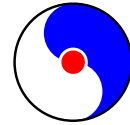


物質優勢宇宙の謎解明のための核子構造精密計算

大木 洋



RIKEN BNL
Research Center

@ 2016年理研シンポジウム「スーパーコンピューターHOKUSAIとShoubu,
研究開発の最前線」 6月8日, 2016

本研究課題の目標

格子色力学を用いた核子構造の理解による標準模型を超えた物理の探求

(i) 核子電磁形状因子

(ii) 陽子崩壊行列要素

(iii) 標準模型を超えた物理から導かれる色電荷電気双極子能率

カイラル対称性を保つ2+1フレーバードメインウォールフェルミオンによる格子QCD計算

(i)形状因子と(ii)陽子崩壊の行列要素に関しては、 $48 \times 48 \times 48 \times 96$ の4次元格子体積での物理クォーク質量直上でのモンテカルロ計算

(iii)色電荷電気双極子能率においては、 $32 \times 32 \times 32 \times 64$ の4次元格子体積($m\pi \sim 170$ MeV)の計算を行う。Gauge ensembles are generated by RBC/UKQCD collaborations.

研究成果ハイライト(1)

CP対称性を破る色電荷電気双極子能率の計算

chromo electric dipole moment (cEDM)

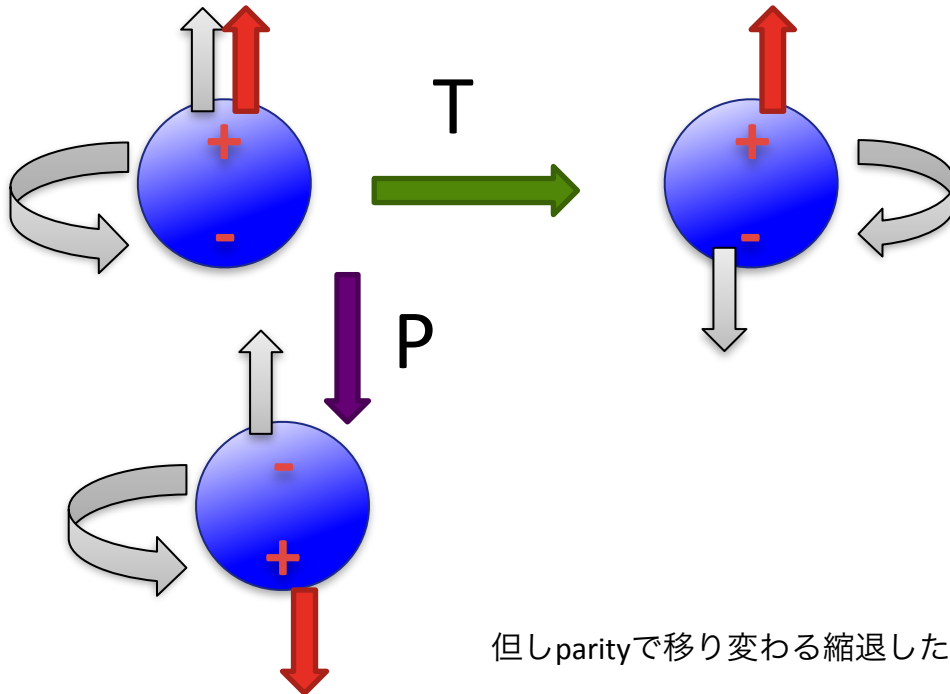
CP (&P) の破れと電子双極子能率

Electric Dipole Moments (EDM)

- Electric Dipole Moment \vec{d}
外部電場 E によるエネルギー変位 ΔH

$$\Delta H = \vec{d} \cdot \vec{E}$$

- EDMは **P&T (CP through CPT)の破れの証拠**



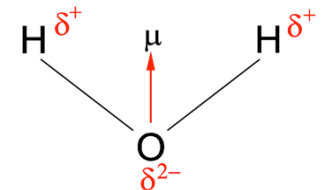
現在の実験の上限:

$$\Delta H \sim 10^{-6} \text{ Hz} \sim 10^{-21} \text{ eV}$$

$$\rightarrow |d| < \Delta H/E \sim 10^{-25} \text{ e cm}$$

$$\text{仮に } d \sim 10^{-2} \times 1 \text{ MeV} / \Lambda_{\text{CP}}^2$$

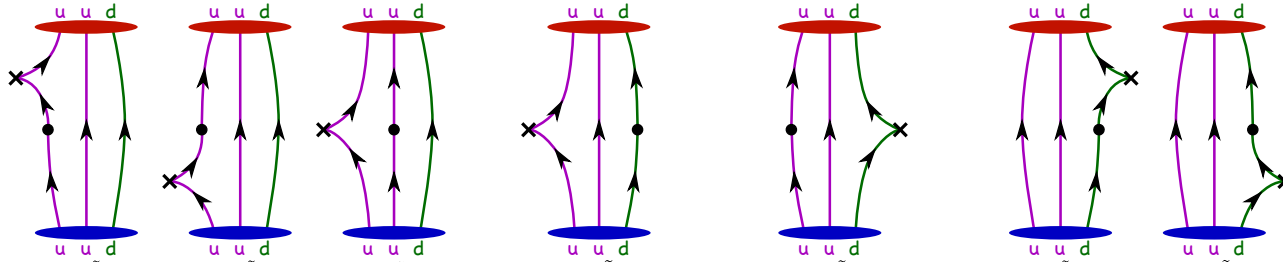
$$\rightarrow \Lambda_{\text{CP}} > \sim O(1) \text{ TeV}$$



但し parity で移り変わる縮退した真空が存在しない場合に限る c.f. Water molecule

cEDM計算における主な2つの困難

1. 4点グラフの計算により計算量が増大と大きな統計誤差



->HOKUSAIによる大規模数値計算とAMA法による誤差縮減

2. 高次元演算子による大きな二次発散の不定性

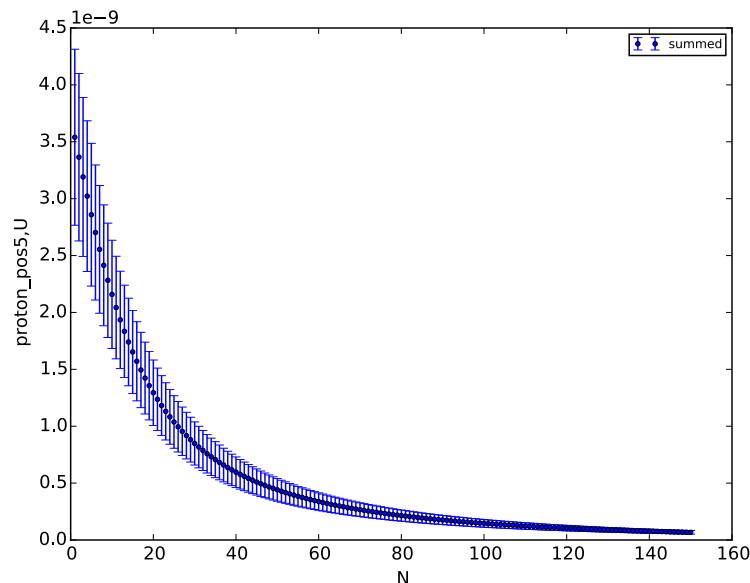
$$(\bar{q}(\sigma \cdot G)\gamma_5 q)_{lattice} \sim \frac{1}{a^2}(\bar{q}\gamma_5 q) + \frac{M}{a}(\bar{q}\gamma_5 q) + (\bar{q}(\sigma \cdot G)\gamma_5 q)$$

連続極限(a->0)で大きな発散

-> Gradient flow法を用いた演算子の改良を実行中

我々のPreliminaryな結果: cEDMによるCP混合角 (α) の計算

$$\sum_s u_N(p, s) \bar{u}_N(p, s) = E_N \gamma_0 - i \vec{p} \vec{\gamma} + m_N e^{i\alpha \gamma_5}$$
$$\text{Tr} \frac{1 + \gamma_t}{2} \gamma_5 \left\langle N(T) \sum_x O_{\text{cEDM}}(x) \bar{N}(0) \right\rangle \propto \alpha$$



$$(t_{WF} = 0.02 \times N)$$

Gradient flow時間による物理量の振る舞いの変化

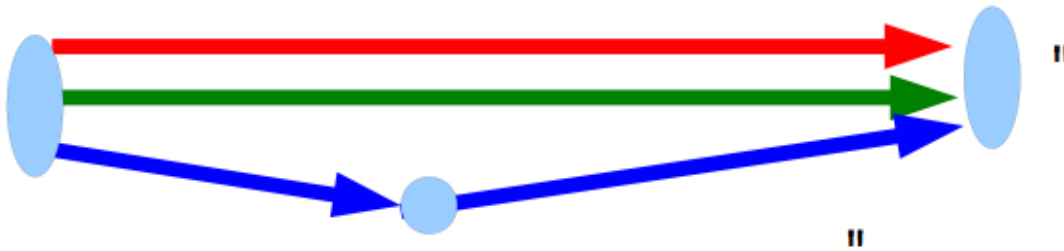
x軸: Gradient flow 時間

大きなflow時間をとることにより、発散項の抑制に成功。

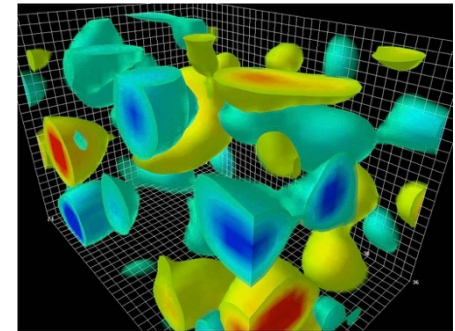
形状因子計算を現在進行中。

θ角によるトポロジカルな揺らぎを用いた quark EDM の計算結果 [E. Shintani et al.]

$$\langle u_N(p') | J^\mu | u_N(p) \rangle_{\mathcal{CP}} = \gamma^\mu F_1(q^2) + \sigma^{\mu\nu} q_\nu \frac{F_2(q^2)}{2m_N} + i\gamma_5 \frac{\sigma^{\mu\nu} q_\nu}{2m_N} F_3(q^2)$$



$$d_N = \lim_{Q^2 \rightarrow 0} F_3(Q^2)/2m_N$$

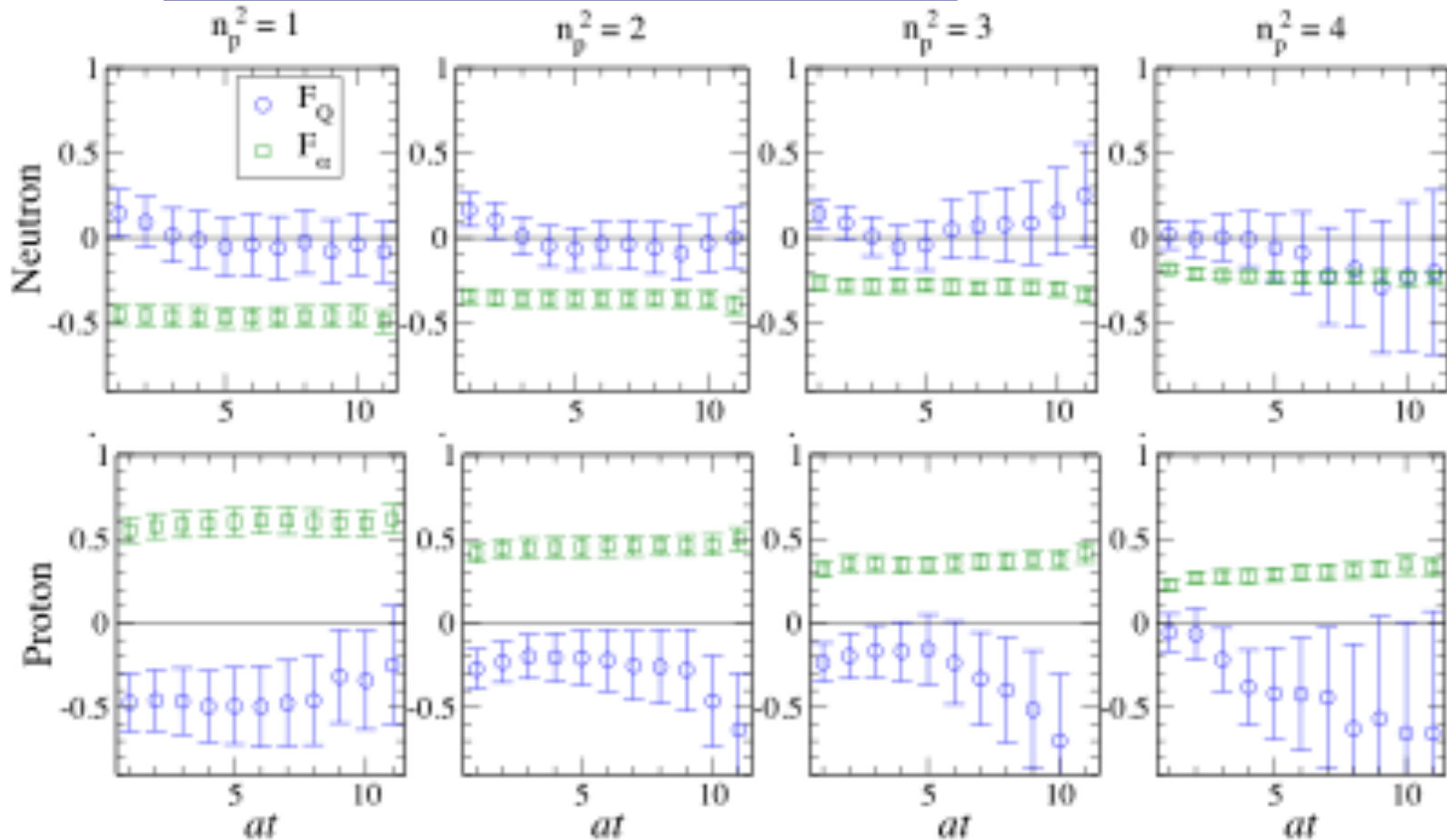


F3 @ $M_{\text{pi}}=300$ MeV

$$F3 = F_Q + F_\alpha$$

F_Q : CP-odd 3pt function contribution

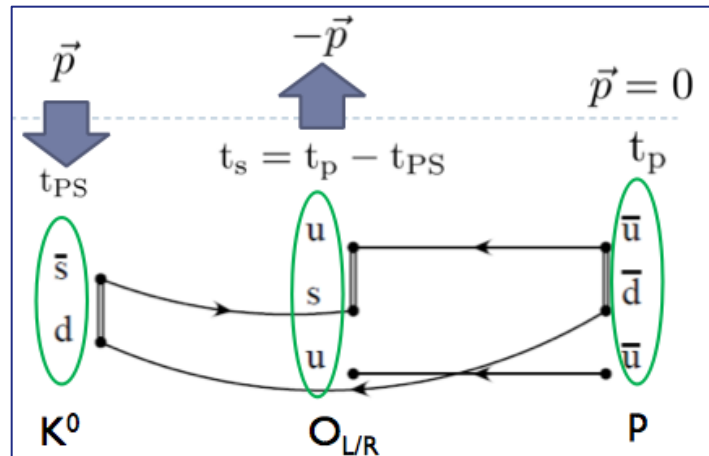
F_α : α x CP-even 3pt function (F1 and F2)



研究成果ハイライト(2)

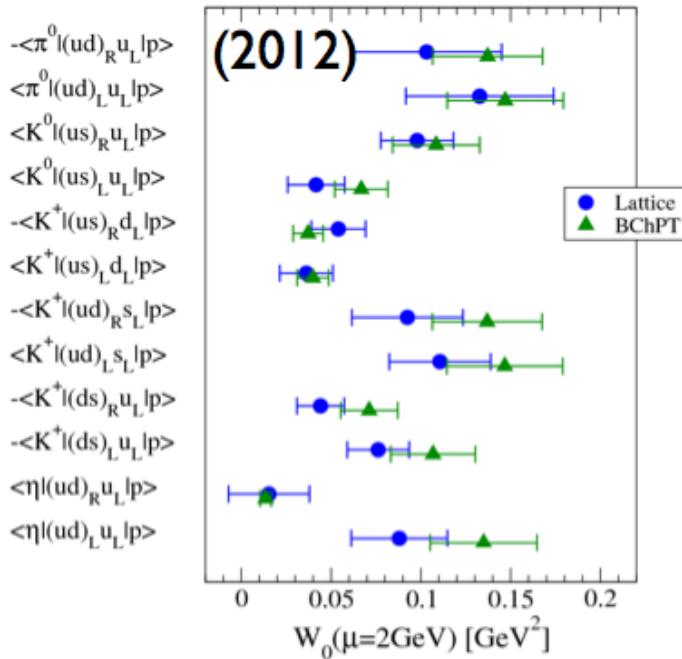
陽子崩壊に関する行列要素の計算

ディラック固有ベクトルの計算及びall-mode平均法による統計誤差の縮減を持ちいた計算

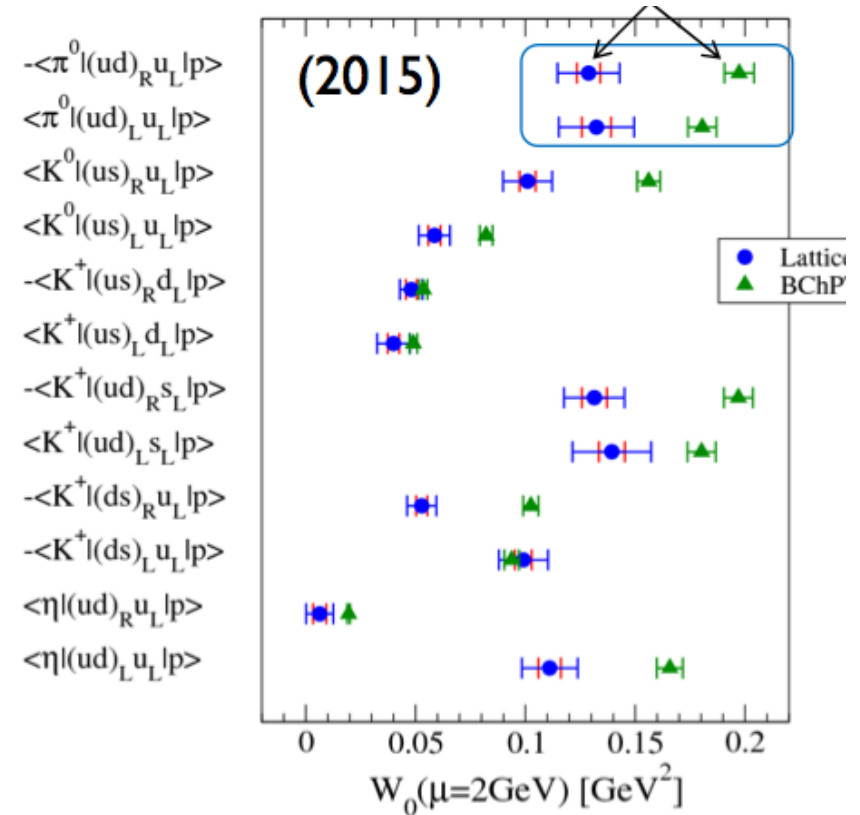


バリオン数を破る相互作用の元での陽子と
 π, k 中間子行列要素の計算

陽子崩壊行列要素の計算結果 [E. Shintani et al.]



Update



π 中間子質量(M_π) ≥ 300 MeVにおいて計算が終了。

本研究により高精度計算が実現可能であることがわかる。しかし、カイラルバグモデルによる異常な π 質量依存性が存在する可能性が指摘されており、より信頼出来る物理点直上($M_\pi=140$ MeV)での計算が必要(現在進行中)