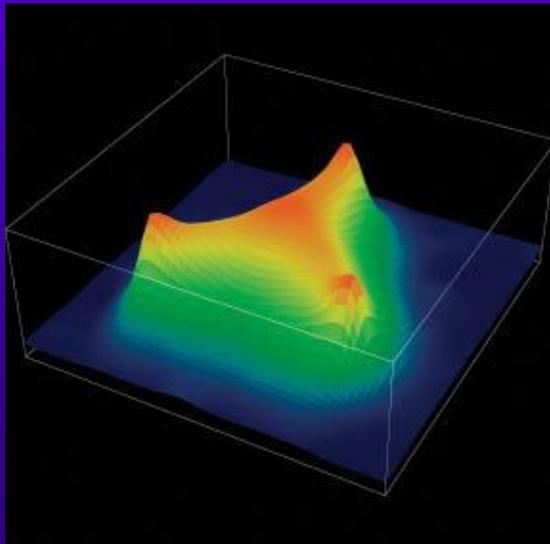
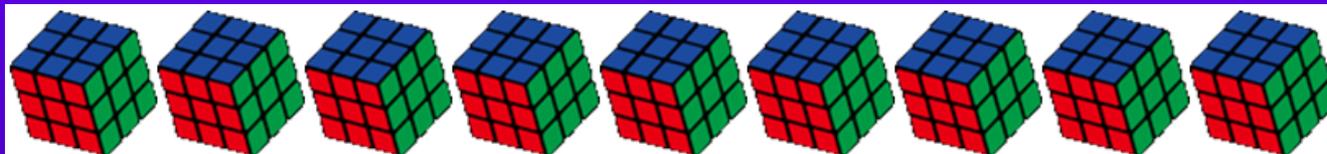


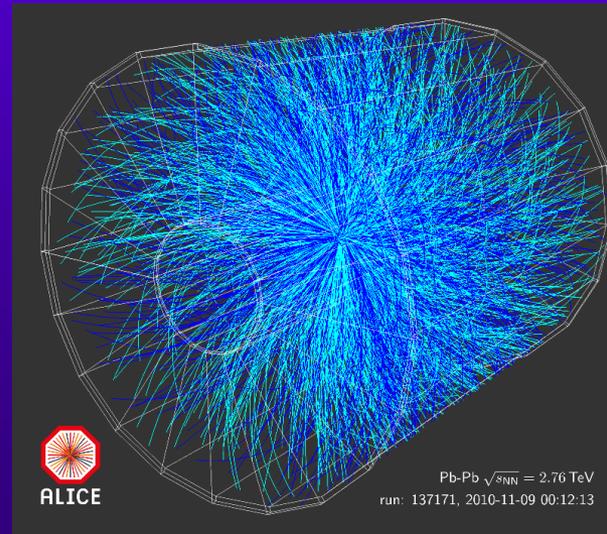
クォーク・グルーオンが織りなす多彩な極微の世界

～量子色力学(QCD)の物理と2兆度の極限世界～

京都大学 理学研究科 菅沼 秀夫



Lattice QCD result for Baryon Structure
H. Ichie et al. (2003)



Quark-Gluon-Plasma Creation Experiment
ALICE, LHC

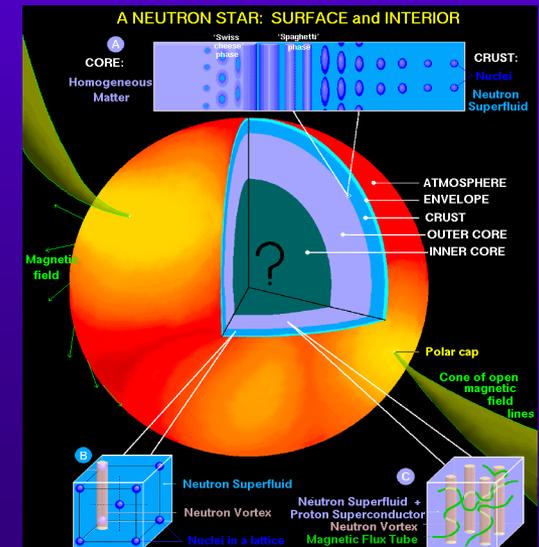


Image figure of Neutron Star Structure
by Dany Page

講演概要

クォークが提唱されてから60年近く経ちますが、この素粒子は未だに多くの謎を秘めています。

例えば、クォーク自身は単独では現れ得ず、陽子や中性子などの内部に閉じ込められていますが、なぜそうなるのかは数学的には解明されていません。

また、物質を構成するクォークは、元々はとても軽かったのですが、グルーオンとの相互作用により非常に重くなり、それが大部分の物質質量の起源になっています。

これらクォークの諸性質は、約2兆度の超高温で大きく変化し、真空自身の構造の転移を経て、クォークとグルーオンのプラズマ状態になります。

こういった「クォークとグルーオンが織りなす多様な極微の世界」を最近の研究成果もまじえて概観します。

目次

1. 物質根源の究極を目指す～科学の1つの潮流と物質観の変遷
2. クォークと量子色力学(QCD)の物理の概観
3. 物質質量の起源:カイラル対称性の自発的破れ
～物質質量の約99%を創り出すQCD
4. 様々なハドロン中でのクォーク閉じ込めの様相
5. クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP):
2兆度の世界と宇宙の初期状態
6. 未解決問題「クォークの閉じ込め」に対する双対超伝導描像



宇宙

銀河団

銀河系

恒星系

生物

熱力学

物性系

統計力学

原子・分子

原子核

ハドロン

素粒子

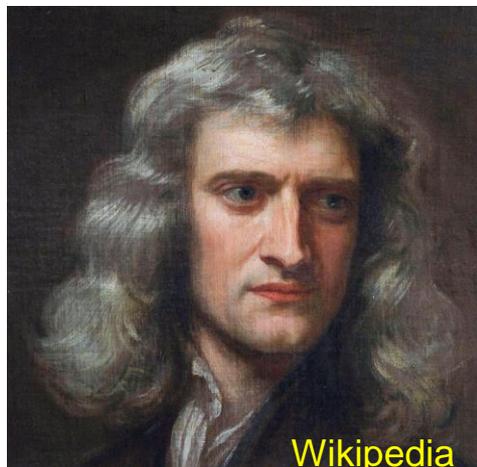
特殊相対論 (クォーク・グルーオンなど)

光速 c に近い速度の系

(= 運動エネルギーが質量エネルギーと同程度またはそれ以上の系)

相対性理論

世界の全体像



ニュートン力学

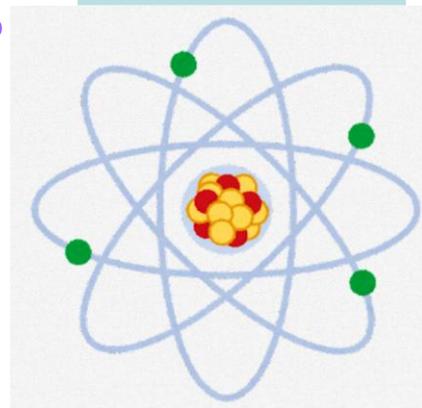
電磁気学

作用が \hbar 以下の系

世界の成り立ち

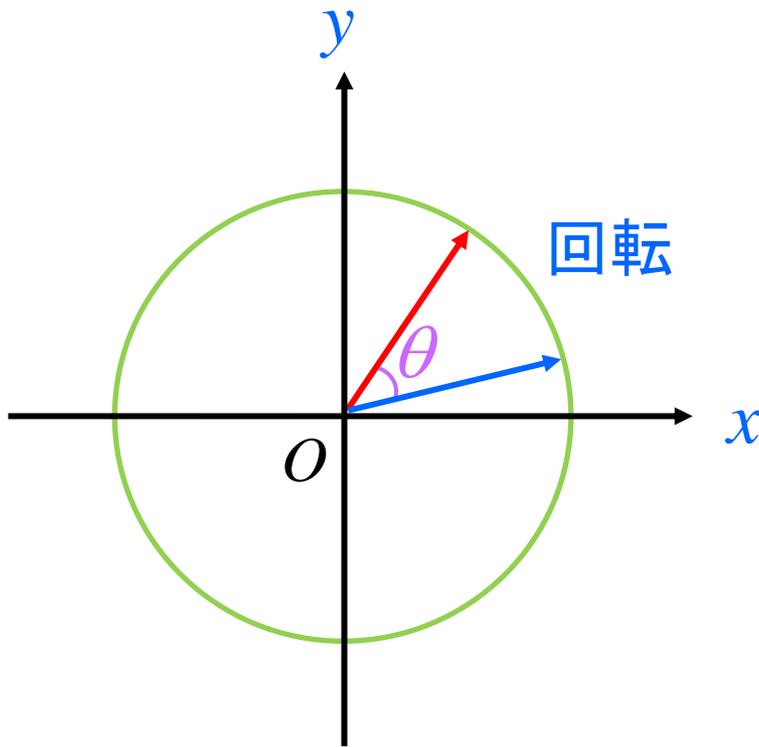


量子力学



自然界の階層性

特殊相対性理論：数学的には複素ベクトルの虚数角の回転



回転変換

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

ローレンツ変換：慣性系間の変換

$$\begin{pmatrix} ct' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \theta & -\sinh \theta \\ -\sinh \theta & \cosh \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ z \end{pmatrix}$$



$$\theta = \operatorname{arctanh}(v/c)$$

$$\begin{pmatrix} ict' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(i\theta) & -\sin(i\theta) \\ \sin(i\theta) & \cos(i\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ict \\ z \end{pmatrix}$$

回転と同じ表式！

もし t や θ が純虚数なら回転

実際の t や θ は実数なので双曲線

特殊相対論は、複素数を直観で理解できる超人には、「時空の回転」の一種として簡単に理解できるかも知れない

量子力学:「物理量」の概念そのものの難解な根本的変革を伴う

・例えば、空間座標 x を基準に考えると
運動量 p は、 x での微分(演算子)で表せる
(Schrödingerの波動力学, 1926)

$$p = -i\hbar \frac{d}{dx}$$

・あるいは、物理量は(∞ 行 ∞ 列の)行列で表せる
(Heisenbergの行列力学, 1925)

$$\hbar = h/2\pi$$

(ディラック定数)

・観測される測定値は実数固有値や波動関数での期待値 ~ 確率的

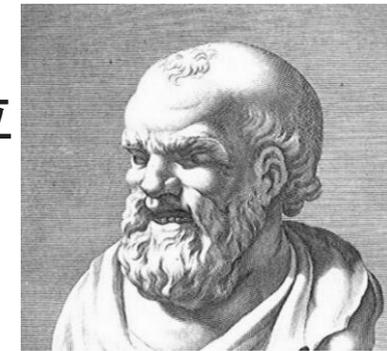
量子論+特殊相対論 → 量子場の理論 : 物質観の革命

“真空” というデバイス上の動画が我々の世界

全ての物体は、“真空”という「画面」上の
「画像」のようなもので、そこでのドットは
RGBの代わりに電子や光やクォークなど。
「物体の運動」は、画面上の「点滅が変化」
し、「画像」が動いたように見えるだけ。

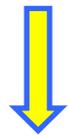


科学のひとつの潮流: 物質の究極形態をめざす

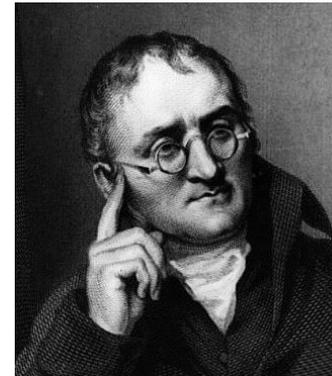


デモクリトス (460BC~370BC)

アトム: 生成も消滅もしない **分割不可能**な自然の最小単位

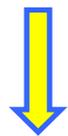


近代原子分子論: ドルトン、アボガドロ



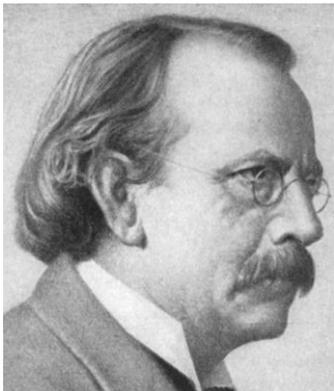
19世紀初頭

1869年



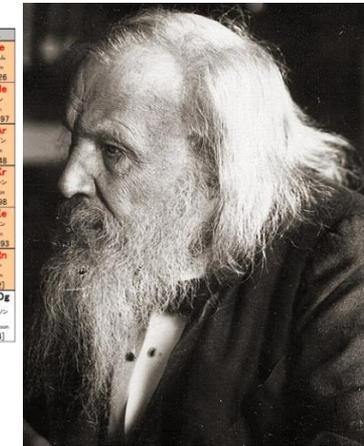
原子の周期律: **メンデレーエフ**
~ 原子の内部構造を示唆?

原子番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素																	2 He ヘリウム
2	3 Li リチウム	4 Be ベリリウム																10 Ne ネオン
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム																18 Ar アルゴン
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As アセチン	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルビジウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57 La ラランタン	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスマニウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマuth	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89 Ac アクチン	104 Rf ラザフォード	105 Db ドブニウム	106 Sg シーボーグ	107 Bh ボヘリウム	108 Hs ハセリウム	109 Mt ミーテネウム	110 Ds ダームシュタット	111 Rg レグネリウム	112 Cn コホナヒウム	113 Nh ニホニウム	114 Fl フルロビウム	115 Mc モスコウィウム	116 Lv リバモヴィウム	117 Ts テネシウム	118 Og オガネソン
※1 ランタノイド系	57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユウロピウム	64 Gd ガドリウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホウメリウム	68 Er エルビウム	69 Tm テュリウム	70 Yb イットリウム	71 Lu ルテチウム			
※2 アクチノイド系	89 Ac アクチン	90 Th トランシウム	91 Pa プロトアクチン	92 U ウラン	93 Np ネプチウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm カリフォルニウム	97 Bk ベルグショウム	98 Cf カリフォルニウム	99 Es エイスンシュタット	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデルセーヴィチウム	102 No ノボボロフ	103 Lr ルースベリウム			



1897年

電子の発見: **トムソン**

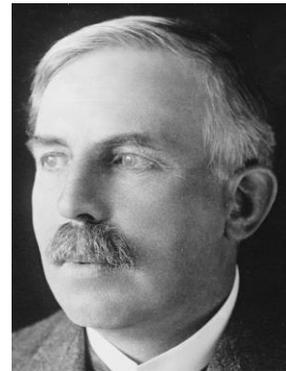
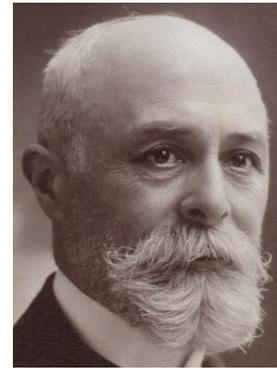


Figures from Wikipedia

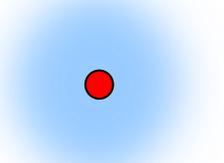
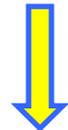
科学のひとつの潮流：物質の究極形態をめざす

放射線と放射性元素：ベクレル、キュリー

19世紀末～20世紀初頭

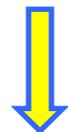


1911年
原子核の発見：ラザフォード



1925, 26年

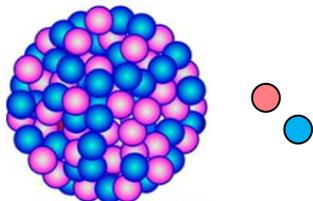
量子力学：ボーア、ハイゼンベルク、シュレディンガー



1932年
中性子の発見：チャドウィック



→量子多体系
としての原子核



Portraits from
Wikipedia

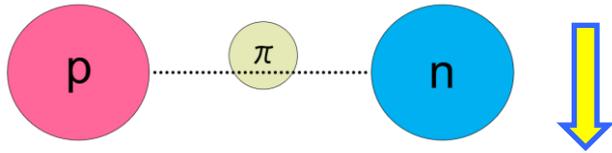
科学のひとつの潮流：物質の究極形態をめざす

1935年

核力と中間子：湯川秀樹

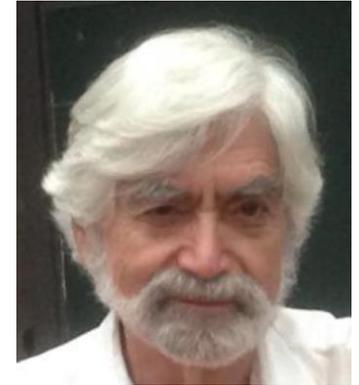
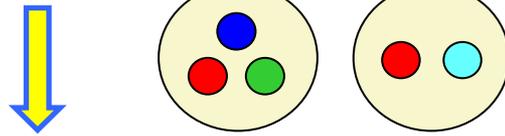


Portraits from
Wikipedia



クォーク模型：ゲルマン、ツヴァイク

1964年



量子色力学 (QCD)：クォークとグルーオンの理論～強い力の基礎理論

1966年提唱(南部)、1973年確立(トーフット、グロス、ウイルチェック、ポリッツァー)



物性物理学～電磁相互作用の物理

原子・分子 電磁気力が主役

$\text{\AA} \sim 10^{-8}\text{cm}$

電子雲



原子核

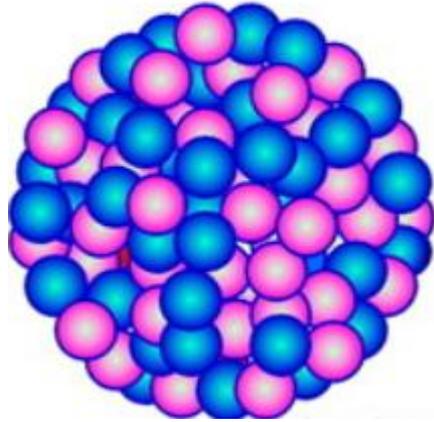
$\text{fm} \sim 10^{-13}\text{cm}$



原子核

物性物理学での原子核：点状の(スピンを持った)電荷
～電磁気力の源

原子核：核子（陽子・中性子）の集合体



$$\text{fm} = 10^{-13}\text{cm}$$

原子・分子より 5桁 小さい世界
100,000分の1

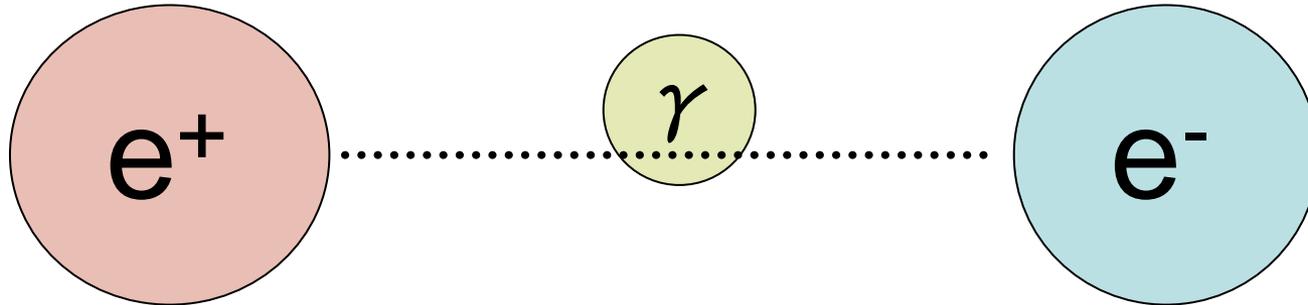
↓
物性系より エネルギースケールが 5桁 大きい世界
100,000倍

核子は電磁気力（陽子間のクーロン反発力）よりも
遥かに強い力で束縛されている

核子を結びつけている強い力 ～ 核力

湯川秀樹の中間子論: 核力の起源の探究

電磁気力

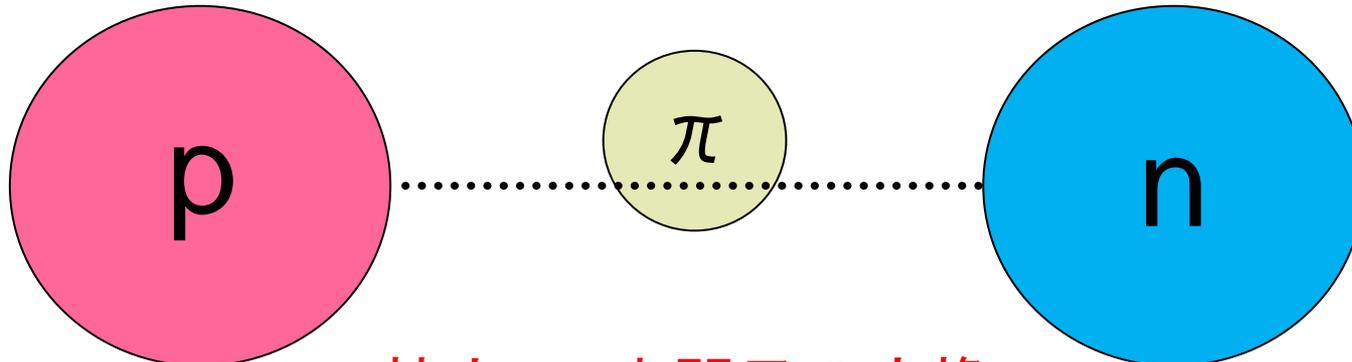


電磁相互作用 ← 光子の交換



QED(量子電気力学)
の完成 朝永振一郎ら

アナロジーと一般化



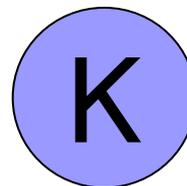
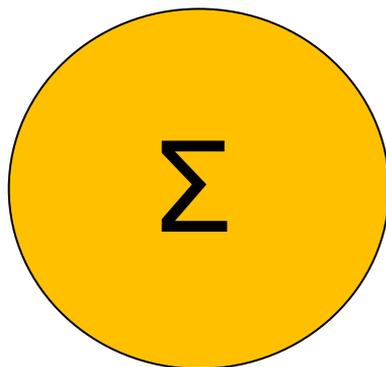
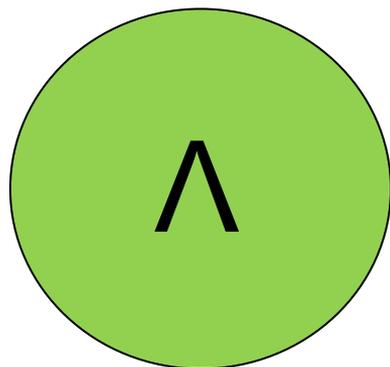
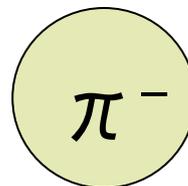
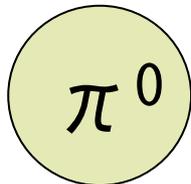
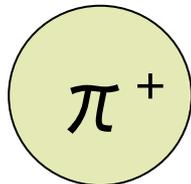
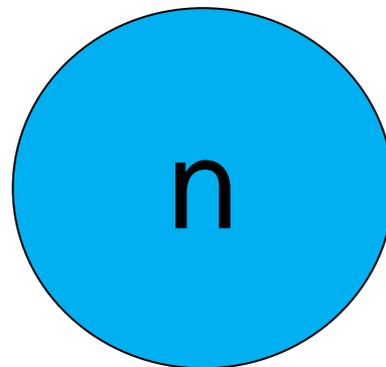
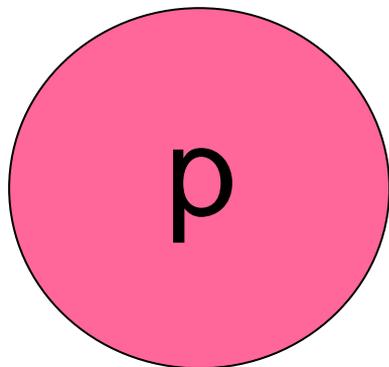
核力 ← 中間子の交換



中間子論 湯川秀樹

湯川のテーゼ: 力を媒介するのは粒子
→ 素粒子論の基本的思想

ハドロン:強い相互作用をする(観測可能な)粒子



■■■■

次々に発見される
ハドロンたち

数百種類ものハドロンが！

(ハドロン:強い相互作用をする粒子で、陽子・中性子・中間子の仲間)

Meson Summary Table

Baryon Summary Table

See also the table of suggested $q\bar{q}$ quark model assignments in the Quark model section.

• Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established.

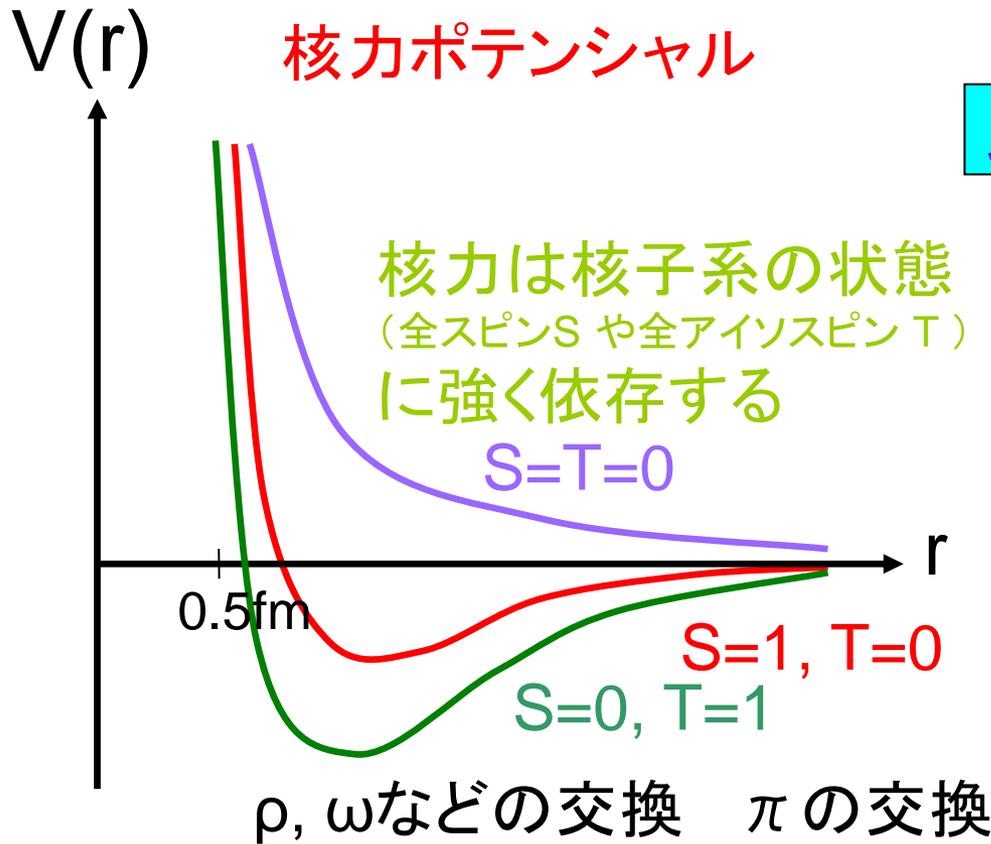
LIGHT UNFLAVORED ($S=C=B=0$)		STRANGE ($S=\pm 1, C=B=0$)		CHARMED, STRANGE ($C=S=\pm 1$)		$c\bar{c}$	
$f_0(J^{PC})$	$f_0(J^{PC})$	$f_0(J^{PC})$	$f_0(J^{PC})$	$f_0(J^{PC})$	$f_0(J^{PC})$	$f_0(J^{PC})$	$f_0(J^{PC})$
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi_1(1670)$	$1^-(2^{+-})$	K^\pm	$1/2(0^-)$	D_s^\pm	$0(0^-)$
π^0	$1^-(0^+)$	$\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2(0^-)$	D_s^0	$0(0^-)$
η	$0^+(0^+)$	$\rho_1(1690)$	$1^+(3^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}^\pm(2317)^\pm$	$0(0^+)$
$\eta(600)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$	$K_1^0(800)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1710)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s2}(2573)^\pm$	$0(2^+)$
$\eta(958)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}(2700)^\pm$	$0(1^-)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^+)$	$K_1(1400)$	$1/2(1^+)$		
$a_0(980)$	$1^-(0^+)$	$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$		
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1835)$	$?^?(?^+)$	$K_1^*(1430)$	$1/2(0^+)$		
$h_1(1170)$	$0^-(1^+)$	$\phi_2(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_1^*(1430)$	$1/2(2^+)$		
$h_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^+)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$		
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\pi_2(1880)$	$1^-(2^+)$	$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$		
$f_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\mu(1900)$	$1^+(1^-)$	$K(1630)$	$1/2(2^?)$		
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$	$K_1(1660)$	$1/2(1^+)$		
$\eta(1295)$	$0^+(0^+)$	$f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$		
$\pi(1300)$	$1^-(0^+)$	$\rho_1(1990)$	$1^+(3^-)$	$K_2(1770)$	$1/2(2^-)$		
$a_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$	$K_1^*(1780)$	$1/2(3^-)$		
$\phi(1370)$	$0^-(0^+)$	$f_2(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_2(1820)$	$1/2(2^-)$		
$h_1(1380)$	$?^-(1^+)$	$a_4(2040)$	$1^-(4^+)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$		
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^+)$	$f_2(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_1^*(1950)$	$1/2(0^+)$		
$\eta(1405)$	$0^-(0^+)$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^+)$	$K_1^*(1980)$	$1/2(2^+)$		
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$f_2(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(2045)$	$1/2(2^+)$		
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_2(2140)$	$1/2(2^-)$		
$f_2(1430)$	$0^+(2^+)$	$\mu(2150)$	$1^+(1^-)$	$K_2(2320)$	$1/2(3^+)$		
$a_0(1450)$	$1^-(0^+)$	$\phi(2170)$	$0^-(1^-)$	$K_1^*(2340)$	$1/2(5^-)$		
$\rho(1450)$	$1^+(1^-)$	$f_2(2200)$	$0^+(0^+)$	$B_1^*(2340)$	$1/2(5^-)$		
$\eta(1475)$	$0^+(0^+)$	$f_2(2220)$	$0^+(2^+)$	$B_2^*(2340)$	$1/2(2^+)$		
$\phi(1500)$	$0^+(0^+)$	$\eta(2225)$	$0^+(0^+)$	$B_{s1}^*(2340)$	$1/2(2^+)$		
$f_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$\rho_1(2250)$	$1^+(3^-)$	$K(3100)$	$?^?(?^?)$		
$f_2'(1525)$	$0^+(2^+)$	$f_2(2300)$	$0^+(2^+)$				
$f_2(1565)$	$0^+(2^+)$	$f_2(2300)$	$0^+(4^+)$				
$\rho(1570)$	$1^+(1^-)$	$f_2(2330)$	$0^+(0^+)$				
$h_1(1595)$	$0^-(1^+)$	$f_2(2340)$	$0^+(2^+)$				
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^+)$	$\rho_2(2350)$	$1^+(5^-)$				
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$a_4(2450)$	$1^-(6^+)$				
$f_2(1640)$	$0^+(2^+)$	$f_2(2510)$	$0^+(6^+)$				
$\eta_2(1645)$	$0^+(2^+)$						
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$						
$\omega_3(1670)$	$0^-(3^-)$						

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the status of baryons in the Review. Only the baryons with 3- or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For Λ , Δ , and Σ resonances, the πN partial wave is indicated by the symbol $L_{21,2,1}$, where L is the orbital angular momentum (S, P, D, \dots), I is the isospin, and J is the total angular momentum. For Λ and Σ resonances, the $\bar{K}N$ partial wave is labeled $L_{1,2}$. The nucleon is a pole in the P_{11} wave, and similar comments apply to the Λ and Σ .

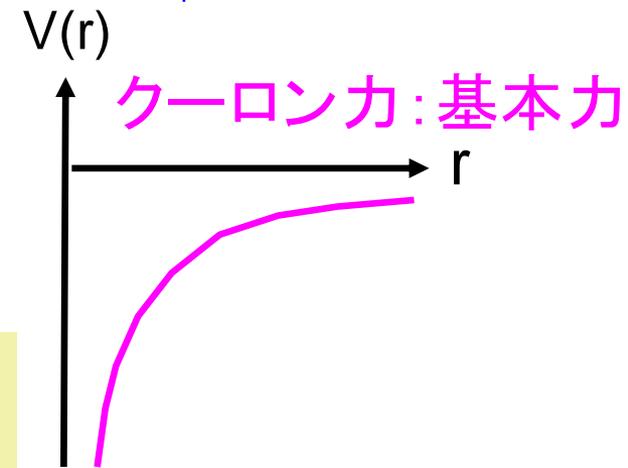
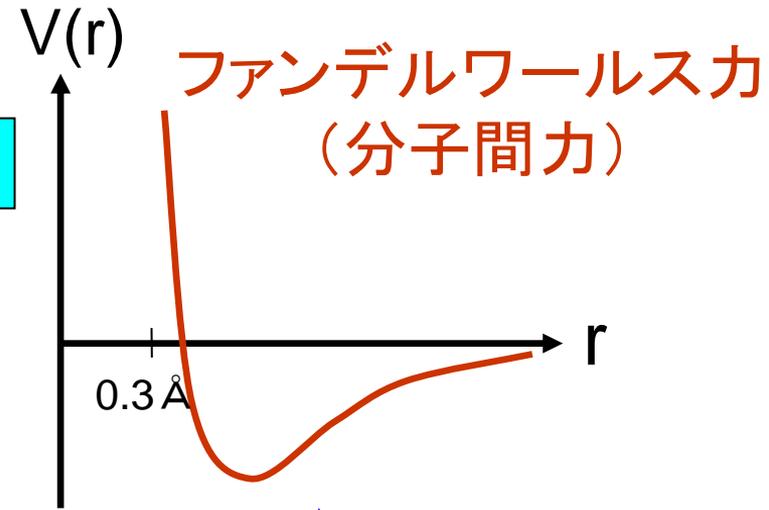
p	P_{11}	****	$\Delta(1232)$	P_{33}	****	$\Sigma(1385)$	****	Ξ^0	P_{11}	****	Λ_c^+	****
n	P_{11}	****	$\Delta(1600)$	P_{33}	***	$\Sigma(1385)$	****	Ξ^-	P_{11}	****	$\Lambda_c(2595)^+$	****
$N(1440)$	P_{11}	****	$\Delta(1620)$	S_{31}	****	$\Sigma(1385)$	****	$\Xi(1530)$	P_{13}	****	$\Lambda_c(2625)^+$	***
$N(1520)$	D_{13}	****	$\Delta(1700)$	S_{31}	****	$\Sigma(1385)$	****	$\Xi(1620)$	*	*	$\Lambda_c(2765)^+$	*
$N(1535)$	S_{11}	****	$\Delta(1700)$	S_{31}	*	$\Sigma(1480)$	*	$\Xi(1690)$	*	*	$\Lambda_c(2880)^+$	****
$N(1650)$	S_{11}	****	$\Delta(1900)$	S_{31}	**	$\Sigma(1560)$	**	$\Xi(1820)$	D_{13}	****	$\Lambda_c(2940)^+$	****
$N(1675)$	D_{15}	****	$\Delta(1900)$	F_{35}	****	$\Sigma(1580)$	D_{13}	$\Xi(1950)$	*	*	$\Sigma_c(2455)$	****
$N(1680)$	S_{11}	****	$\Delta(1920)$	P_{33}	****	$\Sigma(1620)$	S_{11}	$\Xi(2030)$	****	****	$\Sigma_c(2520)$	****
$N(1700)$	P_{11}	****	$\Delta(1920)$	P_{33}	****	$\Sigma(1660)$	P_{11}	$\Xi(2120)$	*	*	$\Sigma_c(2800)$	****
$N(1700)$	P_{11}	****	$\Delta(1930)$	S_{31}	****	$\Sigma(1670)$	D_{13}	$\Xi(2250)$	****	****	Ξ_c^+	****
$N(1700)$	P_{13}	****	$\Delta(1940)$	S_{31}	****	$\Sigma(1690)$	**	$\Xi(2370)$	**	**	Ξ_c^0	****
$N(1700)$	P_{13}	**	$\Delta(1950)$	S_{31}	****	$\Sigma(1750)$	S_{11}	$\Xi(2500)$	*	*	Ξ_c^-	****
$N(1990)$	F_{17}	**	$\Delta(2000)$	S_{31}	**	$\Sigma(1770)$	P_{11}	*	*	*	Ξ_c^+	****
$N(2000)$	S_{15}	**	$\Delta(2000)$	S_{31}	**	$\Sigma(1775)$	D_{15}	****	Ω^-	****	$\Xi_c(2645)$	****
$N(2080)$	S_{15}	**	$\Delta(2200)$	G_{37}	*	$\Sigma(1840)$	P_{13}	*	$\Omega(2250)^-$	****	$\Xi_c(2790)$	****
$N(2000)$	S_{15}	**	$\Delta(2300)$	H_{39}	**	$\Sigma(1880)$	P_{11}	**	$\Omega(2380)^-$	****	$\Xi_c(2815)$	****
$N(2000)$	S_{15}	**	$\Delta(2350)$	D_{35}	**	$\Sigma(1915)$	F_{15}	****	$\Omega(2470)^-$	****	$\Xi_c(2930)$	*
$N(2000)$	S_{17}	****	$\Delta(2390)$	F_{37}	*	$\Sigma(1940)$	D_{13}	****			$\Xi_c(2980)$	****
$N(2200)$	D_{15}	**	$\Delta(2400)$	G_{39}	**	$\Sigma(2000)$	S_{11}	*			$\Xi_c(3055)$	**
$N(2200)$	H_{19}	****	$\Delta(2420)$	$H_{3,11}$	****	$\Sigma(2030)$	F_{17}	****			$\Xi_c(3080)$	****
$N(2250)$	G_{19}	****	$\Delta(2750)$	$h_{3,3}$	**	$\Sigma(2070)$	F_{15}	*			$\Xi_c(3123)$	*
$N(2600)$	$h_{3,11}$	****	$\Delta(2950)$	$K_{3,15}$	**	$\Sigma(2080)$	P_{13}	**			Ω_c	****
$N(2700)$	$K_{1,13}$	**				$\Sigma(2100)$	G_{17}	*			$\Omega_c(2770)^0$	****
						Λ	P_{01}	****			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(1405)$	S_{01}	****			Ξ_c^0	****
						$\Lambda(1520)$	D_{03}	****			Σ_c^+	****
						$\Lambda(1600)$	P_{01}	****			Σ_c^0	****
						$\Lambda(1670)$	S_{01}	****			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(1690)$	D_{03}	****			Ξ_c^0	****
						$\Lambda(1800)$	S_{01}	****			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(1810)$	P_{01}	****			Ξ_c^0	****
						$\Lambda(1820)$	F_{05}	****			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(1830)$	D_{05}	****			Ξ_c^0	****
						$\Lambda(1890)$	P_{03}	****			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(2000)$	*	*			Ξ_c^0	****
						$\Lambda(2020)$	F_{07}	*			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(2100)$	G_{07}	****			Ξ_c^0	****
						$\Lambda(2110)$	F_{05}	****			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(2325)$	D_{03}	*			Ξ_c^0	****
						$\Lambda(2350)$	H_{09}	**			Ξ_c^+	****
						$\Lambda(2585)$	****	****			Ξ_c^0	****

**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.
 *** Existence ranges from very likely to certain, but further confirmation is desirable and/or quantum numbers, branching fractions, etc. are not well determined.
 ** Evidence of existence is only fair.
 * Evidence of existence is poor.

核子・核子散乱実験から得た核力の概形



比較



- ・核力の外側の領域は 複数種類の中間子の交換で説明可能
- ・核力の内側の領域には強い斥力芯が存在する

⇒ 核子の複合粒子性とより基本的な力の存在を示唆

ハドロンに対するクォーク描像

ゲルマン・西島和彦・坂田昌一ら

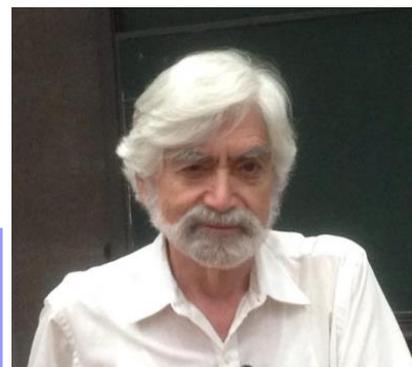
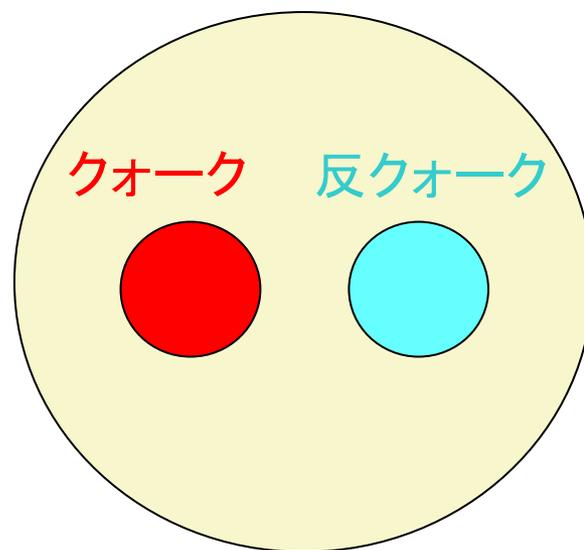
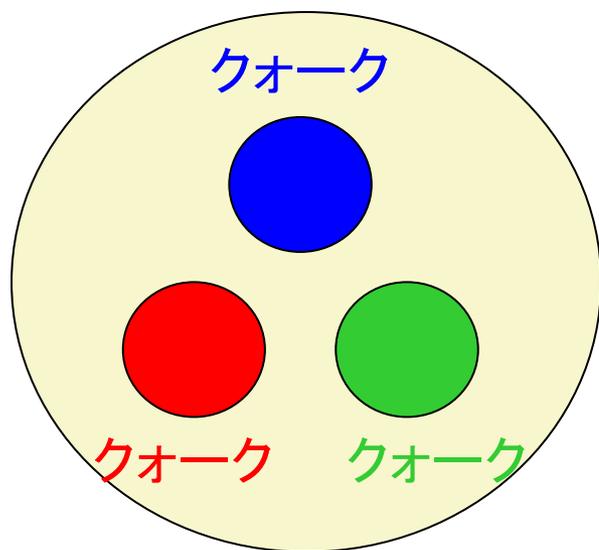
ハドロンの群論的な分類 → フレーバーSU(3)の構造



クォーク模型の提唱: ゲルマン・ツヴァイク (1964年)

バリオン: 核子など

中間子



実験との深刻な矛盾: ミリカン以降の電気素量 e の測定実験から
分数電荷は実験的に否定

$\frac{2}{3}e$, $-\frac{1}{3}e$ という分数電荷を持つ クォークは単独では現れない?

ハドロンに対するクォーク描像の展開

☆クォーク模型の提唱：ゲルマン・ツヴァイク（1964年）

☆カラー自由度の導入：南部・ハン（1965年）

クォークのフェルミ統計から隠れた量子数の存在を導く

☆グルーオン自由度の導入とQCDの定式化：南部陽一郎（1966年）

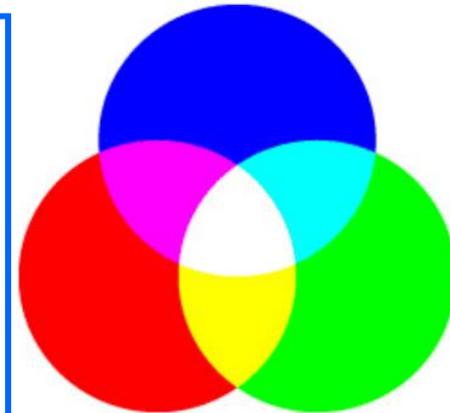
カラー電荷に反応し
クォーク間力をもたらす粒子

QEDとの直接的なアナロジー



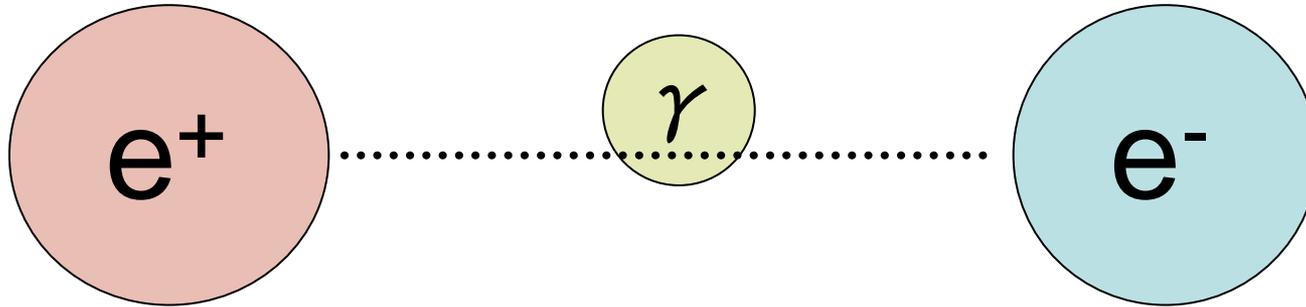
※ カラーは比喩

- ・ハドロンは全体的に“無色”状態（カラー1重項）
- ・“カラー”を持った状態は物理的に現れない
 - ～分数電荷不在の物理的理由
- “カラーの閉じ込め” という現代的な理論的仮説



電子の理論からクォークの理論へ

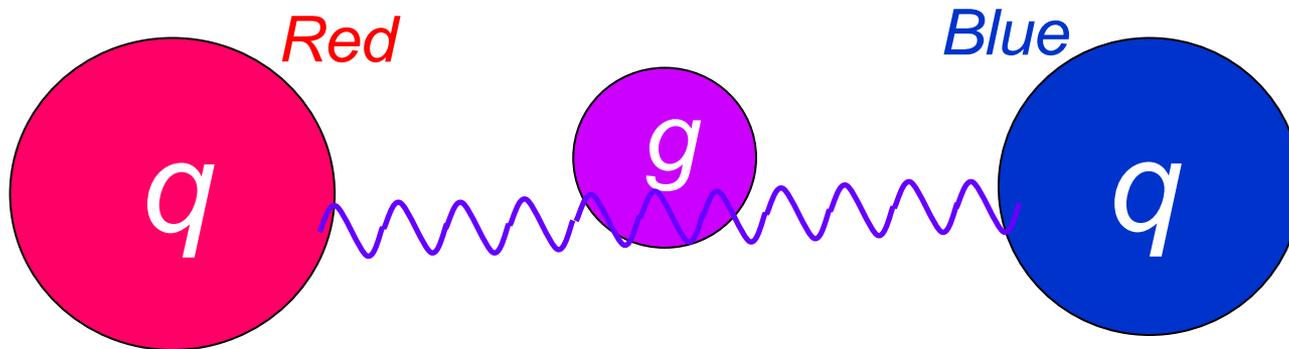
電磁気力



電磁気力 ← 光子(ゲージ粒子)の交換



くりこみ理論による
QED(量子電気力学)
の完成 朝永振一郎ら



クォーク間力 ← グルーオン(非可換ゲージ粒子)の交換

カラー電荷 と グルーオン の導入

→ 非可換ゲージ理論としての QCD(量子色力学)



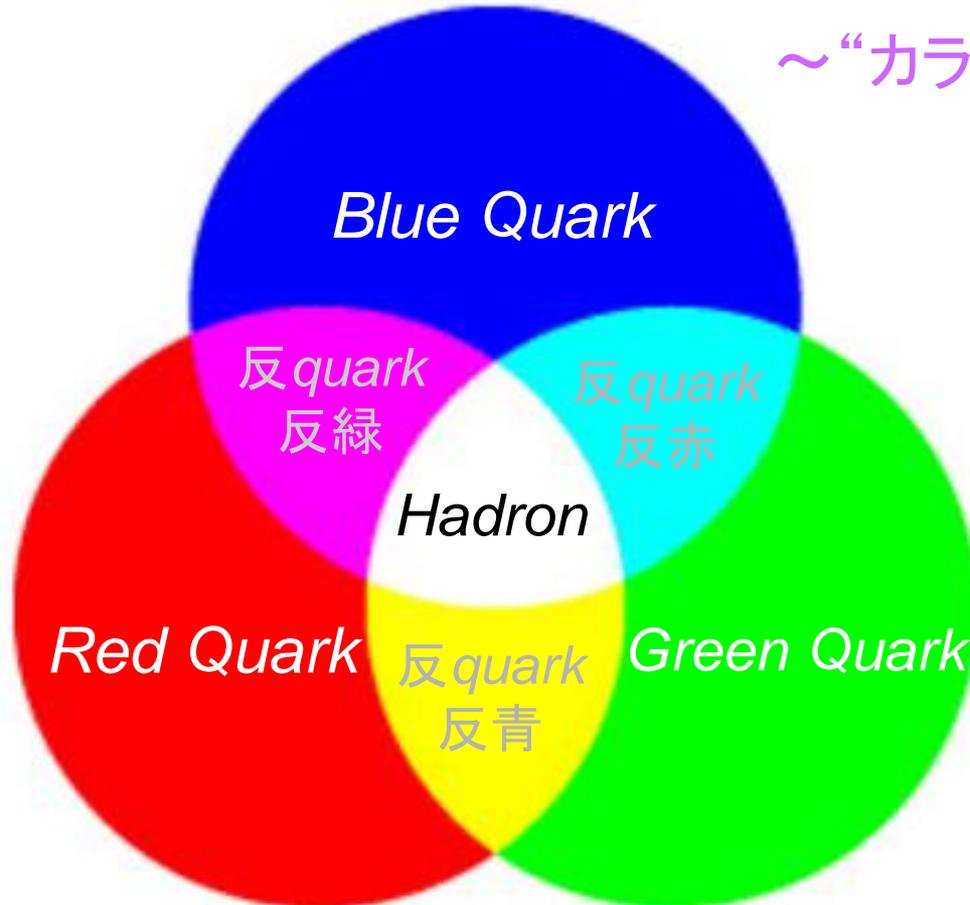
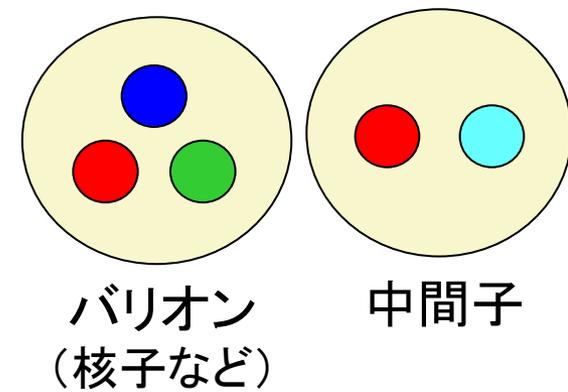
Portraits from
Wikipedia

☆ハドロン:強い相互作用をする観測可能な粒子
全体として無色!

☆クォーク: 赤、青、緑 の3種類のカラー電荷
(反クォーク: 反赤、反青、反緑 の3種類)

☆グルーオン:強い力を媒介するゲージ粒子:8種類のカラー電荷

~“カラー電荷”を有する“光”



※ カラーは巧妙な比喩

クォークの発見と単純な「要素還元主義」の限界

物質の構成要素を求めて: エネルギー(熱、電気、放射線、加速粒子など)を与えて、物質や複合粒子を**破碎**し、**構成要素を分離**し、**検出**する



よりミクロな階層からの理解は**科学では重要**: 例えば、分子レベルで物性を調べ、分子の性質を原子や電子のレベルから把握するなど

クォークは、実在する基本的要素であるが、単独では現れない

「存在」や「実在」ってなんなんだろう？

実験的な「検証」ってどういうものか？～科学哲学的な命題

ちなみに、クォークとグルーオン **以外**の素粒子である
光子、ニュートリノ、ミューオン、タウオン、ウィーク・ボゾン、ヒッグス粒子
は**全て単独で観測可能**

クォークとグルーオン、量子色力学(QCD)

☆クォーク:強い力をする spin 1/2 のフェルミ粒子
カラー電荷(R,B,G)を持ち、6種類(フレーバー)ある

☆グルーオン:強い力を媒介する ゲージ粒子 (spin 1)
カラー電荷に反応する質量ゼロの粒子 自身もカラーを持つ

量子色力学(QCD):クォークとグルーオンを支配する法則

クォーク

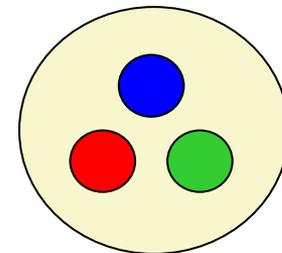
質量

u: アップ	2.2 MeV	軽い
d: ダウン	4.7 MeV	軽い
s: ストレンジ	93 MeV	やや軽い
c: チャーム	1.28 GeV	重い
b: ボトム	4.18 GeV	とても重い
t: トップ	173 GeV	極端に重い

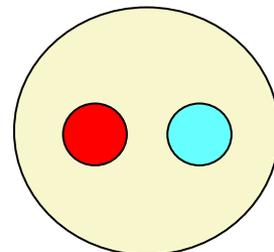
QCD



複合粒子としての
多数のハドロン(無色)



バリオン



中間子

量子色力学 (QCD)

クォークとグルーオンの理論

☆量子色力学: QCD (Quantum Chromodynamics)

- ・強い相互作用の基礎理論
- ・クォークとグルーオンの理論
- ・ $SU(N_c)$ の非可換ゲージ理論

$$A^\mu = \begin{matrix} & \begin{matrix} R & B & G \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} A_{11}^\mu & A_{12}^\mu & A_{13}^\mu \\ A_{21}^\mu & A_{22}^\mu & A_{23}^\mu \\ A_{31}^\mu & A_{32}^\mu & A_{33}^\mu \end{pmatrix} & \begin{matrix} R \\ B \\ G \end{matrix} \end{matrix}$$

グルーオンの場

☆量子電気力学: QED (Quantum Electrodynamics)

- ・電磁相互作用の基礎理論
- ・電子と光の理論
- ・ $U(1)$ の可換ゲージ理論

$$A^\mu$$

光子場

量子色力学は 行列の性質を反映した 非可換な理論

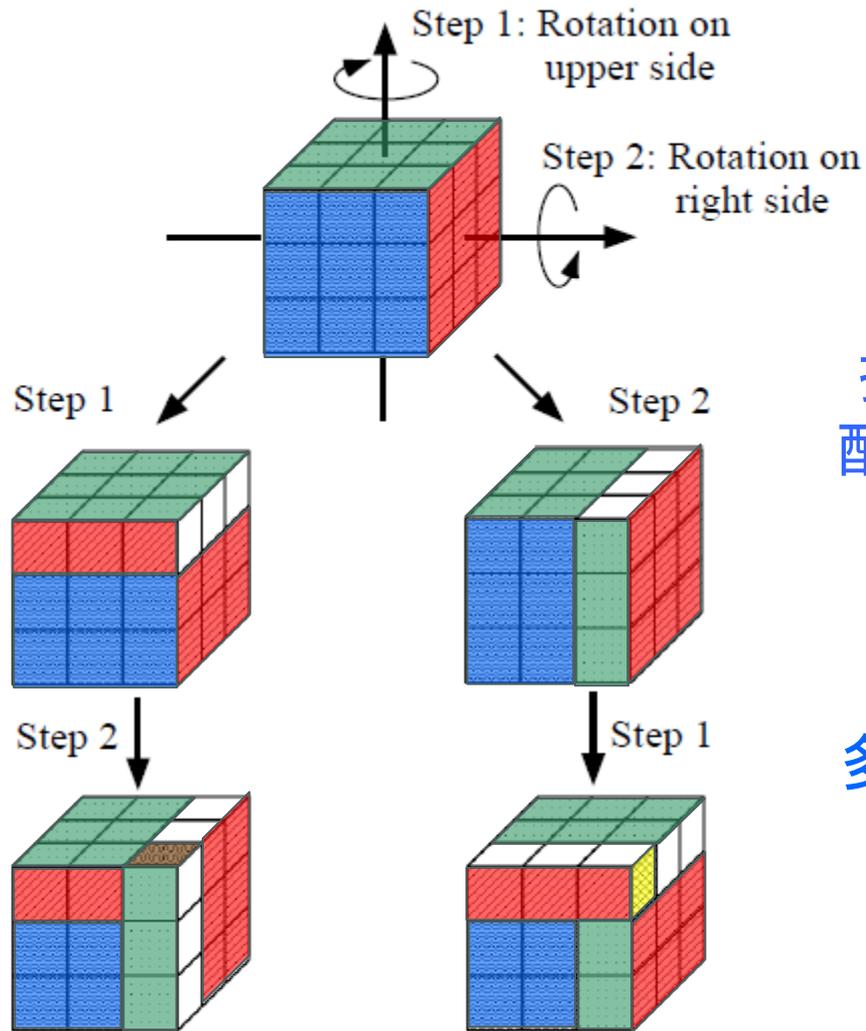
QCDは非可換なゲージ理論

この非可換性が物理を難しく、かつ、面白くしている

非可換な回転群に基づいたパズルの代表例：
ルービックキューブ



ルービック キューブ



操作する**順番**によって
配色が異なってしまふ！
～非可換性



多彩な**色**の**組み合わせ**
と
「**解く**」**こと**の**難しさ**

Figure 1. The difficulty and the interest of the Rubik cube originate from non-commutable operations based on the nonabelian nature of the rotational group. The configuration after Step 1 and Step 2 depends on the order of these operations. Can you find a nonabelian nature of QCD in the Rubik cube ?

QCD: 強い相互作用の基礎理論

量子色力学 (Quantum Chromo Dynamics, QCD)

- ・強い相互作用の基礎理論: SU(3) ゲージ理論
 - ・クォークとグルーオンの相互作用を記述
- $q(x)$: クォーク場
 $A^\mu(x)$: グルーオン場

理論はQED

(電磁気)と類似の
simple form

$$L_{QCD} = -\frac{1}{2} \text{Tr}(G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}) + \bar{q}(i\gamma_\mu D^\mu - m)q$$

クォーク:
3種類の
カラー荷

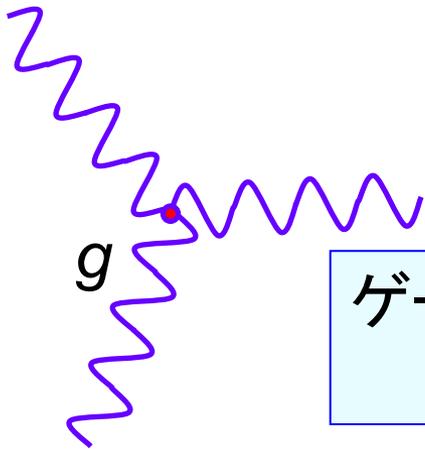
$$q = \begin{pmatrix} R \\ B \\ G \end{pmatrix}$$

$D^\mu = \partial^\mu + igA^\mu$: 共変微分 g : QCDのゲージ結合定数

$$G^{\mu\nu} = \frac{1}{ig} [D^\mu, D^\nu] = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu + ig[A^\mu, A^\nu] : \text{カラー電磁場}$$

$A^\mu(x) = A^\mu_a(x)T_a$: カラー空間に作用する $N_c \times N_c$ の行列

ゲージ場の非可換性 → グルーオンの自己相互作用
(グルーオンの3点・4点 局所相互作用)

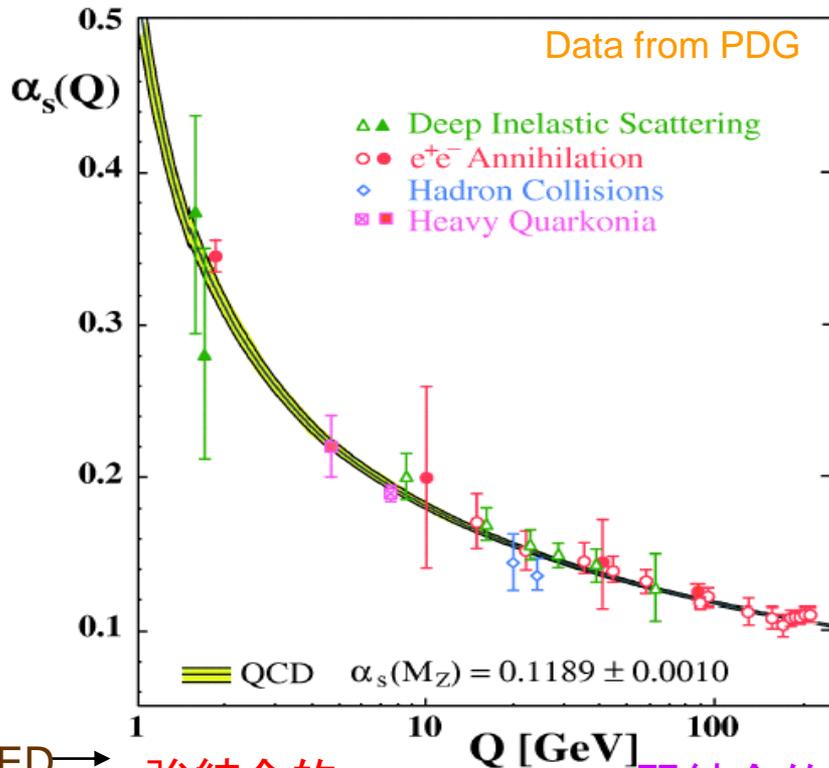


QCDの漸近的自由性

トフーフト・グロス・ウィルツェック・ポリッツァーら(1973年)(2004年ノーベル賞)

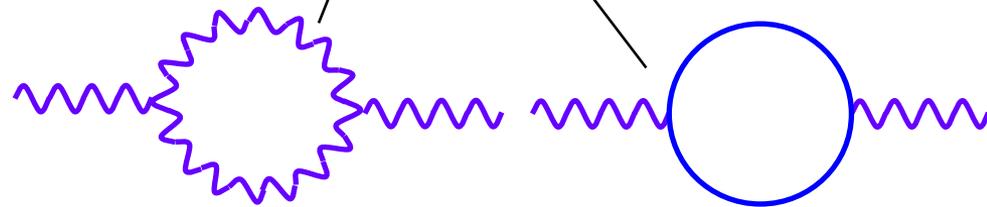
QCDの結合定数は **高エネルギー**(近距離)領域では**弱結合**
低エネルギー(遠距離)領域では**強結合**

QCDの結合定数 $\alpha_s(\mu) = \frac{g^2(\mu)}{4\pi}$



1 ループまでの摂動QCD計算

$$\alpha_s(\mu) = \frac{12\pi}{(11N_c - 2N_f) \ln(\mu^2/\Lambda_{\text{QCD}}^2)}$$



グルーオンの自己相互作用に **クォーク・ループ**の寄与
 由来する**グルーオン・ループ**の寄与

比較

QEDの結合定数(微細構造定数)

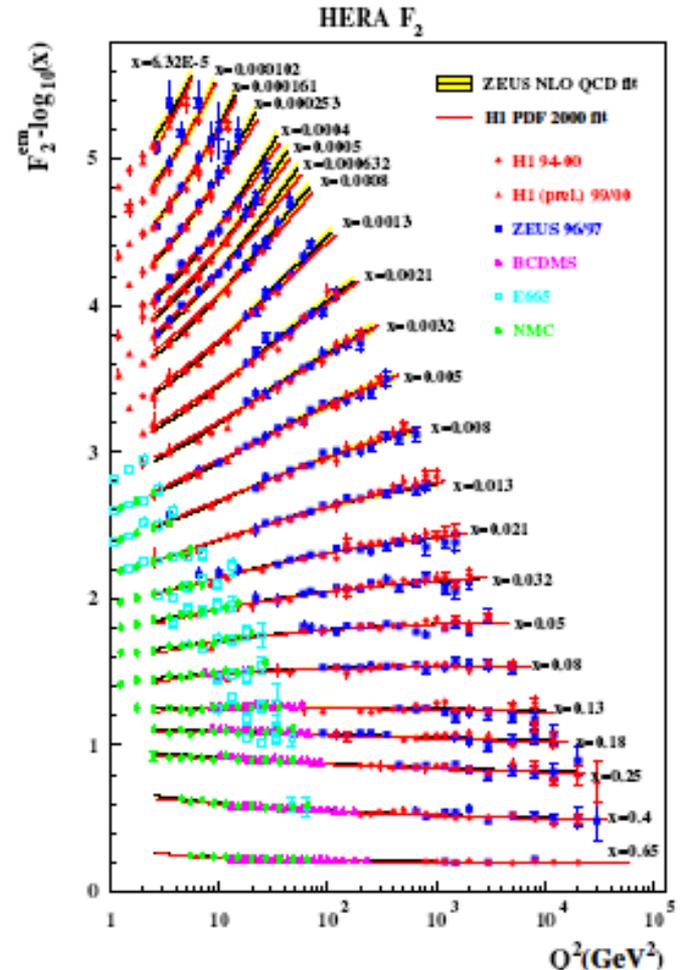
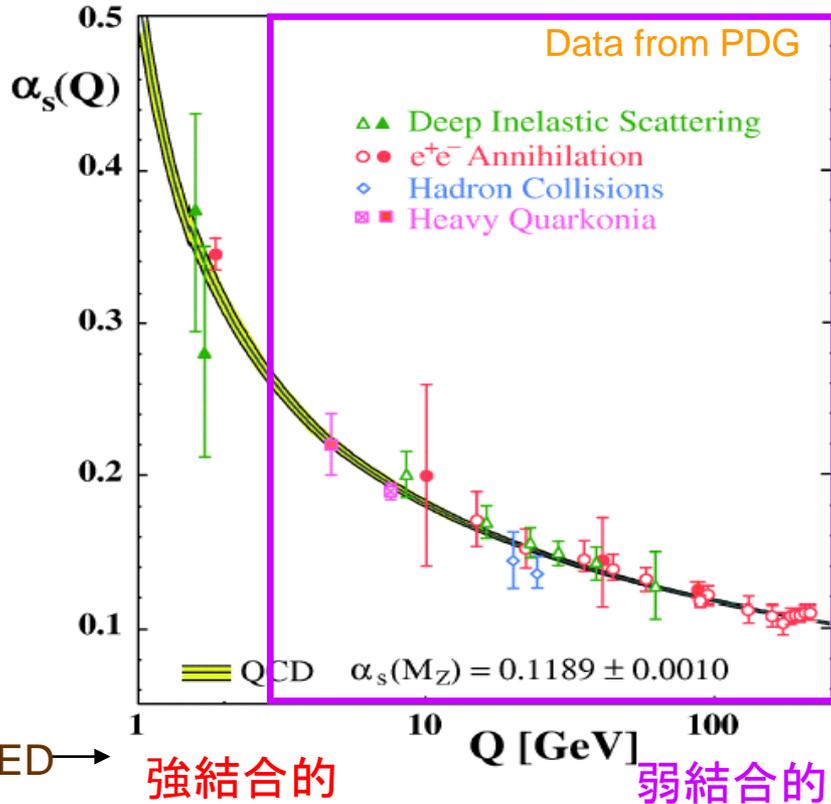
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$$

QED → **強結合的** **弱結合的**
 QCDの結合定数は見るスケールによって大きく変化する

摂動論的QCD

QCDの結合定数は 高エネルギー（近距離）領域では弱結合
 →高エネルギー（近距離）領域では摂動論的QCDが適用可能

QCDの結合定数 $\alpha_s(\mu) = \frac{g^2(\mu)}{4\pi}$



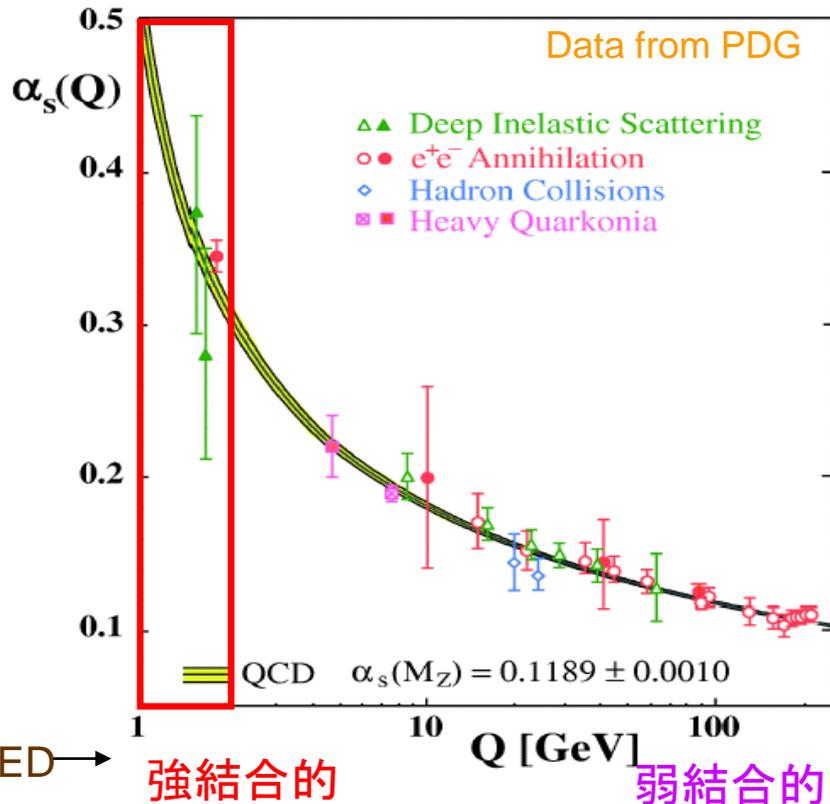
Proton structure function F_2

QCDの漸近的自由性

トフーフト・グロス・ウィルツェック・ポリッツァーら(1973年)(2004年ノーベル賞)

QCDの結合定数は 高エネルギー(近距離)領域では弱結合
低エネルギー(遠距離)領域では強結合

QCDの結合定数 $\alpha_s(\mu) = \frac{g^2(\mu)}{4\pi}$



低エネルギー領域での強結合性

非摂動的現象
摂動論を超えた現象

真空の構造が大きく変質!

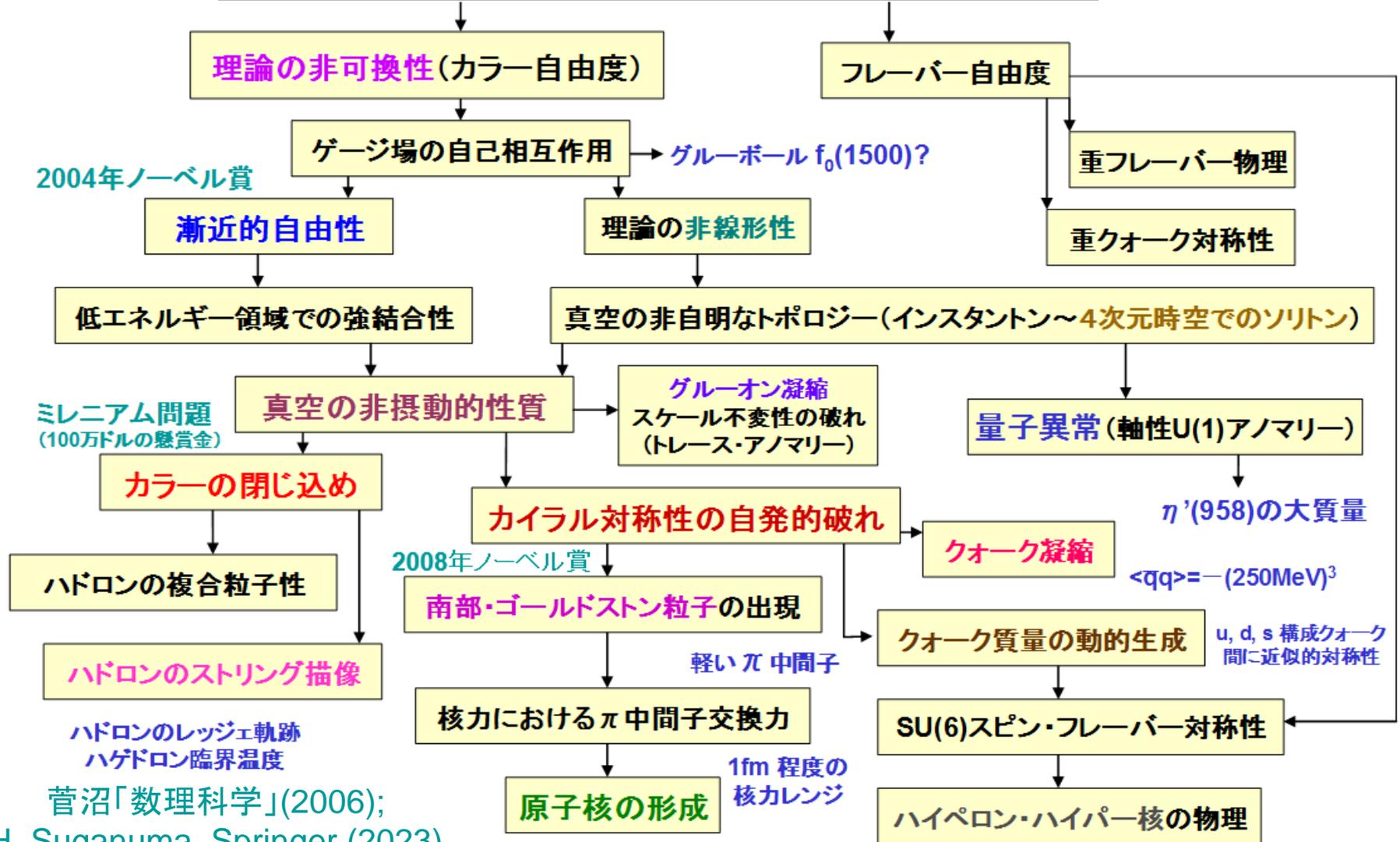
- ・カラー(クォーク等)の閉じ込め
- ・カイラル対称性の自発的破れ

QCD: ミクロな階層での多様な現象の宝庫

QCD

$$L_{QCD} = -\frac{1}{2} \text{Tr}(G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}) + \bar{q}(i\gamma_{\mu} D^{\mu} - m)q$$

理論の見た目は
とてもシンプル



QCDは多彩な物理現象と同時に、数百種類ものハドロンを創り出す！

Meson Summary Table

Baryon Summary Table

See also the table of suggested $q\bar{q}$ quark-model assignments in the Quark Model section.

• Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established.

LIGHT UNFLAVORED (S = C = B = 0)		STRANGE (S = ±1, C = B = 0)		CHARMED, STRANGE (C = S = ±1)		$c\bar{c}$ $f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	
$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$	$f^0(f^{\prime}P^{\prime}C)$
• π^{\pm} 1 ⁻ (0 ⁻)	• $\pi_2(1670)$ 1 ⁻ (2 ⁻ ++)	• K^{\pm} 1/2(0 ⁻)	• K^{\pm} 1/2(0 ⁻)	• D_s^{\pm} 0(0 ⁻)	• $\eta_c(1S)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $\eta_c(1S)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $\eta_c(1S)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)
• π^0 1 ⁻ (0 ⁻ ++)	• $\phi(1680)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• K^0 1/2(0 ⁻)	• K^0 1/2(0 ⁻)	• D_s^0 0(0 ⁻)	• $J/\psi(1S)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $J/\psi(1S)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $J/\psi(1S)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)
• η 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $\rho_3(1690)$ 1 ⁺ (3 ⁻ ++)	• K_S^0 1/2(0 ⁻)	• K_S^0 1/2(0 ⁻)	• $D_s^*(2317)^{\pm}$ 0(0 ⁺)	• $\chi_{c0}(1P)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $\chi_{c0}(1P)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $\chi_{c0}(1P)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)
• $\phi(600)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $\rho(1700)$ 1 ⁺ (1 ⁻ ++)	• K_L^0 1/2(0 ⁻)	• K_L^0 1/2(0 ⁻)	• $D_{s1}(2460)^{\pm}$ 0(1 ⁺)	• $\chi_{c1}(1P)$ 0 ⁺ (1 ⁺ ++)	• $\chi_{c1}(1P)$ 0 ⁺ (1 ⁺ ++)	• $\chi_{c1}(1P)$ 0 ⁺ (1 ⁺ ++)
• $\rho(770)$ 1 ⁺ (1 ⁻ ++)	• $a_2(1700)$ 1 ⁻ (2 ⁺ ++)	• $K_S^*(800)$ 1/2(0 ⁺)	• $K_S^*(800)$ 1/2(0 ⁺)	• $D_{s1}(2536)^{\pm}$ 0(1 ⁺)	• $\chi_{c2}(1P)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $\chi_{c2}(1P)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $\chi_{c2}(1P)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)
• $\omega(782)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $f_0(1710)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $K^*(892)$ 1/2(1 ⁻)	• $K^*(892)$ 1/2(1 ⁻)	• $D_{s3}(2573)^{\pm}$ 0(0 [?])	• $\eta_c(2S)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $\eta_c(2S)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $\eta_c(2S)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)
• $\eta(958)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $\eta(1760)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $K_1(1270)$ 1/2(1 ⁺)	• $K_1(1270)$ 1/2(1 ⁺)	• $D_{s1}(2700)^{\pm}$ 0(1 ⁻)	• $\psi(2S)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $\psi(2S)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $\psi(2S)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)
• $\phi(980)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $\pi(1800)$ 1 ⁻ (0 ⁻ ++)	• $K_1(1400)$ 1/2(1 ⁺)	• $K_1(1400)$ 1/2(1 ⁺)		• $\psi(3770)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $\psi(3770)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $\psi(3770)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)
• $\omega(980)$ 1 ⁻ (0 ⁺ ++)	• $f_0(1810)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $K^*(1410)$ 1/2(1 ⁻)	• $K^*(1410)$ 1/2(1 ⁻)		• $X(3872)$ 0 [?] (0 [?] ++)	• $X(3872)$ 0 [?] (0 [?] ++)	• $X(3872)$ 0 [?] (0 [?] ++)
• $\phi(1020)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $X(1835)$ 0 [?] (0 [?] ++)	• $K_S^*(1430)$ 1/2(0 ⁺)	• $K_S^*(1430)$ 1/2(0 ⁺)		• $\chi_{c2}(2P)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $\chi_{c2}(2P)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $\chi_{c2}(2P)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)
• $h_1(1170)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $\phi_2(1850)$ 0 ⁻ (3 ⁻ ++)	• $K_S^*(1430)$ 1/2(2 ⁺)	• $K_S^*(1430)$ 1/2(2 ⁺)		• B^{\pm} 1/2(0 ⁻)	• B^{\pm} 1/2(0 ⁻)	• B^{\pm} 1/2(0 ⁻)
• $h_1(1235)$ 1 ⁺ (1 ⁺ ++)	• $\eta_2(1870)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $K(1460)$ 1/2(0 ⁻)	• $K(1460)$ 1/2(0 ⁻)		• B^0 1/2(0 ⁻)	• B^0 1/2(0 ⁻)	• B^0 1/2(0 ⁻)
• $a_1(1260)$ 1 ⁻ (1 ⁺ ++)	• $\pi_2(1880)$ 1 ⁻ (2 ⁺ ++)	• $K_2(1580)$ 1/2(2 ⁻)	• $K_2(1580)$ 1/2(2 ⁻)		• B^{\pm}/B^0 ADMIXTURE	• B^{\pm}/B^0 ADMIXTURE	• B^{\pm}/B^0 ADMIXTURE
• $f_2(1270)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $\rho(1900)$ 1 ⁺ (1 ⁻ ++)	• $K(1630)$ 1/2(0 ⁺)	• $K(1630)$ 1/2(0 ⁺)		• $B^{\pm}/B^0/B^{\pm}/b$ baryon ADMIXTURE	• $B^{\pm}/B^0/B^{\pm}/b$ baryon ADMIXTURE	• $B^{\pm}/B^0/B^{\pm}/b$ baryon ADMIXTURE
• $f_1(1285)$ 0 ⁺ (1 ⁺ ++)	• $f_2(1910)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $K_1(1650)$ 1/2(1 ⁺)	• $K_1(1650)$ 1/2(1 ⁺)		• V_{ub} and V_{ub} CKM Matrix Elements	• V_{ub} and V_{ub} CKM Matrix Elements	• V_{ub} and V_{ub} CKM Matrix Elements
• $\eta(1295)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $f_3(1950)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $K^*(1680)$ 1/2(1 ⁻)	• $K^*(1680)$ 1/2(1 ⁻)		• B^* 1/2(1 ⁻)	• B^* 1/2(1 ⁻)	• B^* 1/2(1 ⁻)
• $\pi(1300)$ 1 ⁻ (0 ⁻ ++)	• $\rho_3(1990)$ 1 ⁺ (3 ⁻ ++)	• $K_2(1770)$ 1/2(2 ⁻)	• $K_2(1770)$ 1/2(2 ⁻)		• $B_1^*(5732)$ 0 [?] (0 [?] ++)	• $B_1^*(5732)$ 0 [?] (0 [?] ++)	• $B_1^*(5732)$ 0 [?] (0 [?] ++)
• $a_2(1320)$ 1 ⁻ (2 ⁺ ++)	• $f_3(2010)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $K_S^*(1780)$ 1/2(3 ⁻)	• $K_S^*(1780)$ 1/2(3 ⁻)		• $B_2^*(5721)^0$ 1/2(1 ⁺)	• $B_2^*(5721)^0$ 1/2(1 ⁺)	• $B_2^*(5721)^0$ 1/2(1 ⁺)
• $f_0(1370)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $f_0(2020)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $K_0^*(1820)$ 1/2(2 ⁻)	• $K_0^*(1820)$ 1/2(2 ⁻)		• $B_{cb}^*(5747)^0$ 1/2(2 ⁺)	• $B_{cb}^*(5747)^0$ 1/2(2 ⁺)	• $B_{cb}^*(5747)^0$ 1/2(2 ⁺)
• $h_1(1380)$ 0 ⁺ (1 ⁺ ++)	• $a_4(2040)$ 1 ⁻ (4 ⁺ ++)	• $K(1830)$ 1/2(0 ⁻)	• $K(1830)$ 1/2(0 ⁻)				
• $\pi_1(1400)$ 1 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $f_4(2050)$ 0 ⁺ (4 ⁺ ++)	• $K_S^*(1950)$ 1/2(0 ⁺)	• $K_S^*(1950)$ 1/2(0 ⁺)				
• $\eta(1405)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $\pi_2(2100)$ 1 ⁻ (2 ⁺ ++)	• $K_S^*(1980)$ 1/2(2 ⁺)	• $K_S^*(1980)$ 1/2(2 ⁺)				
• $f_1(1420)$ 0 ⁺ (1 ⁺ ++)	• $f_5(2100)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $K_S^*(2045)$ 1/2(4 ⁺)	• $K_S^*(2045)$ 1/2(4 ⁺)				
• $\omega(1420)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $f_5(2150)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $K_2(2250)$ 1/2(2 ⁻)	• $K_2(2250)$ 1/2(2 ⁻)				
• $f_2(1430)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $\rho(2150)$ 1 ⁺ (1 ⁻ ++)	• $K_3(2320)$ 1/2(3 ⁺)	• $K_3(2320)$ 1/2(3 ⁺)				
• $a_0(1450)$ 1 ⁻ (0 ⁺ ++)	• $\phi(2170)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $K_S^*(2380)$ 1/2(5 ⁻)	• $K_S^*(2380)$ 1/2(5 ⁻)				
• $\rho(1450)$ 1 ⁺ (1 ⁻ ++)	• $f_5(2200)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $K_{cb}^*(2500)$ 1/2(4 ⁻)	• $K_{cb}^*(2500)$ 1/2(4 ⁻)				
• $\eta(1475)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)	• $f_5(2220)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $K(3100)$ 0 [?] (0 [?] ++)	• $K(3100)$ 0 [?] (0 [?] ++)				
• $f_0(1500)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)	• $\eta(2225)$ 0 ⁺ (0 ⁻ ++)						
• $f_1(1510)$ 0 ⁺ (1 ⁺ ++)	• $\rho_3(2250)$ 1 ⁺ (3 ⁻ ++)						
• $f_2^*(1525)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $f_5(2300)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)						
• $f_2(1565)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $f_6(2300)$ 0 ⁺ (4 ⁺ ++)						
• $\rho(1570)$ 1 ⁺ (1 ⁻ ++)	• $f_6(2330)$ 0 ⁺ (0 ⁺ ++)						
• $h_1(1595)$ 0 ⁻ (1 ⁺ ++)	• $f_6(2340)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)						
• $\pi_1(1600)$ 1 ⁻ (1 ⁻ ++)	• $\rho_3(2350)$ 1 ⁺ (5 ⁻ ++)						
• $a_1(1640)$ 1 ⁻ (1 ⁺ ++)	• $a_6(2450)$ 1 ⁻ (6 ⁺ ++)						
• $f_1(1640)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)	• $f_6(2510)$ 0 ⁺ (6 ⁺ ++)						
• $\eta_2(1645)$ 0 ⁺ (2 ⁺ ++)							
• $\omega(1650)$ 0 ⁻ (1 ⁻ ++)							
• $\omega_1(1670)$ 0 ⁻ (3 ⁻ ++)							
	OTHER LIGHT						
	Further States						
		• D^{\pm} 1/2(0 ⁻)	• D^{\pm} 1/2(0 ⁻)				
		• D^0 1/2(0 ⁻)	• D^0 1/2(0 ⁻)				
		• $D^*(2007)^0$ 1/2(1 ⁻)	• $D^*(2007)^0$ 1/2(1 ⁻)				
		• $D^*(2010)^{\pm}$ 1/2(1 ⁻)	• $D^*(2010)^{\pm}$ 1/2(1 ⁻)				
		• $D_1^*(2400)^0$ 1/2(0 ⁺)	• $D_1^*(2400)^0$ 1/2(0 ⁺)				
		• $D_2^*(2400)^{\pm}$ 1/2(0 ⁺)	• $D_2^*(2400)^{\pm}$ 1/2(0 ⁺)				
		• $D_1(2420)^0$ 1/2(1 ⁺)	• $D_1(2420)^0$ 1/2(1 ⁺)				
		• $D_1(2420)^{\pm}$ 1/2(0 [?])	• $D_1(2420)^{\pm}$ 1/2(0 [?])				
		• $D_1(2430)^0$ 1/2(1 ⁺)	• $D_1(2430)^0$ 1/2(1 ⁺)				
		• $D_2^*(2460)^0$ 1/2(2 ⁺)	• $D_2^*(2460)^0$ 1/2(2 ⁺)				
		• $D_2^*(2460)^{\pm}$ 1/2(2 ⁺)	• $D_2^*(2460)^{\pm}$ 1/2(2 ⁺)				
		• $D^*(2640)^{\pm}$ 1/2(0 [?])	• $D^*(2640)^{\pm}$ 1/2(0 [?])				

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the status of baryons in the Review. Only the baryons with 3- or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For Λ , Δ , and Ξ resonances, the πN partial wave is indicated by the symbol $L_{2J,2J}$, where L is the orbital angular momentum (S, P, D, ...), I is the isospin, and J is the total angular momentum. For Λ and Ξ resonances, the $\bar{K}N$ partial wave is labeled $L_{I,2J}$. The nucleon is a pole in the P_{11} wave, and similar comments apply to the Λ and Σ .

p	P_{11}	****	$\Delta(1232)$	P_{33}	****	Σ^+	P_{11}	****	Ξ^0	P_{11}	****	Λ_c^+	****
n	P_{11}	****	$\Delta(1600)$	P_{33}	***	Σ^0	P_{11}	****	Ξ^-	P_{11}	****	$\Lambda_c(2595)^+$	***
$N(1440)$	P_{11}	****	$\Delta(1620)$	S_{31}	****	Σ^-	P_{11}	****	$\Xi(1530)$	P_{13}	****	$\Lambda_c(2625)^+$	***
$N(1520)$	D_{13}	****	$\Delta(1700)$	D_{33}	****	$\Sigma(1385)$	P_{13}	****	$\Xi(1620)$	*	****	$\Lambda_c(2765)^+$	*
$N(1535)$	S_{11}	****	$\Delta(1750)$	P_{31}	*	$\Sigma(1480)$	*	****	$\Xi(1690)$	****	****	$\Lambda_c(2880)^+$	****
$N(1650)$	S_{11}	****	$\Delta(1900)$	S_{31}	**	$\Sigma(1560)$	**	****	$\Xi(1820)$	D_{13}	****	$\Lambda_c(2940)^+$	****
$N(1675)$	D_{15}	****	$\Delta(1905)$	F_{35}	***	$\Sigma(1580)$	D_{13}	*	$\Xi(1950)$	****	****	$\Sigma_c(2455)$	****
$N(1680)$	F_{15}	****	$\Delta(1910)$	P_{31}	****	$\Sigma(1620)$	S_{11}	**	$\Xi(2030)$	****	****	$\Sigma_c(2520)$	****
$N(1700)$	D_{13}	***	$\Delta(1920)$	P_{33}	***	$\Sigma(1660)$	P_{11}	***	$\Xi(2120)$	****	****	$\Sigma_c(2800)$	****
$N(1710)$	P_{11}	***	$\Delta(1930)$	D_{35}	***	$\Sigma(1670)$	D_{13}	****	$\Xi(2250)$	**	****	$\Sigma_c(2900)$	****
$N(1720)$	P_{13}	****	$\Delta(1940)$	D_{33}	*	$\Sigma(1690)$	**	****	$\Xi(2370)$	**	****	$\Xi_c(2800)$	****
$N(1900)$	P_{13}	**	$\Delta(1950)$	F_{37}	****	$\Sigma(1750)$	S_{11}	***	$\Xi(2500)$	*	****	$\Xi_c(2800)$	****
$N(1990)$	F_{17}	**	$\Delta(2000)$	F_{35}	**	$\Sigma(1770)$	P_{11}	*	$\Xi(2700)$	*	****	$\Xi_c(2800)$	****
$N(2000)$	F_{15}	**	$\Delta(2150)$	S_{31}	*	$\Sigma(1775)$	D_{15}	****	Ω^-	****	****	$\Xi_c(2645)$	****
$N(2080)$	D_{13}	**	$\Delta(2200)$	G_{37}	*	$\Sigma(1840)$	P_{13}	*	$\Omega(2250)^-$	****	****	$\Xi_c(2790)$	****
$N(2090)$	S_{11}	*	$\Delta(2300)$	H_{39}	**								

QCDと物質質量の起源

カイラル対称性の自発的破れ
と
クォークの質量生成

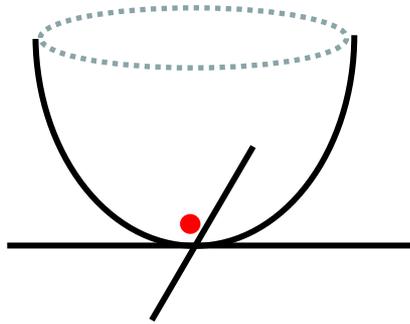
カイラル対称性:

質量ゼロのフェルミオンの持つ対称性
~フェルミオン(QCDではクォーク)の
右巻き、左巻きに関する対称性



南部陽一郎ら(1961年)
2008年ノーベル物理学賞

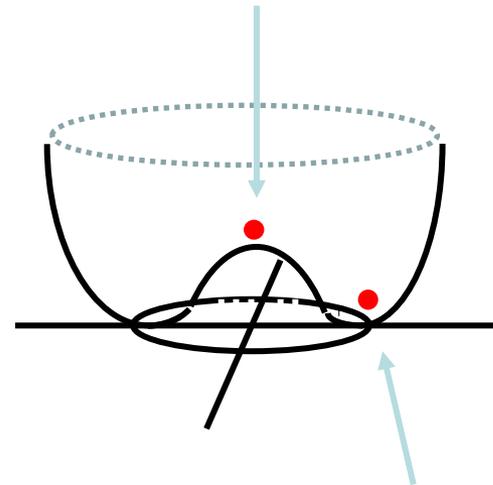
対称性の自発的破れ



エネルギー的に安定な場所
= 対称性が良く見える場所

エネルギー的に
安定な場所(“真空”)は
ただひとつだけ

対称性が良く見える場所は
エネルギー的に不安定



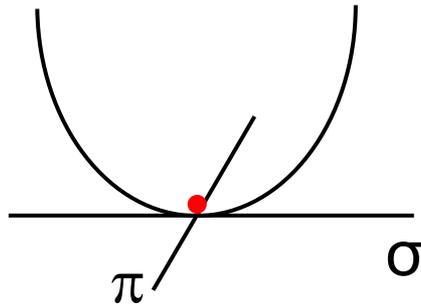
エネルギー的に
安定な場所は
系全体の対称性が見えない

エネルギー的に
安定な場所(“真空”)は
(対称性を反映して)複数存在する

カイラル対称性の自発的破れ

Wigner-Weyl 相

カイラル対称性が明らかな相

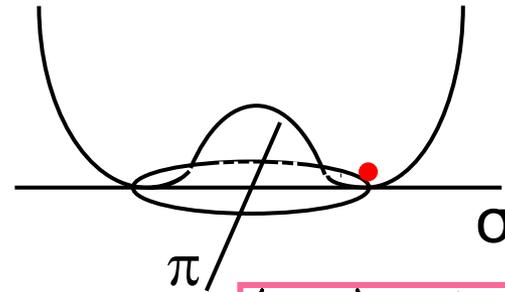


$$\langle \bar{q}q \rangle \simeq 0$$

真空

Nambu-Goldstone 相

カイラル対称性が自発的に破れた相

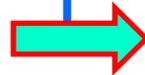


$$\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$$

真空中にクォークの対凝縮！

Quark

$$m_u, m_d = 2 \sim 5 \text{ MeV}$$



$$M_u, M_d \sim 300 \text{ MeV}$$

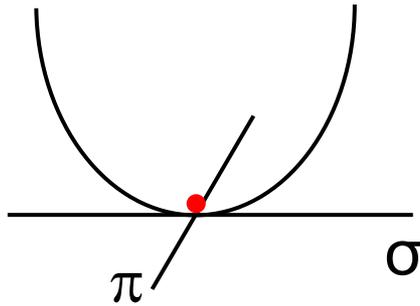
u, d クォークの有効質量が100倍程度に！

この世界の物質質量の大部分は QCDの相互作用により生じている

カイラル対称性の自発的破れ

Wigner-Weyl 相

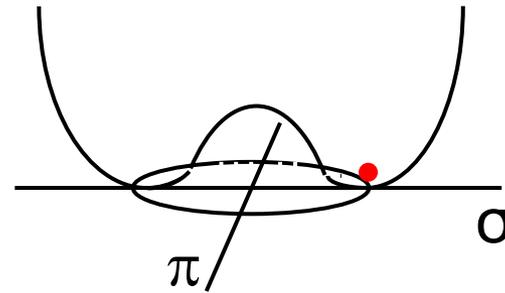
カイラル対称性が明らかな相



真空

Nambu-Goldstone 相

カイラル対称性が自発的に破れた相



Hadron

対称性から
パリティ2重項
が出現する

ρ, a_1

σ, π

パリティ2重項
の縮退がとける

a_1

ρ

σ

π

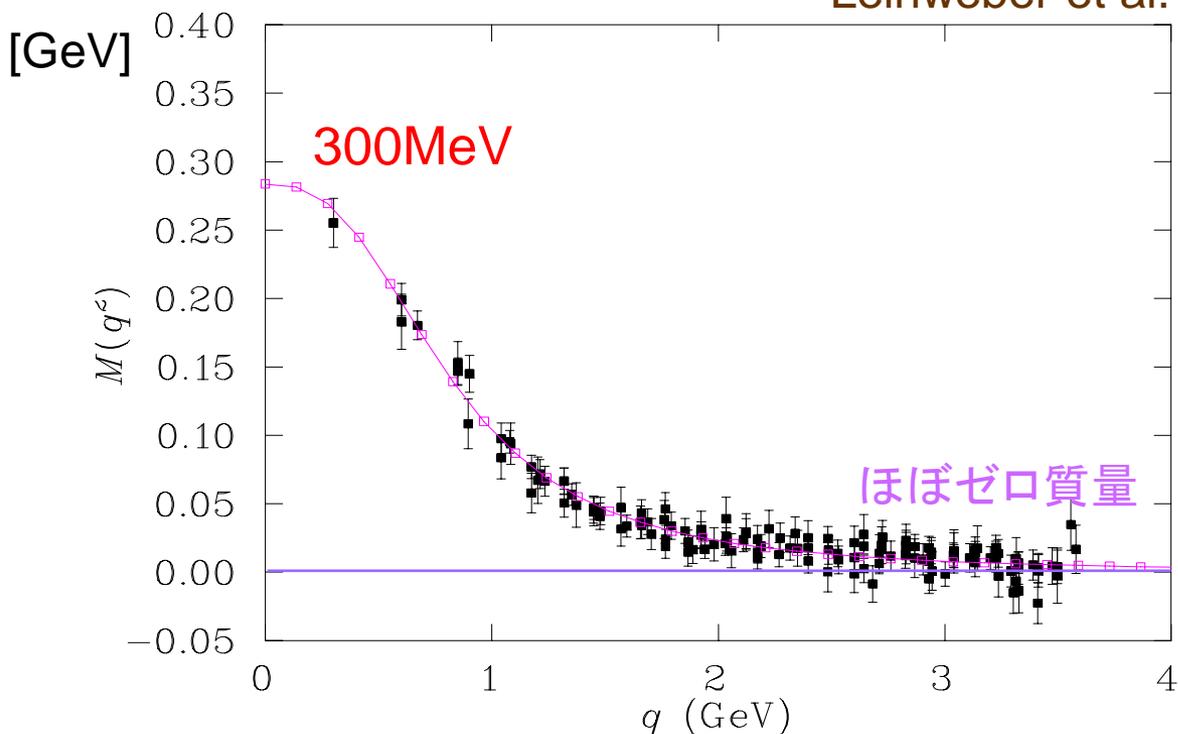
質量が小さい
南部・ゴールドストン
ボゾンが出現
～湯川のパイ中間子

クォーク質量関数 $M(q^2)$ に対する格子QCD計算

ユークリッド計量で
ランダウ・ゲージ ($\partial_\mu A^\mu = 0$) の場合

$$S_F(q) = \frac{Z(q^2)}{\gamma_\mu q^\mu + M(q^2)}$$

Leinweber et al.



低エネルギー領域
強結合的

高エネルギー領域
弱結合的

低エネルギー領域で 300MeV 程度のクォーク有効質量の生成

Quark Confinement

クォークの閉じ込め現象

☆ クォーク間ポテンシャル

☆ カラー・フラックス・チューブの形成



数学におけるQCDの位置づけ

QCDにおけるカラーの閉じ込めなどの
非摂動効果の解析的証明は
数学的にも極めて重要な超難問

QCDには100万ドルの懸賞金が掛けられている

クォーク質量がゼロまたは無限大という理想化されたQCDは、パラメータを全く含まない純粋な数学的理論であり、その数理科学的解法は数学上の重要な課題にもなっている。実際、QCDの数学的解法は、“ヤン・ミルズ方程式の質量ギャップ問題”として、リーマン予想、BSD予想、 $P \neq NP$ 問題、ホッジ予想、ポアンカレ予想、ナビエ・ストークス方程式の解の存在問題と共にミレニアムの7問題の1つとして、クレイ数学研究所から100万ドルの懸賞金がかけられている。



天才ペレリマンによる証明

QCDの非摂動的現象：クォークの閉じ込め

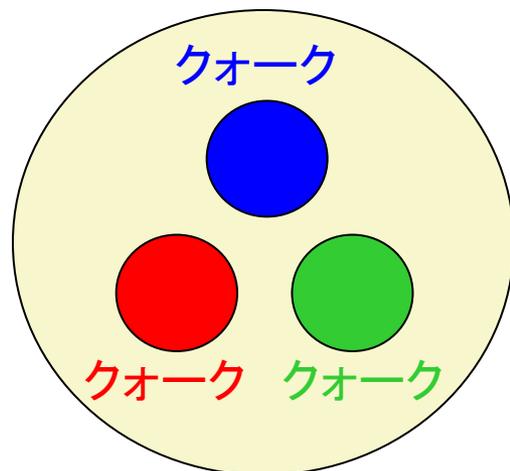
低エネルギー領域での強結合性



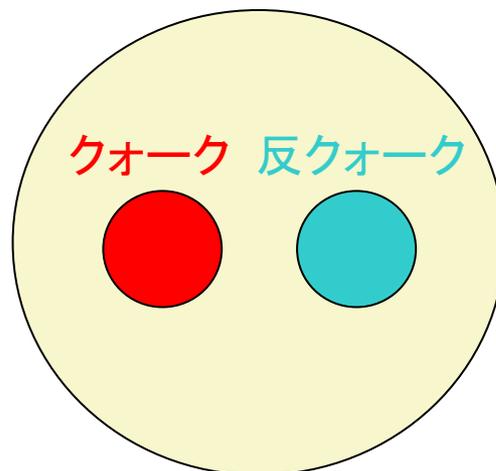
非摂動的現象：摂動論を超えた現象～真空が変質

カラーの閉じ込め

バリオン：核子など



中間子



?

クォークはハドロンの内部に閉じ込められている！

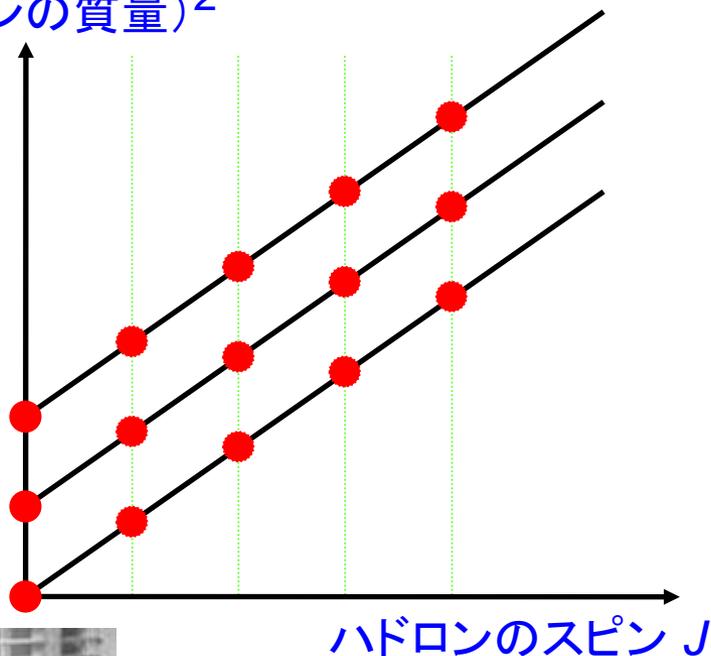
どのように閉じ込められているのか？

ハドロンのストリング描像

歴史

ハドロンのレグジュエ軌跡

(ハドロンの質量)²



$$M^2 = M_0^2 + 2\pi\sigma J$$

相対論的ストリング模型

クォーク

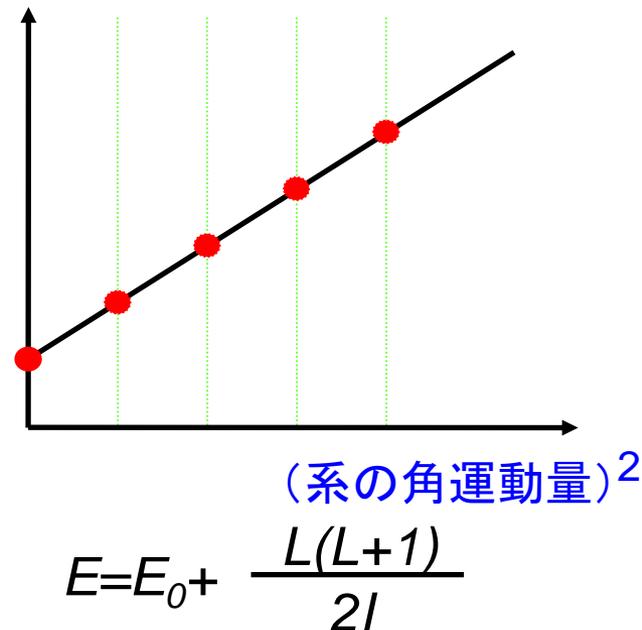
反クォーク



$\sigma = 1 \text{ GeV/fm}$: ハドロンの弦の張力 (閉じ込め力の強さ)

比較

非相対論量子力学
エネルギー



クォーク・反クォーク間の
線形ポテンシャル

$$V(r) = \sigma r$$

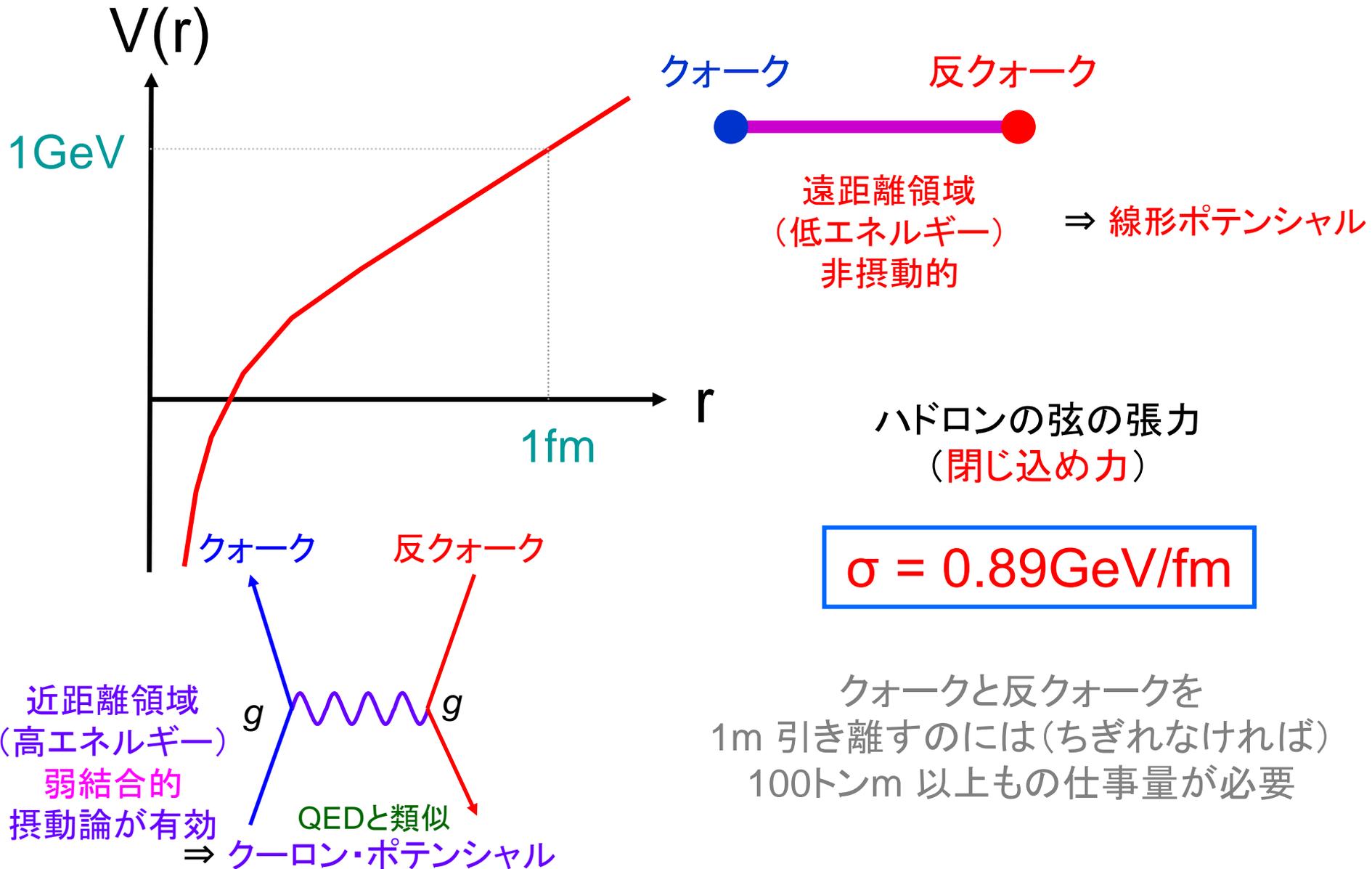


Wikipedia

南部による弦描像の提唱、南部・後藤による弦理論の構築(1969-70)

クォーク・反クォーク間ポテンシャルとクォークの閉じ込め

クォークoniumの実験データの解析や格子QCD計算から得られるクォーク間ポテンシャル

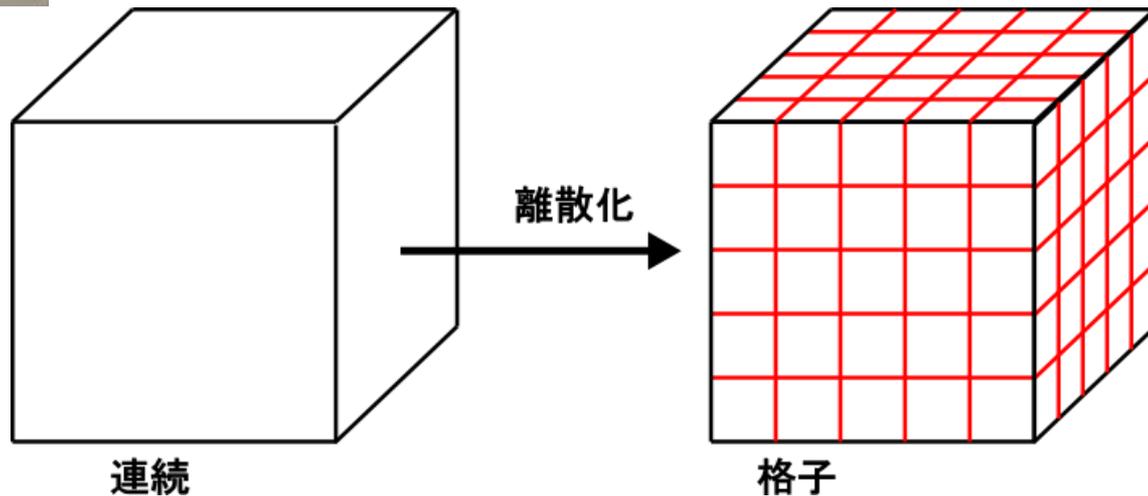
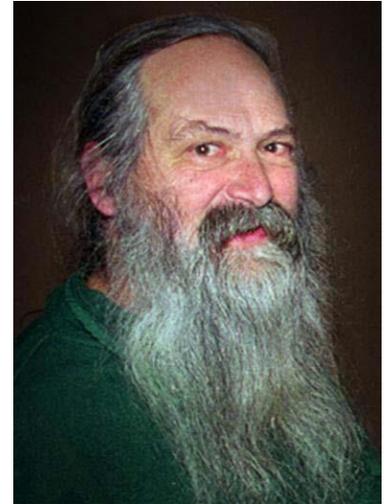


Lattice QCD

格子ゲージ理論～非摂動的解析の標準的理論



Kenneth Wilson による定式化 (1974)
Creutz による数値計算の成功 (1980)



格子QCDモンテカルロ計算

ユークリッド化: $t \rightarrow -it$ (虚時間の導入)

ウィルソンらによる定式化 (1974)
クロイツによる数値計算の成功 (1980)

ユークリッド時空でのQCDの生成汎関数 (経路積分=連続 ∞ 重積分)

$$Z_{\text{OCD}} = \int Dq D\bar{q} DA \exp(-S_{\text{OCD}}[q, \bar{q}, A])$$

取り得る全ての状態の総和

“指数関数部分”を確率的な重みの因子とみなす

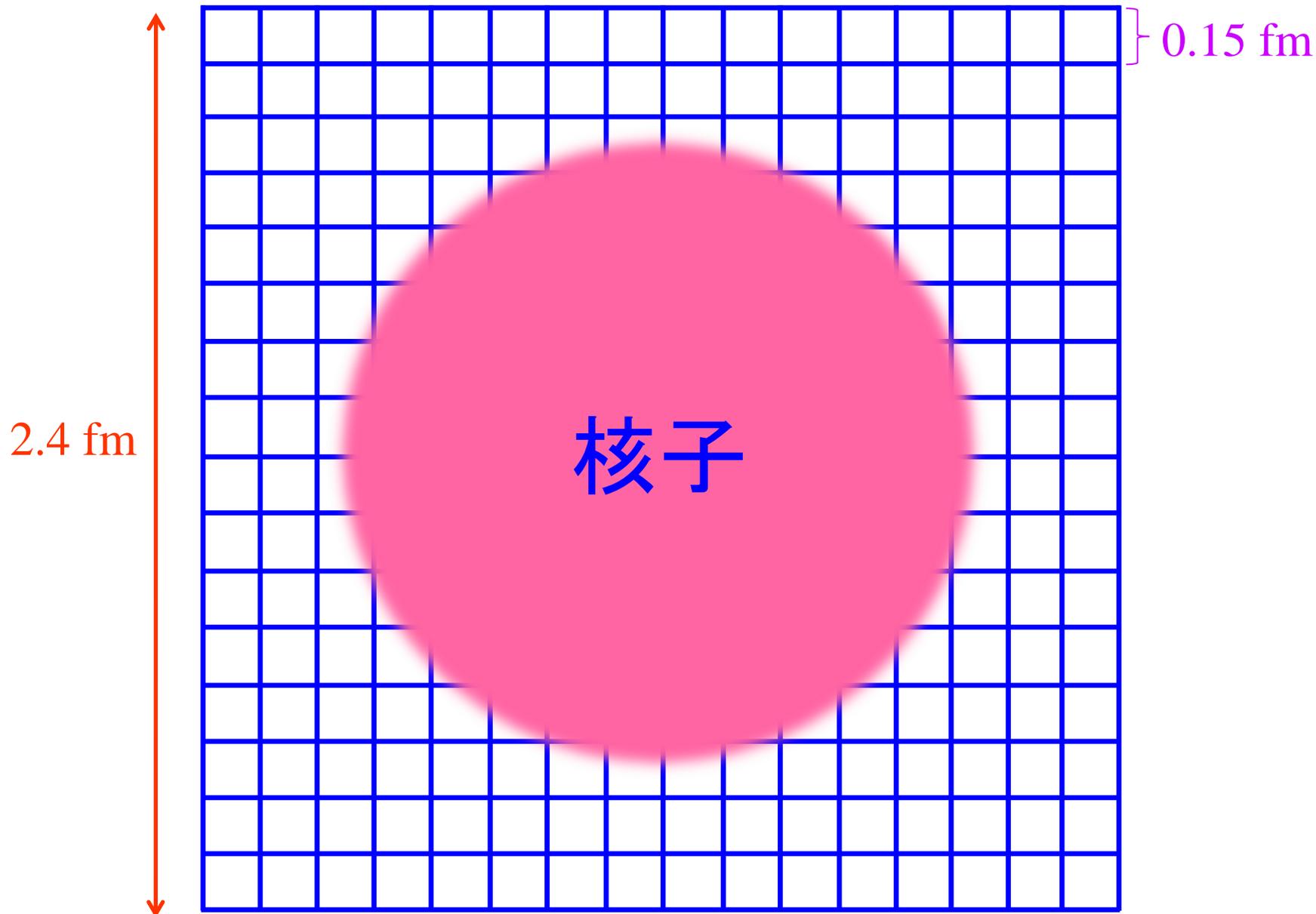
連続 ∞ 重積分を数百万重積分にまで“近似”してスパコンで解く!

被積分関数の“指数関数部分”を確率的な重みの因子とし、
統計力学的方法を用いた効率的なモンテカルロ計算を行い
QCDの生成関数を数値的に評価する

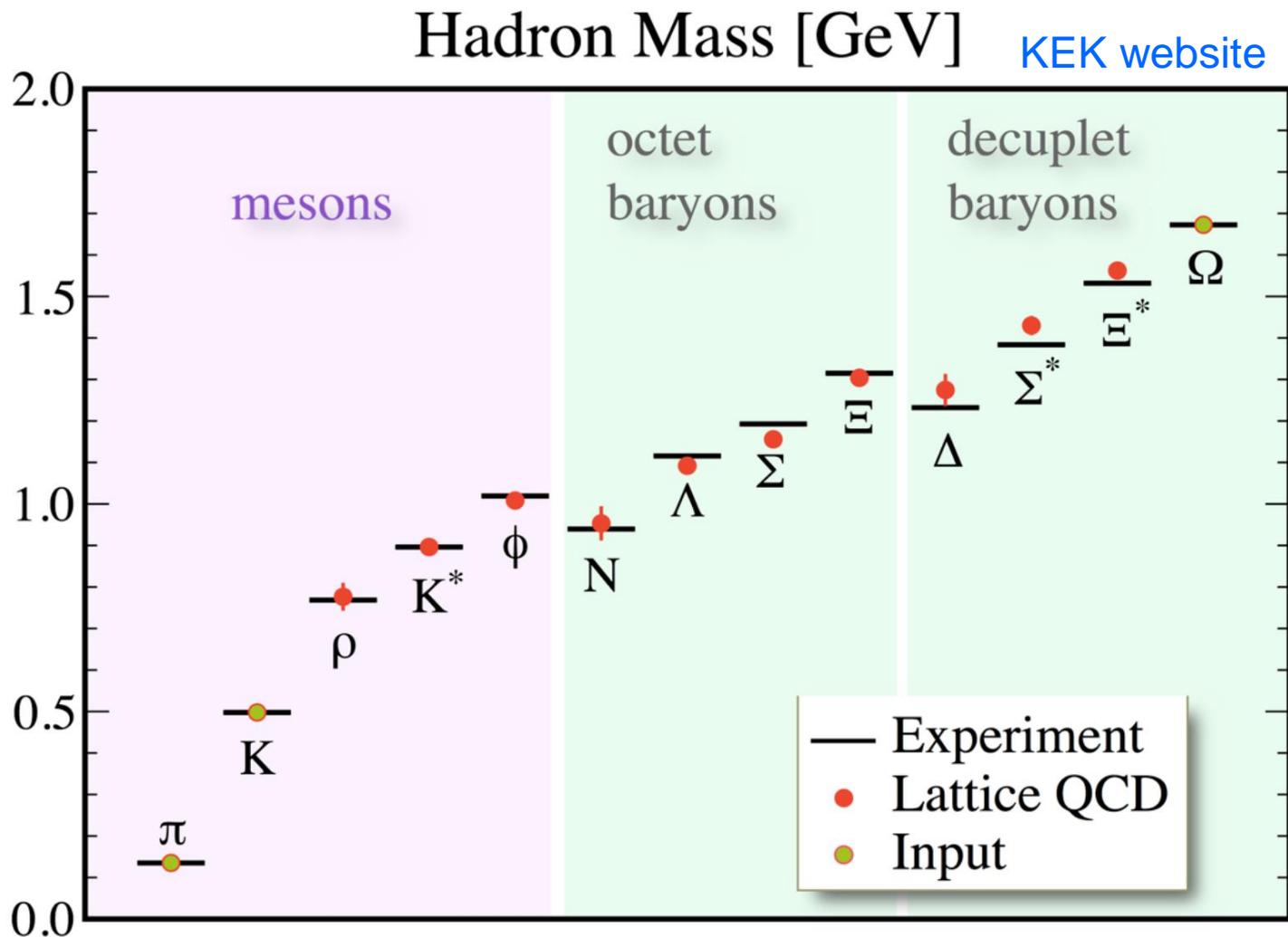
類似

統計物理学での分配関数: $Z = \text{Tr} e^{-H/T} = \sum e^{-E_n/T}$

16⁴ の格子QCD, $\beta=5.8$ ($a = 0.15$ fm)



格子QCDでのハドロン質量の計算



ハドロン質量などは格子QCD計算で精度良く再現される

グルーボール ~ QCDにおける“光”の分子状態

QEDにおいては、光(フォトン)の分子状態“フォトニウム”は存在しない
← 電氣的に中性の光同士は相互作用しないから

QCDの非可換性

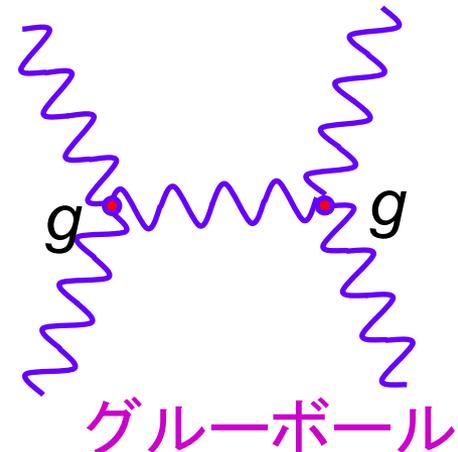
- グルーオンの自己相互作用
- グルーオンのみの束縛状態 ~ QCDにおける“光”(ゲージ場)の分子状態
グルーボール: クォーク模型を越えて QCDが预言する粒子
 - ~ QCDならではの粒子
 - ~ フレーバー1重項の中間子 ($I=S=0, B=0$) として存在

グルーボール候補: $f_0(1500)$ ← Crystal Barrel の実験

格子QCDによるグルーボールの研究

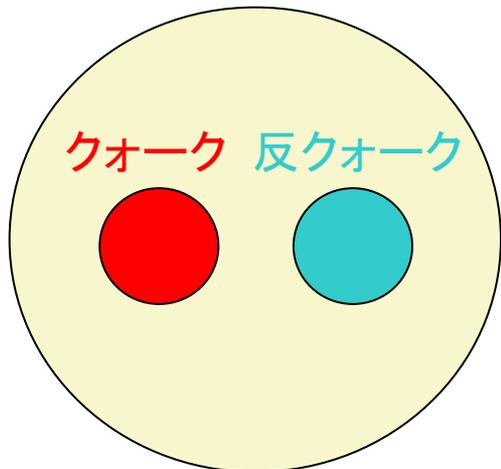


$J^{PC}=0^{++}$ のスカラー・グルーボール: 約1.5GeV
 $J^{PC}=2^{++}$ のテンソル・グルーボール: 約2.2GeV

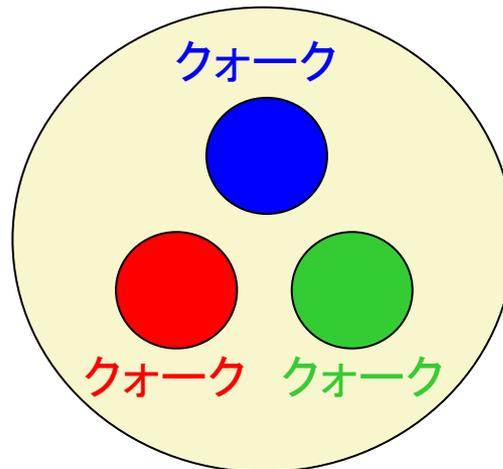


様々なハドロン中でのクォーク閉じ込めの様相

中間子

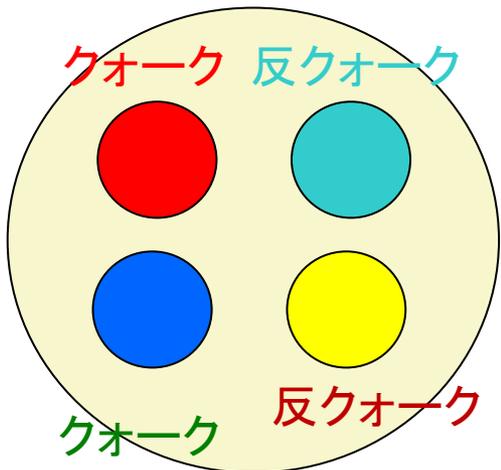


バリオン: 核子など

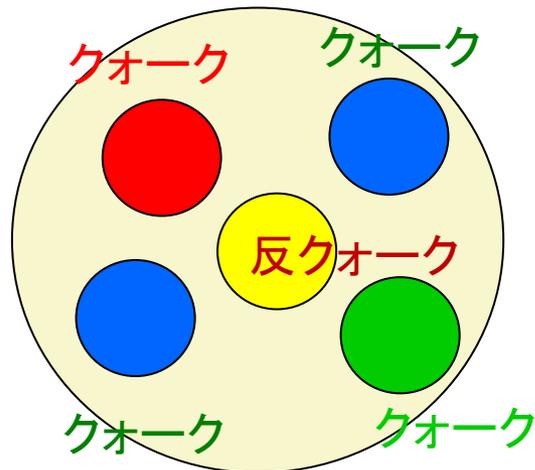


?

テトラクォーク

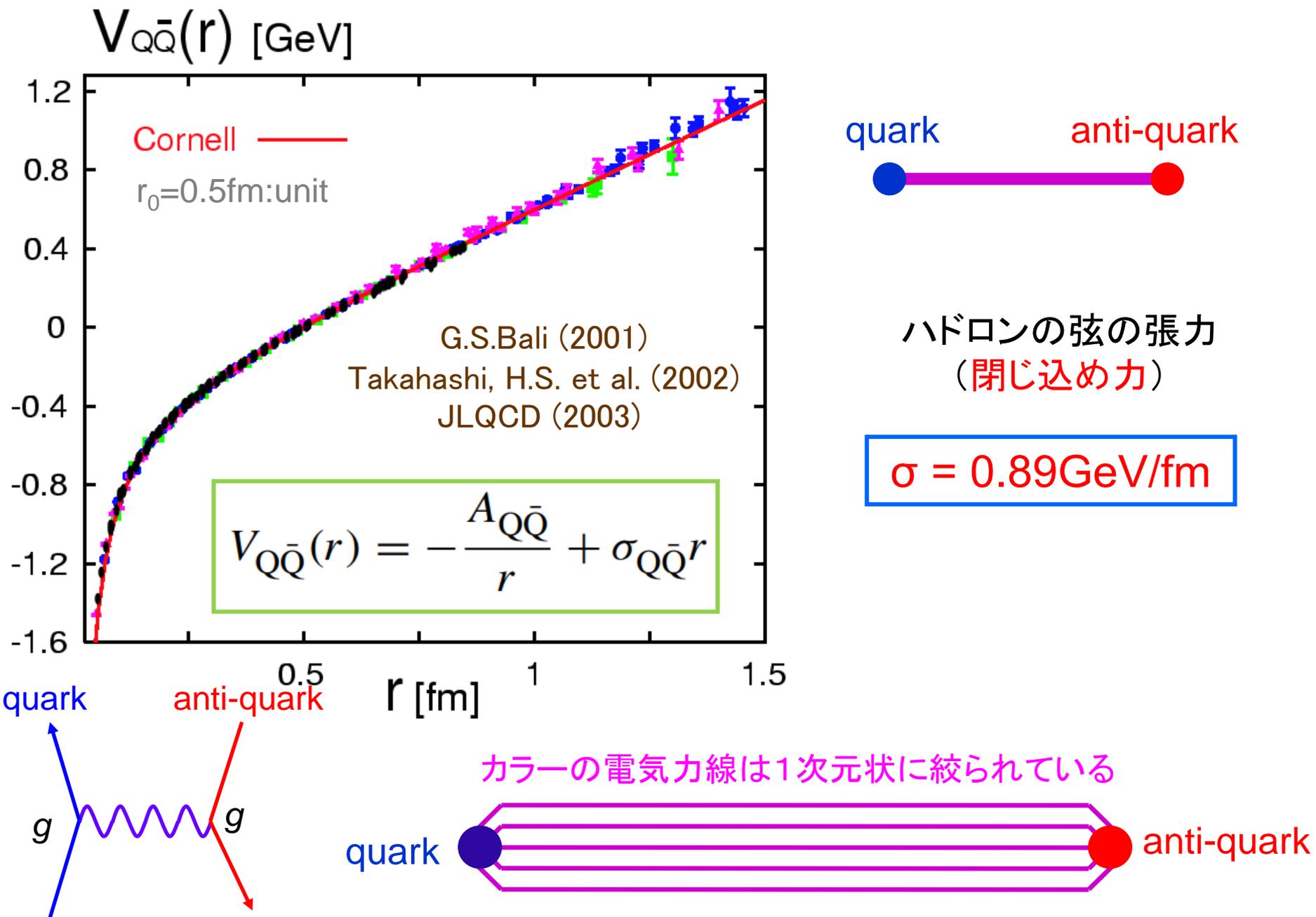


ペンタクォーク

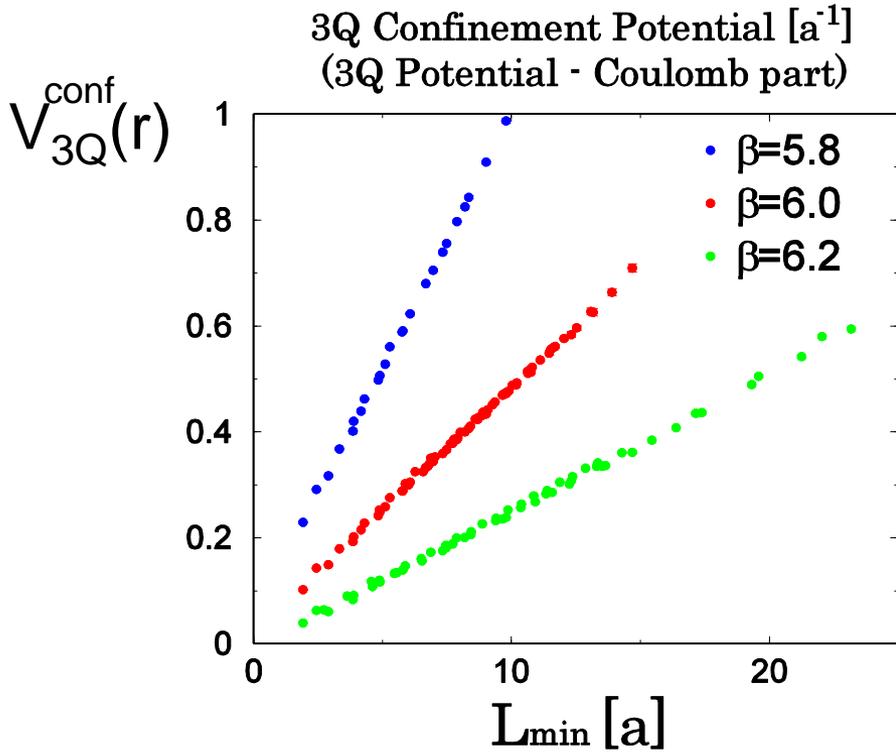


?

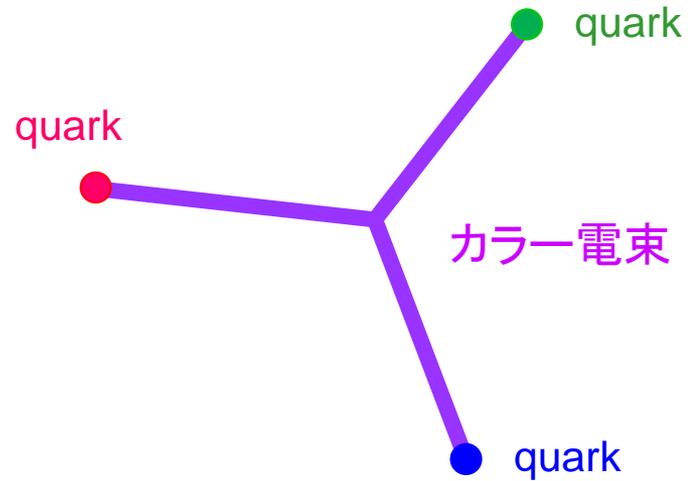
Quark-antiquark static potential in Lattice QCD



バリオン中での閉じ込めポテンシャルの計算



H. Suganuma et al. PRL(2001), PRD (2002)



L_{min} : 3つのクォークを結ぶ最短のストリングの長さの和

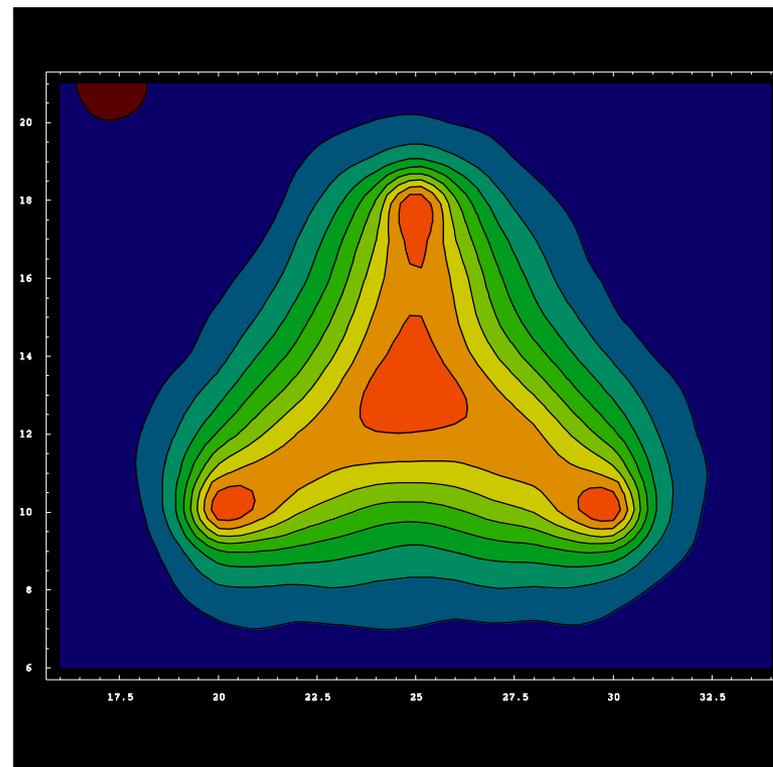
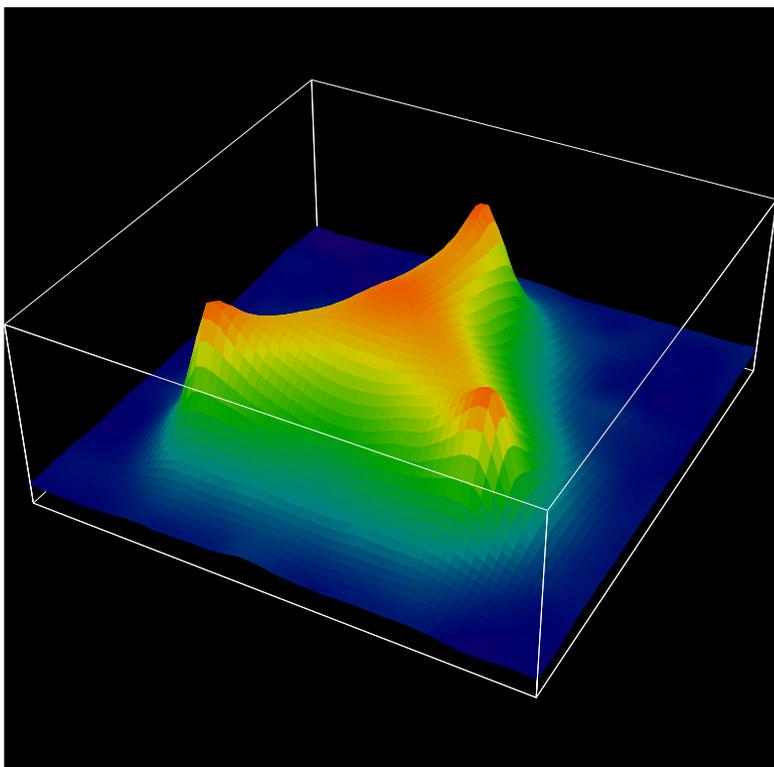
$$V_{3Q} = -A_{3Q} \sum_{i < j} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \sigma_{3Q} L_{min}$$

閉じ込め力は同じ
 $\sigma = 0.89 \text{ GeV/fm}$

1グルーオン交換による
クーロン型ポテンシャル

弦描像に基づく線形の
閉じ込めポテンシャル

格子QCDによるバリオン中での カラー電束の形成の検証とクォークの閉じ込め



H. Ichie et al., Nucl. Phys. A721, 899 (2003)

エキゾチック・ハドロン:新しい量子多体系の形

マルチ・クォーク候補の実験的発見

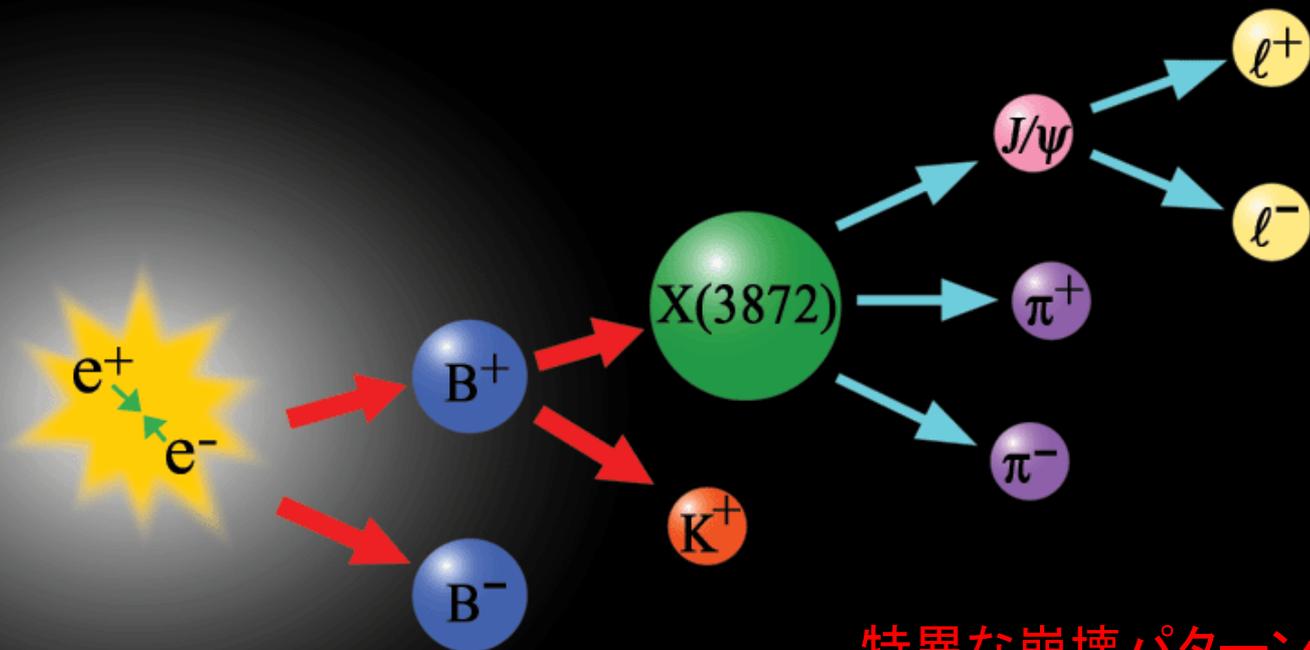
テトラ・クォーク候補:

$X(3872)$, $Y(3940)$, $D_{s0}^+(2317)$ など

~ KEK (Belle), SLAC (BaBar) 等で

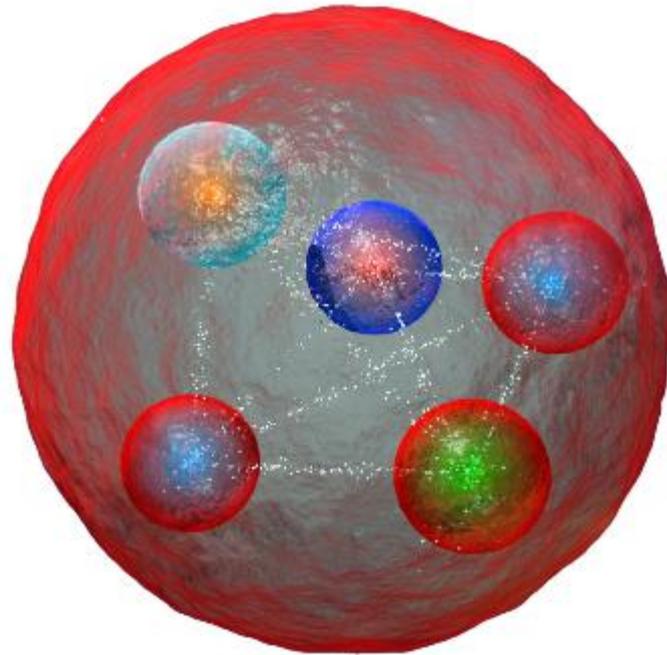
発見・確認 (2004年)

重いチャーム・クォークを含むQCDの物理



特異な崩壊パターン

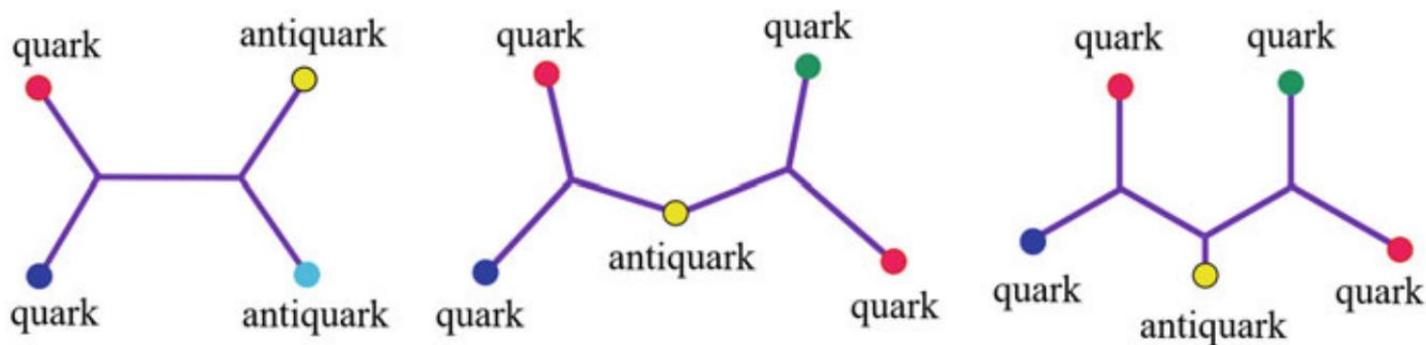
CERNのLHCb実験でペンタクォークを発見



ペンタクォーク($uudc\bar{c}$)のイメージ図 : CERN・LHCbより

格子QCDによるクォーク多体系の閉じ込めポテンシャルの解明

Okiharu, H.S. et al. PRL, PRD (2005)



L_{min} : n 個のクォークを最短で繋ぐストリングの長さの和

$$V_{nQ} = \frac{3}{2} A_{nQ} \sum_{i < j} \frac{T_i^a T_j^a}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \sigma_{nQ} L_{min}$$

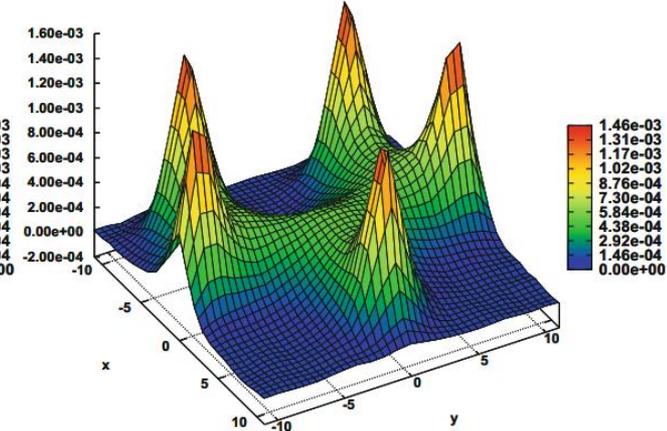
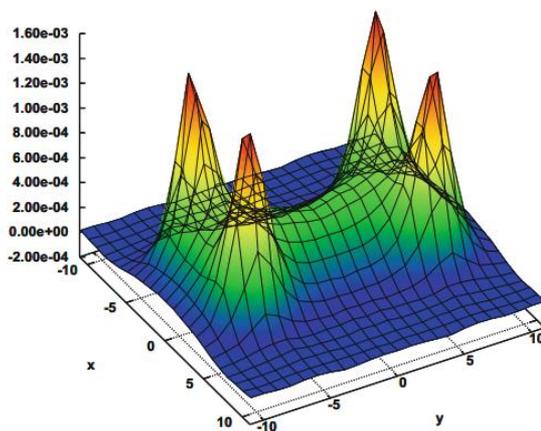
閉じ込め力は同じ

$\sigma = 0.89 \text{ GeV/fm}$

1グルーオン交換
によるクーロン項

弦描像に基く線形の
閉じ込めポテンシャル

Bicudo et al. PRD (2011)

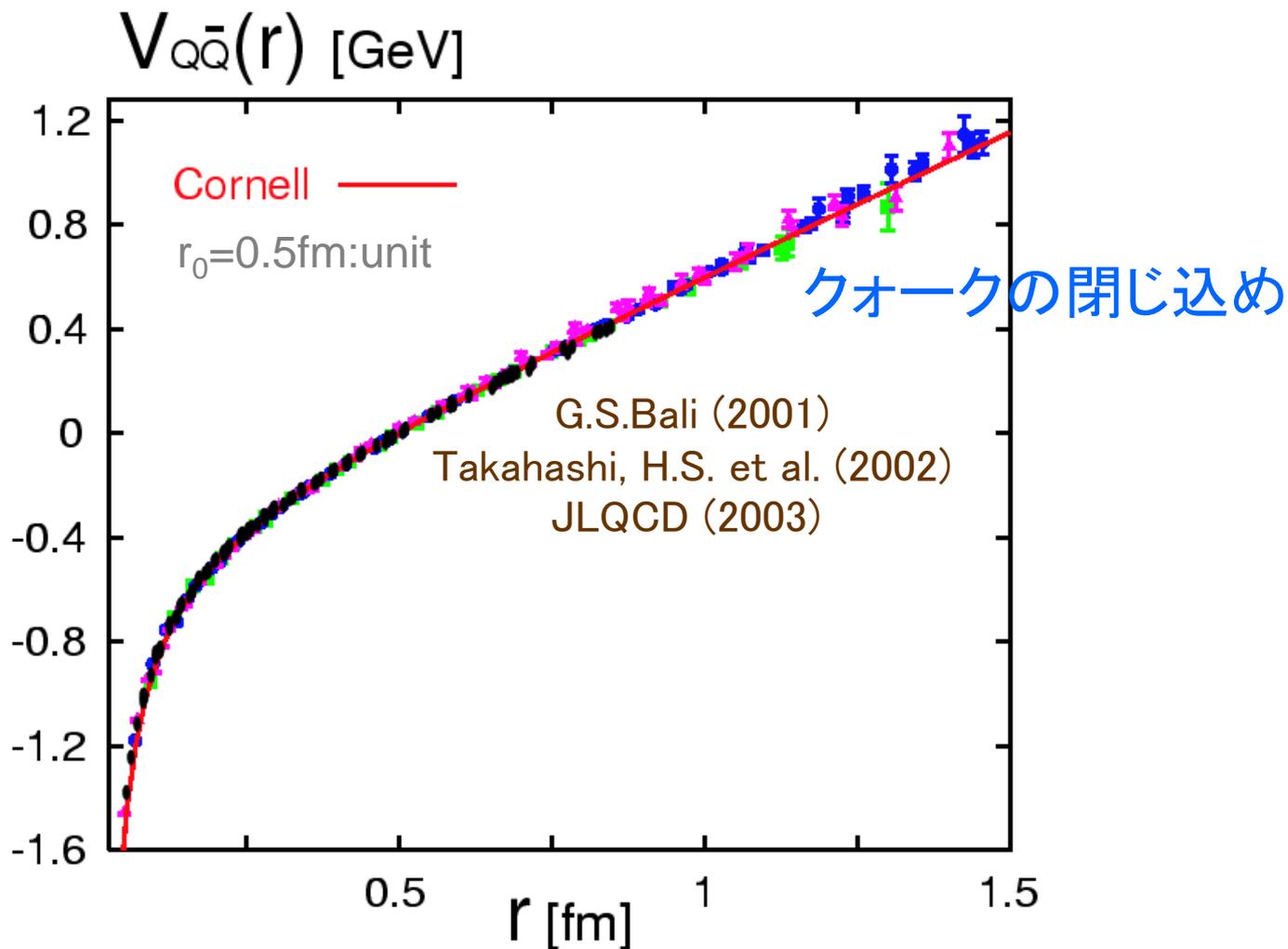


2兆度以上の超高温の世界

クォーク・グルーオン・プラズマ

宇宙の初期状態を探る

ゼロ温度でのクォーク間ポテンシャル

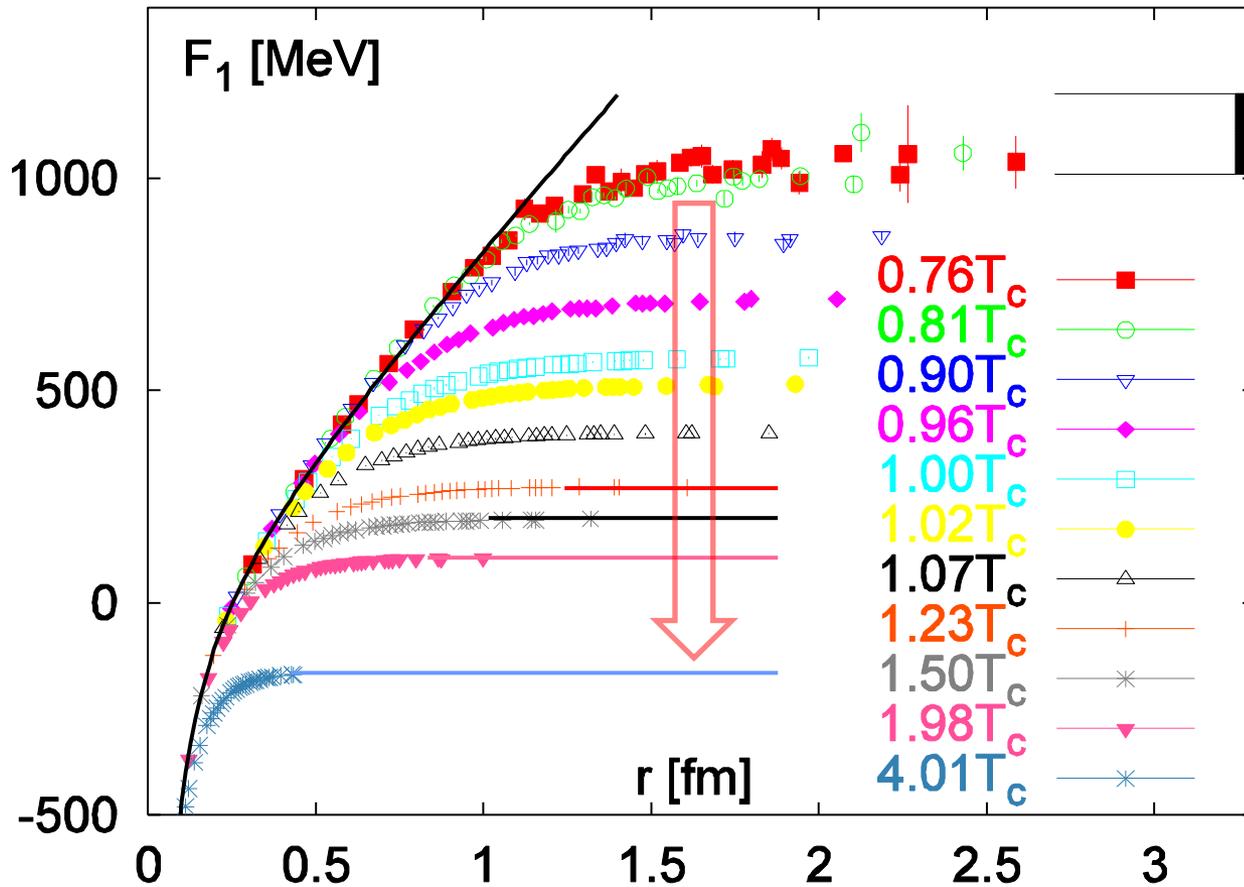


カラーの電気力線は1次元状に絞られている



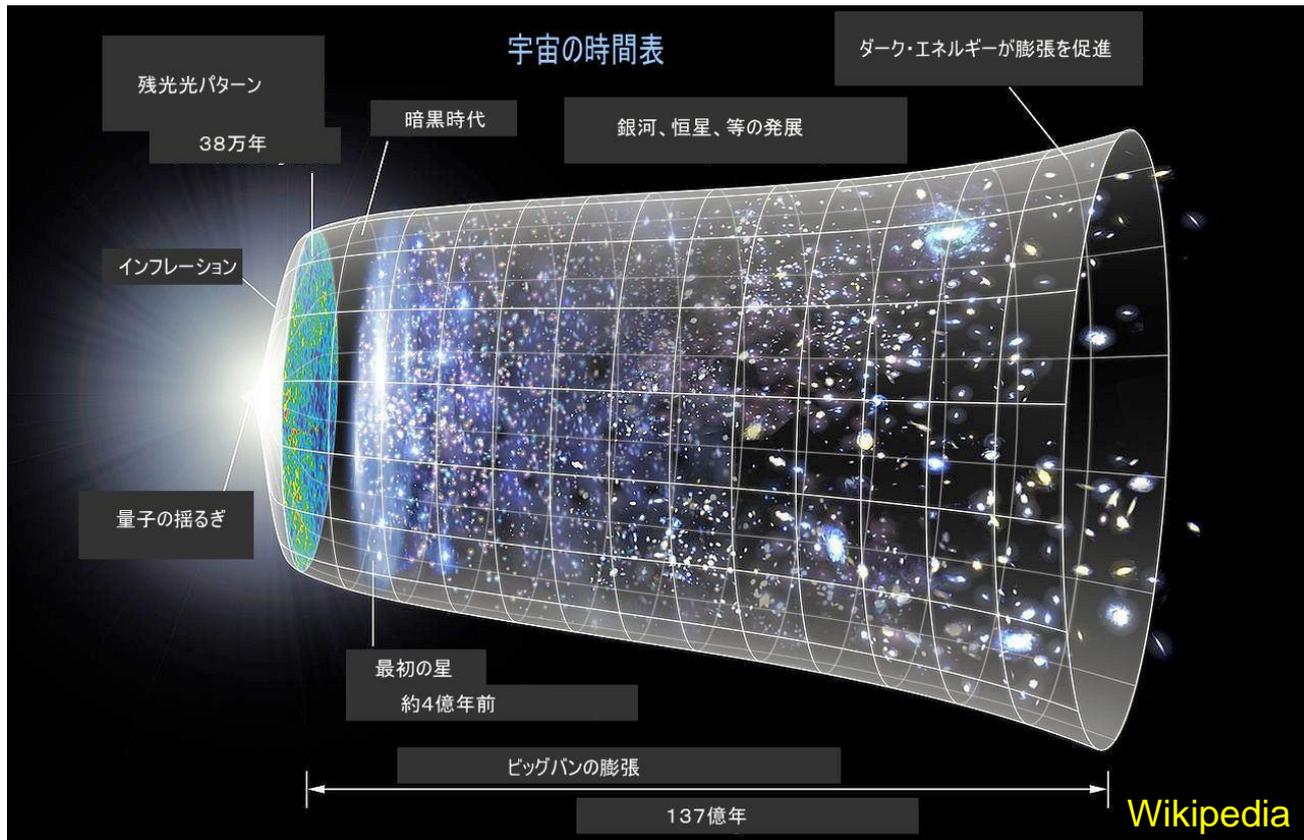
有限温度でのクォーク間ポテンシャル に対する格子QCD計算

Kaczmarek, Zantow



高温ではクォーク間ポテンシャルが遮蔽され
クォークは閉じ込められず、非閉じ込め相になる

QCD相転移: 宇宙最後の真空相転移



ビッグバン直後

10^{-35} sec: GUT相転移→インフレーション?

10^{-11} sec: WS相転移→ヒッグス凝縮

10^{-5} sec: QCD相転移→QGPからハドロンへ

QCD相転移: 2兆度の世界と宇宙最後の真空相転移

☆ クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相:

約2兆度以上の高温で実現する 全く新しい物質相

(臨界温度: $T_c =$ 約170MeV \doteq 1.7兆度)

・閉じ込め力の消失 → クォークやグルーオンは比較的**自由**になる

・カイラル対称性の回復 → クォーク質量の消失

☆ QCD相転移: 宇宙最後の真空相転移

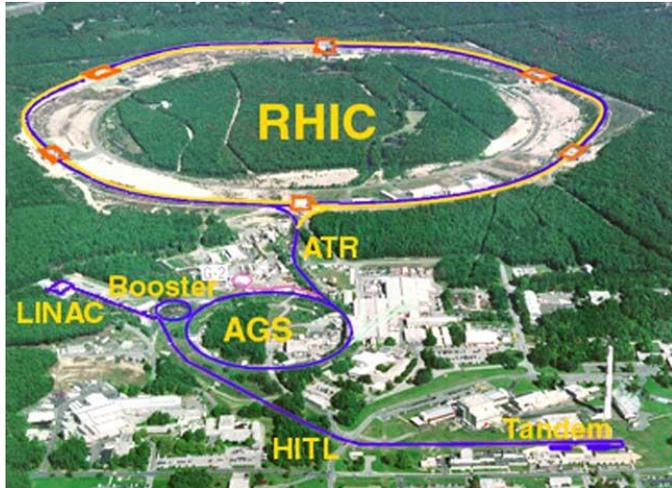
→ 宇宙の初期状態(ビッグバン直後10~100 μ 秒)

☆ 超高エネルギーの重イオン衝突によるQGP生成実験

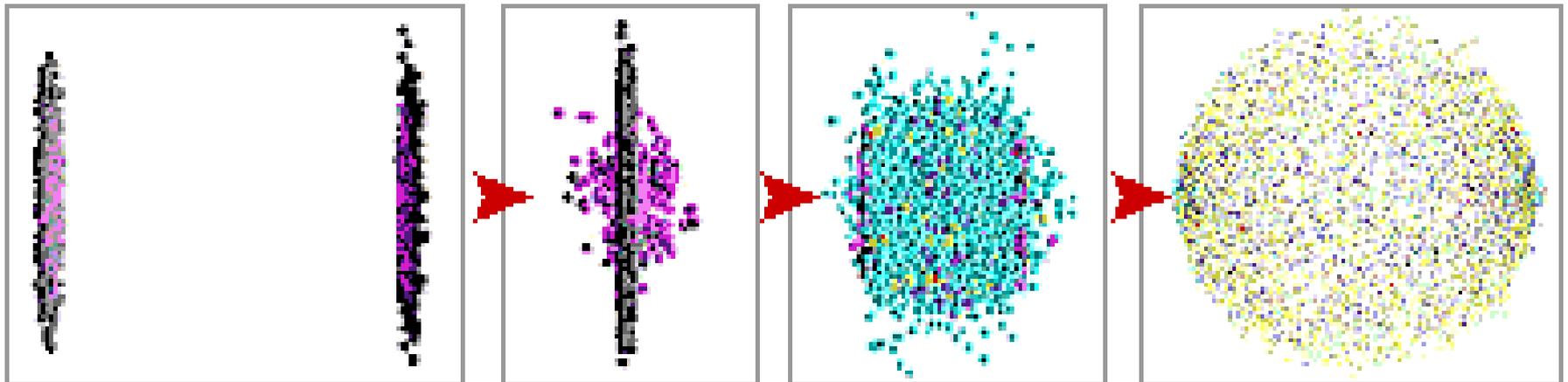
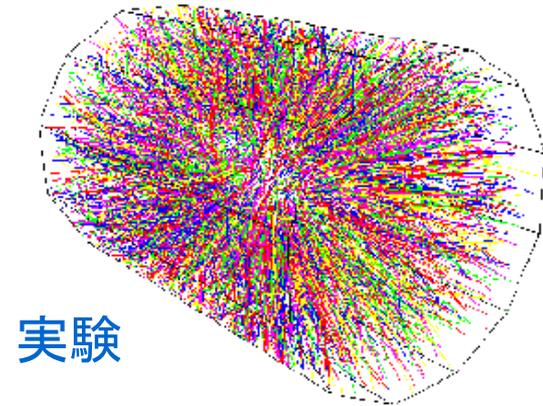
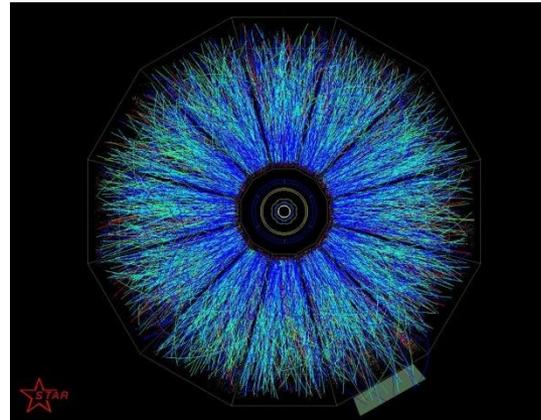
~リトルバン実験

米国ブルックヘブン国立研究所の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) でのQGP相生成実験

Figure from RHIC



超高エネルギー重イオン衝突実験
(核子あたり200GeV Au+Au)



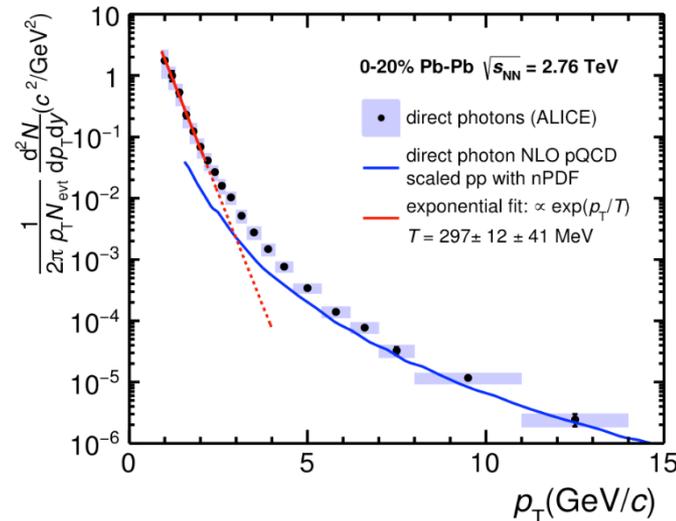
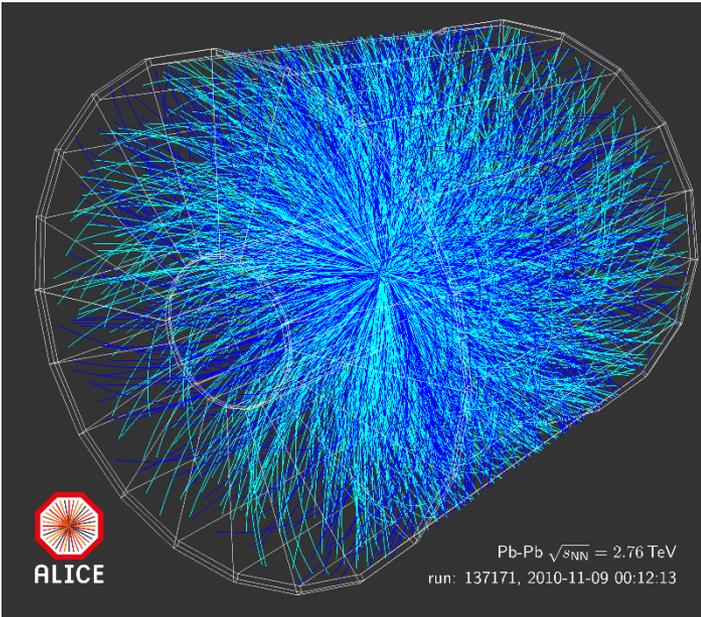
流体モデルによるシミュレーション

CERN の Large Hadron Collider (LHC) の ALICE実験での高温のQGP相生成実験

Figure from LHC



超高エネルギー重イオン衝突実験
(核子あたり数TeV Pb+Pb)



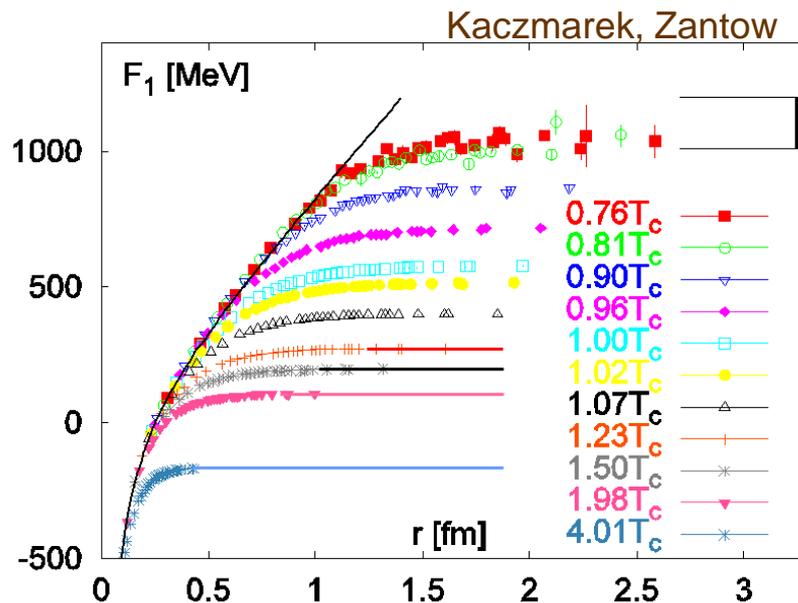
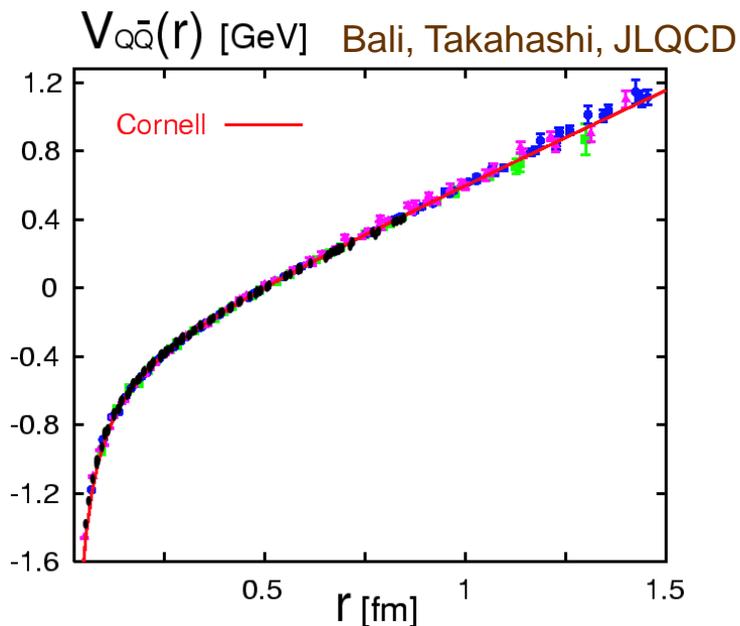
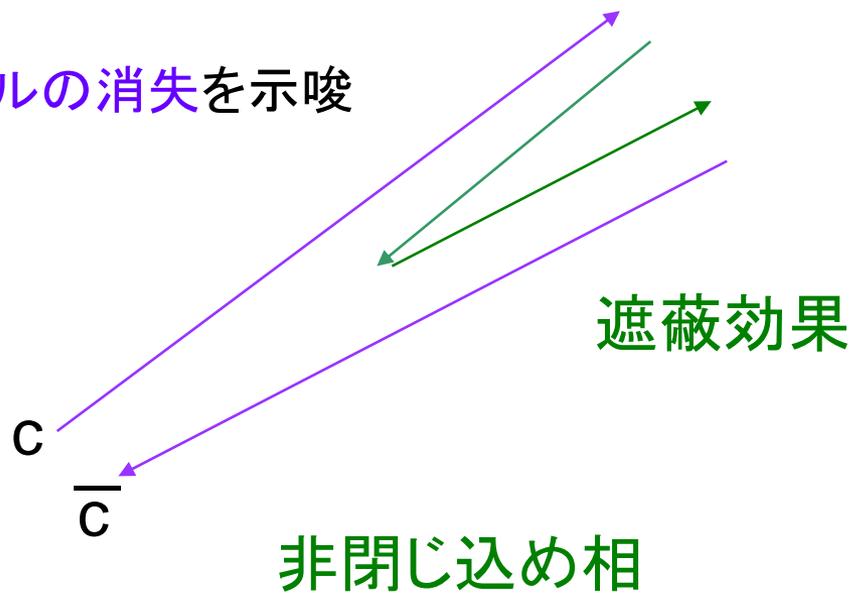
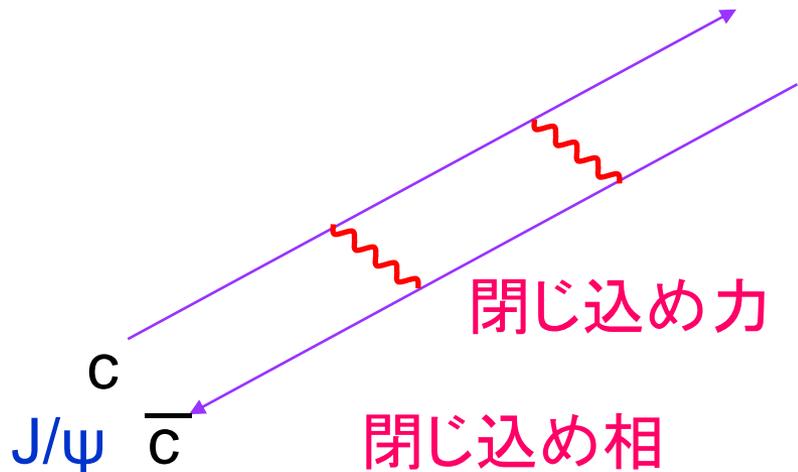
300MeV
≒約3兆度

クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)生成実験

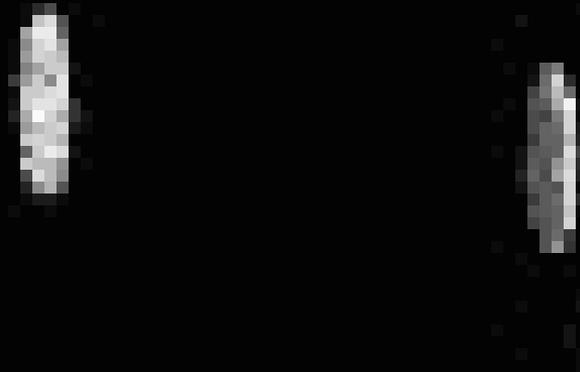
- **J/ψ生成の強い減少** → QGP中での閉じ込めポテンシャルの消失を示唆
- 生成粒子の大きな**方位角異方性** → 非中心衝突の場合の**アーモンド型**のQGP生成を示唆
- 短時間での**高い化学平衡温度**の実現 → ハドロン反応では説明できず、QGPでの**クォーク反応**で説明可能
- **ジェット・クエンチング** (粒子の横運動量分布における高運動量成分の減少) → クォーク・パートンのQGP相通過に伴う**エネルギー・ロス**を示唆

Strong J/ψ suppression

- J/ψ 生成の強い減少 \rightarrow
QGP中での閉じ込めポテンシャルの消失を示唆



高エネルギー重イオン衝突のシミュレーション



QGP実験に対する 相対論的流体モデルでの解析

相対論的流体モデルによるシミュレーションとの比較

→ QGPの粘性は極めて小さい？

→ QGPは超流動のような理想流体？

～QGP中での強相関性を示唆

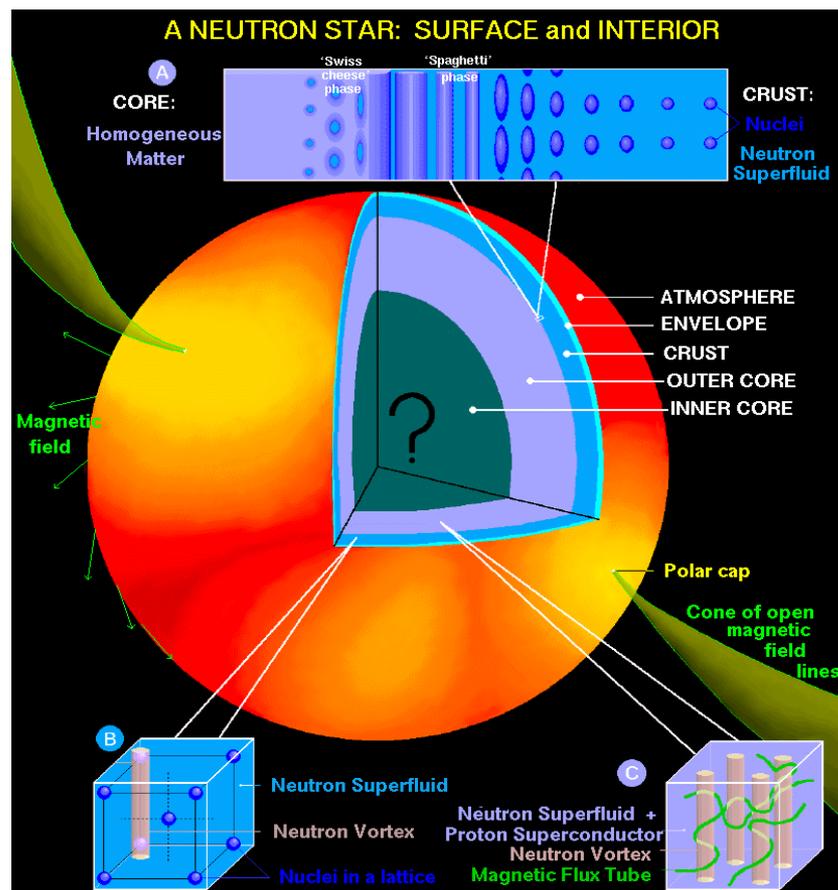


高温なのに理想流体として振舞うQGPの謎と
そのメカニズムの物理的解明

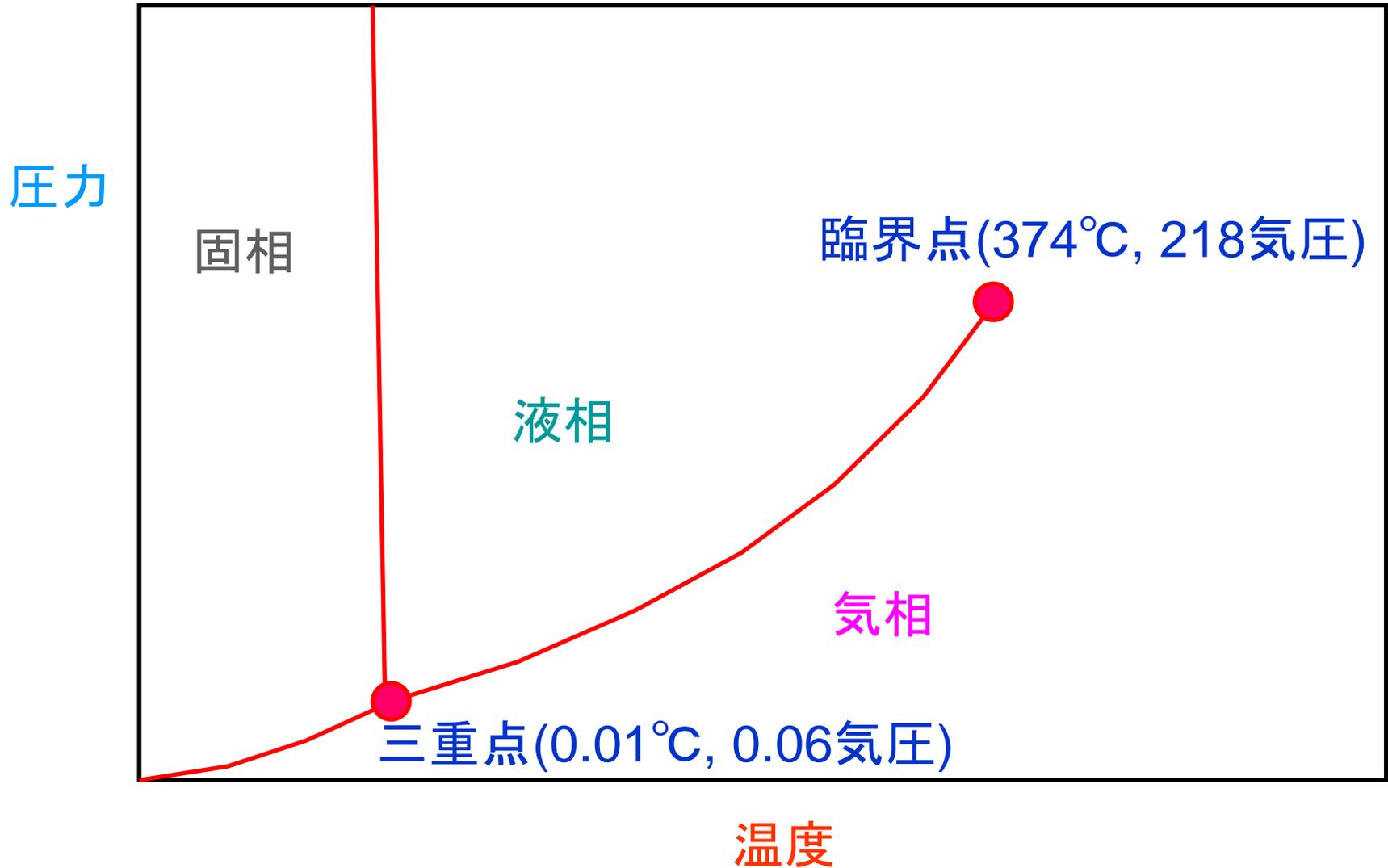
～超弦理論のDブレーンで説明可能？

有限密度のQCD

中性子星の内部に迫る



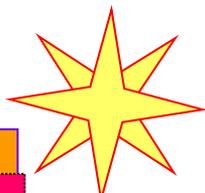
水の相図と臨界点



RHIC, LHC
格子QCD

QCDの相図

高温
初期宇宙



ビッグバン直後
10~100マイクロ秒

強結合QGP

クォーク・グルーオン・プラズマ
(QGP)相

カラー自由度の開放
カイラル対称性の回復

ハドロン相

カラーの閉じ込め
カイラル対称性の自発的破れ

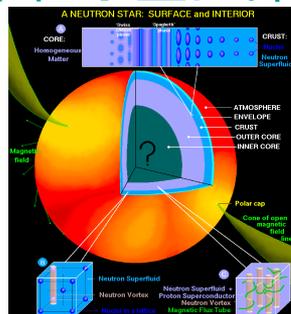


原子核

中性子星内部

高密度

μ_B



約170MeV
(約2兆度)

高密度天体～中性子星

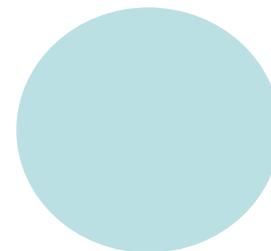


約100億年後



赤色巨星

白色矮星



電子の縮退圧
で重力崩壊を
まぬがれている

地球と同程度の大きさ



II型超新星爆発



中性子星



中性子の縮退圧
が重力と拮抗

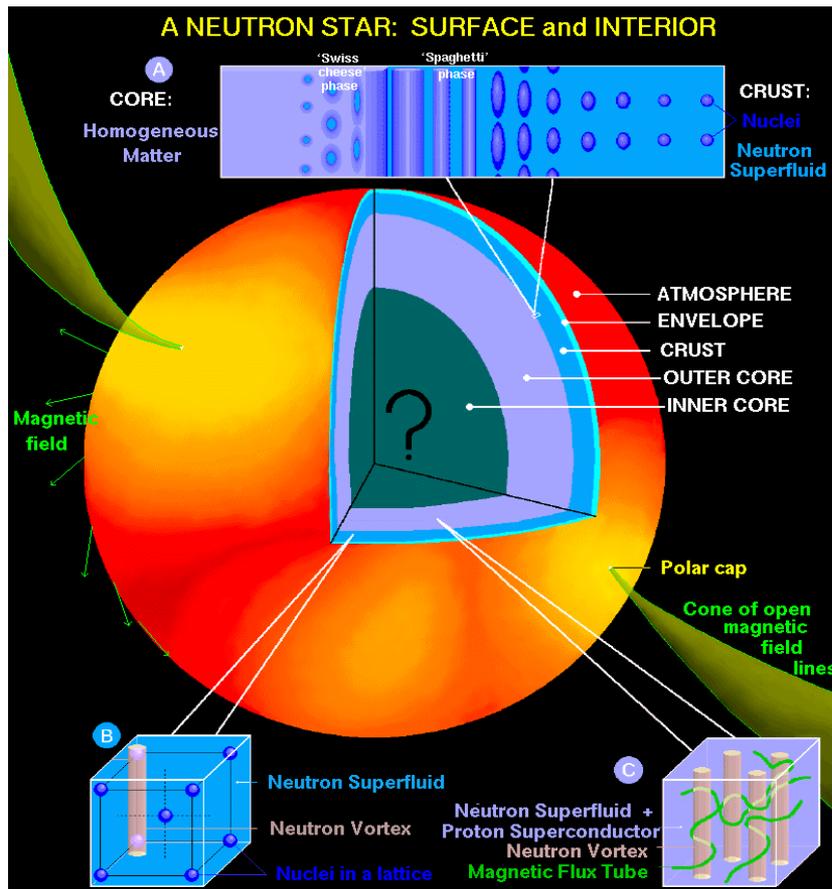
半径 約10km

太陽質量の約1.4倍

(チャンドラセカル限界質量)

高密度天体とQCDが予言する新しい物質相

Dany Page



中性子星：巨大な原子核

中性子星

質量：太陽質量の約1.4倍

半径：10km程度

密度： 10^{14} g/cm³

表面付近での重力：地表の約1兆倍

磁場： 10^{12} ガウス程度

(～地磁気の1兆倍程度)

マグネター(強磁場中性子星)

磁場： 10^{15} ガウス以上

(～地磁気の千兆倍以上)

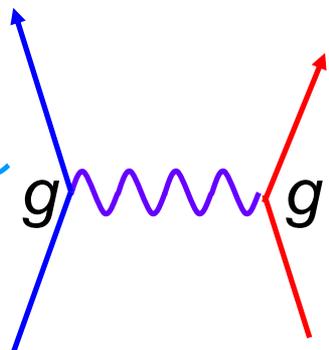
- ・中性子星の中心領域 $\sim 3\rho_0$ (原子核内部の3倍程度の高密度)
→ ハドロン物質 (カイラル対称性の部分的回復)
クォーク物質 (カラー超伝導相?)
- ・マグネターの強磁場の起源 → クォーク起源の強磁性?

高密度QCDの解析

ウイルツェックら (1998)

高密度QCD

閉じ込め力は消失し
クォークは自由にな
ったものの...



高密度極限のQCDでは、
ダイクォーク(クォーク対)の凝縮による
カラー超伝導が実現する $\langle qq \rangle \neq 0$

$$\Rightarrow \langle qq \rangle \neq 0 \Rightarrow$$

カラー超伝導状態

異なるカラーの
クォーク間に引力

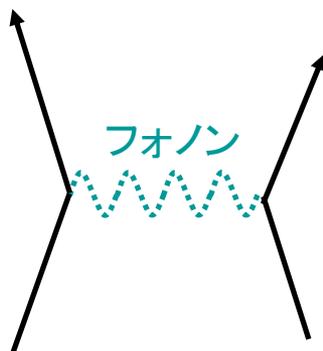
異なるカラーの
ダイクォーク凝縮

多様な相構造

~最新の物性研究とも
密接に関連

比較

超伝導



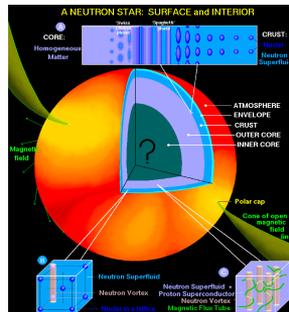
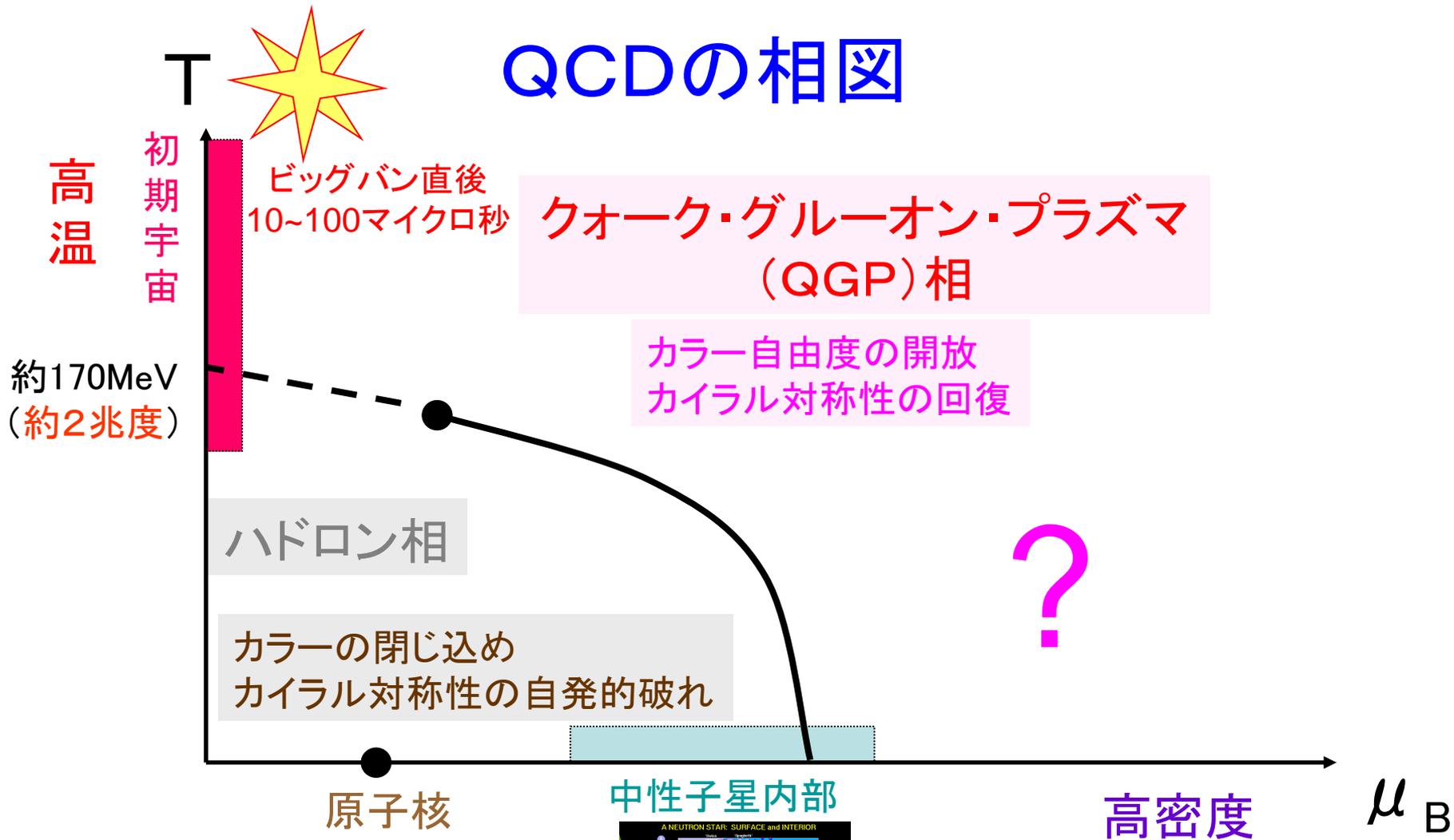
$$\Rightarrow \langle \psi\psi \rangle \neq 0 \Rightarrow$$

超伝導状態

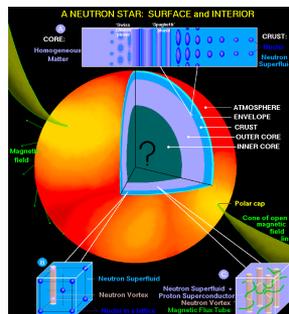
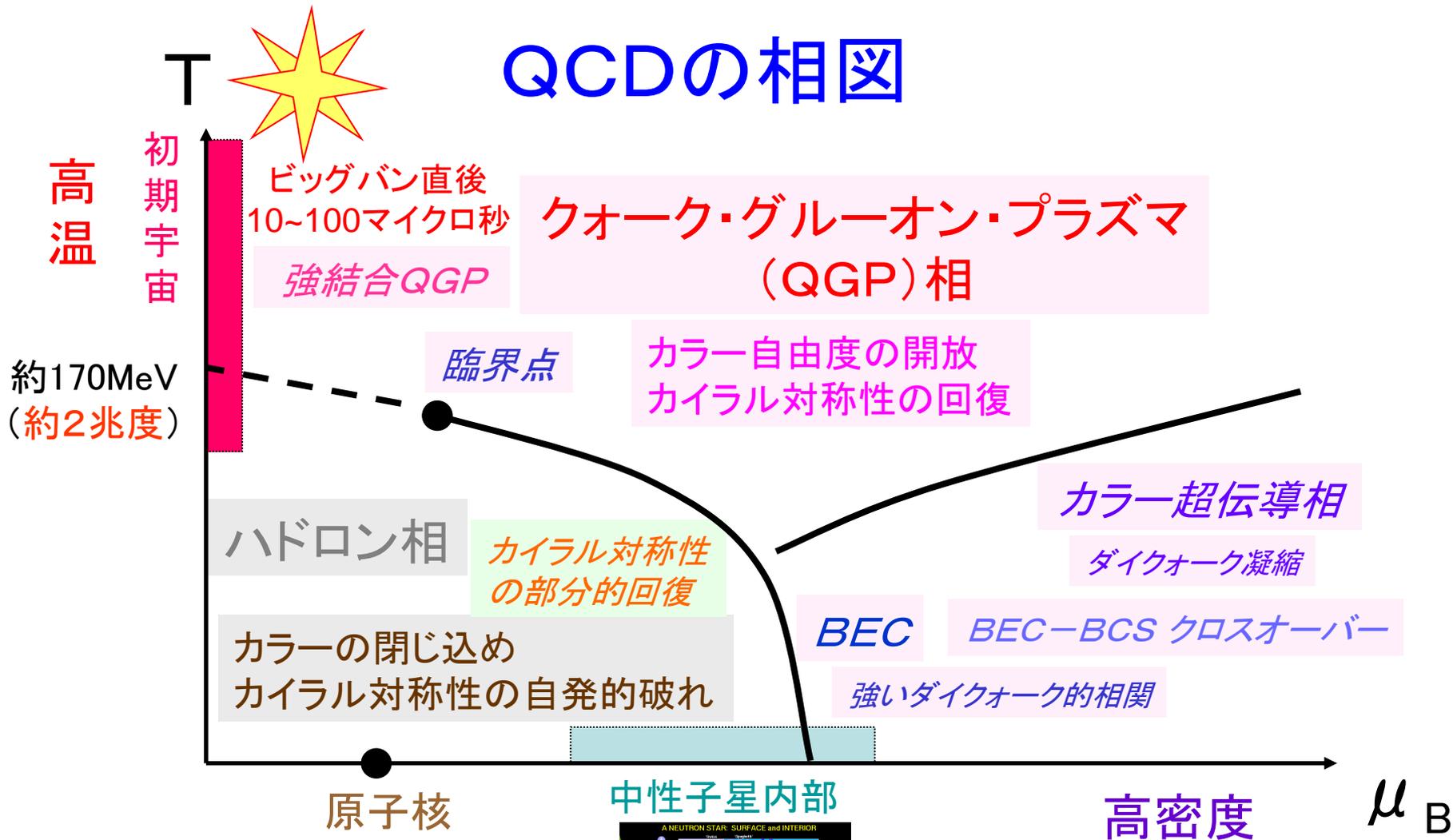
フォノンにより電子間に引力

クーパー対凝縮

QCDの相図



QCDの相図



中性子星とクォーク・ハドロン核物理

大西 明 京都大学 基礎物理学研究所 教授

「中性子星を支える力」(京大市民講座2014年11月29日)

素晴らしい講演 ~ You Tube で視聴可能



Dual Superconductor Picture for Quark Confinement

双対超伝導描像によるクォークの閉じ込め機構



クォークの閉じ込め機構の研究

カラー電気力線が1次元状に絞り込まれる

→ クォーク間に線形の閉じ込めポテンシャルの形成
(cf. コンデンサー)

カラーの電気力線は1次元状に絞られている



では、どのようなメカニズムで QCD真空において
カラー電気力線が1次元状に絞られるのか？

永年にわたる超難問であり、
現代物理学における未解決問題の1つ

QCDにおけるカラーの閉じ込めなどの非摂動効果の
解析的証明は数学的にも極めて重要な超難問であり、
100万ドルの懸賞金が掛けられている

クォークの閉じ込めに対する双対超伝導描像

超伝導体中での
マイスナー効果: 磁束の排除
⇒ アブリコソフ・ボルテックス

電磁気学における双対性:
電場と磁場の入れ替えに対する
マックスウェル方程式の対称性

磁束

アナロジー

電荷(クーパー対)の凝縮
↓
磁束が一次元的に絞られる

超伝導体

$$\begin{cases} \partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\nu \\ \partial_\mu {}^*F^{\mu\nu} = k^\nu \end{cases}$$

南部・トーフトラ (1974)



双対超伝導描像

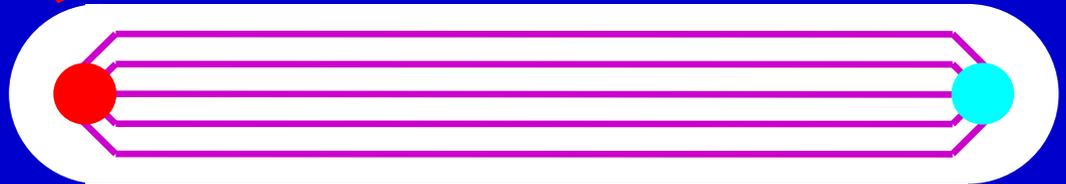
双対超伝導体

カラー磁荷(カラー磁気単極子)凝縮

↓
カラー電束が一次元的に絞られる

クォーク

反クォーク

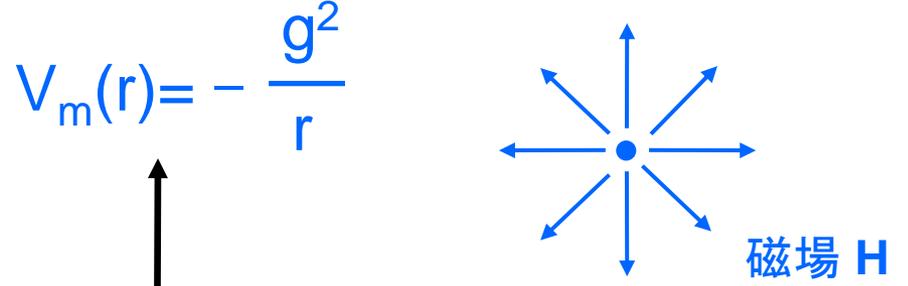
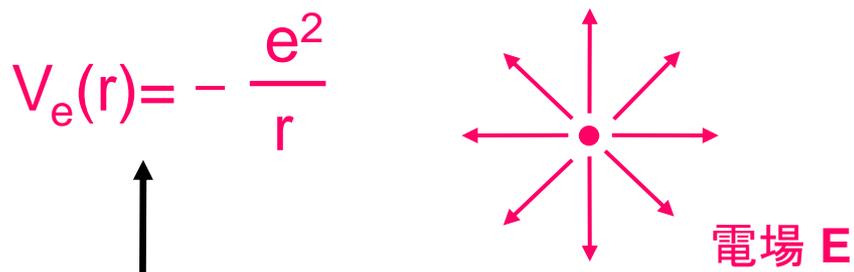


カラー電束の排除

1990年以降 格子QCD計算等を用いた
双対超伝導描像の研究

通常相での電磁気学

マックスウェル方程式 $\begin{cases} \partial^\mu F_{\mu\nu} = j_\nu \\ \partial^\mu {}^*F_{\mu\nu} = k_\nu \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_e \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = \rho_m \end{cases}$



電荷間ポテンシャル
~クーロン・ポテンシャル

磁荷間ポテンシャル
~クーロン・ポテンシャル

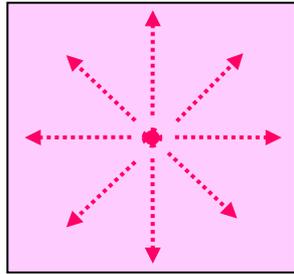
超伝導体中の電磁気学

ロンドン方程式

$$\partial^\mu F_{\mu\nu} + m^2 A_\nu = j_\nu$$

$$\Rightarrow (\partial^2 + m^2) A_\nu = j_\nu \quad \partial^\mu A_\mu = 0$$

$$V_e(r) \propto -\frac{e^{-mr}}{r}$$



電場 E

$$V_m(r) \sim \sigma r$$



磁場 H

ヒッグス場の凝縮により
電場は遮蔽され
電荷(電気力線)は非保存
~ガウスの定理は成立せず
←ゲージ対称性の破れ

ヒッグス場の凝縮
→誘導電流
→完全反磁性
~マイスナー効果

電荷間ポテンシャル
~湯川ポテンシャル

磁荷間ポテンシャル
~線形ポテンシャル

双対超伝導体中の電磁気学

双対ロンドン方程式

$$\partial^\mu *F_{\mu\nu} + m^2 B_\nu = k_\nu$$

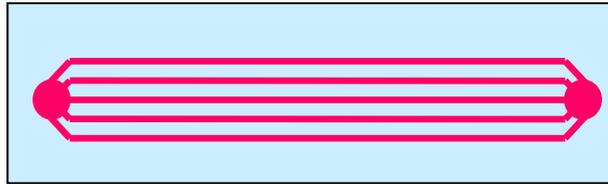
$$\Rightarrow \partial^\mu B_\mu = 0$$

$$(\partial^2 + m^2)B_\nu = k_\nu$$

$$\partial^\mu F_{\mu\nu} = j_\nu$$

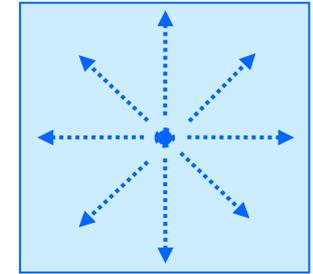
ゲージ対称性→
電荷(電気力線)は保存

$$V_e(r) \sim \sigma r$$



電場 E

$$V_m(r) \propto -\frac{e^{-mr}}{r}$$



磁場 H

双対ヒッグス場の凝縮
→誘導磁流
→完全反電性
~双対マイスナー効果

双対ヒッグス場の凝縮により
磁場は遮蔽され
磁荷(磁力線)は非保存
~ガウスの定理成立せず
←双対ゲージ対称性の破れ

電荷間ポテンシャル
~線形ポテンシャル

磁荷間ポテンシャル
~湯川ポテンシャル

クォークの閉じ込めに対する双対超伝導描像

超伝導体中での
マイスナー効果: 磁束の排除
⇒ アブリコソフ・ボルテックス

電荷(クーパー対)の凝縮
↓
磁束が一次元的に絞られる

電磁気学における双対性:
電場と磁場の入れ替えに対する
マックスウェル方程式の対称性

磁束

アナロジー

超伝導体

$$\begin{cases} \partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\nu \\ \partial_\mu {}^*F^{\mu\nu} = k^\nu \end{cases}$$

南部・トーフトラ (1974)



双対超伝導描像

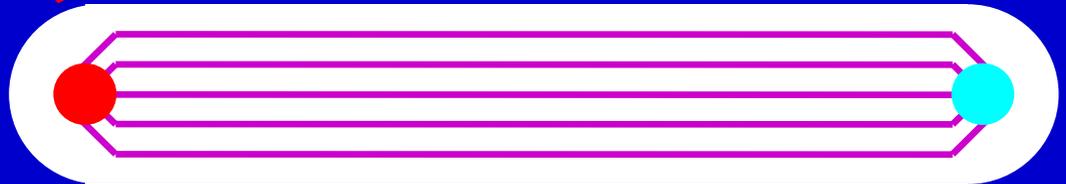
双対超伝導体

カラー磁荷(カラー磁気単極子)凝縮

↓
カラー電束が一次元的に絞られる

クォーク

反クォーク



カラー電束の排除

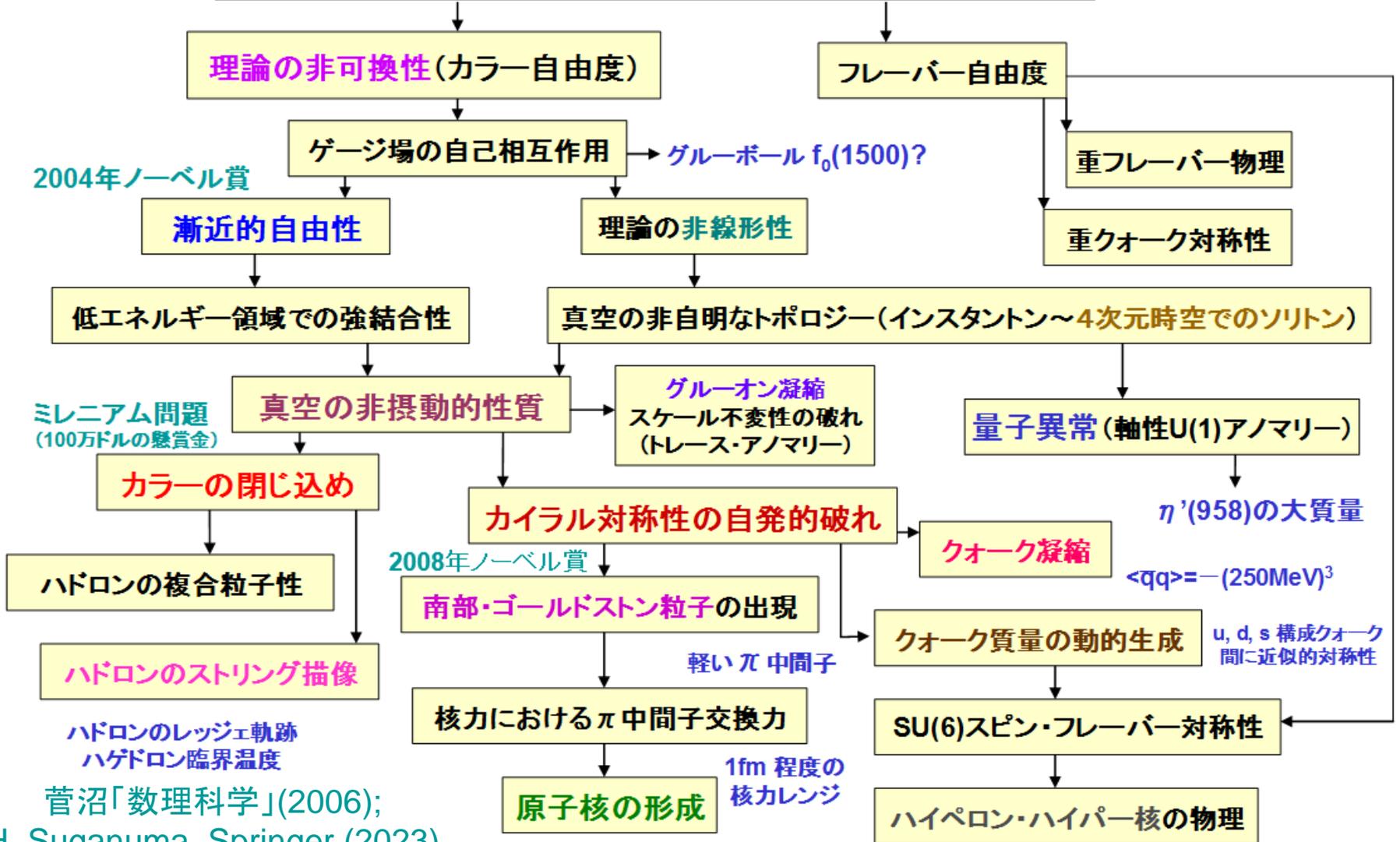
1990年以降 格子QCD計算等を用いた
双対超伝導描像の研究

QCD: ミクロな階層での多様な現象の宝庫

QCD

$$L_{QCD} = -\frac{1}{2} \text{Tr}(G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}) + \bar{q}(i\gamma_{\mu} D^{\mu} - m)q$$

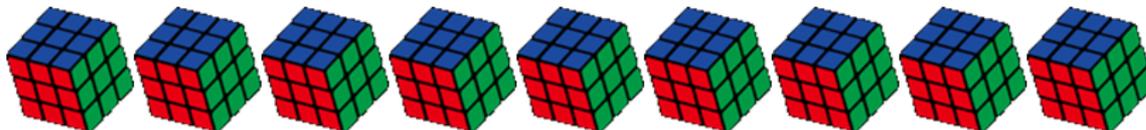
理論の見た目は
とてもシンプル



まとめ



- ・QCDは多彩な物理現象の宝庫である
- ・特に“カラー閉じ込め”や“カイラル対称性の自発的破れ”などの非摂動的性質は興味深く、未解決の問題を多く含む
- ・格子QCDにより非摂動的なQCDの物理の理解が大きく進みつつある: 閉じ込め・カイラル対称性の破れ・クォーク多体系・核力……
- ・高温(2兆度以上)のクォーク・グルーオン・プラズマの研究も理論と実験の両面で大きく展開している
- ・中性子星などの高密度ハドロン物質の研究も進展つつある



Thank you !

