



ハドロンの物理 (ほんのさわりだけ)

Flavor Physics Workshop 2022

@伊豆の国市ニュー八景園

2022年11月08日

谷田 聖(日本原子力研究開発機構)

自己紹介

- 所属: 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター
 - というとわからないかも知れませんが、J-PARCのおひざ元です
- 専門: 原子核・ハドロン物理実験
- プロジェクト:
 - J-PARCハドロンホール
 - ストレンジネスを持つ原子核
 - Belle (II)
 - バリオン分光
- ハドロンのことなら何でもやっています

ハドロン物理って何？

- 高エネルギーの人には良く聞かれます
 - そして喧嘩になります
- まずハドロンって何？
 - 強い力を感じる粒子のこと：
陽子, 中性子, パイオン, ...
 - パイオンの発見(1947)以来多数のハドロンが見つかったいる
→ 現在では何百も。Particle Data Bookのほとんどを占める
 - 構造を持つ → 「素粒子」ではない
→ 現在では、クォークとグルーオンからなると一応知られている
 - ハドロン物理＝「強い力」の物理

4つの相互作用

- 重力

- 引力のみ(?)
- 重い物体、特に天体運動などを支配

- 電磁気

- 同チャージ → 斥力, 逆チャージ → 引力
- 物質の性質を支配。エレクトロニクス

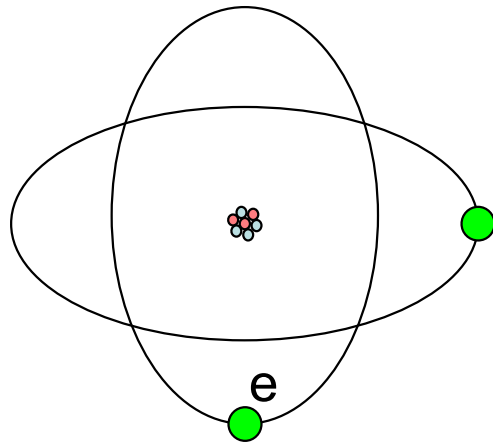
- 弱い力

- 原子核の β 崩壊など

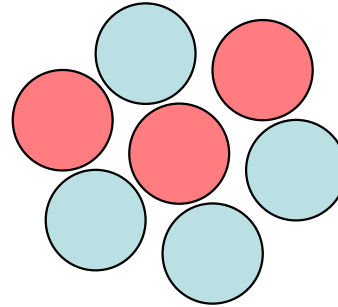
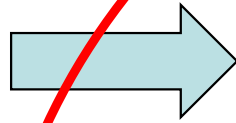
- 強い力

- 原子核・核子やそれらの構造を支配

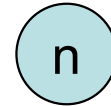
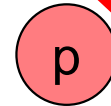
原子よりも小さな世界



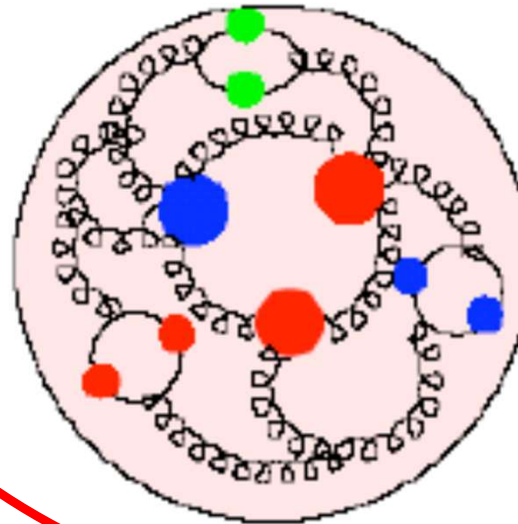
原子 ($\sim 0.1\text{nm}$)



原子核 ($1\sim 10\text{ fm}$)



核子
($\sim 1\text{fm}$)



クォークと
グルーオン

QCD

- QCD = Quantum Chromo-Dynamics
 - 強い相互作用の真の源

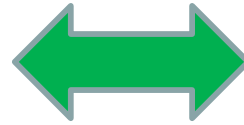
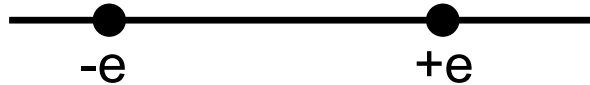
Electro-magnetism (QED)

gauge theory

$\pm e$ – 1 kind of charge

photon mediates

photon has no charge



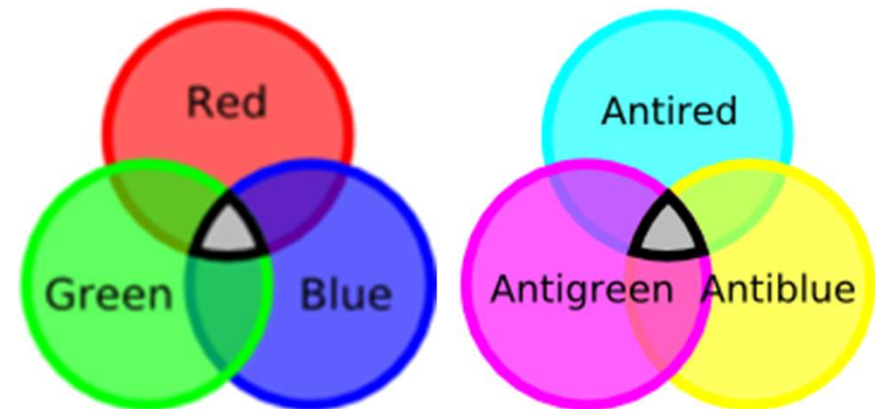
QCD

gauge theory

RGB – 3 color charges

gluon

gluons have color charge



QCD Lagrangian

$$L_{QCD} = \sum_q \bar{\psi}_q \left(i \gamma_\mu D^\mu - m_q \right) \psi_q - \frac{1}{2} \text{Tr} \left[\bar{G}_{\mu\nu} \bar{G}^{\mu\nu} \right]$$

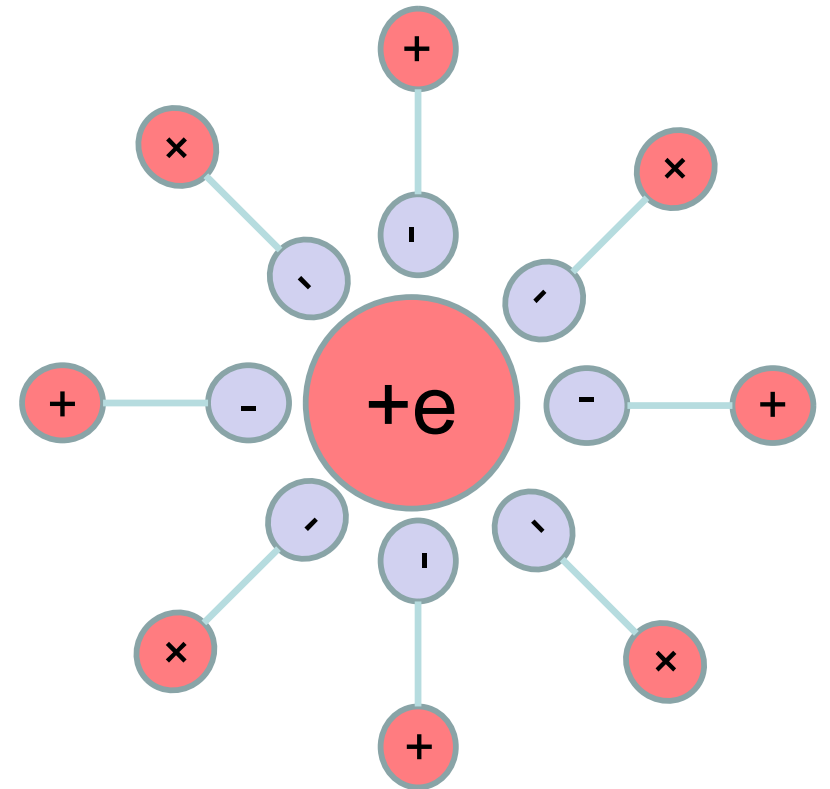
- 基本的にはQEDと似た構造
- これだけ見ると単純そう
 - 高エネルギーの人にとっては「終わった」物理
(CP問題-axionを除いて)
- だけど、これから何が起こるかは複雑

QCDの特徴(1)ー結合定数

- Coupling constant

QED: $\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137} \ll 1$: fine structure constant

- 実は距離(エネルギー)によって変わる
- なぜ? ← 仮想粒子-反粒子生成による(Debye)遮蔽効果
- 長距離で弱い
($\Leftrightarrow$ 短距離で強い)



QCD coupling constant

- QCD: グルーオンも電荷を持つ

→ 反遮蔽効果

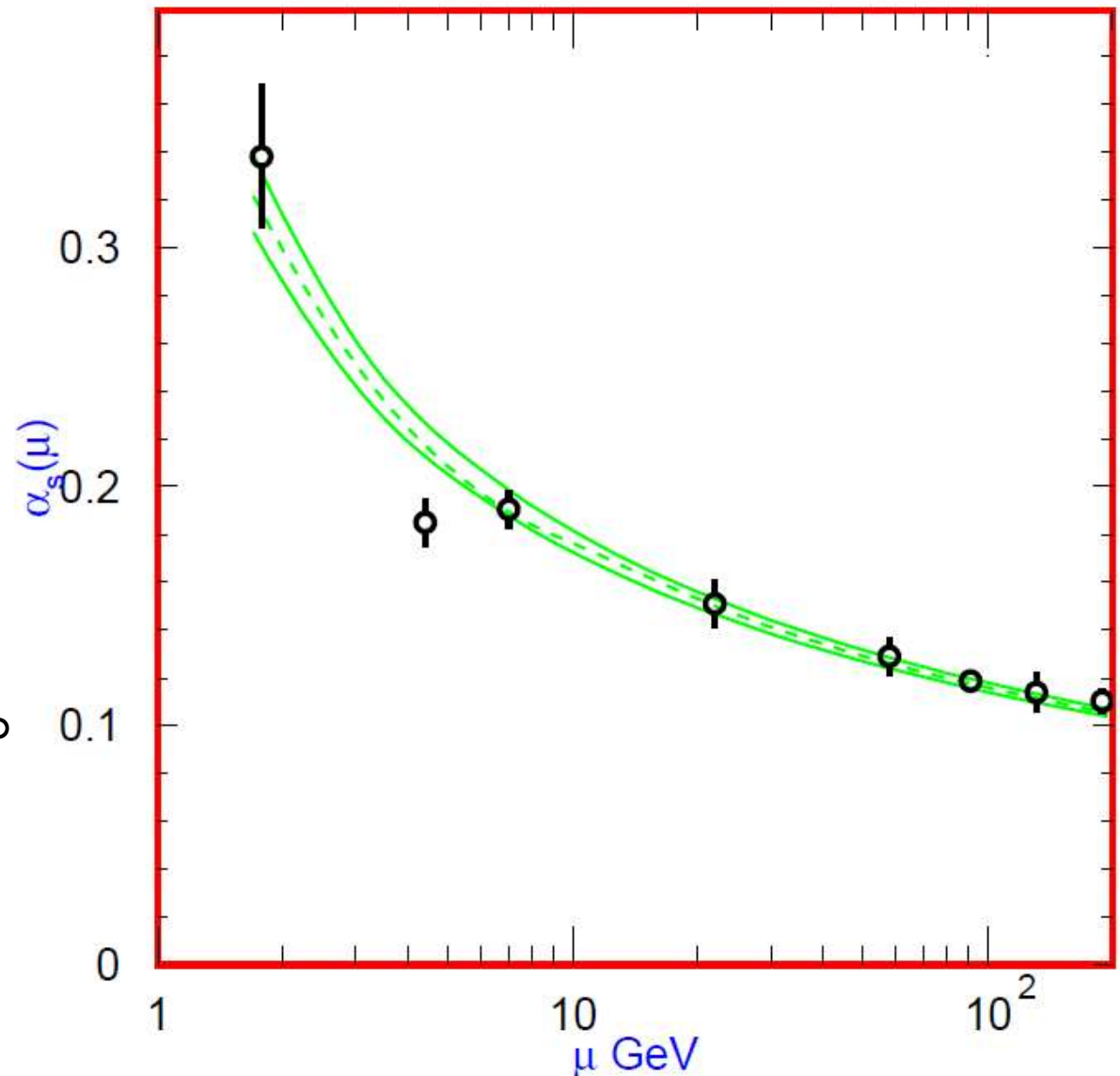
高エネルギーで弱い

→ 漸近自由性

- 低エネルギーでは

$$\alpha_s \rightarrow \infty$$

- α_s が発散するところ、
 $\Lambda_{\text{QCD}} (\sim 250 \text{ MeV})$
というスケールが入る。



摂動論 vs 非摂動論(イメージ)

- α が小さい(摂動論的)
 - 何もない空間に粒子があって、それらが少しずつ相互作用する
- α が大きい(非摂動論的)
 - 相互作用が強すぎて、上の描像が破綻
 - 摂動論のどこにもない性質が現れたりする
- テーラー展開を例に取ってみると

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots$$

- $x=0.1$ なら確かに成り立つ
- $x=2$ だと、右辺の各項は全部正なのに、左辺は負
(一応いっとくと、実際の物理理論の収束半径は0)

余談1:収束半径0のToy model

$$Z(g) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2 - \frac{g}{4}x^4\right) dx$$

を無理やり g の級数として展開すると

$$Z(g) = \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{2} \frac{\Gamma\left(2n + \frac{1}{2}\right)}{n!} (-g)^n$$

この収束半径は0。
だけど、 $e/4g$ 次くらいまでは
摂動展開が良い近似
(精度 $\sim \exp(-e/4g)$)を与える。

- 摂動論と非摂動論をつなぐ
ような理論(リサージェンス)
が最近注目されている

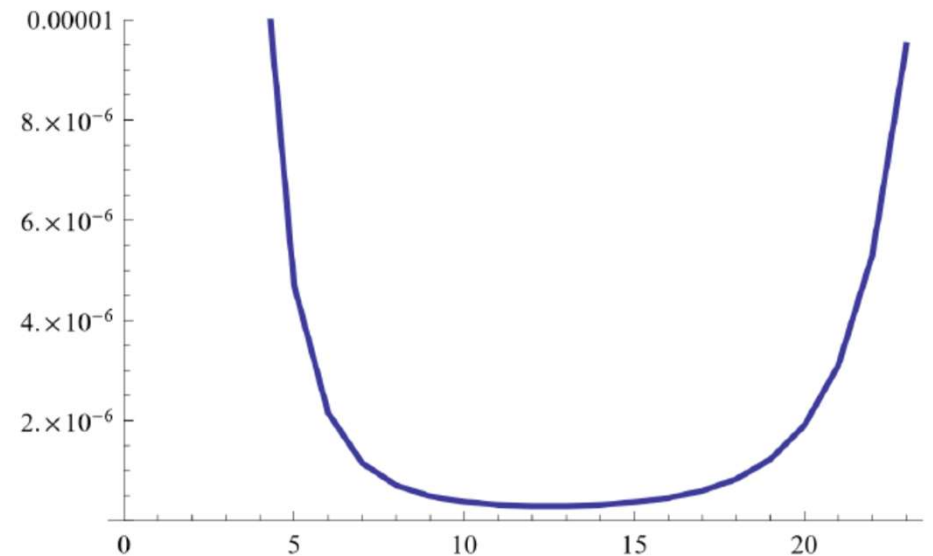
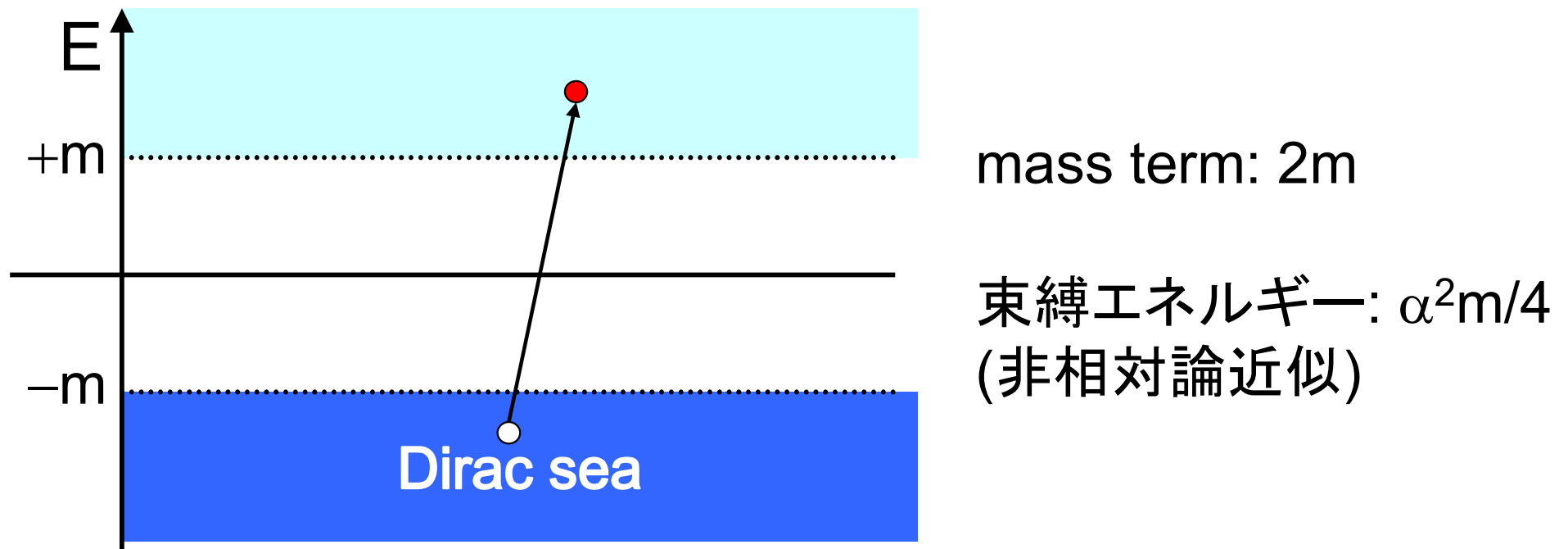


Figure 1.1: 縦軸: $|Z_{true}(g) - Z_{pert.}(g)|$, 横軸: N

α が大きいと何が起こる？

- QEDのようなToy modelで考える



- もし $2m < \alpha^2 m/4$ なら、何が起こる？
(cf. QEDではこの比は100万分の7くらい)

$q\bar{q}$ 凝縮

- 真空から q を一個拾い上げる $\rightarrow$ より安定
 $\rightarrow$ 真空そのものが変わる

$$\phi = \langle q\bar{q} \rangle \neq 0$$

- 粒子としての“Quark”は新しい真空で再定義される
 - もとの質量が0でも、質量 $\propto \phi$ を獲得する
 - $3 \times m_q \sim 10 \text{ MeV}$ が $m_p \sim 1 \text{ GeV}$ になる仕掛け
- 最初に南部が NJL モデルを使って示した
 - 2008年ノーベル賞
 - Higgs機構も同様の仕掛け
- 実際のQCDはさらに複雑
(閉じ込め、グルーオン凝縮、...)
 $\rightarrow$ 原子核・ハドロン物理のおもしろさ

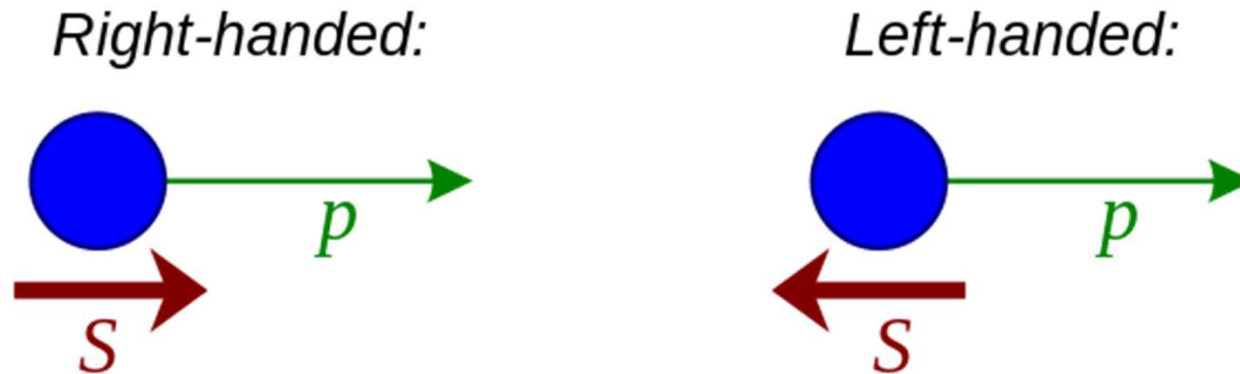
余談その2:バリオン数の破れ

- 標準理論でのバリオン数の破れは電弱相互作用の非摂動効果で引き起こされる
 - 非可換ゲージ理論の非摂動効果という点が共通
 - 出てくる状況がQCDと似ている。
例: バリオン数が違う真空をつなぐインスタントン
- 正確な計算ができない
 - どれだけCPの破れが足りない？
 - ハドロン側からブレイクスルーが出てくるかも。

QCDの特徴(2)ーカイラル対称性

- カイラリティ

- 物理学における一般的な定義は「パリティ変換では重なるが、時間反転では重ならない一対の構造が持つ属性」
- 素粒子物理学では、イメージとしてはヘリシティ=スピンの向きと進行方向の関係(質量がないときはこれでOK)



- 形式的な定義: スピン1/2の場合、 γ_5 行列を使って、

$$\psi_{R/L} = \frac{1 \pm \gamma_5}{2} \psi$$

- 普通言わないが、光にもカイラリティが定義できる

弱い相互作用におけるカイラリティ

- フェルミオン: 左巻きの粒子か右巻きの反粒子しかカップルしない
 - パリティの破れ (V-A型)
 - V: ベクトルカレント (いわゆる通常の電荷／電流と同じ)
 - A: アキシャルカレント
- ただし、ハドロンに対しては、実効的にはV-Aからずれる
 - ← Aの方が少し変更を受ける
 - (これを Partially Conserved Axial Currentと呼ぶ)
 - 実験的には $g_A/g_V = -1.2723 \pm 0.0023$
 - この値を理解するのはハドロン物理の問題

カイラル対称性

- ハドロン物理でこれを聞かない研究会はない！
- 右巻き粒子と左巻き粒子を入れ替えるような、離散的対称性のことではない(たしかに対称ではあるが)
- カイラル変換(連続変換)に対する対称性
 - フレーバーが1種類なら、右巻きの粒子と左巻きの粒子の位相を反対向きに回すような変換
→ 純粋に量子力学的な対称性
 - 同じ向きに回す変換に対しても当然対称だから、実は右巻きと左巻きを自由に回せる。
 - フレーバーが複数ある場合は、ユニタリー変換。
 - 運動エネルギーの項は不変。質量項は破る。
→ クォークの質量(Higgsによる)で、もともと小さく破れている

保存量

- 連続変換なので、ネーターの定理に従って、保存量(カレント)が存在
 - アキシャルベクターカレント(A)
 - 左巻きと右巻きのクォークの個数の差に相当
 - 当然、和も保存(V)
- Aはパリティと交換しない(反交換)
 - 反対パリティ(で同じ質量)の粒子が存在(カイラルダブレット)
 - ただし、現実にはそのような構造は見えない

自発的破れ

- 理論 (Lagrangian) の持つ対称性: $SU_f(n)_R \times SU_f(n)_L$
- クォーク凝縮によって、カイラル対称性が自発的に破れる
- 真空の持つ対称性: $SU_f(n)_V$ ($n=2$ ならアイソスピン)
- Vector current はそれでも保存している
- Axial current はもはや保存していない
 - PCACは、これと小さな裸のクォーク質量との協力による
- いろいろと面白い現象
 - パイオンは(疑)ゴールドストーンボゾンとして、質量0(現実には小さいが有限)で存在する
 - ...

QCDの特徴(3)ー閉じ込め

- クォークやグルーオンは決して単独では観測できない
 - ー 実験事実としては完全に確立
 - ー 現象論的には、クォーク間に線形のポテンシャルを入れる
- 実は完全な理解は得られていない
 - ー 数学として100万ドルの賞金がかかった問題の1つ。
- ハドロン物理をややこしくする要因の1つ。
 - ー 例えば、単独で存在しない粒子に「質量」や「角運動量」を厳密に定義しようとする、往々にして複数の定義が出てくる

QCDの特徴—まとめ

- 低エネルギーで結合定数が発散
($\Leftrightarrow$ 漸近的自由性)
- 真空の相転移。非自明な真空
- (近似的な)カイラル対称性とその自発的破れ
- 閉じ込め

理論は形式的には「わかっている」。

が、その上で何が起こるかが未知 → ハドロン物理

ハドロン物理

- 同じ理論 (QCD) でも、個々の現象では多種多様な現れ方をする
 - QCD→現象につながる道筋 (メカニズム) はわかっていないことの方が多い。
 - 万能な第一原理計算が存在しない
- 広い意味では、ハドロンを含むどんな現象もハドロン物理の対象
 - その現象のメカニズムは何か？
 - どんな自由度が大切なのか？
 - QCD特有の現象？他の系でも現れる？
 - 物性物理に似ている。

ハドロン物理の対象

- 主として
 - 核子構造 (構造関数、パートン分布関数、構造因子、...)
 - QCD物性 (高温、高密度でどうなる？ 状態方程式は？)
 - ← 重イオン衝突など
 - ハドロン分光
 - ...

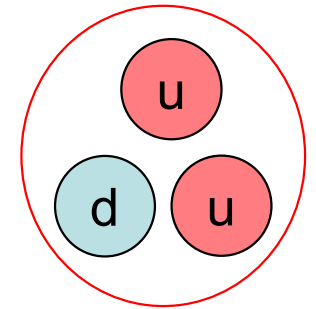
があげられる。
- 以下の2つは、ハドロン物理としない場合が多い
 - 摂動論で完結する場合 (高エネルギー反応)
 - 例: $gg \rightarrow h$ (ただし、初期状態のグルーオン分布は対象)
 - 原子核 (核子の多体系) 物理
 - 逆に、社会的にはハドロン物理が原子核物理の一部とされることも

ハドロン分光

- 最も狭い意味では「ハドロン物理」≡「ハドロン分光」
- 個々のハドロンについて
 - 励起エネルギーは？
 - 崩壊は？
 - その構造は？
 - どう分類する？
 - それらの間の相互作用は？などを調べ、そのメカニズムを議論。

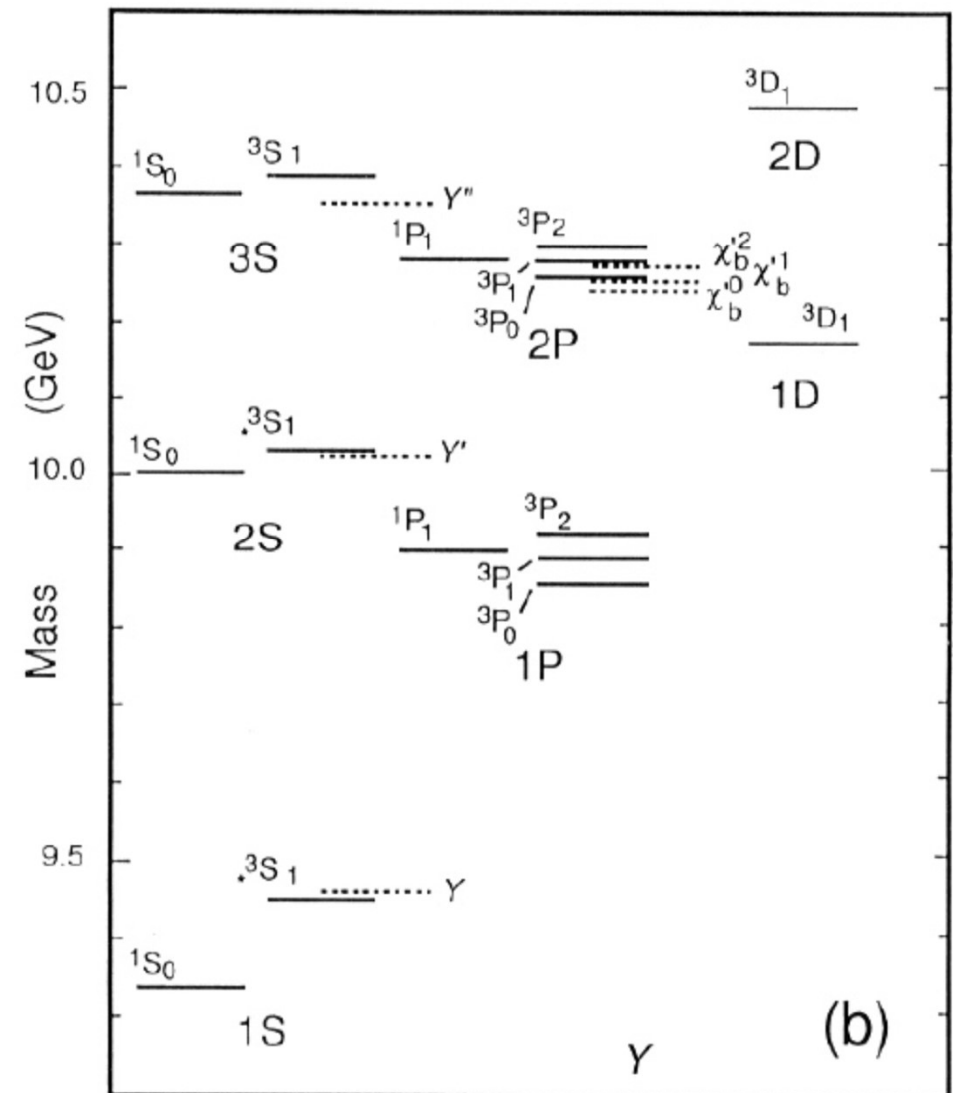
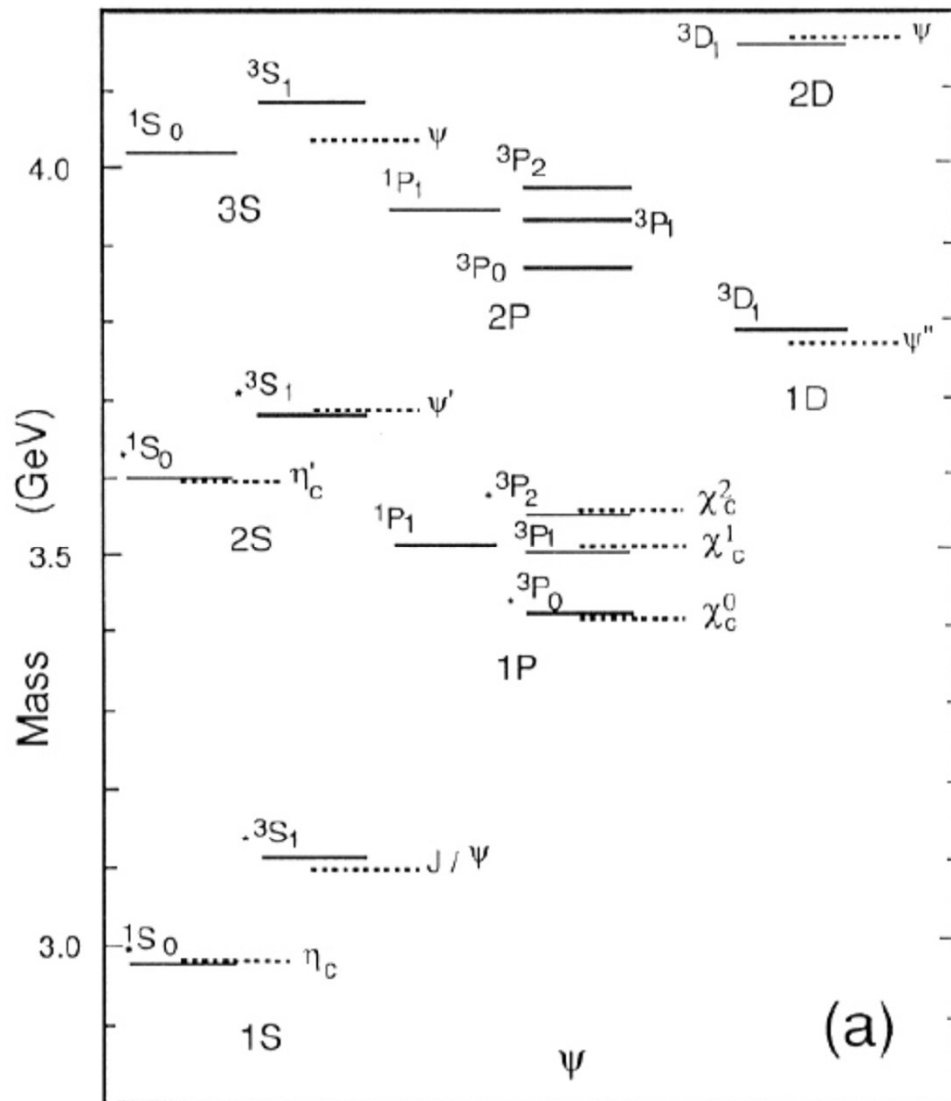
クォークモデル

- (特に低励起状態の)ハドロンを理解・分類するための強力な道具
- バリオン(フェルミオン)は3つのクォークから出来ている
 - 例:陽子=(uud), 中性子=(udd)
 - カラーの反対称化の要請から、他の波動関数は対称化する
- メソン(ボゾン)はクォークと反クォークからなる
 - 例: $\pi^+ = (u\bar{d})$
- モデルにおけるクォーク: constituent quark
 - 相転移後の真空中、「重さを獲得した」クォーク
 - QCDの観点からは、真空中の $\bar{q}q$ 対やグルーオンの衣を着た準粒子と考えることができる(ただしきちんと定式化した人はいない)。量子数は裸のクォークと同じ。



Heavy quarkonia

- 重いクォーク Q とその反クォーク $\bar{Q}$ の結合状態
- クォークモデルで良く説明できる



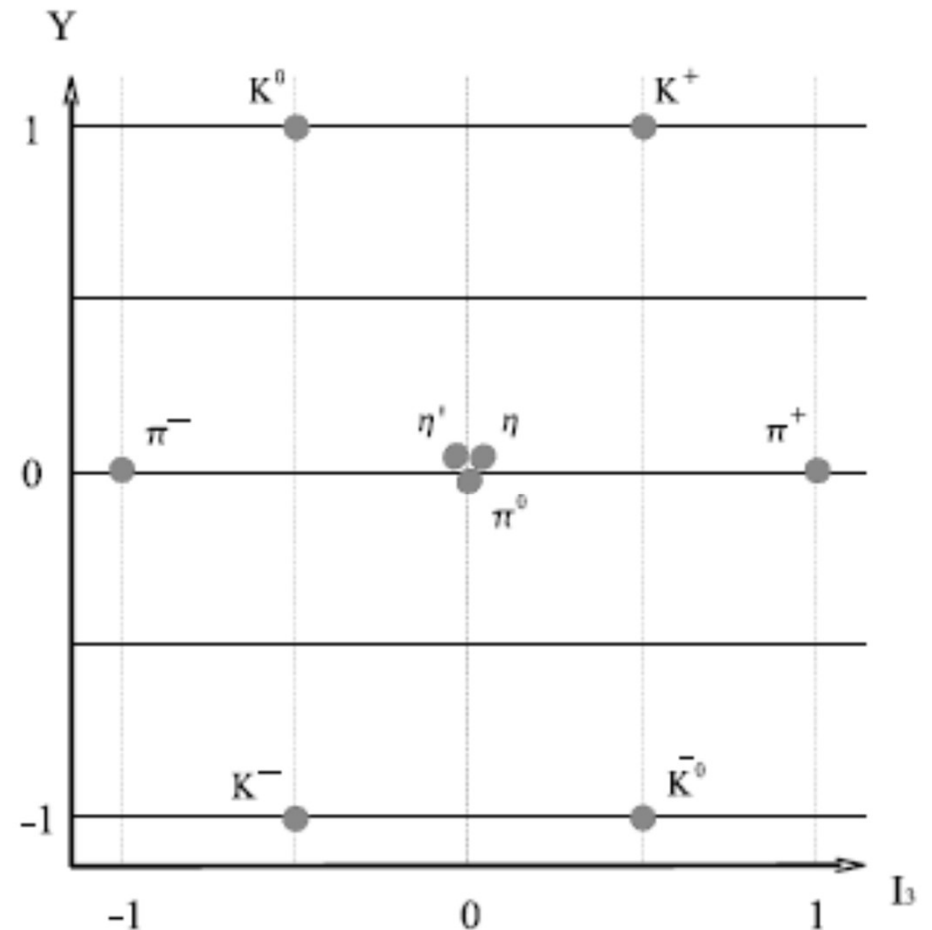
Cornell potential

$$V(r) = \sigma r - \frac{b}{r} + (\text{スピン依存項})$$

- 線形項: 閉じ込めポテンシャル
- クーロン項: QCDの1 gluon交換から出てくる (color electric interaction)
- スピン依存項
 - 理論的にはQCDの1 gluon交換から出てくる (color magnetic interaction)
 - スピンースピン力: J/ψ と η_c の質量差
$$V \propto \frac{1}{m_Q m_{\bar{Q}}} \vec{s}_Q \cdot \vec{s}_{\bar{Q}} \delta(r)$$
 - スピンー軌道力: P波粒子のsplittingを説明

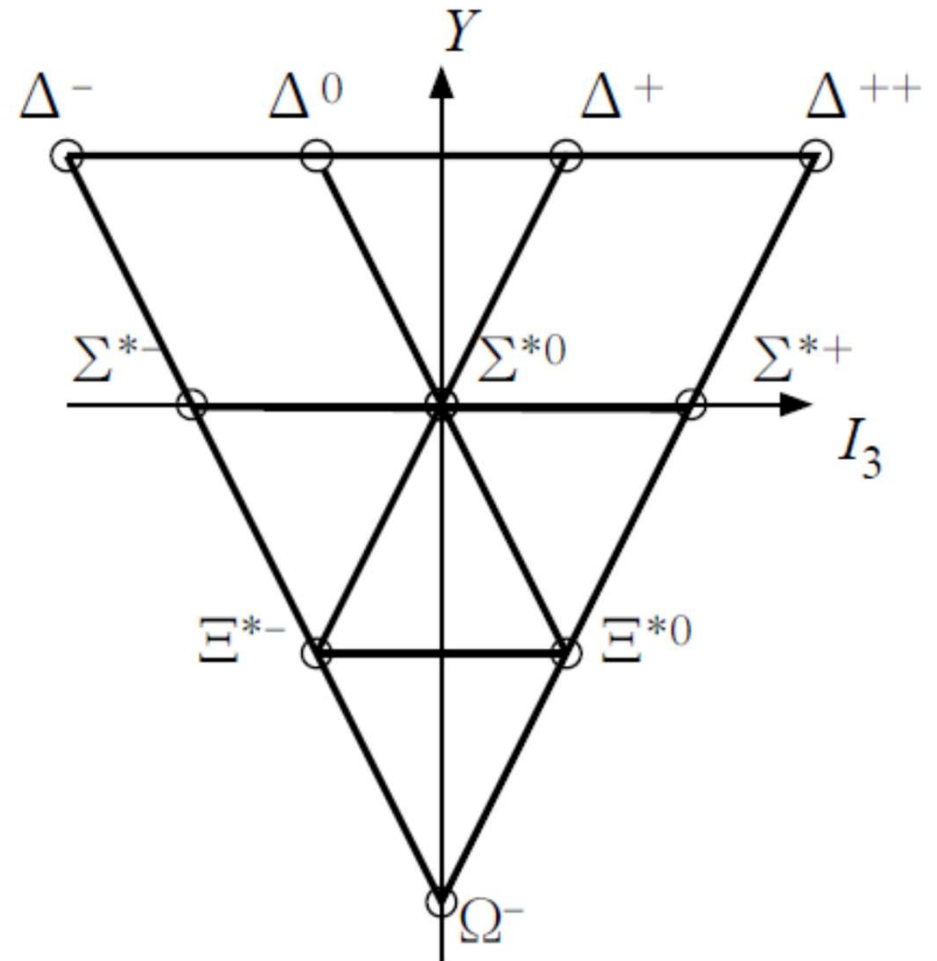
軽いクォークのメソン

- uds 3種類の組み合わせで、 $3 \times 3 = 9$ 種類
 - 3S_1 ($J^P=1^-$, ベクター)、 1S_0 ($J^P=0^-$, 擬スカラー)ともに、低励起状態に綺麗に見えている
- クォーク質量だけ変えて、ほぼ同じポテンシャルで再現可能
- P波では、もはやこのような分類は不可能



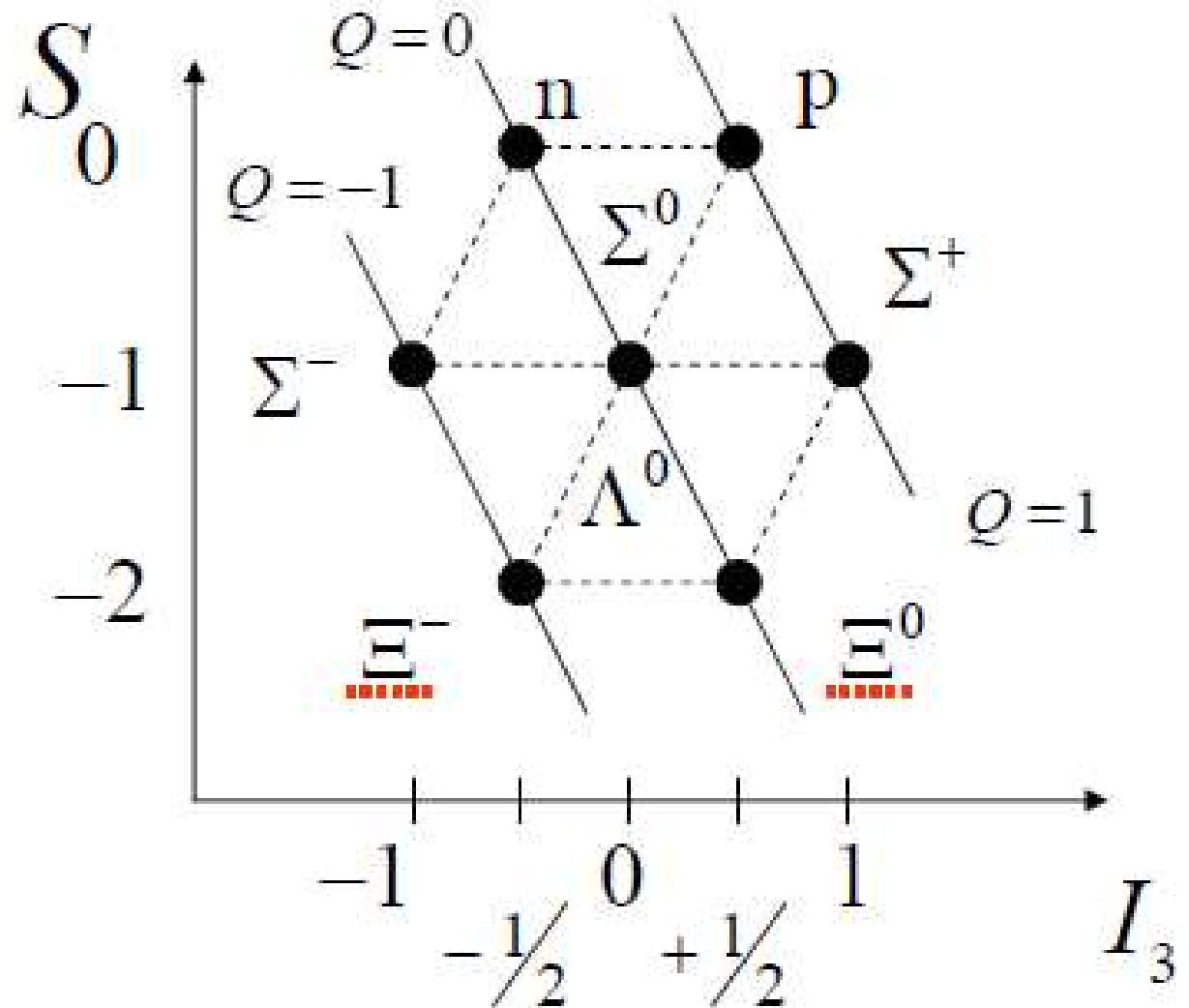
バリオンでは？

- S波バリオン — 2種類
- スピン3/2(例: uuu)
 - 空間、スピン、フレーバー、全てが対称
 - 3種類の”軽い”クォーク(u,d,s)から作ると、全部で10個できる。
→ 全部見つかった
 - 特に $\Omega(sss)$ は予言されたとおりに見つかった。
- これも同様のポテンシャルで理解可能。
- Heavy quarkを含むバリオンも知られている



スピン1/2バリオン

- 基底状態(陽子、中性子、...)
 - 3フレーバーで8個
- こちらの方が軽い
理由はスピン-スピン
力による
- 驚くべきは、磁気
モーメントまで
実験と合うこと。

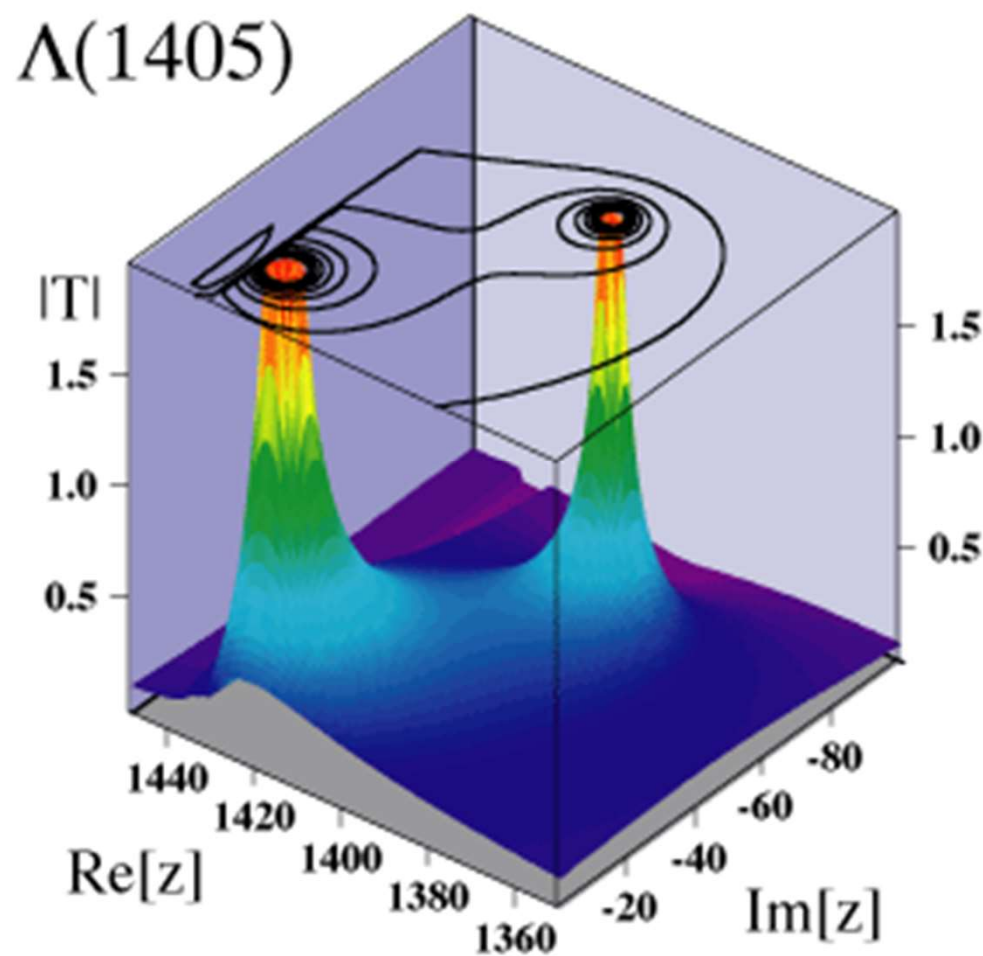


クォークモデルの限界

- 高励起状態に対しては一般にあまり良くない(?)
 - 計算、実験とも状態が多すぎて、どれがどれやらさっぱり
 - Missing resonance
 - 観測されているのに、クォークモデルでは分類できないものも
- 軽いクォークからなるP波のメソンはうまくいかない
 - いわゆる σ ($J^P=0^+$) メソンを含むチャンネル
 - おそらくは真空そのものとカップルするため
- バリオンでは
 - $\Lambda(1405)$
 - $N(1440)$の2つがうまく行かない例として有名

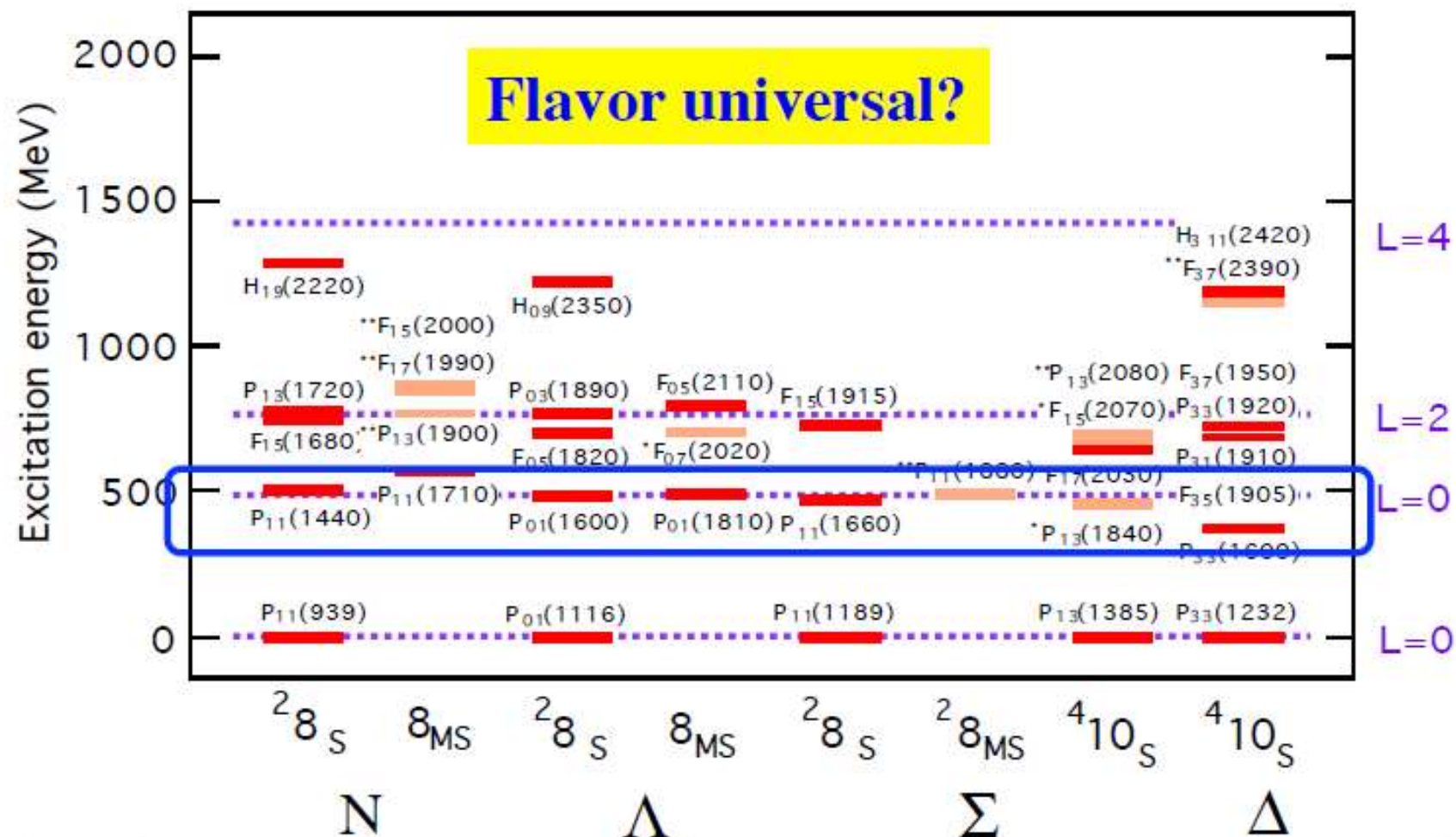
$\Lambda(1405)$

- ストレンジネスー1、Mass ~ 1405 MeV, $J^P=1/2^-$
- 負パリティのバリオンの中で一番軽い
- 3 クォーク (uds)?
5 クォーク?
- $\bar{K}N$ の束縛状態?
- $\pi\Sigma$ 共鳴?
- 実はPoleが2つ?
- ずっと昔から論争
最近さらにホット



N(1440)

- これも昔から知られた問題
 - が、訳が分からな過ぎて、あんまり研究している人がいない
- 発見者の名前から、Roper共鳴とも呼ばれる
- 核子の第一励起状態、 $J^P = 1/2^+$ (核子と一緒に)
 - 2S状態ならもっと高励起になるはず。(1Pより上)
なのになぜ第一励起状態？
 - なんとLattice計算でも難しい
- 実は、 Λ や Σ にも同様の状態がある。
- 原子核物理の経験から言えば、形が球からずれている？



Roperのチャーム版

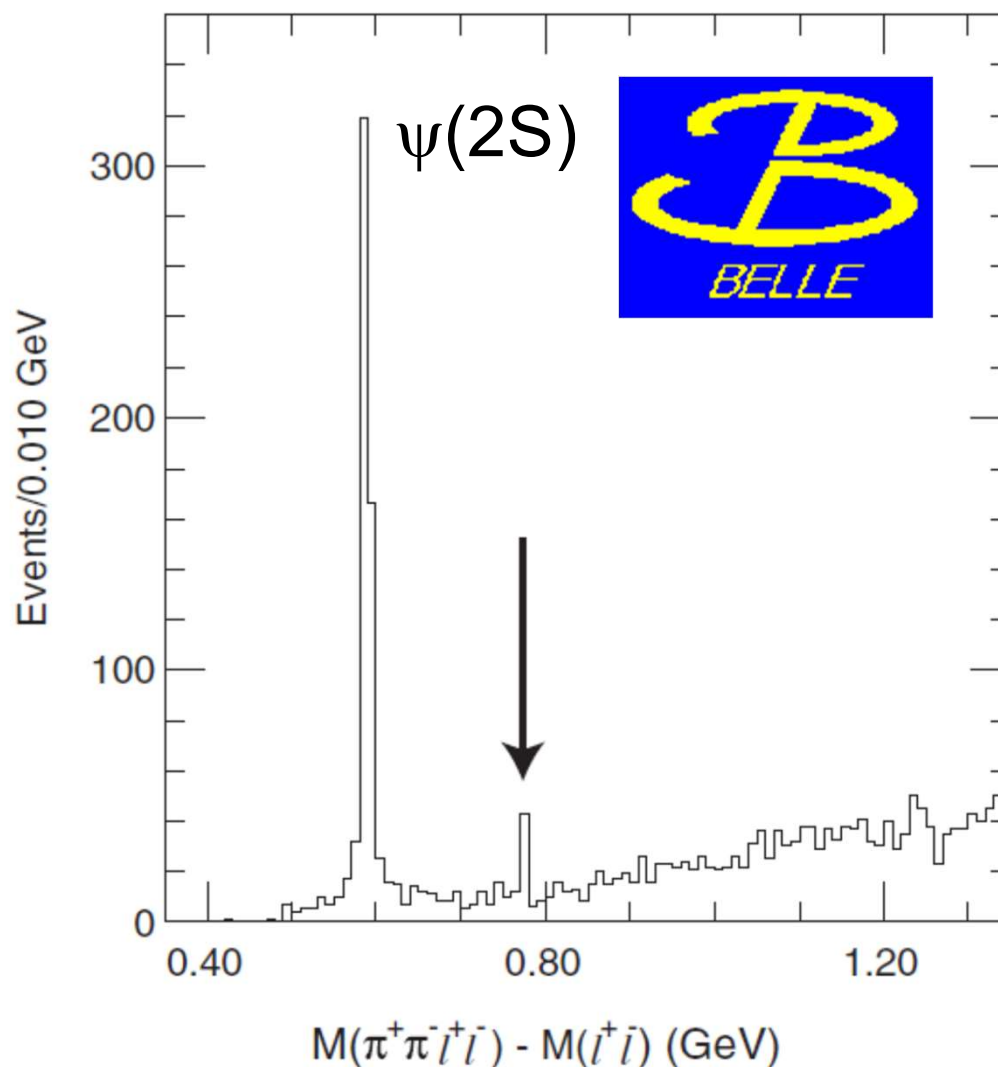
- 最近の論文で、 $\Xi_c(2970)^+$ というバリオン(クォーク模型ではcsu)が、Roperと同じ $J^P=1/2^+$ を持つことを発見。[Belle, PRD103.L111101 (2021)]
- 励起エネルギーも500 MeVとRoperと同じ。
 - クォーク質量が違うのに励起エネルギーが変わらないのはなぜ？
- さらに重いボトムでは？
軽いクォークを含まない Ω や Ω_c では？
→ Belle II、LHCb、J-PARC、...

エキゾチックハドロン

- 単純なクォーク模型で記述できないハドロン
 - Non- $q\bar{q}$ メソン、Non- qqq バリオン
- 閉じ込めはカラー白色だけを要求。必ずしも上の組み合わせ以外でもいい。
- どんなものがありえる？
 - ハドロンの(準)束縛(分子)状態: MM、MB、...
 - クォークの数が違う: $qq\bar{q}\bar{q}$ 、 $qqqq\bar{q}$ 、...
 - グルーオン自由度: $q\bar{q}g$ 、グルーボール、...
- 20世紀中には、確実なものは2例だけ。
 - $J^{PC}=1^{-+}$ のメソンは $q\bar{q}$ で書けない。
 - 候補は沢山
- 最近、チャームやボトムで新発見が相次いでいる

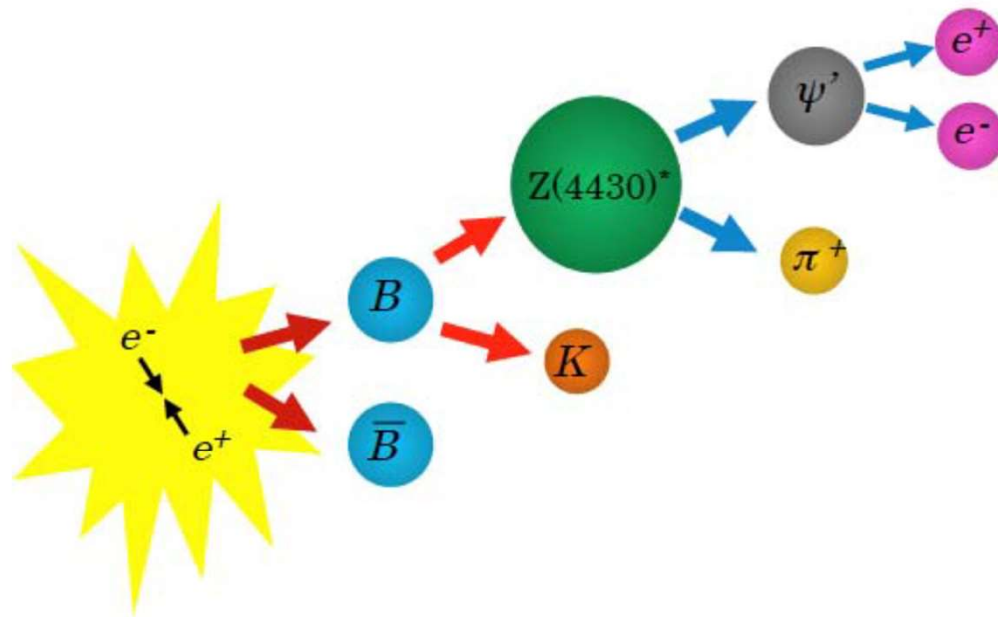
X(3872)

- 通常、 $D\bar{D}$ より重いチャームoniumは広い幅を持つ
- が、この粒子の幅は狭い(~ 1 MeV)
- ちょうど $D^*\bar{D}$ の真上
- Belleが発見、他の多くの実験でも観測
- J^{PC} は 1^{++} と決定 (LHCbによる)
- $D^*\bar{D}$ の分子的状态と $c\bar{c}$ チャームoniumの混合状態という説が有力

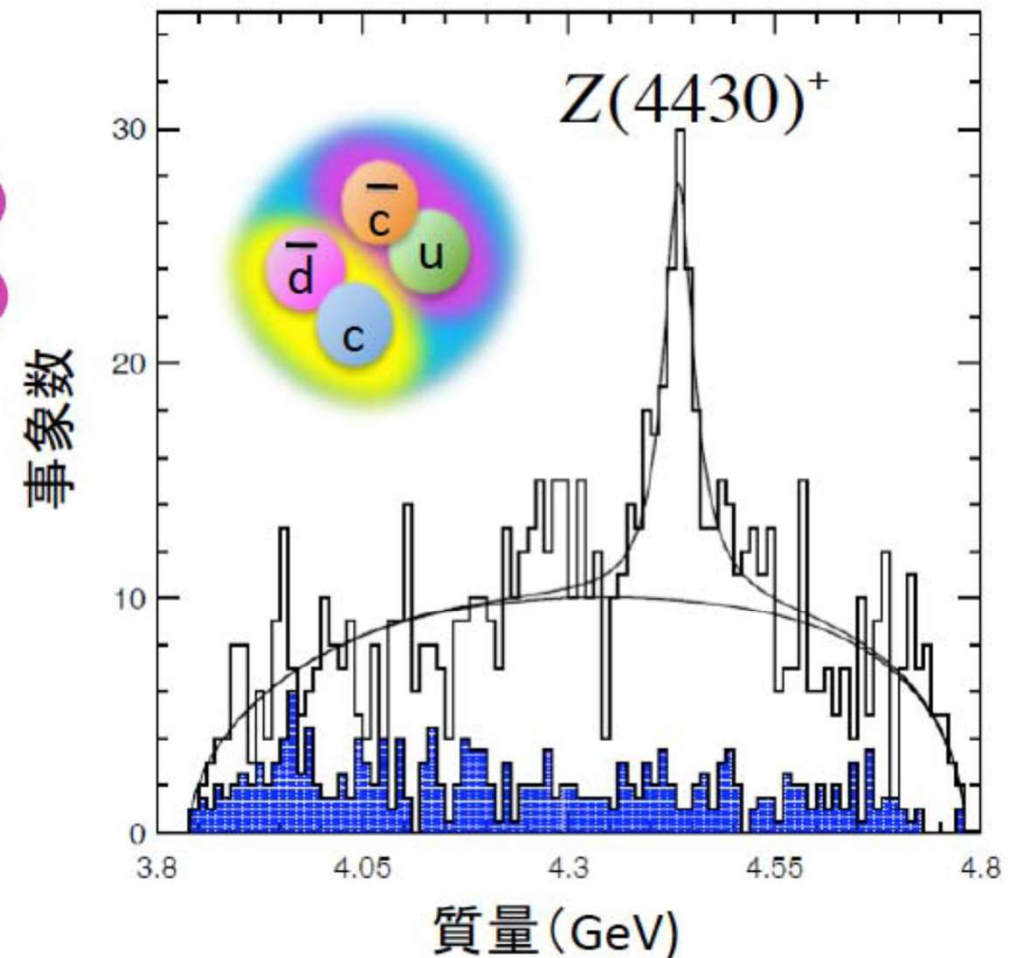


$Z(4430)^+$

- 電荷を持つチャームonium！
 - 最低でも $c\bar{c}u\bar{d}$ という構成が必要
 - Belleが発見、LHCbによる確認

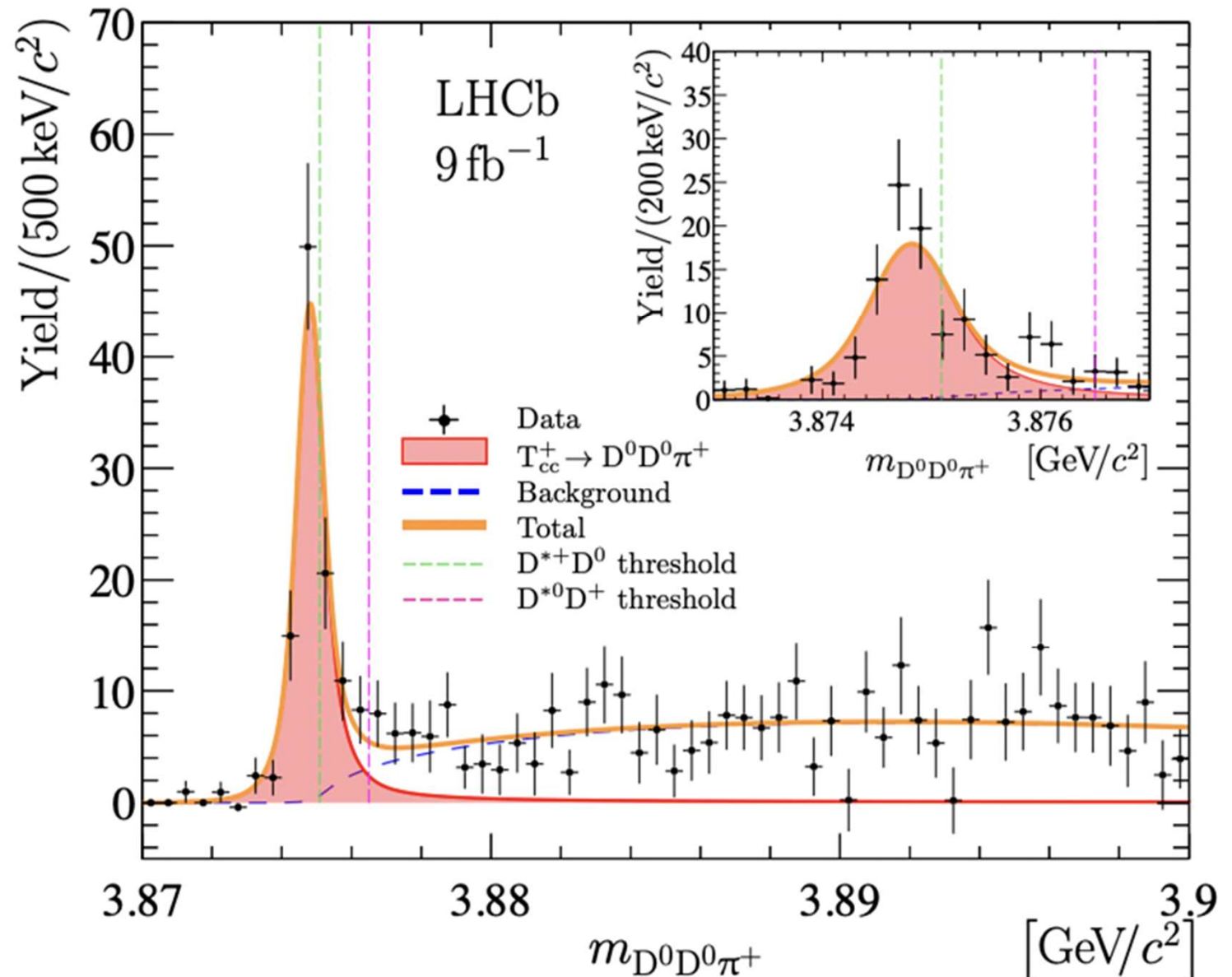


$$Z(4430)^+ \rightarrow \psi' \pi^+$$



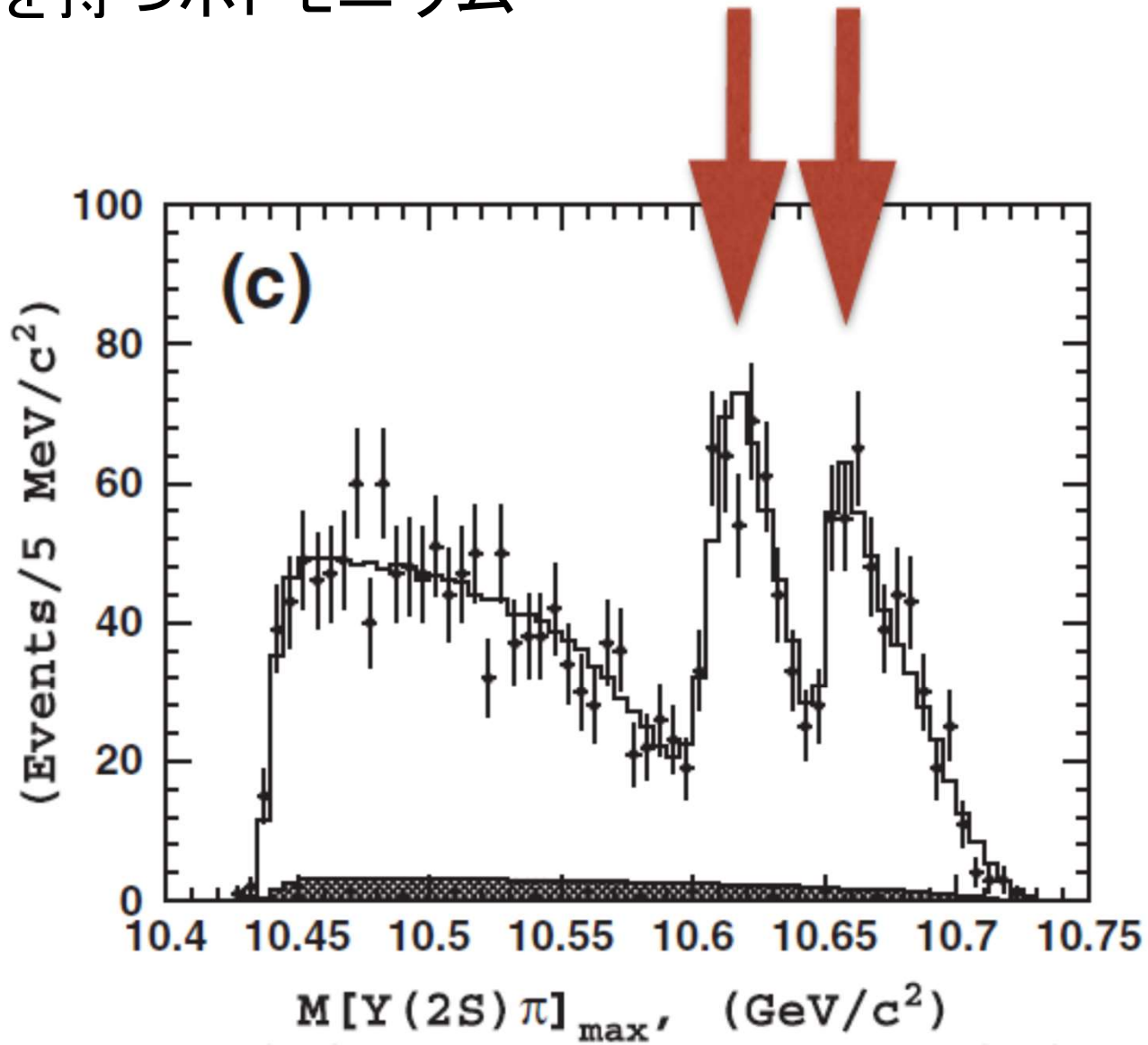
チャームを2つ持つ中間子

- $T_{cc}(3875)^+$
- チャームを2つ持つ
 $cc\bar{u}d$
- ぎりぎり束縛
分子的状态



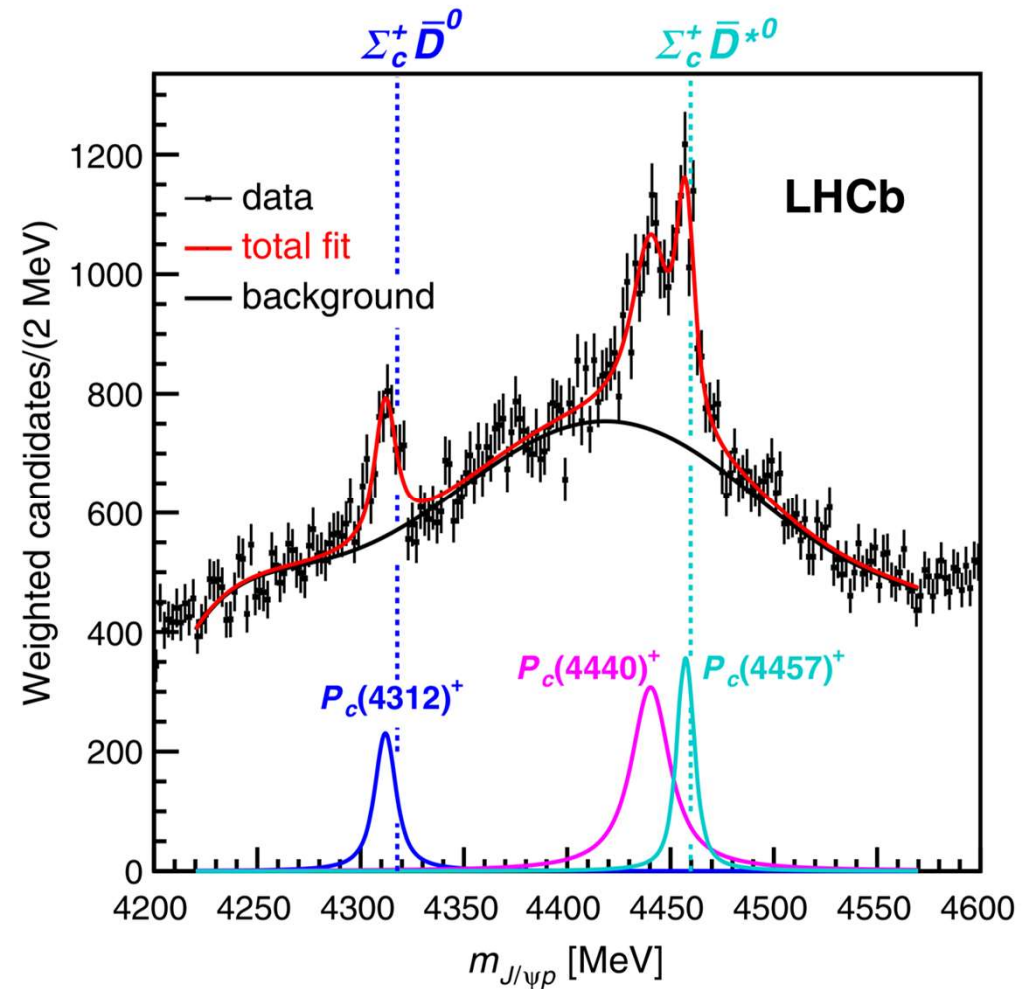
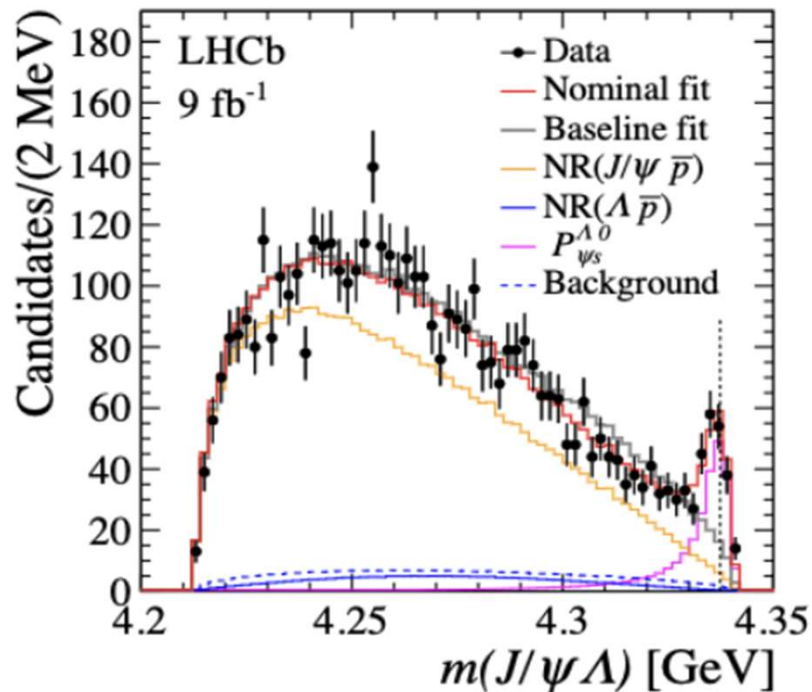
ボトムでも

- $Z_b(10610)$ 、 $Z_b(10650)$ の発見 (Belle)
 - 電荷を持つボトムonium



バリオンでは

- ペンタクォーク P_c の発見 (LHCb)
 - $\Lambda_b \rightarrow J/\psi \, p \, K^-$ で、 $J/\psi \, p$ の不変質量にピーク
 - $B \rightarrow J/\psi \, \Lambda \, \bar{p}$ でストレンジを含んだものも見つかる
- どんな状態？
議論が沸騰中



フレーバーハドロン物理？

- 強い相互作用はフレーバーによらないはず。
- なのにチャーム、ボトムでエキゾチックハドロンの新発見が相次ぐのはなぜ？
 - QCDはエネルギーによって、多様な顔を見せる
- 重いクォークでエキゾチックができやすい(見えやすい)理由として:
 - 単純に質量が大きく、運動エネルギーが小さい
 - ← 特に分子的状态を作るのに有利
 - 相互作用が弱く、崩壊幅が狭くなりやすい
 - OZI rule, Heavy quark symmetry
 - ...

OZI rule

- 重いクォーク-反クォーク対は消えにくい
 - もちろん、逆に生成しにくい
- 例: ϕ メソンは1040 MeVの質量を持ち、同じ量子数 ($J^P=1^-$) の $\omega(780)$ より260 MeVも重い
 - 幅は ω の半分しかない
 - しかも崩壊モードは $K\bar{K}$ がメイン ($Q=50$ MeV)
 - $\omega/\phi \rightarrow 3\pi$ の部分幅は大体10倍違う
 - ϕ が $s\bar{s}$ の構造を持つとして理解されている
- J/ψ や Y ではさらにこの傾向が顕著
 - η_c や η_b はこれほど細くないが、それでも10-30 MeV程度

Heavy Quark Symmetry

- 重いクォークのスピンは、近似的に保存量になる

$$\mathcal{L}_{\text{HQ}} = \bar{Q}(i\not{D} - m_Q)Q$$

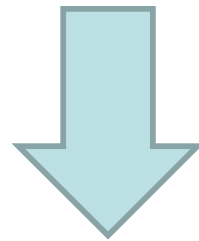
$$Q_v(x) = e^{im_Q v \cdot x} \frac{1 + \not{v}}{2} Q(x)$$

$$\mathcal{L}_{\text{HQET}} = \bar{Q}_v v \cdot iD Q_v + \bar{Q}_v \frac{(iD_\perp)^2}{2m_Q} Q_v - c(\mu) g_s \bar{Q}_v \frac{\sigma_{\mu\nu} G^{\mu\nu}}{4m_Q} Q_v + \mathcal{O}(1/m_Q^2)$$

- $J=j+S_Q$ なので、残り部分の角運動量 j も保存
 - Brown-muck
 - $J=j \pm 1/2$ という2重項ができる
 - Hyperfine splittingのようなもの。Heavy quark doublet
- 重いクォークのスピンが反転するような崩壊は起きにくい
 - h_c は J/ψ に壊れず、 η_c に壊れる

さらなる発見は？

- むしろまだ始まったばかり
- どこに何が潜んでいるかわからない楽しみ
- 発見されたエキゾチックハドロンの本質についてもこれからの議論
 - 分子的状态は確立しつつある。
 - 共鳴状態ではない、という議論すらある(残念ながら時間が・・・)
スレショールドカusp、トライアングルシンギュラリティ



ハドロン物理の大航海時代

まとめ

- ハドロン物理＝「強い力」の物理

- 究極の法則を探るのではなく、どうやって個々の現象を理解するか、その途中で現れる重要法則は何か、を探るのが主眼
- 物性物理学に似ている

- QCDの性質

- 低エネルギーで結合定数が発散
- 真空の相転移、自発的対称性の破れ
- 閉じ込め
- 1つの基本法則の持つ、多様な顔

- エキゾチックハドロン

- 近年、発見が相次ぐ
- 正体は何か？ 激しい議論が続く。
- ハドロン物理の大航海時代