

# イラストで見る QCDの フレームワーク

神戸大学理学部物理学科1回  
樋口流雲

YMAP 秋の研究会2019

名古屋大学 宇宙地球環境研究所共同館Ⅱ

3F大ホール 10/16-18

# 自己紹介

- ・ 樋口 流雲(るくも)
- ・ 神戸大学理学部  
物理学科B1
- ・ ピアノとサックス、トロンボーンを演奏します。  
写真は自分のjazzオーケストラでの練習中の写真



# このプレゼンについて

強い相互作用の基本理論である  
QCD(量子色力学)について

①カラーが必要だったわけ

R G B

②グルーオンに媒介される強い相互作用

これらについてイラストを交えて今一度フレームワークを紹介します

このプレゼンを通してQCDにより親しみを  
感じるようになっていただければ嬉しいです。



QCD

P3

# QCD CONCEPT

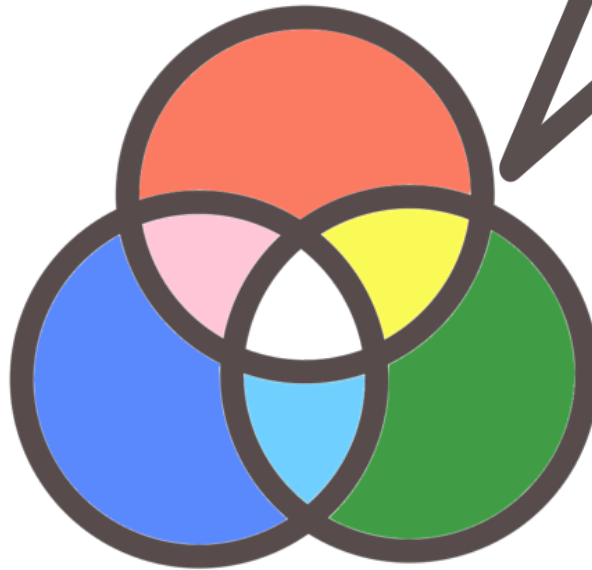
ハドロン

RGB

= 白

クォークにカラー荷があり  
光の三原色と同じ白になる  
カラーを持つ組み合わせで  
ハドロンが構成されている

強い相互作用  
カラーを交換する



ex...proton, neutronなど

P4



# ハドロンを構成する 主な素粒子



UP



反UP



DOWN



反DOWN



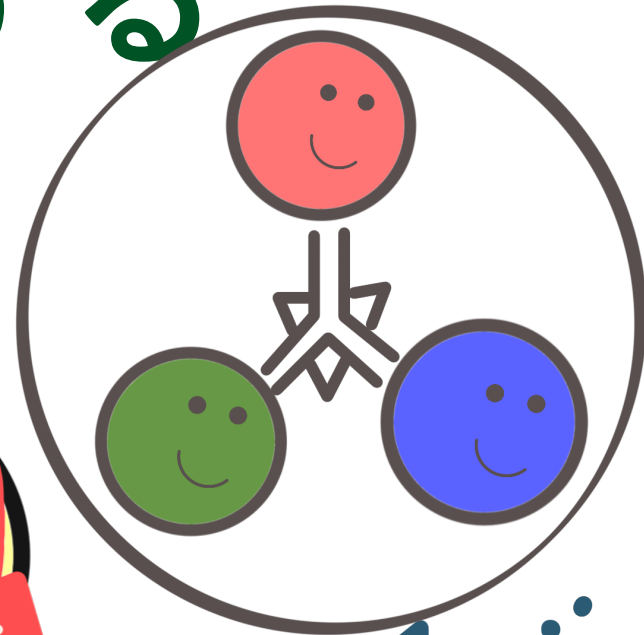
STRANGE



反STRANGE



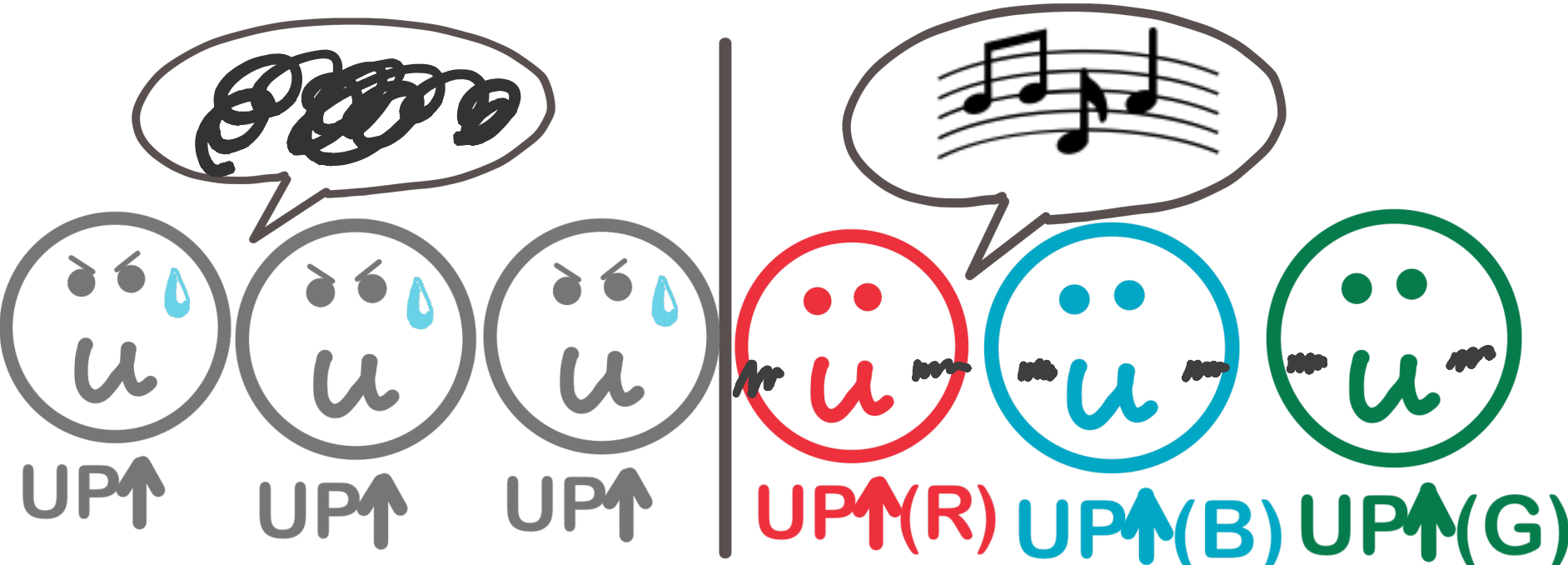
GLUON



zzz...

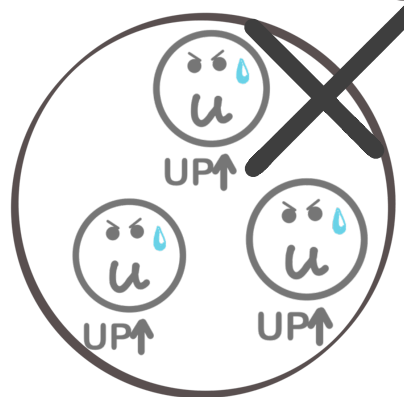
TOP,BOTTOMら3世代は寿命が短すぎて強い相互作用前に崩壊してしまうためお休みです.CHARMもほぼハドロンを作りません

# 何故カラー荷が導入されたか



同じ量子状態が3つ → 色分けで矛盾解消

$\Delta^{++}$  粒子



パウリの排他律による矛盾を解消したい!

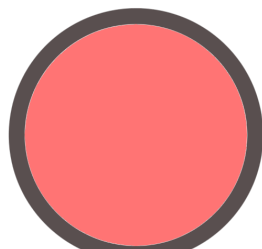
(※ただし、この頃にクォークという名前は有りませんでした)

# 新しい量子数 カラー荷

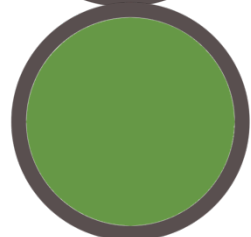
クォークの  
もつカラー

RGB

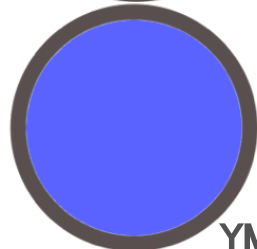
R



G



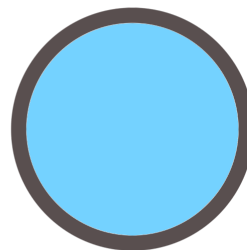
B



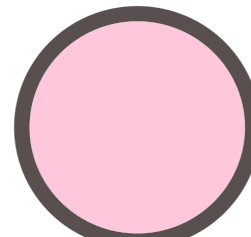
反クォークの  
もつカラー

$\bar{R}\bar{G}\bar{B}$

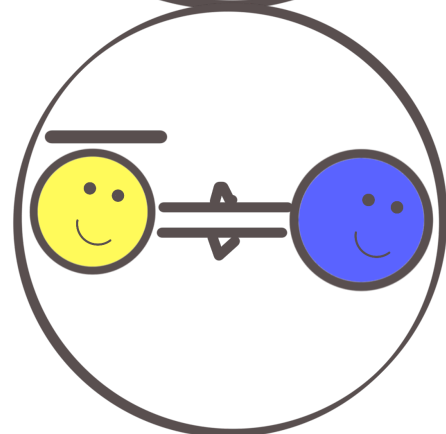
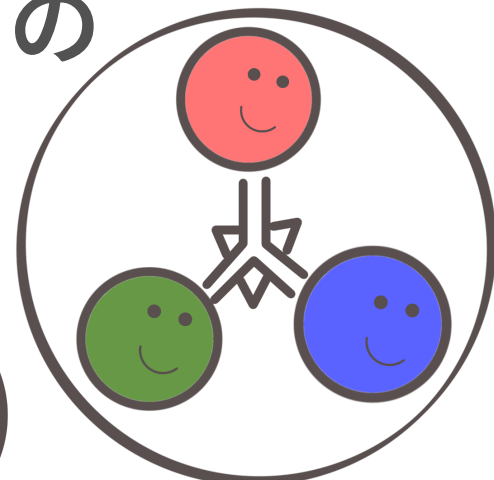
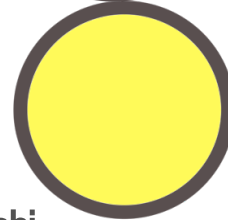
$\bar{R}$



$\bar{G}$

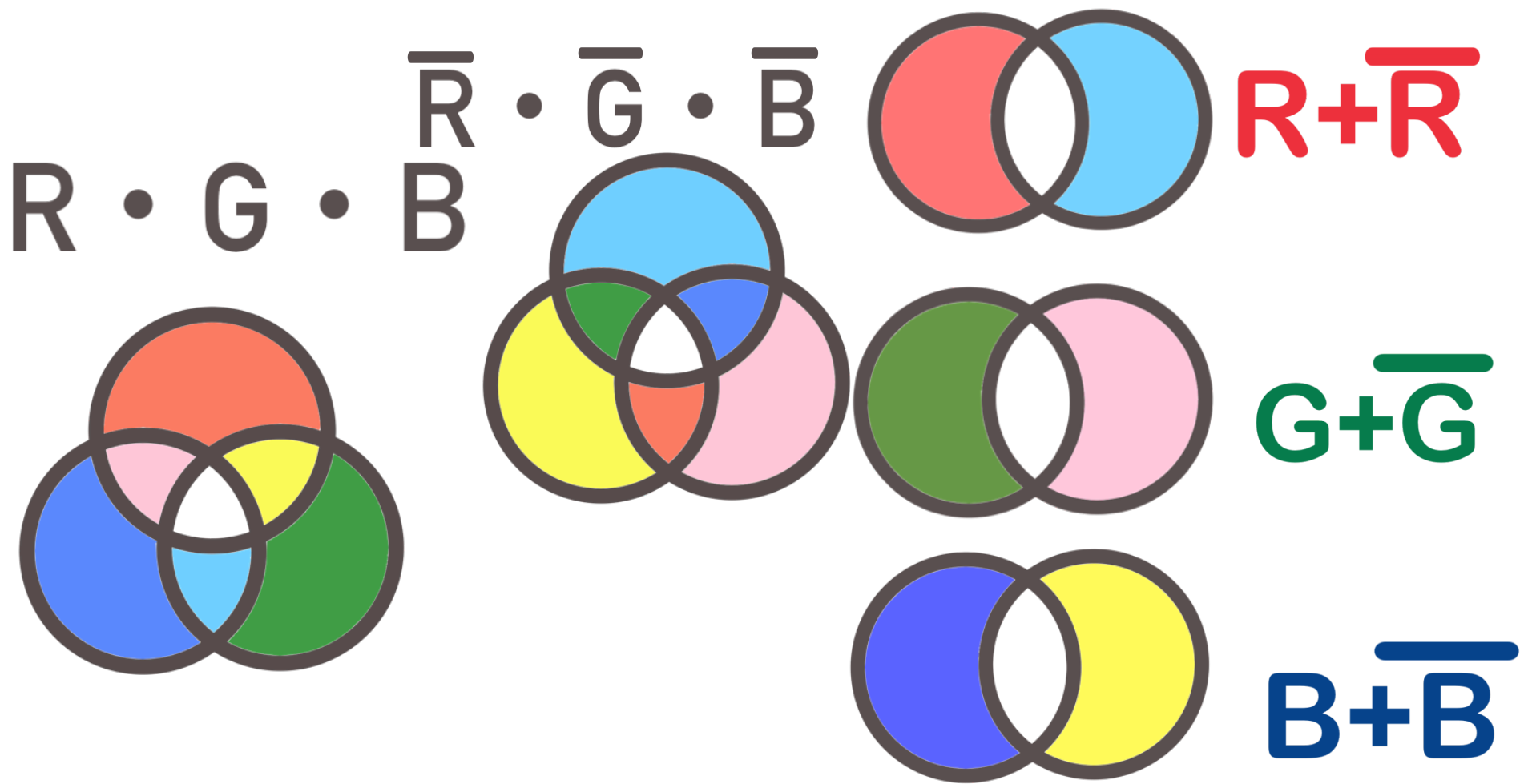


$\bar{B}$



P7

# 光の三原色・補色関係



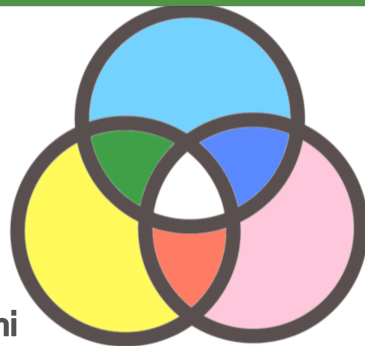
# カラーと光の三原色 もうちょっと

- ・ SU(3)で表される状態を新たな量子状態カラーとして導入してみたところ、観測事実をうまく説明できた

- ・ SU(3)の表現は光の三原色が白になる組を作れるのと類似している。

- ・ ⇨しかも元の数が光の3原色とその補色の組み合わせと数がぴったりあう(原色3+補色3)

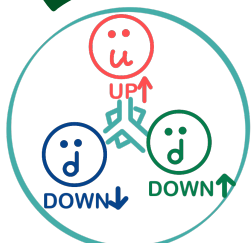
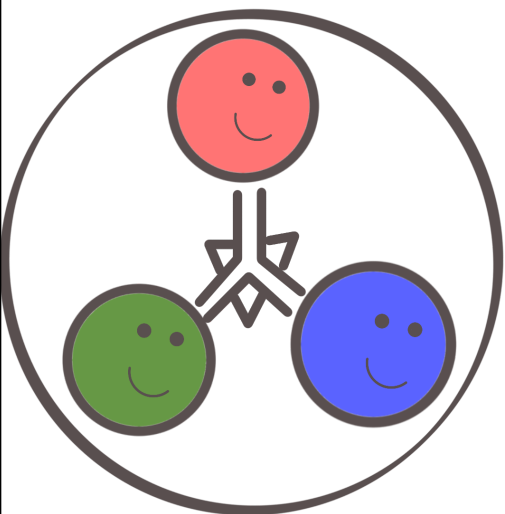
- ・ ⇨ハドロンを構成するカラーの組みに、光の三原色で白を作る組みを割り振ってやると、SU(3)の性質がイメージできた



⇨カラーは光の三原色のイメージで考えれば良い!

P9

# ハドロン

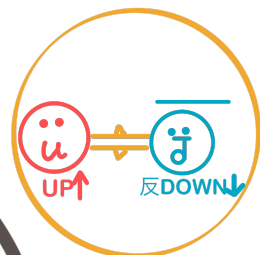
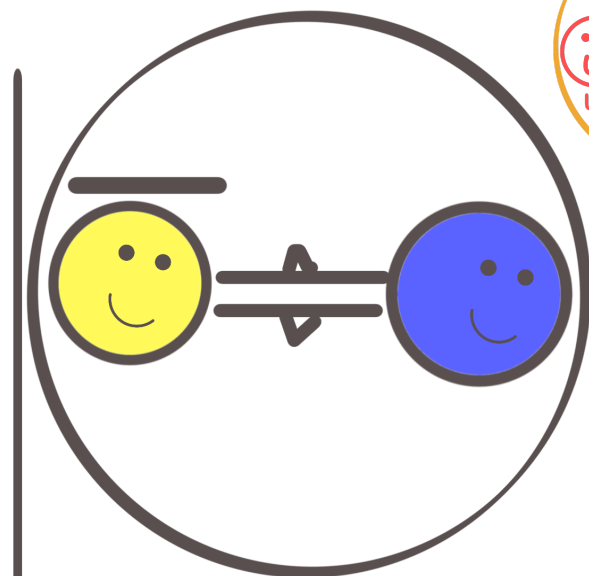


Neutron

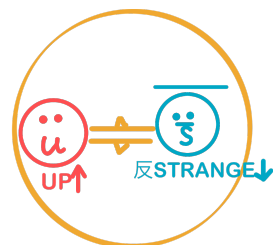


Proton

バリオン( $q \times 3$ )



Pion+



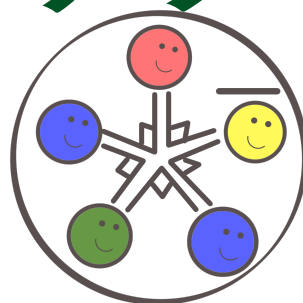
Kaon+

メソン(中間子)( $q + \bar{q}$ )

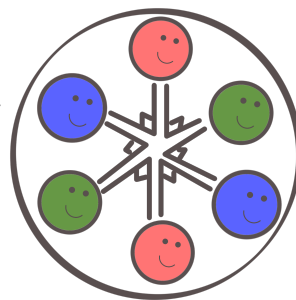
# エキゾチックハドロン



テトラ  
クォーク  
 $qq\bar{q}\bar{q}$



ペンタ  
クォーク  
 $qqqq\bar{q}$



ダイ  
バリオン  
 $qqqqqq$

テトラは存在が示唆されており、ペンタはLHCb実験で観測されています

V.M.Abazov et al Phys. Rev. Lett 117,022003 (2016)

R. Aaij et al Phys. Rev. Lett 115, 072001(2015)

YMAP 秋の研究会2019 Rukumo Higuchi



# 8組の運び屋グループオン

$$g1 = \bar{R}G \text{ (運ぶカラー電荷)}$$

$$g2 = \bar{G}R$$

$$g3 = 1/\sqrt{2} \cdot (R\bar{R} - G\bar{G})$$

$$g4 = \bar{R}B$$

$$g5 = \bar{B}R$$

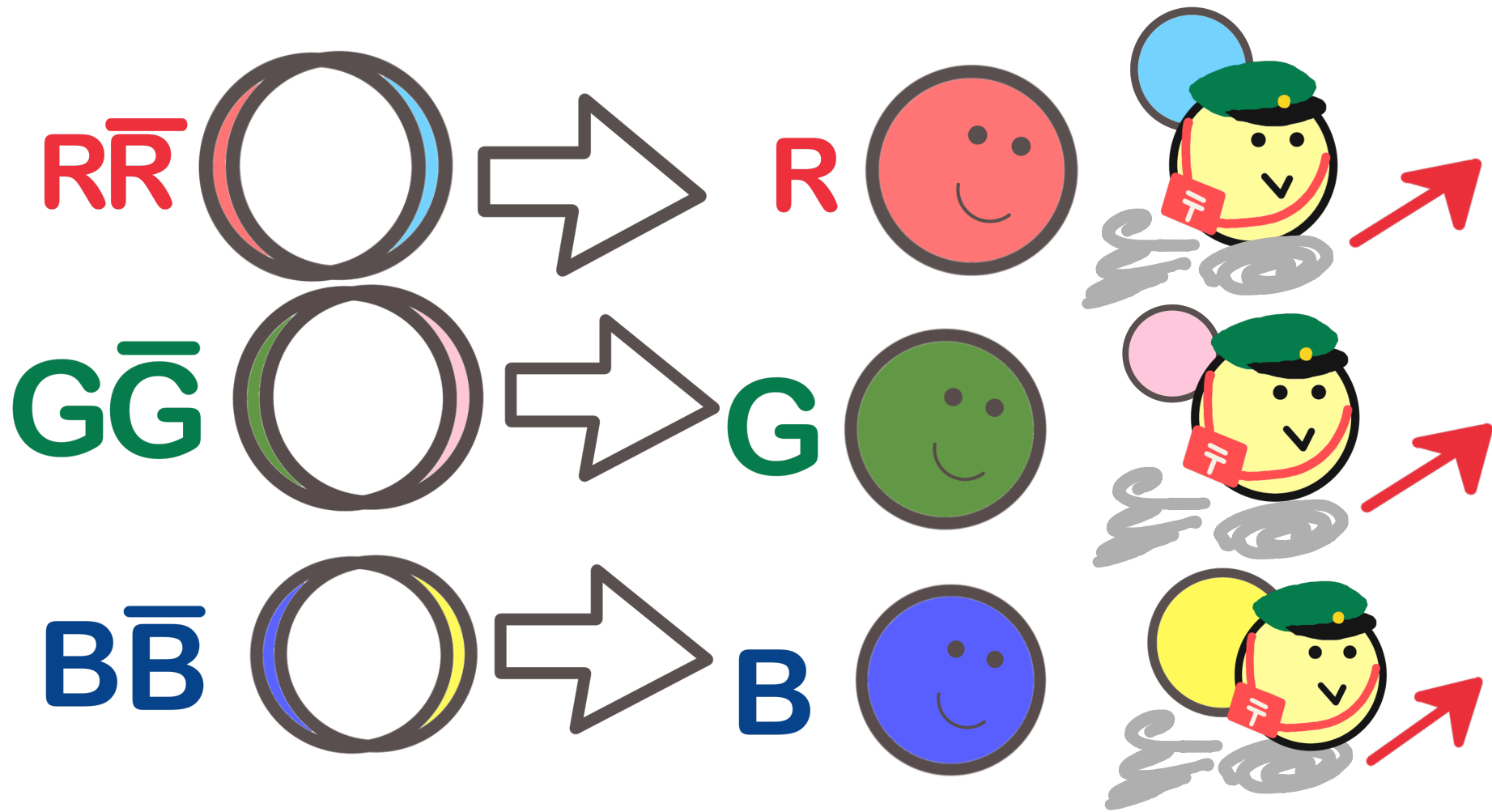
$$g6 = \bar{G}B$$

$$g7 = \bar{B}G$$

$$g8 = 1/\sqrt{6} \cdot (R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}) \quad 1/\sqrt{2} \cdot (R\bar{R} - G\bar{G})$$



# 補足 捕食の分離



⇨これらはクオークのカラーについても言える!

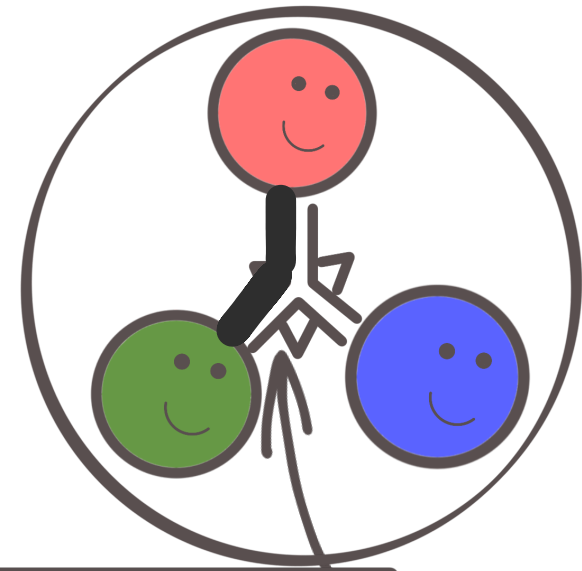
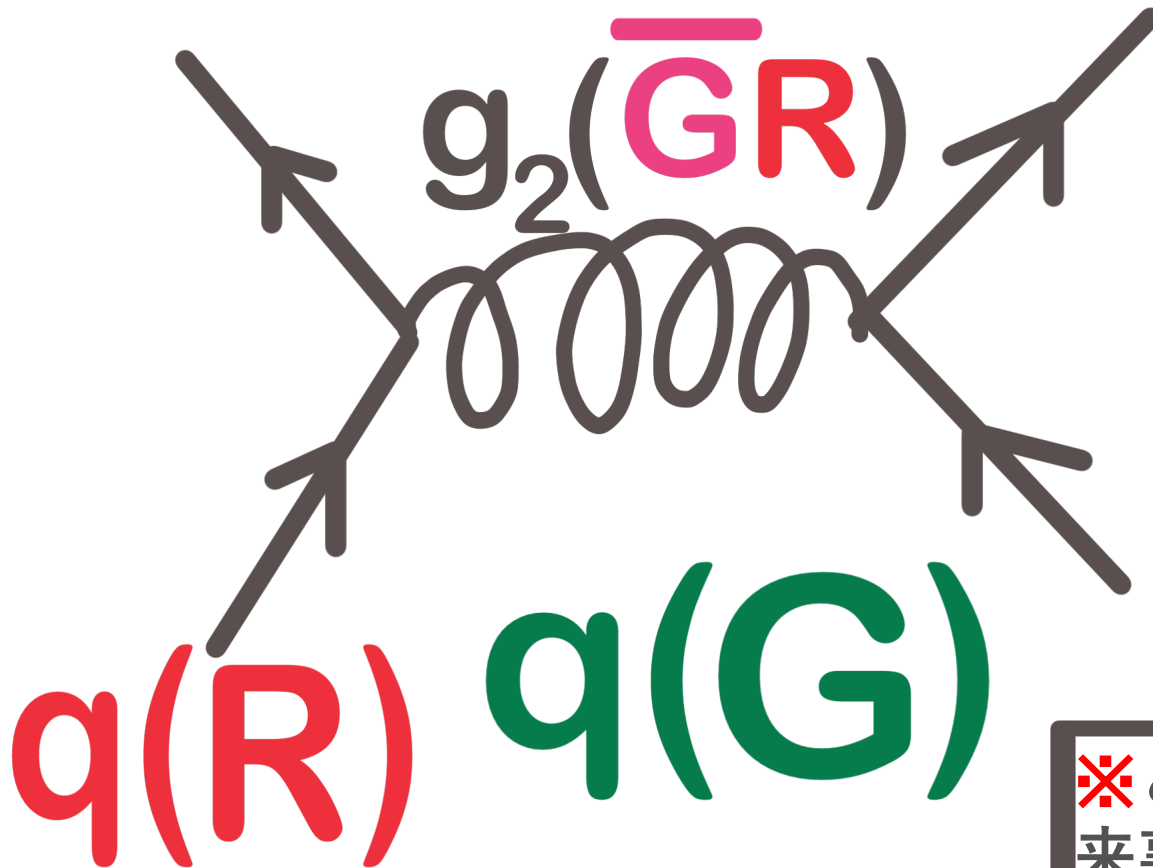
P12

# 強い相互作用のダイアグラム(局所的)

$q(G)$

$q(R)$

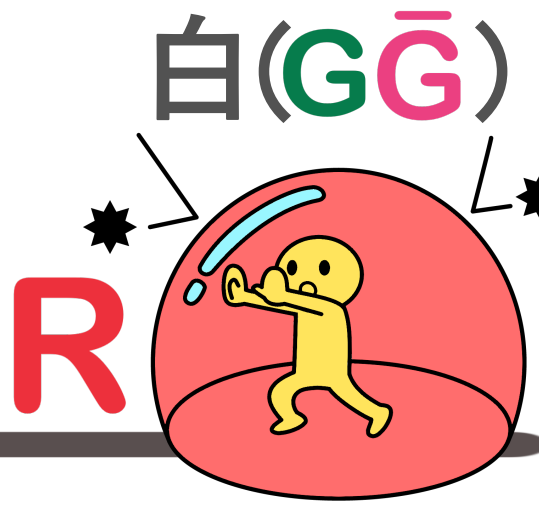
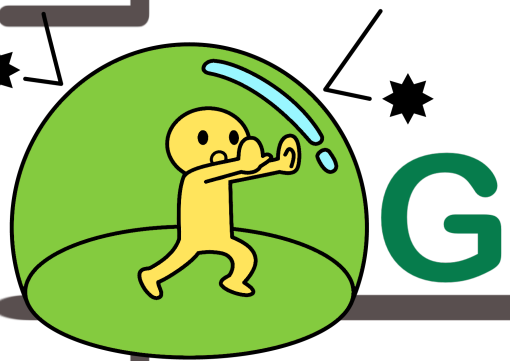
HADRON MAP



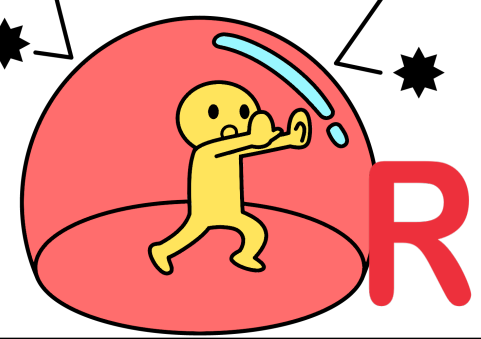
※このルートでの出来事。全体では白

P13

# 1 集荷



# 3 白(GḠ) 配達完了



# 漸近自由性

・強い相互作用の結合定数  $\alpha$  はエネルギーが高くなるほど小さくなる(漸近自由性)

⇒強い相互作用は  $\alpha$  の逆数に比例するためクォーク同士の距離が離れるほど強くなる

・⇒クォーク同士を引き離そうとエネルギーを与えると、それは結局真空からクォーク・反クォークの対がつい生成されるのに使われてしまう。

・⇒結果、クォークはエネルギーの低いハドロン内から出られない(閉じ込め)

・逆に、クォークはハドロン内では自由粒子のように振る舞う。

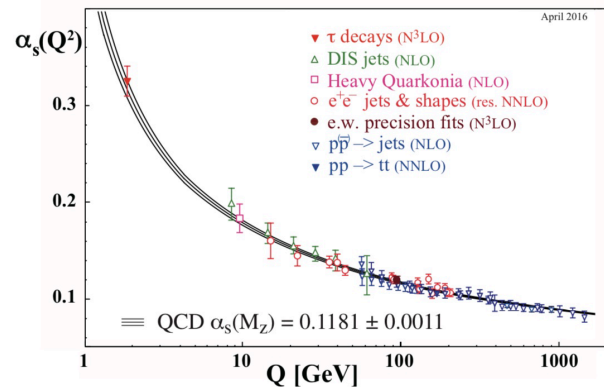
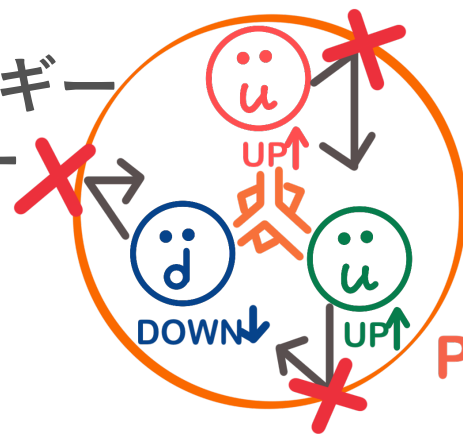


Figure 9.3: Summary of measurements of  $\alpha_s$  as a function of the energy scale  $Q$ . The respective degree of QCD perturbation theory used in the extraction of  $\alpha_s$  is indicated in brackets (NLO: next-to-leading order; NNLO: next-to-next-to leading order; res. NNLO: NNLO matched with resummed next-to-leading logs; N<sup>3</sup>LO: next-to-NNLO).



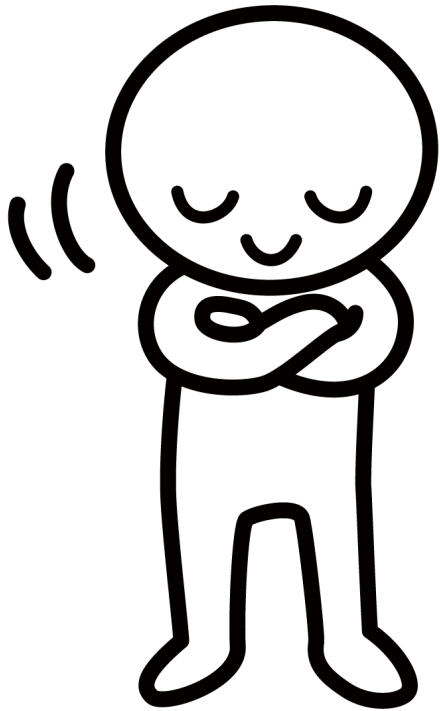
Protonの例

グラフ引用

Phys.Rev.D 98,030001 (2018) Figure9.3 (P155) YMAP 秋の研究会2019 Rukumo Higuchi

P15

# QCDのフレームワーク まとめ



パウリの排他律の矛盾解消のため、クォーク、グルーオンにカラーが導入された。  
カラーの組み合わせは光の3原色とほぼ同様に考える事ができる。

グルーオンによりカラー交換が行われ、強い相互作用が媒介されている。  
ビジュアルで見ると、カラー1つと補色1つを運ぶ事でカラーの交換が行われているイメージができる。

フレームワークを再確認することで、クォークの漸近自由性など、QCDのより高度な部分が馴染みやすくなる。



# 新しいハドロン

## ・テトラクォーク

・論文 Evidence for a  $B_s^0 \pi^\pm$  State のように、テトラクォークとおもわれるハドロンは続々と報告されてきている。しかし  $B_s^0 \pi^\pm$  の観測は  $3.9\sigma$  程度であり、存在が確信し切れていない。

V.M.Abazov et al

Phys. Rev. Lett 117,022003 (2016)



テトラクォーク

## ・ペンタクォーク

・LHCb実験では、ペンタクォークが  $9\sigma$  の精度で見つかったっている！

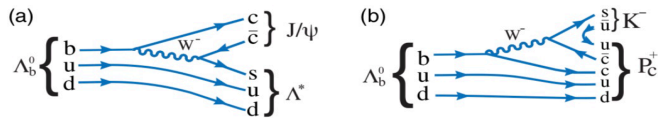
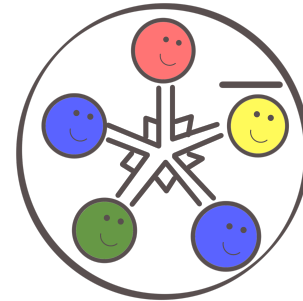
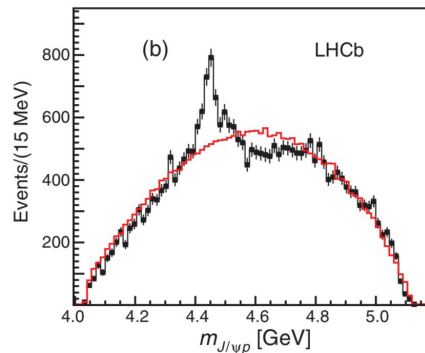


FIG. 1 (color online). Feynman diagrams for (a)  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^+$  and (b)  $\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-$  decay.



ペンタクォーク

引用

R. Aaij et al

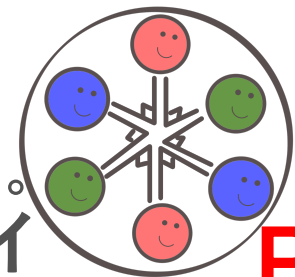
Phys. Rev. Lett 115, 072001(2015)

## ・ダイバリオン

・現在、uuddssからなるHダイバリオンがLatticeQCDの計算により、理論的な存在が議論されている。実験的な探索結果はまだ報告されていない。

参考 <http://www.jicfus.jp/jp/2017-04/>

YMAP 秋の研究会2019 Rukumo Higuchi



ダイバリオン

P17

# ・ グルーボール?

・ グルーオンも、カラーを持っている。  
そのためグルーオン同士で白になった場合に新しい粒子を作るかもしれないと、理論的に予言されている。

論文 Nonchiral Enhancement of Scalar Glueball Decay in the Witten-Sakai-Sugimoto Model

で、 $f_0(1710)$  がグルーボールである可能性が示唆されている。

Frederic Brunner and Anton Rebhan  
Phys. Rev. Lett 115,131601 (2015)



グルーオン2つで  
構成されたグルー  
ボールのイメージ

P18

# ・この中で $f_0(1710)$ が グローバル候補

Decay	$\Gamma/M$		
	(Expt. [11])	(WSS chiral [28])	(WSS massive)
$f_0(1500)$ (total)	0.072(5)	0.027–0.037	0.057–0.077
$f_0(1500) \rightarrow 4\pi$	0.036(3)	0.003–0.005	0.003–0.005
$f_0(1500) \rightarrow 2\pi$	0.025(2)	0.009–0.012	0.010–0.014
$f_0(1500) \rightarrow 2K$	0.006(1)	0.012–0.016	0.034–0.045
$f_0(1500) \rightarrow 2\eta$	0.004(1)	0.003–0.004	0.010–0.013
$f_0(1710)$ (total)	0.078(4)	0.059–0.076	0.083–0.106
$f_0(1710) \rightarrow 2K$ * $\begin{cases} 0.041(2) \\ 0.047(17) \end{cases}$		0.012–0.016	0.029–0.038
$f_0(1710) \rightarrow 2\eta$ * $\begin{cases} 0.020(10) \\ 0.022(11) \end{cases}$		0.003–0.004	0.009–0.011
$f_0(1710) \rightarrow 2\pi$ * $\begin{cases} 0.017(4) \\ 0.009(2) \end{cases}$		0.009–0.012	0.010–0.013
$f_0(1710) \rightarrow 2\rho,$ $\rho\pi\pi \rightarrow 4\pi$	...	0.024–0.030	0.024–0.030
$f_0(1710) \rightarrow$ $2\omega \rightarrow 6\pi$	Seen	0.011–0.014	0.011–0.014

Frederic Brunner and Anton Rebhan  
Phys. Rev. Lett 115,131601 (2015)

P19