強い磁場中でのハドロン質量

arXiv: 1412.6877

田屋 英俊（東大理）

1. 研究背景

背景1. なぜ『強い磁場』を考えるのか？

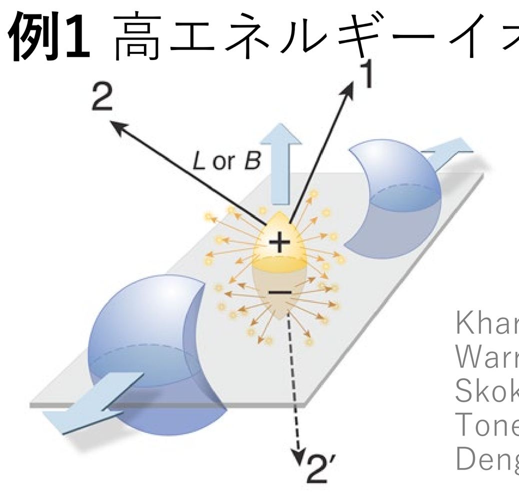
A1. 温度/密度以外の極限状態でのハドロン物理はどのように振る舞うのか？という**理論的興味**

A2. 現実世界に強い磁場が**存在する可能性**がある

A3. 符号問題がなく、**格子計算が実行でき、非自明な現象が発見**され始めている

例）(Inverse-)Magnetic Catalysis, qq-potentialの非対称性、
軽いメソンの非自明な磁場依存性 ...

例1 高エネルギーイオン衝突



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

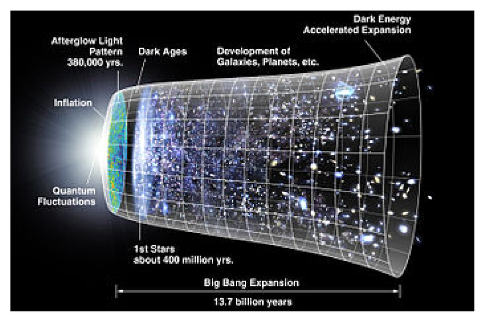
$eB \sim 10^{18-20}\mathrm{G}$
$\sim (1\text{-}10 \times \Lambda_{\mathrm{QCD}})^2$

例2 中性子星の内部

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

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

例3 初期宇宙(電弱相転移)



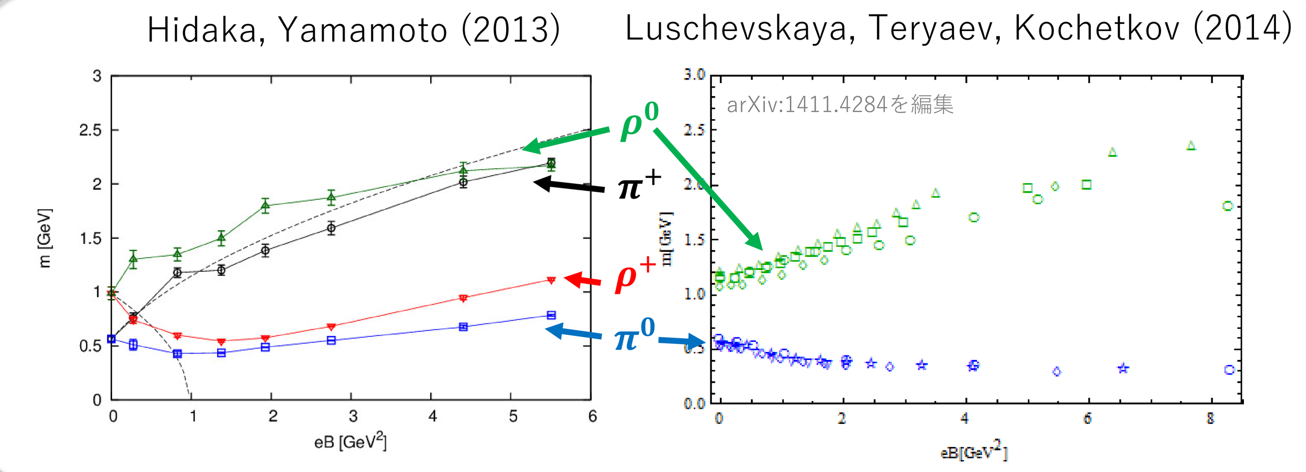
Vachaspati (1991)
Enqvist, Olesen (1993)

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

背景2. なぜ『ハドロン質量』を考えるのか？

A. 格子計算によれば、軽いメソン(π,ρ)の質量は**非自明な磁場依存性**を持つが、それがなぜか**よくわかっていない**

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



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

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

✕ ハドロン有効模型で再現できない　Chernodub (2010)
✕ 物理的な起源は不明

2. やりたいこと

① 格子の結果を**簡単に説明**する模型の構築

② 軽いメソン以外のまざまなハドロン質量の**予言**

3. 模型

模型が取り込まねばならない要素

1. クォークの自由度

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

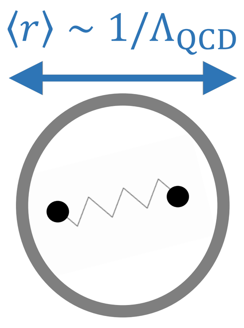
弱い磁場　ハドロンの基底状態は、SU(6)対称性: $M_{u\uparrow} = M_{u\downarrow} = M_{d\uparrow} = M_{d\downarrow} = M_{s\uparrow} = M_{s\downarrow}$を尊重するように構成される　Gell-Mann (1964) Zweig (1964)

強い磁場　クォークは磁場と結合し、**クォーク質量は電荷とスピンを通して、磁場に依存する**(Landau準位) i.e., SU(6)対称性は壊れて、$M_{u\uparrow} = M_{u\downarrow} = M_{d\uparrow} = M_{d\downarrow} = M_{s\uparrow} = M_{s\downarrow}$は成り立たない

3. ハドロン体積の縮小(閉じ込めポテンシャル)

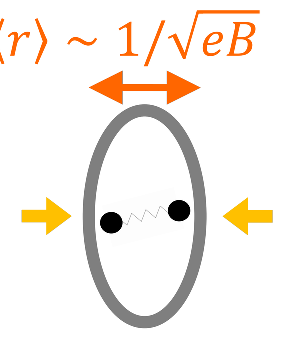
弱い磁場

$\langle r\rangle \sim 1/\Lambda_{\mathrm{QCD}}$



強い磁場

$\langle r\rangle \sim 1/\sqrt{eB}$



ハドロン内のクォークの運動は磁場により、横方向に強くsqueezeされる(ハドロン体積の減少)
⇒ **閉じ込めの質量への寄与 $\Delta V_{\text{閉じ込め}} \sim \sigma\langle r\rangle$ は減少**

具体的な模型

1粒子Hamiltonian

$$\begin{cases} H(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{\alpha}\cdot(-i\boldsymbol{\nabla} - q\boldsymbol{A}) + \beta\, V(\boldsymbol{r}) \\ V(\boldsymbol{r}) = \sqrt{m^2 + \sigma^2 \boldsymbol{r}^2},\ \boldsymbol{A} = \dfrac{Br}{2}\mathbf{e}_\theta \end{cases}$$

電荷　磁場　カレント質量　線形な閉じ込め

に従うクォークから構成される**クォーク模型**

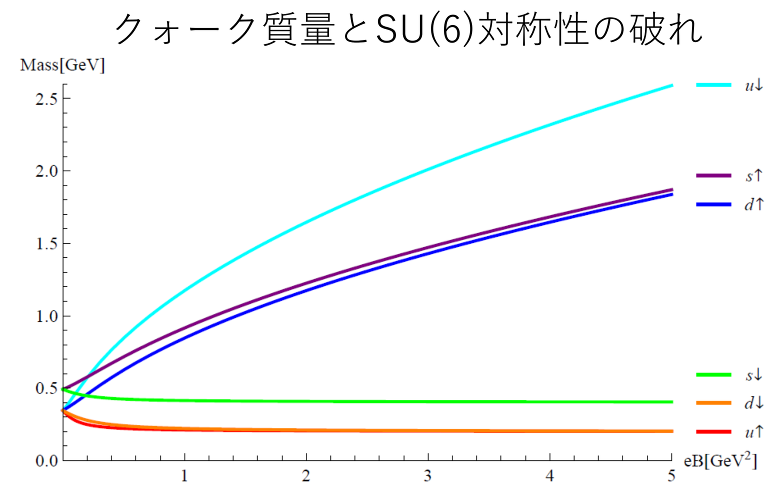
! この『クォーク模型』とは、「**クォークの従うDirac方程式$H\psi = E\psi$をちゃんと解き、その最低エネルギー固有値Mを用い、ハドロンの基底状態を正しく構成することで、ハドロンの質量$M_{Hadron} = \sum M_{quark}$を求める模型**」という意味

▶ **ハドロンの基底状態**

Dirac方程式から最低エネルギー固有値Mは

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

クォーク質量とSU(6)対称性の破れ



∴ **$qs < 0$のクォーク($\sqrt{2|qB|}$程度で質量が増える)の方が$qs > 0$のクォーク(磁場依存性は弱い)より重い**

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^-	$s\downarrow s\downarrow s\downarrow$

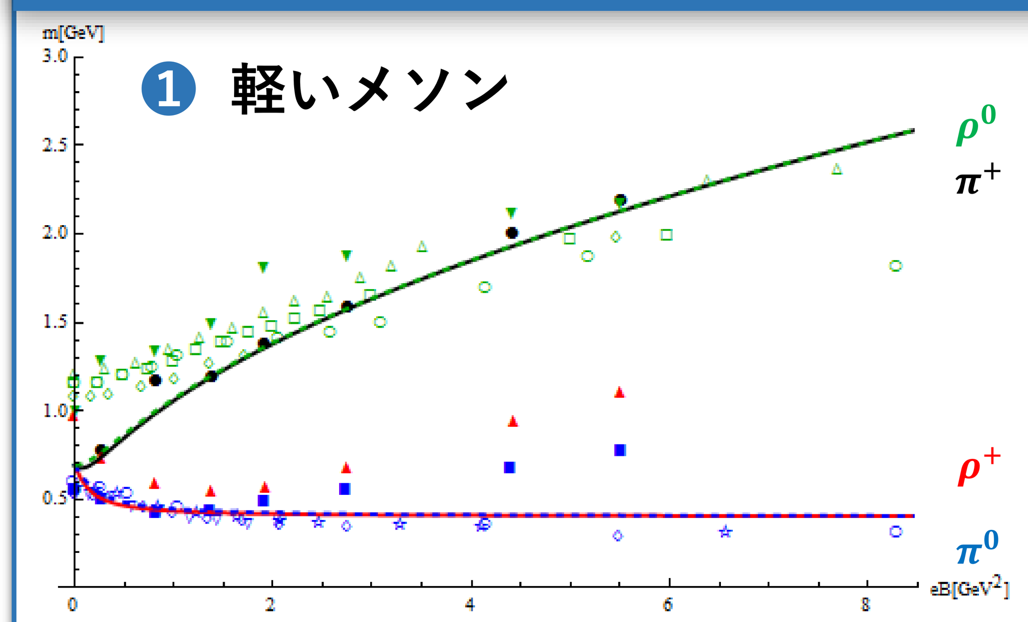
① **ハドロンの基底状態は、その量子数を満たし、$qs > 0$のクォークが最大限多くなるように構成される**
② **ハドロンの質量は $qs < 0$ のクォークの数の分だけ$\sqrt{2|qB|}$程度で増える**

例) ρ^+中間子

$$u\downarrow\bar{d}\downarrow \ > \ \frac{u\downarrow\bar{d}\uparrow \pm u\uparrow\bar{d}\downarrow}{\sqrt{2}} \ > \ u\uparrow\bar{d}\uparrow$$

4. 計算結果

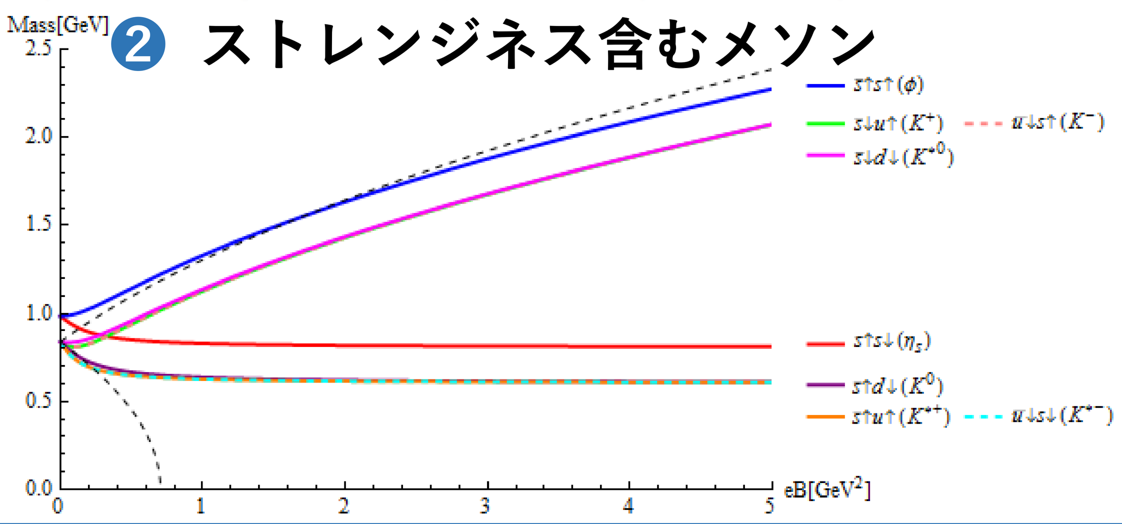
① **軽いメソン**



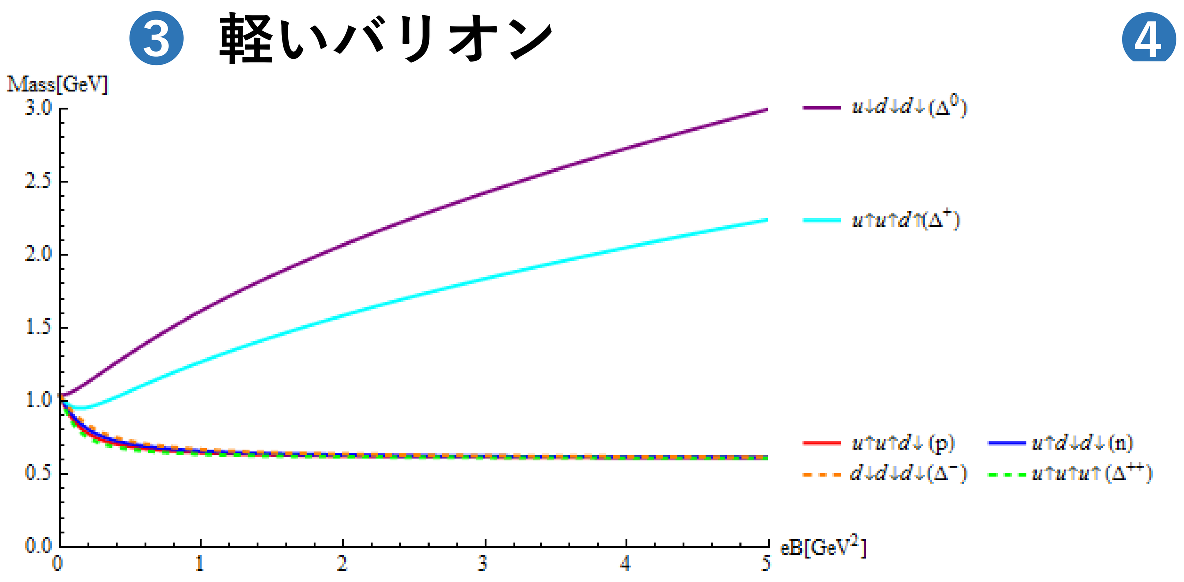
― 模型
● 格子[Hidaka, Yamamoto (2013)]
○ 格子[Luschevskaya et al. (2014)]

格子の結果を定性的に再現！

② **ストレンジネス含むメソン**



③ **軽いバリオン**



④ **ストレンジネスを含むバリオン**