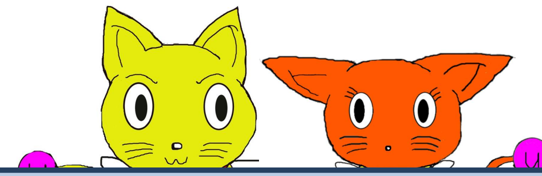


カイラル対称性からひも解く原子核
-我々の質量の起源を求めて-

名古屋大学
クォーク・ハドロン理論研究室
D3　末永 大輝

目次

1. イントロダクション

- カイラル対称性の自発的破れと核子の質量
- パリティ二重項模型の紹介

2. 核物質中の計算

- パリティ二重項模型を用いた核物質の構築
- 核物質中での $N^-(1535)$ の崩壊幅
- 核物質中での $\bar{D}$ 中間子のスペクトル関数

3. まとめ

目次

1. イントロダクション

- カイラル対称性の自発的破れと核子の質量
- パリティ二重項模型の紹介

2. 核物質中の計算

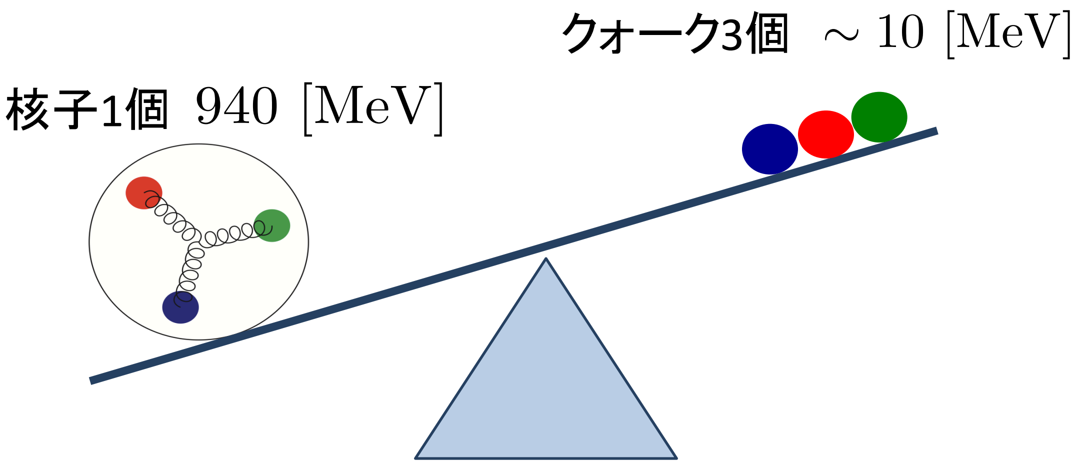
- パリティ二重項模型を用いた核物質の構築
- 核物質中での $N^-(1535)$ の崩壊幅
- 核物質中での $\bar{D}$ 中間子のスペクトル関数

3. まとめ

1. イントロダクション

• 質量ギャップ問題

– 核子（陽子・中性子）はクォーク3つで出来ているが. . .

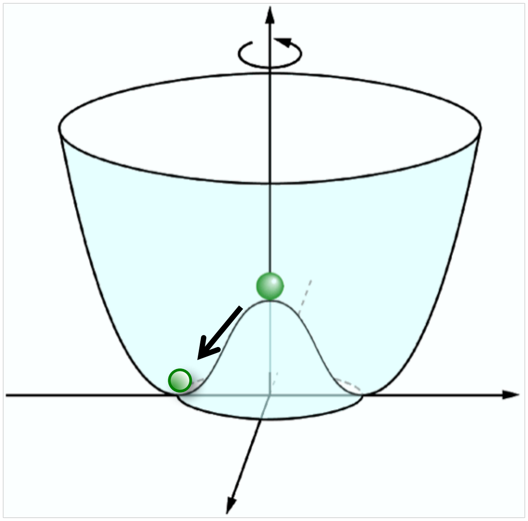


– 核子とクォーク3つの質量に大きな差がある(質量ギャップ問題)

– QCDを解くことが出来れば説明できるが、かなり困難！

1. イントロダクション

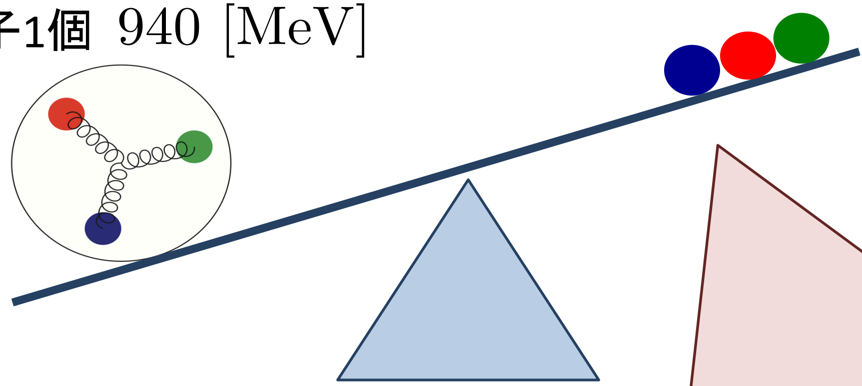
- **質量生成機構**
  - 質量生成機構と言えば、南部陽一郎先生の「自発的対称性の破れ」を思い浮かべる(はず…)
  - 例えば　ヒッグス機構(電子等の質量)
    超伝導理論 (準粒子の質量)
    ⋮



- 核子質量も「自発的対称性の破れ」で説明出来るのか？

1. イントロダクション

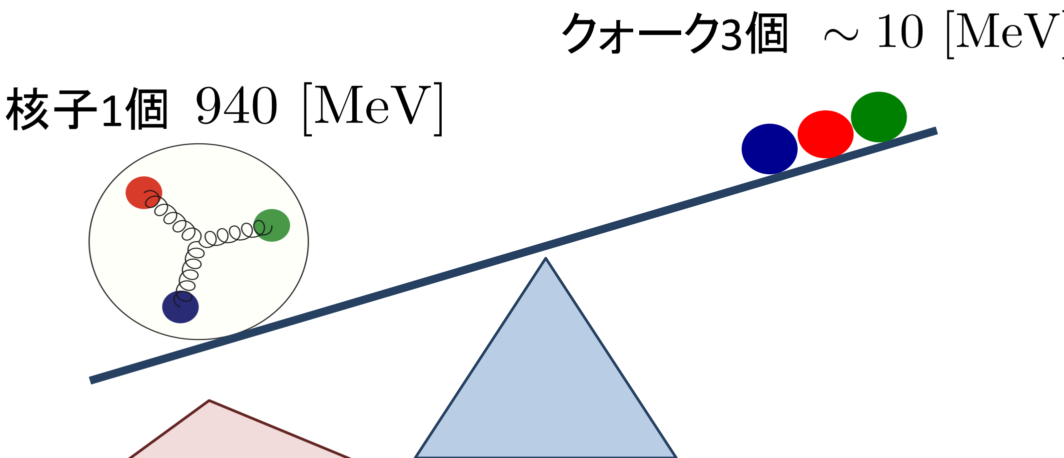
- **質量ギャップ問題**
  - 核子質量を説明する自発的対称性の破れ



- クォークは軽く（近似的に）ゼロ質量とみなせる
- QCD はもともと（近似的に）カイラル対称性を持っている

1. イントロダクション

- **質量ギャップ問題**
  - 核子質量を説明する自発的対称性の破れ



- 核子の質量はカイラル対称性が自発的に破れて与えられる
（カイラル対称性の自発的破れ）

1. イントロダクション

- **カイラル対称性の自発的な破れ**
  - 南部理論:
    (近似的な)対称性が自発的に破れると、(近似的に)ゼロ質量の粒子(南部・ゴールドストーンボソン)が出現する

カイラル対称性の自発的破れの場合は、軽いパイオンが出現する

- カイラル対称性の自発的破れを用いれば、核子の質量とパイオンの存在を同時に説明することが出来る

1. イントロダクション

- **カイラル有効模型**
  - 「カイラル対称性の自発的破れ」を基にしたハドロンレベルの理論を、カイラル有効模型と呼ぶ
  - 例えば

線形シグマ模型

M. Gell-Mann and M. Levy, Nuovo Cim. 16. 705 (1960)
J. S. Schwinger, Annals Phys. 2. 407 (1957)

非線形シグマ模型

J. Gasser, H. Leutwyler, Nucl.Phys. B250. 465 (1985)
G. Echer, Plog.Part.Nucl.Phys. 35. 1 (1995)

パリティ二重項模型

C. E. DeTar and T. Kunihiro, Phys. Rev. D 39, 2805 (1989)
D. Jido, M. Oka, and A. Hosaka, PTP 106, 873 (2001)

⋮

1. イントロダクション

- **カイラル有効模型**
  - 「カイラル対称性の自発的破れ」を基にしたハドロンレベルの理論を、カイラル有効模型と呼ぶ
  - 例えば

線形シグマ模型

M. Gell-Mann and M. Levy, Nuovo Cim. 16. 705 (1960)
J. S. Schwinger, Annals Phys. 2. 407 (1957)

非線形シグマ模型

J. Gasser, H. Leutwyler, Nucl.Phys. B250. 465 (1985)
G. Echer, Plog.Part.Nucl.Phys. 35. 1 (1995)

今日は

パリティ二重項模型

C. E. DeTar and T. Kunihiro, Phys. Rev. D 39, 2805 (1989)
D. Jido, M. Oka, and A. Hosaka, PTP 106, 873 (2001)

⋮

1. イントロダクション

• パリティ二重項模型

- 核子 $N^+(939)$ と負パリティ核子 $N^-(1535)$ を同時に取り扱え、質量がそれぞれ以下のように与えられる

$$M_{N^\pm} = \sqrt{a^2\sigma_0^2 + m_0^2} \mp b\sigma_0$$

σ_0 : カイラル対称性の破れの強さの指標（order parameter）

m_0 : カイラル対称性と無関係な質量（カイラル不変質量）

- カイラル対称性が回復（$\sigma_0 = 0$）すると $M_{N^\pm} = m_0$ となり、$N^+(939)$と $N^-(1535)$ が縮退する

目次

2. 核物質中の計算

- **核物質 (原子核)**
  - 核物質 (原子核) は核子の多体系

- 束縛エネルギー
- 対称エネルギー
- 密度の飽和性
- 非圧縮率 (“堅さ”)

⋮

- 核物質 (原子核) の性質をカイラル対称性の観点から説明することも可能なのでは？

2. 核物質中の計算

- パリティ二重項模型による核物質の構築
  - 核子とメソンのラグランジアン

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_N =& \bar{\psi}_{1r} i\gamma^\mu D_\mu \psi_{1r} + \bar{\psi}_{1l} i\gamma^\mu D_\mu \psi_{1l} \\
&+ \bar{\psi}_{2r} i\gamma^\mu D_\mu \psi_{2r} + \bar{\psi}_{2l} i\gamma^\mu D_\mu \psi_{2l} \\
&- m_0[\bar{\psi}_{1l}\psi_{2r} - \bar{\psi}_{1r}\psi_{2l} - \bar{\psi}_{2l}\psi_{1r} + \bar{\psi}_{2r}\psi_{1l}] \\
&- g_1\sigma[\bar{\psi}_{1r}U^\dagger\psi_{1l} + \bar{\psi}_{1l}U\psi_{1r}] \\
&- g_2\sigma[\bar{\psi}_{2r}U\psi_{2l} + \bar{\psi}_{2l}U^\dagger\psi_{2r}] \\
&- a_{\rho NN}[\bar{\psi}_{1l}\gamma^\mu(\xi_L^\dagger\hat{\alpha}_{\parallel\mu}\xi_L)\psi_{1l} + \bar{\psi}_{1r}\gamma^\mu(\xi_R^\dagger\hat{\alpha}_{\parallel\mu}\xi_R)\psi_{1r}] \\
&- a_{\rho NN}[\bar{\psi}_{2l}\gamma^\mu(\xi_R^\dagger\hat{\alpha}_{\parallel\mu}\xi_R)\psi_{2l} + \bar{\psi}_{2r}\gamma^\mu(\xi_L^\dagger\hat{\alpha}_{\parallel\mu}\xi_L)\psi_{2r}] \\
&- a_{0NN}\,\mathrm{tr}[\hat{\alpha}_{\parallel\mu}]\,(\bar{\psi}_{1l}\gamma^\mu\psi_{1l} + \bar{\psi}_{1r}\gamma^\mu\psi_{1r} \\
&+ \bar{\psi}_{2l}\gamma^\mu\psi_{2l} + \bar{\psi}_{2r}\gamma^\mu\psi_{2r}).
\end{aligned}
$$

$$U = \xi_L^\dagger \xi_R = \exp\{i\pi/f_\pi\}$$

$$\hat{\alpha}_{\parallel\mu} = \frac{1}{2i}\left\{(\partial_\mu - iV_\mu)\xi_R\xi_R^\dagger + (\partial_\mu - iV_\mu)\xi_L\xi_L^\dagger\right\}$$

V_μ : ρ, ω メソン場

- ψ_1, ψ_2 の線形結合が $N^+(939), N^-(1535)$ となる

2. 核物質中の計算

- パリティ二重項模型による核物質の構築
  - メソン部分のラグランジアン

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_M = &\frac{1}{2}\partial_\mu\sigma\,\partial^\mu\sigma + \sigma^2\mathrm{tr}[\hat{\alpha}_{\perp\mu}\hat{\alpha}_\perp^\mu] - V_\sigma - V_{\mathrm{SB}} \\
&+ \frac{m_\rho^2}{g_\rho^2}\mathrm{tr}[\hat{\alpha}_{\parallel\mu}\hat{\alpha}_\parallel^\mu] + \left(\frac{m_\omega^2}{2g_\omega^2} - \frac{m_\rho^2}{2g_\rho^2}\right)\mathrm{tr}[\hat{\alpha}_{\parallel\mu}]\mathrm{tr}[\hat{\alpha}_\parallel^\mu] \\
&- \frac{1}{2g_\rho^2}\mathrm{tr}[\rho_{\mu\nu}\rho^{\mu\nu}] - \left(\frac{1}{4g_\omega^2} - \frac{1}{4g_\rho^2}\right)\mathrm{tr}[\omega_{\mu\nu}]\mathrm{tr}[\omega^{\mu\nu}]
\end{aligned}
$$

$$
\hat{\alpha}_\mu = \frac{1}{2i}(\partial_\mu\xi_R\xi_R^\dagger - \partial_\mu\xi_L\xi_L^\dagger)
$$

$$
V_\sigma = -\tfrac{1}{2}\bar{\mu}^2\sigma^2 + \tfrac{1}{4}\lambda\sigma^4 - \tfrac{1}{6}\lambda_6\sigma^6,
$$

$$
V_{\mathrm{SB}} = -\tfrac{1}{4}\bar{m}\epsilon\sigma\ \mathrm{tr}[U + U^\dagger].
$$

- σ の6点相互作用が付け加えられている

2. 核物質中の計算

- パリティ二重項模型による核物質の構築
  - メソンの平均場と核子の1ループにより核物質を構築
  - 真空に関するのインプットの表 [MeV]

m_+	m_-	m_ω	m_ρ	f_π	m_π
939	1535	783	776	92.3	140

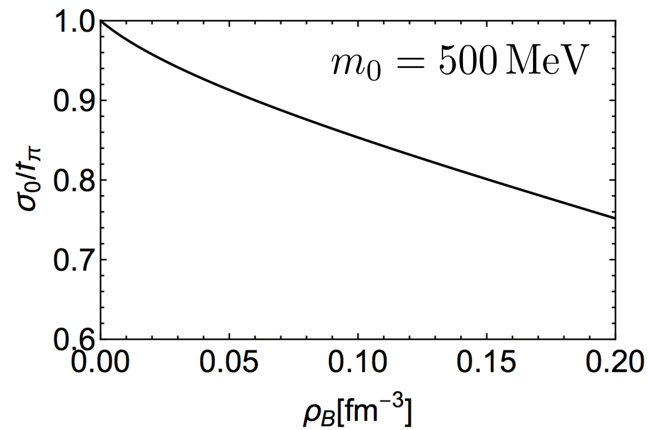
  - 核物質に関するインプットの表

$\rho_0(\mu_B^*)$ (fm^{-3})	$E/A(\mu_B^*) - m_+$ (MeV)	K (MeV)	E_{sym} (MeV)
0.16	-16	240	31

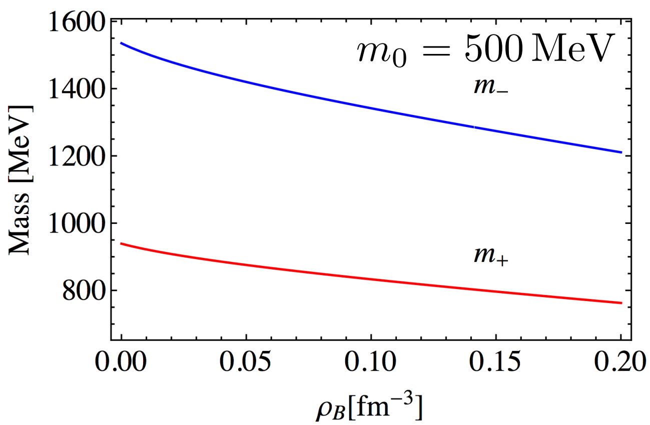
- パリティ二重項模型で核物質の性質を再現可能
- カイラル不変質量 m_0 のみフリーパラメーター

2. 核物質中の計算

- **結果**
  - 核物質中でのカイラル対称性



σ_0の密度依存性



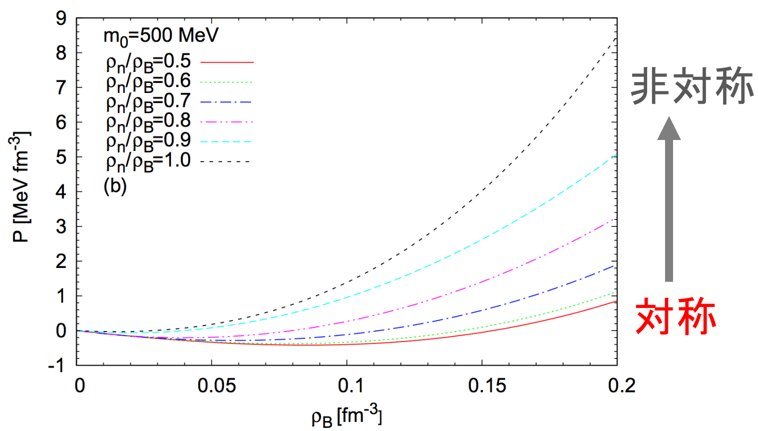
m_+, m_-の密度依存性

– 密度が上がるとσ_0が小さくなり、m_+とm_-の差が小さくなる（カイラル対称性の部分的回復）

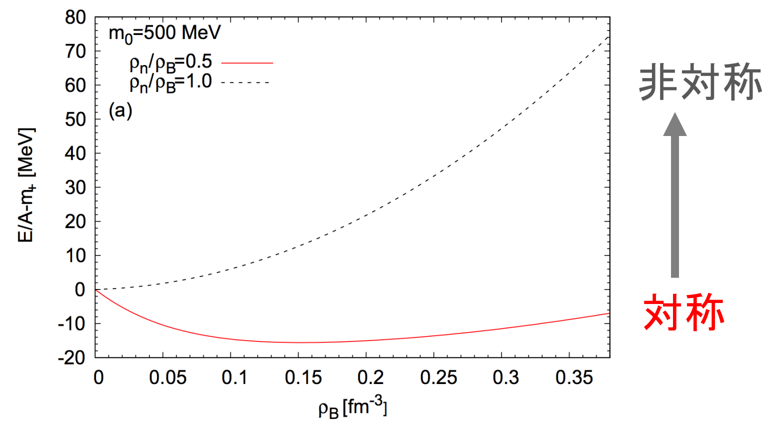
2. 核物質中の計算

- **結果**
  - 非対称核物質 $(n_p \neq n_n)$ における結果

Y. Motohiro, Y. Kim, M. Harada, PRC92, 025201 (2015)



圧力の密度依存性



束縛エネルギーの密度依存性

- 飽和する密度を直接のインプットにしていないが $\rho \approx 0.16\,\mathrm{fm}^{-3}$ で束縛エネルギーが最小値をとる

2. 核物質中の計算

- **議論**
  - 有限体積の核物質(＝原子核)における密度のr依存性$\rho_B(r)$やスピン・軌道相互作用（LS力）の強さはどうなる？

- 現在計算中（今は見せられませんが良い感じになりそうです）

- 真空での$N^-(1535)$の崩壊幅や$N^+(939)$の軸性電荷は？

- 微分結合を入れれば解決する
  (平均場近似を用いた核物質の結果は変わらない)

2. 核物質中の計算

- **パリティ二重項模型の改良**
  - 高次と思われる微分結合を入れる

$$\mathcal{L}_\partial = -ih_1\left[\bar{\psi}_{1l}(M\partial\!\!\!/ M^\dagger - \partial\!\!\!/ M M^\dagger)\psi_{1l} + \bar{\psi}_{1r}(M^\dagger \partial\!\!\!/ M - \partial\!\!\!/ M^\dagger M)\psi_{1r}\right]$$
$$\quad - ih_2\left[\bar{\psi}_{2r}(M\partial\!\!\!/ M^\dagger - \partial\!\!\!/ M M^\dagger)\psi_{2r} + \bar{\psi}_{2l}(M^\dagger \partial\!\!\!/ M - \partial\!\!\!/ M^\dagger M)\psi_{2l}\right]$$

$$M = \sigma U$$

  - カイラルシングレットの η メソンを付け加える

$$\mathcal{L}_\eta = \frac{1}{2}\partial_\mu\eta\partial^\mu\eta - \frac{m_\eta^2}{2}\eta^2 + g_{N^+N^-\eta}\bar{N}^-\eta N^+ + g^*_{N^+N^-\eta}\bar{N}^+\eta N^-$$

  - 追加されたパラメーターに対するインプット

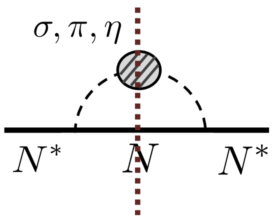
$$\Gamma[N^- \to N^+\pi] = \Gamma[N^- \to N^+\eta] \approx 75\,\mathrm{MeV}$$
$$g_A^{N^+} \approx 1.27$$

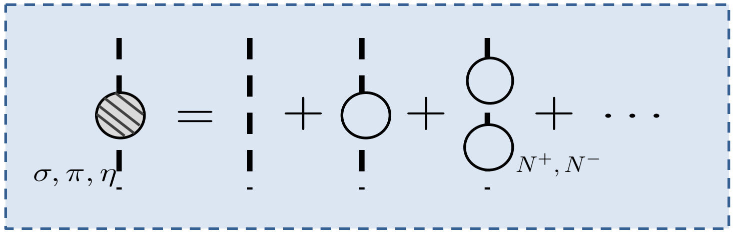
2. 核物質中の計算

- **核物質中での $N^-(1535)$ の崩壊幅**
  - カイラル対称性を尊重しながら計算する

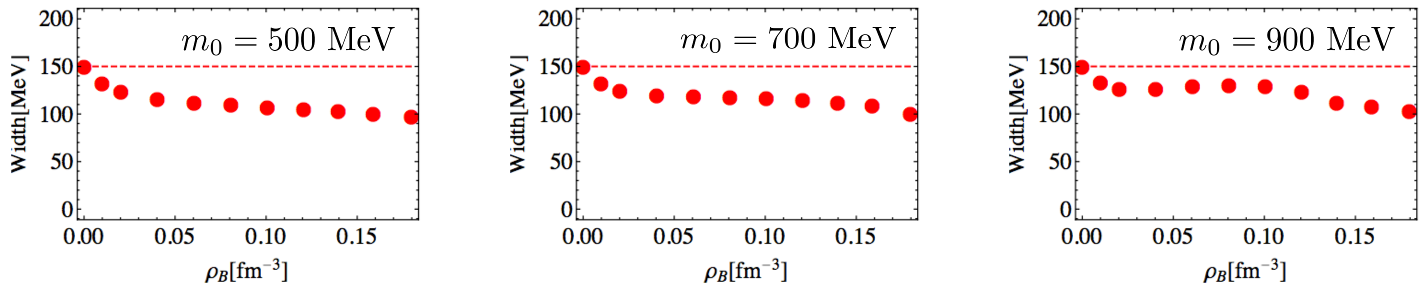
D. Suenaga, 1704:03630

$\Gamma^*_{\mathrm{tot}} \sim$





  - 結果



- ブロードニングは起こらず、むしろ崩壊幅は小さくなった
  (核物質中でのカイラル対称性の回復を見るプローブに？)

2. 核物質中の計算

- **核物質中での $\bar{D}$ 中間子を用いた m_0 の値の探求**
  - 互いにカイラルパートナーである $\bar{D}(0^-)$ と $\bar{D}_0^*(0^+)$ を考える

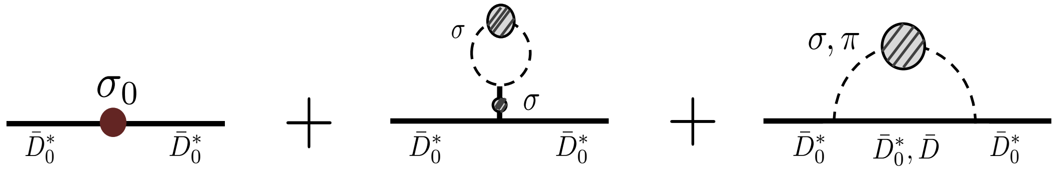
$$M_{\bar{D}_0^*} = a_D + b_D\sigma_0$$
$$M_{\bar{D}} = a_D - b_D\sigma_0$$

M. A. Nowak, M. Rho, and I. Zahed, PRD 48 (1993)
W. A. Bardeen and C. T. Hill, PRD 49 (1994).

  - パリティ二重項模型で構築した核物質中での、$\bar{D}_0^*(0^+)$ の自己エネルギーを計算

D.Suenaga, S. Yasui, M. Harada, PRC96. 015204 (2017)

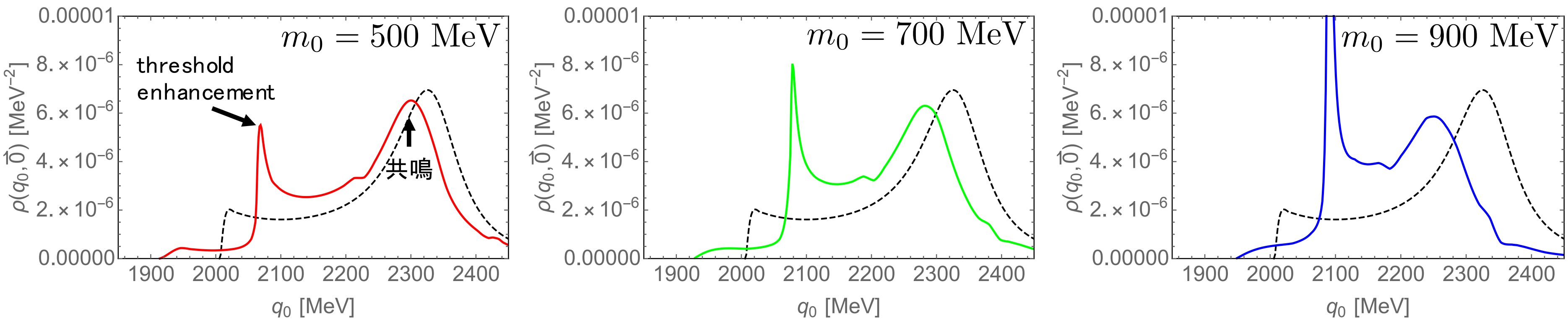
$$\Sigma^*_{\bar{D}_0^*}(q) =$$



平均場　Hartree型1ループ　Fock型1ループ

2. 核物質中の計算

- **結果**
  - $\rho_B = 0.16\,\mathrm{fm}^{-3}$ における $\bar{D}_0^*(0^+)$ のスペクトル関数



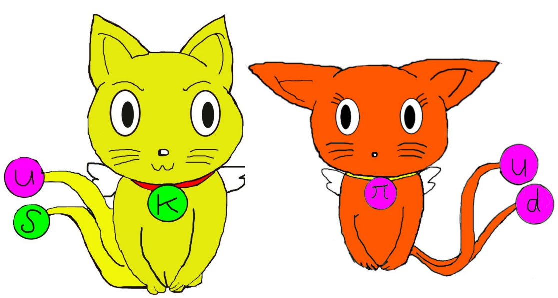
> - $\bar{D}_0^*(0^+)$ 共鳴の位置は m_0 が大きいほど左に移動し、threshold enhancementの位置は逆に右に移動し、鋭く高く立つ
> - 核物質中でのカイラル対称性の回復と m_0 の値を知るために特にthreshold enhancementが良いプローブになる！？

目次

3. まとめ

- まとめ
  - 核子の質量は「カイラル対称性の自発的破れ」で説明される
  - 「パリティ二重項模型」は核物質の性質を説明可能な模型であるが、「カイラル不変質量 m_0」の値は不明
  - m_0 は、我々の質量の起源にも関わる重要な物理量である
  - 核物質中でのカイラル対称性の回復や m_0 の値を知るために $N^-(1535)$ や $\bar{D}_0^*(0^+)$ が良いプローブとなり得る

ありがとうございました

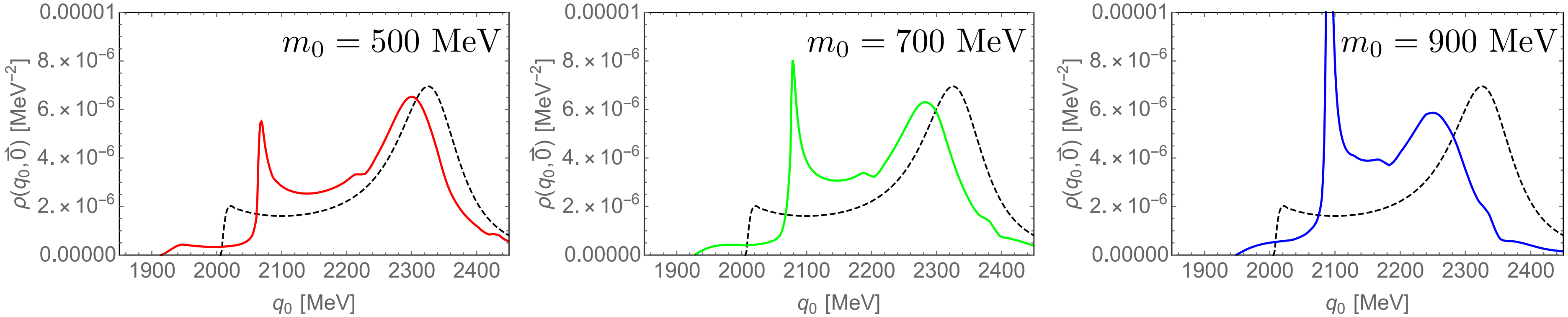


ケイにゃん パイにゃん

Back up

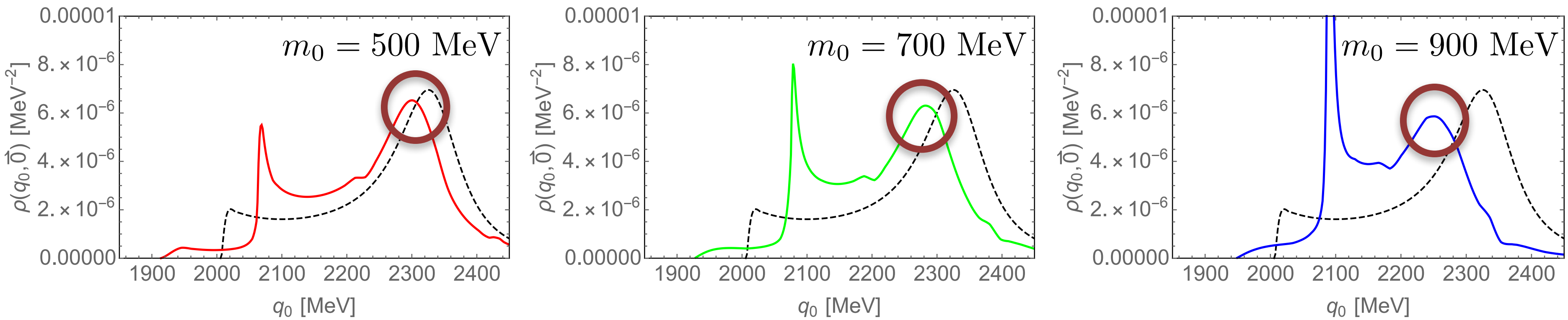
1. イントロダクション

- **結果**
  - $\rho_B = 0.16\,\mathrm{fm}^{-3}$ における $\bar{D}_0^*(0^+)$ のスペクトル関数



– 点線が真空でのスペクトル関数を表し、色線が結果を表す

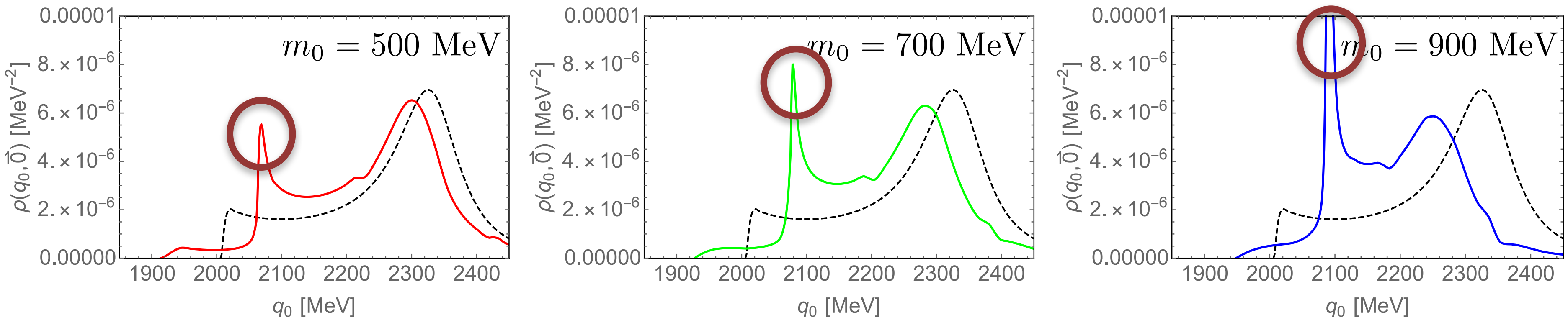
- **結果**
  - $\rho_B = 0.16\,\mathrm{fm}^{-3}$ における $\bar{D}_0^*(0^+)$ のスペクトル関数



- $\bar{D}_0^*(0^+)$ 共鳴の位置は、m_0 が大きいほど左に移動する
（ m_0 が大きいほどカイラル対称性の回復が早いことに対応）

1. イントロダクション

- **結果**
  - $\rho_B = 0.16\,\mathrm{fm}^{-3}$ における $\bar{D}_0^*(0^+)$ のスペクトル関数



- Threshold enhancementの位置は、m_0 が大きいほど右に移動し、鋭く高くなる
- 核物質中でのカイラル対称性の回復を見るプローブ、さらにカイラル不変質量 m_0 の値を知る良いプローブにも！？