

よく知られている理論の不思議な性質 ---

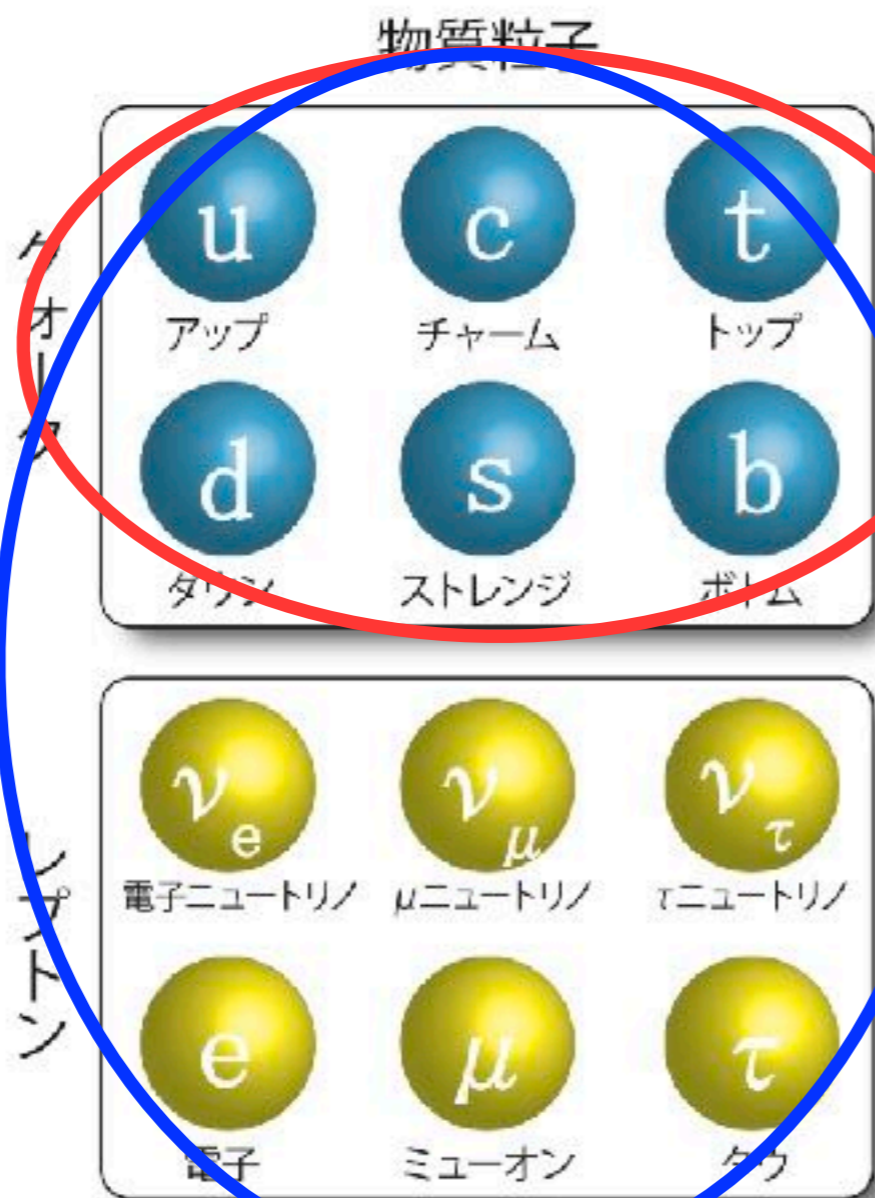
大規模数値計算によるQCDの相境界近傍の解析

青木保道

理化学研究所 計算科学研究センター 連続系場の理論研究チーム

素粒子標準模型に登場する素粒子

QCD



最後のピース
2012年発見

電弱理論

素粒子標準模型に登場する素粒子とパラメタ

- 結合定数 (QCD, 電弱)

- Higgs (vev, mass)

- フェルミオン質量

 - クォーク

 - レプトン

- フェルミオン混合

 - 小林-益川 行列 (3x3)

 - レプトン混合





素粒子標準模型の動力学

- 対称性とその破れ
 - ゲージ対称性： 電弱理論
 - ヒッグス機構
 - ➔ フェルミオン質量の起源
 - カイラル対称性： QCD
 - 南部 - ゴールドストーン
 - ➔ ハドロンの質量の起源: 陽子、中性子含む
 - 目に見える宇宙の99%の質量はこちらから

QCD 標準模型中の強い相互作用の理論

- Quantum Chromo Dynamics
- カイラル対称性: 右巻きと左巻きのクォークの交換で理論が変わらない
- 理論式を見る限り対称性がある。しかし、、、
- 自発的に破れている
- 真空中でカイラル凝縮: クォークと反クォークのへ
- ゼロ質量の粒子の存在: 南部-ゴールドストーン粒
- π : 複合粒子: $(u\bar{d})$, $(d\bar{u})$, $(u\bar{u}-d\bar{d})$ 粒子反粒子 へ
- 核力を説明する粒子



The Nobel Prize in Physics 2008

Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa

The Nobel Prize in Physics 2008



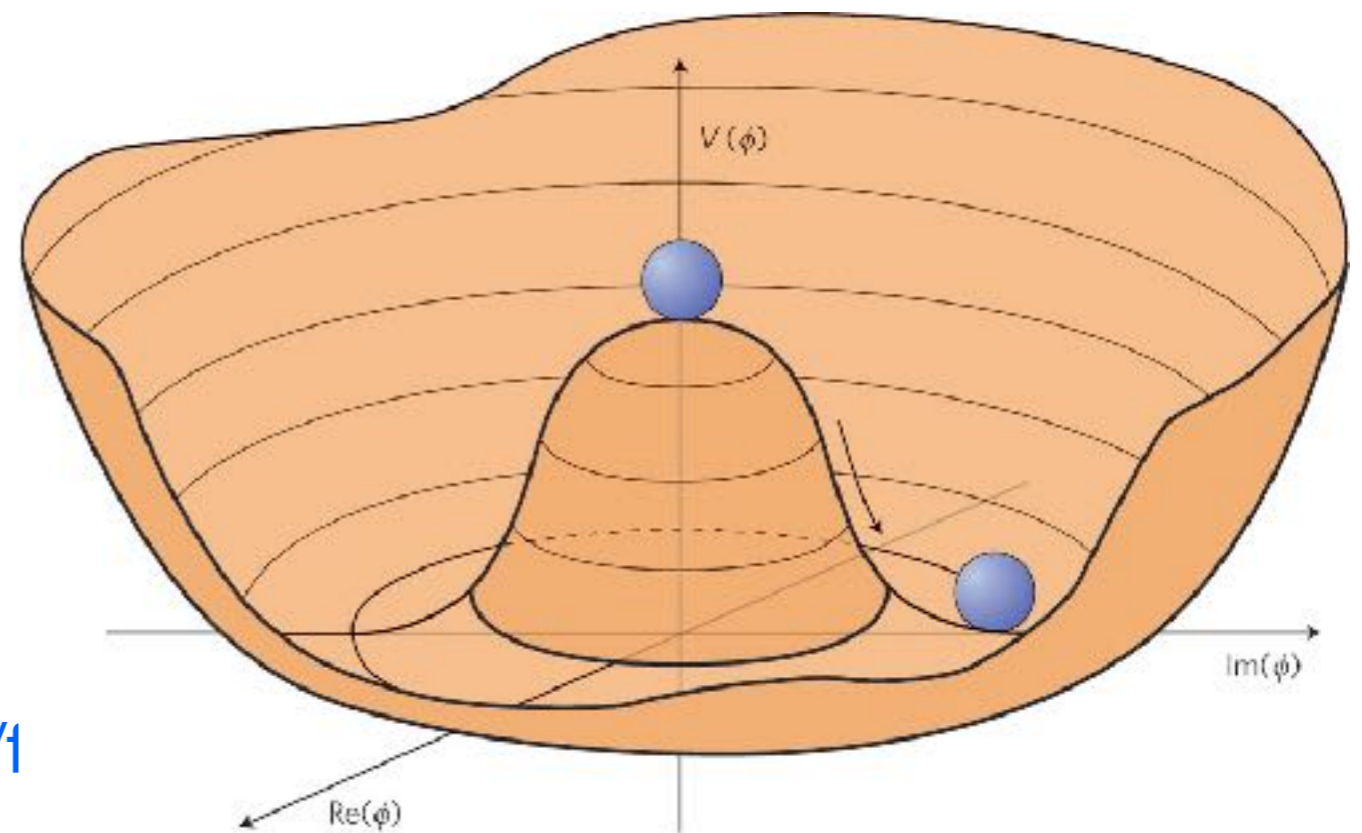
Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu

QCDにおける π と σ (シグマ)

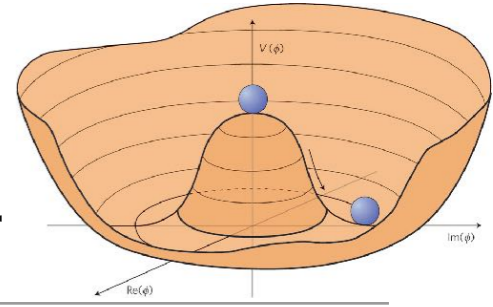
- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($u\bar{u}+d\bar{d}$)
- 複合粒子の質量 $m^2=\text{曲率}$: $m_\pi=0, m_\sigma>0$
- 実世界では \rightarrow 傾きが入る($m_{ud}>0$)

有効ポテンシャル



- 対称性が少し破れる
- $m_\pi = 135 \text{ MeV}$
- $m_\sigma = 400 \sim 550 \text{ MeV}$
- QCDのスケール: π 崩壊定数
 - $f_\pi = 93 \text{ MeV}$ インプット
 - **simulationで求まる: $m_\pi/f_\pi, m_\sigma/f$**
- 他の複合粒子(陽子,中性子...)の質量はクォーク質量を決めれば全て決まる

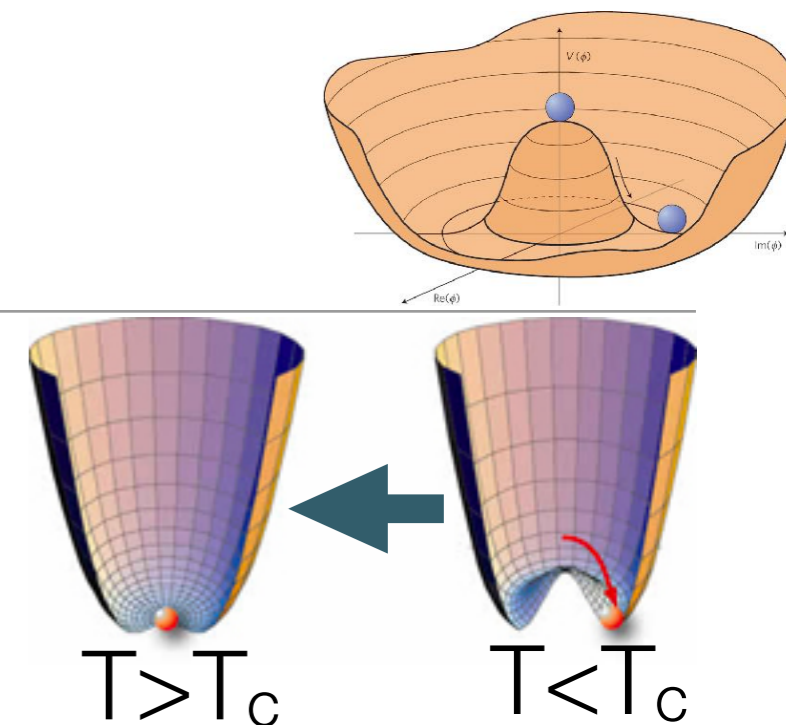
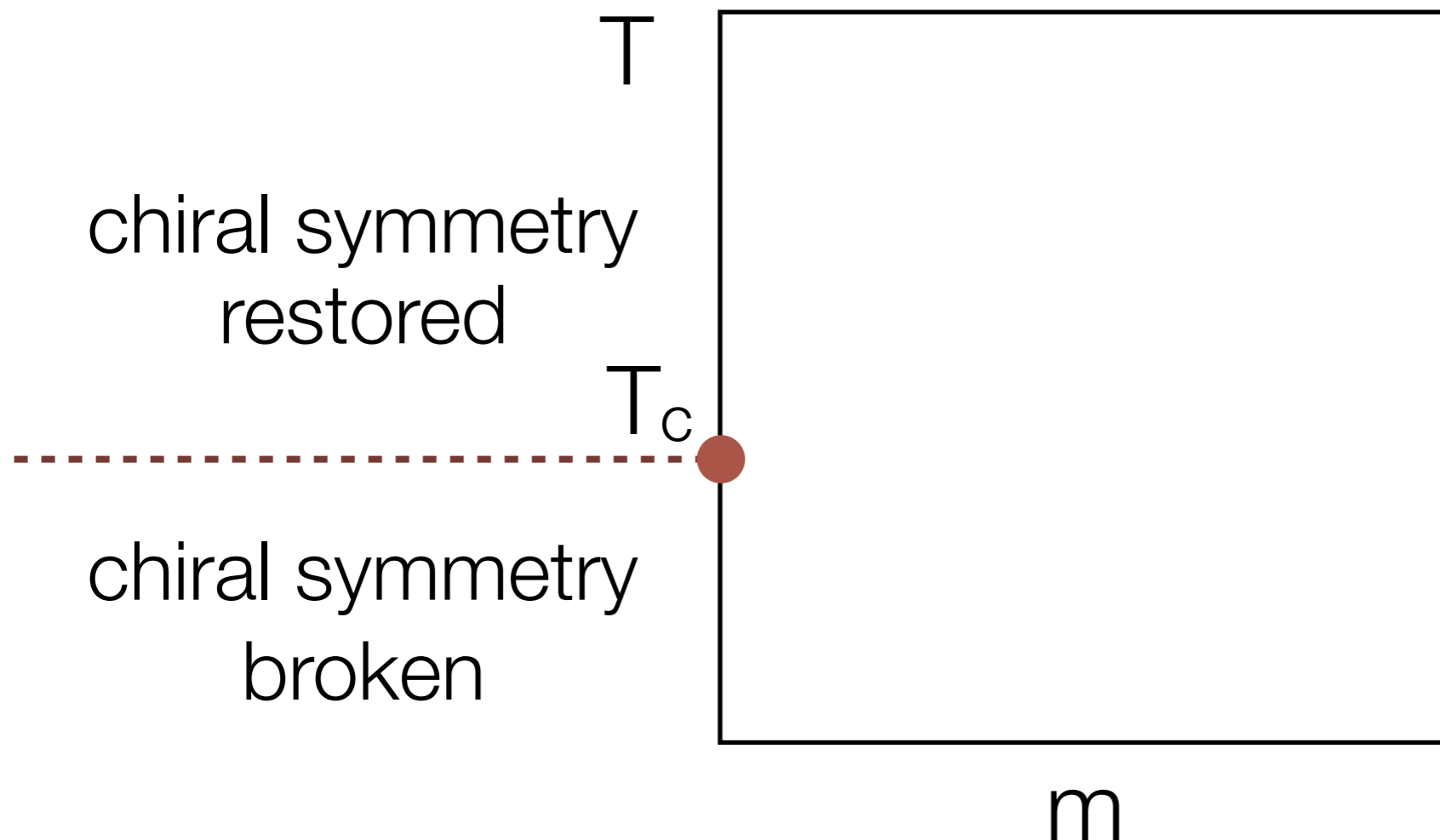
QCDにおける π と σ (シグマ) \Leftarrow 有効模型



- 有効模型による記述: 結構良い \Leftarrow かなり昔から分かっている
 - カイラル対称性の自発的破れで定性的理解
 - 有効模型のパラメタをいくつか決めると
 - それなりに世界を記述できる
- しかし、それでは、標準模型の精密検証はできない
 - π や σ 等の複合粒子を作る元になっている理論の第一原理計算必要
 - しかも高精度!
- 実は、標準模型中のヒッグス部分 \rightarrow この有効模型とほぼ同じ
 - 背後にQCDの様な理論がある?

カイラル対称性の回復

- 温度
- 2つの異なる相: やぶれ(低温) \leftrightarrow 回復(高温)
 - 相転移の存在
 - クォーク閉じ込め \leftrightarrow 非閉じ込め

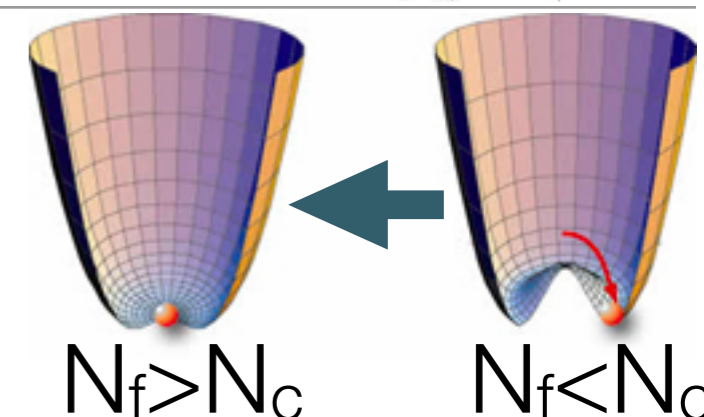
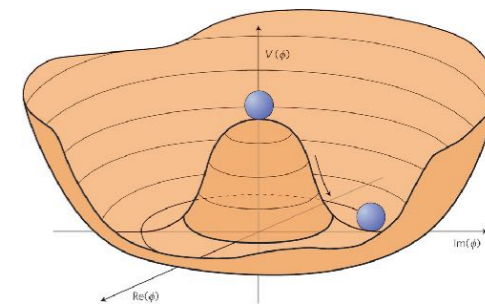


出典: 東大理学部

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2004/02.html>

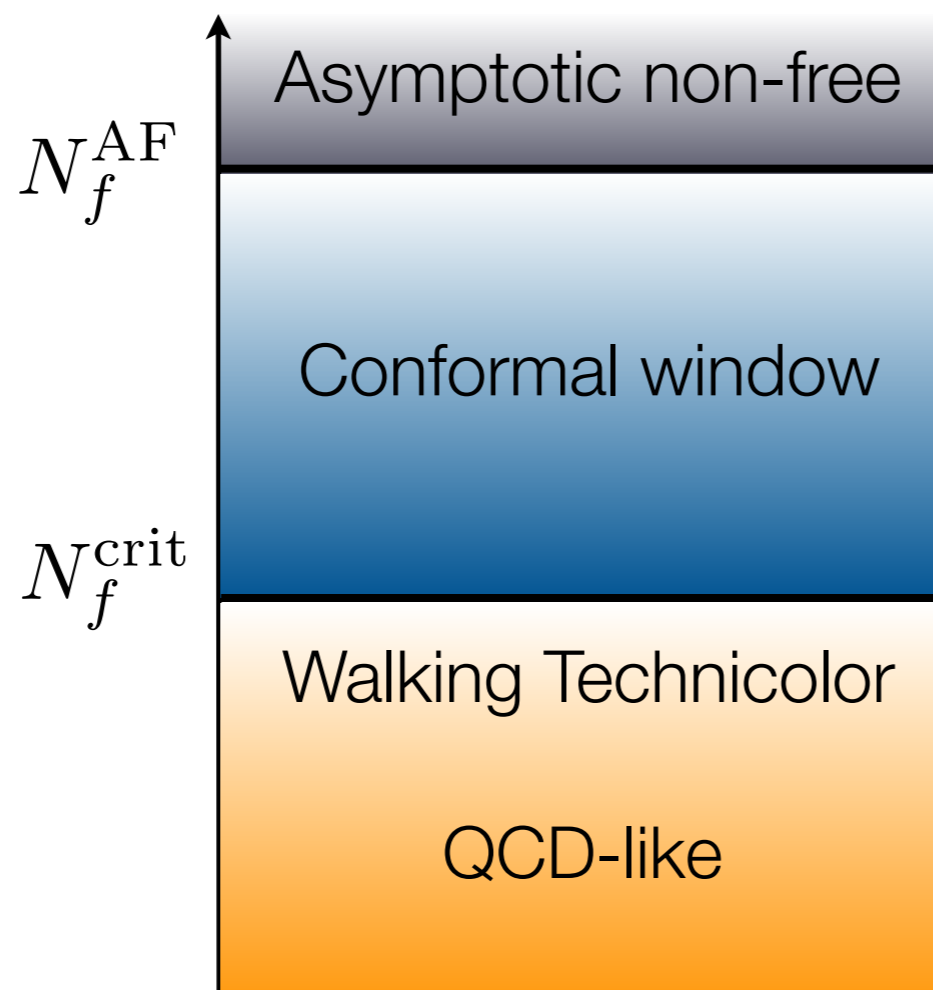
カイラル対称性の回復

- 温度
- 2つの異なる相: やぶれ(低温) \leftrightarrow 回復(高温)
 - クォーク閉じ込め \leftrightarrow 非閉じ込め
- クォークの数 N_f

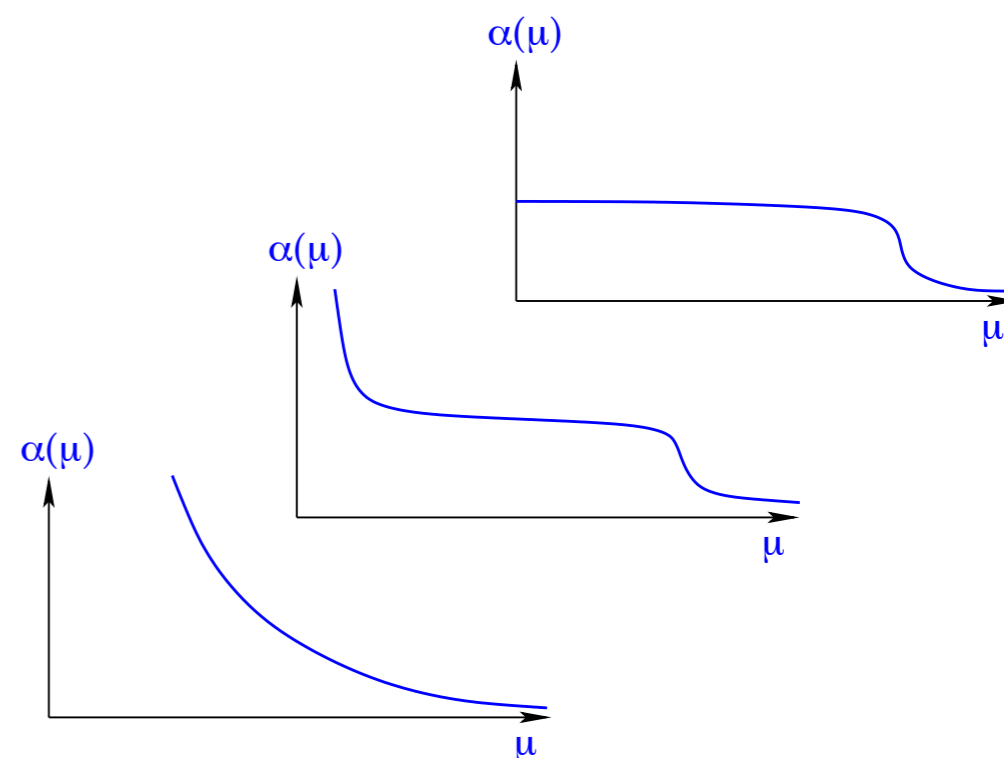


出典: 東大理学部

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2004/02.html>

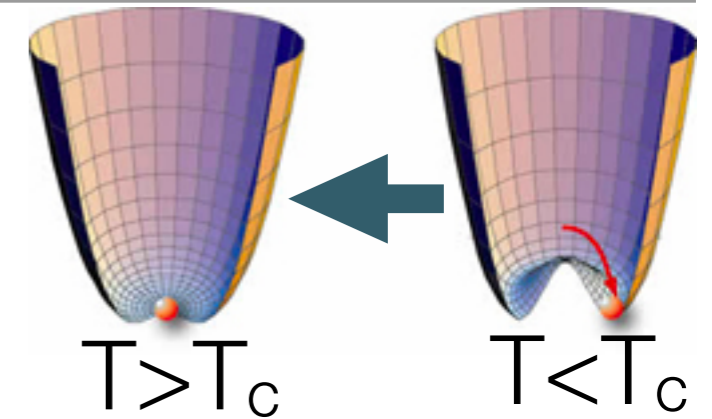
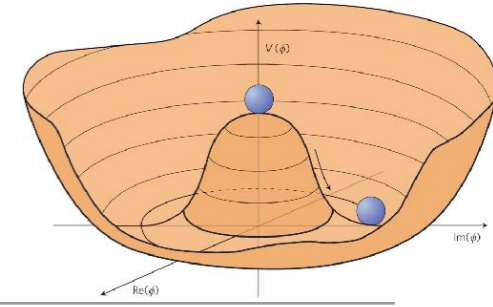


結合強度 vs エネルギー



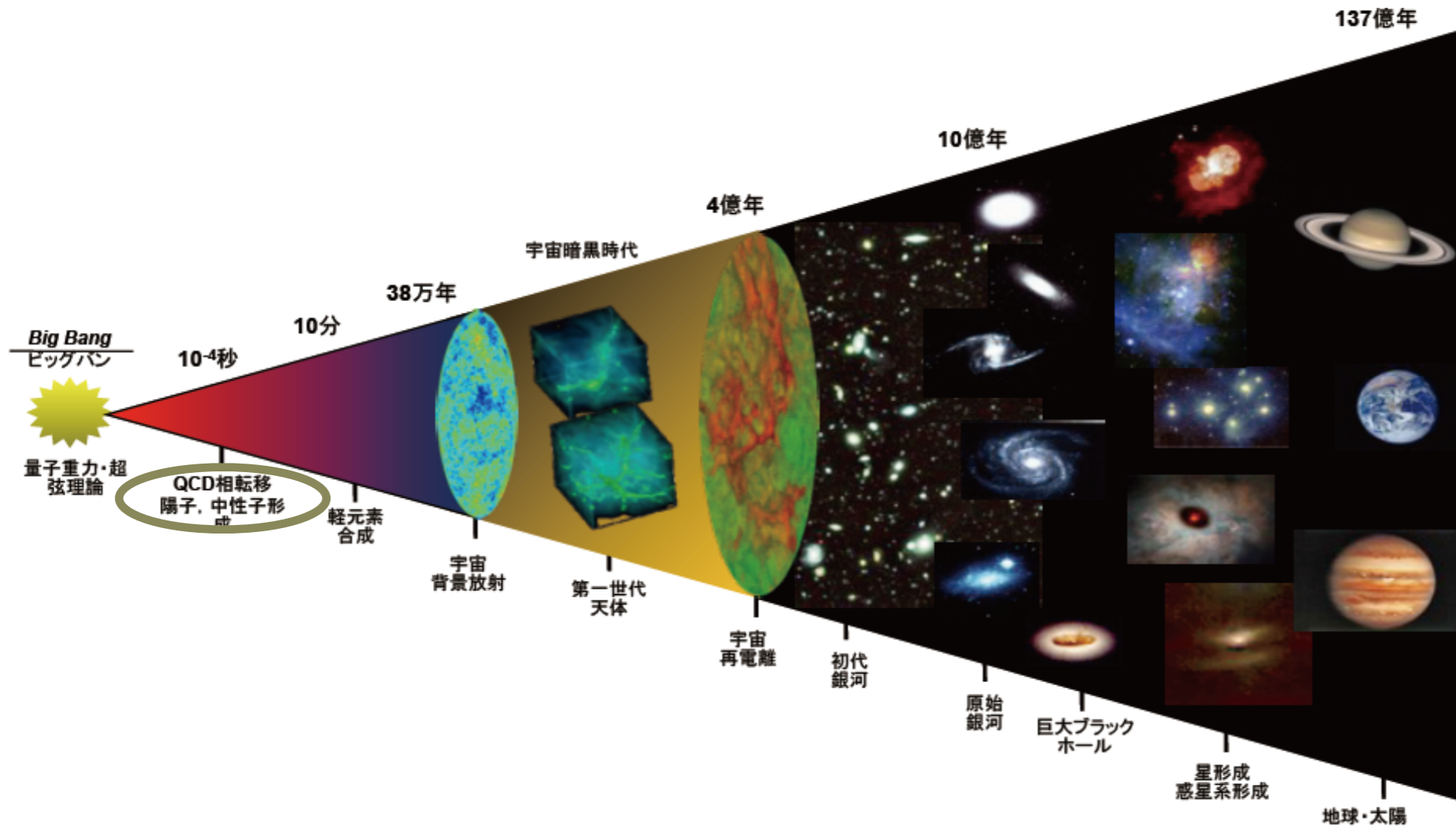
カイラル対称性の回復

- 温度
- 2つの異なる相: やぶれ(低温) \leftrightarrow 回復(高温)
 - クォーク閉じ込め \leftrightarrow 非閉じ込め

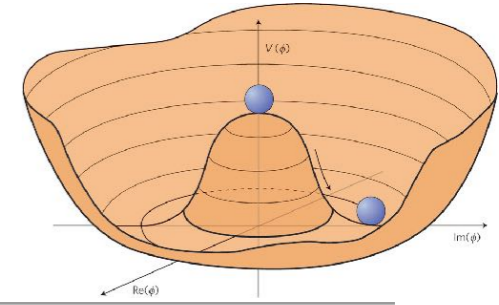


出典: 東大理学部

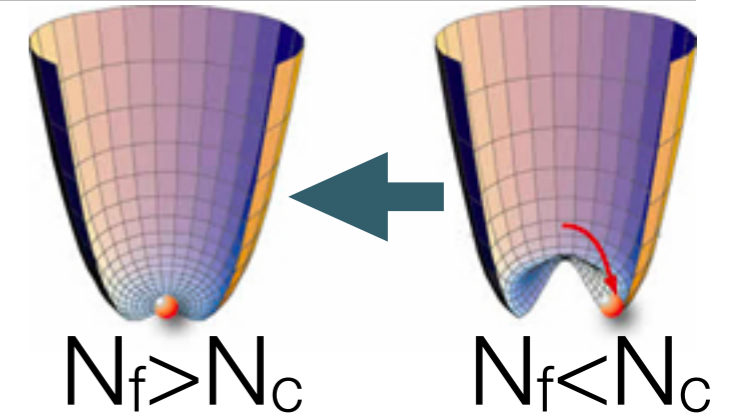
www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2004/02.html



カイラル対称性の回復

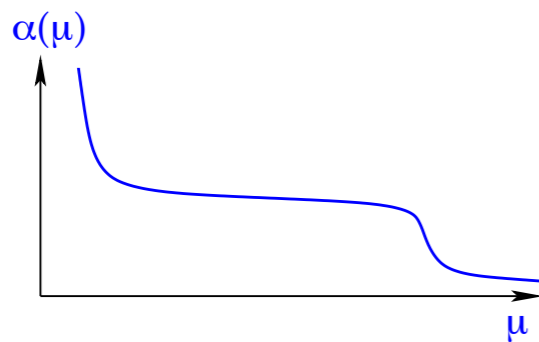


- 温度
- 2つの異なる相: やぶれ(低温) \leftrightarrow 回復(高温)
 - クォーク閉じ込め \leftrightarrow 非閉じ込め
- クォークの数
 - ヒッグスセクターの背景にある新法則の可能性



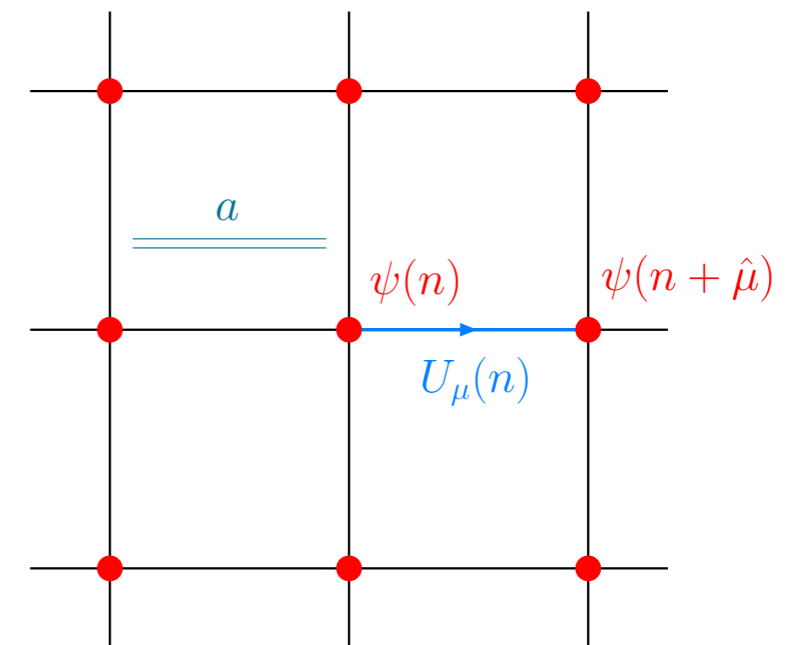
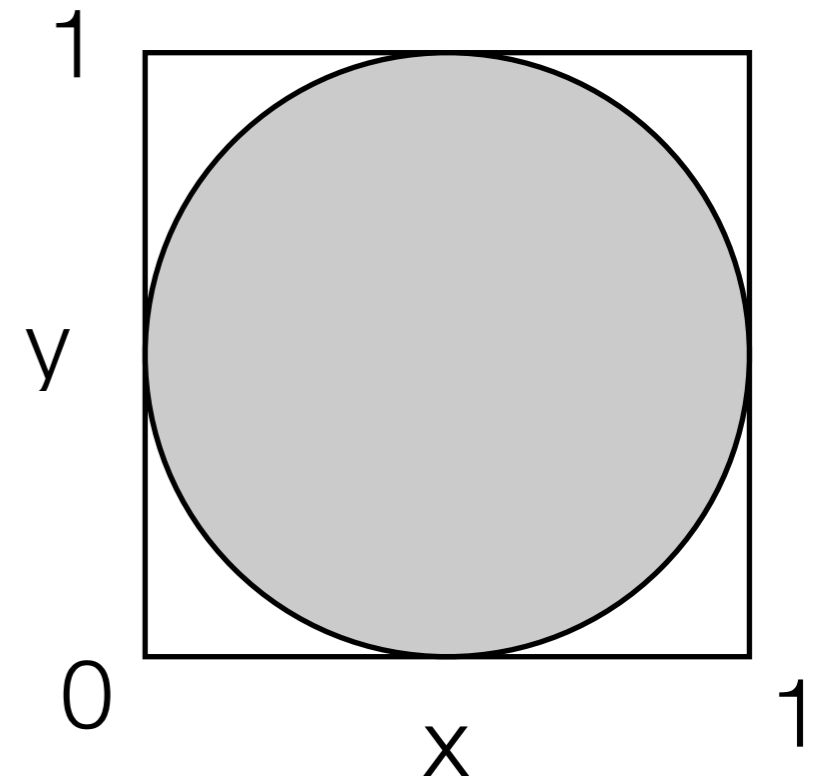
出典: 東大理学部

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2004/02.html>



理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比
 - 円の面積 / 正方形の面積 = $\pi / 4$
- 面積 ← モンテカルロ法による数値積分
- 基礎理論: 格子場のラグランジアンを経路積分
 - 4次元時空の各点で場の変数の積分を行う
 - 点の数と評価する関数の複雑さ → 膨大な計算



困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には

- 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大

- 格子間隔

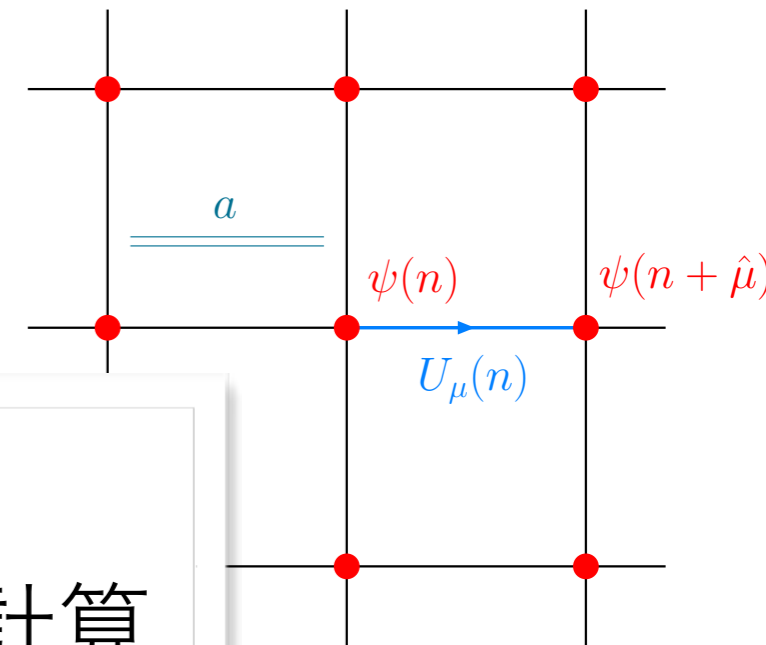
- とたんに世界最

- $a \neq 0$ では：カイ

- 工夫

- カイラル対称性の改良／厳密化

- 格子間隔 a が比較的大きくても 連続極限 $a \rightarrow 0$ のエッセンスをとらえる



現状 $T=0$ の格子計算は

- 物理点クォーク質量直上計算

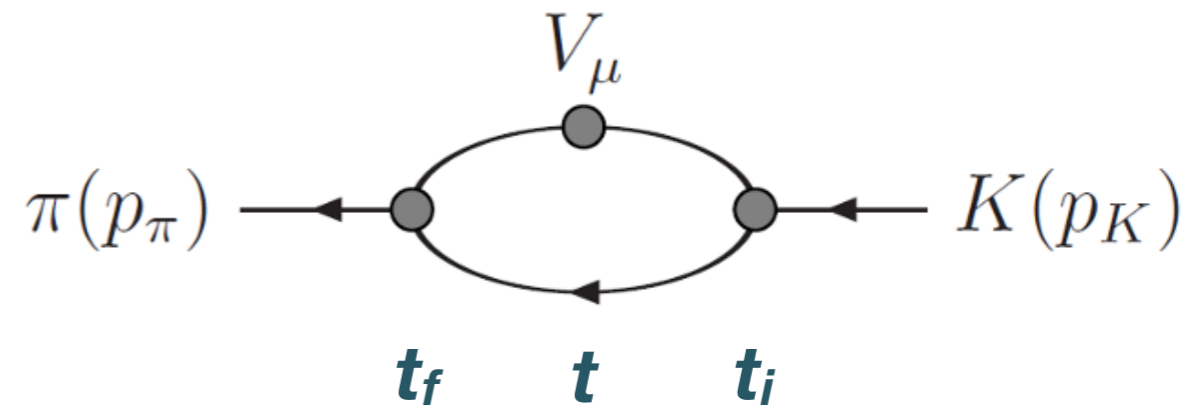
- 複数の a から連続極限 $a \rightarrow 0$

が可能になってきた

二宮の定理

form factor calculation: one example

- Kaon semi-leptonic decay
 - $K \rightarrow \pi + l + \nu$



$$\langle \pi(p_f) | V_\mu(0) | K(p_i) \rangle = f_+(q^2)(p_f + p_i)_\mu + f_-(q^2)(p_f - p_i)_\mu$$

a CKM matrix element V_{us} is obtained from

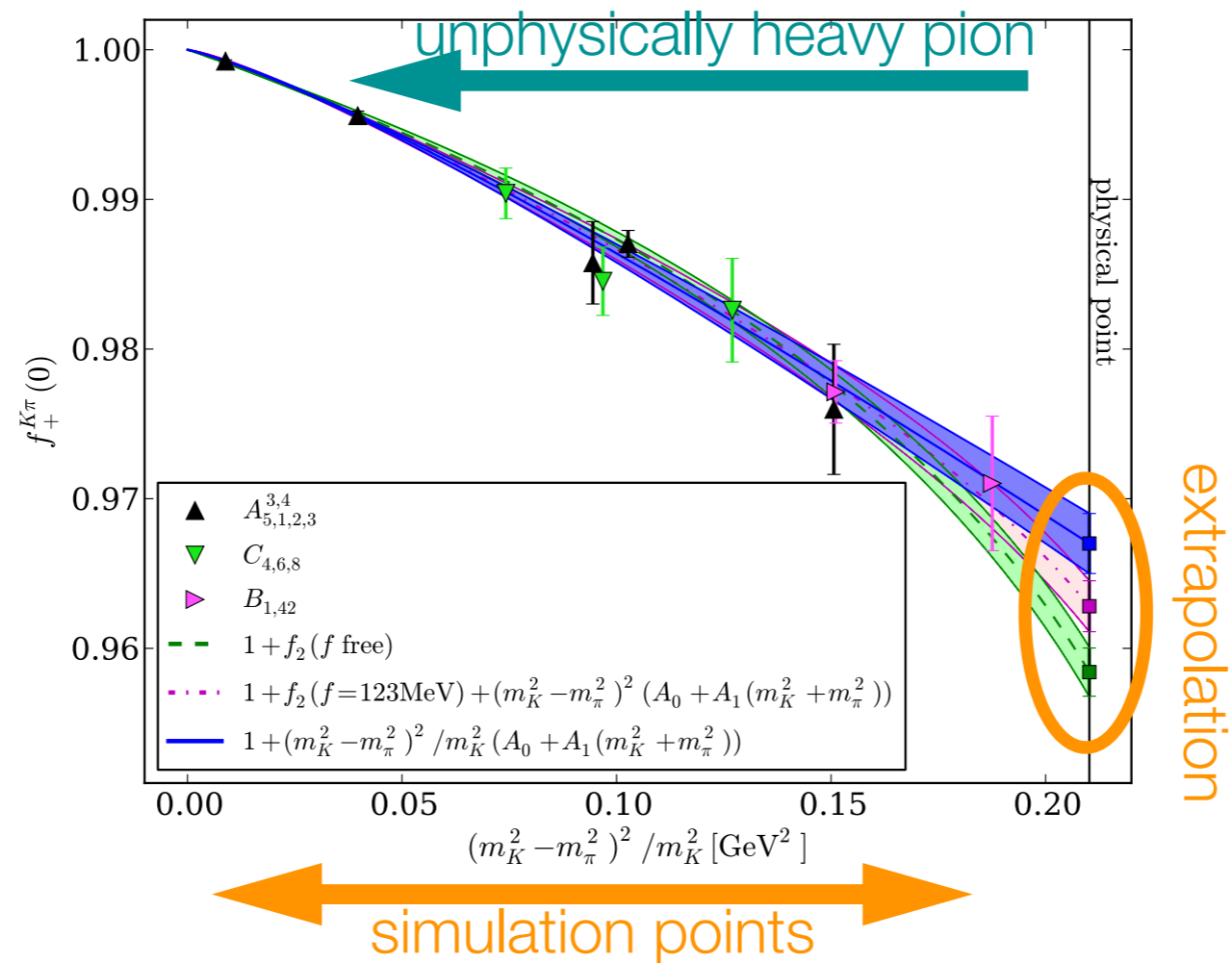
$$V_{us} f_+(0) = 0.2165(4)$$

average of $[K_L e3, K_L \mu3, K_S e3, K_\pm e3, \text{ and } K_\pm \mu3]$ by Mouslon 2014

form factor calculation: one example

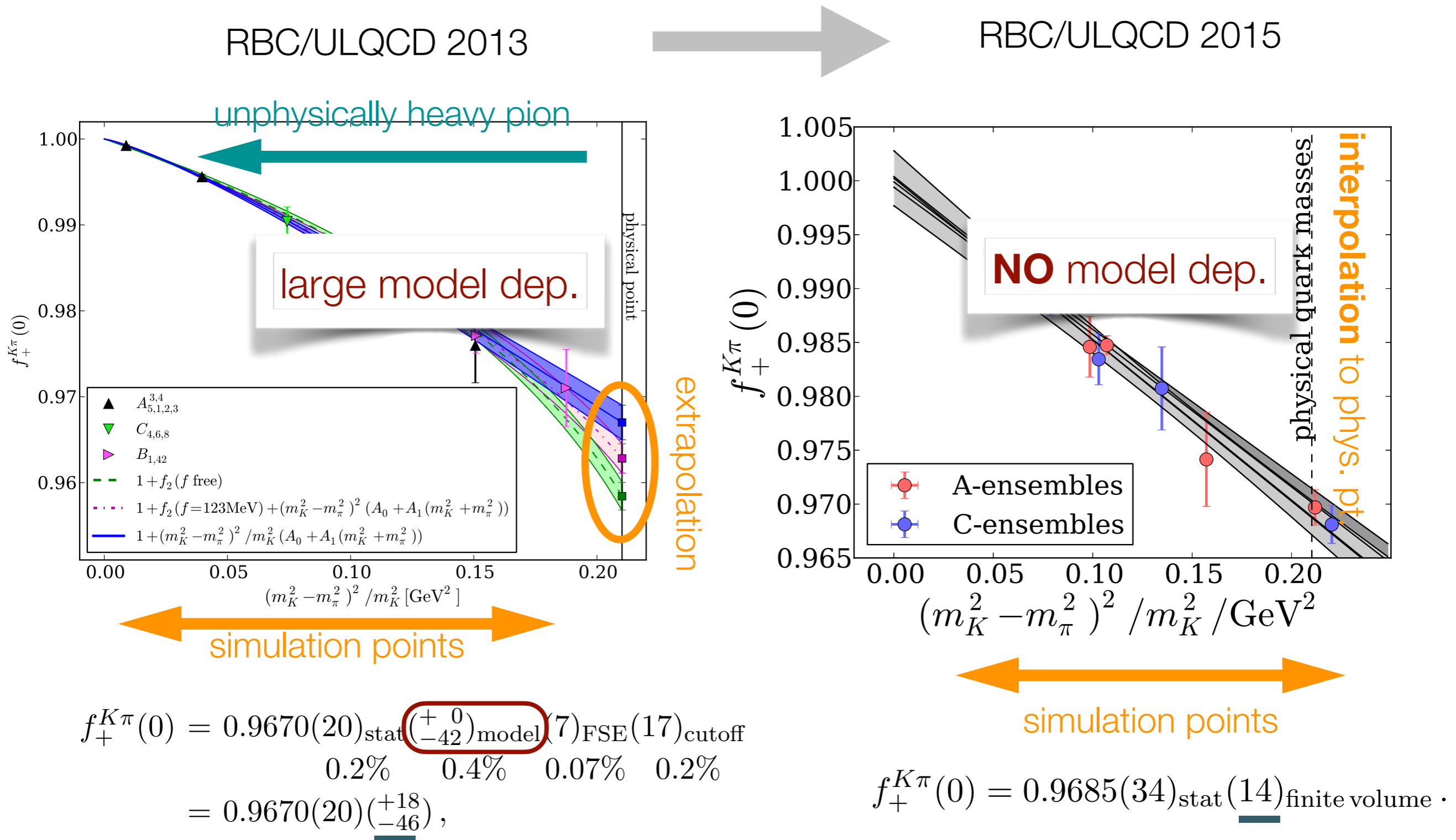
with unphysical ud mass simulation

RBC/ULQCD 2013

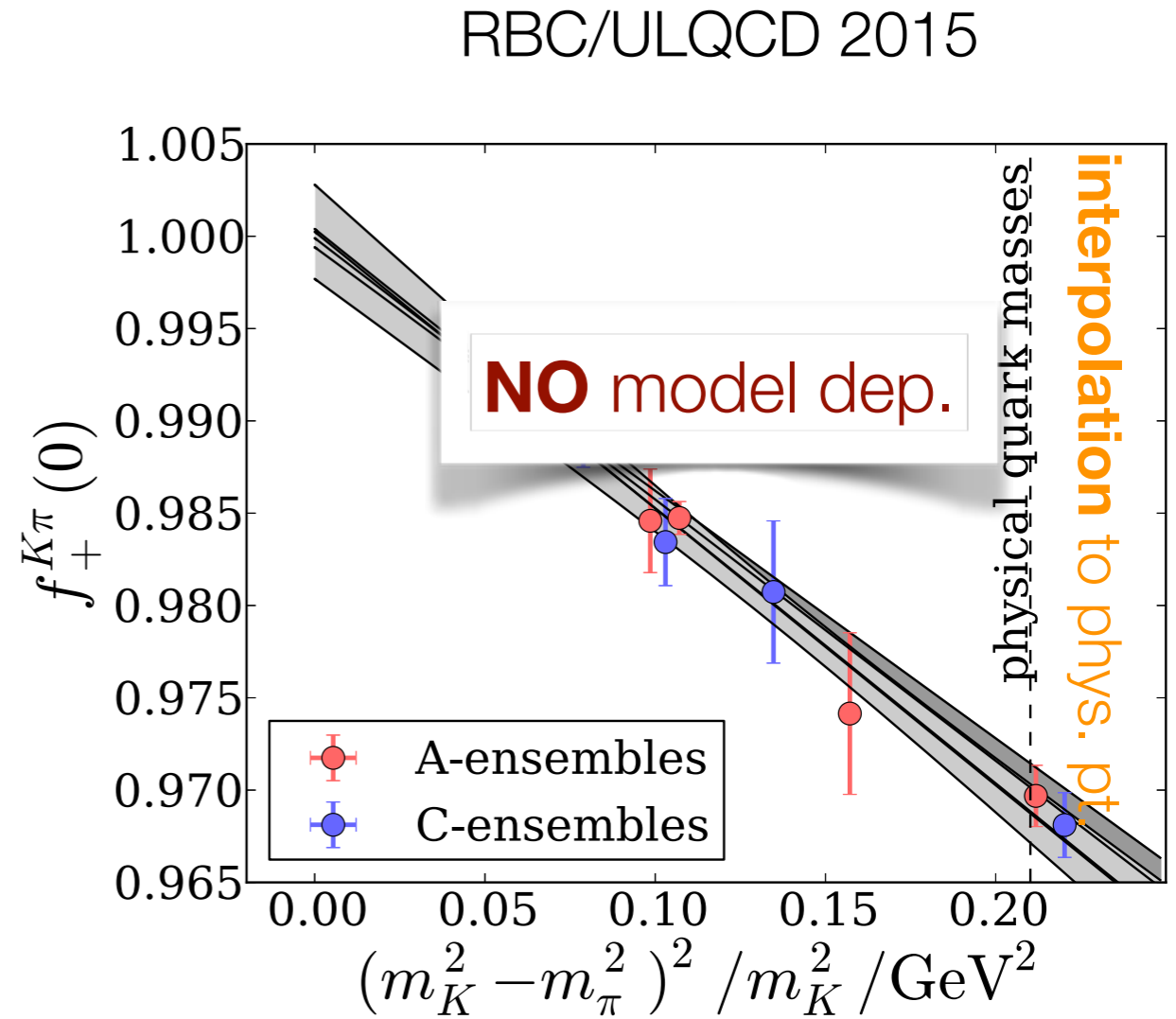
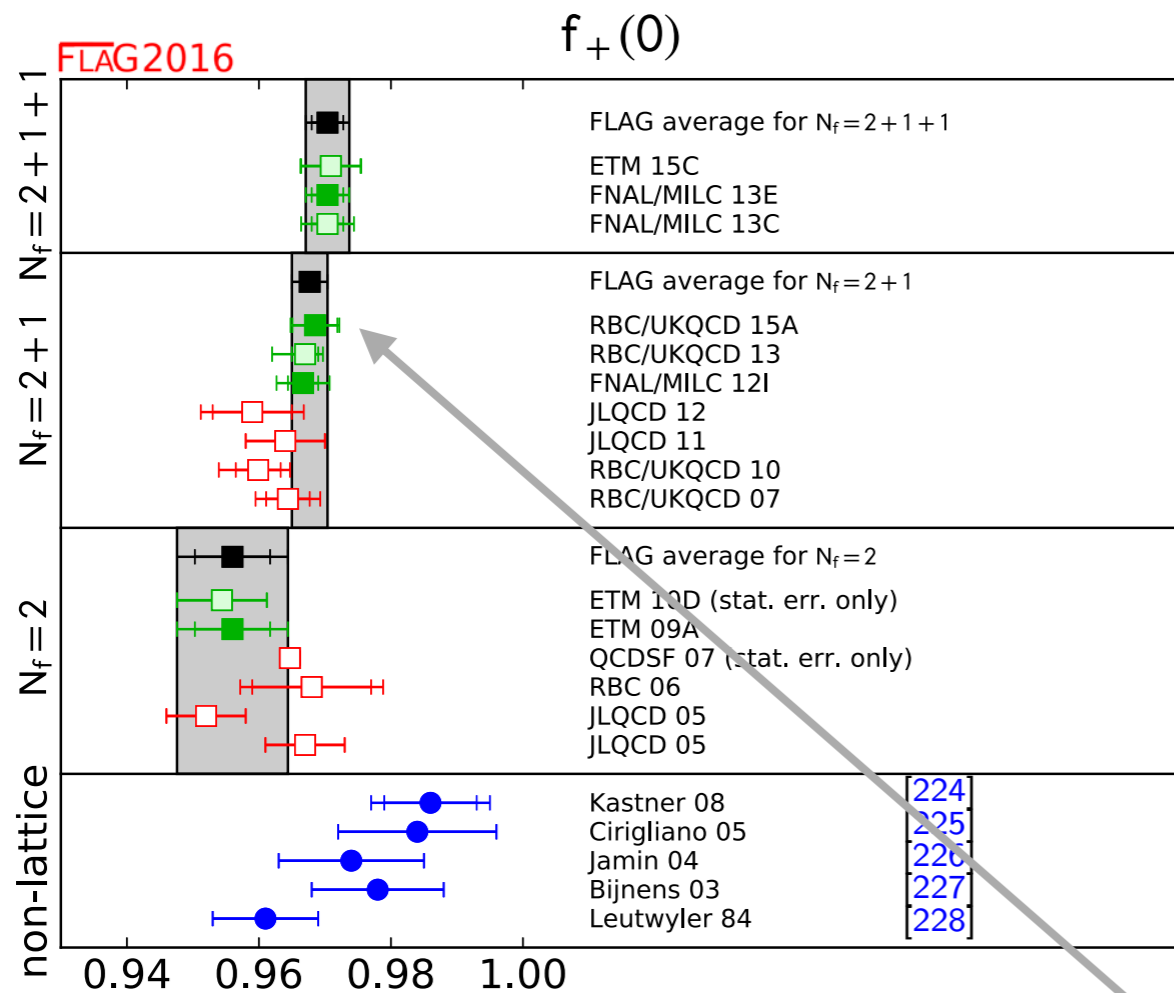


form factor calculation: one example

one big step forward: physical ud mass simulation



form factor calculation: one example
 this is a best understood quantity → average available



Flavour Lattice Averaging Group

WG to provide average of lattice results

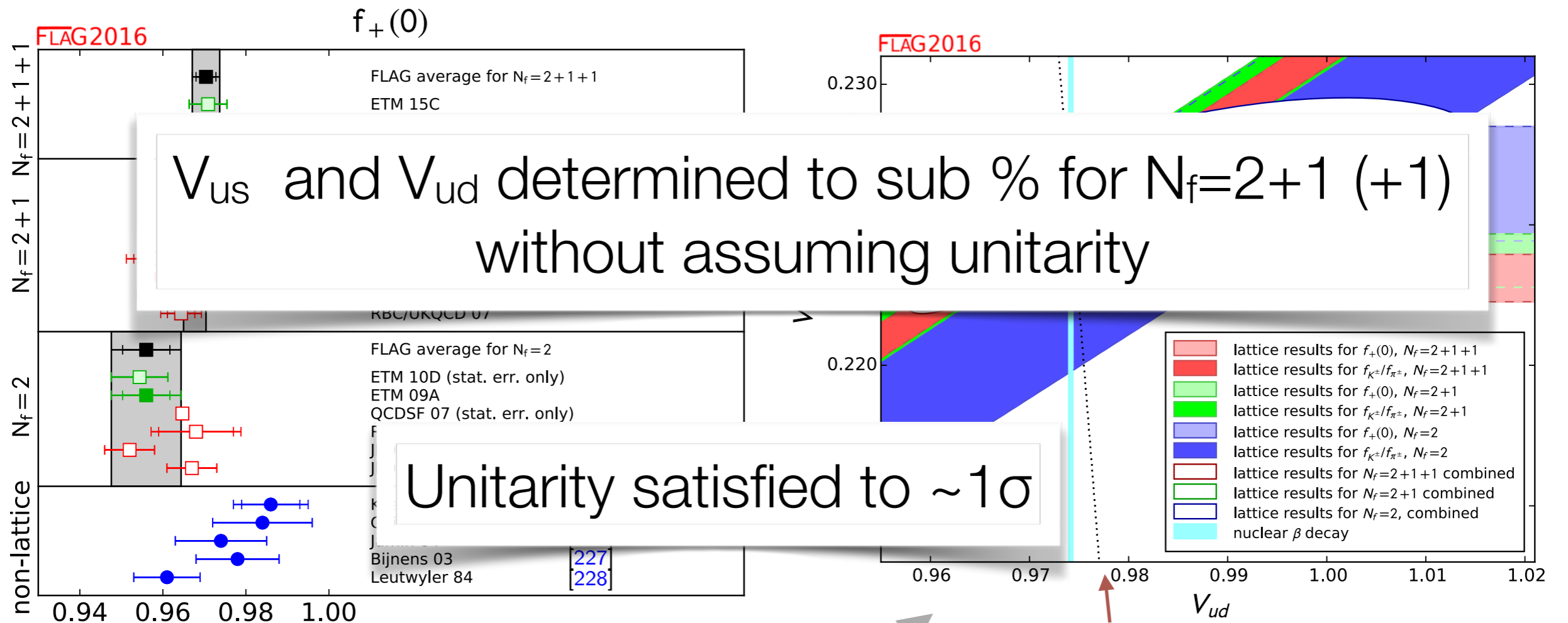
issues: 2010, 2013, **2016**, (2019 will be out soon)

so far does not contain any baryonic quantities

nucleon axial charge to be included in the next

$$f_+^{K\pi}(0) = 0.9685(34)_{\text{stat}}(14)_{\text{finite volume}}$$

form factor calculation: one example to flavor physics pheno



unitary line with $|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1$
with better determined $|V_{ub}|$ input

$$|V_{us}| f_+(0) = 0.2165(4)$$

and using a similar relation with π and K decay constants (leptonic decay) on

$$\left| \frac{V_{us}}{V_{ud}} \right| \frac{f_K}{f_\pi}$$

FLAG 2016 coverage I

Table 1 Summary of the main results of this review, grouped in terms of N_f , the number of dynamical quark flavours in lattice simulations. Quark masses and the quark condensate are given in the $\overline{\text{MS}}$ scheme at running scale $\mu = 2 \text{ GeV}$ or as indicated; the other quantities listed are specified in the quoted sections. For each result we list the references that entered the FLAG average or estimate. From the entries in this col-

umn one can also read off the number of results that enter our averages for each quantity. We emphasize that these numbers only give a very rough indication of how thoroughly the quantity in question has been explored on the lattice and recommend to consult the detailed tables and figures in the relevant section for more significant information and for explanations on the source of the quoted errors

Quantity	Sects.	$N_f = 2 + 1 + 1$	Refs.	$N_f = 2 + 1$	Refs.	$N_f = 2$	Refs.
m_s [MeV]	3.1.3	93.9(1.1)	[4,5]	92.0(2.1)	[6–10]	101(3)	[11,12]
m_{ud} [MeV]	3.1.3	3.70(17)	[4]	3.373(80)	[7–10,13]	3.6(2)	[11]
m_s/m_{ud}	3.1.4	27.30(34)	[4,14]	27.43(31)	[6–8,10]	27.3(9)	[11]
m_u [MeV]	3.1.5	2.36(24)	[4]	2.16(9)(7)	^a	2.40(23)	[16]
m_d [MeV]	3.1.5	5.03(26)	[4]	4.68(14)(7)	^a	4.80(23)	[16]
m_u/m_d	3.1.5	0.470(56)	[4]	0.46(2)(2)	^a	0.50(4)	[16]
$\overline{m}_c(3 \text{ GeV})$ [GeV]	3.2	0.996(25)	[4,5]	0.987(6)	[9,17]	1.03(4)	[11]
m_c/m_s	3.2.4	11.70(6)	[4,5,14]	11.82(16)	[17,18]	11.74(35)	[11,132]
$\overline{m}_b(\overline{m}_b)$ [GeV]	3.3.4	4.190(21)	[5,19]	4.164(23)	[9]	4.256(81)	[20,21]
$f_+(0)$	4.3	0.9704(24)(22)	[22]	0.9677(27)	[23,24]	0.9560(57)(62)	[25]
f_{K^\pm}/f_{π^\pm}	4.3	1.193(3)	[14,26,27]	1.192(5)	[28–31]	1.205(6)(17)	[32]
f_{π^\pm} [MeV]	4.6			130.2(1.4)	[28,29,31]		
f_{K^\pm} [MeV]	4.6	155.6(4)	[14,26,27]	155.9(9)	[28,29,31]	157.5(2.4)	[32]
$\Sigma^{1/3}$ [MeV]	5.2.1	280(8)(15)	[33]	274(3)	[10,13,34,35]	266(10)	[33,36–38]
F_π/F	5.2.1	1.076(2)(2)	[39]	1.064(7)	[10,29,34,35,40]	1.073(15)	[36–38,41]
$\overline{\ell}_3$	5.2.2	3.70(7)(26)	[39]	2.81(64)	[10,29,34,35,40]	3.41(82)	[36,37,41]
$\overline{\ell}_4$	5.2.2	4.67(3)(10)	[39]	4.10(45)	[10,29,34,35,40]	4.51(26)	[36,37,41]
$\overline{\ell}_6$	5.2.2					15.1(1.2)	[37,41]
\hat{B}_K	6.1	0.717(18)(16)	[42]	0.7625(97)	[10,43–45]	0.727(22)(12)	[46]

^a This is a FLAG estimate, based on χ PT and the isospin averaged up- and down-quark mass m_{ud} [7–10,13]

FLAG 2016 coverage II

Table 2 Summary of the main results of this review, grouped in terms of N_f , the number of dynamical quark flavours in lattice simulations. The quantities listed are specified in the quoted sections. For each result we list the references that entered the FLAG average or estimate. From the entries in this column one can also read off the number of results that

enter our averages for each quantity. We emphasize that these numbers only give a very rough indication of how thoroughly the quantity in question has been explored on the lattice and recommend to consult the detailed tables and figures in the relevant section for more significant information and for explanations on the source of the quoted errors

Quantity	Sects.	$N_f = 2 + 1$ and $N_f = 2 + 1 + 1$	Refs.
f_D [MeV]			
f_{D_s} [MeV]			
f_{D_s}/f_D			
$f_+^{D\pi}(0)$			
$f_+^{DK}(0)$			
f_B [MeV]			[57,58]
f_{B_s} [MeV]			[57,58]
f_{B_s}/f_B	8.1	1.205(7) [52]	1.201(16) [48,53–55] 1.206(23) [20,57,58]
$f_{B_d}\sqrt{\hat{B}_{B_d}}$ [MeV]	8.2		219(14) [54,59] 216(10) [20]
$f_{B_s}\sqrt{\hat{B}_{B_s}}$ [MeV]	8.2		270(16) [54,59] 262(10) [20]
\hat{B}_{B_d}	8.2		1.26(9) [54,59] 1.30(6) [20]
\hat{B}_{B_s}	8.2		1.32(5) [20]
ξ	8.2		1.225(31) [20]
B_{B_s}/B_{B_d}	8.2		1.007(21) [20]
Quantity	Sects.	$N_f = 2 + 1$ and $N_f = 2 + 1 + 1$	Refs.
$\alpha_{\overline{\text{MS}}}^{(5)}(M_Z)$	9.9	0.1182(12)	[5,9,61–63]
$\Lambda_{\overline{\text{MS}}}^{(5)}$ [MeV]	9.9	211(14)	[5,9,61–63]

T=0 の素粒子物理で重要な
基本的な物理量は数%誤差で求まっている
1%以下のものもある

他の話題はどうだろうか？

困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には

- 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大

- 格子間隔 $a \rightarrow 0$

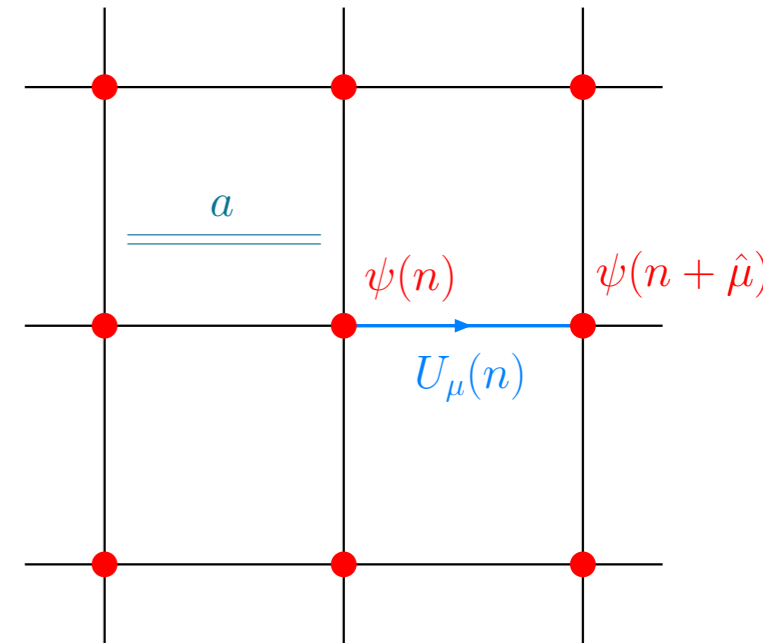
- とたんに世界最速スーパーコンピュータでも扱えなくなる

- $a \neq 0$ では：カイラル対称性はあからさまに破れる：ニールセン-二宮の定理

- 工夫

- **カイラル対称性の改良／厳密化**

- 格子間隔 a が比較的大きくても 連続極限 $a \rightarrow 0$ のエッセンスをとらえる



格子作用と対称性

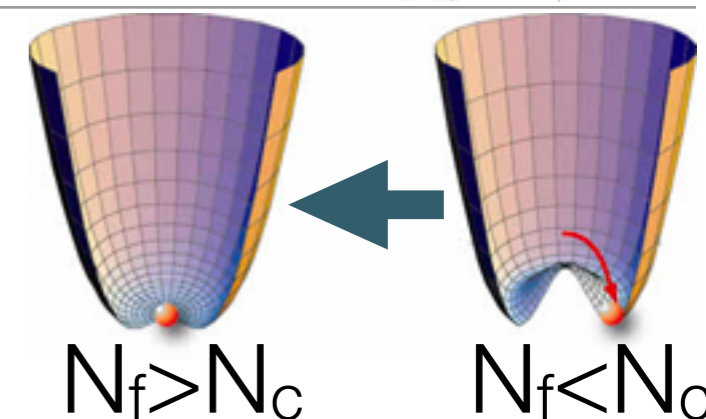
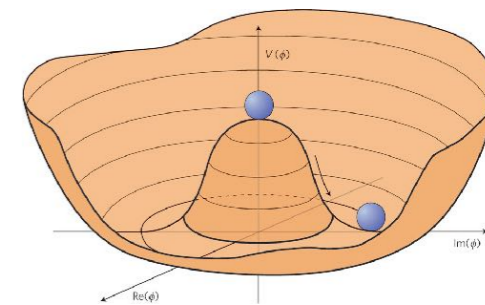
	$U(1)_B$	$SU(N_f)_V$	$SU(N_f)_A$	計算コスト
Wilson	✓	✓	✗	普通
staggered	✓	✗	部分的	安い
domain wall	✓	✓	ほぼ厳密	高い
overlap	✓	✓	✓	高すぎ / 非現実的

「改良」 & 系の性質により、改善しうる対称性

- Wilson
- staggered

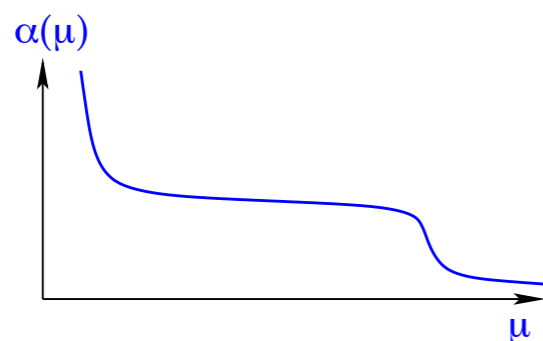
カイラル対称性の回復

- 温度
- 2つの異なる相: やぶれ(低温) \leftrightarrow 回復(高温)
 - クォーク閉じ込め \leftrightarrow 非閉じ込め
- クォークの数
 - ヒッグスセクターの背景にある新法則の可能性



出典: 東大理学部

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2004/02.html>



LatKMI collaboration

- KMI / Nagoya Univ.



T.Maskawa, K.Nagai, K.Yamawaki

- KEK, Kyoto, Swansea, Keio, CPT Marseille, Nara, RBEC, Tsukuba

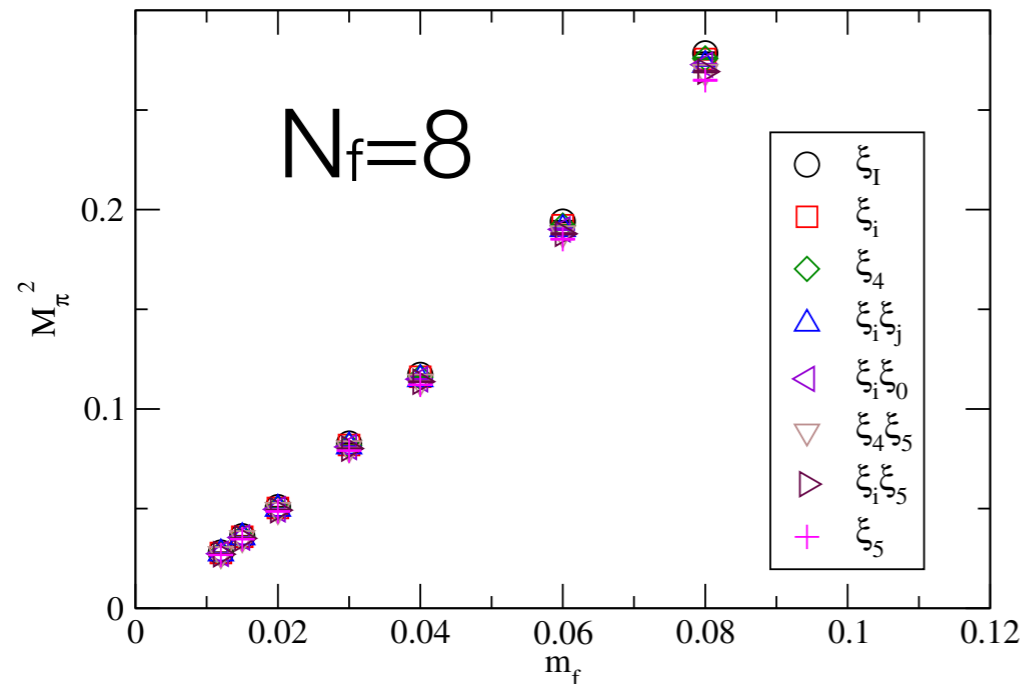


Y. A, T.Aoyama, E.Bennett, M.Kurachi, K.Miura, H.Ohki, E.Rinaldi, A.Shibata, T.Yamazaki

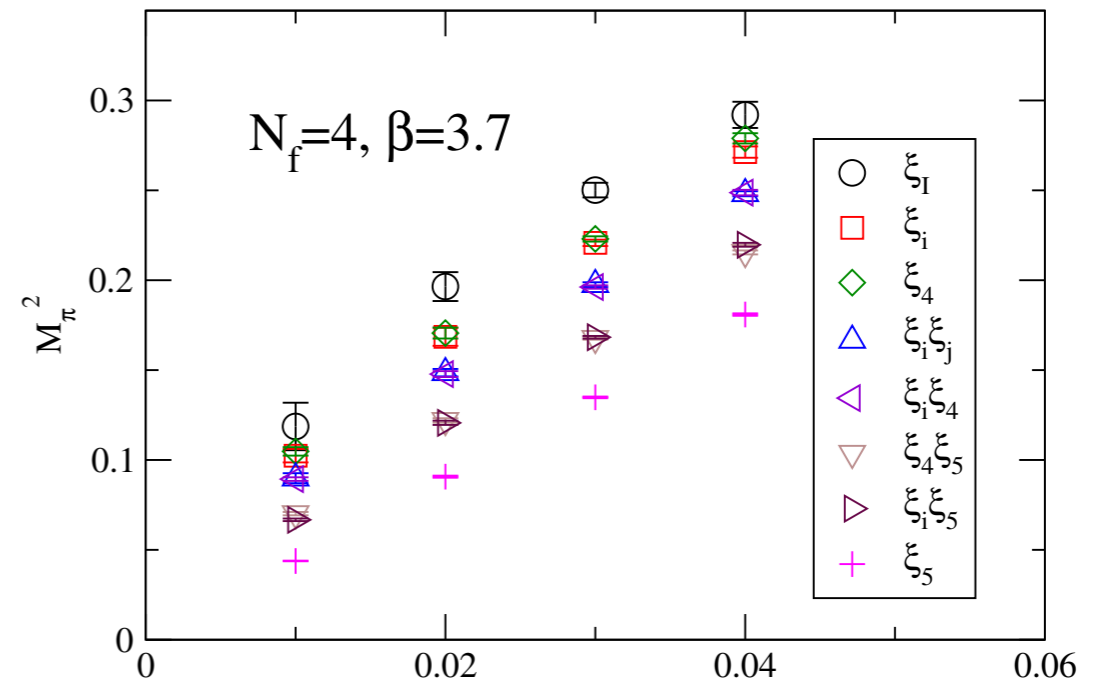


$N_f=8$ QCD

- Highly Improved Staggered Quark (HISQ) の利用
- 理論の対称性 $SU(N_f)_V$ のチェック

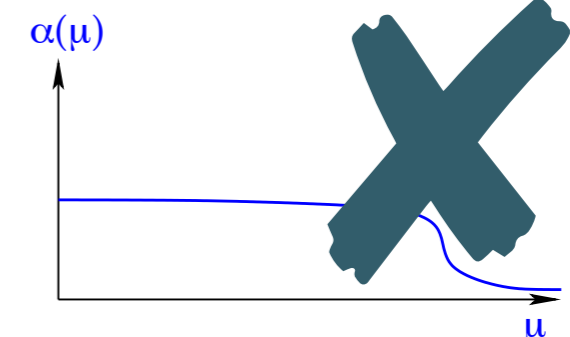
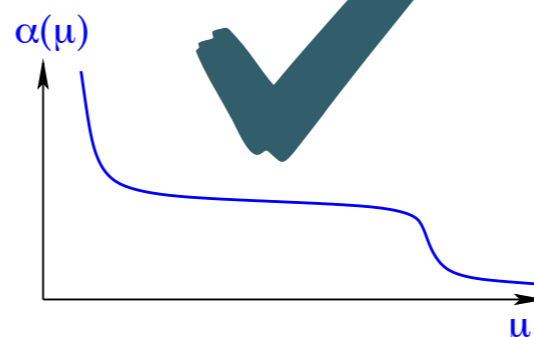
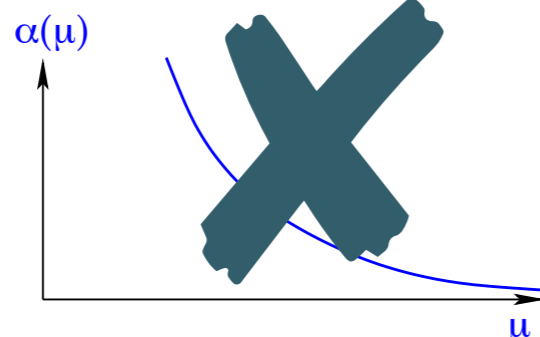


π (63個) の質量がほぼ等しい



π (15個) 対称性破れている

- 欲しい性質の間接的チェック



$N_f=8$ spectrum — σ : flavor singlet scalar

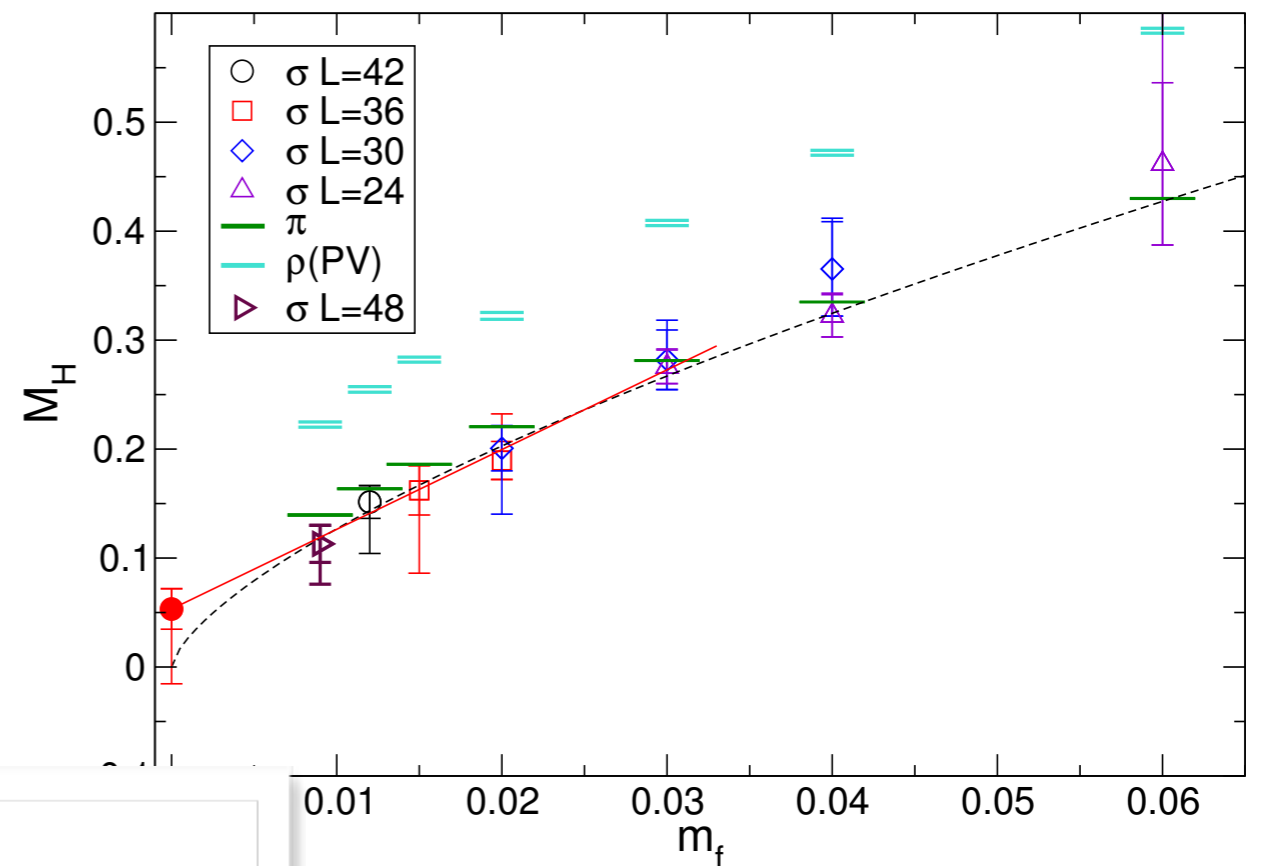
- σ is a candidate of Higgs in a successful walking technicolor theory
- observed hierarchy of spectrum (parametrically)

- $m_\pi \simeq m_\sigma < m_\rho$ ($N_f=8$)
- unlikely due to “heavy quark”
- also in other (near) conformal th.
 - $N_f=12$, $N_f=2$ sextet, $SU(2)$ 2 adj..

- contrast to QCD (physical point)

- $m_\pi \ll m_\sigma < m_\rho$ ($\sim N_f=2+1$)

- eventually $m_\pi < m_\sigma$
 - but, far from our
 - this continues to



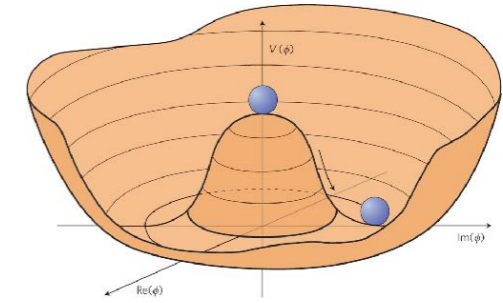
real world QCD:

- $m_\pi = 135$ MeV
- $m_\sigma = 400 \sim 550$ MeV
- $m_\rho = 770$ MeV

updated from Phys.Rev.D96(2017)
 $m_f=0.009$ (lightest) is new

2016

何がおもしろいのか？



- 素朴には、複合模型 Higgs の質量は
 - $m_H \sim 1000 \text{ GeV}$
- ところが、2012年に発見された Higgs 粒子は
 - $m_H \sim 125 \text{ GeV}$
- 「軽い σ 」の存在は 「軽い Higgs」を説明できる可能性！



格子作用と対称性

	$U(1)_B$	$SU(N_f)_V$	$SU(N_f)_A$	計算コスト
Wilson	✓	✓	✗	普通
staggered	✓	✗	部分的	安い
domain wall	✓	✓	ほぼ厳密	高い
overlap	✓	✓	✓	高すぎ / 非現実的

JLQCDの有限温度計算: **カイラルフェルミオン**

- **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

“chiral fermion”

- Domain-wall fermion: Kaplan 92, Furman-Shamir 95
 - もとの4次元理論→5次元
 - 5次元方向に質量の domain wall を作る
 - エッジモードとして、カイラルフェルミオンが出現する
 - 物性ではよく知られた現象
 - 5次元方向の長さが有限の場合、微少なやぶれがある
- Overlap fermion
 - Domain-wall fermion の5次元方向を無限大極限
 - 厳密な格子上的カイラル対称性を実現する a Ginsparg-Wilson fermion
- どちらも Wilson Fermion のライブラリを援用して構成

JLQCD collaboration

ポスト京重点課題9: サブ課題A - QCD相転移

これ以降の結果は全てpreliminaryです

[JLQCD collaboration]

青木慎也



青木保道



Cossu, Guido



深谷英則



橋本省二



金児隆志



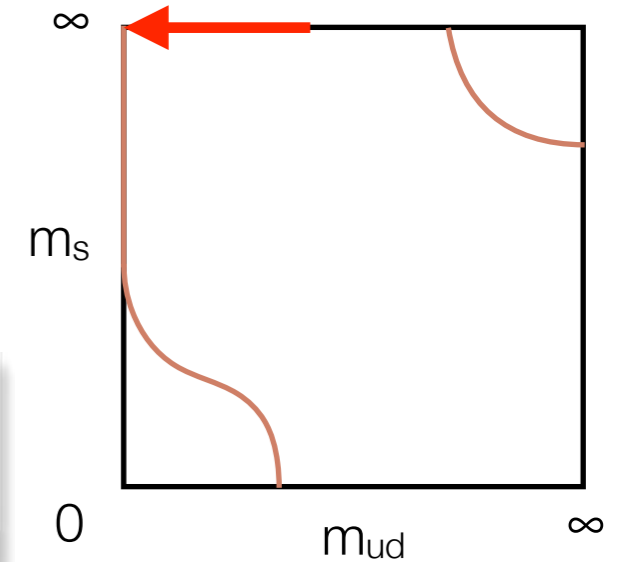
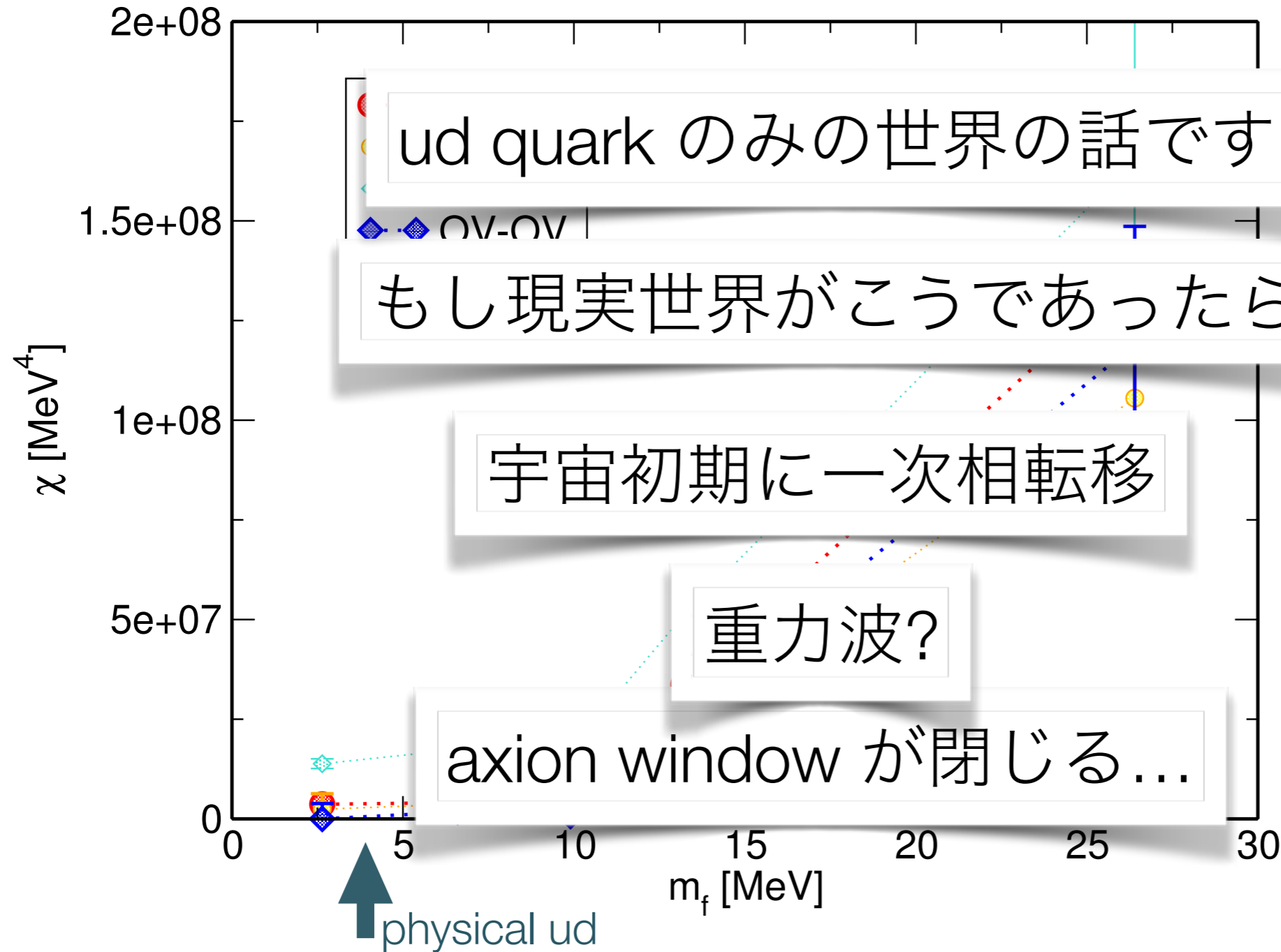
鈴木溪



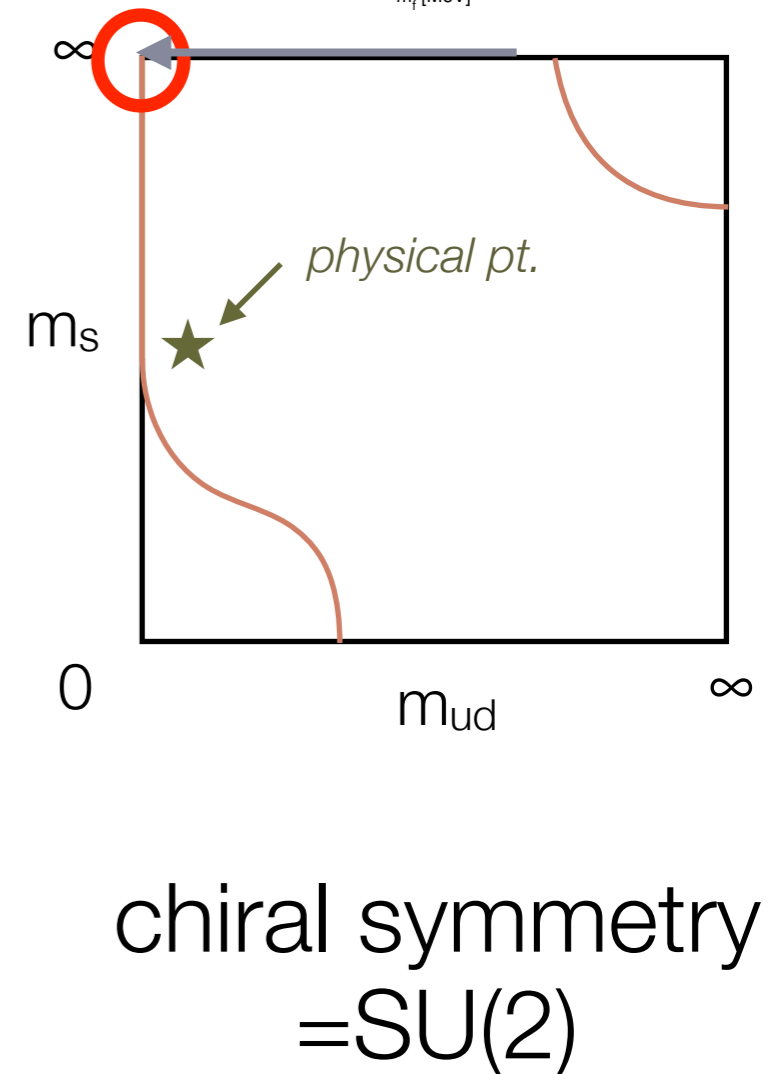
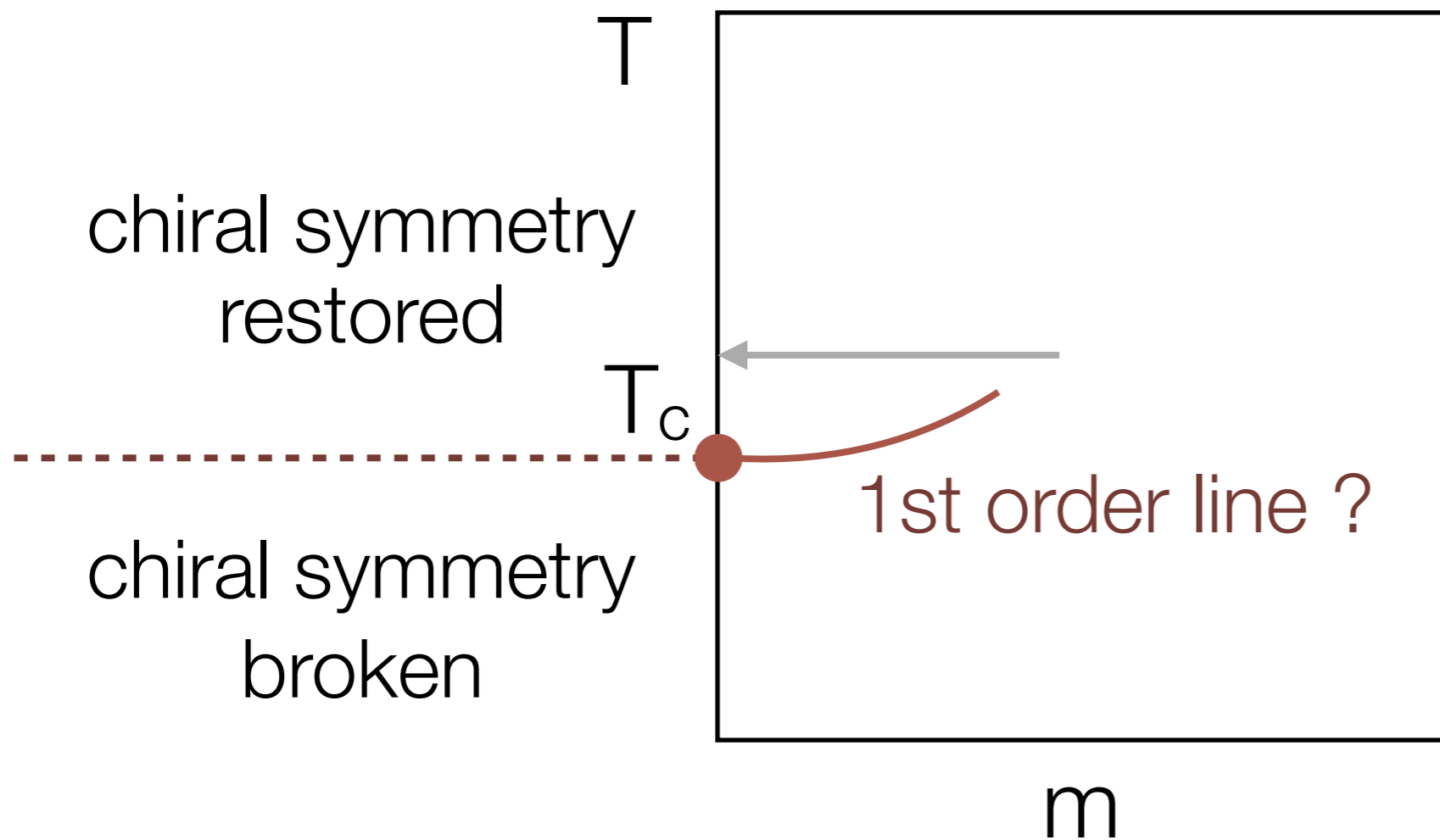
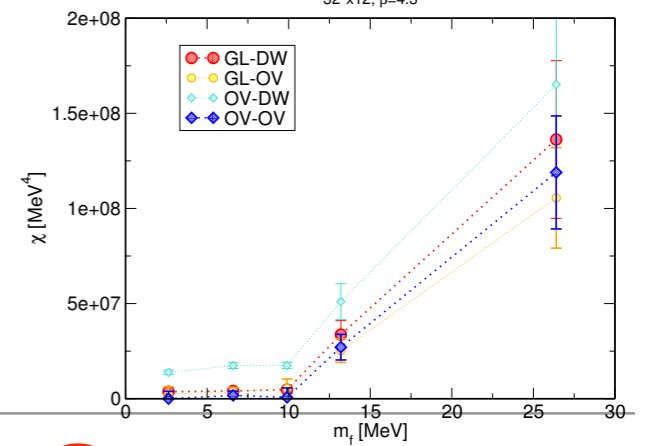
$\chi_t(m_f)$ for $N_f=2$ $T=220$ MeV

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

$32^3 \times 12, \beta=4.3$

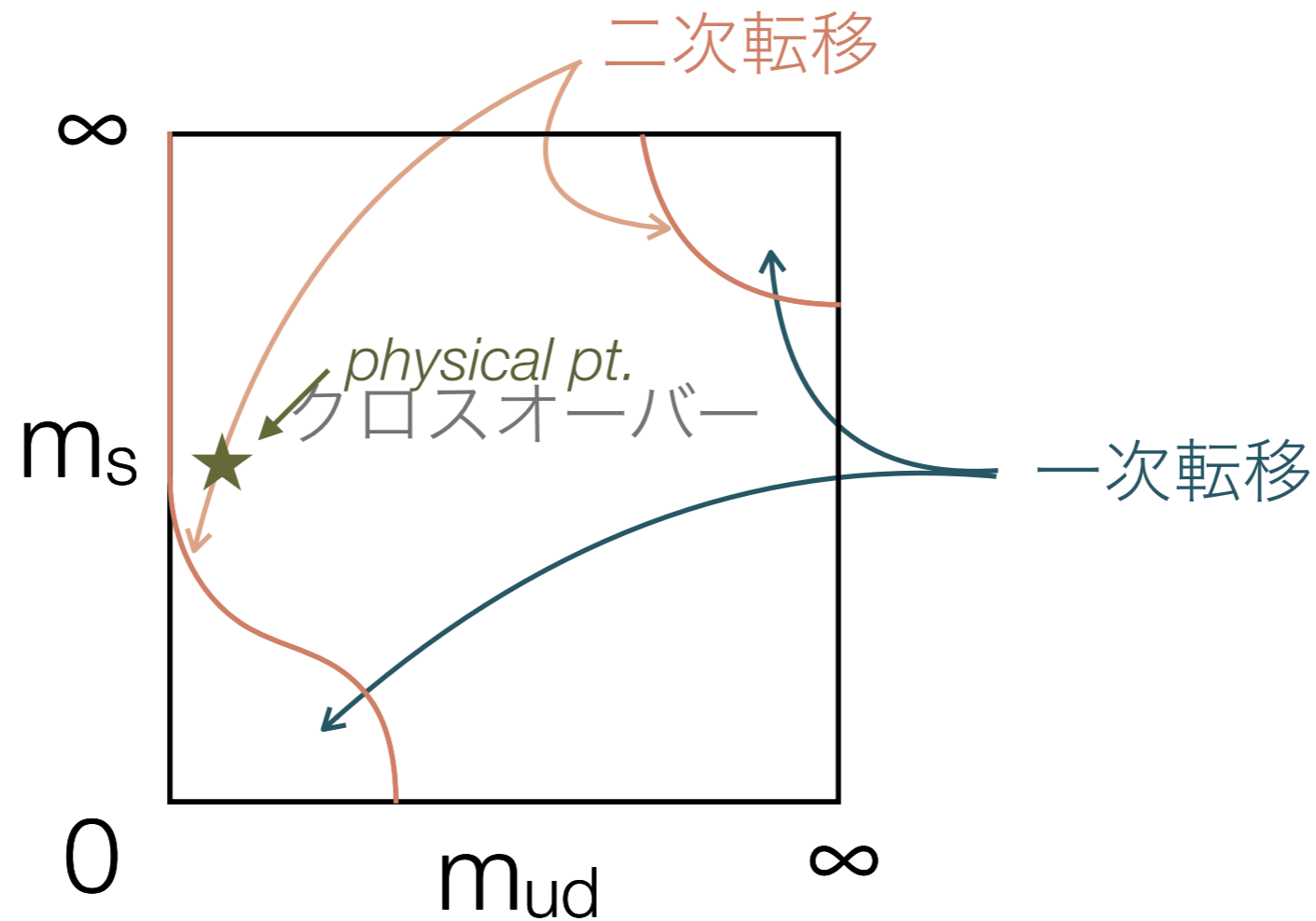


有限温度 $N_f=2$ QCD



- test if there is any 1st order transition line there ?
- investigating the symmetry at $m \rightarrow 0$
 - * $SU(2)_{L \times R}$ or $SU(2)_{L \times R} \times \mathbf{U(1)}_A$?

現在でも: Columbia Plot = 大方の人の理解 || 期待



u, d, s クォークの質量: $m_u < m_d \ll m_s < \Lambda_{\text{QCD}} \ll m_c < m_b \ll m_t$

[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

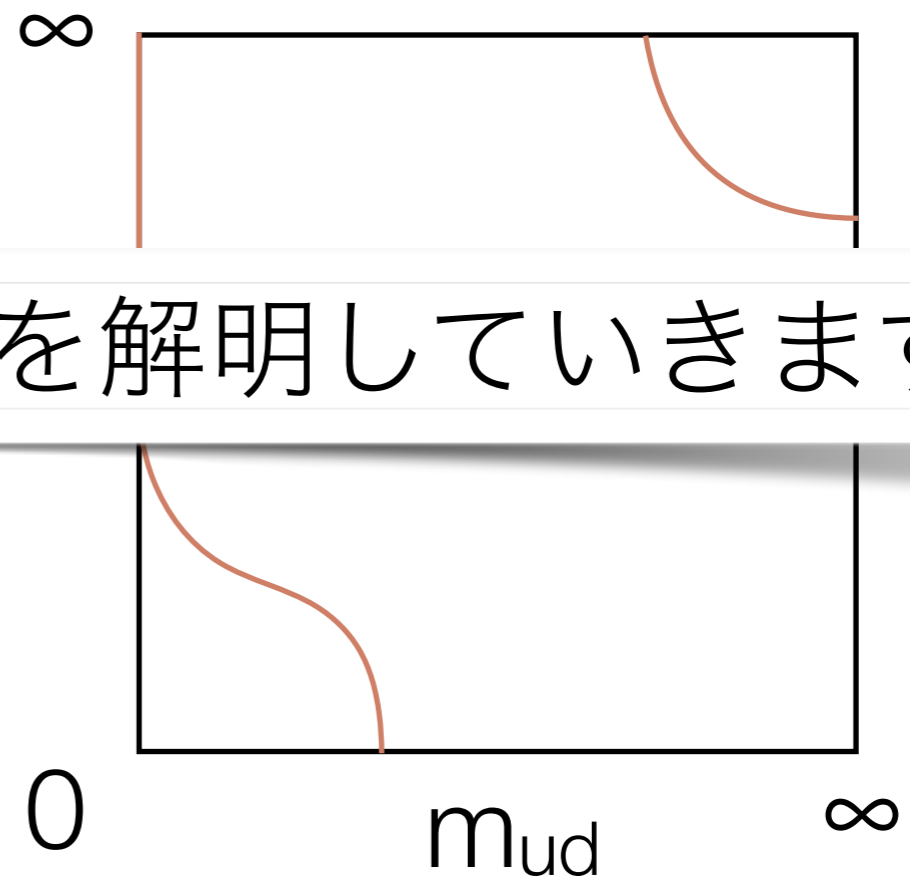
- $N_f=0$: 一次転移

- 右上隅はよく分かっている

ポスト京を用いて、これを説明していきます

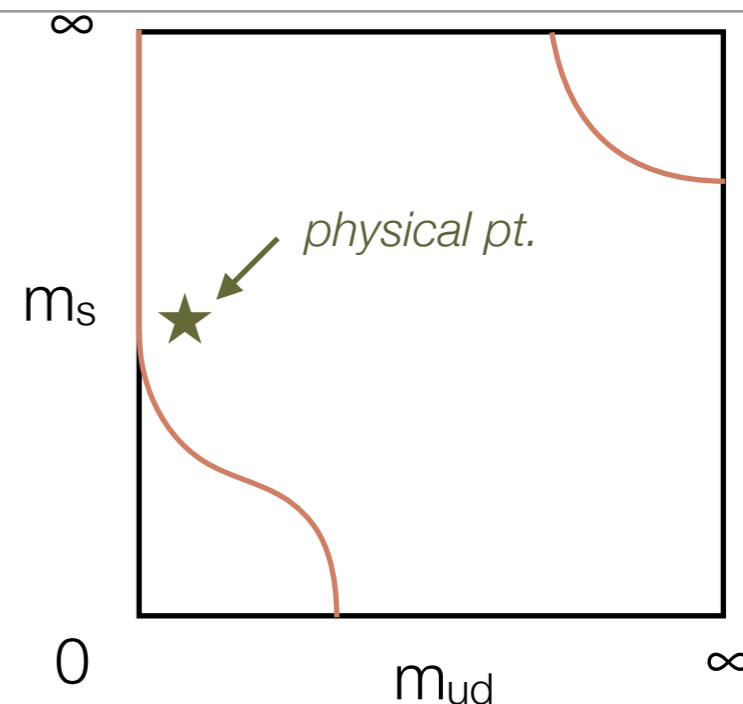
- staggered (Wuppertal 2006)
- 他の正則化でも反証なし
- 厳密なカイラル対称性を持つ
アプローチでは未踏

- 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

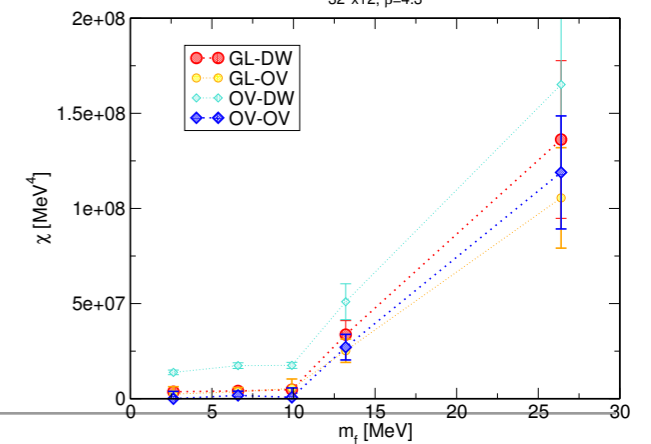


QCD 有限温度相転移の理論: $N_f=2+1$ Lattice

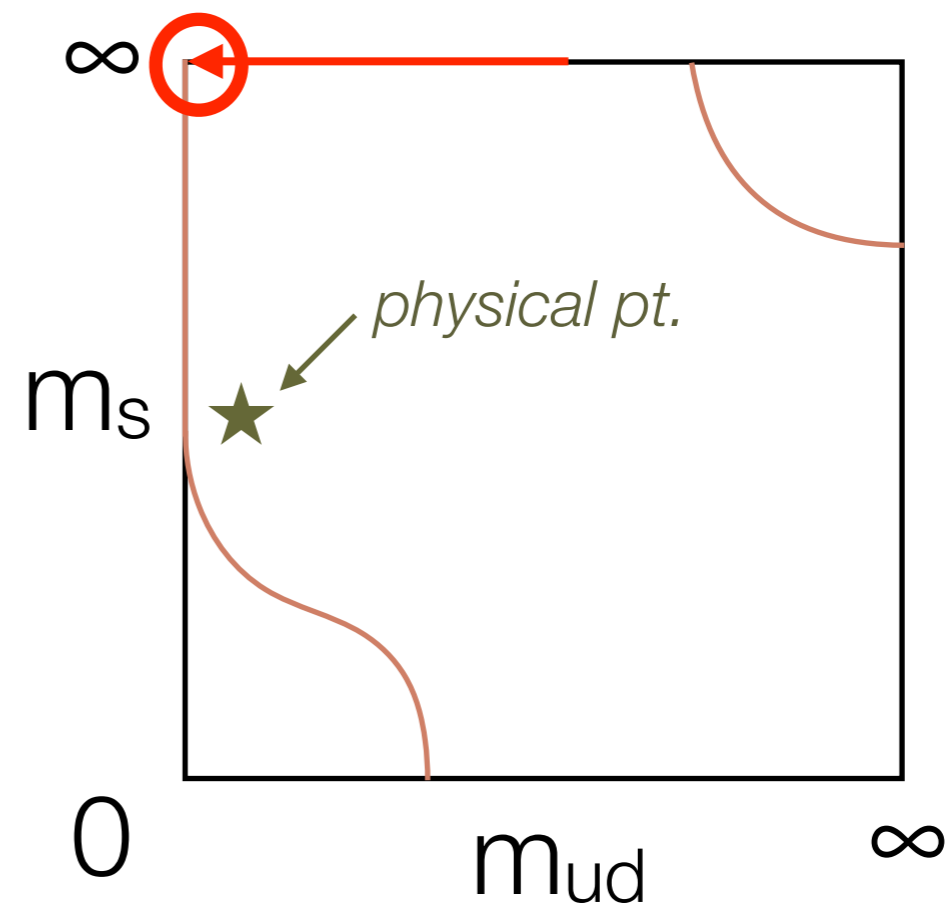
- $N_f=2+1$ 相図が完成すれば
 - QCD の理解
 - 物理点の相転移の存在、次数が分かる。
 - 遠回りだが確実な方法
 - 相境界($\mu=0$)の $\mu>0$ への伸び方を調べる \rightarrow (T, μ) 臨界終点の研究へつなげる
- 大変重要 / 有用である！



まずは $N_f=2$



- $N_f=2+1$ physical pt. から遠い？
 - $m_s \sim 100 \text{ MeV} \rightarrow \infty$
 - $T=0$ 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

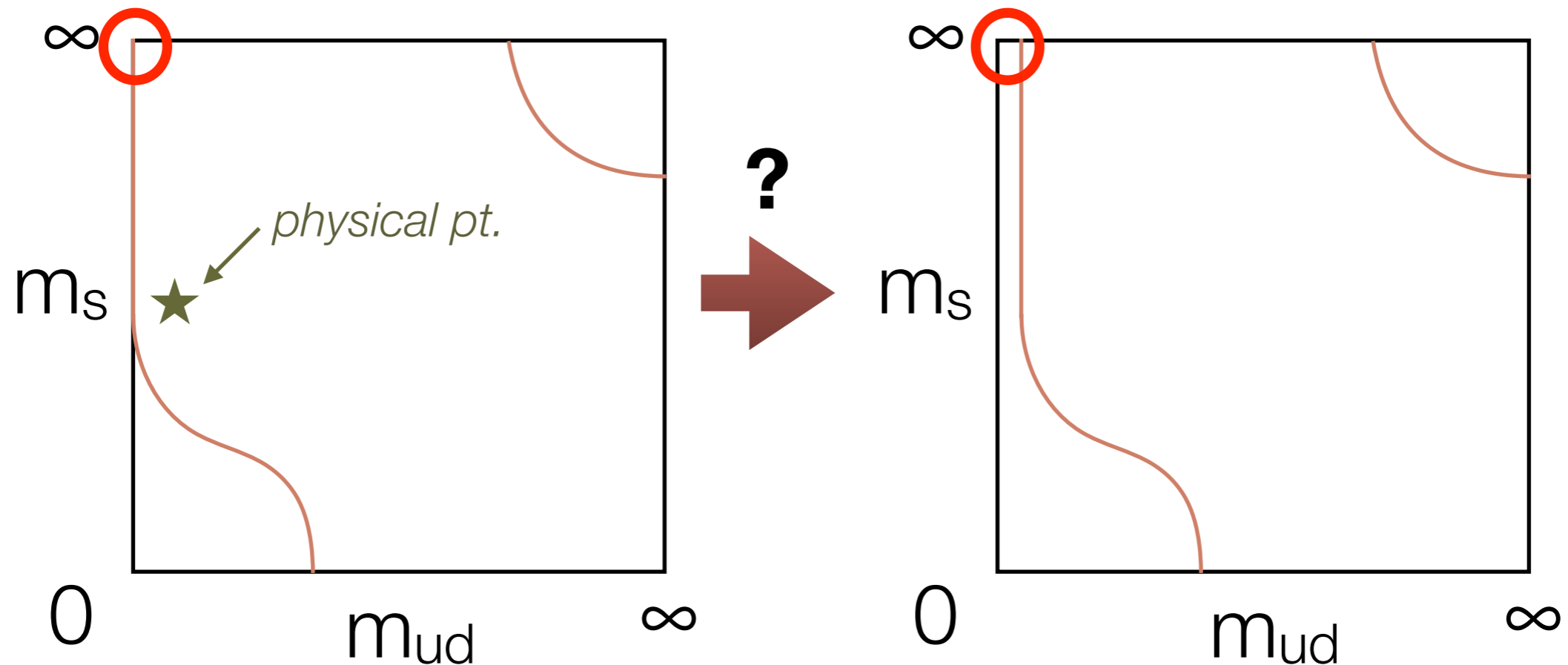
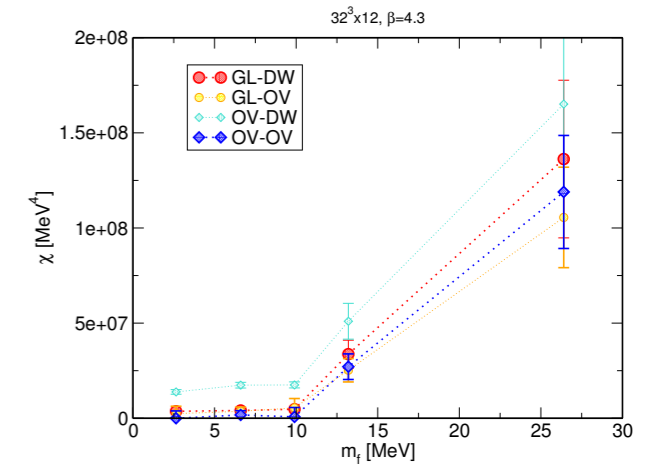


➡ $U(1)_A$ 回復を示唆[JLQCD16]

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

一次転移だとどうなるか？

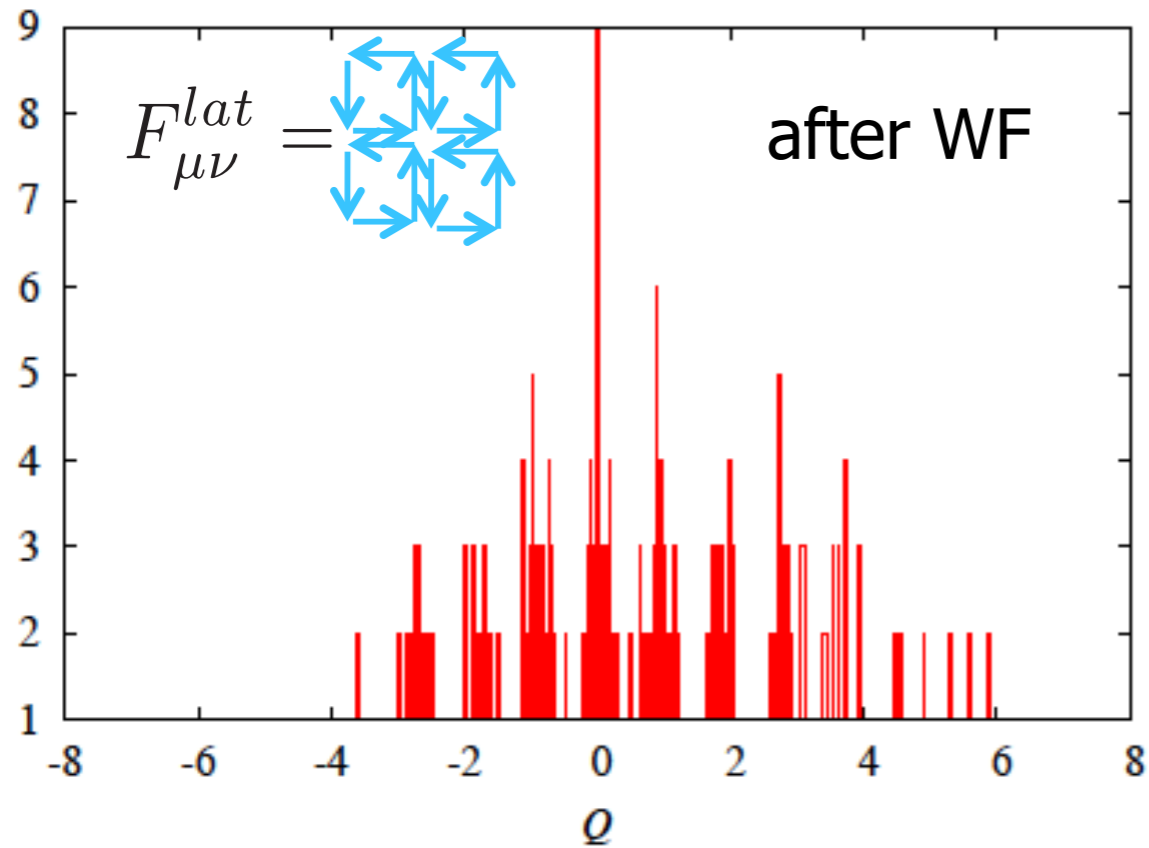
- $0 \leq m_f < m_c$: 一次転移
- 一つの可能性として: $N_f=3$ の一次転移領域と繋がる
- 物理点への影響も考えられる



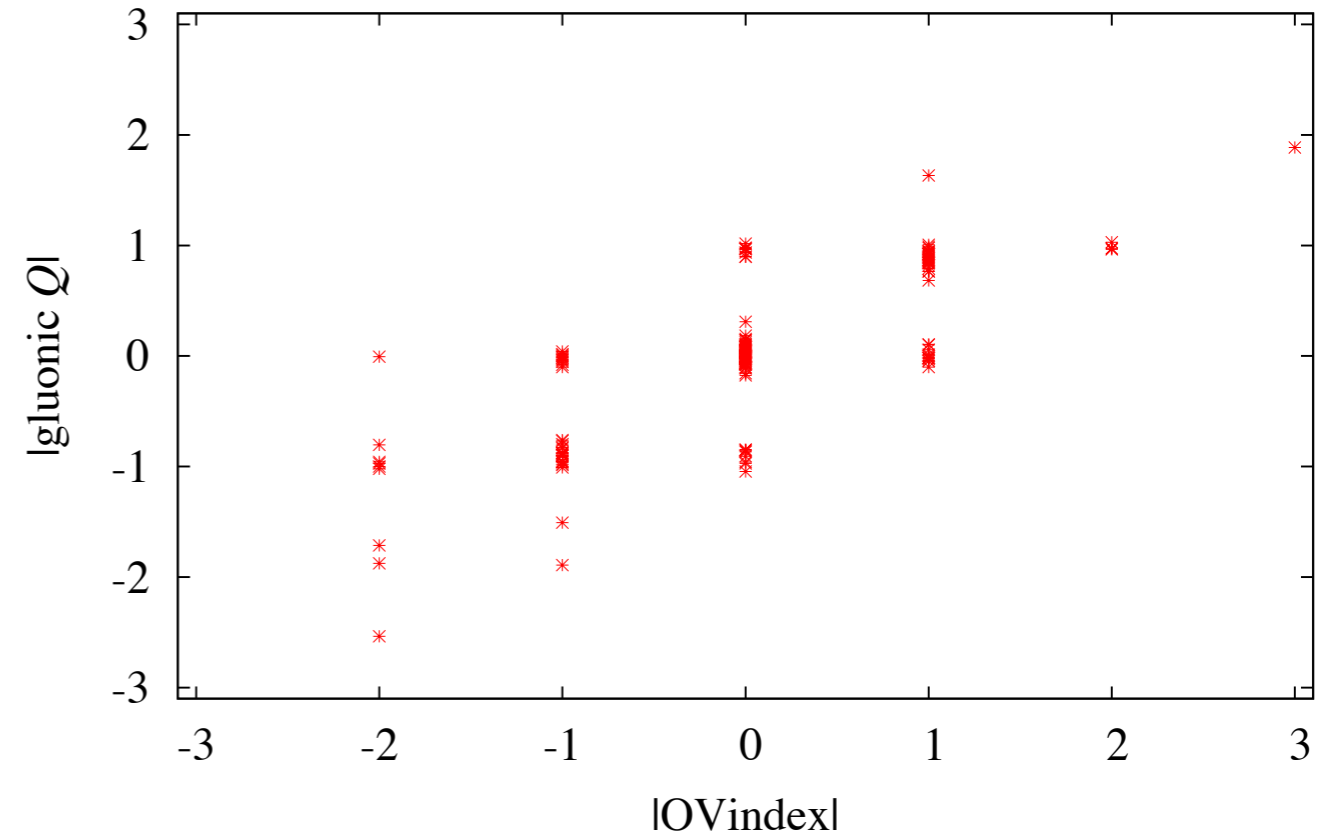
トポロジカル電荷 (ゲージ場の幾何学的指数)

→ 感受率

$$q(x) = \frac{1}{32\pi^2} \text{Tr} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu}^{lat} F_{\rho\sigma}^{lat}$$



32x12 beta=4.23 m=0.005 (T=191 MeV)

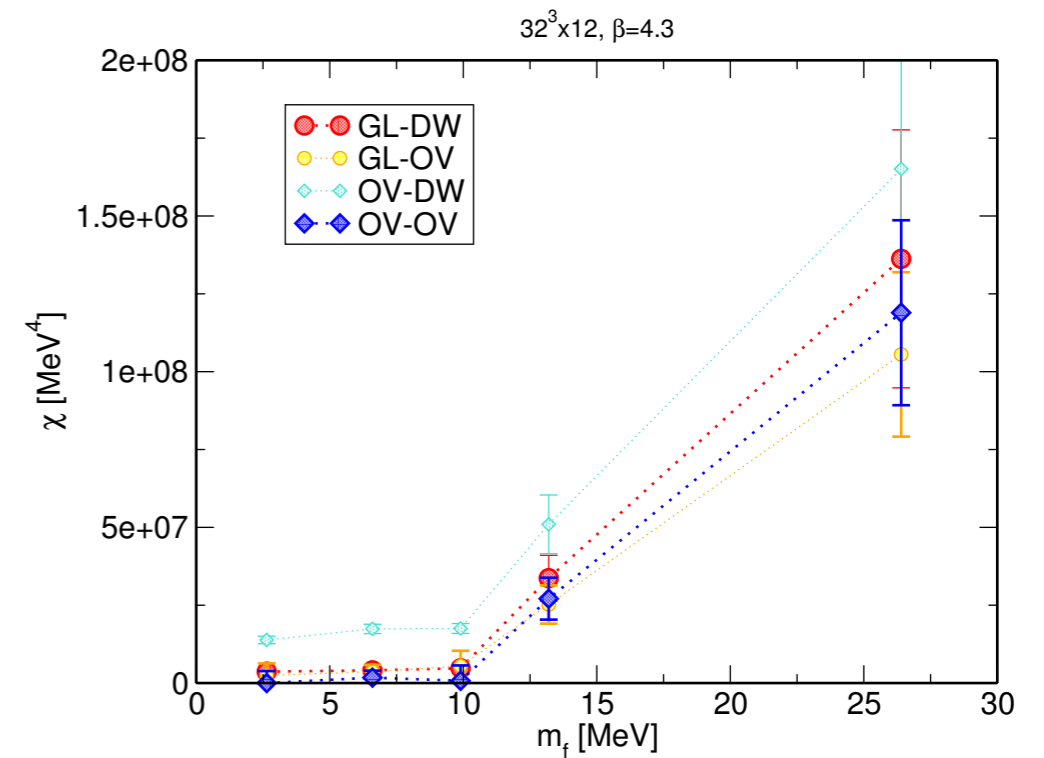


$$Q = \sum_x q(x) \quad \text{charge}$$

$$\chi_t = \frac{\langle Q^2 \rangle}{V} \quad \text{susceptibility}$$

実際、我々の研究で

トポロジカル感受率 $\chi_t(m)$ に一次転移的兆候が
見えた。。。



系統誤差?

- $V=32^3$

 - ➔ ∞ 必要

 - 熱力学極限: $m \rightarrow 0$ の前に

- $a = 0.07$ fm

 - ➔ 0 必要

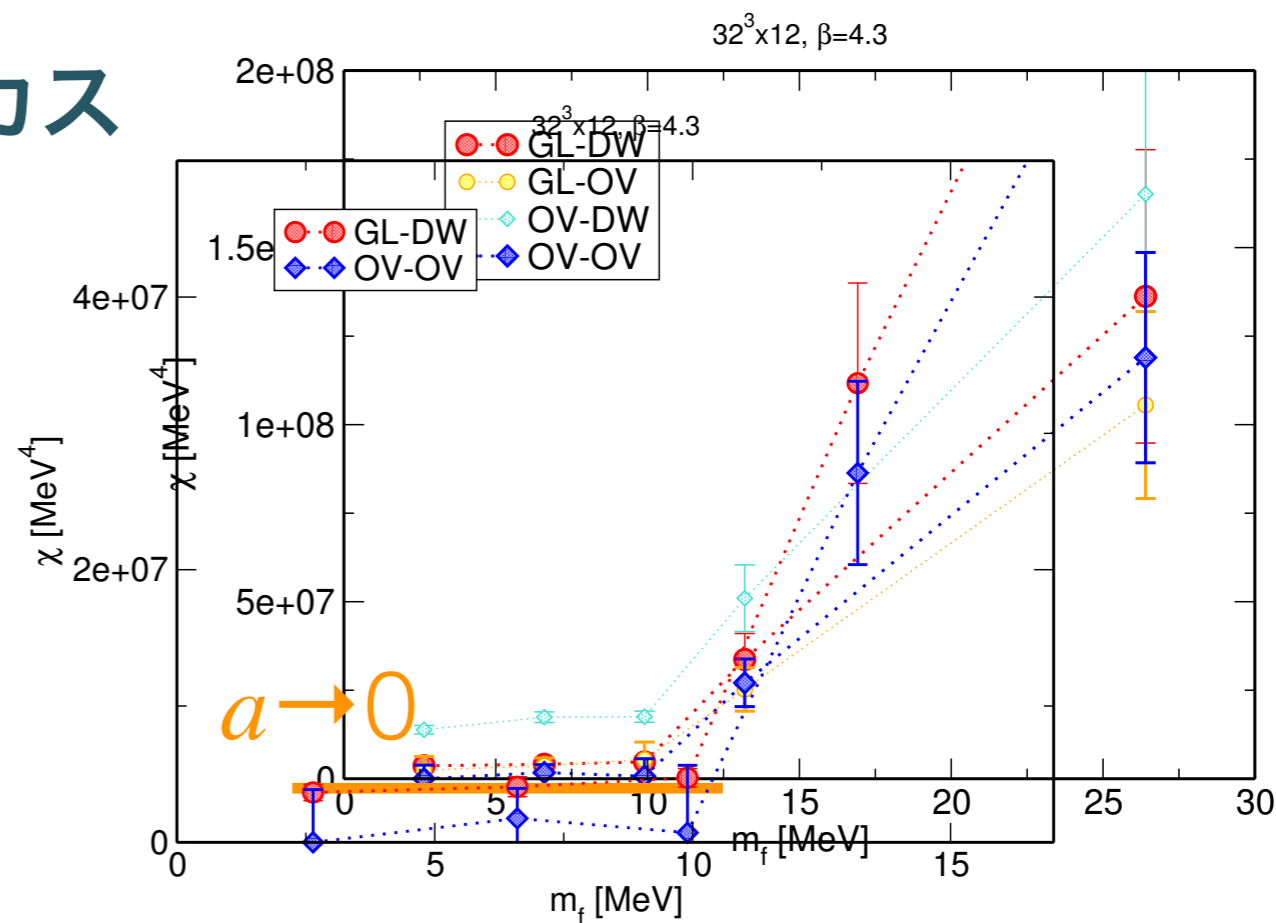
 - $a = 0.11$ fm と比較

 - 誤差は a^2

- $T=220$ MeV

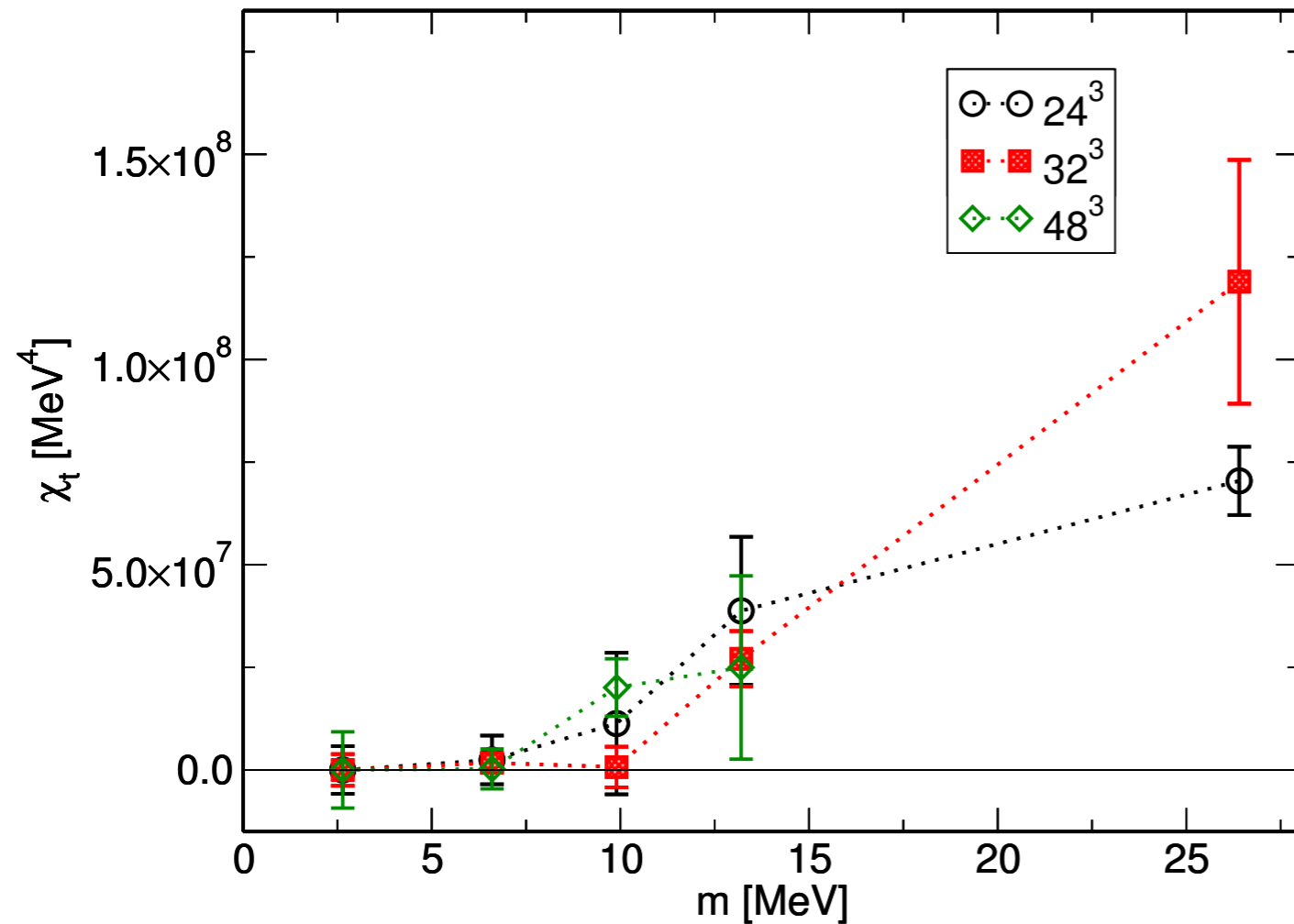
 - ➔ 温度を下げていき
 T_c 近傍まで調べたい

今年度のフォーカス



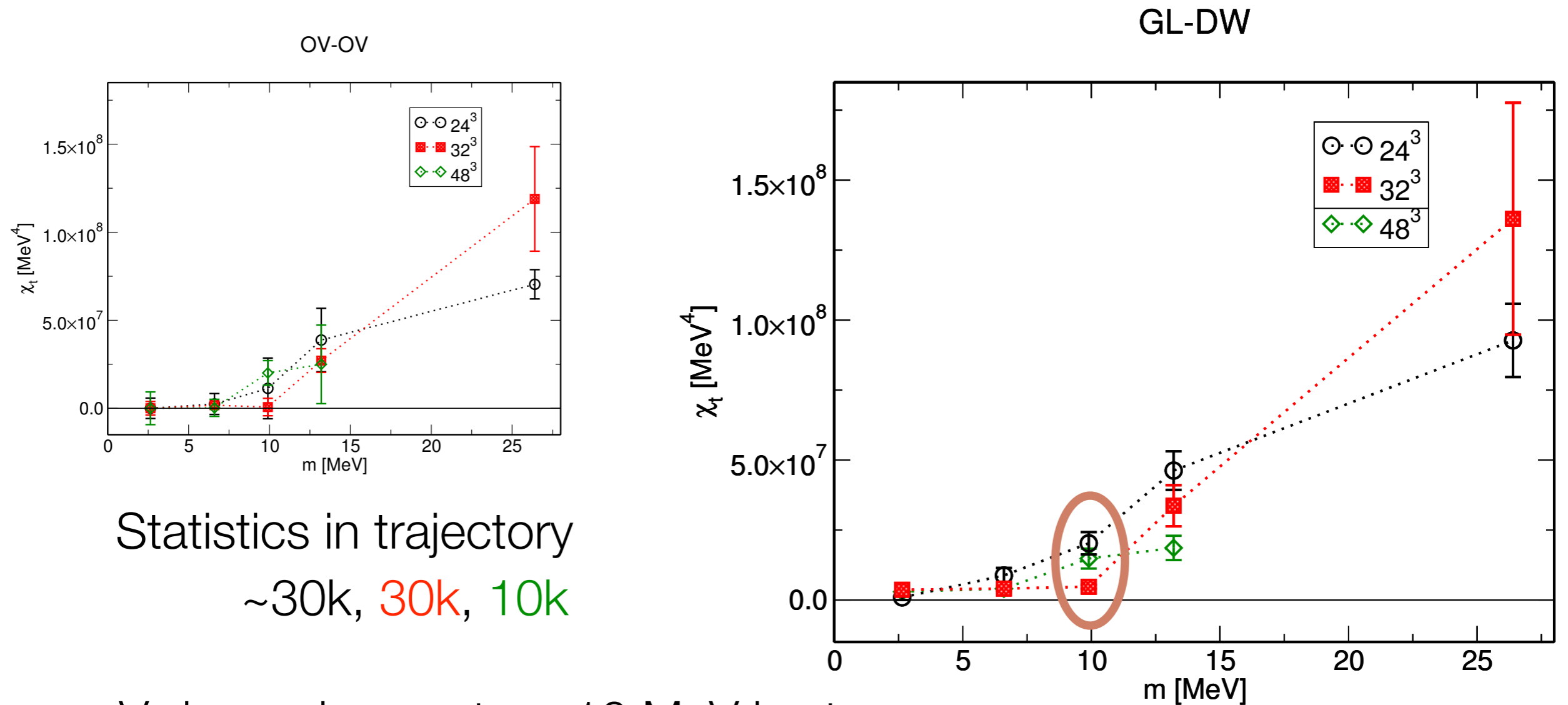
Results of $\chi_t(m)$ at $T=220$ MeV; multiple volume

OV-OV



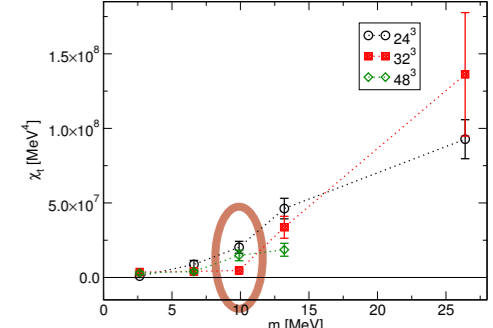
- Statistics in trajectory
~30k, 30k, 10k

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



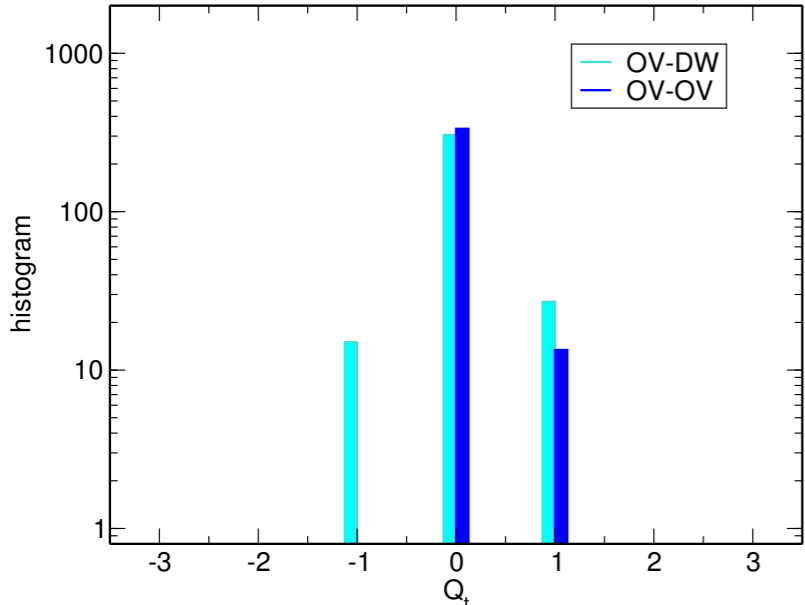
- V dependence at $m=10$ MeV is strange
 - non-monotonic: cannot take thermodynamic limit
 - important region, where a phase boundary was suggested w/ 32^3
- Let's look at the histogram of Q

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



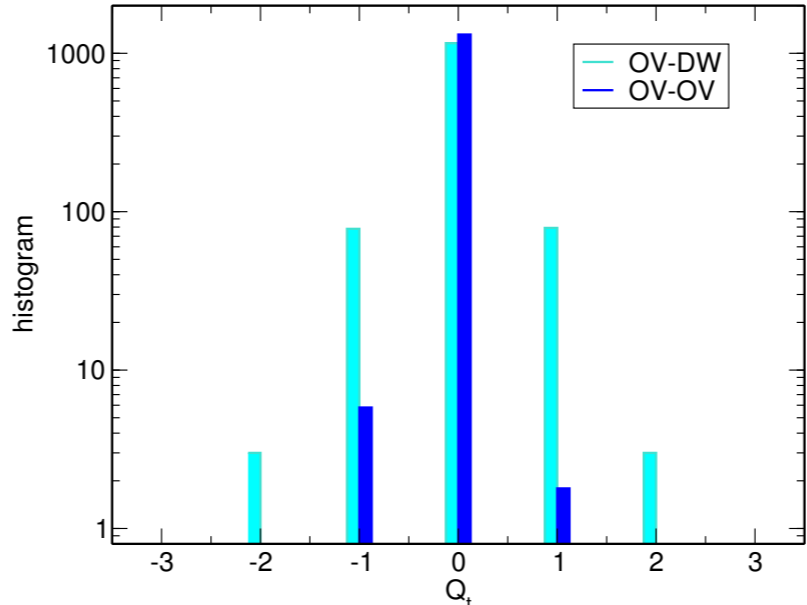
24³x12

OV index
24³x12, $\beta=4.3$, $m=0.00375$



32³x12

OV index
32³x12, $\beta=4.3$, $m=0.00375$



48³x12

OV index
48³x12, $\beta=4.3$, $m=0.00375$



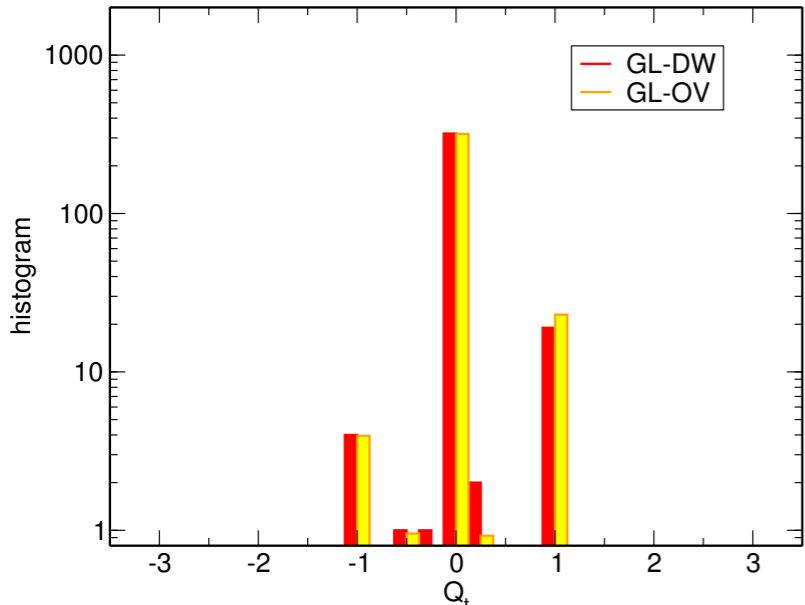
low stat.

まだ統計が心許ない

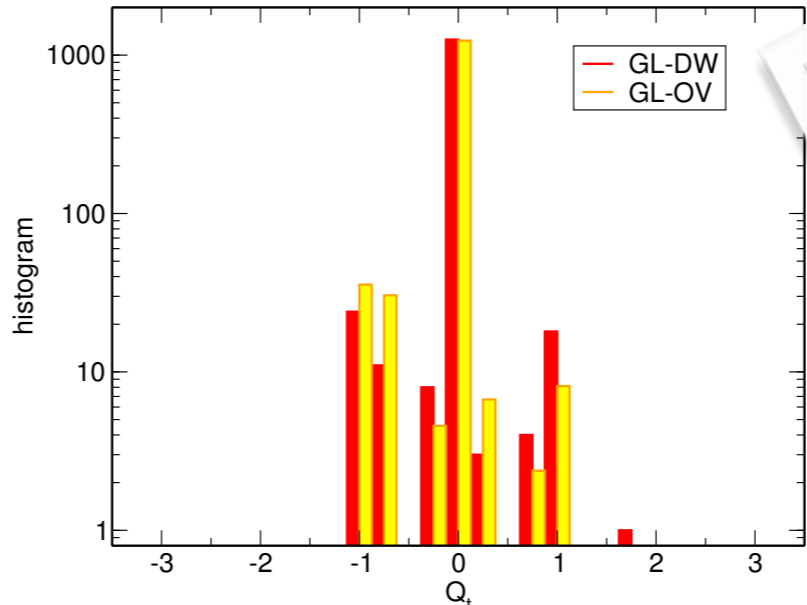
若干体積を減らして継続中

low stat.

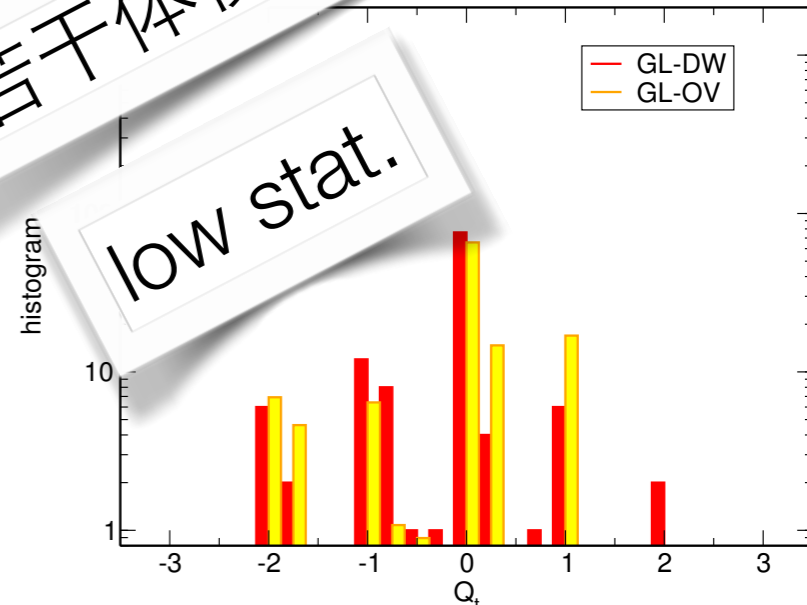
gluonic
24³x12, $\beta=4.3$, $m=0.00375$



gluonic
32³x12, $\beta=4.3$, $m=0.00375$



gluonic
48³x12, $\beta=4.3$, $m=0.00375$



trajectory: ~30k
sample rate: 100

~30k
20

~10k
100

まとめ (未言及含む)

- 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 $\chi_t(m)$ について特に **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
- 比較的大きいクォーク質量で不思議な体積依存性: $U(1)_A$
 - 相転移を示唆？
 - フレーバー—重項スカラーが軽くなる新奇な現象？
- 継続中。。。

$N_f=2+1$ 相図

- 連続極限で分かっていること

- $N_f=0$: 一次転移

- 右

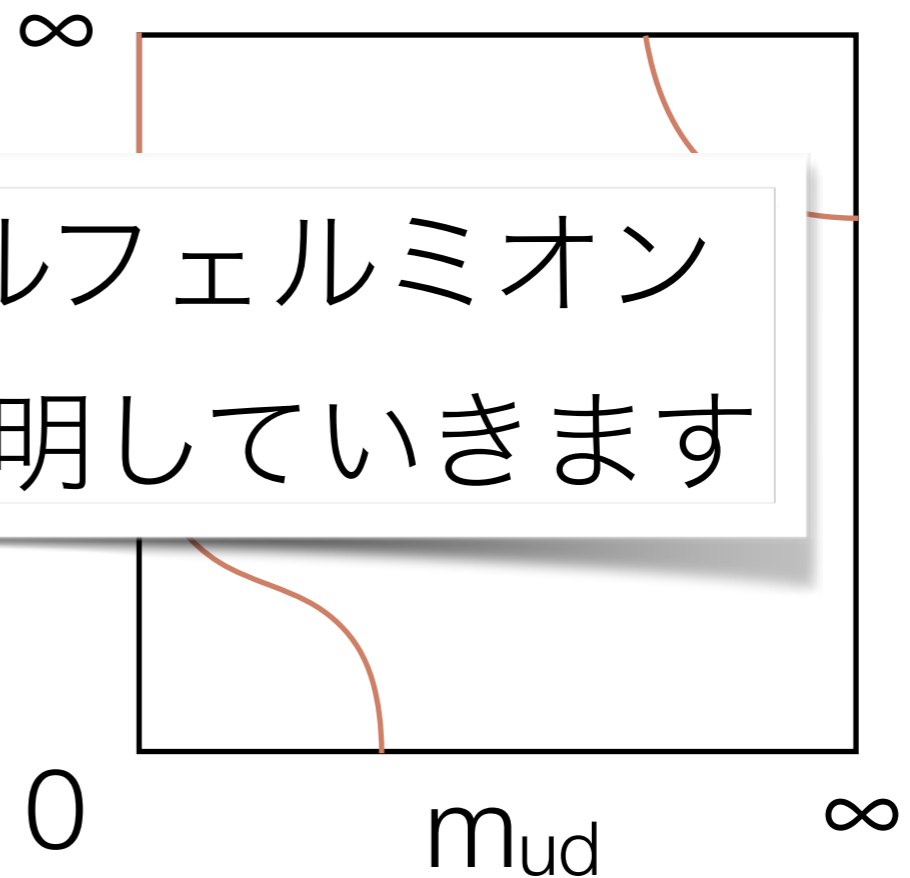
- $N_f=2$

- 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



ご静聴ありがとうございました。