物理学会 第70回年次大会(2015年)@早稲田大学
講演番号: 22aCB-5

強い磁場中でのハドロン質量

arXiv: 1412.6877

田屋 英俊 (東大総文, 東大理)

強い磁場

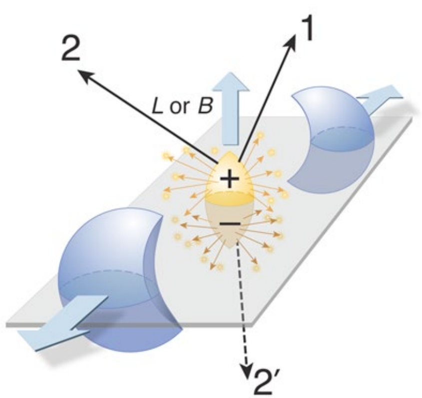
❶ 温度/密度以外の極限状態におけるハドロン物理

強い磁場

❶ 温度/密度以外の極限状態におけるハドロン物理

❷ 現実世界に**存在**する可能性？

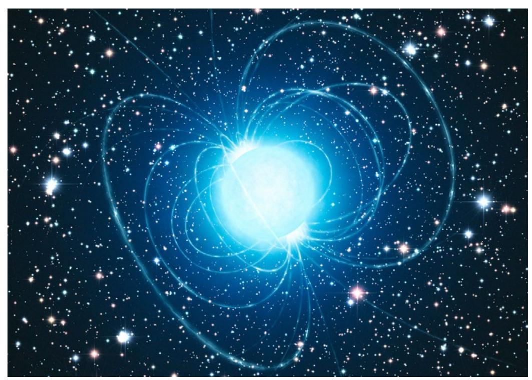
例1 重イオン衝突



$eB \sim 10^{18-20}\mathrm{G}$
$\sim (1\text{-}10 \times \Lambda_{\mathrm{QCD}})^2$

Kharzeev, McLerran, Warringa (2007)
Skokov, Illarionov, Toneev (2009)
Deng, Huang (2012)

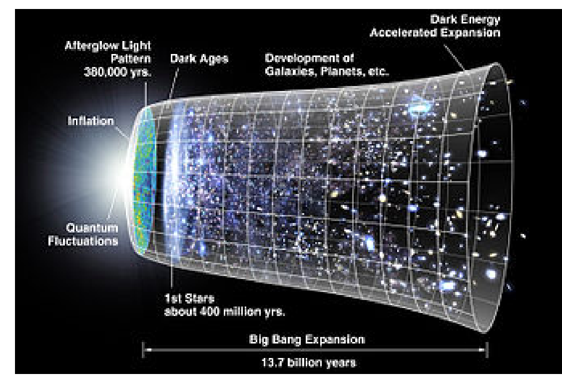
例2 中性子星の内部



$eB \lesssim 10^{20}\mathrm{G}$
$\sim (10 \times \Lambda_{\mathrm{QCD}})^2$

Ferrer, Incera, Keith, Portillo, Springsteen (2010)

例3 初期宇宙(電弱相転移)



$eB \sim 10^{23}\mathrm{G}$
$\sim (100 \times \Lambda_{\mathrm{QCD}})^2$

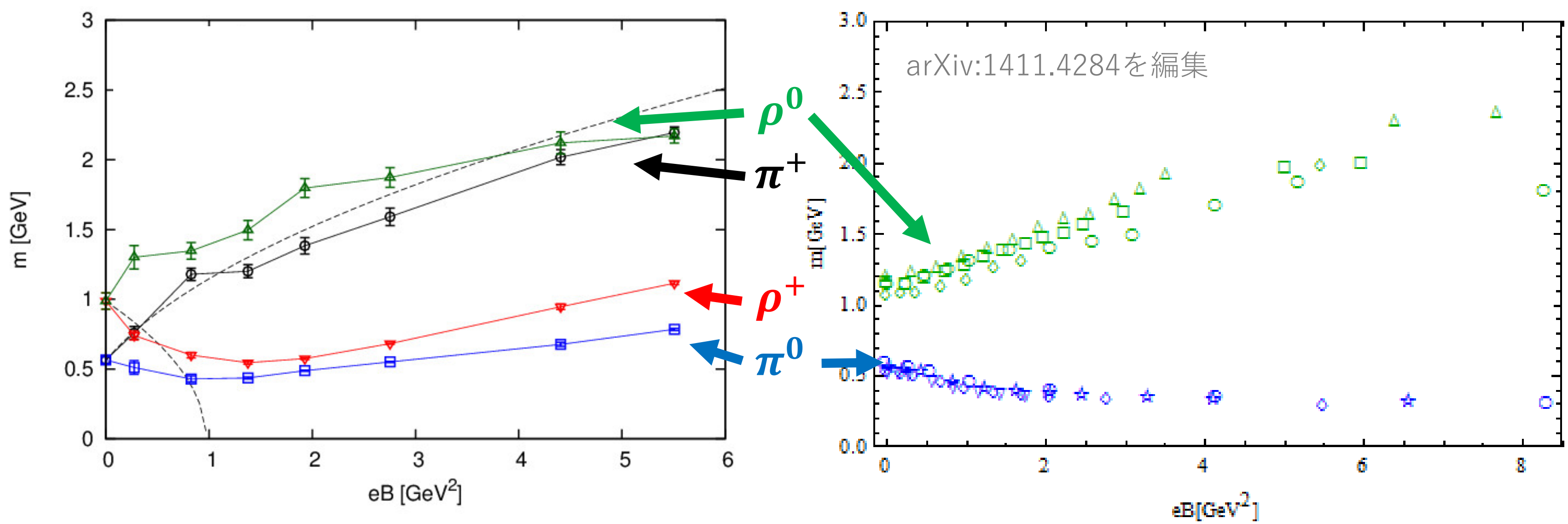
Vachaspati (1991)
Enqvist, Olesen (1993)

軽いメソン(π , ρ)の質量

導入 → 理論 → 結果 → まとめ

(↓中性粒子のみ)

Hidaka, Yamamoto (2013)　　Luschevskaya, Teryaev, Kochetkov (2014)



ρ^0, π^+ : $\sqrt{eB}$ で増える
ρ^+, π^0 : **弱い** 依存性

$\rho^0 \sim \pi^+ > \rho^+ \sim \pi^0$

✕ ハドロン有効模型では再現できない　Chernodub (2010)

✕ 物理的起源は不明

これから議論すること

❶ 格子の結果を物理的に説明する模型の構築

❷ さまざまなハドロン質量の計算

これから議論すること

❶ 格子の結果を物理的に説明する模型の構築

❷ さまざまなハドロン質量の計算

「物理」として何が重要か？

❶ クォークの自由度

「物理」として何が重要か？

❶ **クォークの自由度**

❷ **SU(6)=SU(3)$_{\text{flavor}}$⊗SU(2)$_{\text{spin}}$ 対称性の破れ**

弱い磁場

Gell-Mann (1964) Zweig (1964)
DeRujula, Georgi, Glashow (1975)

SU(6)対称性

$$M_{u\uparrow} = M_{u\downarrow} = M_{d\uparrow} = M_{d\downarrow} = M_{s\uparrow} = M_{s\downarrow}$$

強い磁場

Landau準位の形成 ➡ ~~SU(6)対称性~~

$$M_{u\uparrow} = M_{u\downarrow} = M_{d\uparrow} = M_{d\downarrow} = M_{s\uparrow} = M_{s\downarrow}$$

「物理」として何が重要か？

❶ クォークの自由度

❷ SU(6)=SU(3)$_{\text{flavor}}$⊗SU(2)$_{\text{spin}}$ 対称性の破れ

弱い磁場

Gell-Mann (1964) Zweig (1964)
DeRujula, Georgi, Glashow (1975)

SU(6)対称性

$$M_{u\uparrow} = M_{u\downarrow} = M_{d\uparrow} = M_{d\downarrow} = M_{s\uparrow} = M_{s\downarrow}$$

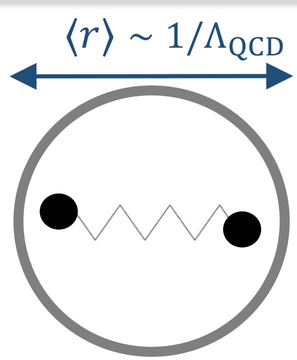
強い磁場

Landau準位の形成 ➡ ~~SU(6)対称性~~

$$M_{u\uparrow} = M_{u\downarrow} = M_{d\uparrow} = M_{d\downarrow} = M_{s\uparrow} = M_{s\downarrow}$$

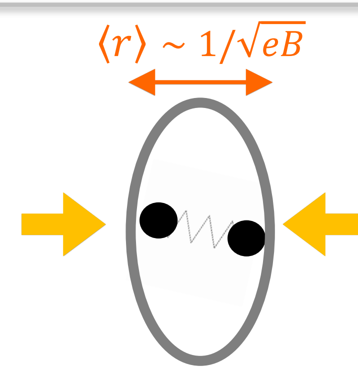
❸ ハドロン体積の縮小(閉じ込めポテンシャル)

弱い磁場



$\Delta V_{閉じ込め} \sim \sigma \langle r \rangle$

強い磁場



模型

模型

電荷 磁場

1粒子Hamiltonian $\begin{cases} H(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{\alpha} \cdot (-i\boldsymbol{\nabla} - q\boldsymbol{A}) + \beta\, V(\boldsymbol{r}) \\ V(\boldsymbol{r}) = \sqrt{m^2 + \sigma^2\, \boldsymbol{r}^2} \end{cases}$ に従う**クォーク模型。**

カレント質量 **線形な閉じ込め**

Dirac方程式$H\psi = E\psi$を解いて求まる最低エネルギー固有値Mを用いて、**ハドロンの基底状態を正しく構成**し、ハドロンの質量$M_{\mathrm{Hadron}} = \sum M_{\mathrm{quark}}$を求める。

模型

模型

電荷 磁場

1粒子Hamiltonian $\begin{cases} H(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{\alpha}\cdot(-i\boldsymbol{\nabla} - q\boldsymbol{A}) + \beta\, V(\boldsymbol{r}) \\ V(\boldsymbol{r}) = \sqrt{m^2 + \sigma^2\, \boldsymbol{r}^2} \end{cases}$ に従う**クォーク模型。**

カレント質量　**線形な閉じ込め**

Dirac方程式$H\psi = E\psi$を解いて求まる最低エネルギー固有値Mを用いて、**ハドロンの基底状態を正しく構成**し、ハドロンの質量$M_{\mathrm{Hadron}} = \sum M_{\mathrm{quark}}$を求める。

▶ ハドロンの基底状態

$$M(B) = \sqrt{m^2 + \sigma + 2\sqrt{\sigma^2 + (qB/2)^2} - sqB} \sim \begin{cases} \sqrt{m^2 + \sigma + 2|qB|} & sq < 0 \\ \sqrt{m^2 + \sigma} & sq > 0 \end{cases} \Longrightarrow M_{sq<0} > M_{sq>0}$$

❶ ハドロンの基底状態は$sq > 0$のクォークの数が最大となるよう構成される

❷ $sq < 0$のクォークがあると、$\sqrt{2|qB|}$でハドロン質量は増える

模型

模型

1粒子Hamiltonian
$$\begin{cases} H(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{\alpha}\cdot(-i\boldsymbol{\nabla} - \overset{\text{電荷}}{q}\overset{\text{磁場}}{\boldsymbol{A}}) + \beta\, V(\boldsymbol{r}) \\ V(\boldsymbol{r}) = \sqrt{\underbrace{m^2}_{\text{カレント質量}} + \underbrace{\sigma^2\,\boldsymbol{r}^2}_{\text{線形な閉じ込め}}} \end{cases}$$
に従う**クォーク模型。**

Dirac方程式$H\psi = E\psi$を解いて求まる最低エネルギー固有値Mを用いて、**ハドロンの基底状態を正しく構成**し、ハドロンの質量$M_{\mathrm{Hadron}} = \sum M_{\mathrm{quark}}$を求める。

▶ ハドロンの基底状態

$$M(B) = \sqrt{m^2 + \sigma + 2\sqrt{\sigma^2 + (qB/2)^2} - sqB} \sim \begin{cases} \sqrt{m^2 + \sigma + 2|qB|} & sq < 0 \\ \sqrt{m^2 + \sigma} & sq > 0 \end{cases} \Rightarrow M_{sq<0} > M_{sq>0}$$

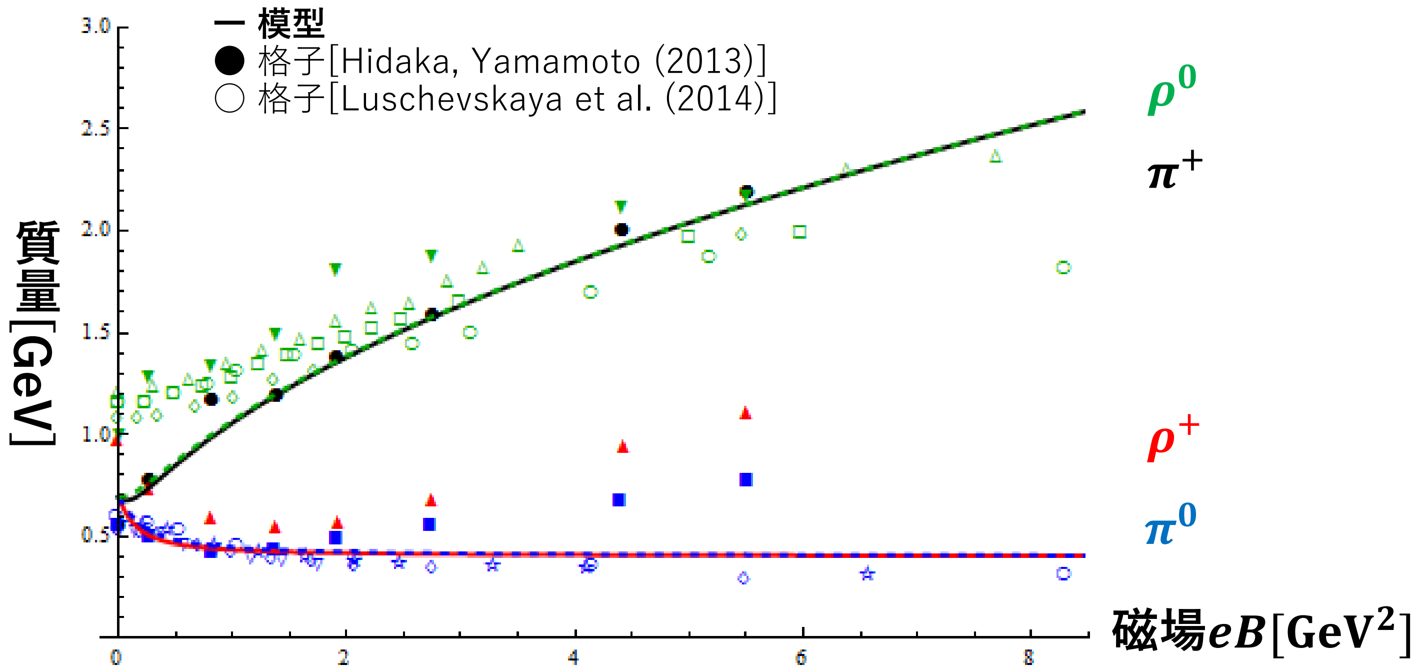
❶ ハドロンの基底状態は$sq > 0$のクォークの数が最大となるよう構成される

❷ $sq < 0$のクォークがあると、$\sqrt{2|qB|}$でハドロン質量は増える

例) ρ^+ 中間子 $u\downarrow \bar{d}\downarrow$ $\dfrac{u\downarrow \bar{d}\uparrow \pm u\uparrow \bar{d}\downarrow}{\sqrt{2}}$ $u\uparrow \bar{d}\uparrow$

軽いメソン：格子との比較

導入　→　理論　→　**結果**　→　まとめ



ρ^0, π^+： $\sqrt{eB}$ で増える
ρ^+, π^0： **弱い** 依存性

$\rho^0 \sim \pi^+ > \rho^+ \sim \pi^0$

ρ^0, π^+は$sq < 0$となる$\bar{d}\uparrow$を含むが、ρ^+, π^0は、すべて$sq > 0$

これから議論すること

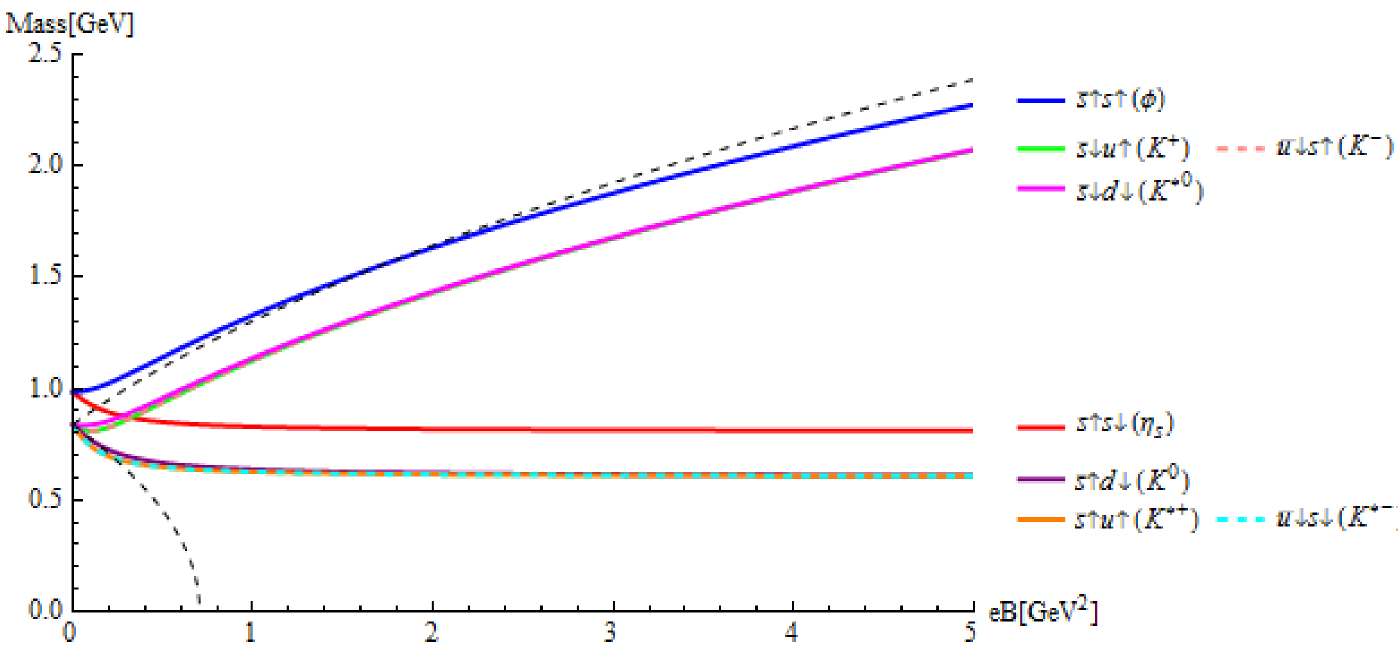
❶ 格子の結果を物理的に説明する模型の構築

❷ さまざまなハドロン質量の予言

他のハドロン

導入 → 理論 → **結果** → まとめ

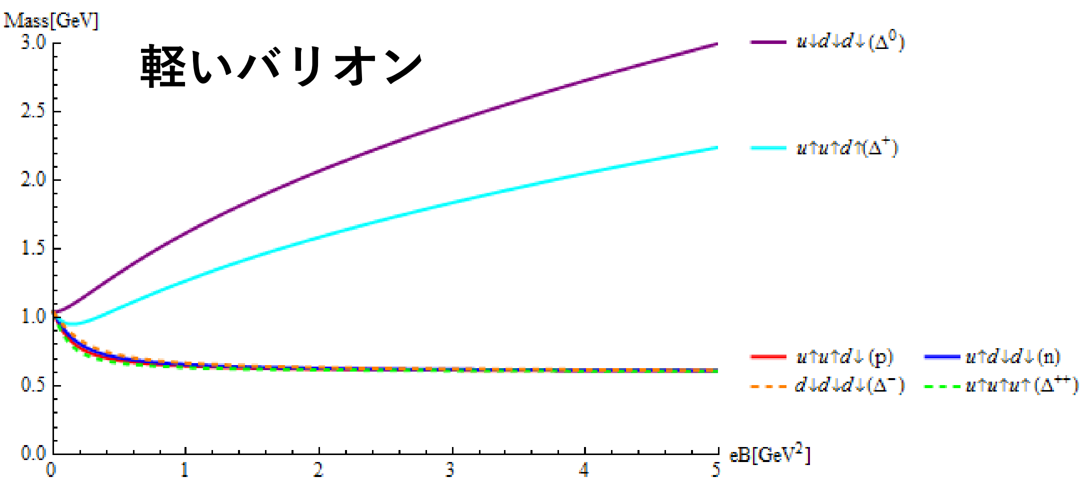
❶ ストレンジネスがあるメソン



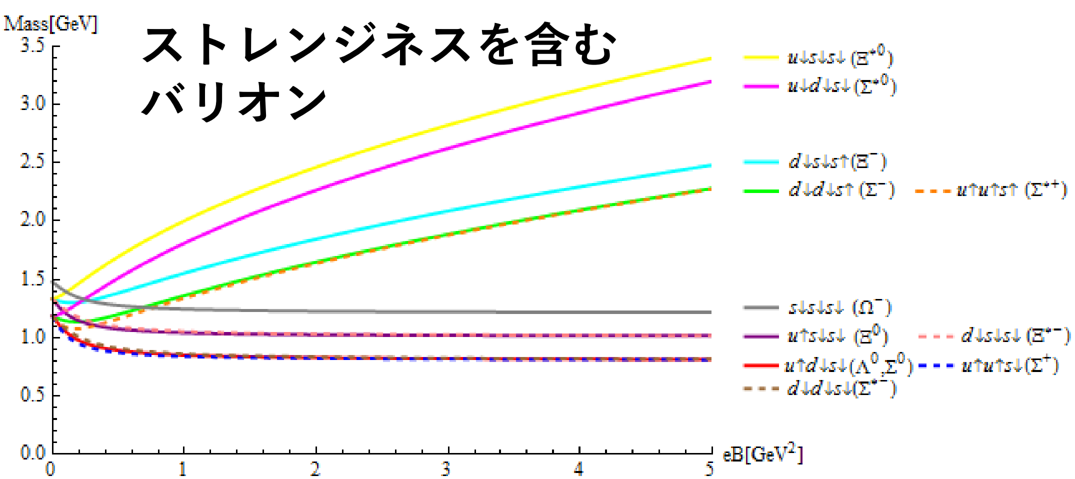
$$\boldsymbol{\phi} \gtrsim \boldsymbol{K^{\pm}}, \mathbf{K^{*0}} > \boldsymbol{\eta} \gtrsim \boldsymbol{K^0}, \boldsymbol{K^{*\pm}}$$

他のハドロン

❷ バリオン



$$\Delta^0 > \Delta^+ > p, n, \Delta^-, \Delta^{++}$$



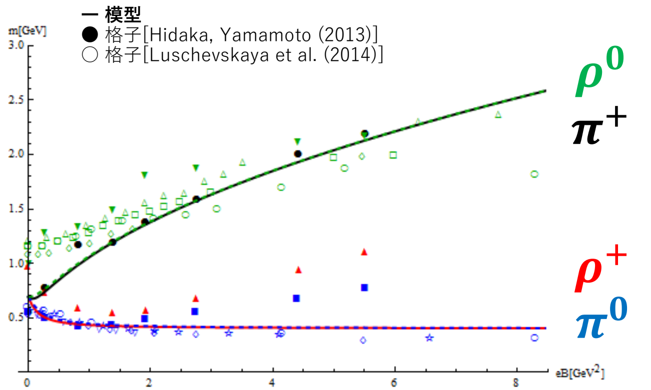
$$\Xi^{*0} \gtrsim \Sigma^{*0}$$
$$> \Xi^- \gtrsim \Sigma^-, \Sigma^{*+}$$
$$> \Omega^- \gtrsim \Xi^0, \Xi^{*+}$$
$$\gtrsim \Lambda^0, \Sigma^0, \Sigma^*, \Sigma^{*-}$$

まとめ

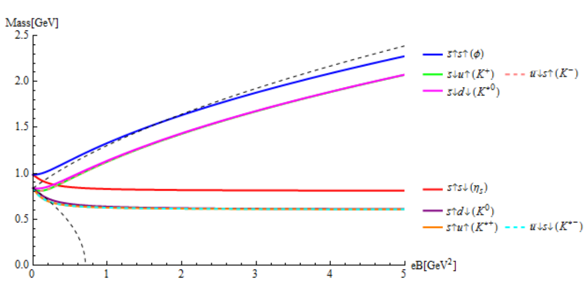
導入 → 理論 → 結果 → **まとめ**

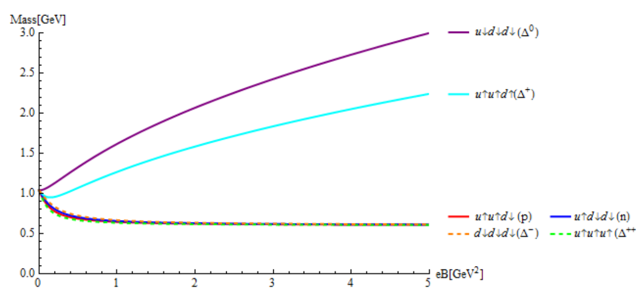
強い磁場中でのハドロン質量を議論した。

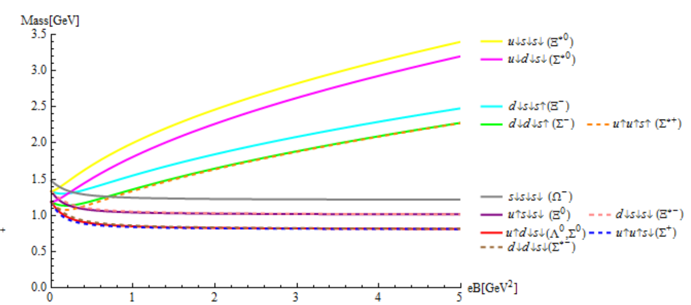
- 『クォークの自由度』『SU(6)=SU(3)flavor⊗SU(2) spin 対称性の破れ』『ハドロン体積の縮小(閉じ込めポテンシャル)』を取り込んだ模型が格子の結果を自然に説明できる。



- 軽いメソン以外の、バリオンやストレンジネスを含むハドロンの質量を計算した。







詳細は[arXiv:1412.6877]

補足

Squeezing of quarks

$$\rho = |N|^2 \mathrm{e}^{-\sqrt{(qB/2)^2+\sigma_\perp^2}\,r^2} \mathrm{e}^{-\sigma_\parallel z^2}$$
$$\times \left[1 + \frac{(\sqrt{(qB/2)^2+\sigma_\perp^2} - qBs/2)^2 r^2 + \sigma_\parallel^2 z^2}{(M + \sqrt{m^2 + \sigma_\perp^2 r^2 + \sigma_\parallel^2 z^2})^2} \right]$$

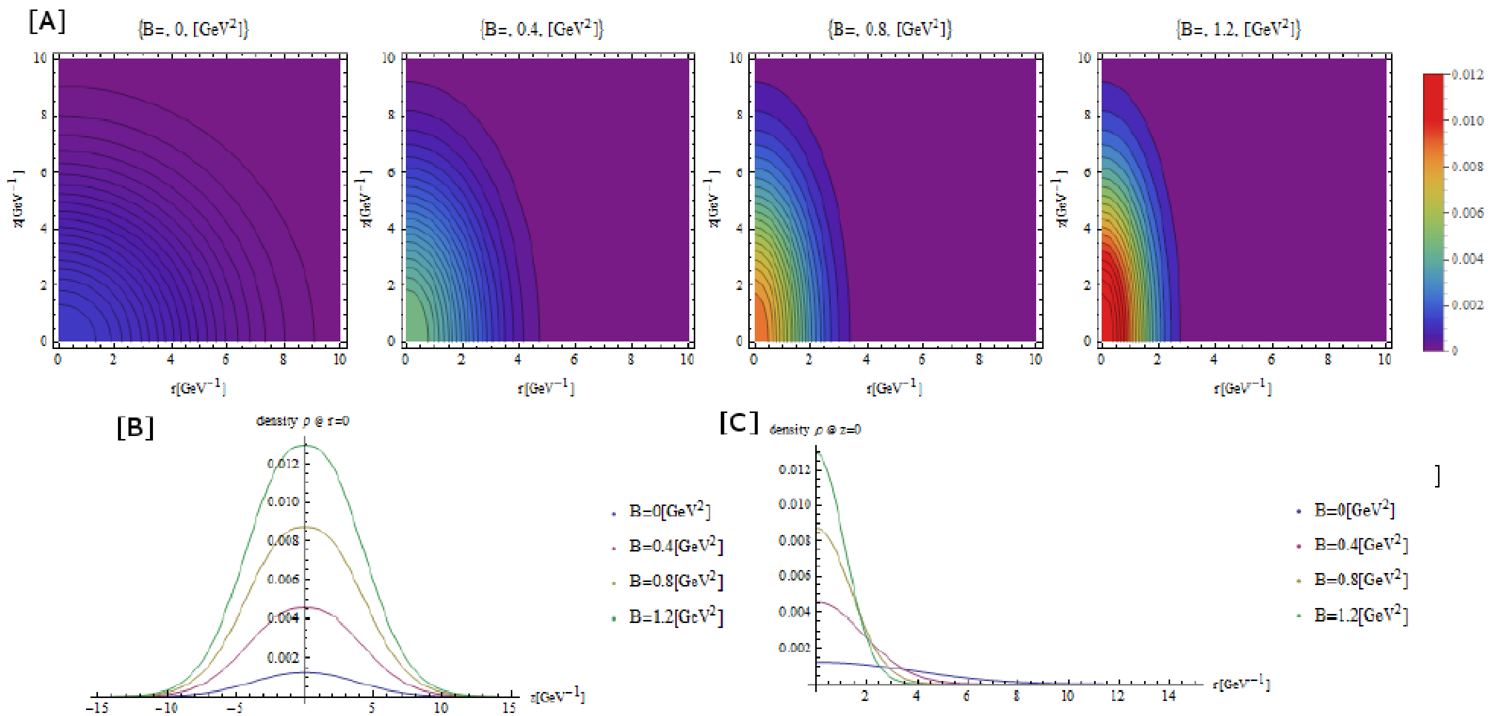
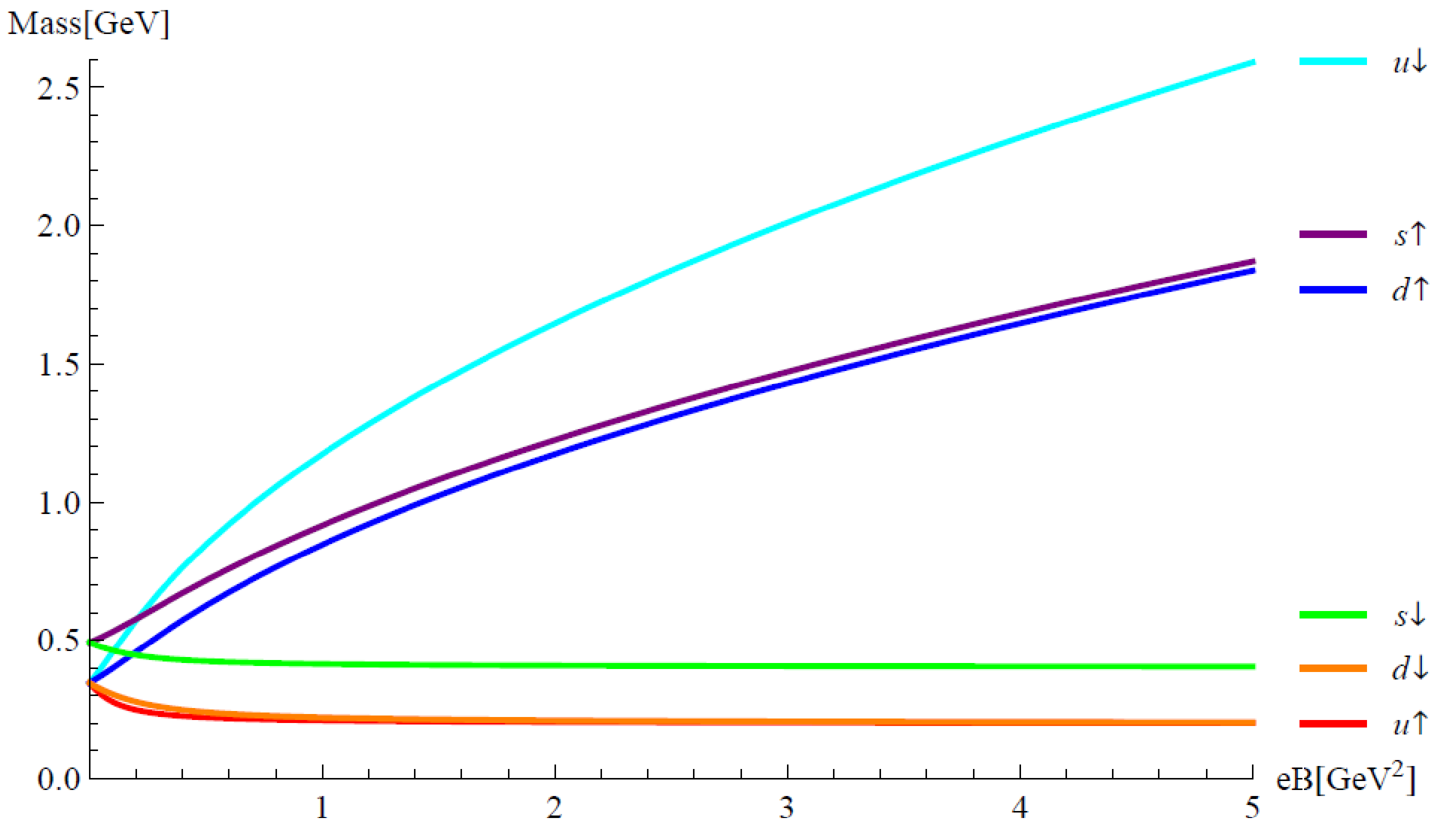


図 41: Plots of density ρ of $u\uparrow$ quark at various magnetic field strength $B = 0, 0.4, 0.8, 1.2\mathrm{GeV}^2$. [A]contour plot in terms of r, z, [B]z-dependence at $r = 0$, [C]r-dependence at $z = 0$.

クォーク質量



$$M(B) = \sqrt{m^2 + \sigma + 2\sqrt{\sigma^2 + (qB/2)^2} - qBs}$$

$$m_u = m_d = 0\text{MeV} \quad m_s = 350\text{MeV} \qquad \sigma = (200\text{MeV})^2$$

ハドロンの基底状態

Meson	Quarks
π^0	$u\uparrow\bar{u}\downarrow,\ d\downarrow\bar{d}\uparrow$
π^+	$u\uparrow\bar{d}\downarrow$
π^-	$d\uparrow\bar{u}\downarrow$
η	$u\uparrow\bar{u}\downarrow,\ d\downarrow\bar{d}\uparrow,\ s\downarrow\bar{s}\uparrow$
η'	$u\uparrow\bar{u}\downarrow,\ d\downarrow\bar{d}\uparrow,\ s\downarrow\bar{s}\uparrow$
K^0	$d\downarrow\bar{s}\uparrow$
$\bar{K}^0$	$s\downarrow\bar{d}\uparrow$
K^+	$u\uparrow\bar{s}\downarrow$
K^-	$s\uparrow\bar{u}\downarrow$
ρ^0	$d\uparrow\bar{d}\uparrow,\ d\downarrow\bar{d}\downarrow$
ρ^+	$u\uparrow\bar{d}\uparrow$
ρ^-	$d\downarrow\bar{u}\downarrow$
ω	$d\uparrow\bar{d}\uparrow,\ d\downarrow\bar{d}\downarrow$
ϕ	$s\uparrow\bar{s}\uparrow,\ s\downarrow\bar{s}\downarrow$
K^{*0}	$d\downarrow\bar{s}\downarrow$
$\bar{K}^{*0}$	$s\uparrow\bar{d}\uparrow$
K^{*+}	$u\uparrow\bar{s}\uparrow$
K^{*-}	$s\downarrow\bar{u}\downarrow$

Baryon	Quarks
p	$u\uparrow u\uparrow d\downarrow$
n	$u\uparrow d\downarrow d\downarrow$
Λ	$u\uparrow d\downarrow s\downarrow$
Σ^+	$u\uparrow u\uparrow s\downarrow$
Σ^0	$u\uparrow d\downarrow s\downarrow$
Σ^-	$d\downarrow d\downarrow s\uparrow$
Ξ^0	$u\uparrow s\downarrow s\downarrow$
Ξ^-	$d\downarrow s\downarrow s\uparrow$
Δ^{++}	$u\uparrow u\uparrow u\uparrow$
Δ^+	$u\uparrow u\uparrow d\uparrow$
Δ^0	$u\downarrow d\downarrow d\downarrow$
Δ^-	$d\downarrow d\downarrow d\downarrow$
Σ^{*+}	$u\uparrow u\uparrow s\uparrow$
Σ^{*0}	$u\downarrow d\downarrow s\downarrow$
Σ^{*-}	$d\downarrow d\downarrow s\downarrow$
Ξ^{*0}	$u\downarrow s\downarrow s\downarrow$
Ξ^{*-}	$d\downarrow s\downarrow s\downarrow$
Ω^-	$s\downarrow s\downarrow s\downarrow$

$$M(B) = \sqrt{m^2 + \sigma + 2\sqrt{\sigma^2 + (qB/2)^2} - sqB}$$

$$\sim \begin{cases} \sqrt{m^2 + \sigma + 2|qB|} & sq < 0 \\ \sqrt{m^2 + \sigma} & sq > 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad M_{sq<0} > M_{sq>0}$$

❶ ハドロンの基底状態は$sq > 0$のクォークの数が最大となるよう構成される

❷ $sq < 0$ のクォークがあると、$\sqrt{2|qB|}$でハドロン質量は増える

Short-range Interaction (SI)

$$\Delta M_{SI} = \frac{g^2}{2}\sum_{color}\int d^3x\, E\cdot E - \frac{g^2}{2}\sum_{color}\int d^3x\, B\cdot B$$

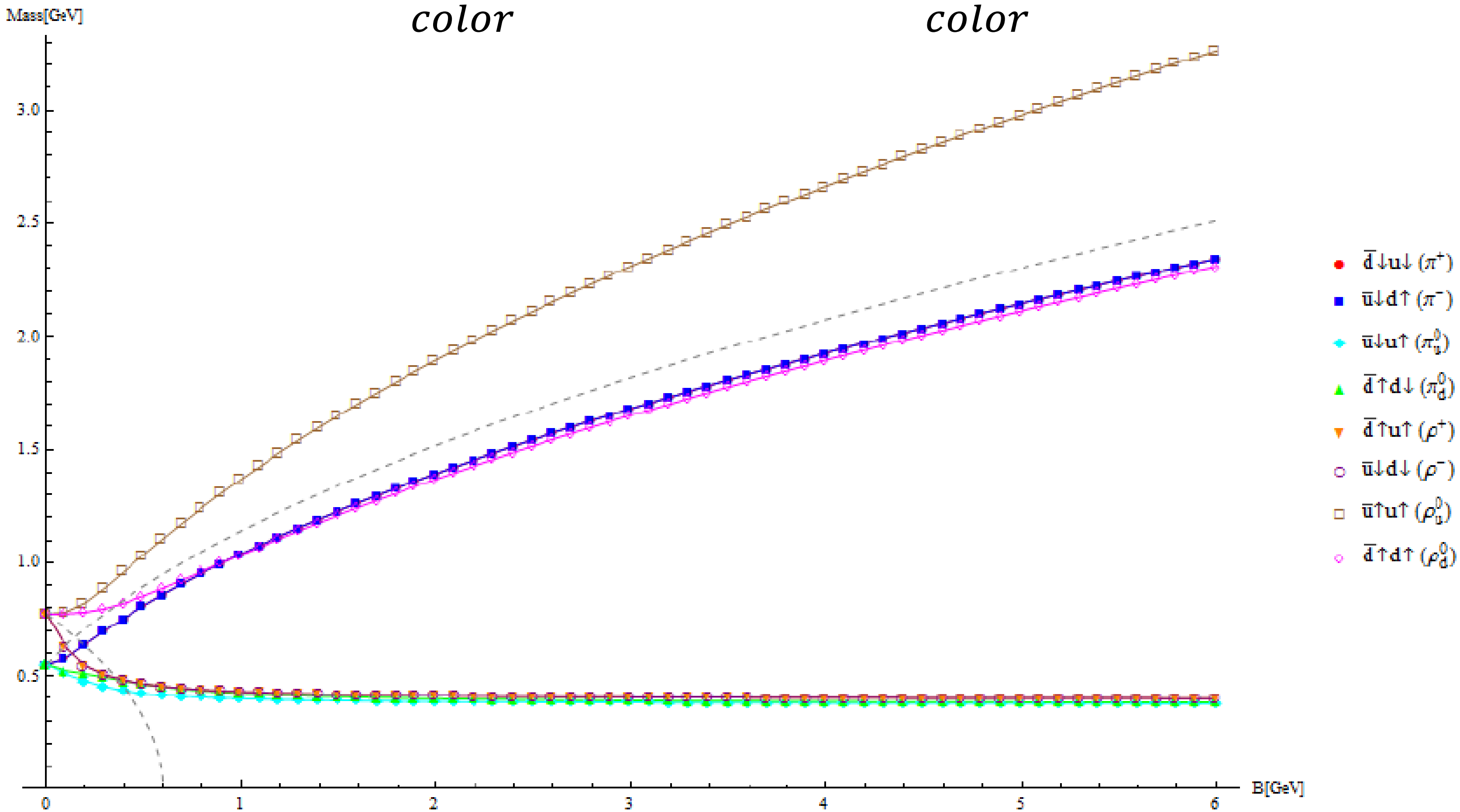


図 32: 相互作用を入れたときの軽いメソン

SI + Magnetic Catalysis

$$m \to \sqrt{m^2 + c\, qB}\ (c\text{: const})$$

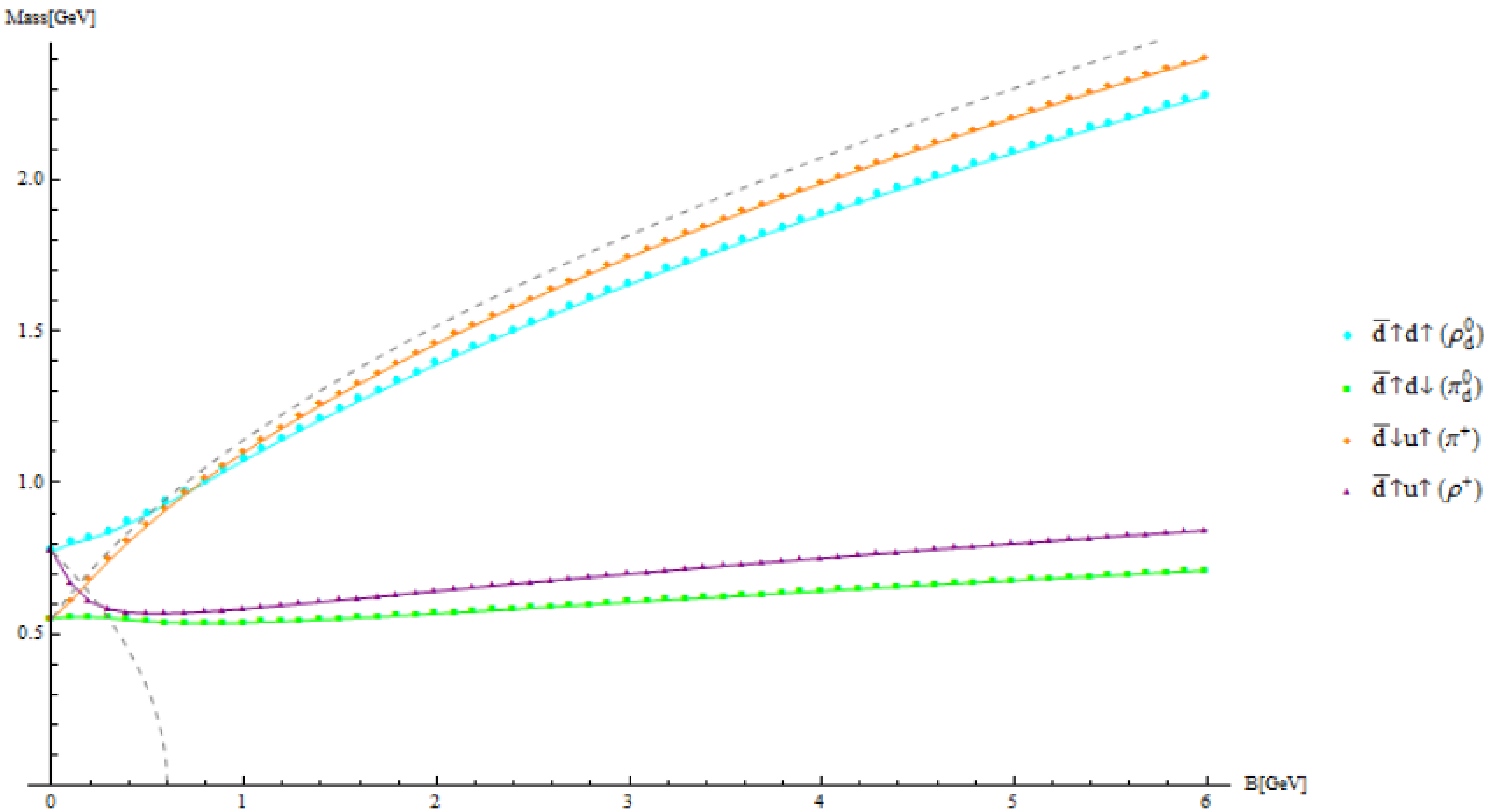


図 38: 相互作用と magnetic catalysis を入れたときの軽いメソン