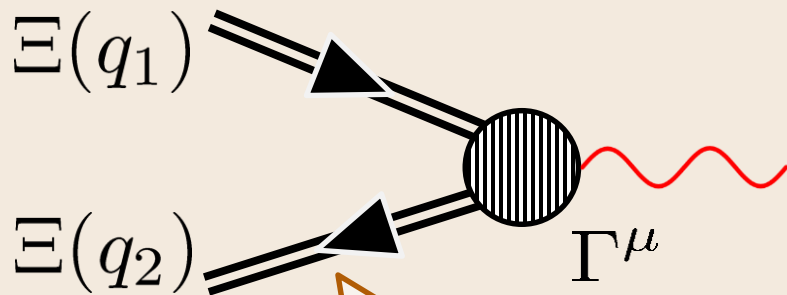
ソフトモードの極 MK+, 2002



ソフトモードの対消滅 → 低E仮想光子の異常な生成
二次相転移線通過のユニークなシグナル?

仮想光子生成機構

ソフトモードの対消滅

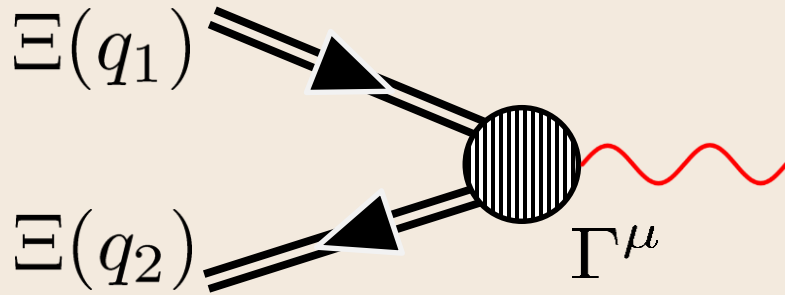


ソフトモード

$$\Xi(q) = \text{==>}$$

仮想光子生成機構

ソフトモードの対消滅



レプトン対生成率

$$\frac{d\Gamma}{d^4Q} = -\frac{\alpha g^{\mu\nu} \text{Im}\Pi_{\mu\nu}(Q)}{12\pi^4 Q^2} n_B(q_0)$$

光子偏極関数

A Feynman diagram for the photon polarization function $\Pi^{\mu\nu}$. It consists of two shaded circular vertices, each labeled Γ^μ and Γ^ν . Two double lines with arrows connect these vertices in a loop. A diagonal yellow line is drawn across the loop. The diagram is equated to an integral expression:

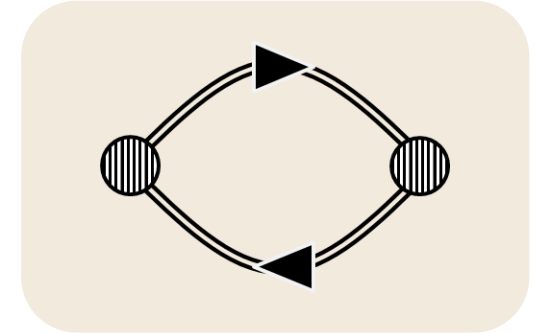
$$\Pi^{\mu\nu} = \text{Diagram} = \frac{T}{3} \sum_n \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \text{Tr}[\Xi(q_1)\Gamma^\mu(q_1, q_2)\Xi(q_2)\Gamma^\nu(q_2, q_1)]$$

TDGL方程式・WT恒等式

□ ソフトモード

(線形化)TDGL方程式($T > T_c$)

$$\begin{aligned}\Xi(\omega, k)^{-1} &= \text{====>} \\ &= A\varepsilon + C_0\omega + Ck^2\end{aligned}$$



$$\longleftrightarrow (-iC_0\partial_t + C\nabla^2 + A\varepsilon)\Delta = 0$$

□ 頂点関数

Ward-Takahashi恒等式: $(q_2 - q_1)_\mu \Gamma^\mu(q_1, q_2) = \frac{1}{3} (\Xi(q_2)^{-1} - \Xi(q_1)^{-1})$

原点での解析性 $\rightarrow \Gamma^0 = \frac{1}{3}C_0, \quad \Gamma^i = \frac{1}{3}C(q_1 + q_2)^i$

$$\longleftrightarrow j^i = -\frac{e^*}{2m^*} \text{Im}(\Delta^* \nabla^i \Delta)$$

パラメータの推定

2-flavor NJL模型

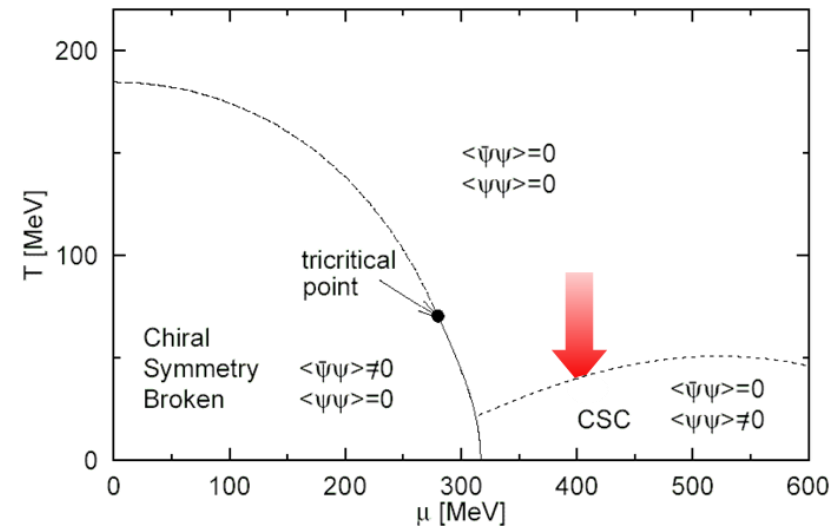
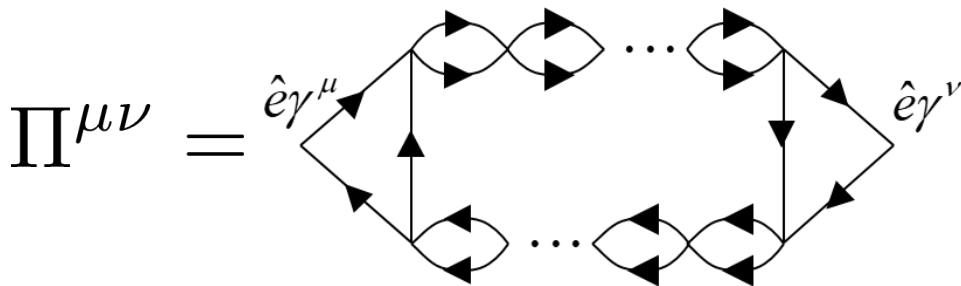
$$L = \bar{\psi} i \gamma \cdot \partial \psi + G_S \left[(\bar{\psi} \psi)^2 + (\bar{\psi} i \gamma_5 \boldsymbol{\tau} \psi)^2 \right] + G_C (\bar{\psi} i \gamma_5 \tau_2 \lambda_A \psi^c) (\bar{\psi}^c i \gamma_5 \tau_2 \lambda_A \psi)$$

$$G_S = 5.01 \text{ GeV}^{-2}$$

$$\Lambda = 650 \text{ MeV}$$

$$G_C / G_S = 0.62$$

Aslamasov-Larkin項

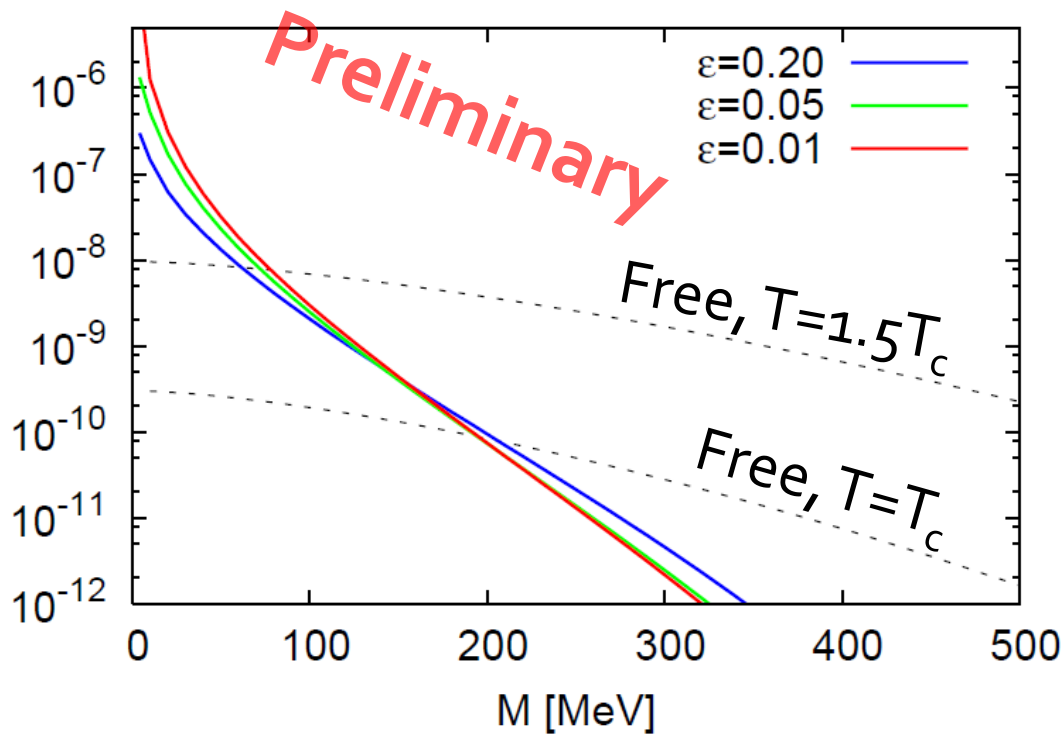


$$\Xi(\omega, k) = G_D + \text{loop} + \text{loop} + \dots$$

$$\Gamma^\nu = \text{triangle loop} \hat{e}\gamma^\nu$$

数値計算結果

単位不変質量あたり生成率

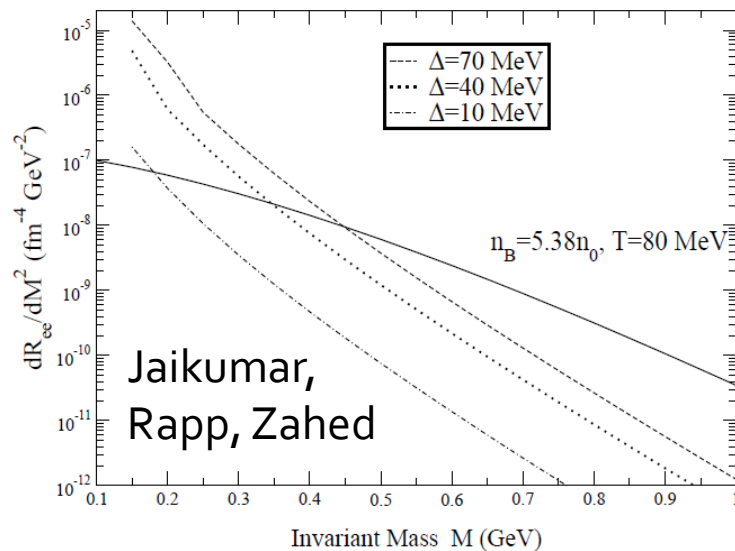


$$\epsilon = \frac{T - T_c}{T_c}$$

$\mu=400\text{MeV}$
 $G_D=0.62G_S$

参考

CFL相内部での生成率



- 低不変質量($M < 100\text{MeV}$)で強い増大
- CSCのシグナルとして観測可能か？
- 制動放射との競合は？

まとめと議論

カラー超伝導への二次相転移の実現は、低不変質量領域のレプトン対生成量増大をもたらす。
→ 実験的観測量として使用可能か？

まとめと議論

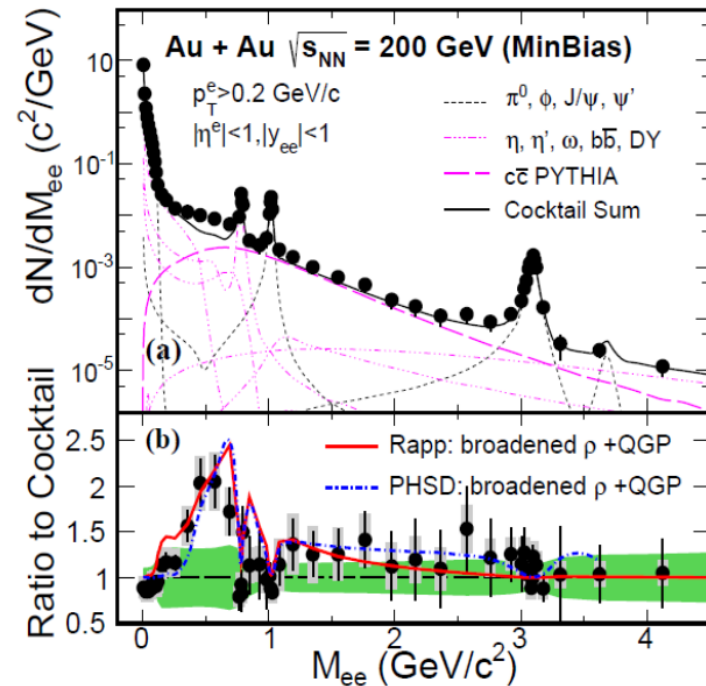
カラー超伝導への二次相転移の実現は、低不変質量領域のレプトン対生成量増大をもたらす。
→ 実験的観測量として使用可能か？

実験的挑戦

- e_+e_- を使う必要性。($\mu_+\mu_-$ は不可)
- Dalitz崩壊の除去。超高統計解析
- 運動量ビンに分割した解析

理論的課題

- Maki-Thompson項
- 制動放射
- QCD臨界点のソフトモード



Maki-Thompson: 

電気伝導度

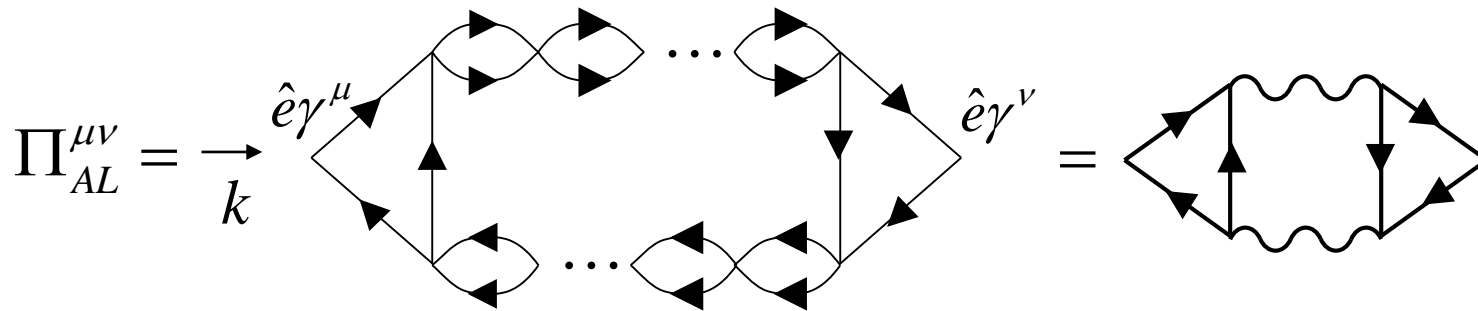
Electric Conductivity

Kubo Formula

$$\sigma = -\lim_{\omega \rightarrow 0} (1/\omega) \text{Im} K^{Rii}(k=0, \omega)$$

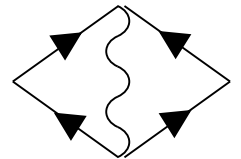
$$K(Q) = \int dx e^{iQ \cdot x} \langle [j(x), j(0)] \rangle \mathcal{G}(t) = \Pi^R(Q)$$

Aslamasov-Larkin term

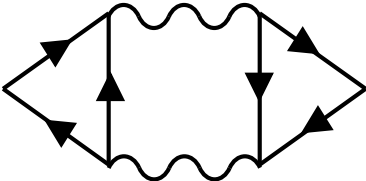


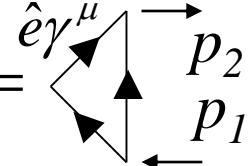
$$= 3 \int d^4 q \Gamma^\mu(q, q+k) \Xi(q+k) \Gamma^\nu(q+k, q) \Xi(q)$$

cf) Maki-Thompson term



Vertex Γ

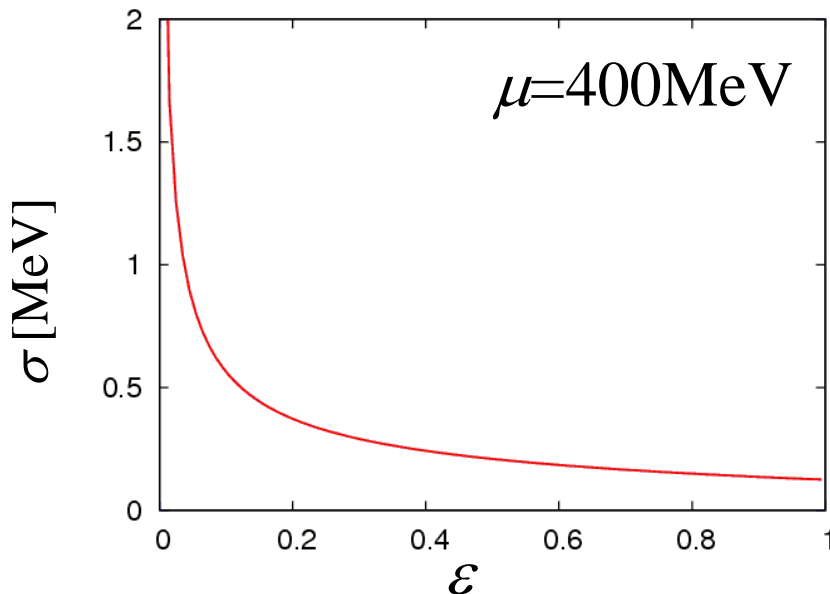
$$\Pi_{AL}^{ij}(\mathbf{k}, \omega) = \text{Diagram} = 3 \frac{4e^2}{9} C^2 \int d^4 q q^i q^j \Xi(q+k) \Xi(q)$$


$$\Gamma^\mu(p_1, p_2) = \text{Diagram}$$


for $\omega, k \rightarrow 0$

$$\Gamma^0(q, q) = \frac{e}{3} c_0 \quad \Gamma^i(q, q) = \frac{2e}{3} q^i c$$

Numerical Result



Electric conductivity diverges
as $\sigma \sim \epsilon^{-1/2}$
as T lowers toward T_c .