フェムトスコピーで探る 強い相互作用の世界

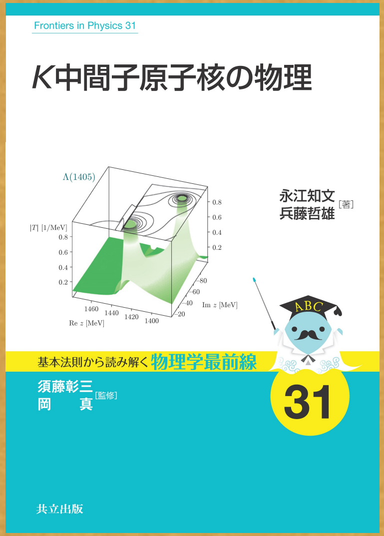
兵藤 哲雄

東京都立大学

2023, Dec. 7th

目次

- 導入：強い相互作用とハドロン
  - ハドロン物理の難しさ/面白さ
- ハドロン物理とフェムトスコピー
  - ハドロン間相互作用の解明
- フェムトスコピーの応用
  - $K^{-}p$ 相互作用と $\Lambda(1405)$ 共鳴
- まとめ



参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）

原子、原子核、ハドロン、クォーク

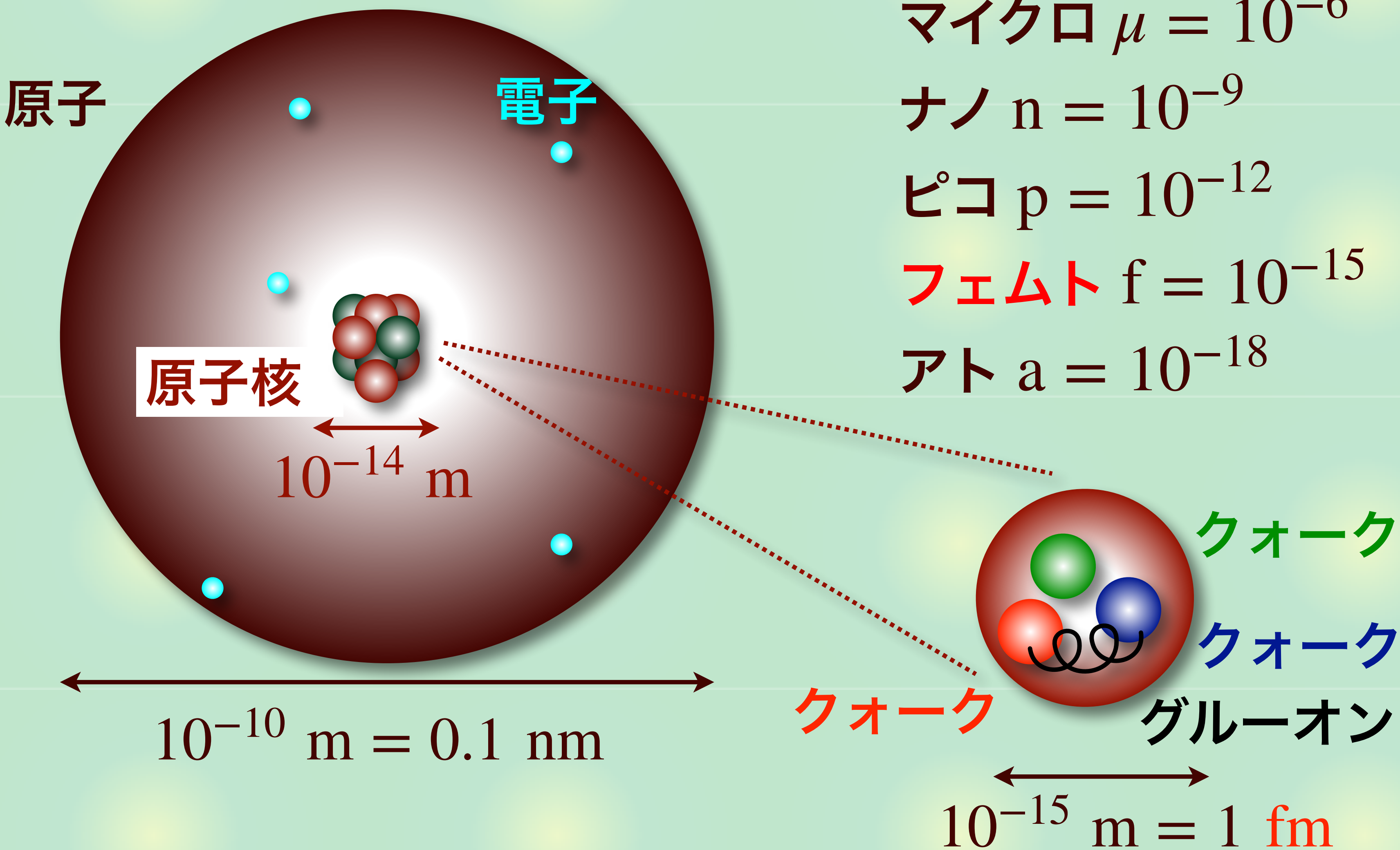
マイクロ $\mu = 10^{-6}$

ナノ $\mathrm{n} = 10^{-9}$

ピコ $\mathrm{p} = 10^{-12}$

フェムト $\mathrm{f} = 10^{-15}$

アト $\mathrm{a} = 10^{-18}$



ハドロン：陽子、中性子など、スケールはフェムトメートル

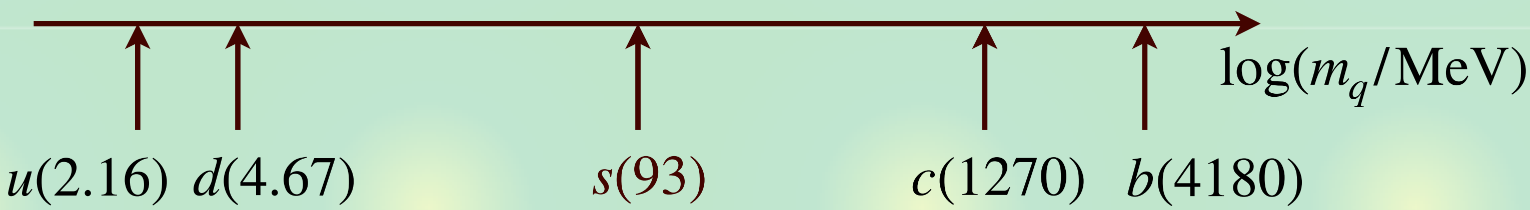
クォークとは

クォークはカラー（色電荷）を持つ <– 南部さん

- カラー：（スピンのような）内部自由度
- クォーク：赤、青、緑
- 反クォーク：反赤、反青、反緑

クォークはフレーバーを持つ

- クォークの種類（u, d, s, c, b, t）
- フレーバー毎に質量が大きく異なる

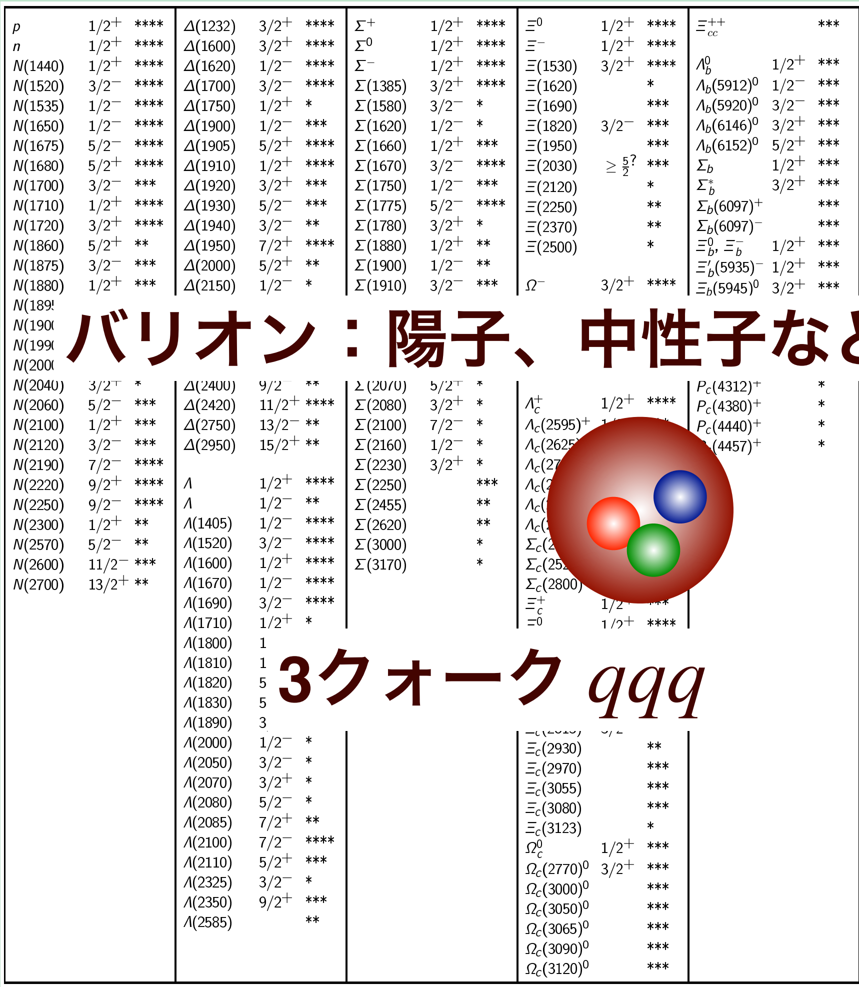


- トップ（t）クォークはハドロンを作らない

ハドロンとは

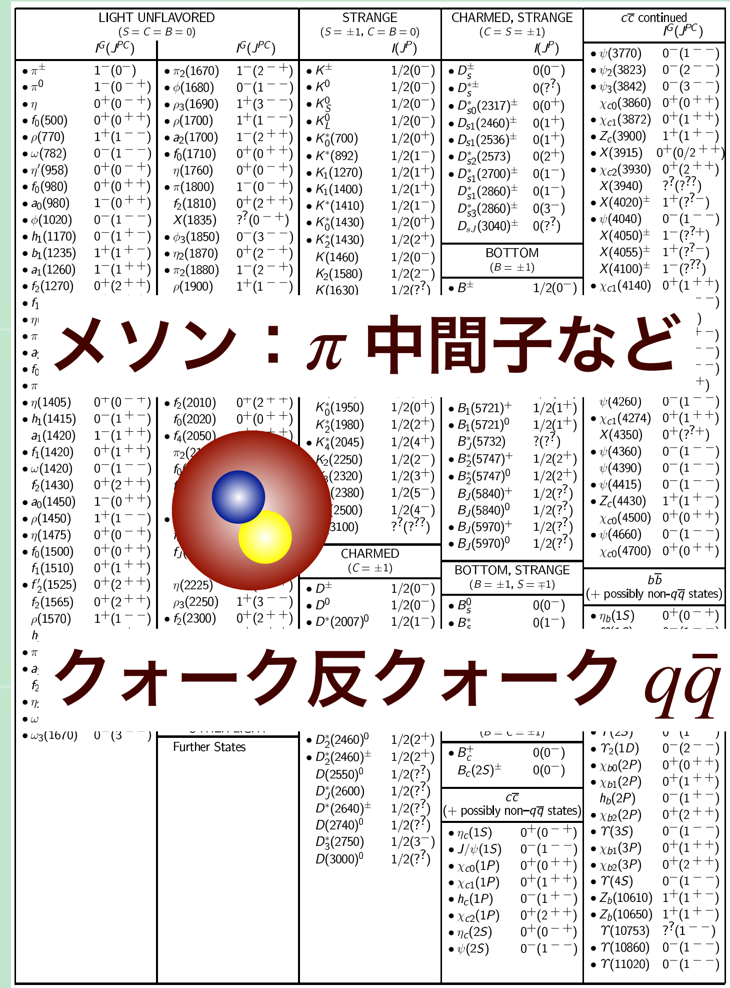
ハドロン：クォーク、グルーオンの自己束縛系（複合状態）

- 現在までに約380種が観測されている



バリオン：陽子、中性子など

3クォーク qqq



メソン：π 中間子など

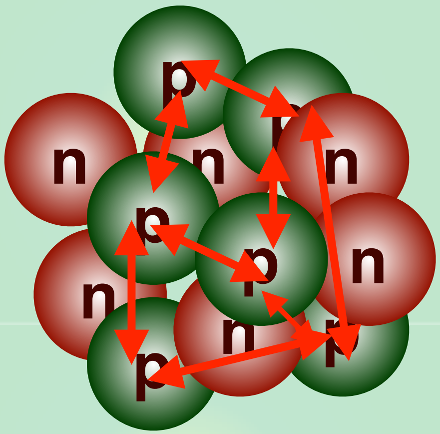
クォーク反クォーク $q\bar{q}$

http://pdg.lbl.gov/

原子核と強い相互作用

原子核：陽子、中性子の自己束縛系（勝手に分解しない）

- 例）$^{12}\mathrm{C}$（炭素）



- 陽子（proton）：電荷 $Q = +1$
- 中性子（neutron）：電荷 $Q = 0$

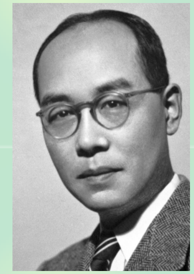
陽子間の電磁気力は斥力

- 強い相互作用：電磁気力に打ち勝って原子核を束縛させる力

核力のメカニズム

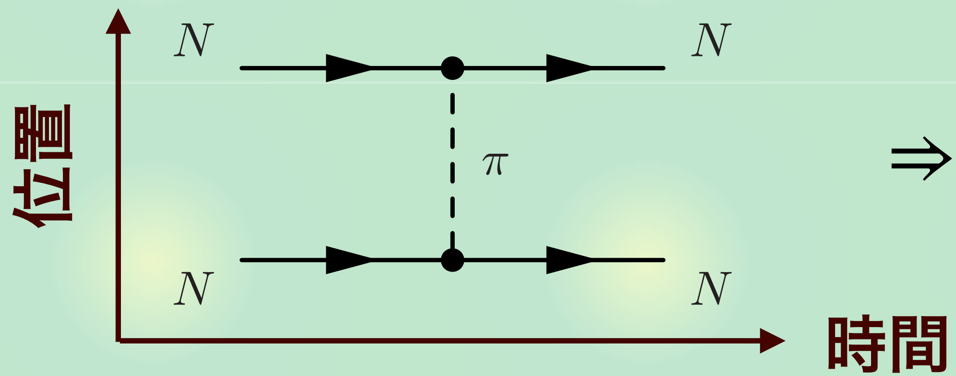
核力は π 中間子の交換で媒介される

(1949年)



https://www.nobelprize.org

- ファインマン図による表現



$$\Rightarrow \quad F \sim \frac{g^2}{4\pi}\frac{\exp\{-\mu r\}}{r^2}$$

- 短距離力：距離 ~ 1 fm 以上ではほとんどゼロ（指数関数的）
- 非中心力：距離 r だけでなく角度などに依存する

重力、電磁気力とは全く性質が異なる

４つの相互作用と素粒子標準理論

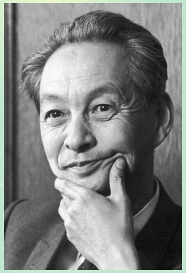
自然界には４つの基本相互作用が存在

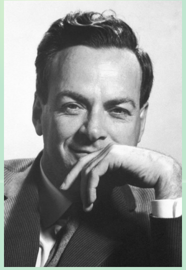
- 重力：ニュートン力学 —> 一般相対性理論

標準理論

- 電磁気力：マクスウェル方程式 —> 量子電磁力学（QED）

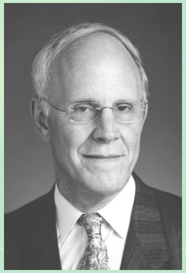
(1965年)





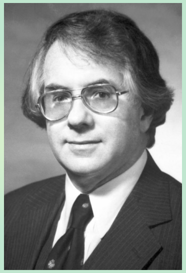
- 強い相互作用：量子色力学（QCD）

(2004年)



- 弱い相互作用：電弱統一理論

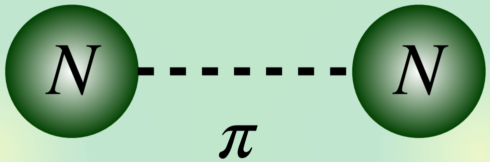
(1979年)

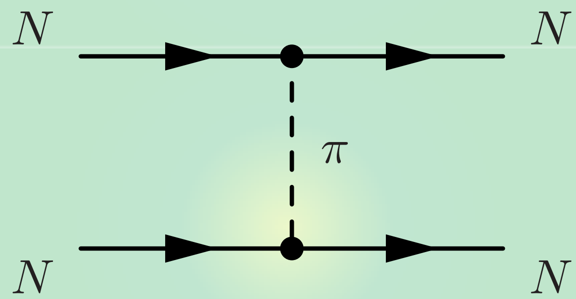


https://www.nobelprize.org

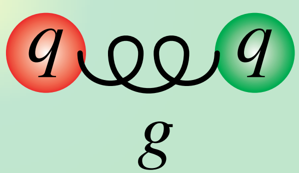
核力とQCDの相互作用

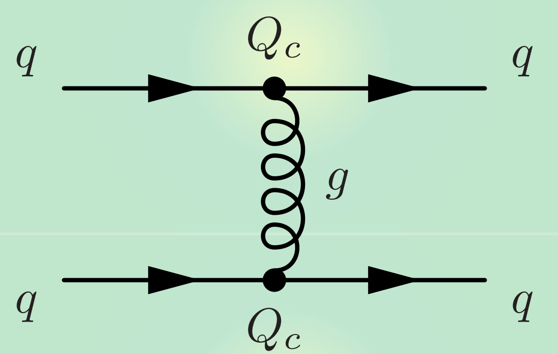
核力：核子間の強い引力





強い相互作用：クォーク・グルーオン間のQCD相互作用





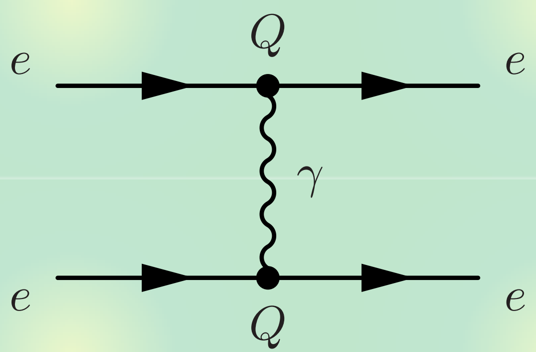
- 核子や中間子もクォーク・グルーオンからできている
- 強い核力の起源もQCDの相互作用

電磁相互作用の基礎理論

量子電磁力学 Quantum Electrodynamics, QED

$$\mathscr{L}_{\mathrm{QED}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{e}(i\gamma^{\mu}D_{\mu} - m)e$$

- 電子 e と光子 γ の理論
- 量子効果を含めて電磁相互作用の全てを記述
- 光子は電荷を持たない：光子間は相互作用しない



$$\Rightarrow \quad F_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q^2}{r^2}$$

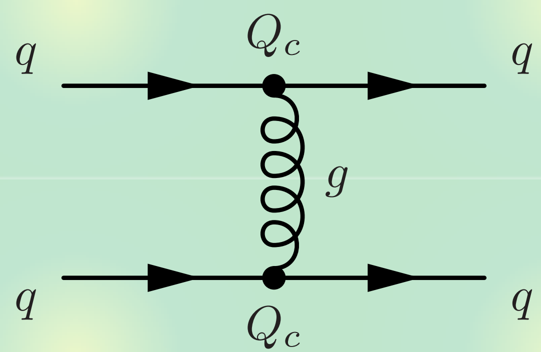
- 電子間の相互作用：クーロン力（+量子効果）

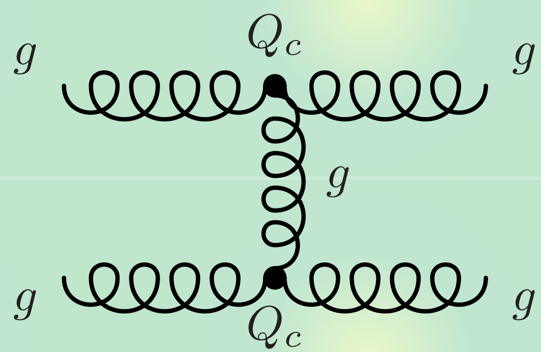
強い相互作用の基礎理論

量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

$$\mathscr{L}_{\mathrm{QCD}} = -\frac{1}{4}G^{a}_{\mu\nu}G^{a,\mu\nu} + \bar{q}_{i,f}(i\gamma^{\mu}(D_{\mu})_{ij} - m_f\delta_{ij})q_{j,f}$$

- クォーク q とグルーオン g の理論
- 量子効果を含めて強い相互作用の全てを記述
- クォークとグルーオンはカラー電荷(a, i, j)を持つ



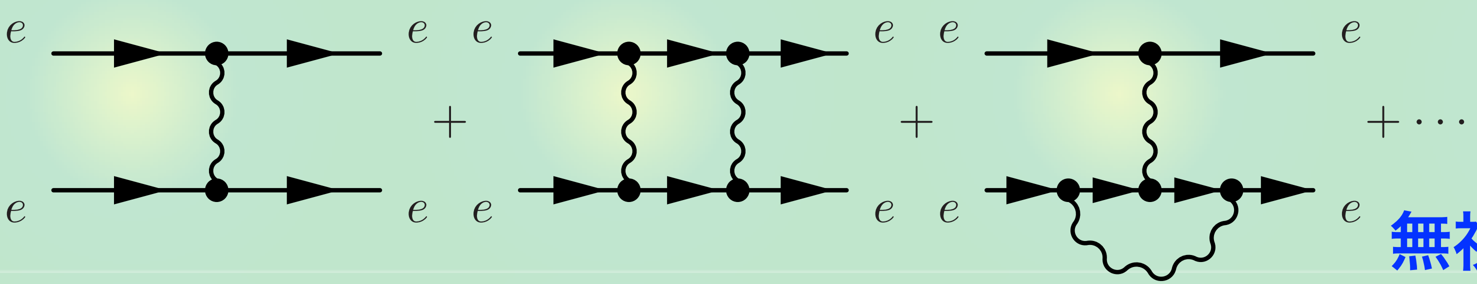


- グルーオン間も相互作用する

量子効果の計算

同じ始状態・終状態のファインマン図を足す（無限個）

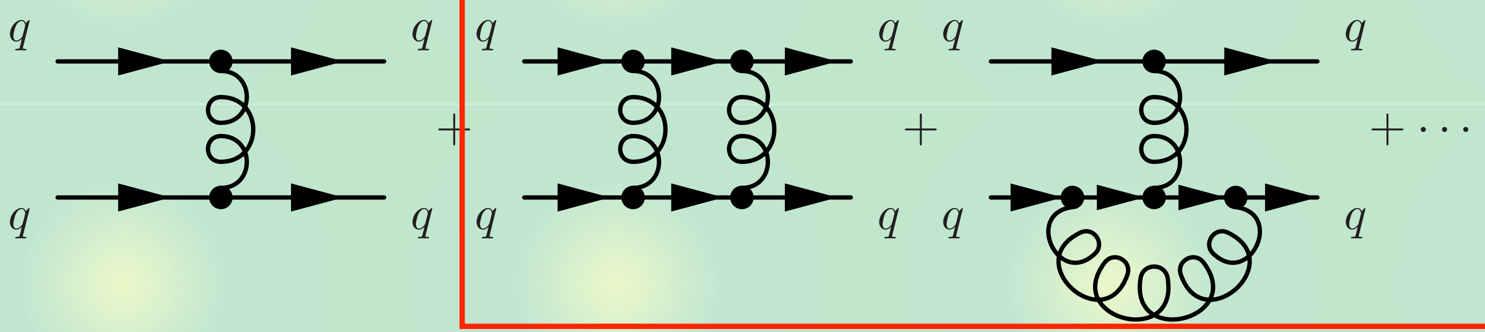
- 電磁相互作用：量子効果が小さい（有限個の計算でOK）



無視できる

- 強い相互作用：量子効果が“強い”

“強い”ので無視できない！



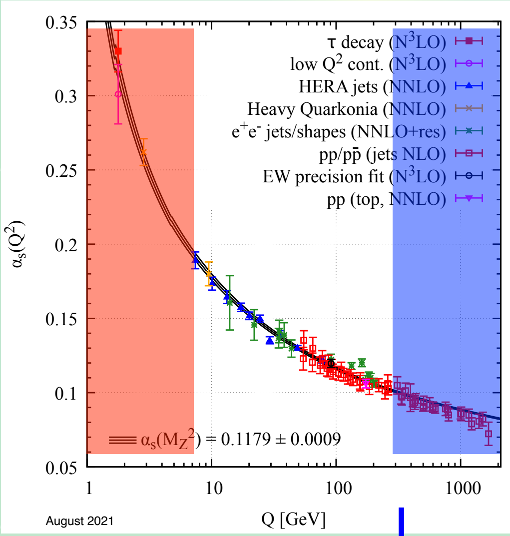
- 理論が分かっているのに解けない（標準理論でQCDだけ）

分かっているのに解けないとは？

漸近自由性

- 高エネルギー：結合定数小（計算可能）
- 低エネルギー：結合定数大（計算不可能）

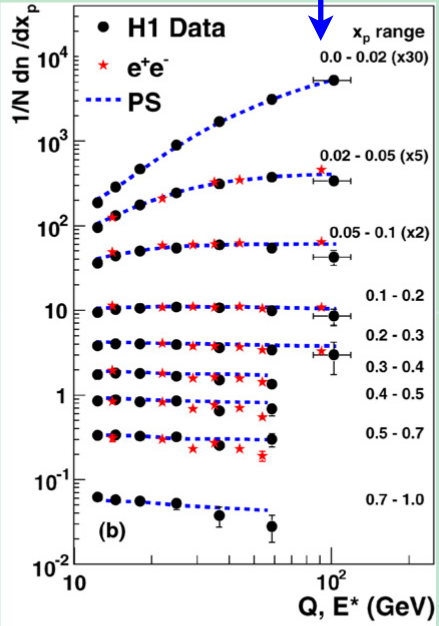
http://pdg.lbl.gov/



深非弾性散乱（高エネルギー電子陽子散乱）

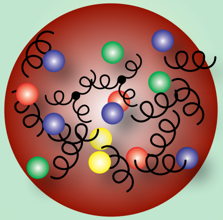
- スケーリングの破れがQCDで説明される
- QCDは高エネルギー実験で検証されている

F.D. Aaron *et al.* (H1 collaboration), PLB 654, 148 (2007)



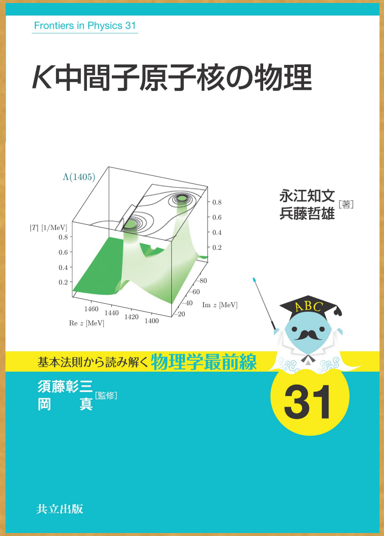
ハドロン物理

- 低エネルギーなので計算できない



目次

- 導入：強い相互作用とハドロン
  - ハドロン物理の難しさ/面白さ
- ハドロン物理とフェムトスコピー
  - ハドロン間相互作用の解明
- フェムトスコピーの応用
  - $K^{-}p$ 相互作用と $\Lambda(1405)$ 共鳴
- まとめ



参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）

観測されているハドロン(2020)

Particle Data Group (PDG) 2020版

http://pdg.lbl.gov/

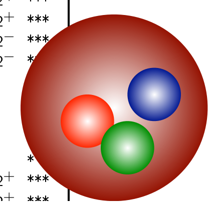
p	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****
$N(1440)$	$1/2^+$	****
$N(1520)$	$3/2^-$	****
$N(1535)$	$1/2^-$	****
$N(1650)$	$1/2^-$	****
$N(1675)$	$5/2^-$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****
$N(1700)$	$3/2^-$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	****
$N(1720)$	$3/2^+$	****
$N(1860)$	$5/2^+$	**
$N(1875)$	$3/2^-$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	****
$N(1900)$	$3/2^+$	****
$N(1990)$	$7/2^+$	**
$N(2000)$	$5/2^+$	**
$N(2040)$	$3/2^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$	***
$N(2100)$	$1/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****
$N(2220)$	$9/2^+$	****
$N(2250)$	$9/2^-$	****
$N(2300)$	$1/2^+$	**
$N(2570)$	$5/2^-$	**
$N(2600)$	$11/2^-$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**

$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1600)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****
$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****
$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*
$\Delta(1900)$	$1/2^-$	***
$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****
$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****
$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***
$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***
$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**
$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****
$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**
$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*
$\Delta(2200)$	$7/2^-$	***
$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**
$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*
$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*
$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**
$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****
$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**
$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**
Λ	$1/2^+$	****
Λ	$1/2^-$	**
$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****
$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	****
$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****
$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	*
$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***
$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***
$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****
$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****
$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****
$\Lambda(2000)$	$1/2^-$	*
$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2070)$	$3/2^+$	*
$\Lambda(2080)$	$5/2^-$	*
$\Lambda(2085)$	$7/2^+$	**
$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****
$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***
$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***
$\Lambda(2585)$		**

Σ^+	$1/2^+$	****
Σ^0	$1/2^+$	****
Σ^-	$1/2^+$	****
$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****
$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*
$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***
$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****
$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***
$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****
$\Sigma(1780)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**
$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	**
$\Sigma(1910)$	$3/2^-$	***
$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****
$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(2010)$	$3/2^-$	*
$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****
$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*
$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*
$\Sigma(2160)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(2230)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(2250)$		***
$\Sigma(2455)$		**
$\Sigma(2620)$		**
$\Sigma(3000)$		*
$\Sigma(3170)$		*

Ξ^0	$1/2^+$	****
Ξ^-	$1/2^+$	****
$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****
$\Xi(1620)$		*
$\Xi(1690)$		***
$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***
$\Xi(1950)$		***
$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}?$	***
$\Xi(2120)$		*
$\Xi(2250)$		**
$\Xi(2370)$		**
$\Xi(2500)$		*
Ω^-	$3/2^+$	****
$\Omega(2012)^-$	$?^-$	***
$\Omega(2250)^-$		***
$\Omega(2380)^-$		**
$\Omega(2470)^-$		**
Λ_c^+	$1/2^+$	****
$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$\Lambda_c(2765)^+$		*
$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$	***
$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***
$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$\Sigma_c(2800)$		***
Ξ_c^+	$1/2^+$	***
Ξ_c^0	$1/2^+$	****
$\Xi_c^{\prime +}$	$1/2^+$	***
$\Xi_c^{\prime 0}$	$1/2^+$	***
$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***
$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***
$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	*
$\Xi_c(2930)$		
$\Xi_c(2970)$		
$\Xi_c(3055)$		
$\Xi_c(3080)$		
$\Xi_c(3123)$		*
Ω_c^0	$1/2^+$	***
$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
$\Omega_c(3120)^0$		***

Ξ_{cc}^{++}		***
Λ_b^0	$1/2^+$	***
$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***
$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***
$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$	***
$\Lambda_b(6152)^0$	$5/2^+$	***
Σ_b	$1/2^+$	***
Σ_b^*	$3/2^+$	***
$\Sigma_b(6097)^+$		***
$\Sigma_b(6097)^-$		***
Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
$\Xi'_b(5935)^-$	$1/2^+$	***
$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***
$\Xi_b(5955)^-$	$3/2^+$	***
$\Xi_b(6227)$		***
Ω_b^-	$1/2^+$	***
$P_c(4312)^+$		*
$P_c(4380)^+$		*
$P_c(4440)^+$		*
$P_c(4457)^+$		*



バリオン~160種

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)

	$I^G(J^{PC})$
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$
• π^0	$1^-(0^{-+})$
• η	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(500)$	$0^+(0^{++})$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$
• $f_1(1285)$	$0^+(1^{++})$
• $\eta(1295)$	$0^+(0^{-+})$
• $\pi(1300)$	$1^-(0^{-+})$
• $a_2(1320)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(1370)$	$0^+(0^{++})$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^{-+})$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^{-+})$
• $h_1(1415)$	$0^-(1^{+-})$
$a_1(1420)$	$1^-(1^{++})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$
• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$
$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$
• $f'_2(1525)$	$0^+(2^{++})$
$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(1570)$	$1^+(1^{--})$
$h_1(1595)$	$0^-(1^{+-})$
• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^{-+})$
• $a_1(1640)$	$1^-(1^{++})$
$f_2(1640)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta_2(1645)$	
• $\omega(16$	
• ω_3	

	$I^G(J^{PC})$
• $\pi_2(1670)$	$1^-(2^{-+})$
• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$
• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$
• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$
• $a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$
$\eta(1760)$	$0^+(0^{-+})$
• $\pi(1800)$	$1^-(0^{-+})$
$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$
$X(1835)$	$?^?(0^{-+})$
• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$
• $\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$
• $\pi_2(1880)$	$1^-(2^{-+})$
$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$
$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$
$a_0(1950)$	$1^-(0^{++})$
• $f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$
• $a_4(1970)$	$1^-(4^{++})$
$\rho_3(1990)$	$1^+(3^{--})$
$\pi_2(2005)$	$1^-(2^{-+})$
• $f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$
$f_0(2020)$	$0^+(0^{++})$
• $f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$
$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$
$f_0(2100)$	$0^+(0^{++})$
$f_2(2150)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(2150)$	$1^+(1^{--})$
• $\phi(2170)$	$0^-(1^{--})$
$f_0(2200)$	$0^+(0^{++})$
$f_J(2220)$	$0^+(2^{++}$ or $4^{++})$
$\eta(2225)$	$0^+(0^{-+})$
$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{--})$
• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$
$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$
$f_0(2330)$	$0^+(0^{++})$
• $f_2(2340)$	$0^+(2^{++})$
$\rho_5(2350)$	$1^+(5^{--})$
$f_6(2510)$	$0^+(6^{++})$

OTHER LIGHT

…her States

STRANGE ($S = \pm1$, $C = B = 0$)

	$I(J^P)$
• $K^\pm$	$1/2(0^-)$
• K^0	$1/2(0^-)$
• K^0_S	$1/2(0^-)$
• K^0_L	$1/2(0^-)$
• $K_0^*(700)$	$1/2(0^+)$
• $K^*(892)$	$1/2(1^-)$
• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$
• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1410)$	$1/2(1^-)$
• $K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$
• $K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$
$K(1460)$	$1/2(0^-)$
$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$
$K(1630)$	$1/2(?^?)$
$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1680)$	$1/2(1^-)$
• $K_2(1770)$	$1/2(2^-)$
• $K_3^*(1780)$	$1/2(3^-)$
• $K_2(1820)$	$1/2(2^-)$
$K(1830)$	$1/2(0^-)$
$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$
$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$
• $K_4^*(2045)$	$1/2(4^+)$
$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$
$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$
$K_5^*(2380)$	$1/2(5^-)$
$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$
$K(3100)$	$?^?(?^{??})$

CHARMED ($C = \pm1$)

• $D^\pm$	$1/2(0^-)$
• D^0	$1/2(0^-)$
• $D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$
• $D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$
• $D_0^*(2300)^0$	$1/2(0^+)$
$D_0^*(2300)^\pm$	$1/2(0^+)$
• $D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$
$D_1(2420)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$
• $D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$
• $D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$
$D(2550)^0$	$1/2(?^?)$
$D_J^*(2600)$	$1/2(?^?)$
$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D(2740)^0$	$1/2(?^?)$
$D_3^*(2750)$	$1/2(3^-)$
$D(3000)^0$	$1/2(?^?)$

CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm1$)

	$I(J^P)$
• $D_s^\pm$	$0(0^-)$
• $D_s^{*\pm}$	$0(?^?)$
• $D_{s0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$
• $D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s2}^*(2573)$	$0(2^+)$
• $D_{s1}^*(2700)^\pm$	$0(1^-)$
$D_{s1}^*(2860)^\pm$	$0(1^-)$
$D_{s3}^*(2860)^\pm$	$0(3^-)$
$D_{sJ}(3040)^\pm$	$0(?^?)$

BOTTOM ($B = \pm1$)

• $B^\pm$	$1/2(0^-)$
• B^0	$1/2(0^-)$
• $B^\pm/B^0$ ADMIXTURE	
• $B^\pm/B^0/B^0_s/b$-baryon ADMIXTURE	
V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements	
• B^*	$1/2(1^-)$
• $B_1(5721)^+$	$1/2(1^+)$
• $B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$
$B_J^*(5732)$	$?(?^?)$
• $B_2^*(5747)^+$	$1/2(2^+)$
• $B_2^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$
$B_J(5840)^+$	$1/2(?^?)$
$B_J(5840)^0$	$1/2(?^?)$
• $B_J(5970)^+$	$1/2(?^?)$
• $B_J(5970)^0$	$1/2(?^?)$

BOTTOM, STRANGE ($B = \pm1$, $S = \mp1$)

• B^0_s	$0(0^-)$
• B^*_s	$0(1^-)$
$X(5568)^\pm$	$?(?^?)$
• $B_{s1}(5830)^0$	$0(1^+)$
• $B_{s2}^*(5840)^0$	$0(2^+)$
$B_{sJ}^*(5850)$	$?(?^?)$

BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm1$)

• B_c^+	$0(0^-)$
$B_c(2S)^\pm$	$0(0^-)$

$c\bar{c}$ (+ possibly non-$q\bar{q}$ states)

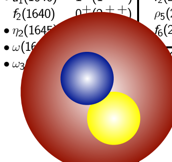
• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
$\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
$h_c(1P)$	$0^-(1^{+-})$
$\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
$\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$
$\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$

$c\bar{c}$ continued

	$I^G(J^{PC})$
• $\psi(3770)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi_2(3823)$	$0^-(2^{--})$
• $\psi_3(3842)$	$0^-(3^{--})$
$\chi_{c0}(3860)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{c1}(3872)$	$0^+(1^{++})$
• $Z_c(3900)$	$1^+(1^{+-})$
• $X(3915)$	$0^+(0/2^{++})$
• $\chi_{c2}(3930)$	$0^+(2^{++})$
$X(3940)$	$?^?(?^{??})$
• $X(4020)^\pm$	$1^+(?^{?-})$
• $\psi(4040)$	$0^-(1^{--})$
$X(4050)^\pm$	$1^-(?^{?+})$
$X(4055)^\pm$	$1^+(?^{?-})$
$X(4100)^\pm$	$1^-(?^{??})$
• $\chi_{c1}(4140)$	$0^+(1^{++})$
• $\psi(4160)$	$0^-(1^{--})$
$X(4160)$	$?^?(?^{??})$
$Z_c(4200)$	$1^+(1^{+-})$
• $\psi(4230)$	$0^-(1^{--})$
$R_{c0}(4240)$	$1^+(0^{--})$
$X(4250)^\pm$	$1^-(?^{?+})$
$\psi(4260)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c1}(4274)$	$0^+(1^{++})$
$X(4350)$	$0^+(?^{?+})$
• $\psi(4360)$	$0^-(1^{--})$
$\psi(4390)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(4415)$	$0^-(1^{--})$
• $Z_c(4430)$	$1^+(1^{+-})$
$\chi_{c0}(4500)$	$0^+(0^{++})$
• $\psi(4660)$	$0^-(1^{--})$
$\chi_{c0}(4700)$	$0^+(0^{++})$

$b\bar{b}$ (+ possibly non-$q\bar{q}$ states)

• $\eta_b(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $h_b(1P)$	$0^-(1^{+-})$
• $\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
$\eta_b(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon_2(1D)$	$0^-(2^{--})$
• $\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
$h_b(2P)$	$0^-(1^{+-})$
• $\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(3S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b1}(3P)$	$0^+(1^{++})$
• $\chi_{b2}(3P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(4S)$	$0^-(1^{--})$
• $Z_b(10610)$	$1^+(1^{+-})$
• $Z_b(10650)$	$1^+(1^{+-})$
$\Upsilon(10753)$	$?^?(1^{--})$
• $\Upsilon(10860)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(11020)$	$0^-(1^{--})$



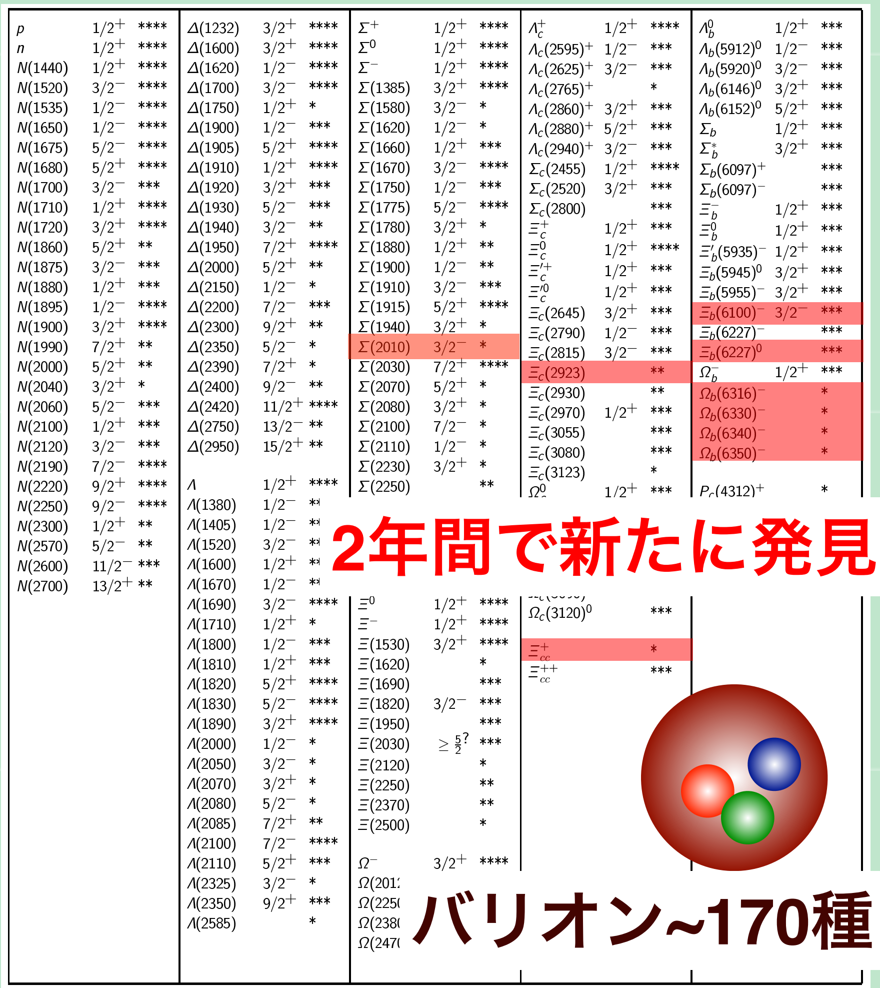
メソン~210種

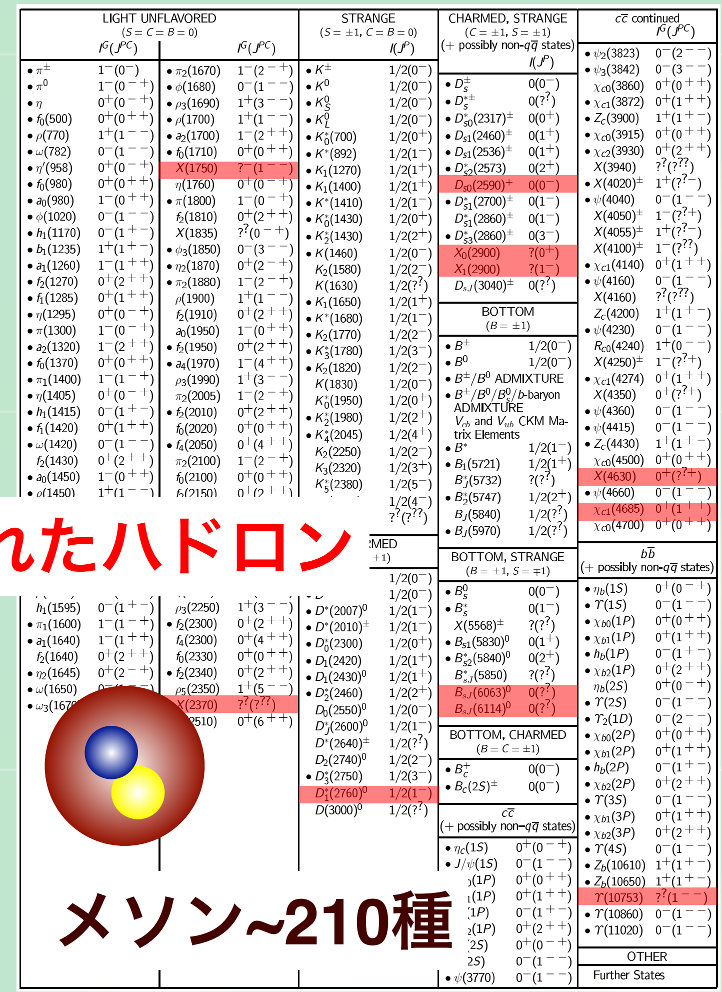
ハドロン物理とフェムトスコピー

観測されているハドロン(2022)

Particle Data Group (PDG) 2022版

http://pdg.lbl.gov/





2年間で新たに発見されたハドロン

バリオン~170種

メソン~210種

全ての ~380種のハドロンはQCDから生じている

エキゾチックハドロン

テトラクォーク粒子 T_{cc} の観測

LHCb collaboration, Nature Phys. 18, 7, 751 (2022); Nature Commun. 13, 1, 3351 (2022)


nature physics

LETTERS

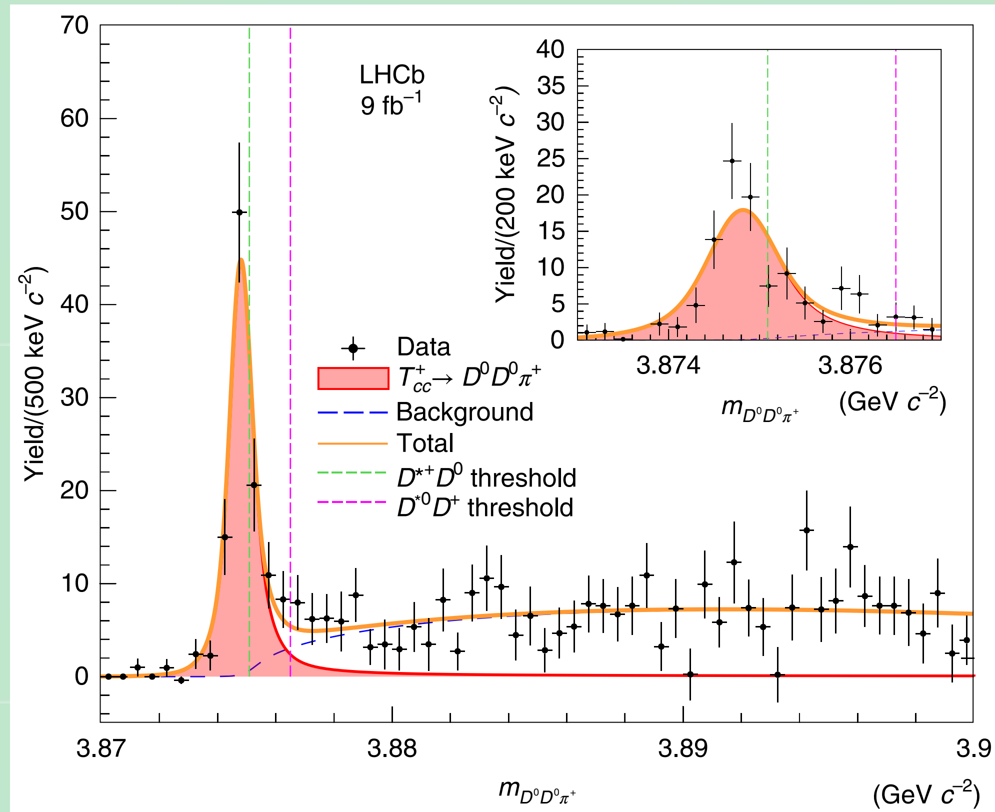
https://doi.org/10.1038/s41567-022-01614-y

Check for updates

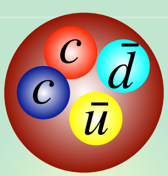
OPEN

Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark

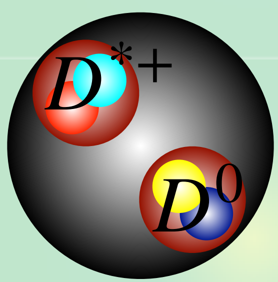
LHCb Collaboration*



- クォーク組成 $\sim cc\bar{u}\bar{d}$
- $q\bar{q}$ で構成できないメソン
- 内部構造は？



？



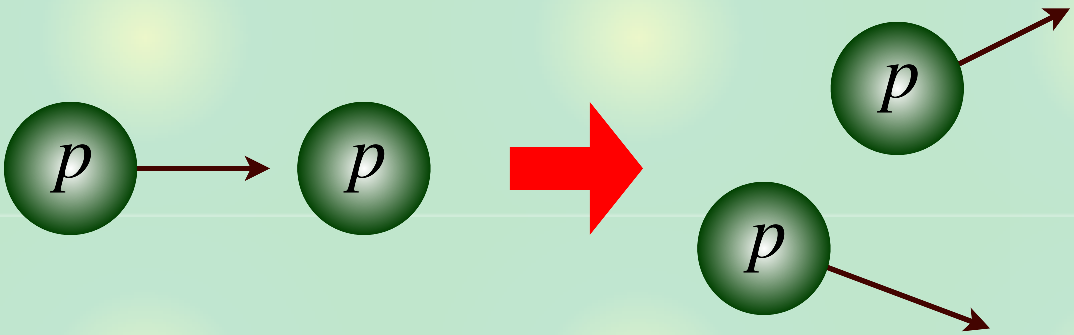
？

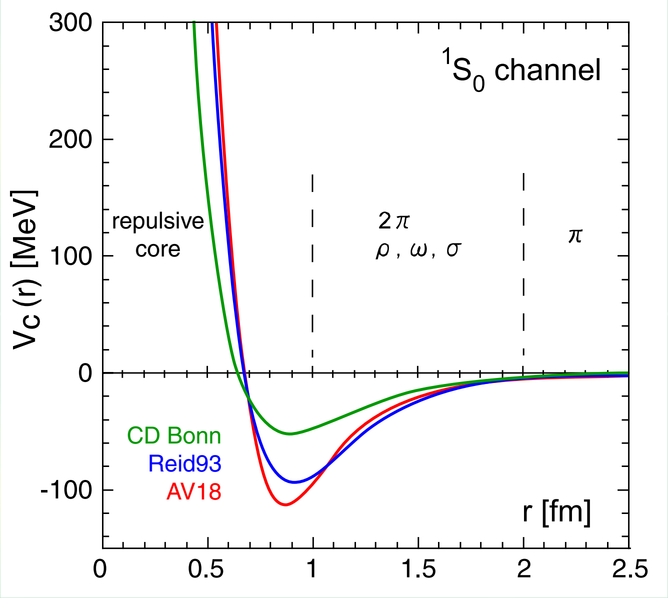
$D^{*+}D^0$ 分子状態：ハドロン間の相互作用？

ハドロン間相互作用

核力の研究

- 散乱実験を行いデータを再現する相互作用を構築する





N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, PRL99, 022001 (2007)

他のハドロン間の相互作用は？

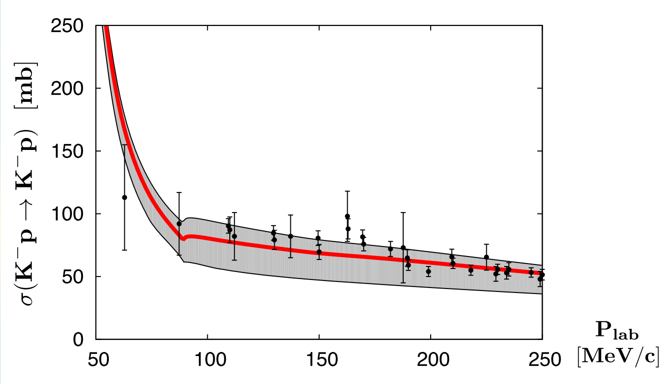
- 標的は安定粒子、ビームは電荷を持っている必要がある

—> 散乱では限られたハドロン対の相互作用しか調べられない

散乱実験とフェムトスコピー

従来の方法：散乱実験

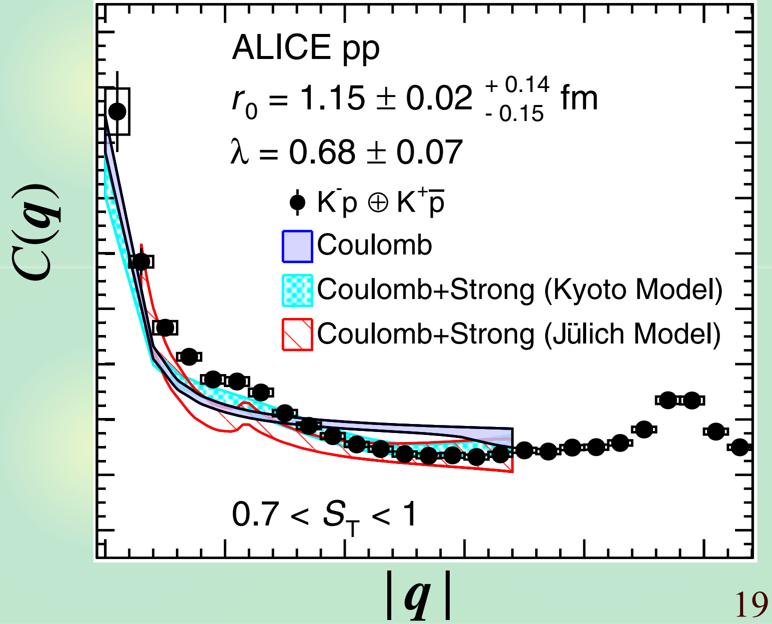
Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011)



- 統計精度が良くない（低エネルギー）
- 限られた系：$NN, \Lambda N, \pi N, KN, \bar{K}N, \cdots$
- ヘビー（c, b）ハドロン：ほぼ不可能

フェムトスコピー：相関関数

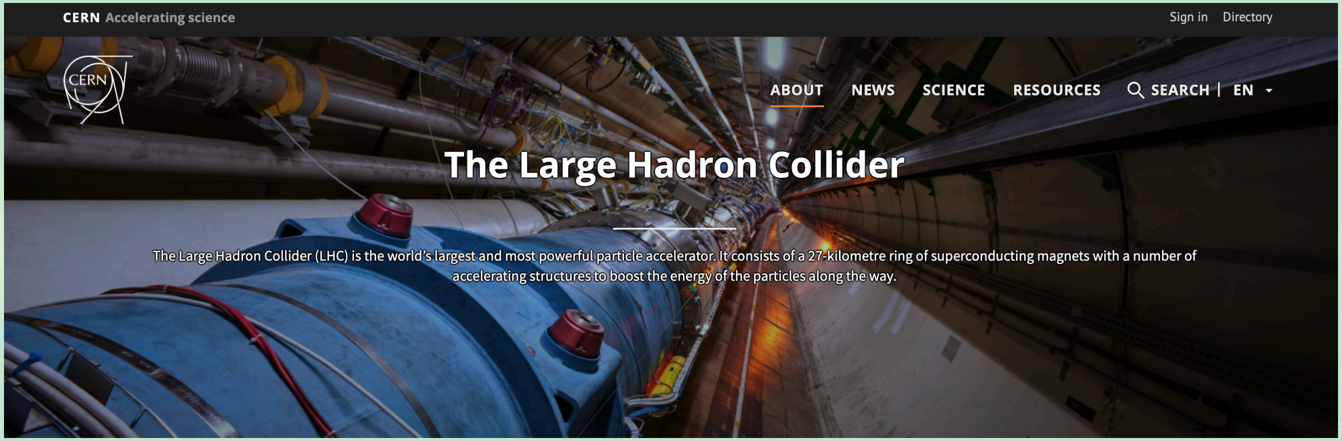
ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)



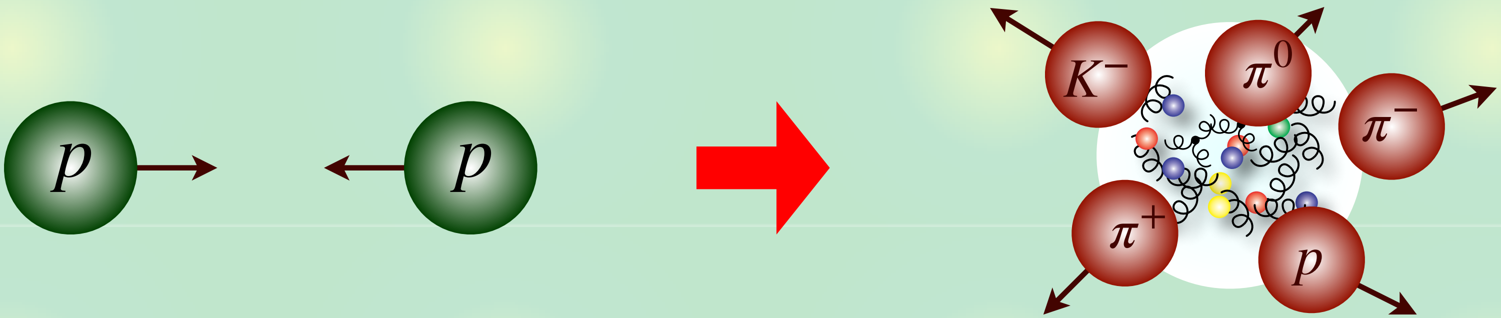
- 高い**精度**
- **様々**な系：$\Lambda\Lambda, N\Xi, N\Omega, \phi N, \bar{K}\Lambda, DN, \cdots$
- **ヘビーハドロン**：可能！

LHC@CERN

高エネルギー衝突実験LHC（Large Hadron Collider）



https://www.home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider

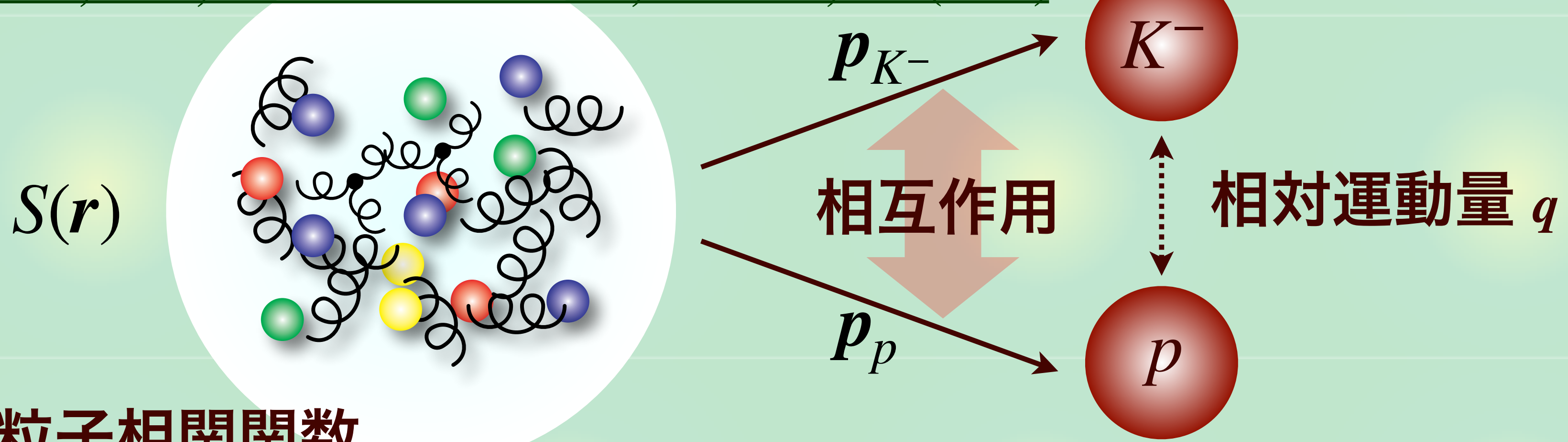


- 光速の99.999999%に加速した陽子や原子核を衝突させる
- 衝突エネルギーを転換し多数のハドロンを生成

相関関数とハドロン相互作用

高エネルギー衝突の統計的なハドロン生成

S. Cho, et al., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)



- 2粒子相関関数

$$C(\boldsymbol{q}) = \frac{N_{K^-p}(\boldsymbol{p}_{K^-}, \boldsymbol{p}_p)}{N_{K^-}(\boldsymbol{p}_{K^-})N_p(\boldsymbol{p}_p)}$$

（相互作用/量子統計が無ければ = 1）

- 計算方法：Koonin-Pratt 公式

S.E. Koonin PLB 70, 43 (1977); S. Pratt, PRD 33, 1314 (1986)

$$C(\boldsymbol{q}) \simeq \int d^3\boldsymbol{r}\ S(\boldsymbol{r})\,|\,\Psi_{\boldsymbol{q}}^{(-)}(\boldsymbol{r})\,|^2$$

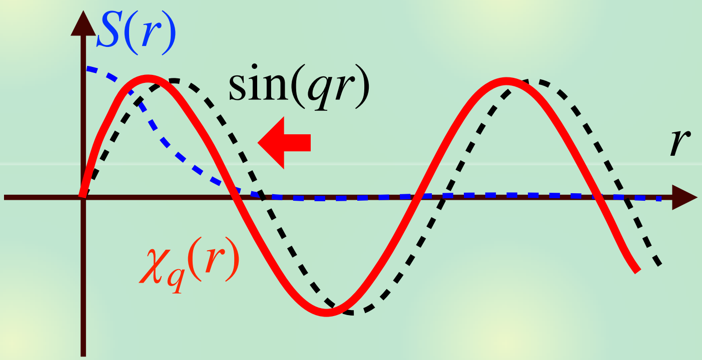
ソース関数 $S(\boldsymbol{r})$（放出源）<—> 波動関数 $\Psi_{\boldsymbol{q}}^{(-)}(\boldsymbol{r})$（相互作用）

波動関数の振る舞いと相関関数

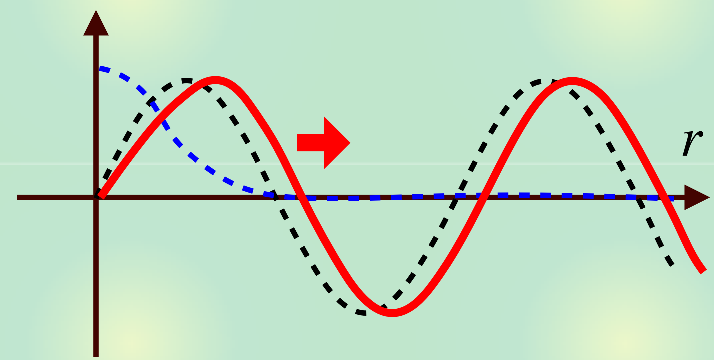
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

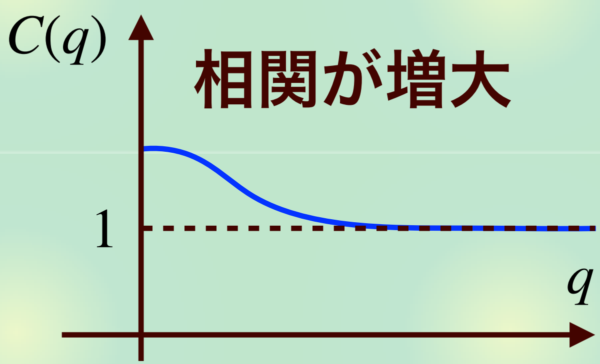
$$C(q) \simeq 1 + \int_0^\infty dr\, S(r)\{\,|\chi_q(r)|^2 - \sin^2(qr)\}$$

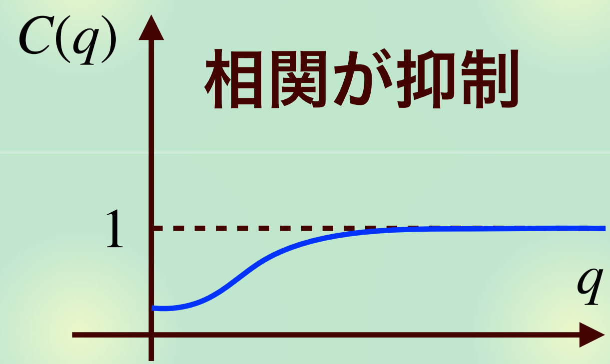
引力



斥力







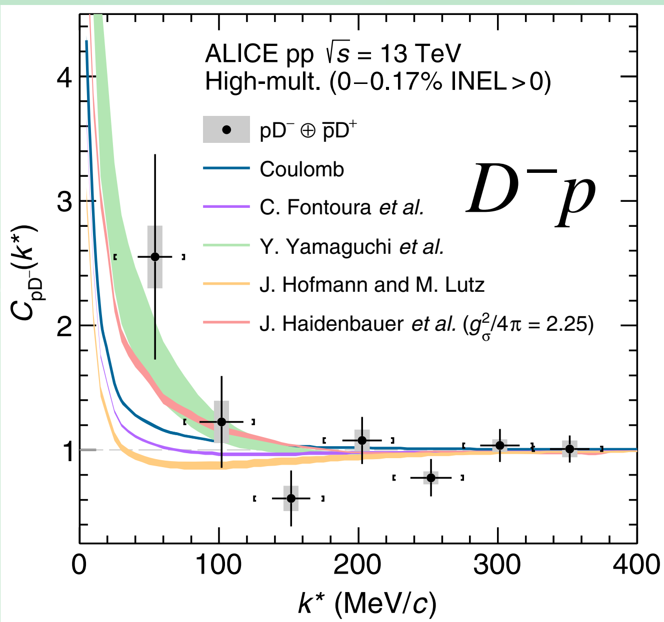
相関の定性的な振る舞いは相互作用の性質を反映

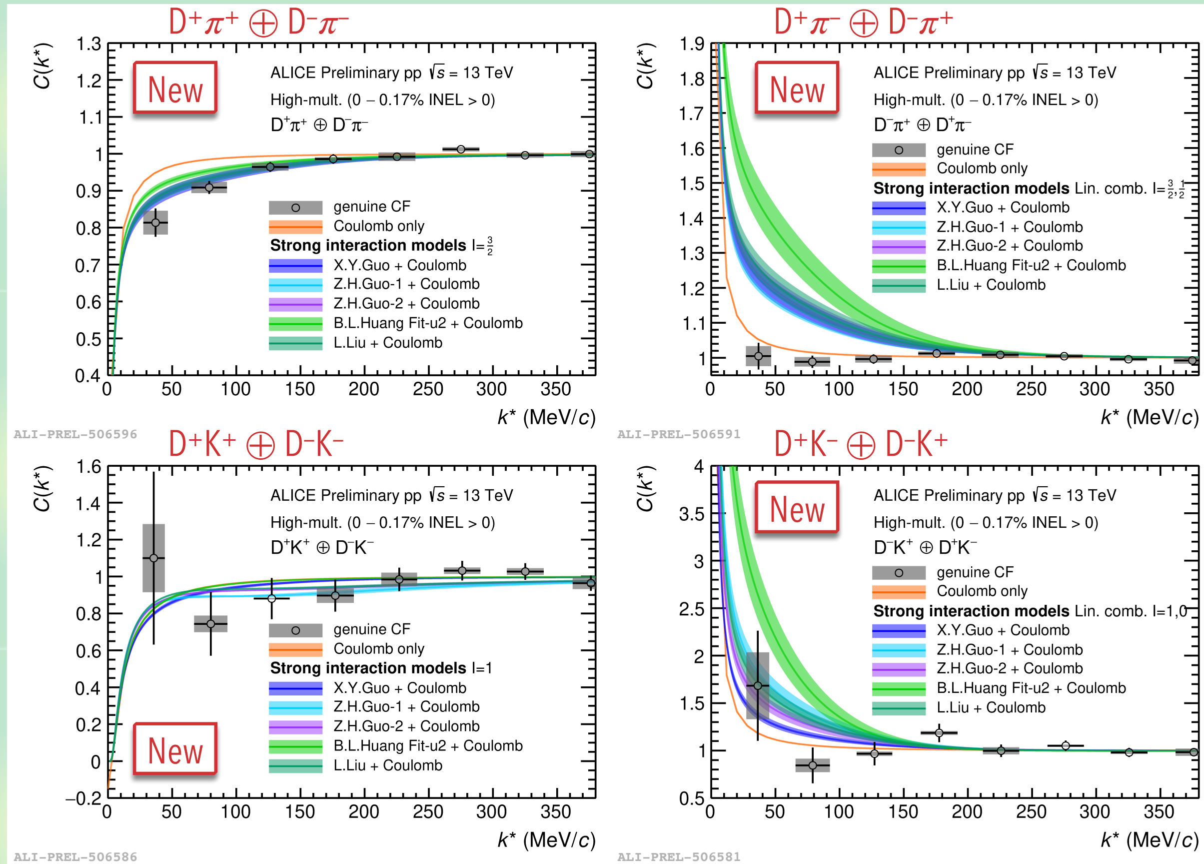
チャームセクターの実験データ

観測されたチャームを含む相関関数：$DN, D\pi, DK$

ALICE collaboration, PRD 106, 052010 (2022);

Talk by F. Grosa @ Quark Matter 2022

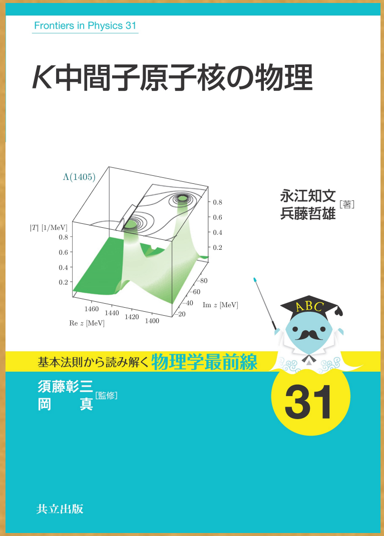




チャーム系で散乱データを得る**唯一の方法**（統計はまだ低い）

目次

- 導入：強い相互作用とハドロン
  - ハドロン物理の難しさ/面白さ
- ハドロン物理とフェムトスコピー
  - ハドロン間相互作用の解明
- フェムトスコピーの応用
  - K^-p 相互作用と $\Lambda(1405)$ 共鳴
- まとめ



参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）

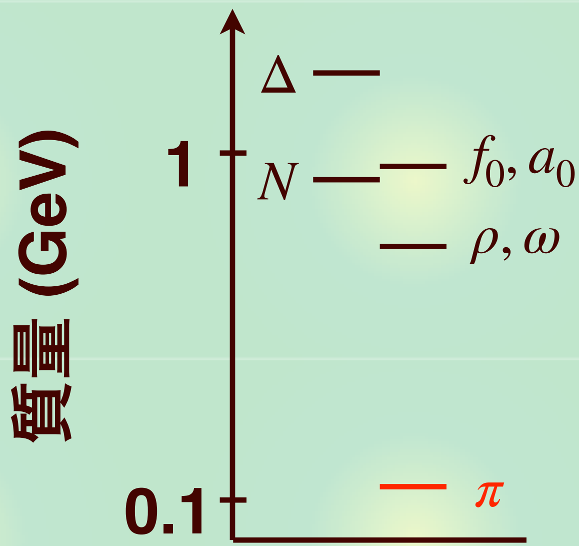
π 中間子とカイラル対称性

多数のハドロンの中で π 中間子だけ有意に軽い

- カイラル対称性の自発的破れ
- 無質量のNambu-Goldstone粒子の出現

Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. 122, 345 (1961); Phys. Rev. 124, 246 (1961)

(2008年)



https://www.nobelprize.org

ハドロンの表記と K 中間子

陽子 p と中性子 n のクォーク組成

$p \sim uud, \quad n \sim udd$ 　まとめて N と表記（核子）

3種の π 中間子とクォーク組成

$\pi^+ \sim u\bar{d}, \quad \pi^0 \sim \frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}, \quad \pi^- \sim d\bar{u}$ 　まとめて π と表記（ π 中間子）

K 中間子：π の u, d クォークを s クォークに置き換えた粒子

$\bar{K}^0 \sim s\bar{d}, \quad K^- \sim s\bar{u}$

まとめて $\bar{K}$ と表記、 s を含む

$\bar{K}$ 中間子（反 K 中間子）

$K^+ \sim u\bar{s}, \quad K^0 \sim d\bar{s}$

まとめて K と表記、 $\bar{s}$ を含む

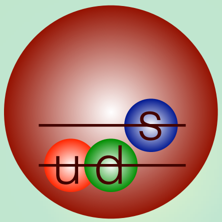
K 中間子

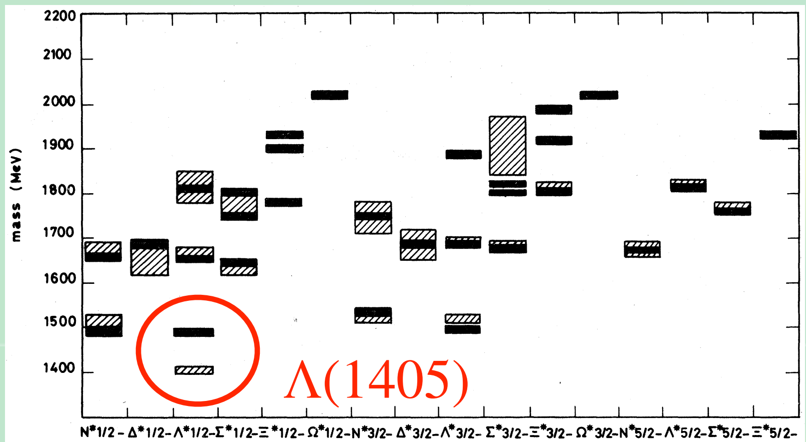
例）$\bar{K}N$ は K^-p や $\bar{K}^0n$ を意味する

$\Lambda(1405)$ と $\bar{K}N$ 散乱

$\Lambda(1405)$ は標準的な描像で記述できない –> エキゾチック候補

N. Isgur and G. Karl, PRD18, 4187 (1978)





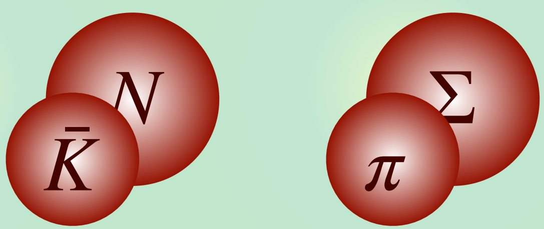
：理論

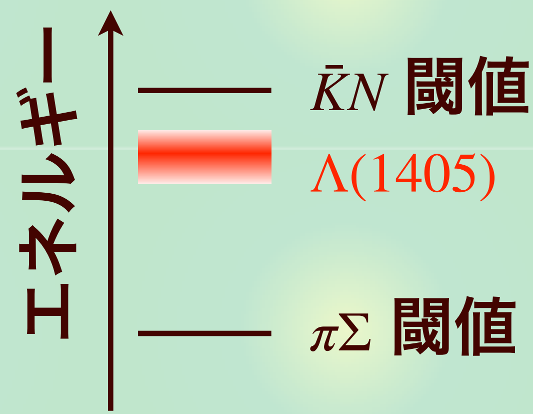
：実験

チャンネル結合散乱での共鳴状態

- MB状態との結合：カイラルSU(3)動力学

永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）



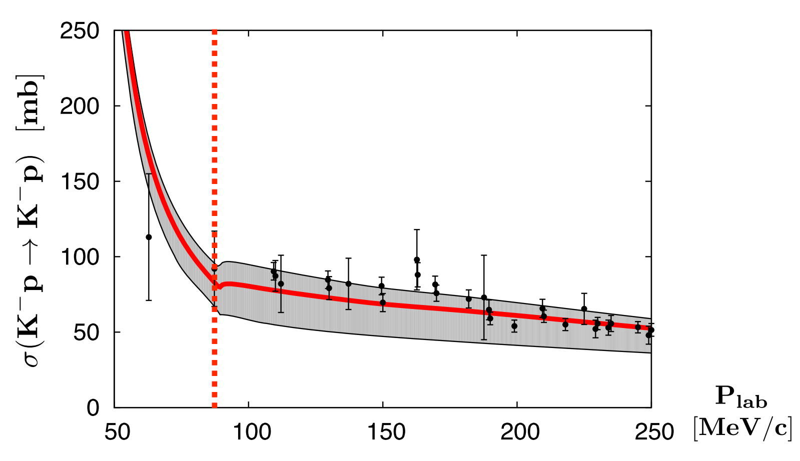


$K^{-}p$ 相関の実験データ

$K^{-}p$ 散乱の全断面積

Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011)

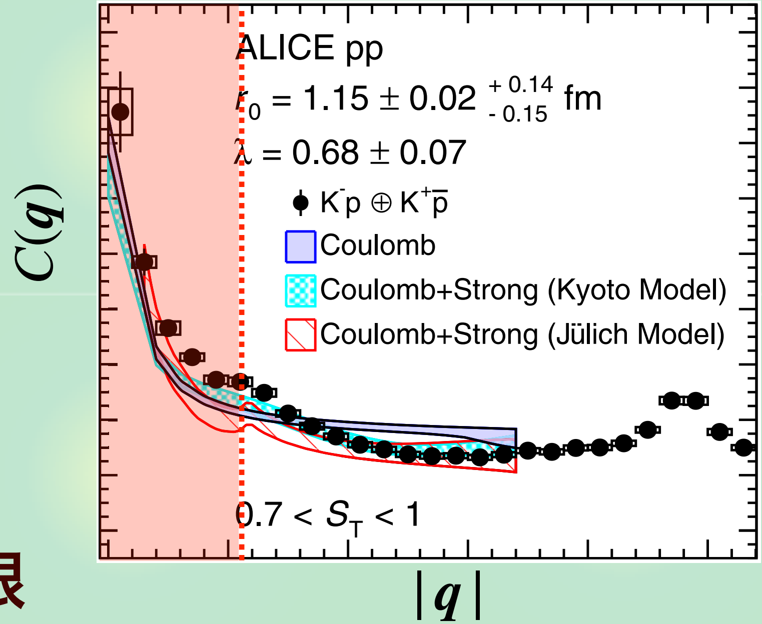
- 古い泡箱のデータ
- 統計精度、解像度が良くない
- $\bar{K}^0 n$ 閾値カスプは見えない



$K^{-}p$ 相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

- 高い**精度**（$\bar{K}^0 n$ カスプが見える）
- $\bar{K}^0 n$ **閾値下**のエネルギーでのデータ



—> Λ(1405) の理論に関する重要な制限

チャンネル結合効果

s波Schrödinger方程式

$$\begin{pmatrix} \frac{-1}{2\mu_1}\frac{d^2}{dr^2} + V_{11}(r) + V_C(r) & V_{12}(r) & \cdots \\ V_{21}(r) & \frac{-1}{2\mu_2}\frac{d^2}{dr^2} + V_{22}(r) + \Delta_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0 n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0 n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix}$$

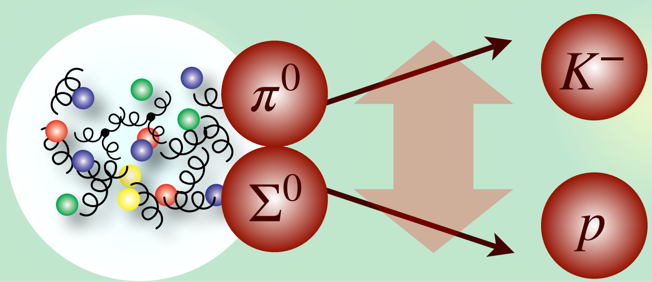
クーロン　閾値エネルギー差（アイソスピンの破れ）

波動関数の漸近形（$r \to \infty$）

$$\begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0 n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} \# e^{-iqr} + \# e^{iqr} \\ \# e^{-iq_2 r} + \# e^{iq_2 r} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

内向き + 外向き

- $\bar{K}^0 n, \pi^+\Sigma^-, \pi^0\Sigma^0, \pi^-\Sigma^+, \pi^0\Lambda$ からの遷移が $\chi_i(r)\ i \neq K^-p$ に含まれる



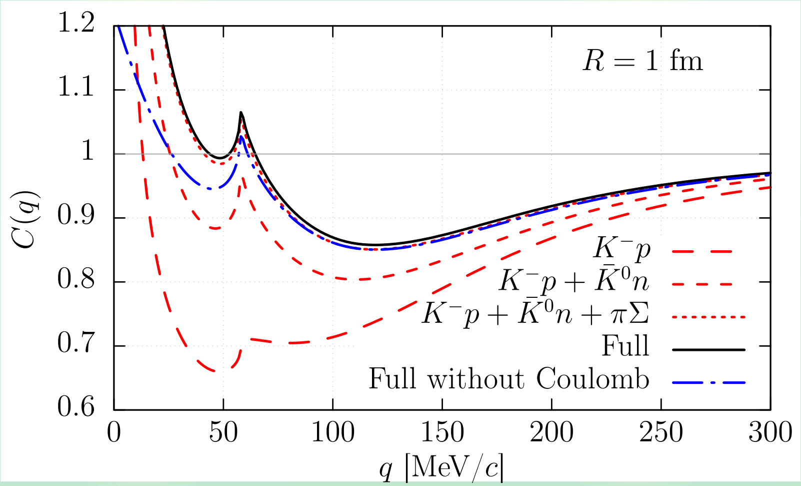
チャンネル結合と相関関数

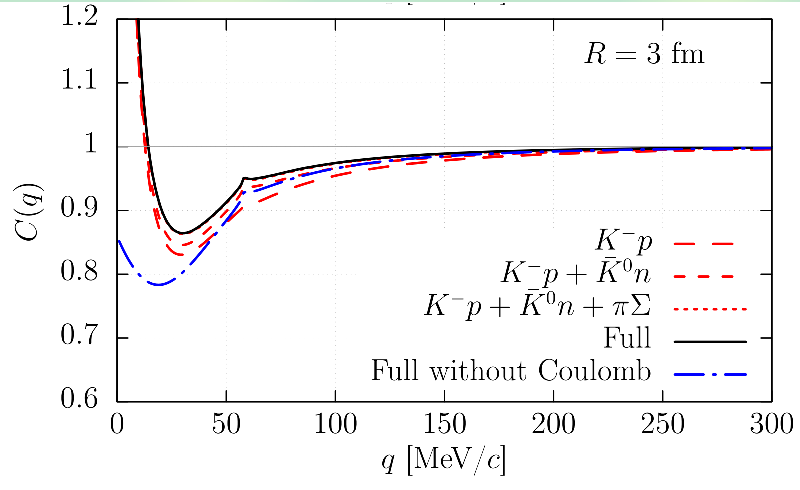
チャンネル結合Koonin-Pratt公式

R. Lednicky, V.V. Lyuboshitz, V.L.Lyuboshitz, Phys. Atom. Nucl. 61, 2950 (1998);
J. Haidenbauer, NPA 981, 1 (2019);
Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

$$C_{K^-p}(\boldsymbol{q}) \simeq \int d^3\boldsymbol{r}\ S_{K^-p}(\boldsymbol{r})\,|\,\Psi^{(-)}_{K^-p,\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{r})\,|^2 + \sum_{i\neq K^-p} \omega_i \int d^3\boldsymbol{r}\ S_i(\boldsymbol{r})\,|\,\Psi^{(-)}_{i,\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{r})\,|^2$$

- $\bar{K}^0n, \pi^+\Sigma^-, \pi^0\Sigma^0, \pi^-\Sigma^+, \pi^0\Lambda$からの遷移
- ω_i：K^-p に対するチャンネル i の重み





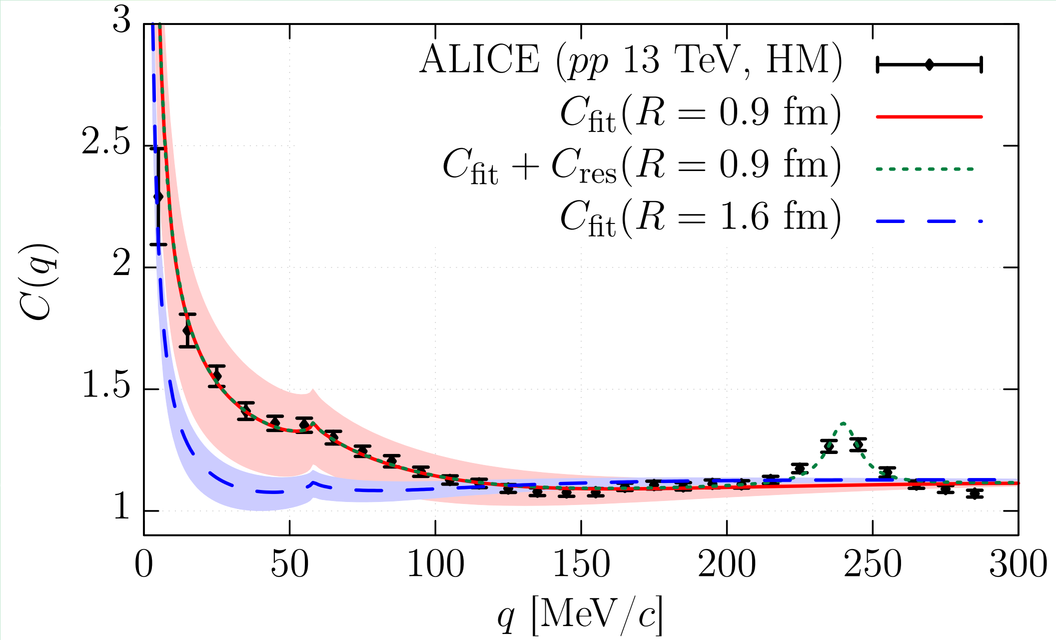
チャンネル結合効果は小さいソースで顕著

カイラルSU(3)動力学による相関関数

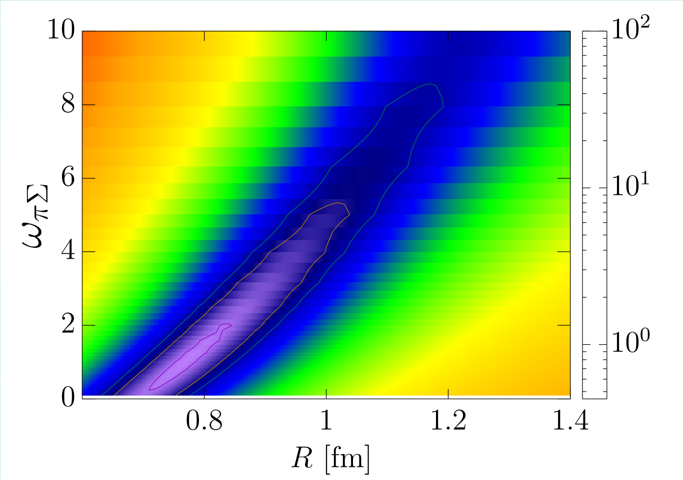
波動関数 $\Psi^{(-)}_{i,q}(r)$ **：チャンネル結合京都** $\bar{K}N$-$\pi\Sigma$-$\pi\Lambda$ **ポテンシャル**

K. Miyahara, T. Hyodo, W. Weise, PRC98, 025201 (2018)

- **ソース関数** $S(r)$ **：ガウシアン,** $R \sim 1$ fm **<—** $K^{+}p$ **データ**
- **重み** $\omega_{\pi\Sigma} \sim 2$ **：統計模型による見積もり**



reduced χ^2



Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

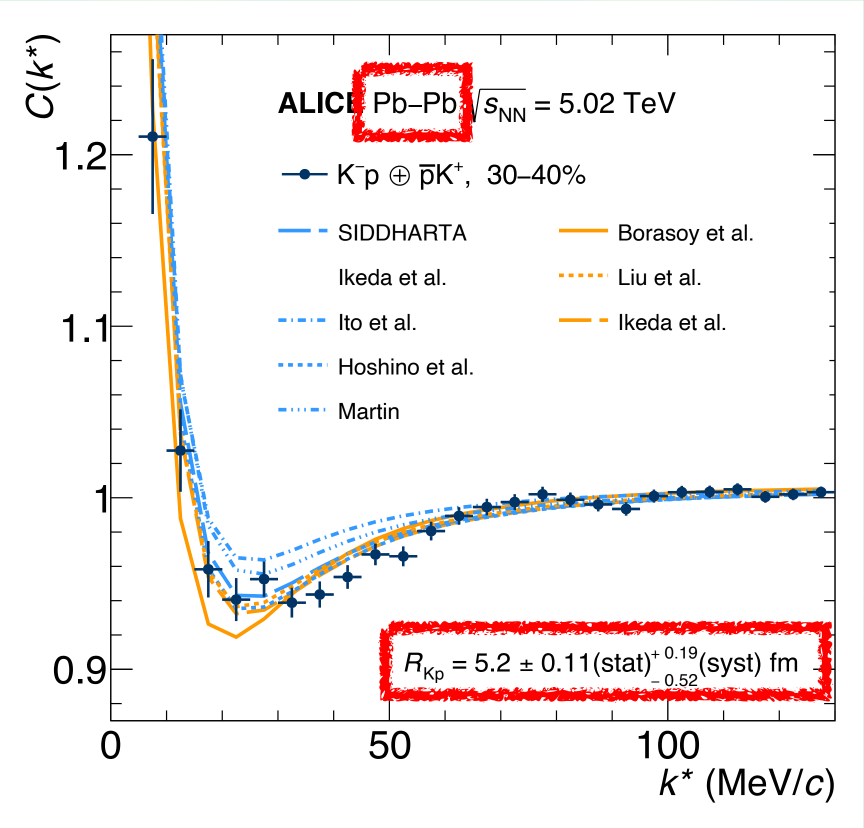
ALICEの相関関数データをよく再現する

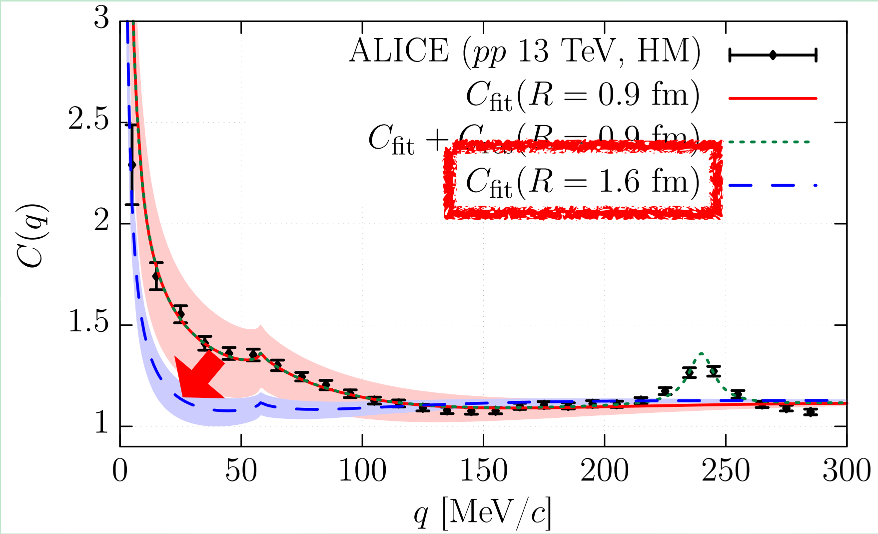
ソースサイズ依存性

5.02 TeV Pb-Pb 衝突のデータ

ALICE collaboration, PLB 822, 136708 (2021)

- 散乱長 $a_{K^-p} = -0.91 + 0.92i$ fm





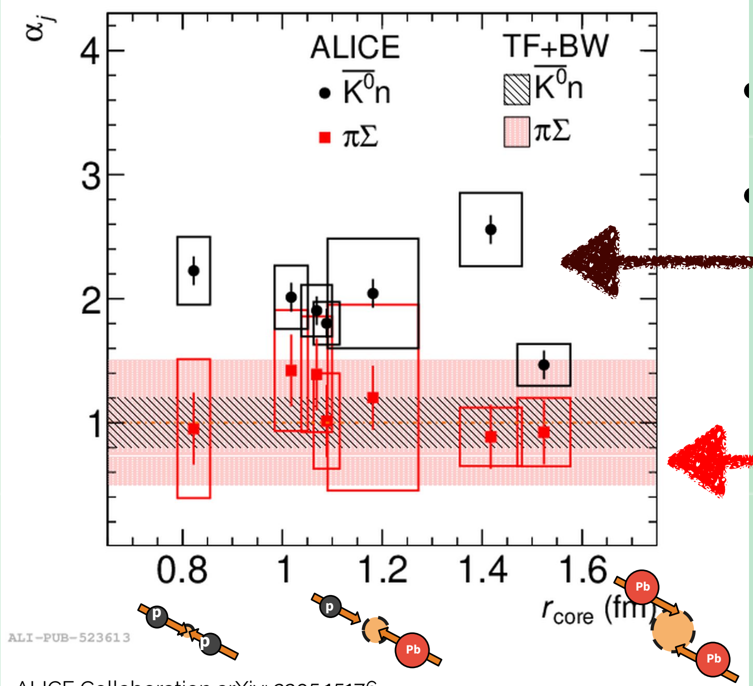
サイズ R の大きいソースで相関が抑制 <— 理論の予言

ソースサイズ依存性の体系的な研究

pp, p-Pb, Pb-Pb衝突での相関関数

ALICE collaboration, EPJC 83, 340 (2023)

$$C_{K^-p}(\boldsymbol{q}) \simeq \int d^3\boldsymbol{r}\, S_{K^-p}(\boldsymbol{r})\,|\Psi^{(-)}_{K^-p,\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{r})|^2 + \sum_{i\neq K^-p} \omega_i \int d^3\boldsymbol{r}\, S_i(\boldsymbol{r})\,|\Psi^{(-)}_{i,\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{r})|^2$$



ALICE Collaboration arXiv: 2205.15176

データを説明するために
必要な増加因子

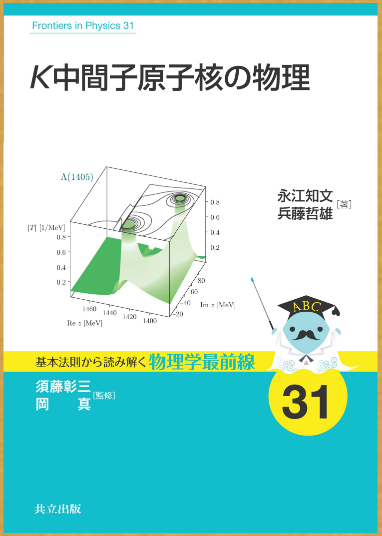
理論的に予想される ω_i の値

$\pi\Sigma$ 相互作用はOK

$\bar{K}^0 n$ チャンネルの相互作用を改善する余地がある？

まとめ

- 強い相互作用：QCD（クォーク・グルーオンの理論）から多様なハドロンの性質が生じる
- フェムトスコピー：従来不可能だったハドロン間相互作用が検証可能に
- 実際の K^-p 相互作用の研究に応用され新たな情報が得られている



参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）