QCD相転移 ー 現状と解明に向けて

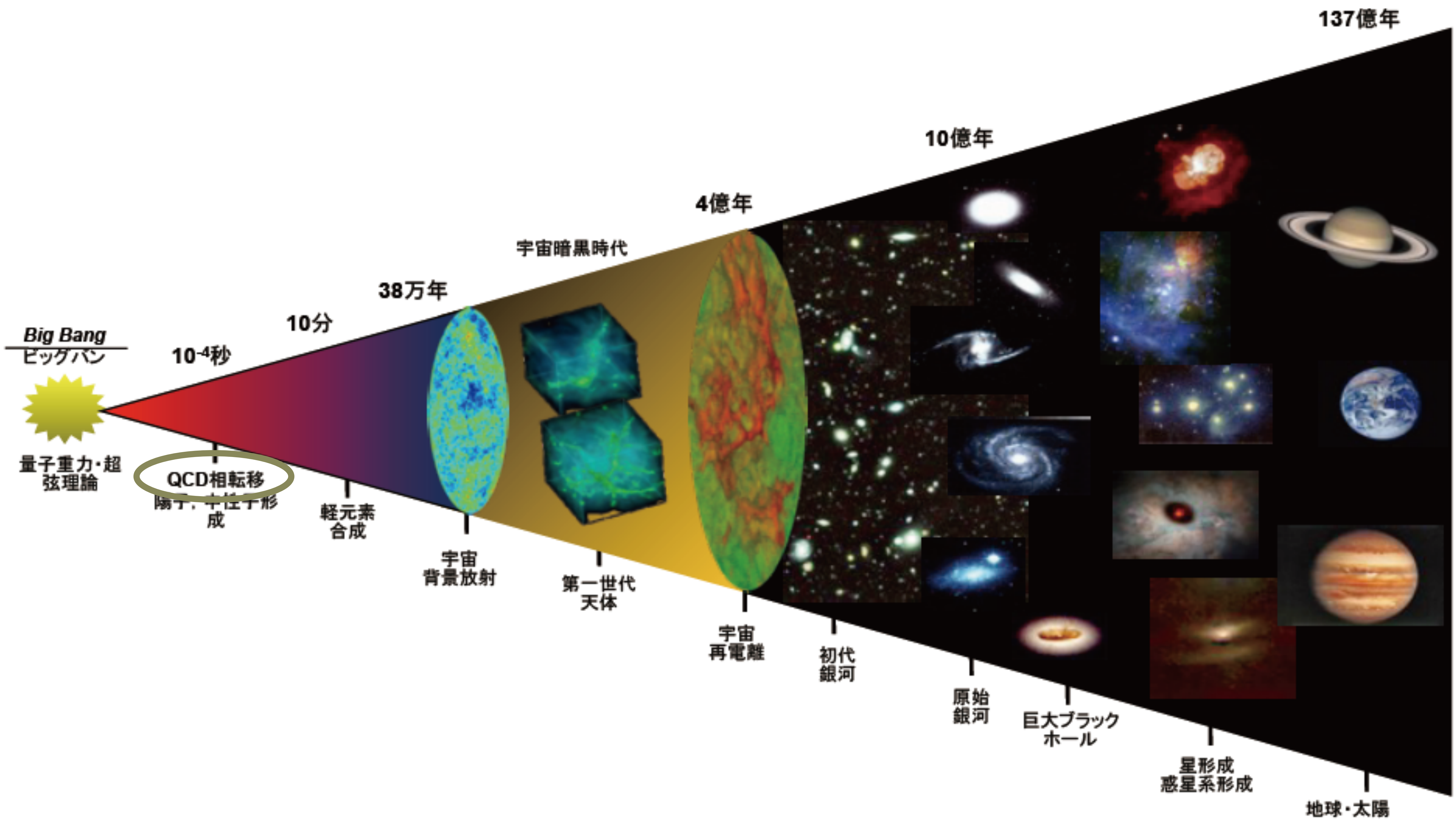
ーサブ課題A「QCD相転移」ー

青木保道　　KEK & RIKEN

2019.1.9　重点課題９研究報告会

QCD 有限温度相転移 contributor

- 青木慎也 京大基研
- 青木保道 KEK/理研
- 深谷英則 大阪大学
- Guido Cossu Edinburgh → left from academia
- 橋本省二 KEK
- 金児隆志 KEK
- **鈴木渓 KEK**
- …



Big Bang
ビッグバン
量子重力・超弦理論
10-4秒
QCD相転移
陽子，中性子形成
10分
軽元素合成
38万年
宇宙背景放射
宇宙暗黒時代
第一世代天体
4億年
宇宙再電離
初代銀河
10億年
原始銀河
巨大ブラックホール
星形成
惑星系形成
137億年
地球・太陽

QCD 有限温度相転移

- 何故興味があるか
  - 宇宙と物質の進化と関係
  - 実験: RHIC, LHC
- 純理論的な興味
  - QCDの理解
    - カイラル対称性とその自発的破れ

↑ 物理点直上の計算

- 大規模数値計算の主流

↑ クォーク質量を変えてプローブ

- 非物理点(クォーク質量)の情報
  - 物理点の理解の強固な補強
  - 究極的には相図の完成
- **この課題で追求する！**

QCD 有限温度相転移

- 何故興味があるか
  - 宇宙と物質の進化と関係
  - 実験: RHIC, LHC

↑ 物理点直上の計算

  - 大規模数値計算の主流

- 純理論的な興味
  - QCDの理解
    - カイラル対称性とその自発的破れ

↑ クォーク質量を変えてプローブ

  - 非物理点(クォーク質量)の情報
    - 物理点の理解の強固な補強
    - 究極的には相図の完成
- **この課題で追求する！**

QCD 有限温度相転移

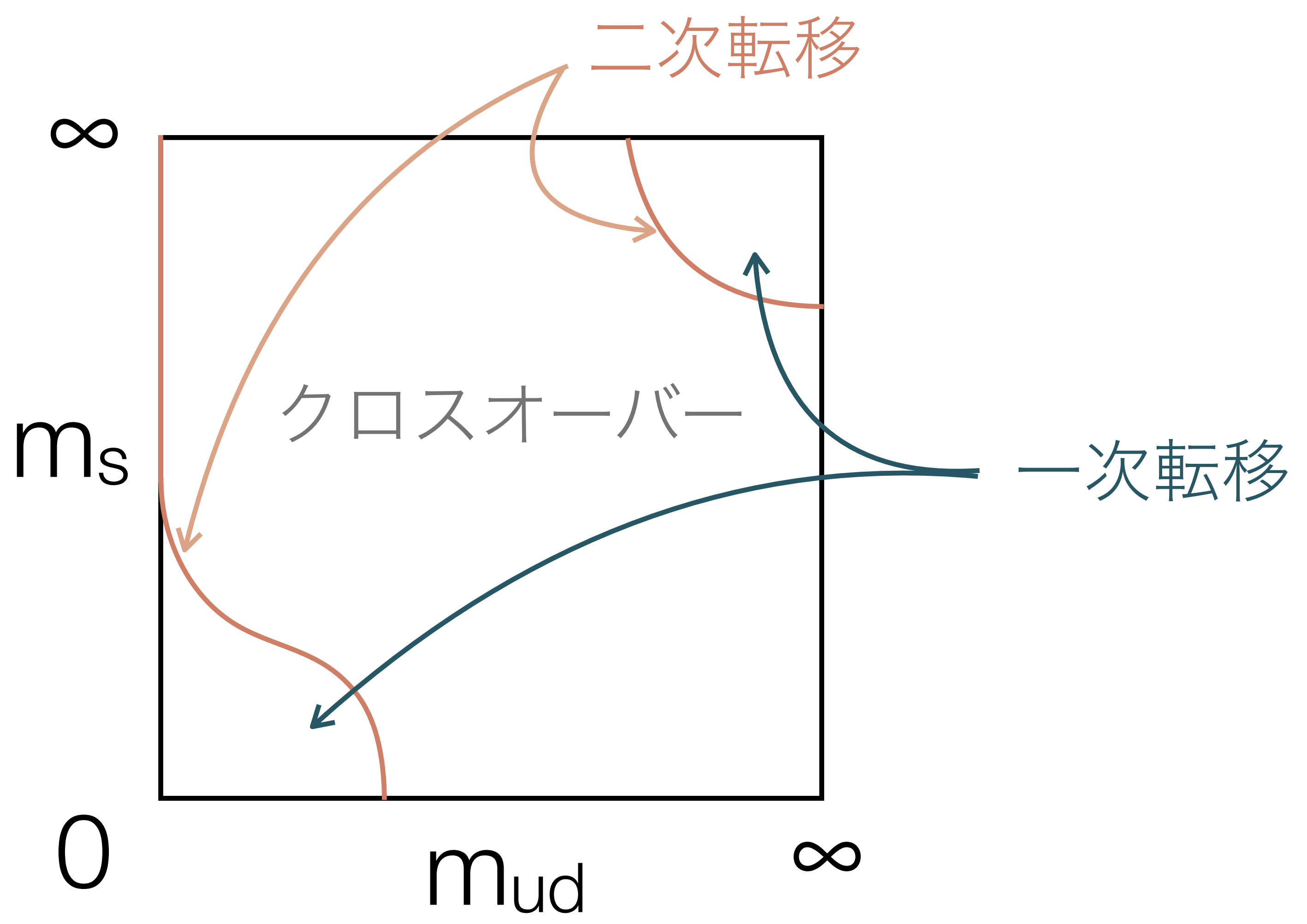
- 純理論的な興味
  - QCDの理解
    - カイラル対称性とその自発的破れ

↑ クォーク質量を変えてプローブ

- 非物理点(クォーク質量)の情報
  - 物理点の理解の強固な補強
  - 究極的には相図の完成
- **この課題で追求する！**

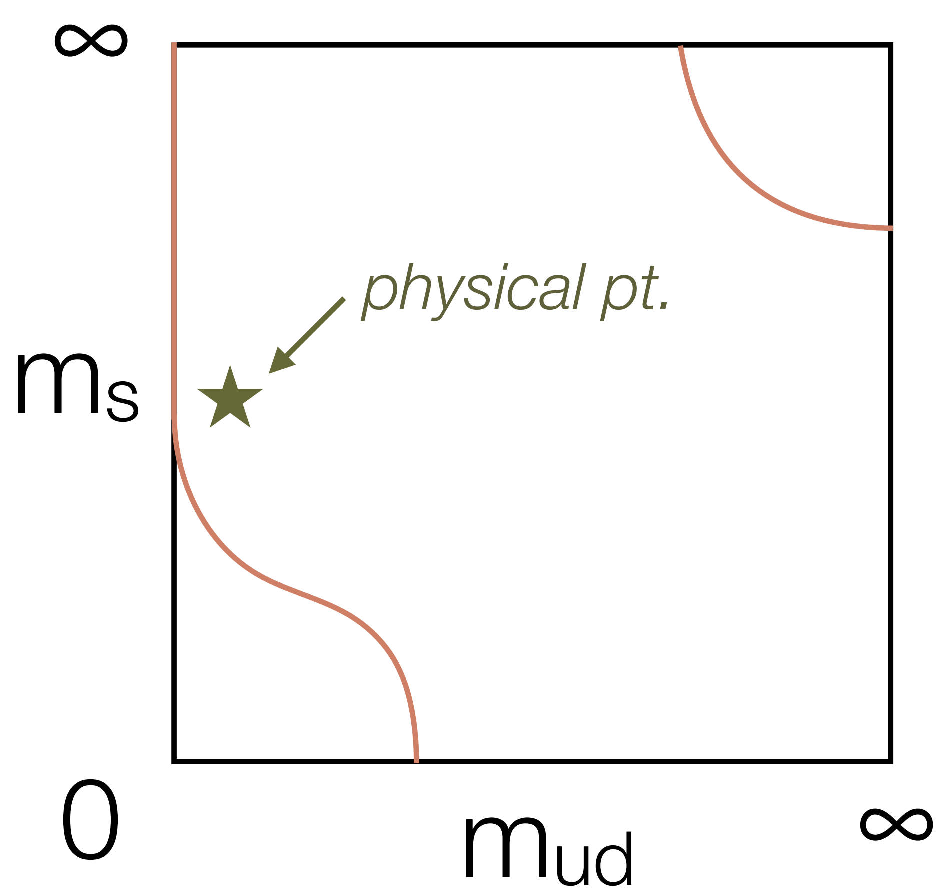
- 現実に近い理想モデル: $N_f=2$
  - 相転移とトポロジー
    - 密接に関係！
  - トポロジーを詳しく調べる
  - $U(1)_A$ の回復？= 長年の懸案
- 波及効果
  - axion → 宇宙と物質の進化
- まずは$N_f=2$を理解し
- $N_f=2+1$ へつなげる
  - Columbia plot の全容へ

現在でも: Columbia Plot = 大方の人の理解 || 期待



[original Columbia plot: Brown et al 1990]

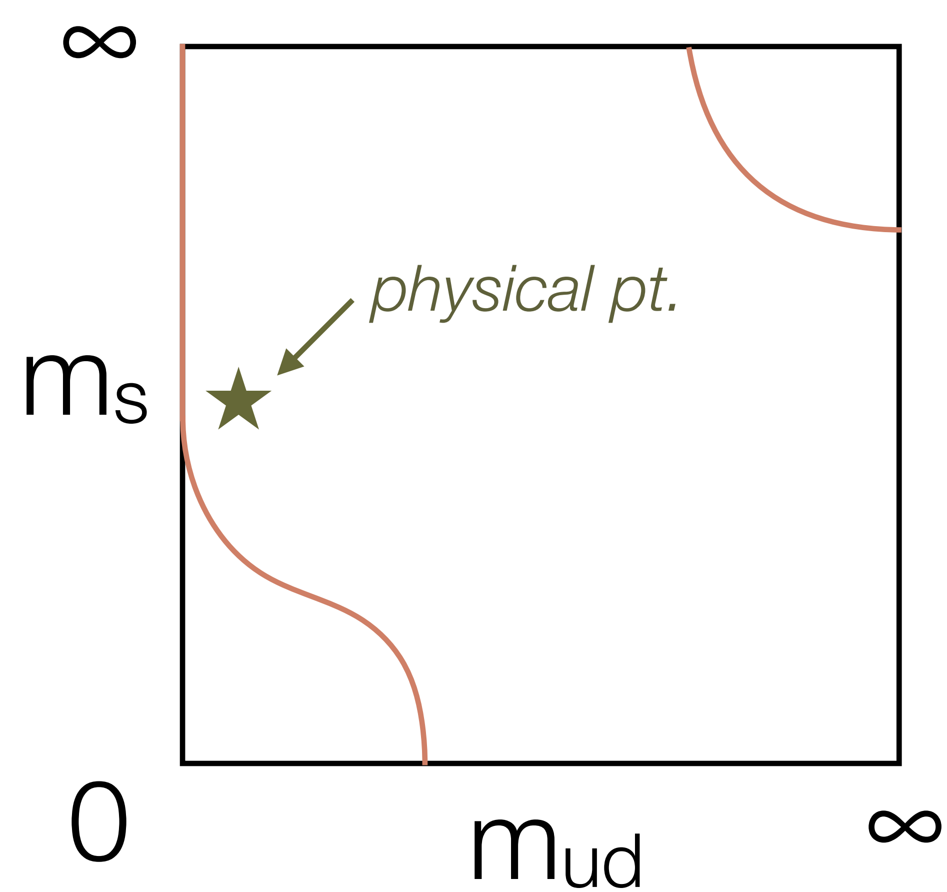
現在でも: Columbia Plot = 大方の人の理解 || 期待



[original Columbia plot: Brown et al 1990]

N_f=2+1相図

- 連続極限で分かっていること
  - N_f=0: 一次転移
    - 右上隅はよく分かっている
  - N_f=2+1 物理点: cross-over
    - staggered (Wuppertal 2006)
    - 他の正則化でも反証なし
    - 厳密なカイラル対称性を持つアプローチでは未踏
- こんな図を普通書きますが、
  大部分はよく分かっていない

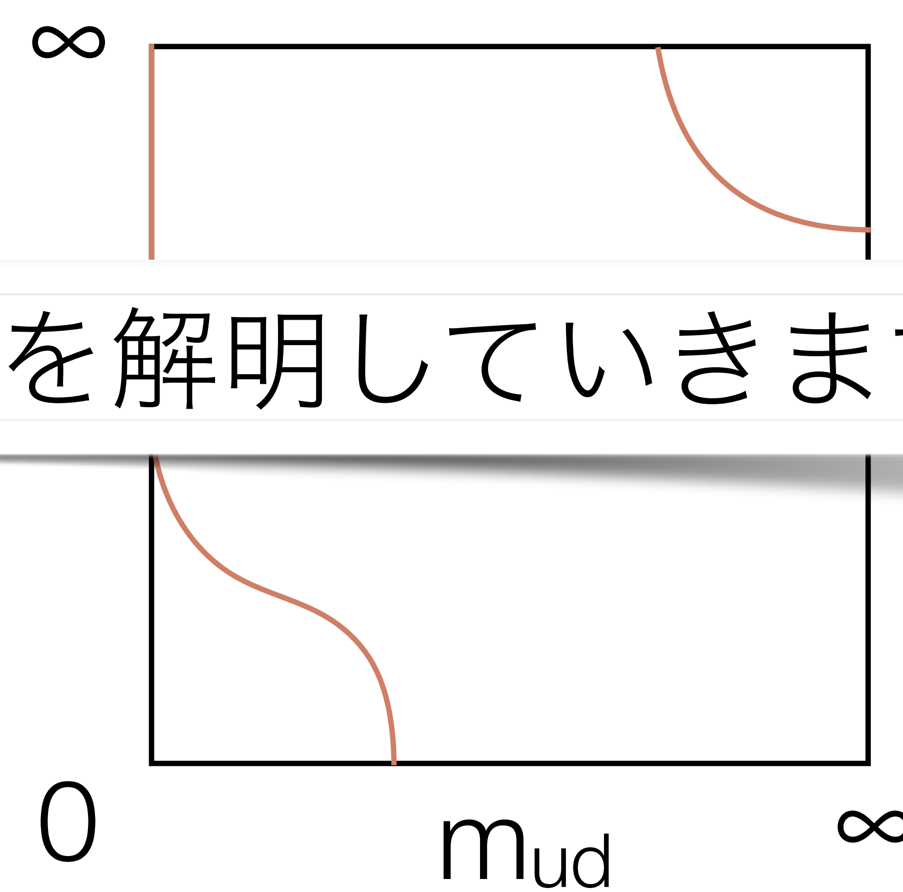


N_f=2+1相図

- 連続極限で分かっていること
  - N_f=0: 一次転移
    - 右上隅はよく分かっている

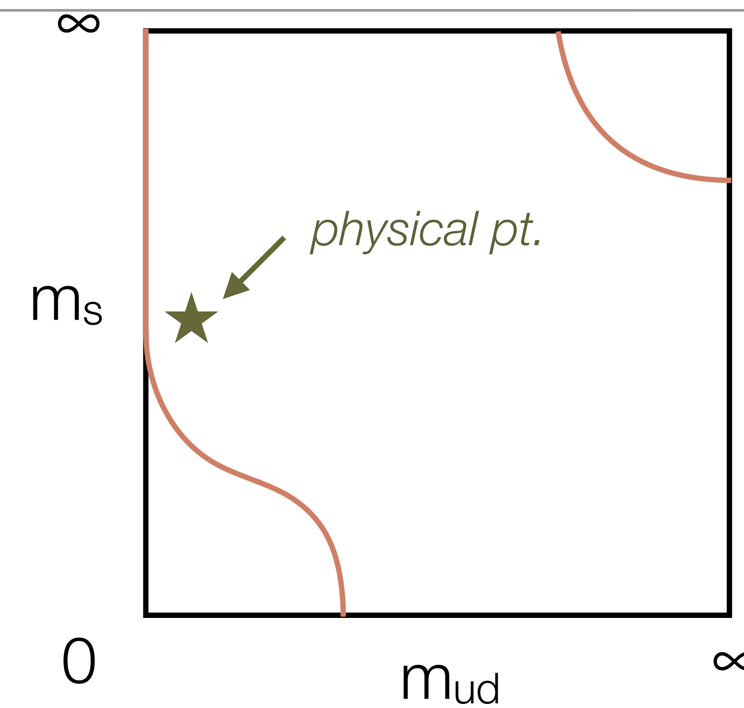
ポスト京を用いて、これを解明していきます

    - staggered (Wuppertal 2006)
    - 他の正則化でも反証なし
    - 厳密なカイラル対称性を持つアプローチでは未踏
- こんな図を普通書きますが、**大部分はよく分かっていない**



QCD 有限温度相転移の理論: N_f=2+1 Lattice

- Nf=2+1 相図が完成すれば
  - QCD の理解
  - 物理点の相転移の存在、次数が分かる。
    - 遠回りだが確実な方法
  - 相境界(μ=0)の μ>0 への伸び方を調べる→(T,μ)臨界終点の研究へつなげる
- 大変重要／有用である！

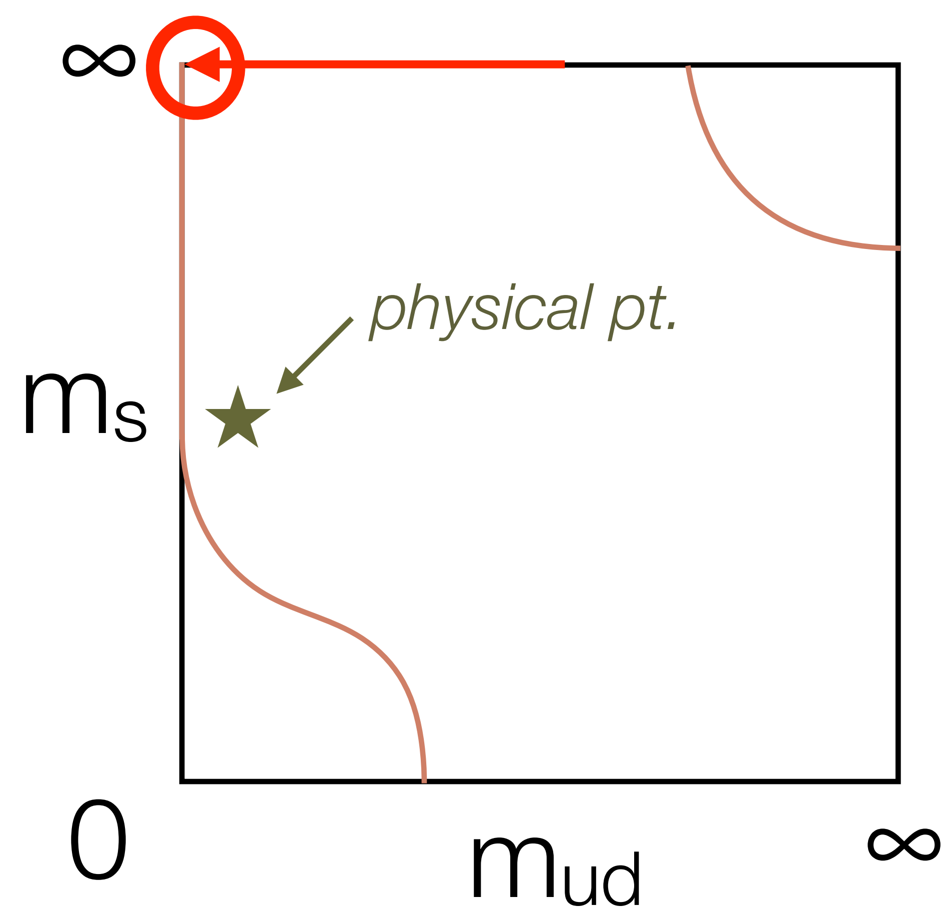


まずは N_f=2

- N_f=2+1 physical pt. から遠い？
  - m_s ~100 MeV → ∞
    - T=0 では s のあるなしは微細効果
  - boundary の情報としては有用
- N_f=2
  - Wilson, staggered: 未確定
  - 厳密な格子カイラル対称性

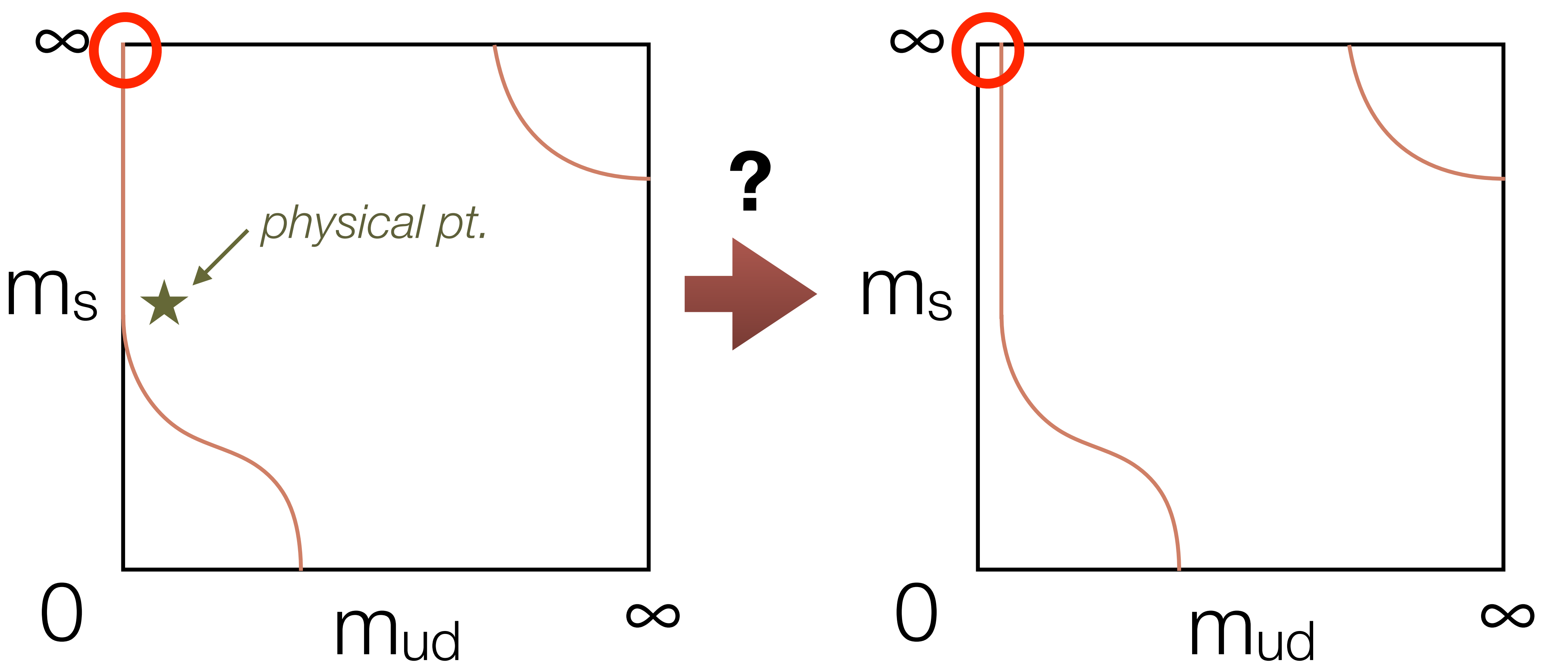
➡U(1)$_A$ 回復を示唆[JLQCD16]

➡一次転移の可能性 → $\chi_t(m)$に飛び?
[Pisarski&Wilczek]



一次転移だとどうなるか？

- $0 \leq m_f < m_c$: 一次転移
- 一つの可能性として: N_f=3の一次転移領域と繋がる
- 物理点への影響も考えられる



実際、我々の研究で

トポロジカル感受率 $\chi_t(m)$ に一次転移が見えている

るかもしれない。。。

格子作用と対称性

	$U(1)_B$	$SU(N_f)_V$	$SU(N_f)_A$	simulation cost
Wilson	✓	✓	×	moderate
staggered	✓	×	U(1)	cheep
domain wall	✓	✓	almost exact	expensive
overlap	✓	✓	✓	almost impossible

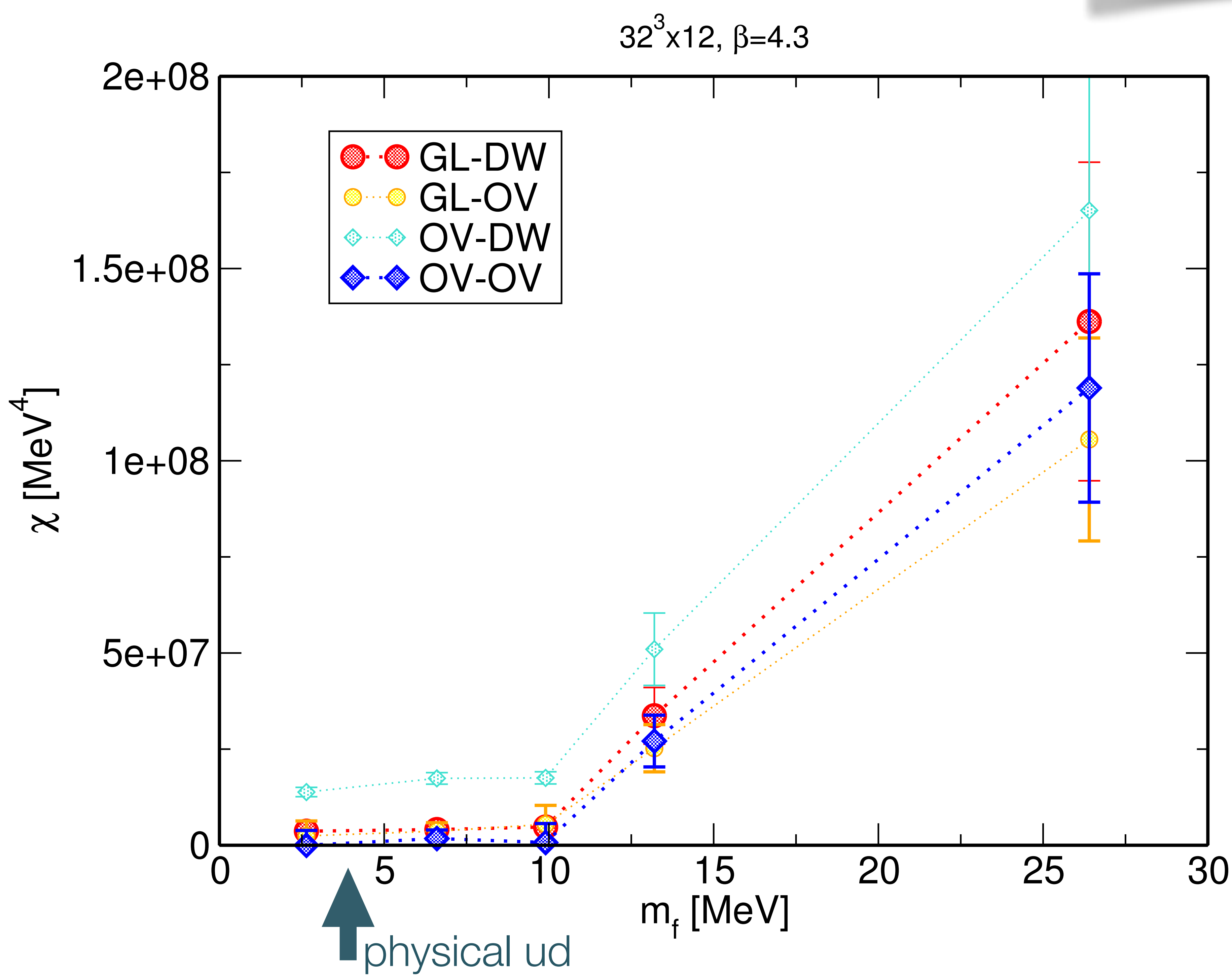
我々の手法

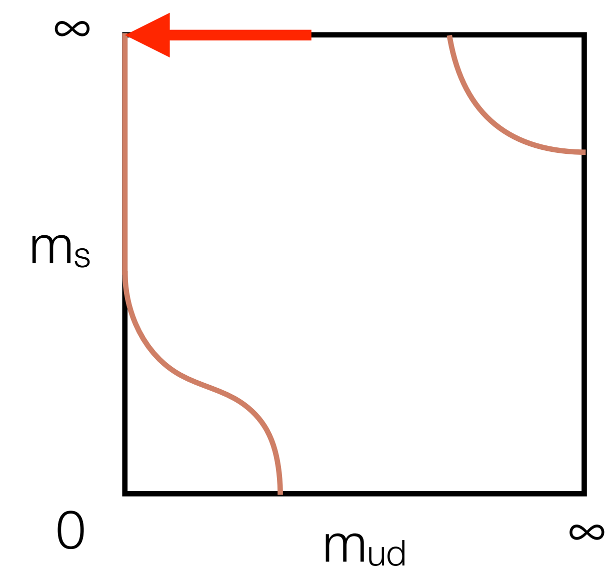
- **domain wall fermion (DW)→ “reweighting” to overlap (OV) [JLQCD]**
- 時間を節約しつつ、最終結果は厳密な対称性を保証
  - ただし、有効統計の減少とDWの近似の精度には注意が必要

ここで紹介する結果は全て Preliminary です

$\chi_t(m_f)$ for N_f=2 T=220 MeV

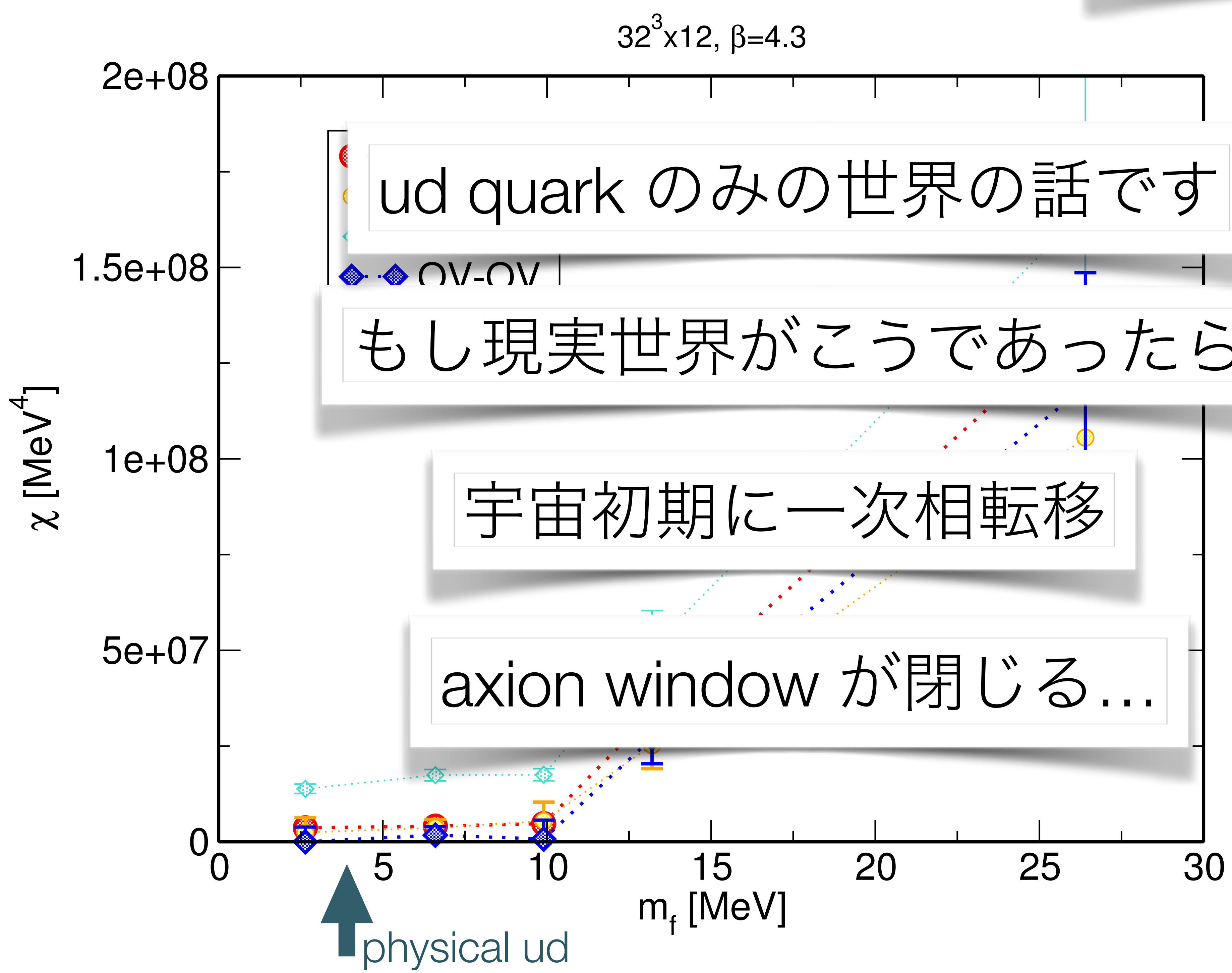
GL-DW	gluonic charge on DW
GL-OV	gluonic charge on OV
OV-DW	OV index on DW
OV-OV	OV index on OV ensemble





$\chi_t(m_f)$ for N_f=2 T=220 MeV

GL-DW	gluonic charge on DW
GL-OV	gluonic charge on OV
OV-DW	OV index on DW
OV-OV	OV index on OV ensemble

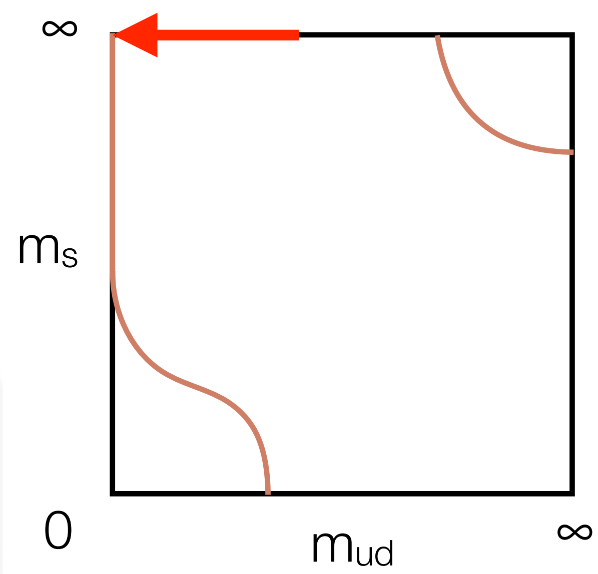


ud quark のみの世界の話です

もし現実世界がこうであったら

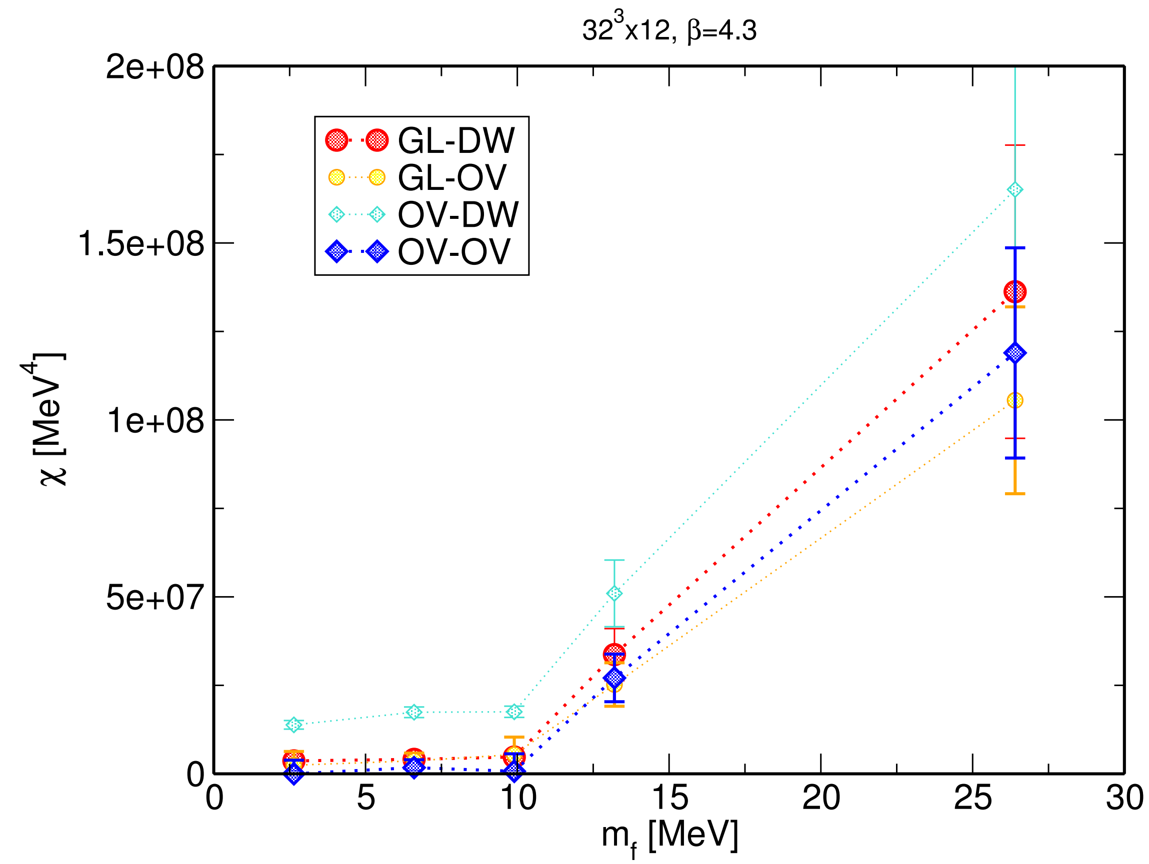
宇宙初期に一次相転移

axion window が閉じる…



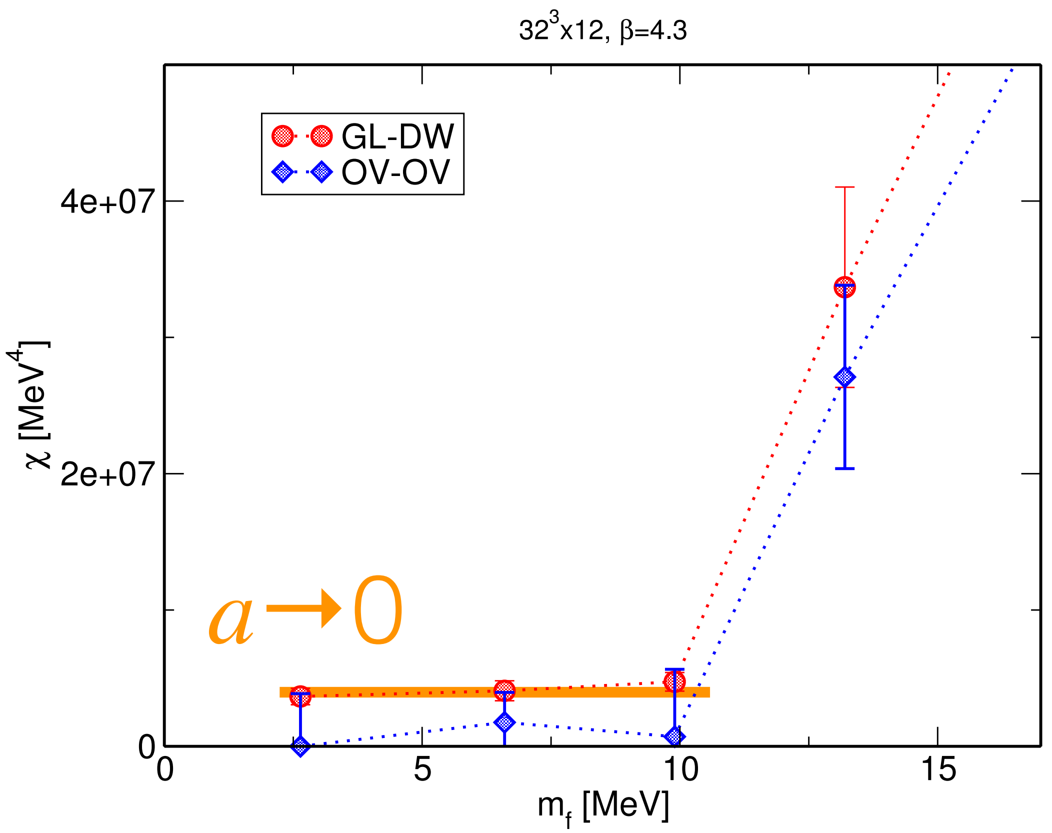
系統誤差?

- V=32[3]
  - ➡∞　必要
  - 熱力学極限: m→の前に
- a = 0.07 fm
  - ➡ 0　必要
    - a = 0.11 fm と比較
      - 誤差はa^2



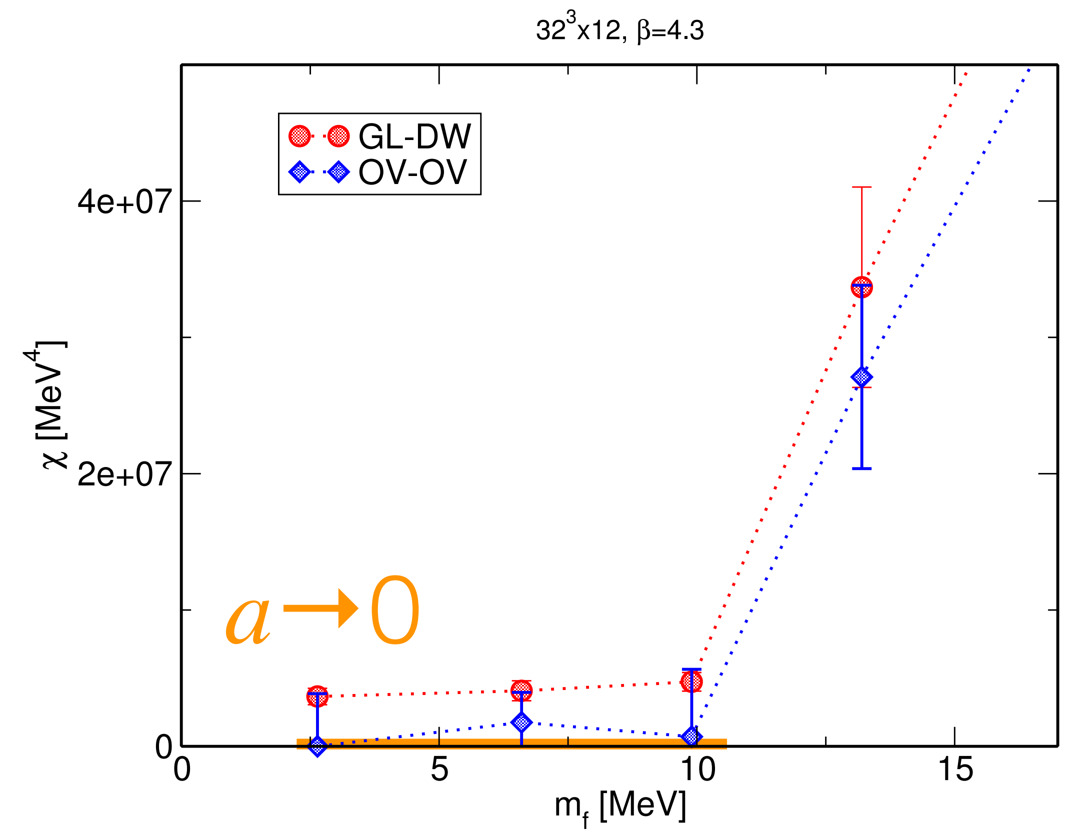
系統誤差?

- V=32^3
  - ➡ ∞　必要
    - 熱力学極限: m→の前に
- a = 0.07 fm
  - ➡ 0　必要
    - a = 0.11 fm と比較
      - 誤差はa^2



系統誤差?

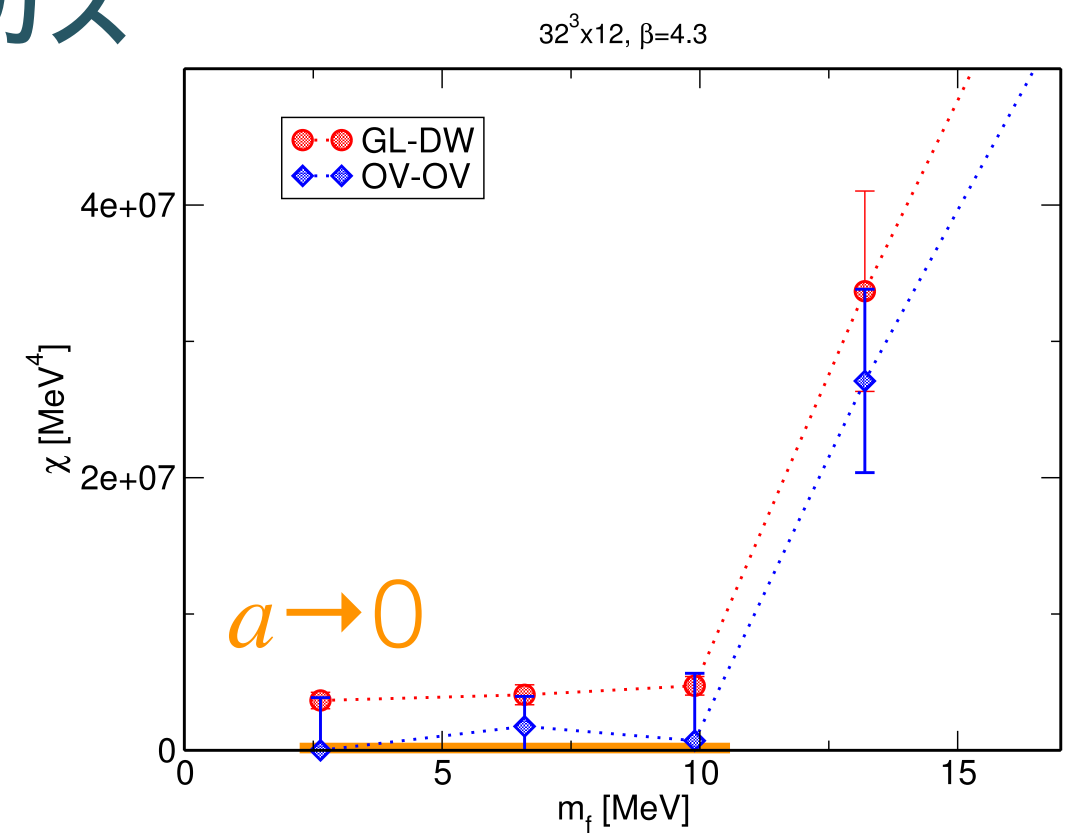
- V=32^3
  - ➡ ∞　必要
    - 熱力学極限: m→の前に
- a = 0.07 fm
  - ➡ 0　必要
    - a = 0.11 fm と比較
      - 誤差はa^2



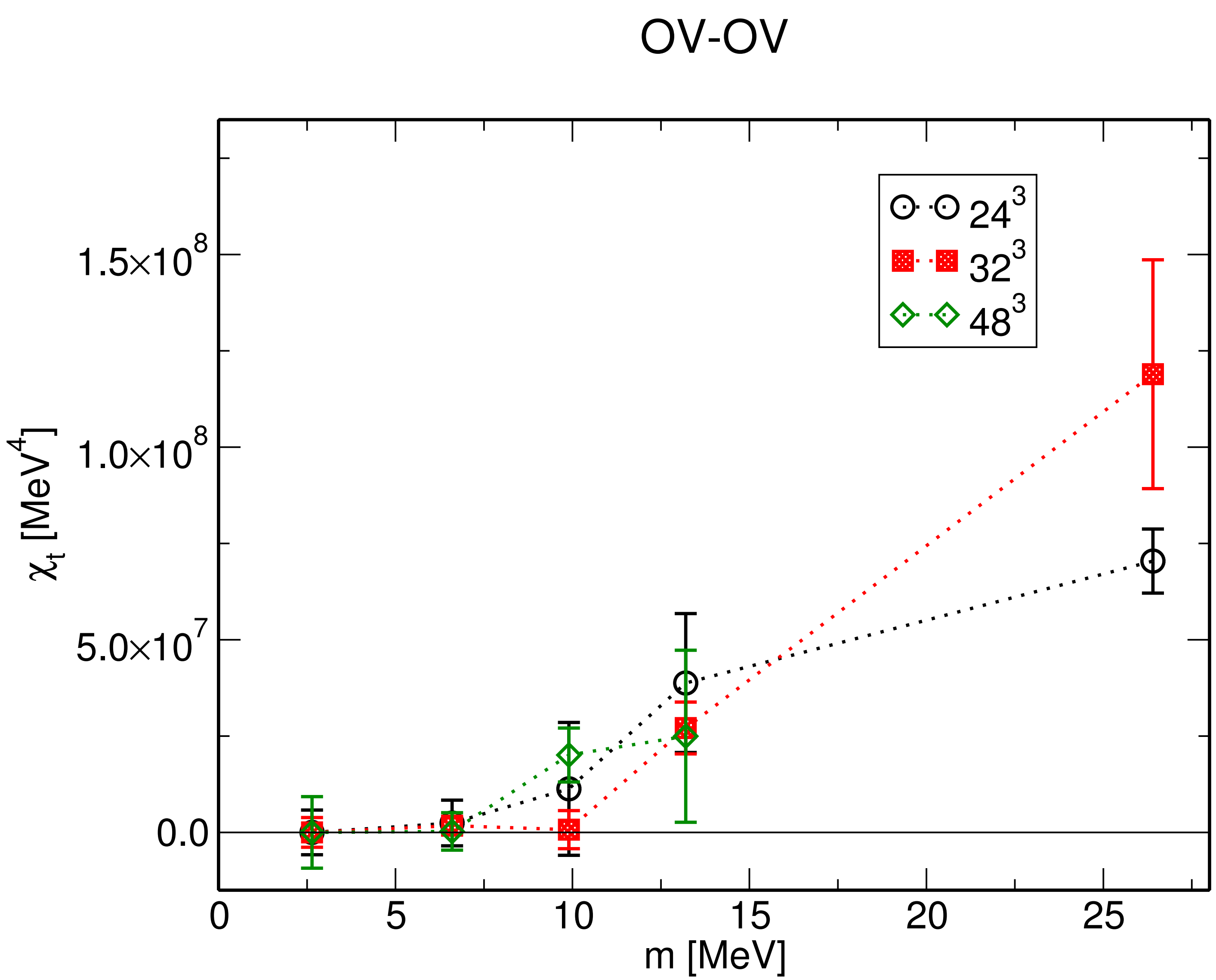
系統誤差?

今年度のフォーカス

- V=32^3
  ➡ ∞　必要
  - 熱力学極限: m→の前に
- a = 0.07 fm
  ➡ 0　必要
  - a = 0.11 fm と比較
    - 誤差はa^2
- T=220 MeV
  ➡ 温度を下げていき
  T_c 近傍まで調べたい



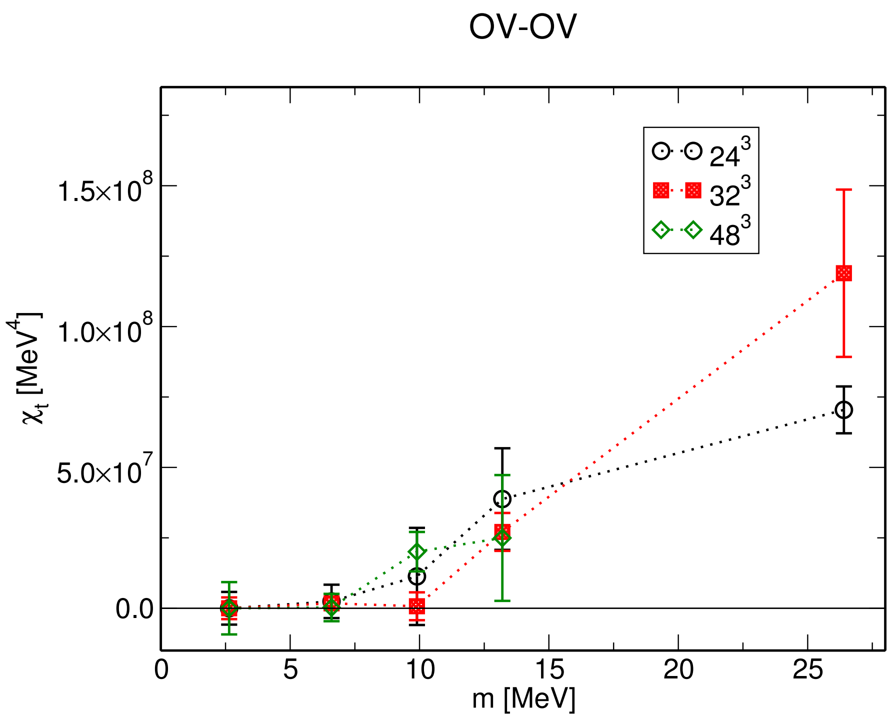
Results of $\chi_t(m)$ at T=220 MeV; multiple volume



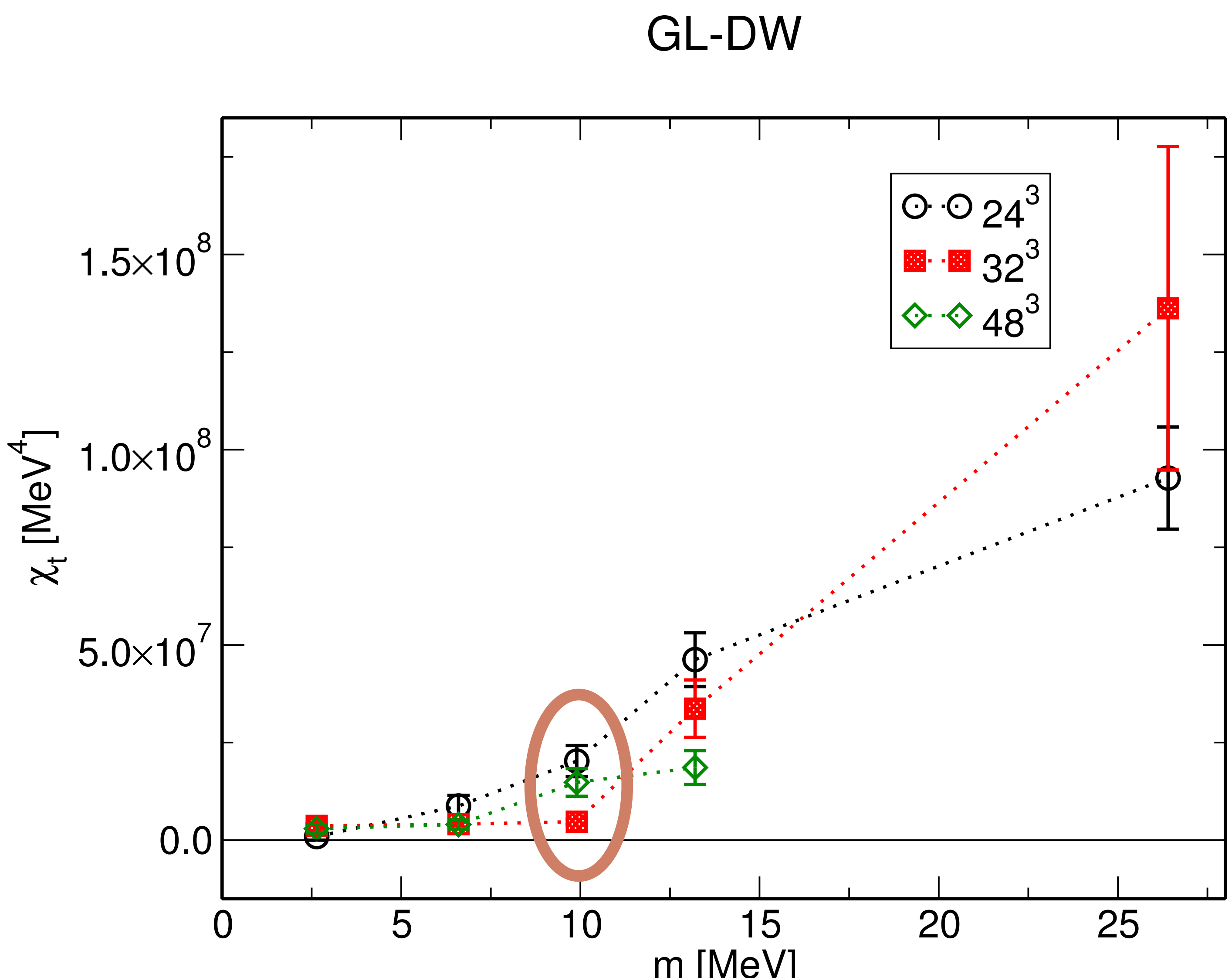
- Statistics in trajectory
  ~30k, 30k, 10k

JICFuS パンフレット

Results of $\chi_t(m)$ at T=220 MeV; multiple volume

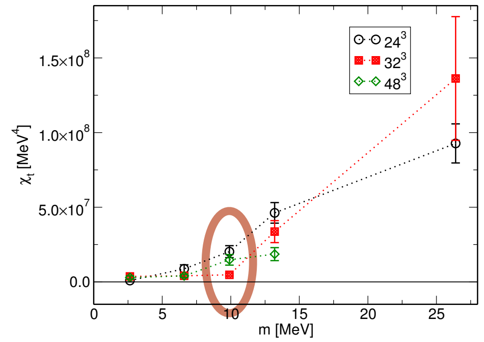


Statistics in trajectory
~30k, 30k, 10k

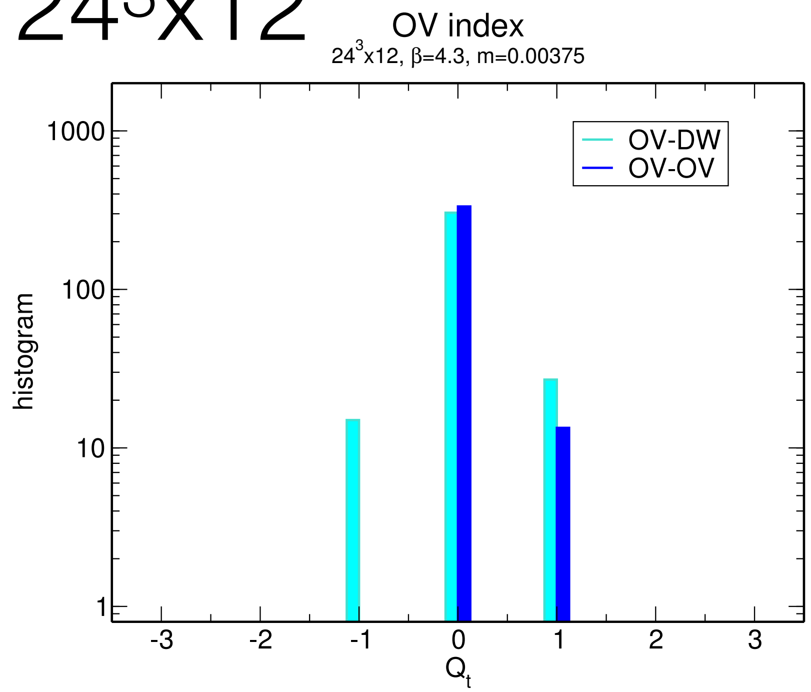


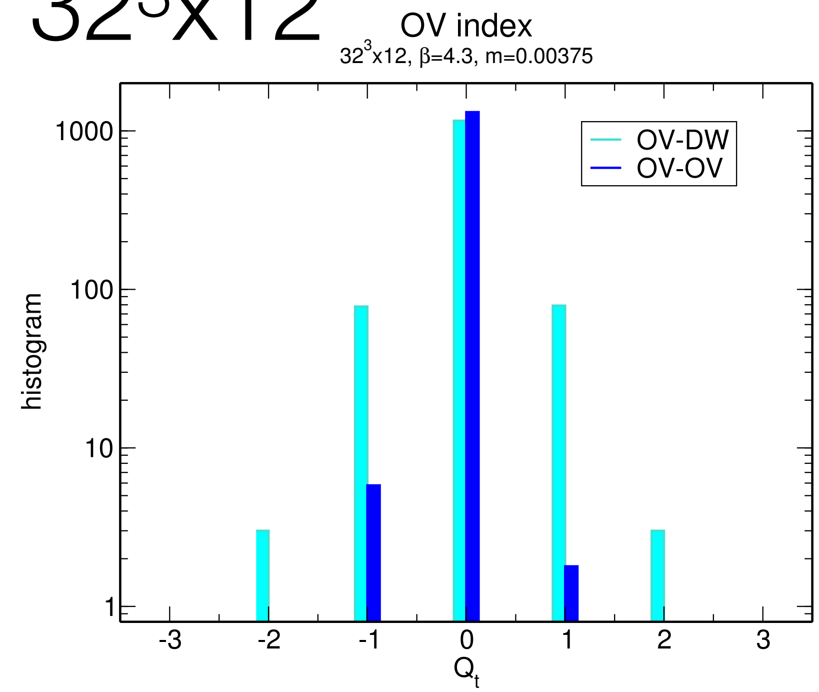
- V dependence at m=10 MeV is strange
  - non-monotonic: cannot take thermodynamic limit
  - important region, where a phase boundary was suggested w/ 32^3
- Let's look at the histogram of Q

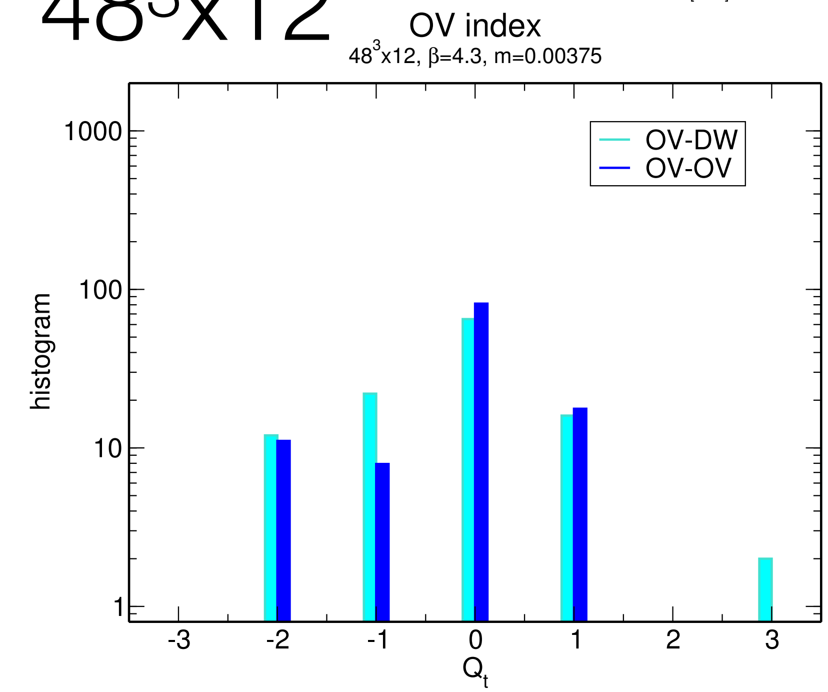
summary of histogram: T=220 MeV, m=10 MeV

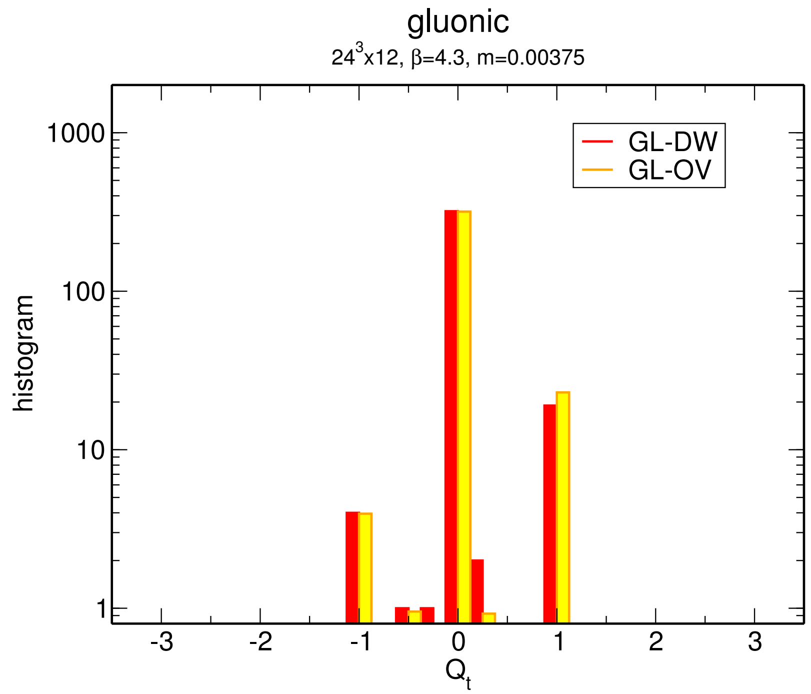


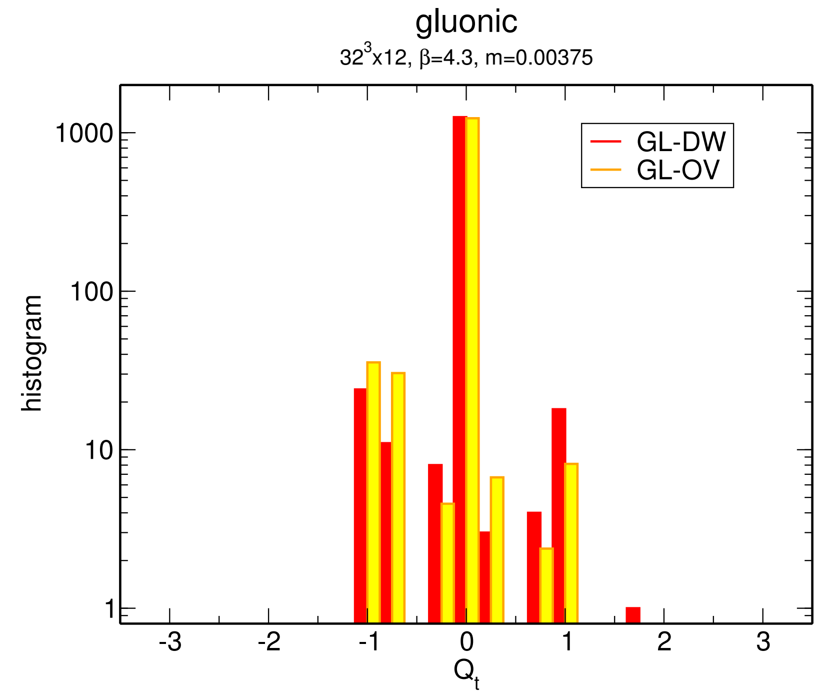
24^3x12	32^3x12	48^3x12

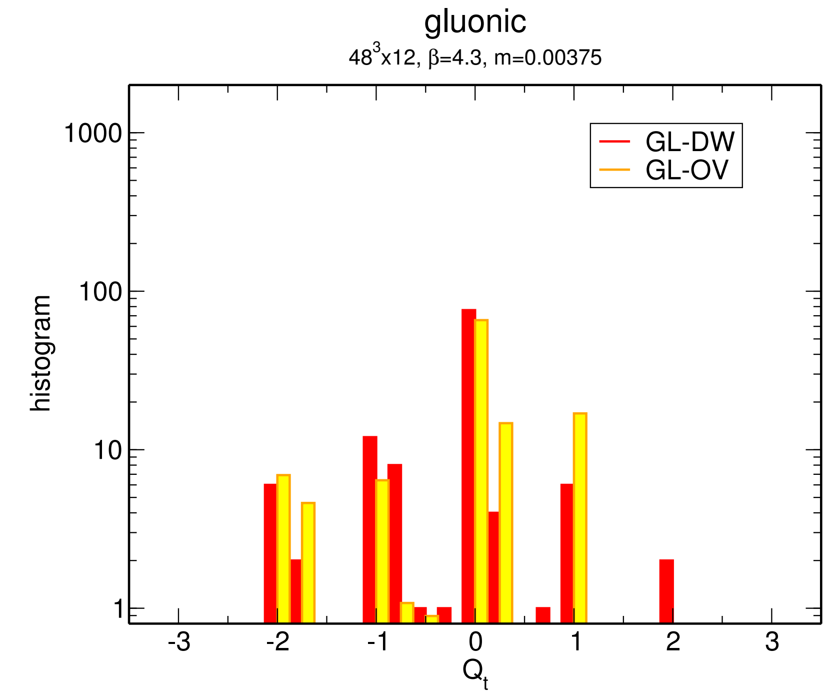






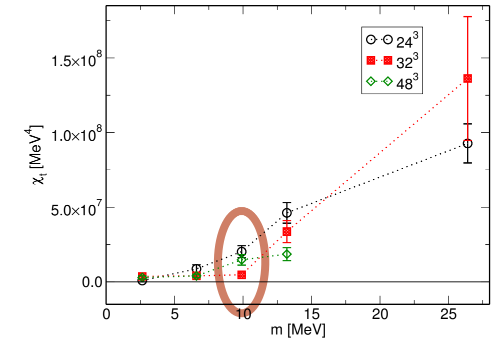




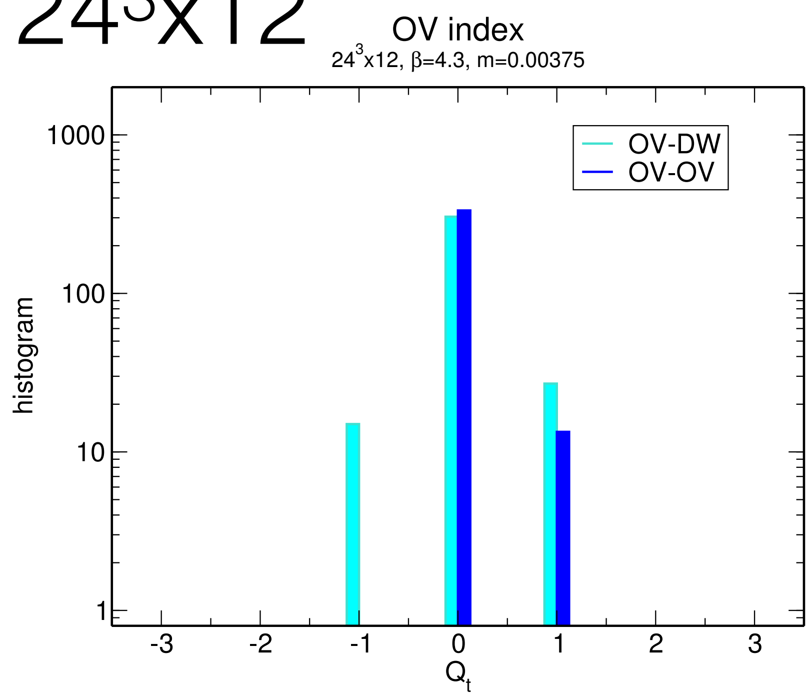


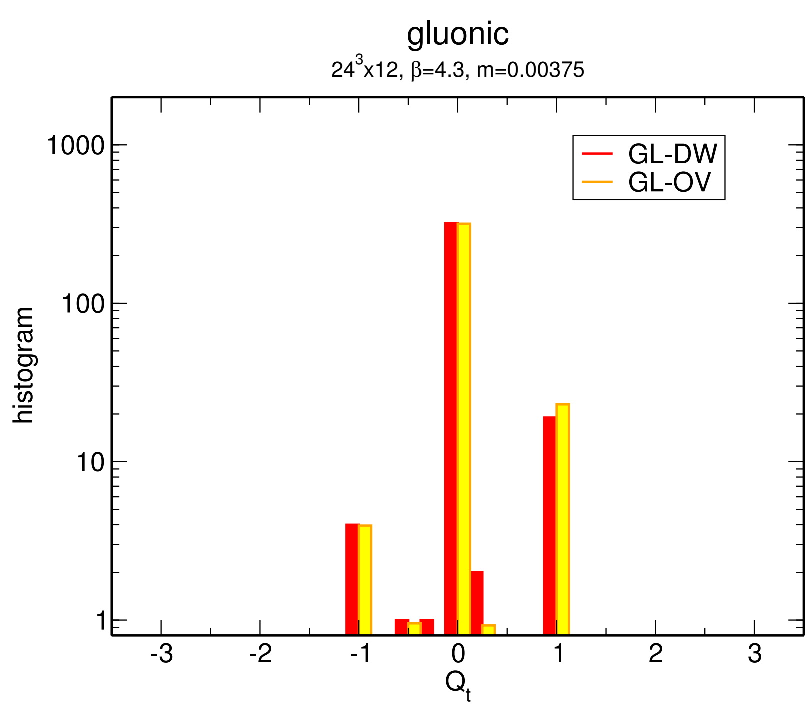
# trajectory:	~30k	~30k	~10k
sample rate:	100	20	100

summary of histogram: T=220 MeV, m=10 MeV

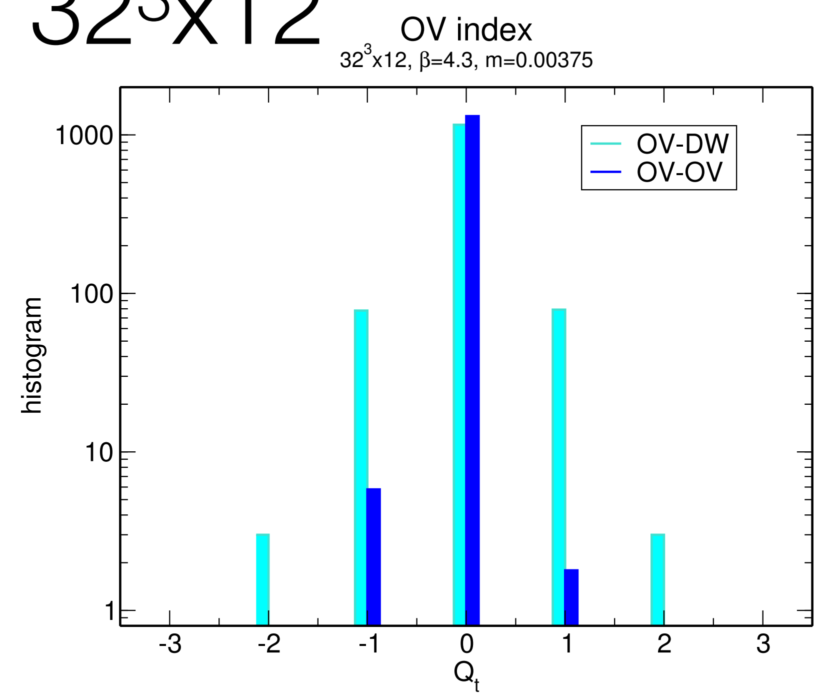


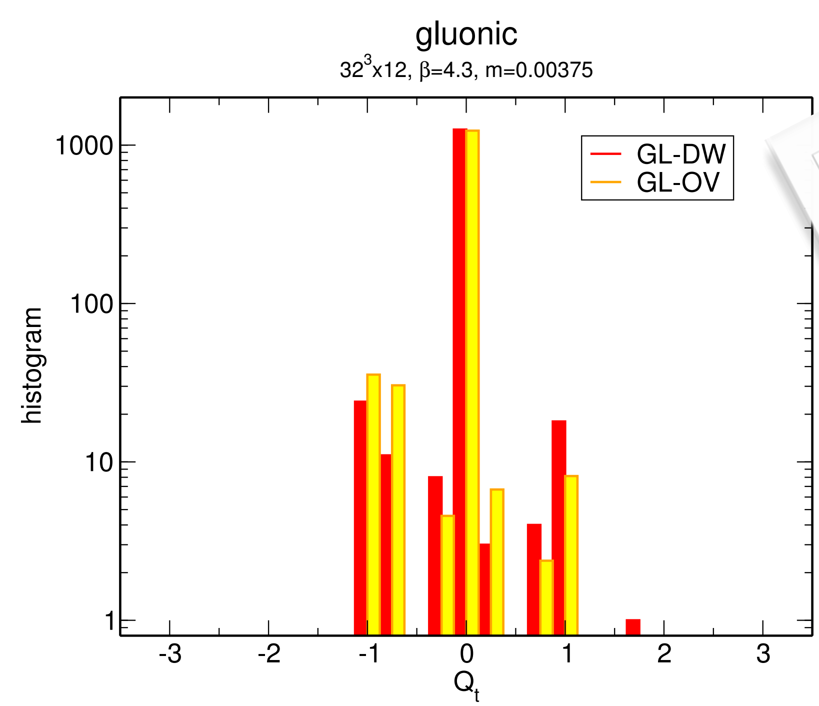
24^3x12



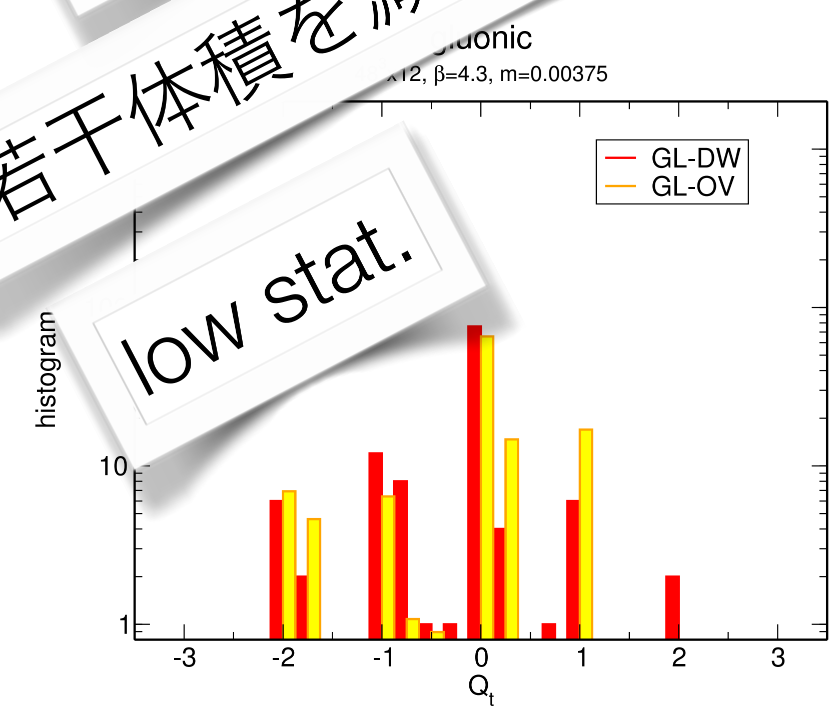


32^3x12





48^3x12



low stat.

まだ統計が心許ない

若干体積を減らして継続中

low stat.

	24^3x12	32^3x12	48^3x12
# trajectory:	~30k	~30k	~10k
sample rate:	100	20	100

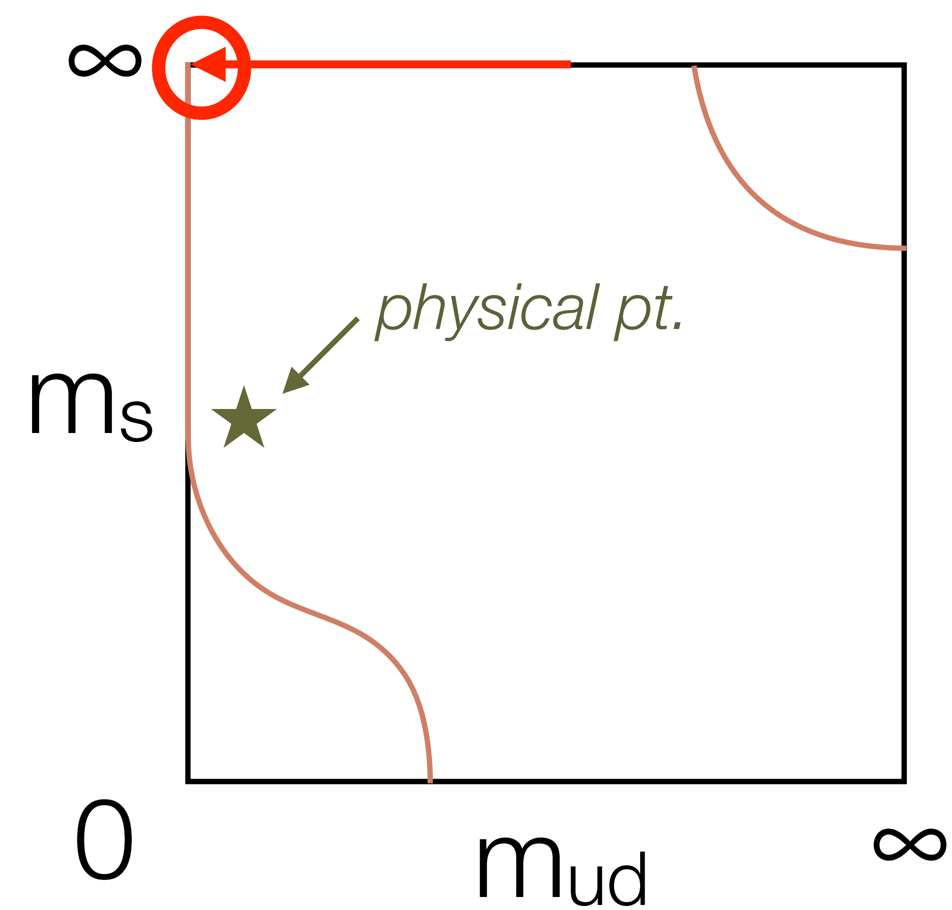
$U(1)_A$ 対称性の回復？　トポロジーと深い関係

まずは N_f=2

- N_f=2+1 physical pt. から遠い？
  - m_s ~100 MeV → ∞
    - T=0 では s のあるなしは微細効果
  - boundary の情報としては有用
- N_f=2
  - Wilson, staggered: 未確定
  - 厳密な格子カイラル対称性

➡U(1)$_A$ 回復を示唆 [JLQCD16]

➡一次転移の可能性 → $\chi_t(m)$に飛び?
[Pisarski&Wilczek]



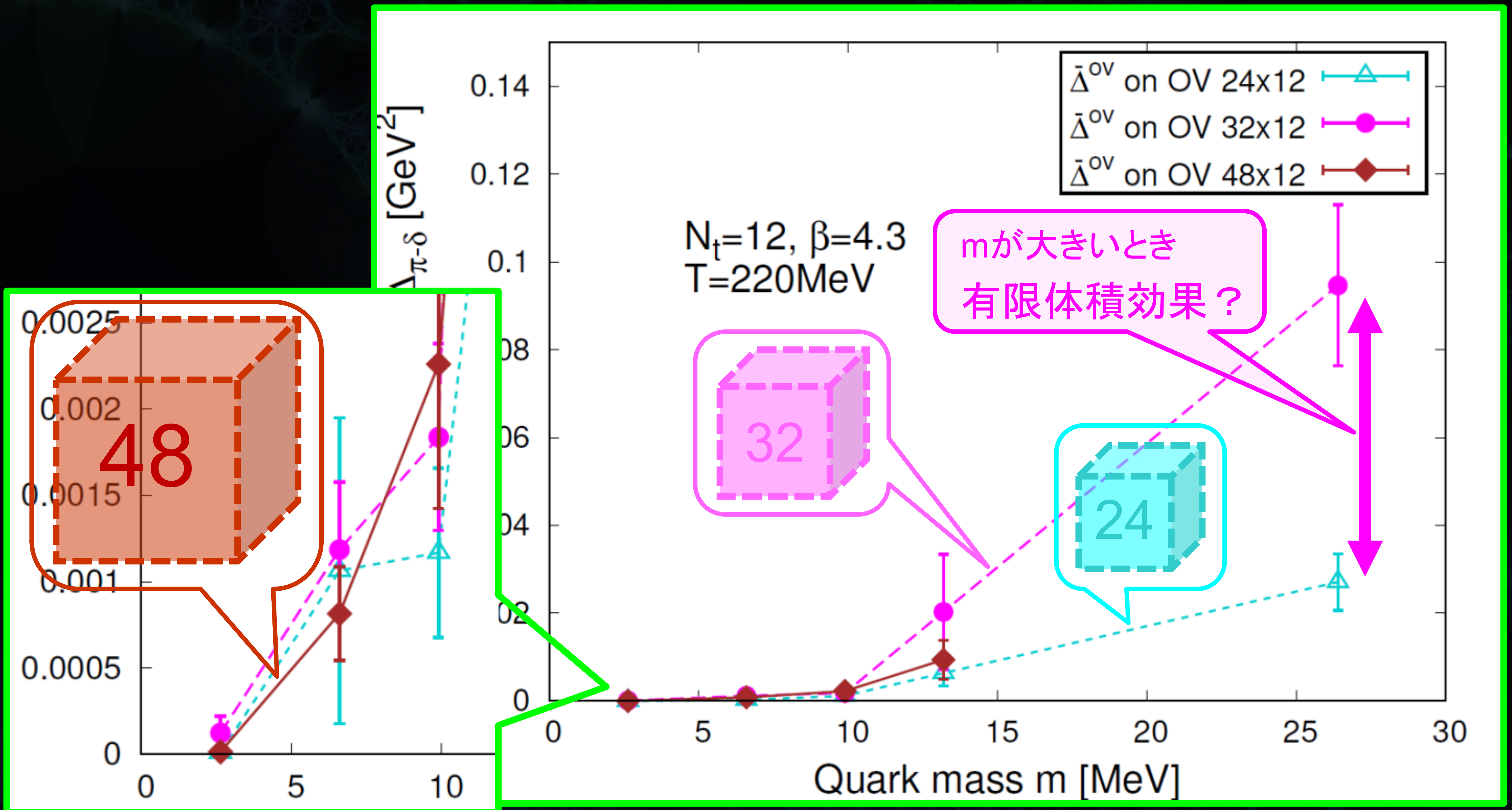
Why bother ?

- **Because it is unsettled problem !**
- fate of $U(1)_A$ - analytic
  - Gross-Pisarski-Yaffe (1981) restores in high temperature limit
    - Dilute instanton gas
  - Cohen (1996)
    - measure zero instanton effect → restores
  - Lee-Hatsuda (1996)
    - zero mode does contributes → broken
  - Aoki-Fukaya-Tanigchi (2012)
    - QCD analysis (overlap) → restores w/ assumption (lattice)
  - Kanazawa-Yamamoto (2015)
    - EFT case study how restore / break
  - Azcoiti (2017)
    - case study how restore / break

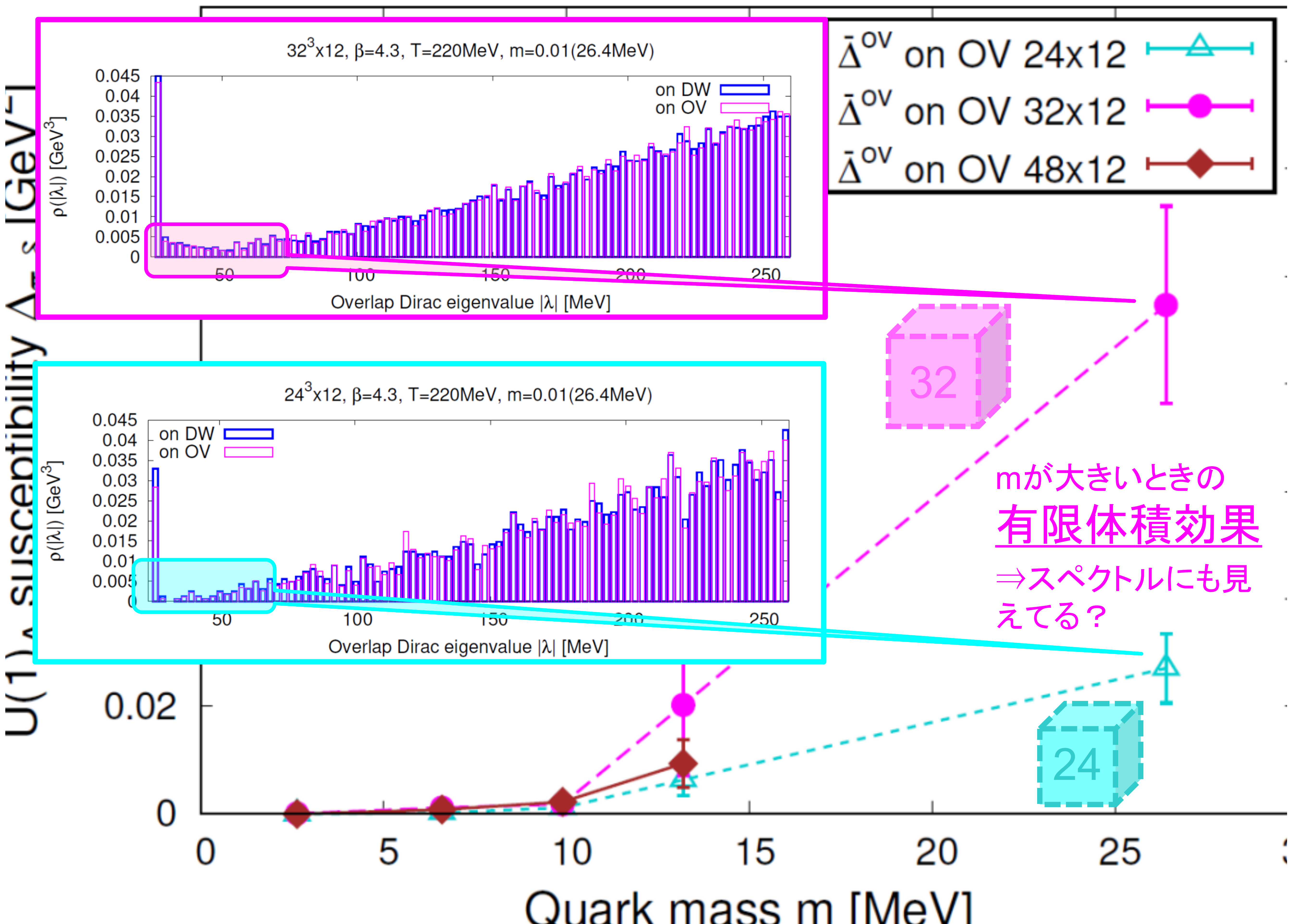
Why bother ?

- **Because it is unsettled problem !**
- fate of $U(1)_A$ lattice
  - HotQCD (DW, 2012) broken
  - JLQCD (topology fixed overlap, 2013) restores
  - TWQCD (optimal DW, 2013) restores ?
  - LLNL/RBC (DW, 2014) broken
  - HotQCD (DW, 2014) broken
  - Dick et al. (overlap on HISQ, 2015) broken
  - Brandt et al. (O(a) improved Wilson 2016) restores
  - JLQCD (reweighted overlap from DW, 2016) restores
  - JLQCD (current: see Suzuki et al Lattice 2017) restores
  - Ishikawa et al (Wilson, 2017) at least Z_4 restores

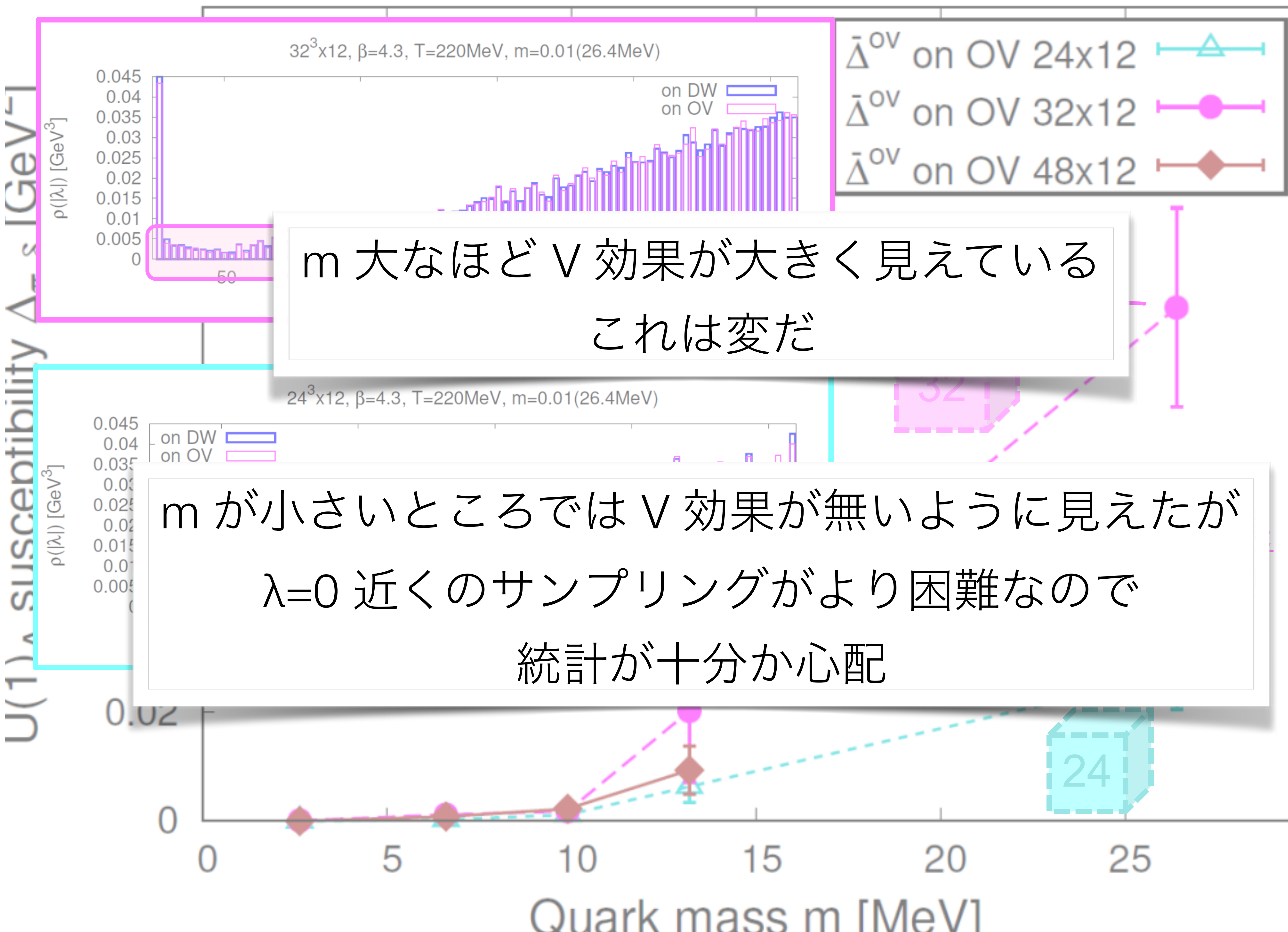
U(1)$_A$感受率（有限体積効果）



⇒mが小さいとき、有限体積効果はなさそう



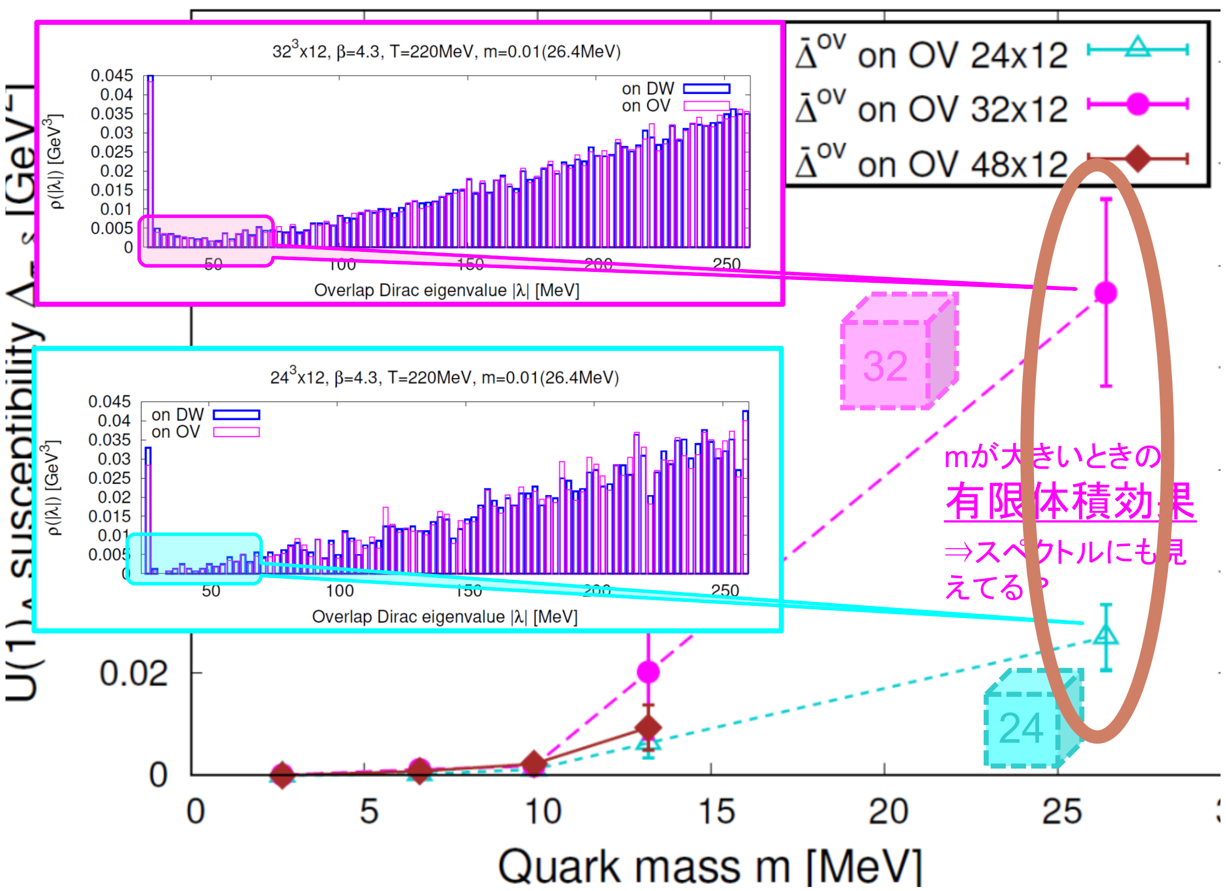
32^3x12, β=4.3, T=220MeV, m=0.01(26.4MeV)
on DW
on OV
ρ(|λ|) [GeV^3]
Overlap Dirac eigenvalue |λ| [MeV]
24^3x12, β=4.3, T=220MeV, m=0.01(26.4MeV)
on DW
on OV
ρ(|λ|) [GeV^3]
Overlap Dirac eigenvalue |λ| [MeV]
$\bar{\Delta}^{OV}$ on OV 24x12
$\bar{\Delta}^{OV}$ on OV 32x12
$\bar{\Delta}^{OV}$ on OV 48x12
32
24
mが大きいときの
有限体積効果
⇒スペクトルにも見えてる？
U(1)$_A$ susceptibility $\Delta_{\pi-\delta}$ [GeV^2]
Quark mass m [MeV]



m 大なほど V 効果が大きく見えている
これは変だ

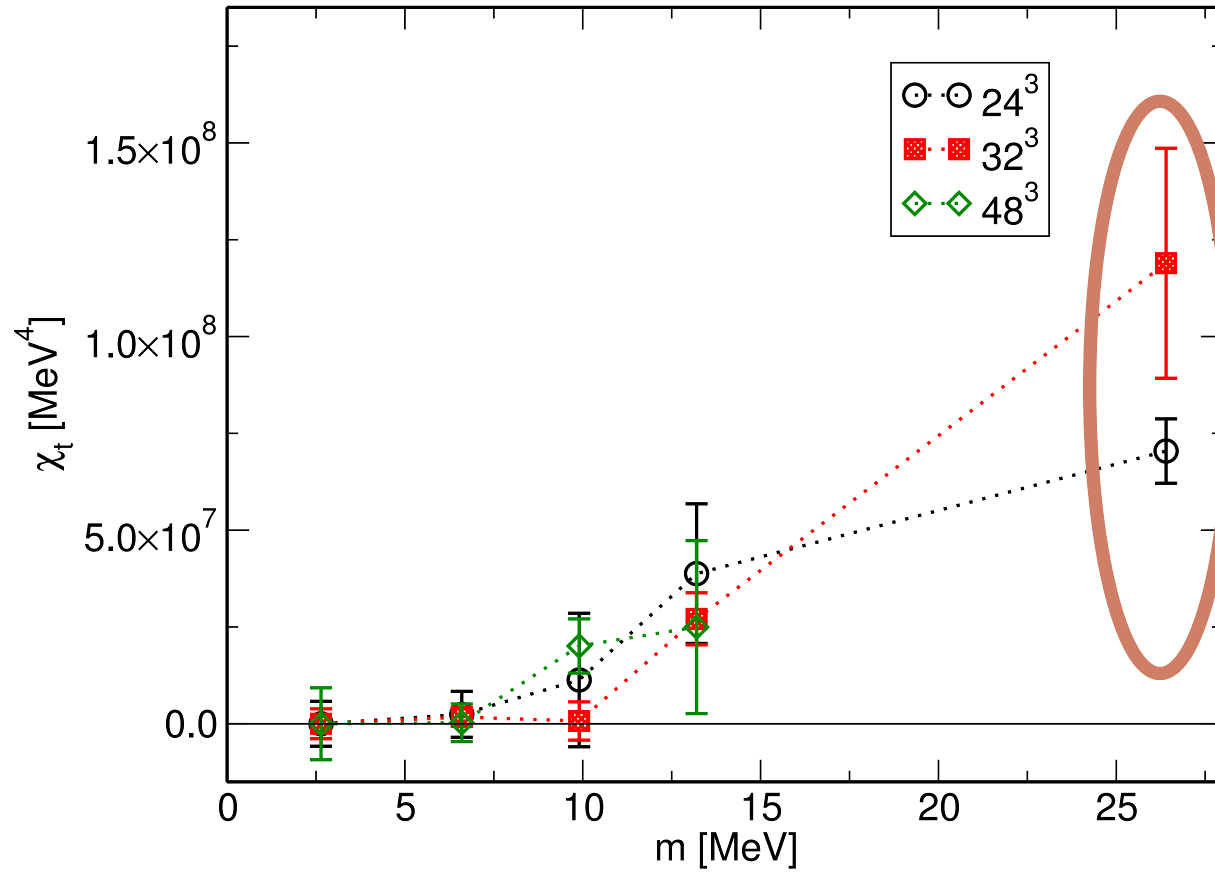
m が小さいところでは V 効果が無いように見えたが
λ=0 近くのサンプリングがより困難なので
統計が十分か心配

U(1)A



topology

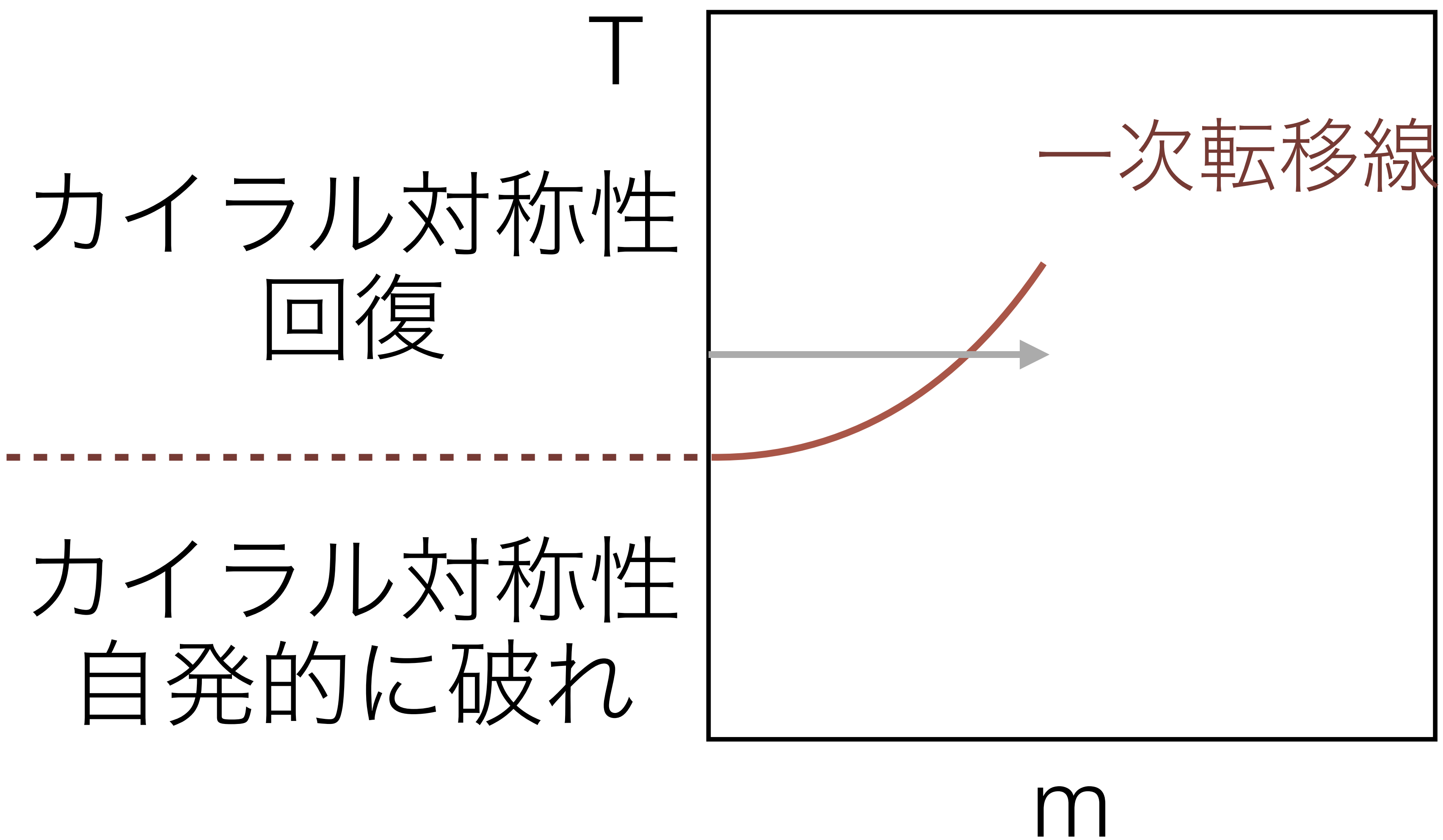
OV-OV

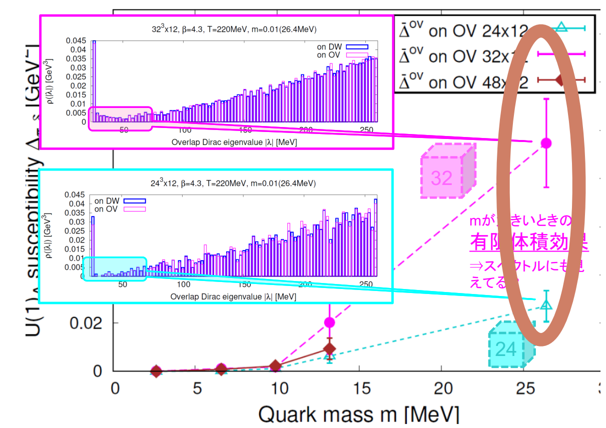


m 大なほど V 効果が大きく見えている

これは変だ

大きな体積効果:考えられるひとつのシナリオ

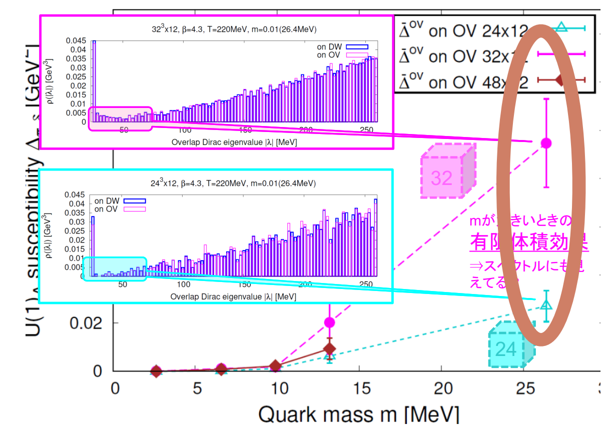


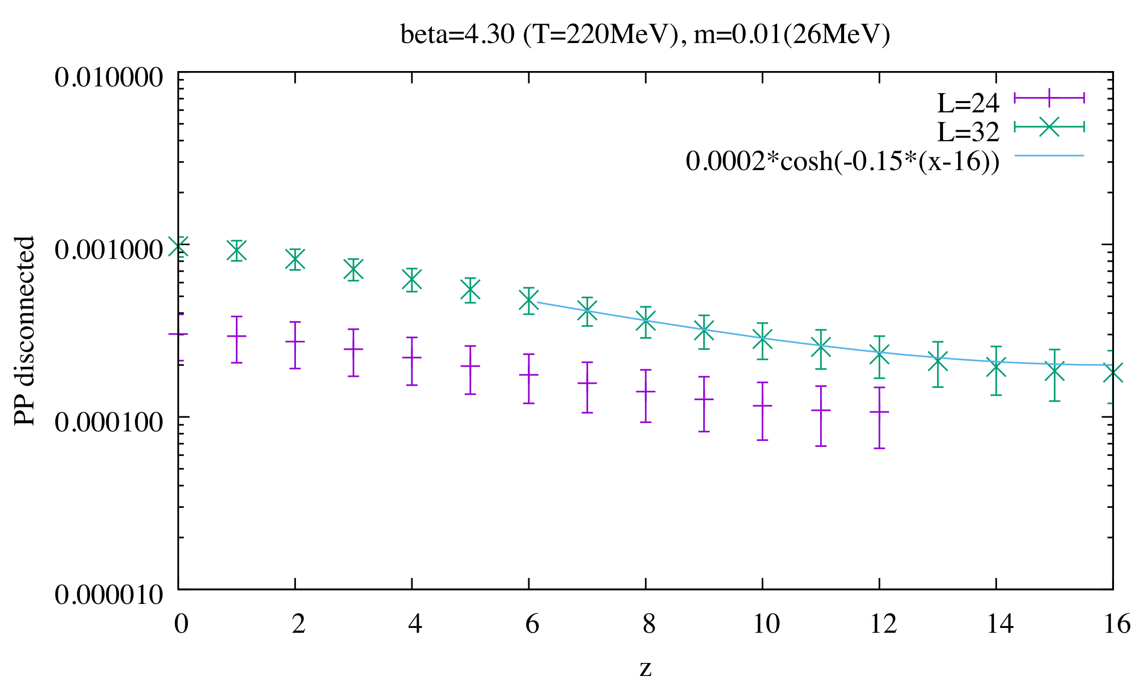


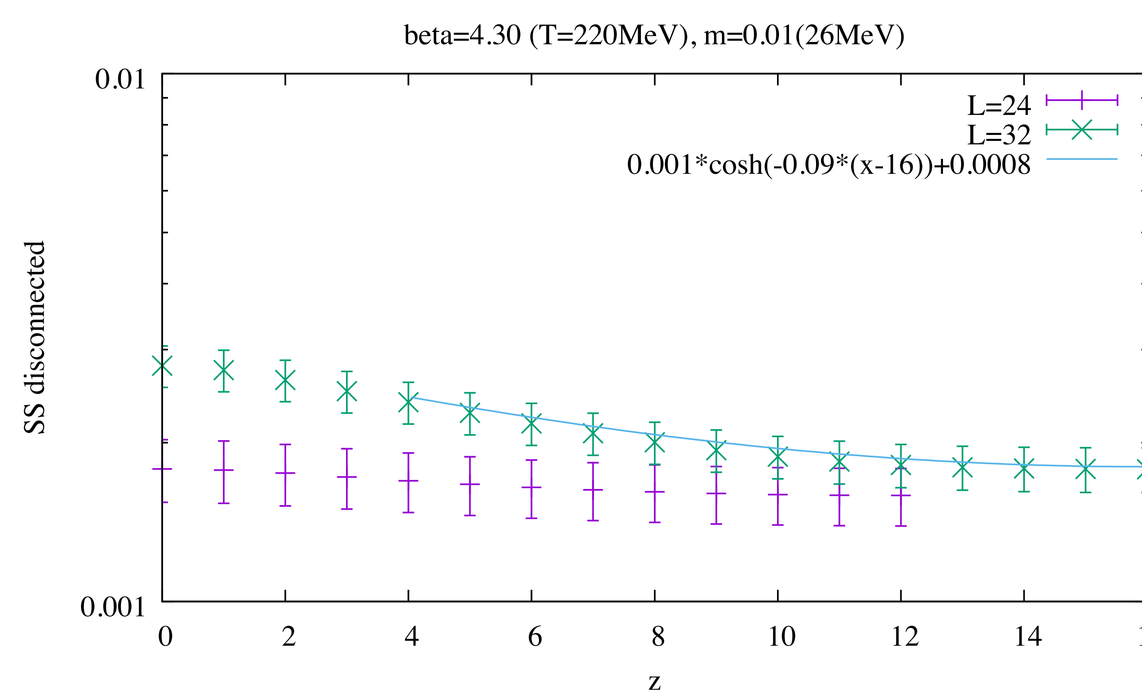
- m増加で破れた相に突入
- 軽い粒子の出現あれば説明可能か？

大きな体積効果:考えられるひとつのシナリオ

- m増加で破れた相に突入
- 軽い粒子の出現あれば説明可能か？
- πは軽くない、しかし、
- σ ~ 0.09 < π ~ 0.2 ~ η’
  - フレーバー一重項スカラーが軽くなっている可能性

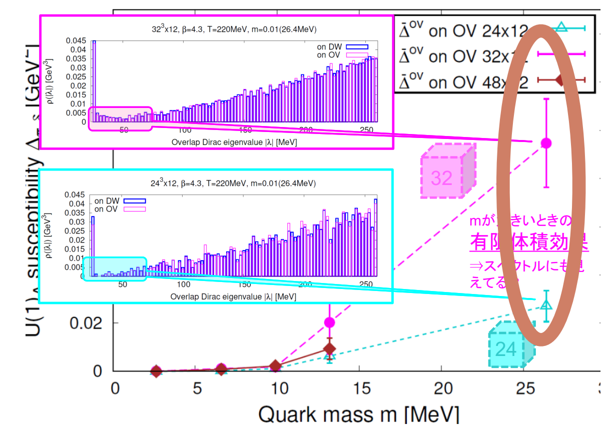


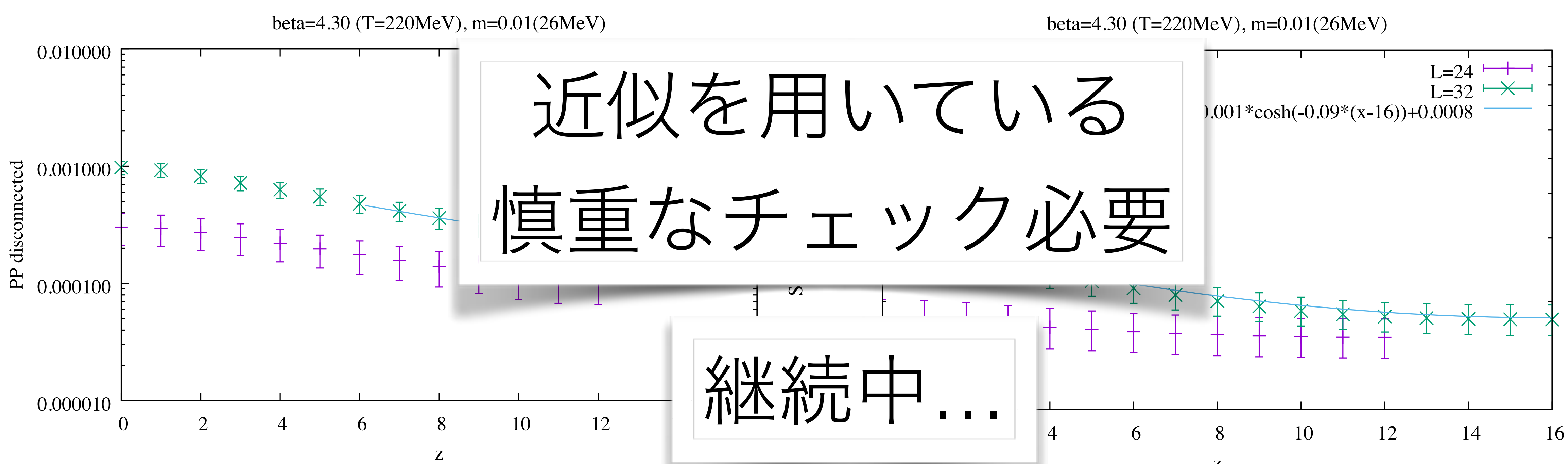




大きな体積効果:考えられるひとつのシナリオ

- m増加で破れた相に突入
- 軽い粒子の出現あれば説明可能か？
- πは軽くない、しかし、
- σ ~ 0.09 < π ~ 0.2 ~ η’
  - フレーバー一重項スカラーが軽くなっている可能性





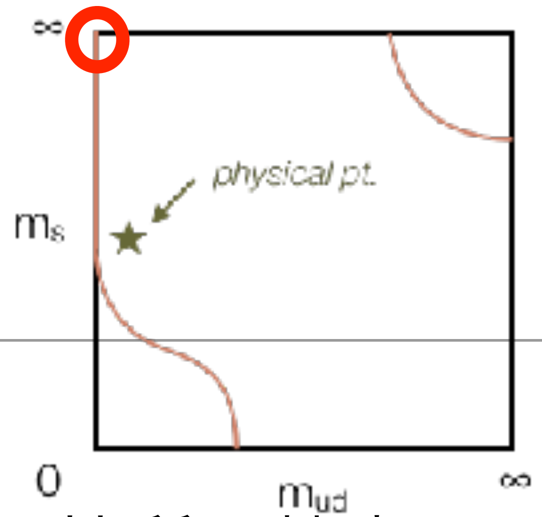
近似を用いている
慎重なチェック必要

継続中...

まとめ

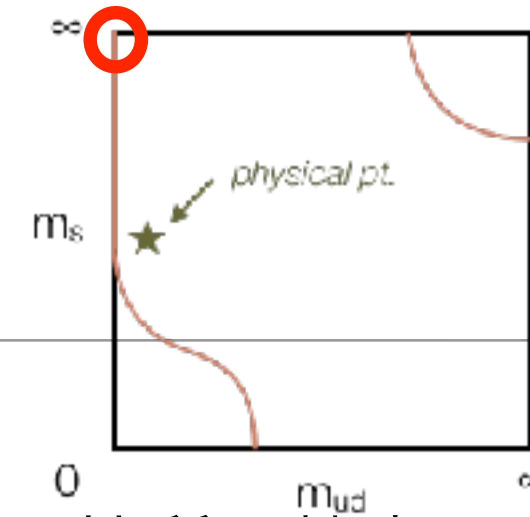
- カイラル対称性が厳密な計算手法でQCD相転移を追跡
  - 特に N_f=2 QCD では他の手法は信頼に足りない
  - 先行するJLQCD研究より連続理論に近い計算を推進
- 高温相 T=220 MeV で $\chi_t(m)$ と $U(1)_A$ 特に **体積依存性**を追求
  - 一次転移と思われた m_c 近傍で 体積依存性が不自然
  - 相転移の有無、$U(1)_A$ の最終結論はおあずけ
- 比較的大きいクオーク質量で不思議な体積依存性
  - 相転移を示唆？
  - フレーバー一重項スカラーが軽くなる新奇な現象？
- 継続中。。。

N_f=2 の問題点



- 何故難しい？
  - 従来の格子手法では捉えられない 対称性にまつわる性質の精密解析により、新たな現象が見えてきている
  - 従来の方法は物理点ではある程度使えるが、極限では心許ない
  - 例えるなら…極地観測.

N_f=2 の問題点



- 何故難しい？
  - 従来の格子手法では捉えられない 対称性にまつわる性質の精密解析により、新たな現象が見えてきている
  - 従来の方法は物理点ではある程度使えるが、極限では心許ない
  - 例えるなら...極地観測.

宗谷: 「一次転

ふじ: 「大きな体積効果を見つけた!」

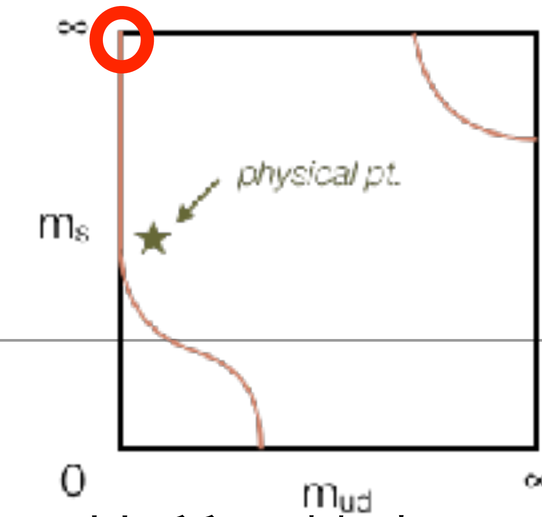
装備:

- カイラルフェルミオン
- IroIro++
- BGQ

装備:

- カイラルフェルミオン
- Grid
- OFP + 複数体積

N_f=2 の問題点



- 何故難しい？
  - 従来の格子手法では捉えられない 対称性にまつわる性質の精密解析により、新たな現象が見えてきている
  - 従来の方法は物理点ではある程度使えるが、極限では心許ない
  - 例えるなら…極地観測.

宗谷: 「一次転

装備:

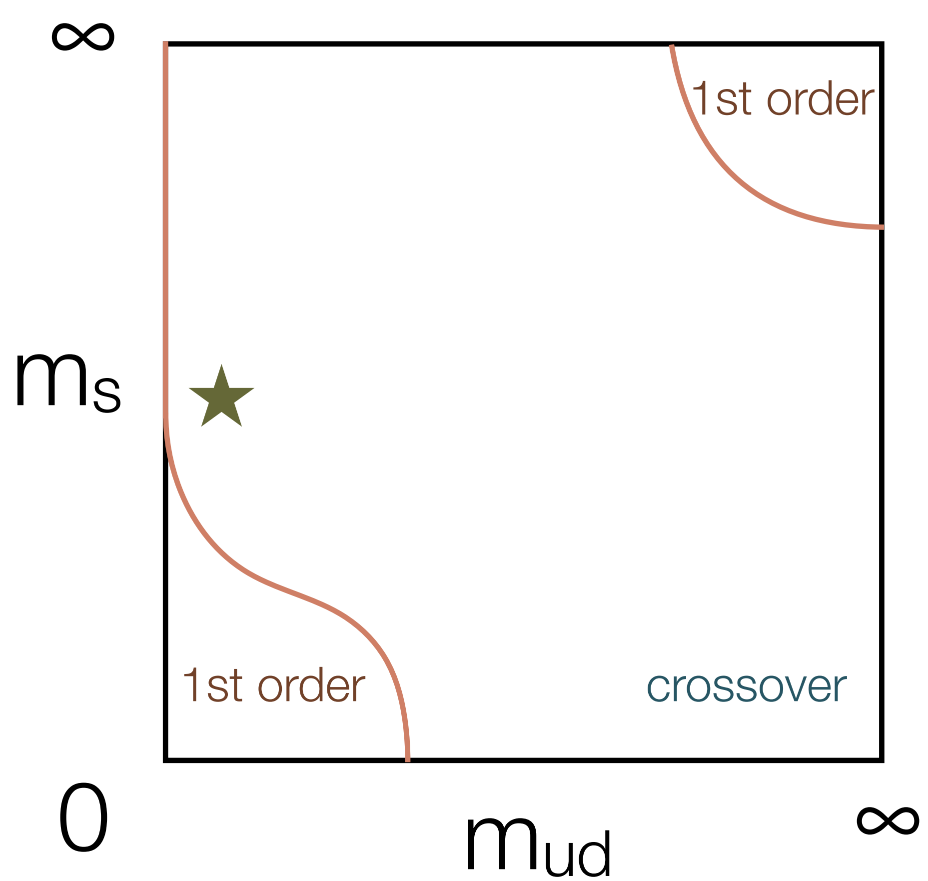
- カイラルフェルミオン
- IroIro++
- BGQ

ふじ: 「大き

装備:

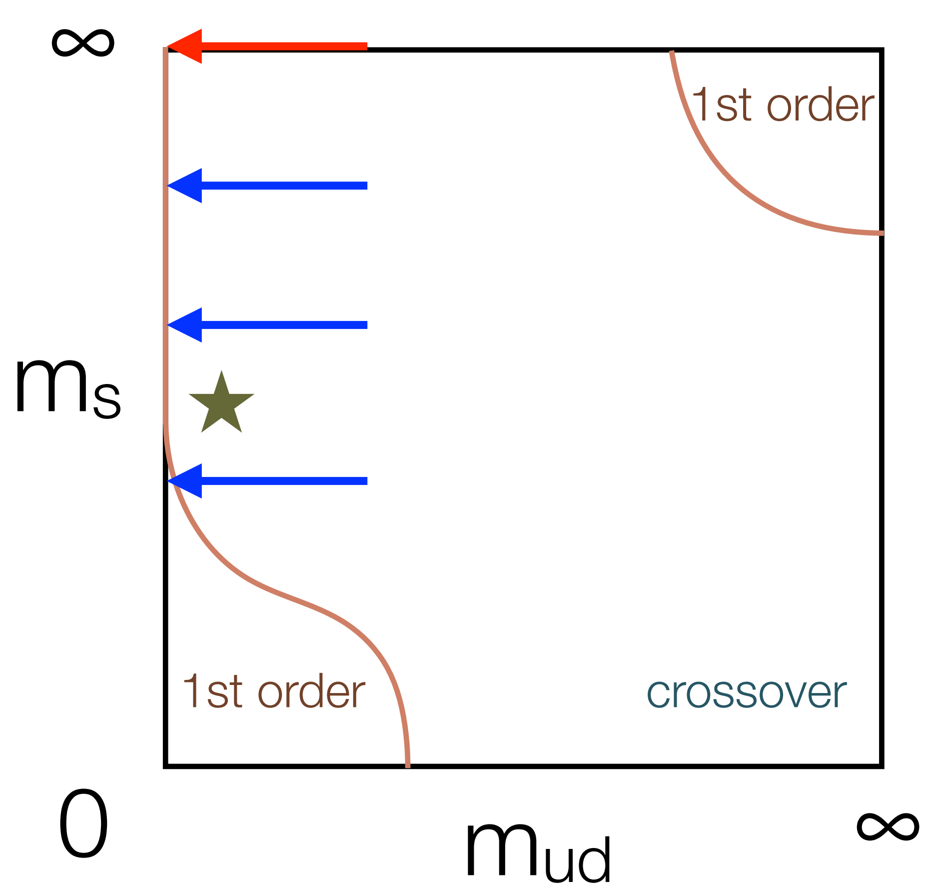
- カイラルフェル
- Grid
- OFP + 複数体積

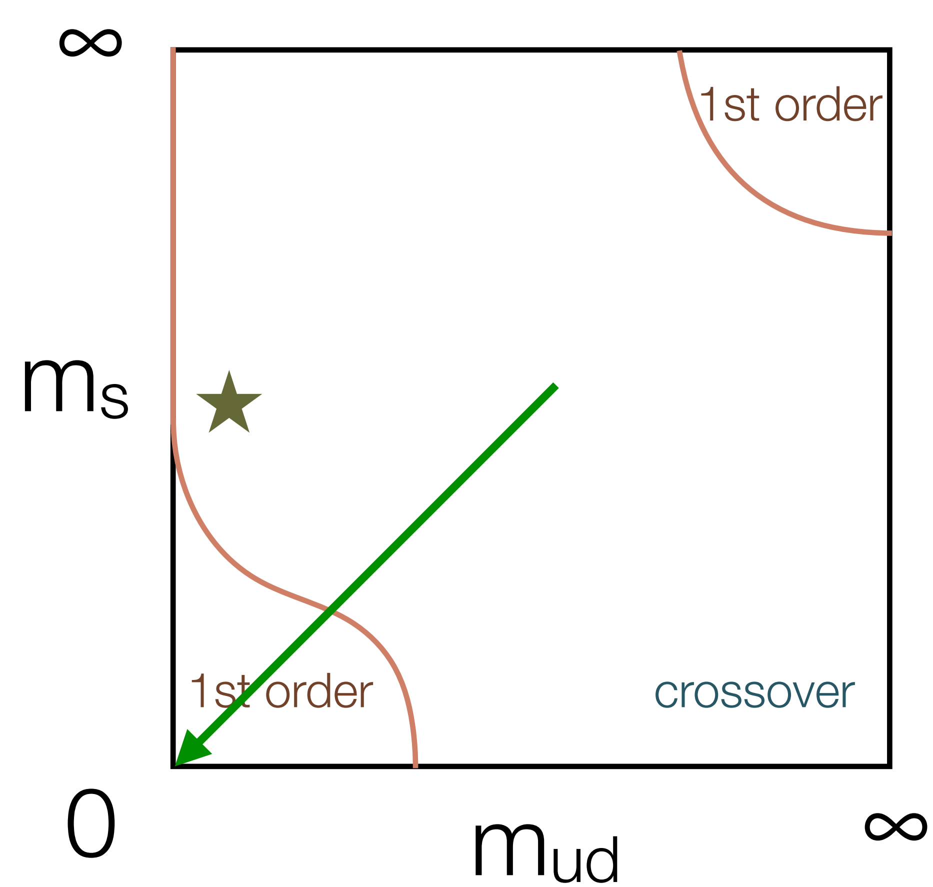
展望



展望

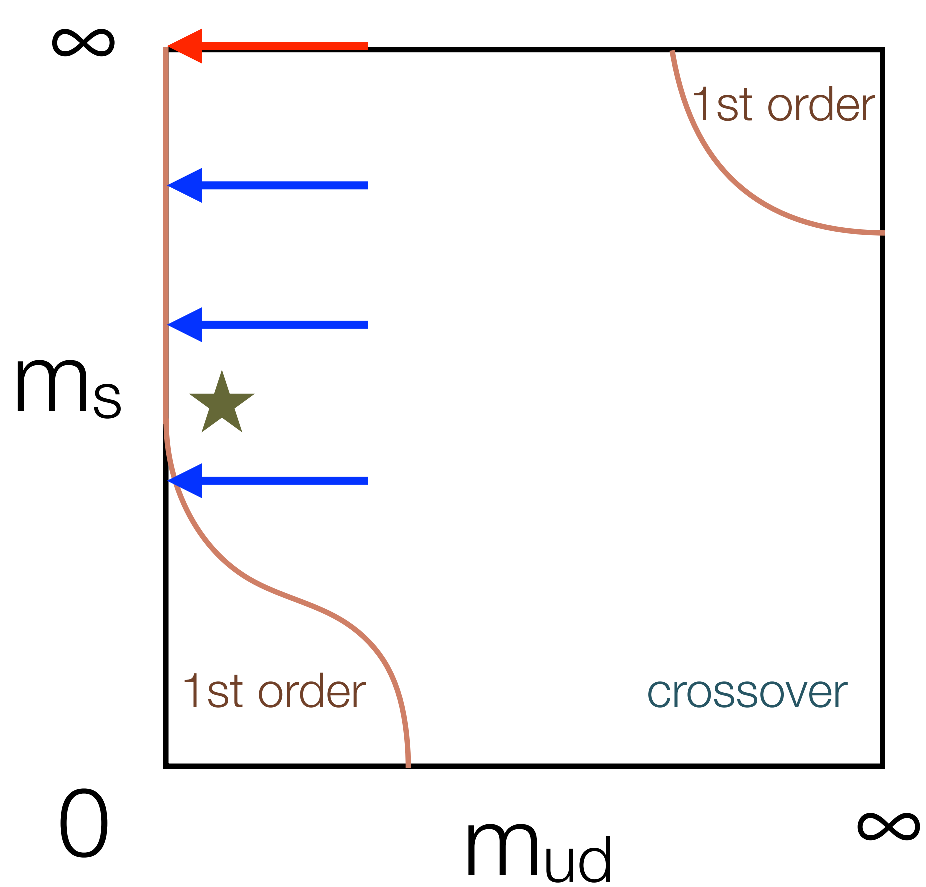
- N_f=2 の相転移の解明
- N_f=2+1 へ (ポスト京) ：しらせ 
- N_f=3:　all degenerate ：

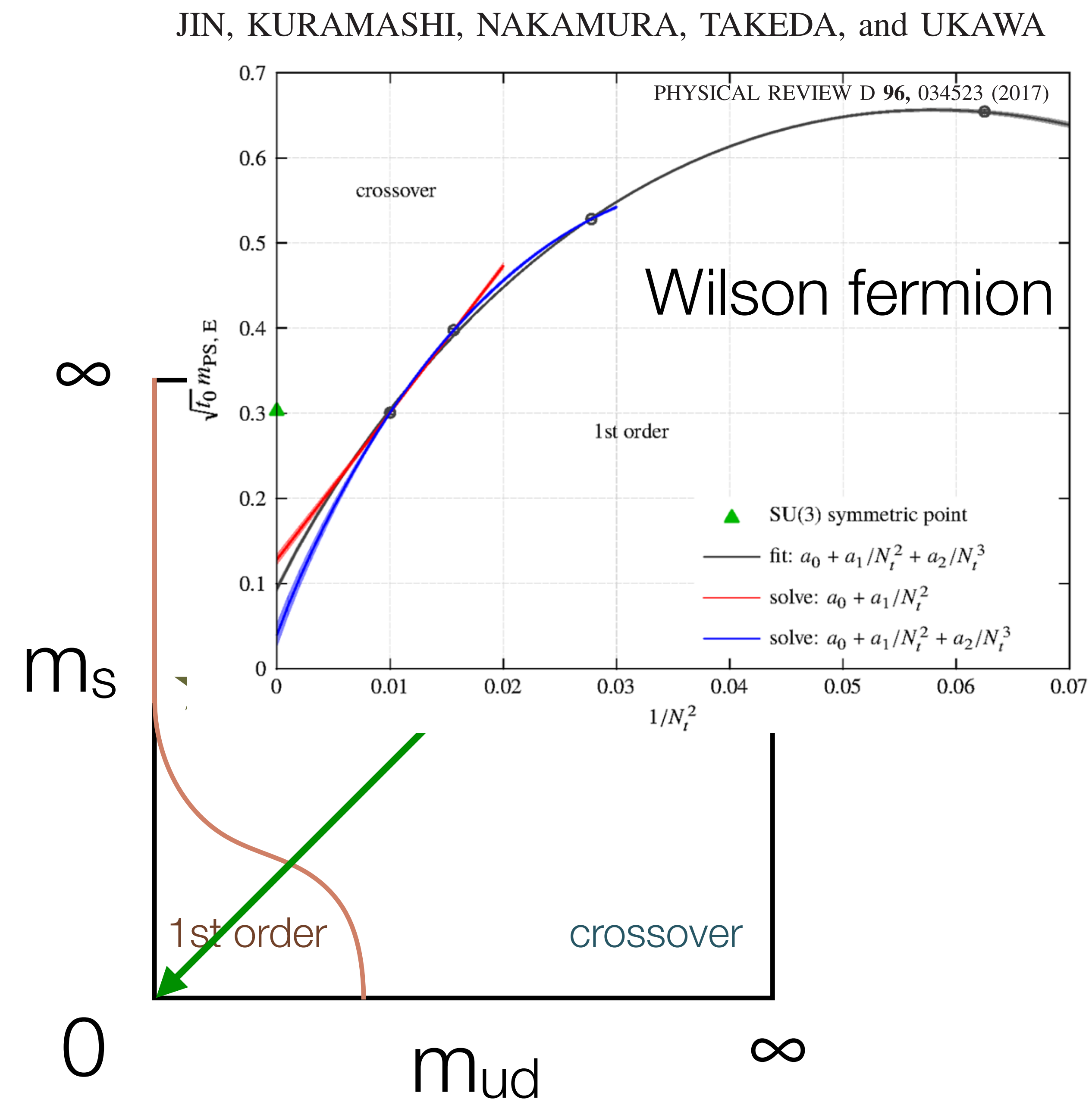




展望

- N_f=2 の相転移の解明
- N_f=2+1 へ (ポスト京) ：しらせ
- N_f=3:　all degenerate ：





展望

- N_f=2 の相転移の解明
- N_f=2+1 へ (ポスト京) ：しらせ 
- N_f=3:　all degenerate ：しらせ