SFtX法を用いたカイラル感受率の測定

WHOT-QCD Collaboration
馬場惇[*]、梅田貴士[1]、江尻信司[2]、金谷和至[*]、北沢正清[3]、鈴木遊[*]、鈴木博[4]、谷口裕介[*]
[*]: 筑波大、[1]: 広島大、[2]: 新潟大、[3]: 大阪大、[4]: 九州大

有限温度QCDの相転移温度の測定において広く用いられているカイラル感受率をgradient flowに基づくSFtX(Small Flow-time eXpansion)法を用いて測定する。従来の研究では無視されがちであったconnectedなダイアグラムの寄与を含めた解析によって真のカイラル感受率の評価を目的としている。また、$U(1)_A$感受率の測定も行う。
本研究では、SFtX法における新しいスケールの導入とそれに合わせてより長いflow timeでの測定を行うことで、これまでの解析で現れていた系統誤差を減らし、より精度の良い解析をすることを目的としている。

QCD相転移

(massless) QCDの本来持つべき対称性

$$\underline{SU(N_F)_R \times SU(N_F)_L \times U(1)_V} \times \boxed{U(1)_A}$$

自発的対称性の破れ → $SU(N_F)_V$　　anomaly

カイラル相転移

有限温度ではこれらの対称性が回復している

カイラル感受率

$$\chi_f^{\rm full} = \underbrace{\langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle}_{} - \langle\bar\psi_f\psi_f\rangle^2$$

$$\langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm disc} + \langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm conn}$$

(一点関数)^2　　二点関数

disconnected カイラル感受率

$$\chi_f^{\rm disc} = \langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm disc} - \langle\bar\psi_f\psi_f\rangle^2$$

一点関数だけで解析できる。これまでもよく利用されてきた。

二点関数の寄与 $\langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm conn}$ も含めた
フルのカイラル感受率 $\chi_f^{\rm full}$ の測定を行う

Lattice Setup

$N_f = 2+1$ QCD Iwasaki + NP-clover
$\beta = 2.05$ ($a \sim 0.07$ fm)
$m_\pi/m_\rho \sim 0.63$, $m_{\eta_{ss}}/m_\phi \sim 0.74$

- 格子間隔は一点のみ
- u, d quarkはheavy
- s quarkはほぼphysical

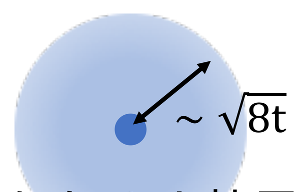
Nt	T [MeV]	$t_{1/2}$
56	0	24.5
16	174	8
14	199	6.125
12	232	4.5
10	279	3.125
8	348	2

Gradient flow

[Narayanan-Neuberger(2006), Lüscher(2009-)]

Flow方程式

$$\partial_t B_\mu(t,x) = D_\nu G_{\mu\nu}(t,x)$$
$$\partial_t \chi(t,x) = D^2\chi(t,x)$$
$$\partial_t \bar\chi(t,x) = \bar\chi(t,x)\overleftarrow{D}^2$$



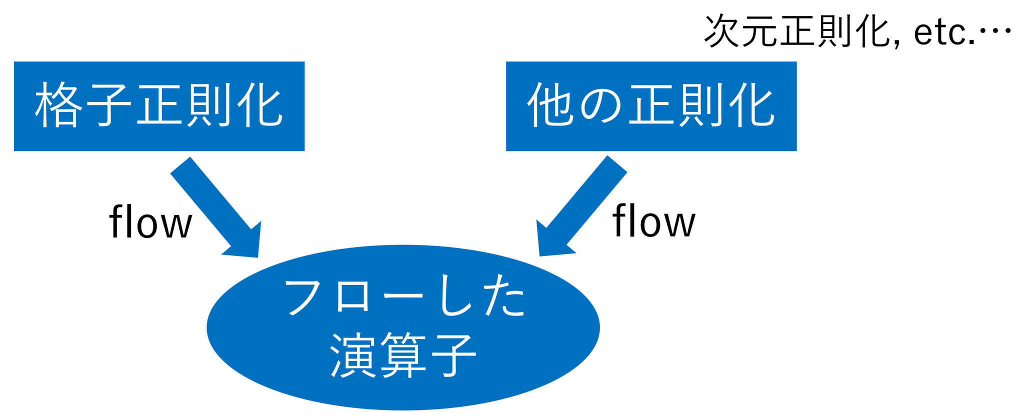
場をなめす効果

仮想時間 t 方向への5次元の拡散方程式

Flowさせた場にはUV発散がない
＝ある種のくりこみスキームとみなせる

Small flow time expansion

[Lüscher-Weisz(2011), Suzuki(2013-)]



Flowした場からは自然にUV発散が取り除かれる
⟶ 正則化によらない演算子が得られる

SFtX method

$$\boxed{Z^{{\rm GF}\to\overline{\rm MS}}(t)}\mathcal{O}^{GF}(t) = \mathcal{O}^{\overline{\rm MS}} + O(t)$$

$tA + t^2B + \ldots$

GF schemeからMS schemeへのmatching factor

中間スケール $\mu'(t) \sim 1/\sqrt{t}$

$\mu_d = 1/\sqrt{8t}$
Suzuki(2013) で導入された。GFで自然なスケール。

$\mu_0 = 1/\sqrt{2t\,e^{\gamma_E}}$
Harlandar-Kluth-Lange(2018) で提案された。
摂動計算で現れる定数を打ち消すように定義している。
$\mu_0 \sim 1.5\mu_d$ なので、摂動領域の振る舞いが改善される期待。

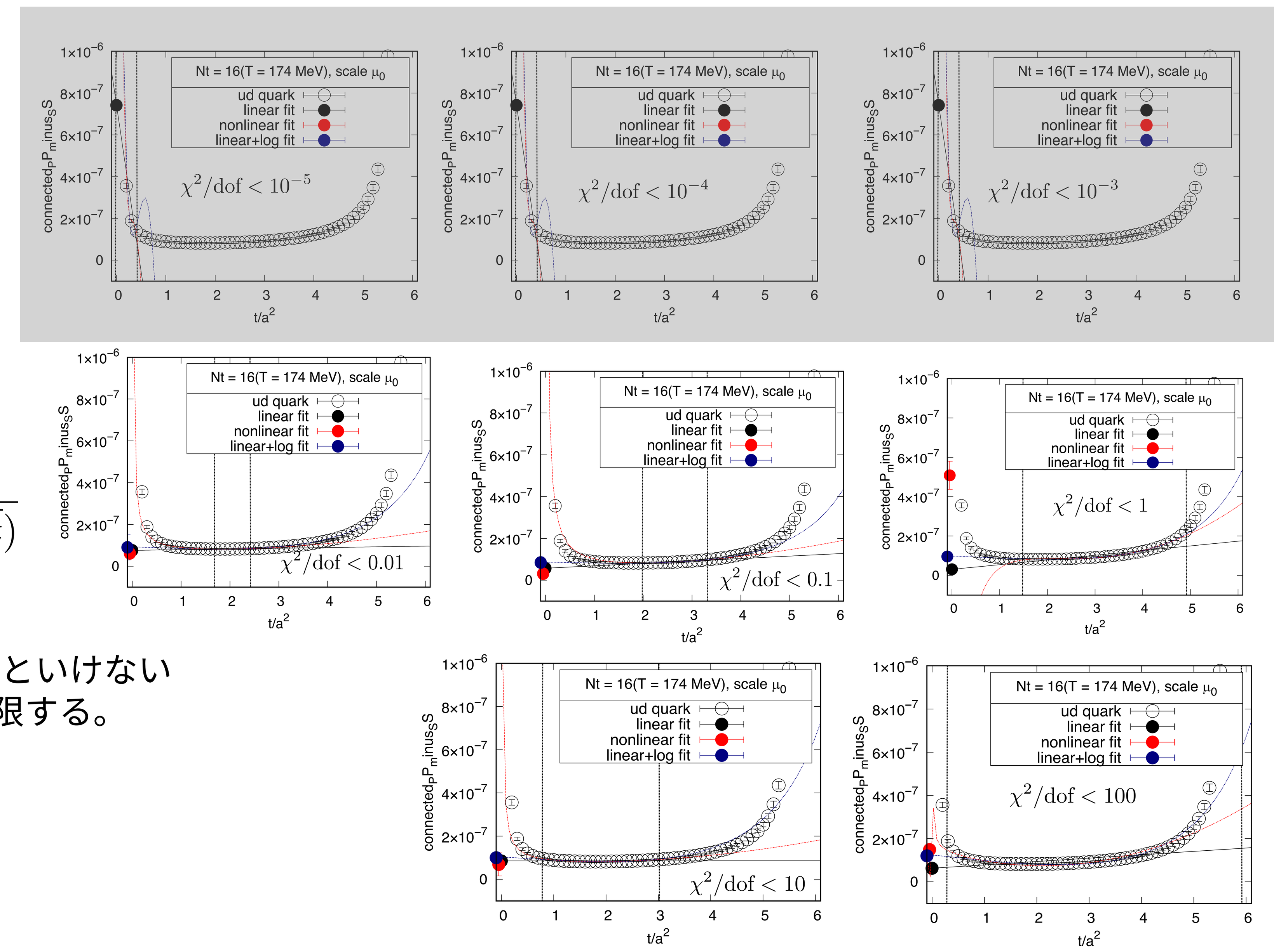
Numerical results

$t \to 0$極限

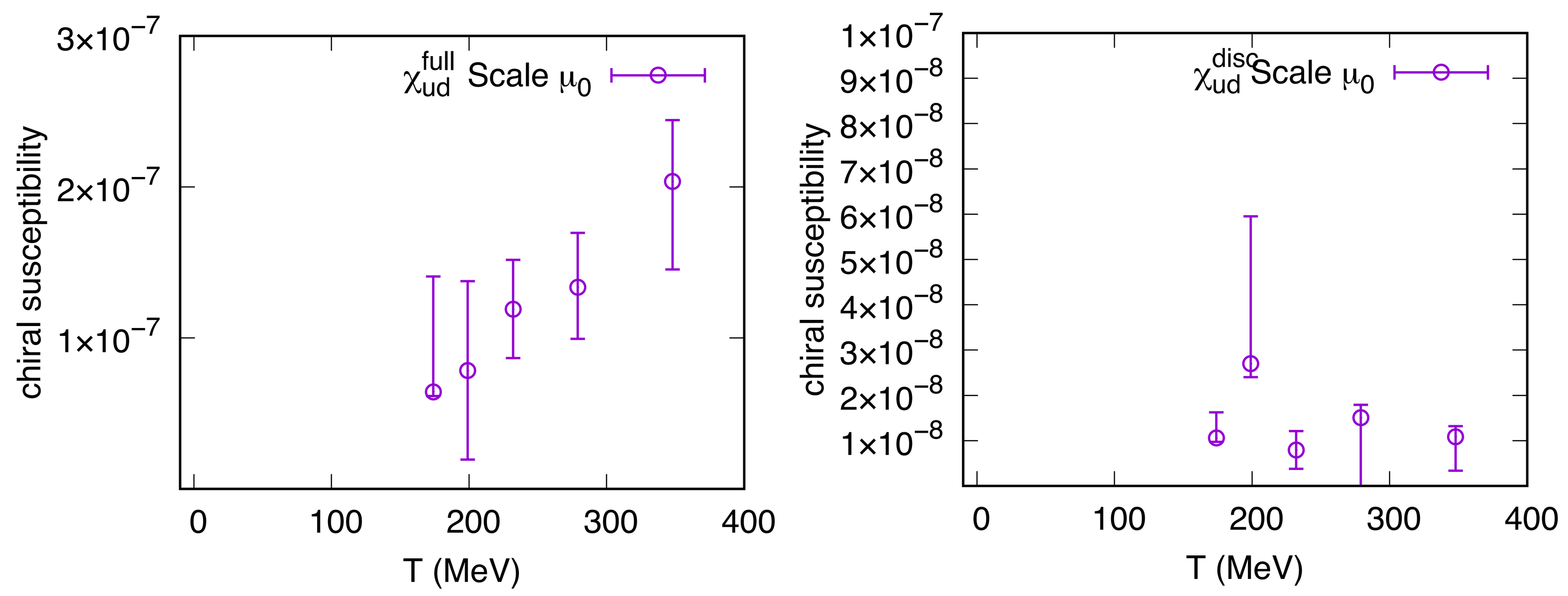
基本方針
- tが小さいところのデータを使う
→tの1次でfit $f(t) = a + bt$
- tが大きいところでは2次以上の寄与
+ lattice artifactとして$1/t$の寄与
→非線形fit $g(t) = a + bt + ct^2 + \frac{d}{t}$
- 摂動論の高次の効果の見積もり
→linear + log fit $h(t) = a + bt + \frac{Q}{\log(\sqrt{8t})}$

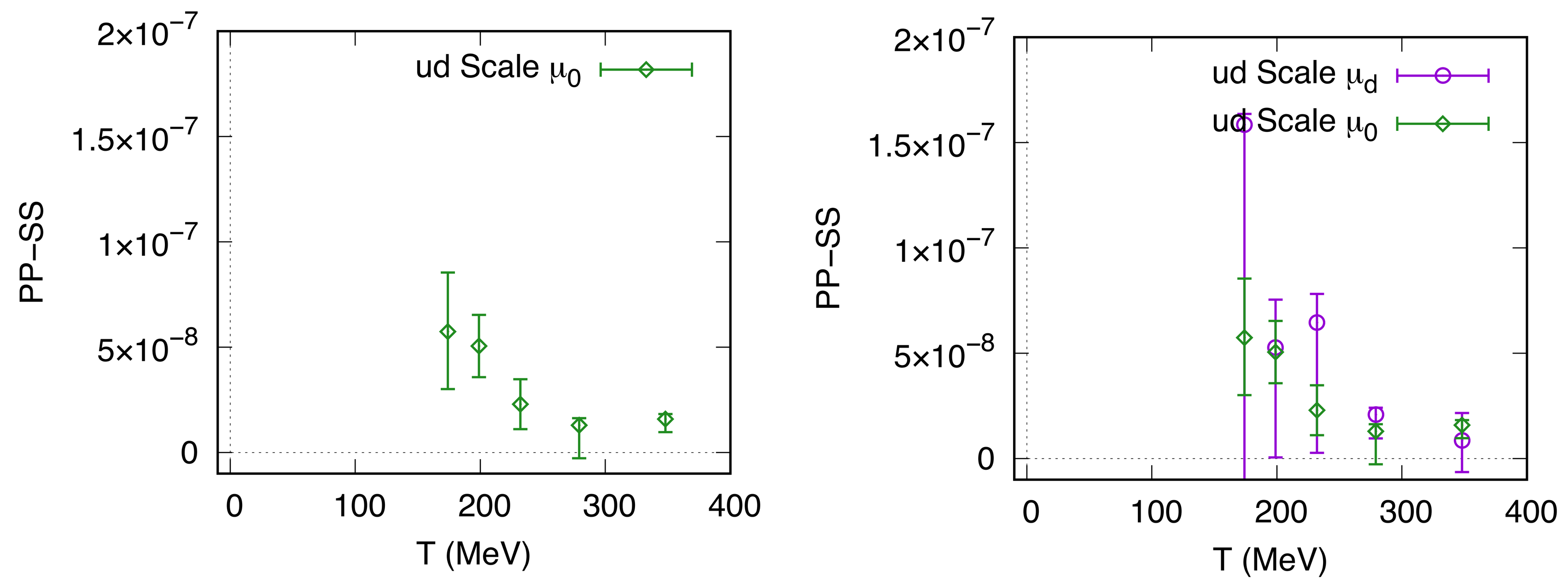
Linear windowをどうやって決める？
中間あたりの"ちょうど良い"ところを探さないといけない
→線形fitのχ^2/dofをcut offとしてwindowを制限する。

Windowなし



カイラル感受率





SFtX法を用いたカイラル感受率の測定

WHOT-QCD Collaboration

馬場惇*、梅田貴士[1]、江尻信司[2]、金谷和至*、北沢正清[3]、鈴木遊*、鈴木博[4]、谷口裕介*

*: 筑波大、[1]: 広島大、[2]: 新潟大、[3]: 大阪大、[4]: 九州大

有限温度QCDの相転移温度の測定において広く用いられているカイラル感受率をgradient flowに基づくSFtX(Small Flow-time eXpansion)法を用いて測定する。従来の研究では無視されがちであったconnectedなダイアグラムの寄与を含めた解析によって真のカイラル感受率の評価を目的としている。また、$U(1)_A$感受率の測定も行う。
本研究では、SFtX法における新しいスケールの導入とそれに合わせてより長いflow timeでの測定を行うことで、これまでの解析で現れていた系統誤差を減らし、より精度の良い解析をすることを目的としている。

QCD相転移

(massless) QCDの本来持つべき対称性

$$SU(N_F)_R \times SU(N_F)_L \times U(1)_V \times \boxed{U(1)_A}$$

自発的対称性の破れ → $SU(N_F)_V$

カイラル相転移

anomaly

有限温度ではこれらの対称性が回復している

カイラル感受率

$$\chi_f^{\rm full} = \underbrace{\langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle}_{} - \langle\bar\psi_f\psi_f\rangle^2$$

二点関数

$$\langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm disc} + \langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm conn}$$

(一点関数)^2

disconnected カイラル感受率

$$\chi_f^{\rm disc} = \langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm disc} - \langle\bar\psi_f\psi_f\rangle^2$$

一点関数だけで解析できる。これまでもよく利用されてきた。

二点関数の寄与 $\langle(\bar\psi_f\psi_f)^2\rangle_{\rm conn}$も含めた
フルのカイラル感受率 $\chi_f^{\rm full}$の測定を行う

Lattice Setup

$N_f = 2 + 1$ QCD Iwasaki + NP-clover
$\beta = 2.05$ ($a \sim 0.07$ fm)
$m_\pi/m_\rho \sim 0.63$, $m_{\eta_{ss}}/m_\phi \sim 0.74$

- 格子間隔は一点のみ
- u, d quarkはheavy
- s quarkはほぼphysical

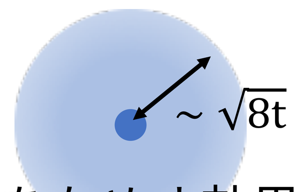
Nt	T [MeV]	$t_{1/2}$
56	0	24.5
16	174	8
14	199	6.125
12	232	4.5
10	279	3.125
8	348	2

Gradient flow

[Narayanan-Neuberger(2006), Lüscher(2009-)]

Flow方程式

$$\partial_t B_\mu(t,x) = D_\nu G_{\mu\nu}(t,x)$$
$$\partial_t \chi(t,x) = D^2\chi(t,x)$$
$$\partial_t \bar\chi(t,x) = \bar\chi(t,x)\overleftarrow{D}^2$$



場をなめす効果

仮想時間 t 方向への5次元の拡散方程式

Flowさせた場にはUV発散がない
＝ある種のくりこみスキームとみなせる

Small flow time expansion

[Lüscher-Weisz(2011), Suzuki(2013-)]

次元正則化, etc.…

格子正則化 —flow→ フローした演算子 ←flow— 他の正則化

Flowした場からは自然にUV発散が取り除かれる
⟶ 正則化によらない演算子が得られる

SFtX method

$$\boxed{Z^{{\rm GF}\to\overline{\rm MS}}(t)}\mathcal{O}^{GF}(t) = \mathcal{O}^{\overline{\rm MS}} + \underbrace{O(t)}_{tA+t^2B+\ldots}$$

GF schemeからMS schemeへのmatching factor

中間スケール $\mu'(t) \sim 1/\sqrt{t}$

$\mu_d = 1/\sqrt{8t}$
Suzuki(2013) で導入された。GFで自然なスケール。

$\mu_0 = 1/\sqrt{2t\,e^{\gamma_E}}$
Harlandar-Kluth-Lange(2018) で提案された。
摂動計算で現れる定数を打ち消すように定義している。
$\mu_0 \sim 1.5\mu_d$ なので、摂動領域の振る舞いが改善される期待。

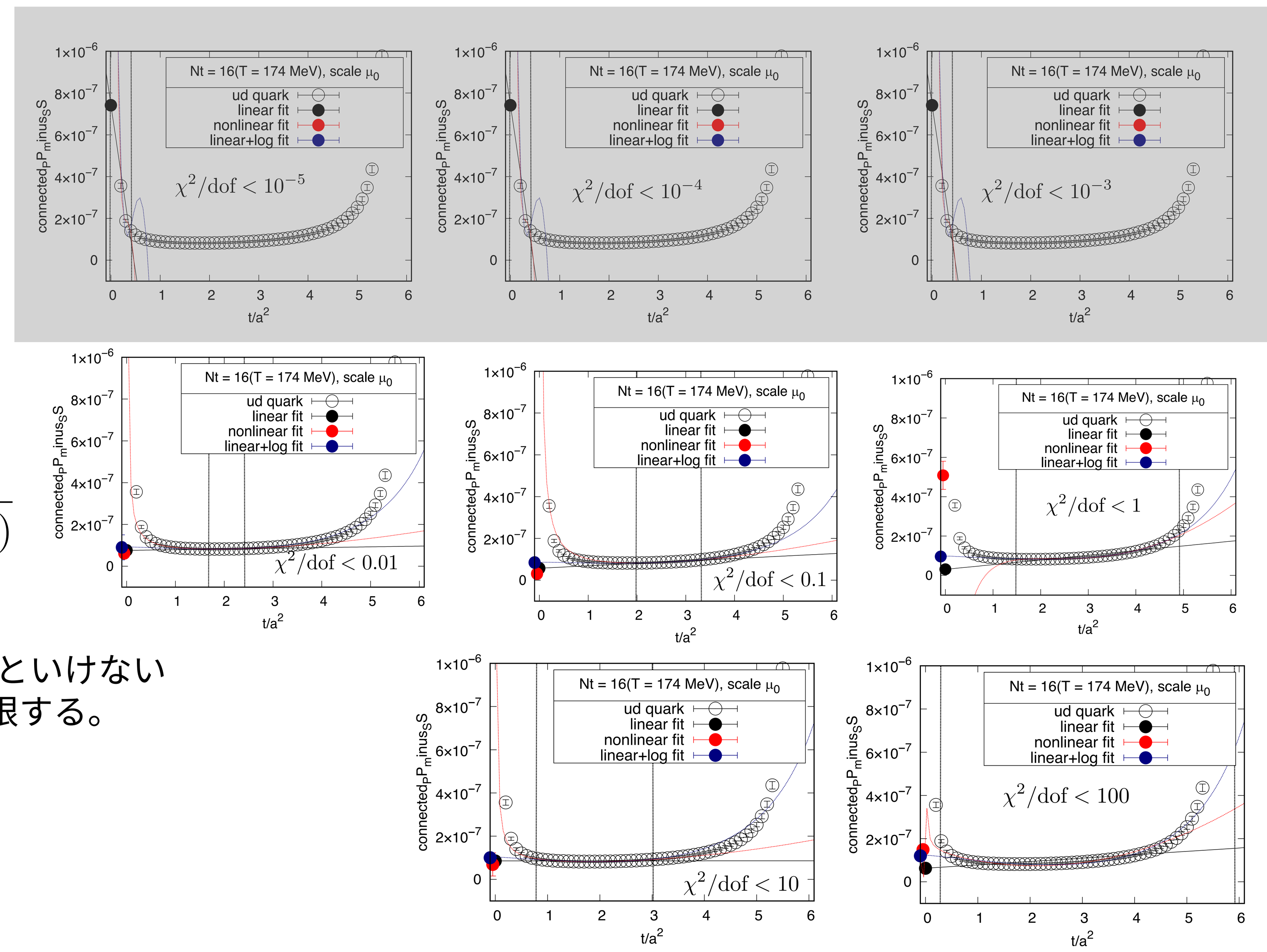
Numerical results

$t \to 0$極限

基本方針
- tが小さいところのデータを使う
 →tの1次でfit $f(t) = a + bt$
- tが大きいところでは2次以上の寄与
 + lattice artifactとして$1/t$の寄与
 →非線形fit $g(t) = a + bt + ct^2 + \frac{d}{t}$
- 摂動論の高次の効果の見積もり
 →linear + log fit $h(t) = a + bt + \frac{Q}{\log(\sqrt{8t})}$

Linear windowをどうやって決める？
中間あたりの“ちょうど良い”ところを探さないといけない
→線形fitのχ^2/dofをcut offとしてwindowを制限する。

Windowなし



カイラル感受率