⑨ サブ課題 A : 究極の自然法則と宇宙開闢の解明

概要： SuperKEKBやJ-PARCで行われる素粒子の精密実験に呼応し、それらと相補的な役割を果たす精密計算を実現して素粒子標準模型を検証する。ここでは、格子量子色力学の大規模数値シミュレーションなどにより素粒子反応における標準模型からの寄与を精密に求めることが鍵となる。標準模型からのずれが見つかれば、それは新しい物理法則発見への手がかりとなる。また、究極理論の候補とされる超弦理論のシミュレーションにより、宇宙開闢の謎にせまる。

「京」時代の成果と課題

[素粒子現象論]
格子上の量子色力学(QCD)のシミュレーションは、(以前は困難だった)軽いクォーク・ループの影響を取り入れて現実のQCDを再現するという目標をほぼ達成した。次の課題は、より精密な計算、さらには散乱や崩壊などの複雑な過程の計算である。

[QCD相転移]
相転移の次数や温度、状態方程式の計算が行われ、連続極限での結果が得られている。一方、QCD相図の全体像は固まっておらず、有限密度の効果を取り入れる計算手法も確立していない。

[超弦理論]
ゲージ重力対応を検証する研究や(超弦理論の基礎方程式としての)行列模型のシミュレーションが始まった。しかし、理論の全体像は未だに未解明で、宇宙開闢の計算も初期段階にある。

ポスト「京」で期待される成果

[素粒子現象論]
小さな格子間隔での格子QCDシミュレーションにより、重いボトムクォークの直接計算も可能になり、B中間子崩壊などに対する素粒子標準模型からの寄与を精密に計算できる。格子QCDは「精密科学」と呼べる段階に入り、新物理法則探索においてSuperKEKB実験やJ-PARC実験と相補的役割を果たす。

[QCD相転移]
カイラル対称性を精密に扱った計算で軽いクォーク領域での相転移の次数を確定させる。

[超弦理論]
ゲージ重力対応の検証をさらに進め、ゲージ理論を通じた量子重力の非摂動計算を実現する。行列模型のシミュレーションにより、空間3次元の宇宙創世とインフレーションに対する理解が進む。

サブ課題Ａ「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」
分担機関：高エネルギー加速器研究機構(KEK)

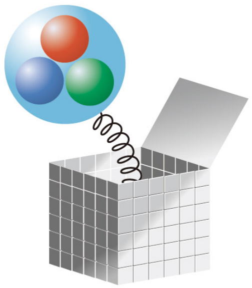
[素粒子現象論] 取りまとめ　金児隆志
研究員： Brian Colquhoun (Glasgow → KEK)

[QCD相転移] 取りまとめ　橋本省二
研究員：　青木保通 (名古屋大KMI → KEK）

[超弦理論] 取りまとめ　西村淳
研究員：　伊藤祐介（総研大　→ KEK）

分担機関：広島大学
[ポスト京向けコード最適化] 取りまとめ　石川健一
研究員：　金森逸作（広島大）

協力機関：大阪大学、名古屋大学、東北大学、筑波大学、新潟大学、理研BNLセンター、静岡大、慶応大、摂南大、九州大、岡山光量子研



有限温度QCD相転移におけるカイラル対称性の役割

橋本省二 (KEK, 総研大)

@ 京からポスト京シンポジウム

東京, 2016年3月31日

計算基礎科学連携拠点
Joint Institute for Computational Fundamental Science
JICFuS

国立大学法人
総合研究大学院大学
The Graduate University for Advanced Studies [SOKENDAI]

何をいまさら…

<u>自発的対称性の破れ</u>（とその回復）

高温 $SU(2)_L \times SU(2)_R$

$T_c \sim 150 \sim 180$ MeV ↓

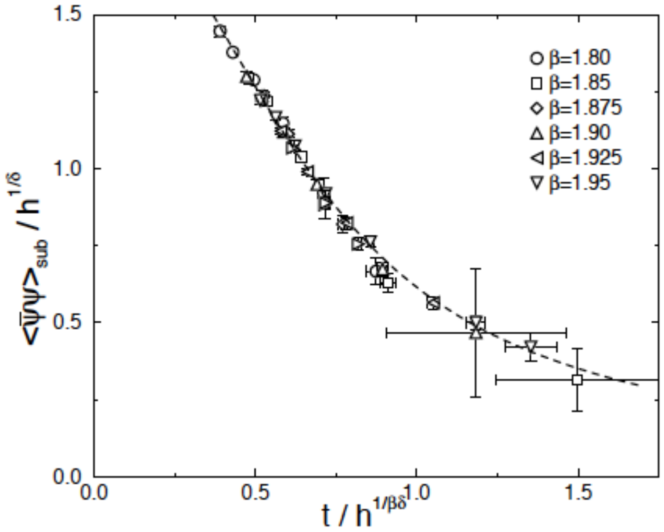
低温 $SU(2)_V$

<u>相転移の臨界指数</u>は対称性（だけ）で決まる

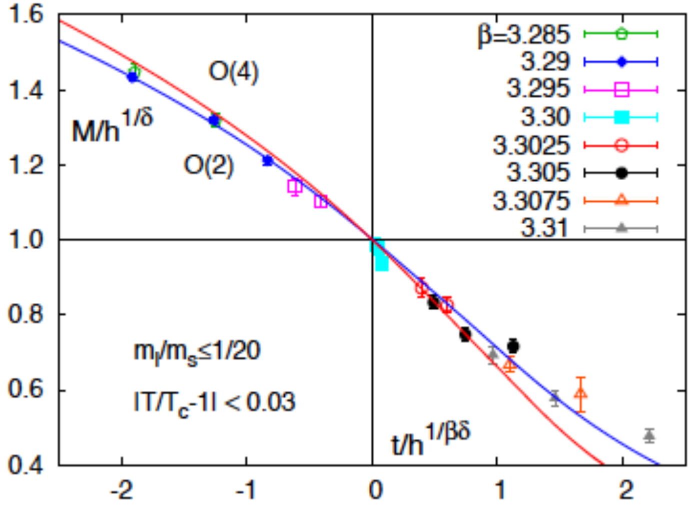
$$SU(2) \sim O(4)$$

（２次相転移で相関長が発散するとき）

CP-PACS (2000), Wilson fermion



BNL-Bielefeld (2009), staggered



何をいまさら…

<u>自発的対称性の破れ</u>（とその回復）

量子異常

高温 $SU(2)_L \times SU(2)_R$ $\times \cancel{U(1)}_A$

$T_c \sim 150\text{~}180$ MeV $\downarrow$ $\uparrow$?

低温 $SU(2)_V$ $\times \cancel{U(1)}_A$

$$\partial_\mu J_{5\mu} = \frac{N_f}{16\pi^2} \mathrm{Tr}\left(F_{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu} \right)$$

<u>相転移の臨界指数</u>は対称性（だけ）で決まる

$SU(2) \times U(1)$??

ここには２次相転移はない…?

量子異常とは

ラグランジアンのもつ対称性が量子化によって壊れる。
（＝カットオフが対称性を壊す… 避けられない）

軸性量子異常
= フレーバー１重項カイラル対称性 により保存するはず
の軸性カレントが、正則化のせいで保存しなくなる。

$$\partial_\mu J_{5\mu} = \frac{N_f}{16\pi^2}\mathrm{Tr}\left(F_{\mu\nu}\tilde{F}_{\mu\nu}\right)$$

フレーバー１重項
~ η′ 粒子

ゲージ場のトポロジー

量子異常とは

格子ゲージ理論はカイラル対称性が苦手

格子フェルミオン	フレーバー対称性	カイラル対称性
ウィルソン	○	×
スタッガード	×	○
オーバーラップ・ドメインウォール	○	変形
連続理論	○	量子異常

これは、些細な問題、ではない。

量子異常と真空中のクォーク

<u>カイラル対称性の自発的破れ</u>（お話）

ゲージ場のトポロジカル励起

量子異常　$\partial_\mu J_{5\mu} = \frac{N_f}{16\pi^2}\mathrm{Tr}\left(F_{\mu\nu}\tilde{F}_{\mu\nu}\right)$

フェルミオン
行列式

クォークの低エネルギー固有モード

フェルミオン対の"沈殿"　Banks-Casher関係式

カイラル凝縮（対称性の破れ）

$$\frac{\Sigma}{\pi} = \lim_{m\to 0}\lim_{V\to\infty}\rho(\lambda=0)$$

高温相 : $U(1)_A$ との関係

量子異常も消える…?　$\partial_\mu J_{5\mu} = \dfrac{N_f}{16\pi^2}\mathrm{Tr}\cancel{\left(F_{\mu\nu}\tilde{F}_{\mu\nu}\right)}$

$\boxed{\text{ゲージ場のトポロジカル励起もない}}$

↑

$\boxed{\text{クォークの低エネルギー固有モード消失}}$

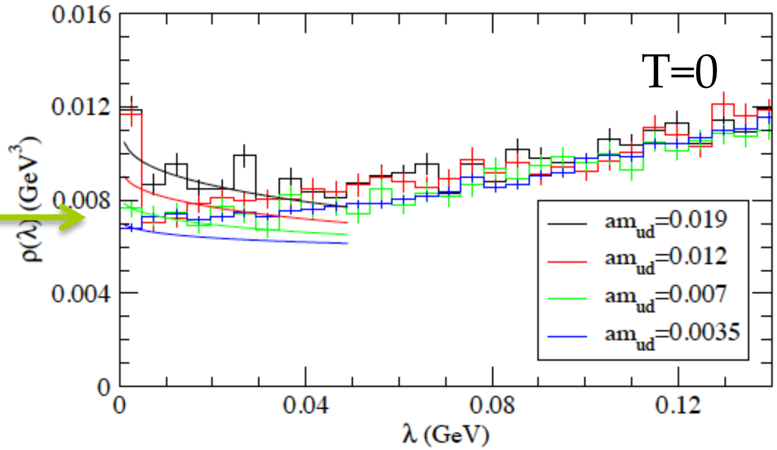
↑

$T > T_c$　$\boxed{\text{カイラル凝縮} = 0\text{（対称性の回復）}}$

クォーク固有モードで見ると

カイラル凝縮

$$\Sigma = -\langle \bar{q}q \rangle = \int_0^\infty d\lambda \rho(\lambda) \frac{2m}{\lambda^2 + m^2}$$



m=0 の極限では、ρ(λ~0) を見ることになる。

$U(1)_A$ **感受率**

$$\chi_\pi - \chi_\delta = \int d^4x \langle j_\pi(x) j_\pi(0) - j_\delta(x) j_\delta(0) \rangle = \int d\lambda \rho(\lambda) \frac{4m^2}{\left(\lambda^2 + m^2\right)^2}$$

ゼロ固有値付近をいかに正確に計算できるかが問題。

(ある程度)理論的にわかること

青木、深谷、谷口 (2012)

- $T > T_c$ でカイラル対称性の回復を仮定[ρ(λ=0)=0]
  - 他にも ρ(λ) の"解析性"を仮定

$$\lim_{m\to 0}\langle \rho(\lambda)\rangle_m \propto \lambda^3 + O(\lambda^4)$$

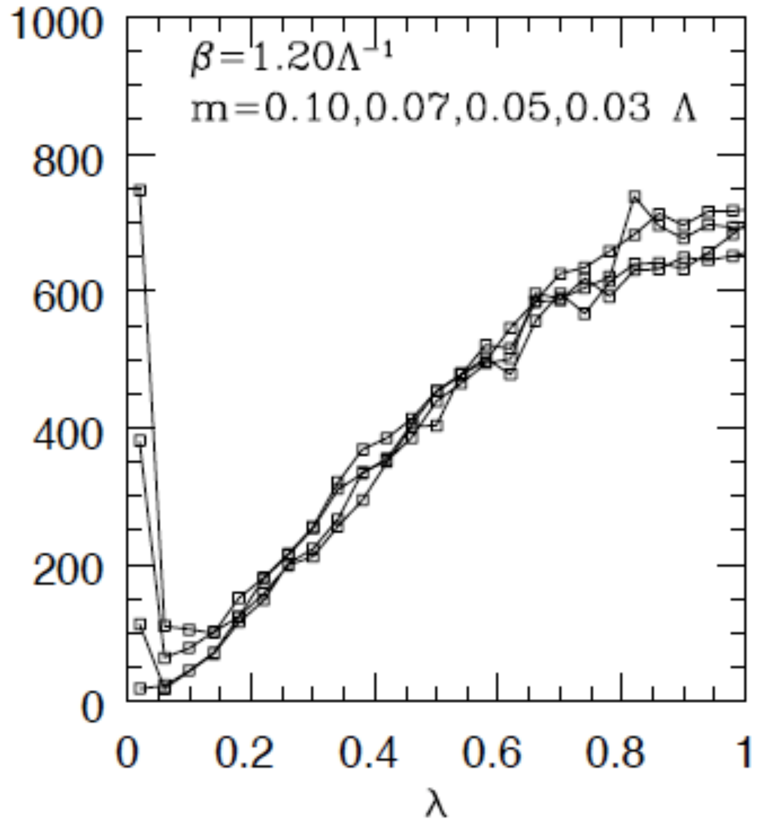
したがって、感受率もゼロ。$U_A(1)$ は回復。

- $U_A(1)$ が残る可能性
  - 例えば

$$\langle \rho(\lambda)\rangle_m \sim m^2\delta(\lambda)$$

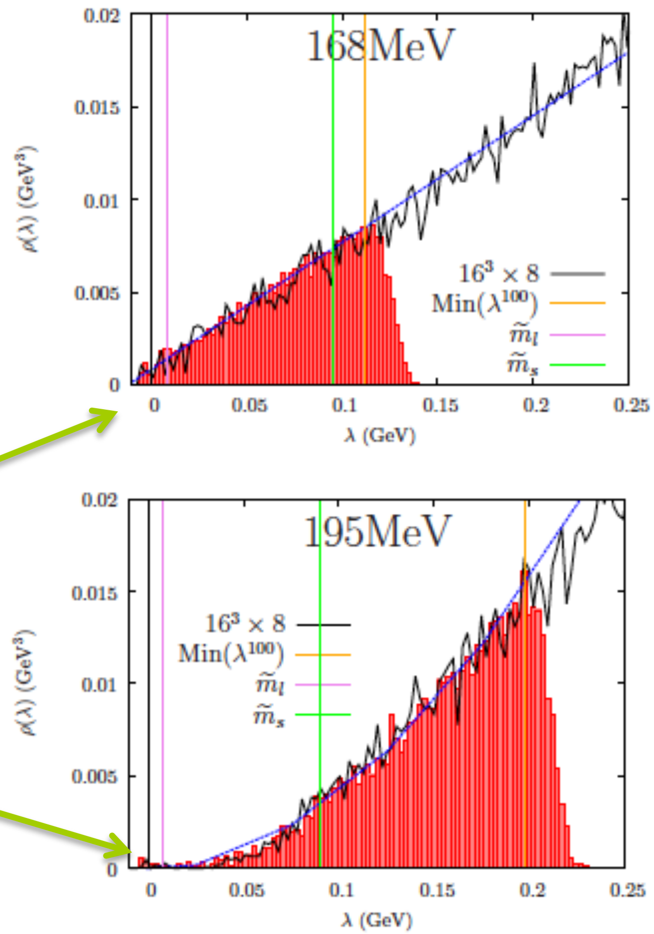
なにそれ？

Schafer (1996)
インスタントン液体模型



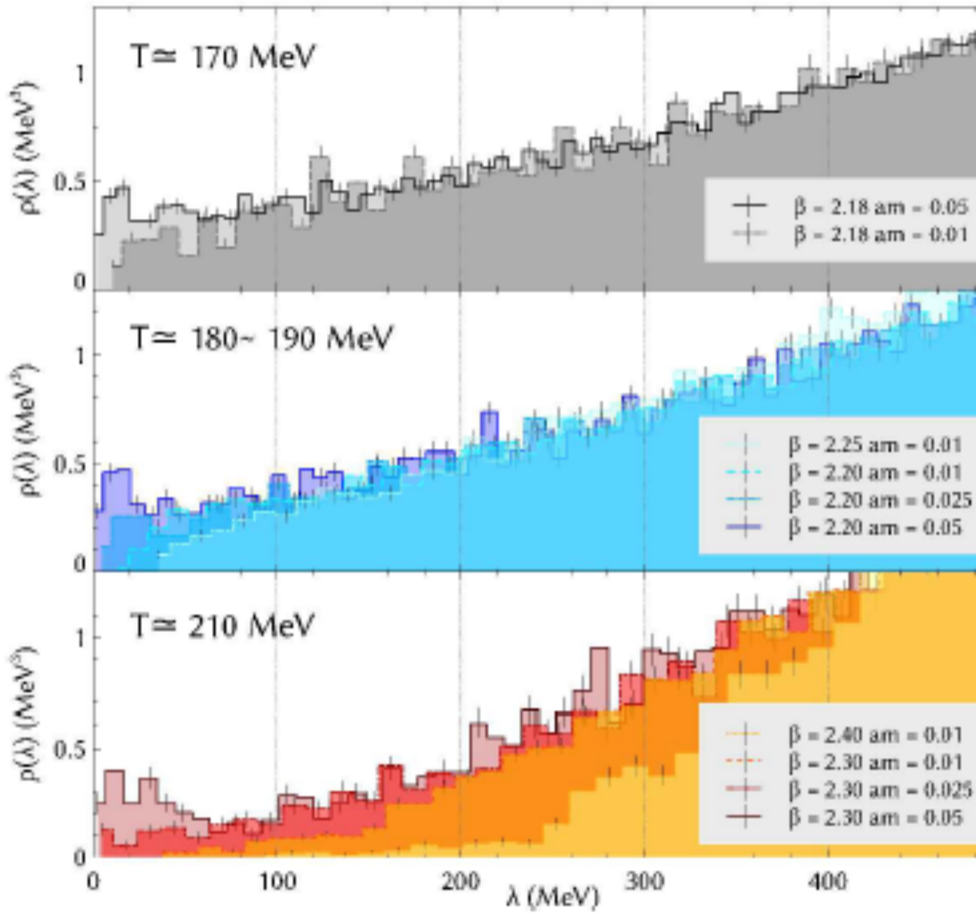
固有値分布

LLNL/RBC (2013)



カイラル対称性の破れに伴うゴミ

JLQCD (2013)

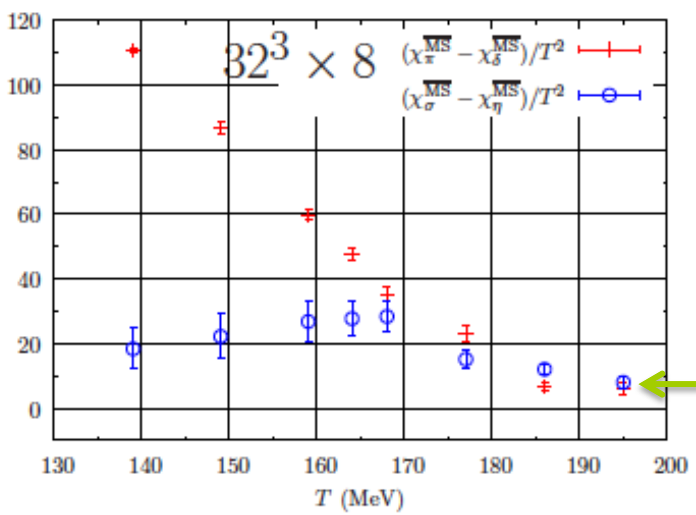


ゼロ付近にギャップはあるか？

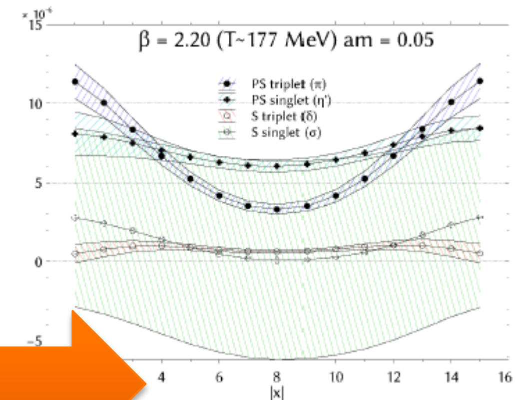
感受率

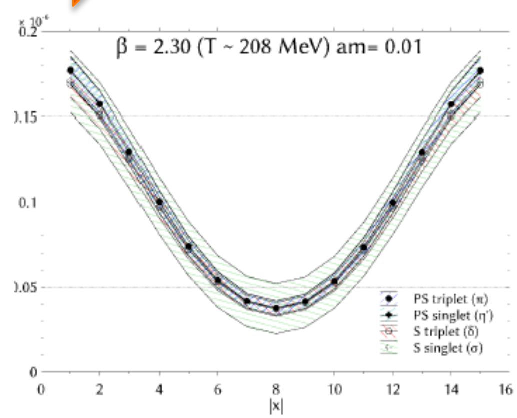
$$\chi_\pi - \chi_\delta = \int d^4x \left\langle j_\pi(x) j_\pi(0) - j_\delta(x) j_\delta(0) \right\rangle = \int d\lambda \rho(\lambda) \frac{4m^2}{\left(\lambda^2 + m^2\right)^2}$$

LLNL/RBC (2013)



有限値が残る





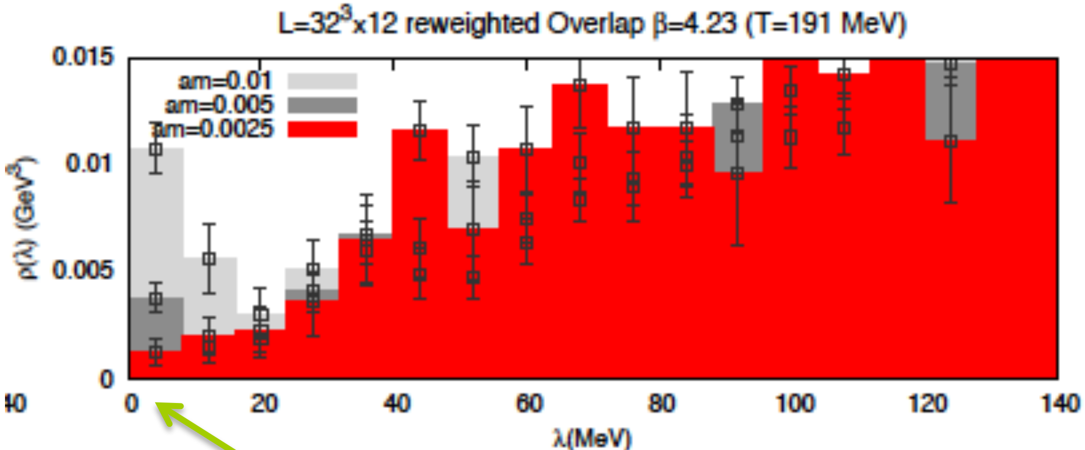
JLQCD (2013)

相関関数
- 低温では分離
- 高温で縮退

最新データ

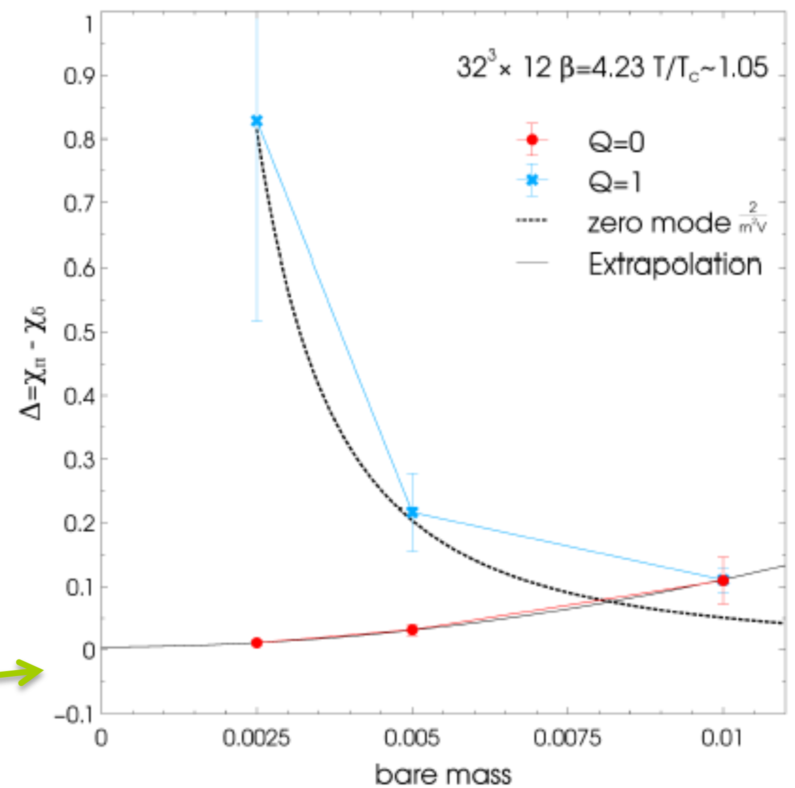
JLQCD (2016)
コス、深谷、富谷…

固有値スペクトル



質量ゼロの極限で消える。

U(1)$_A$ 感受率

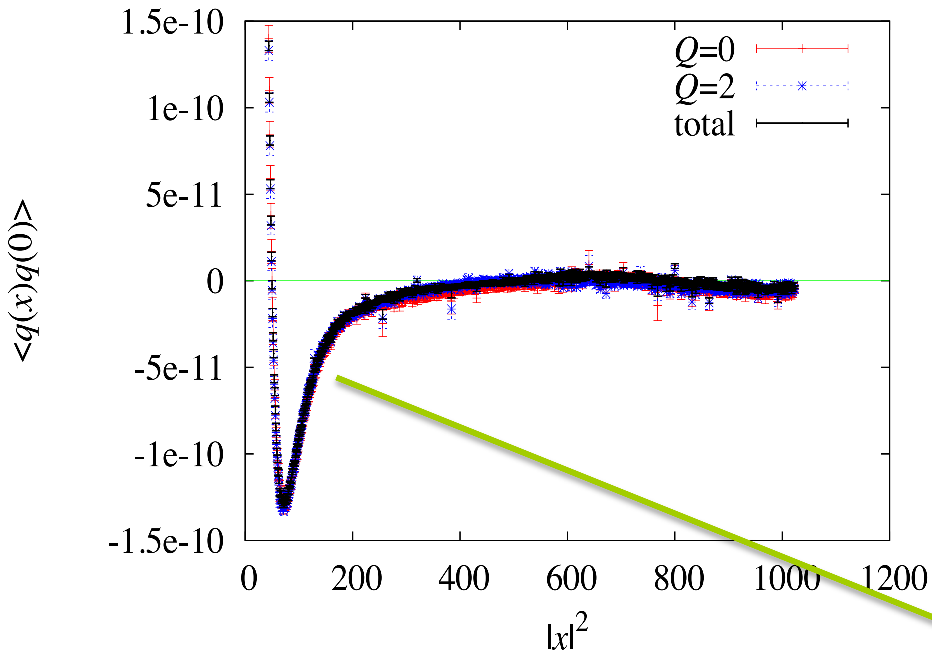


トポロジーを区別して関係する部分を
見ると質量ゼロの極限で消える。

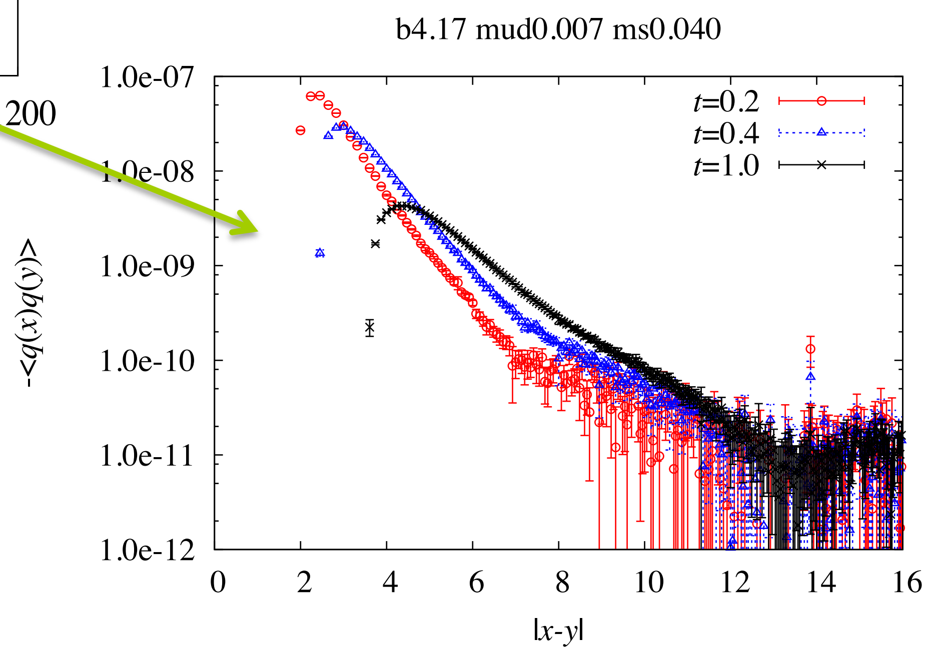
今後の課題

$U(1)_A$ 感受率は $T>T_c$ で消える。

- 肝心の相転移はどうなるのか。
  - 関係する自由度は:トポロジー相関を測る。技術開発進行中。
  - ２次相転移は生き残るか？
- 現実世界は u, d, s
  - 有限質量のときは恐らくクロスオーバー。
  - 全体像は理解できていない。本当に大丈夫？



トポロジー相関（ゼロ温度）



どこまでチェックされているか？