素粒子原子核物理学Ⅰの予定（2010年夏学期）

浅井、 小沢先生

4月05日	第01回	（小沢）	単位系、概論
4月19日	第02回	（小沢）	原子核反応
4月26日	休講		
4月30日	第03回	（小沢）	クォークモデル
5月10日	第04回	（浅井）	標準理論の登場人物概論、クォークモデル
5月24日	第05回	（浅井）	cの発見、DIRAC方程式
5月31日	第06回	（浅井）	DIRAC方程式とスピン
6月07日	第07回	（小沢）	クォークモデル続き：核子反応
6月14日	第08回	（浅井）	対称性　主にC,P,T対称性
6月21日	第09回	（浅井）	連続対称性とゲージ理論
6月28日	第10回	（浅井）	弱い相互作用
7月05日	第11回	（小沢）	クォークグルオンプラズマ
7月12日	第12回	（浅井）	隠れた対称性、ヒッグス機構
7月26日	補講	（小沢）	原子核の構造

評価：2回（素粒子・原子核）出すレポートで評価を行う

素粒子の方：参考書：

(1) クォークとレプトン―現代素粒子物理学入門　培風館
　F. ハルツェン、A.D. マーチン（日本語は絶版、英語可能）
(2) An Introduction to the Standard Model of Particles Physics 2nd.Cambridge
　W.N.Cottingham & D.A. Greenwood（初版は日本語訳あり）
(3) 高エネルギー物理学の基礎 I,II 朝倉書店　長島順清
(4) ゲージ理論入門 講談社 エイスチン・ヘイ
(5) Introduction to High Energy Physics, 4th. Cambridge, Perkins
(6) 素粒子の物理 東大出版　相原さん
(7) 粒子線検出器 培風館　K.クラインクネヒト
(8) よみもの：ブルーバックス：南部陽一郎「クォーク」

はじめに（1）

単位系について

自然単位　　$\hbar = 1$,　$c = 1$

$\hbar c = 197\ \mathrm{MeV\,fm} = 1$ としている。

$\hbar = 1.05\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$　　$c = 3\times10^{8}\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$

$1\mathrm{eV} = 1.6\times10^{-19}\ \mathrm{J}$

エネルギーのスケール　　可視光　eV

水素 $n=1$　13.6eV　｝化学

電子 質量　511KeV

p　938MeV ~ 1GeV

Z, W.　~100GeV

$\varepsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1$　誘電率　透磁率　　$c^2 = \dfrac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} = 1$

$F = \dfrac{e_1 e_2}{4\pi}\dfrac{1}{r^2}$

面積，長さ　　(T, G, M, K, m, μ, n, P, f)

- 1fm（原子核の大きさ）$= 10^{-15}$ m　⟶ （問）π^2のmassを求めよ
- $(1\mathrm{fm})^2 = 10\mathrm{mb} = 10^{10}\ \mathrm{pb}$　←原子核の面積 程度（σ_{pp}）

（$1\mathrm{b} = 10^{-28}\ \mathrm{m}^2$）

- $1\ \mathrm{GeV}^{-2} = 0.389\ \mathrm{mb}$

標準理論の登場人物

レプトン $\begin{pmatrix}\nu_e\\ e^-\end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu^-\end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau^-\end{pmatrix}$

クォーク $\begin{pmatrix}u\\ d\end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix}c\\ s\end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix}t\\ b\end{pmatrix}$

フェルミ粒子（spin ½）

4つの力（重力，電磁気力，強い力，弱い力）

γ (QED)
g (QCD)
} 質量なし

Z^0
$W^\pm$
} 質量あり

ベクターボソン spin 1

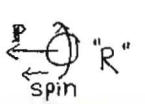
"ヒッグス粒子" spin 0

⇩

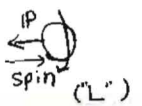
3セット（3世代）ある

$\begin{pmatrix}\nu_{eL}\\ e^-_L\end{pmatrix}$ ν_R（最近） e^-_R

$\begin{pmatrix}u_L\\ d_L\end{pmatrix}$ u_R d_R



右巻き



左巻きの2種類存在

- 同じパターンが3回（3世代） → 3つある KM
  → 2つ目の"μ"が発見された時
  「誰が注文したんだ」（ラビ）

- 力を伝える ↦ ゲージ原理（質量のないベクトル場）
- W, Z だけ質量

⇩

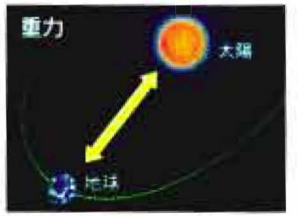
Higgs場
（真空が弱い相互作用：凝縮）

ある保存量 ↔ 対称性（時空とは関係なり）
その対称性の局所性を保障

⇩

ゲージ粒子が必要

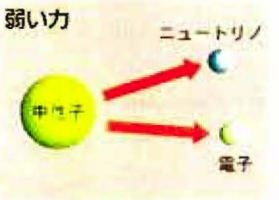
自然界の4つの力 ⇔ 力を伝える素粒子



重力子（グラビトン：未発見）

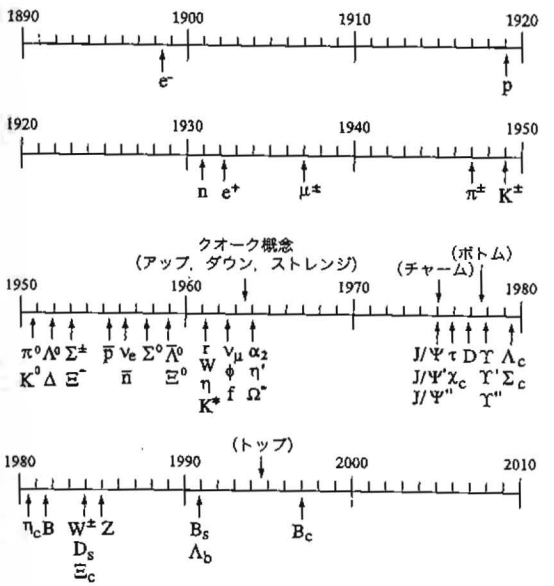
光子（電磁波）

湯川先生が予言　グルオン



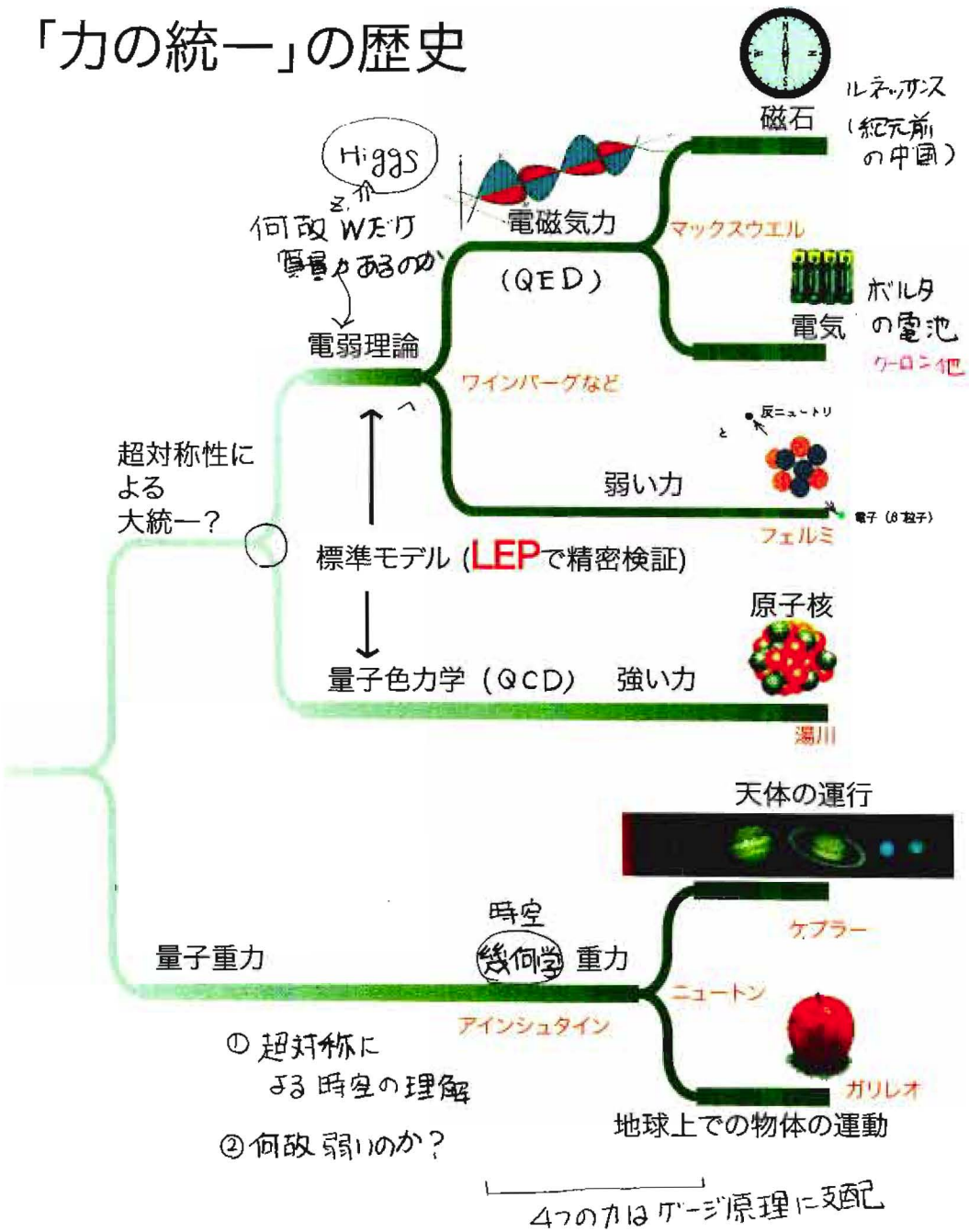
（中性子は陽子に変わる）W、Z粒子 5

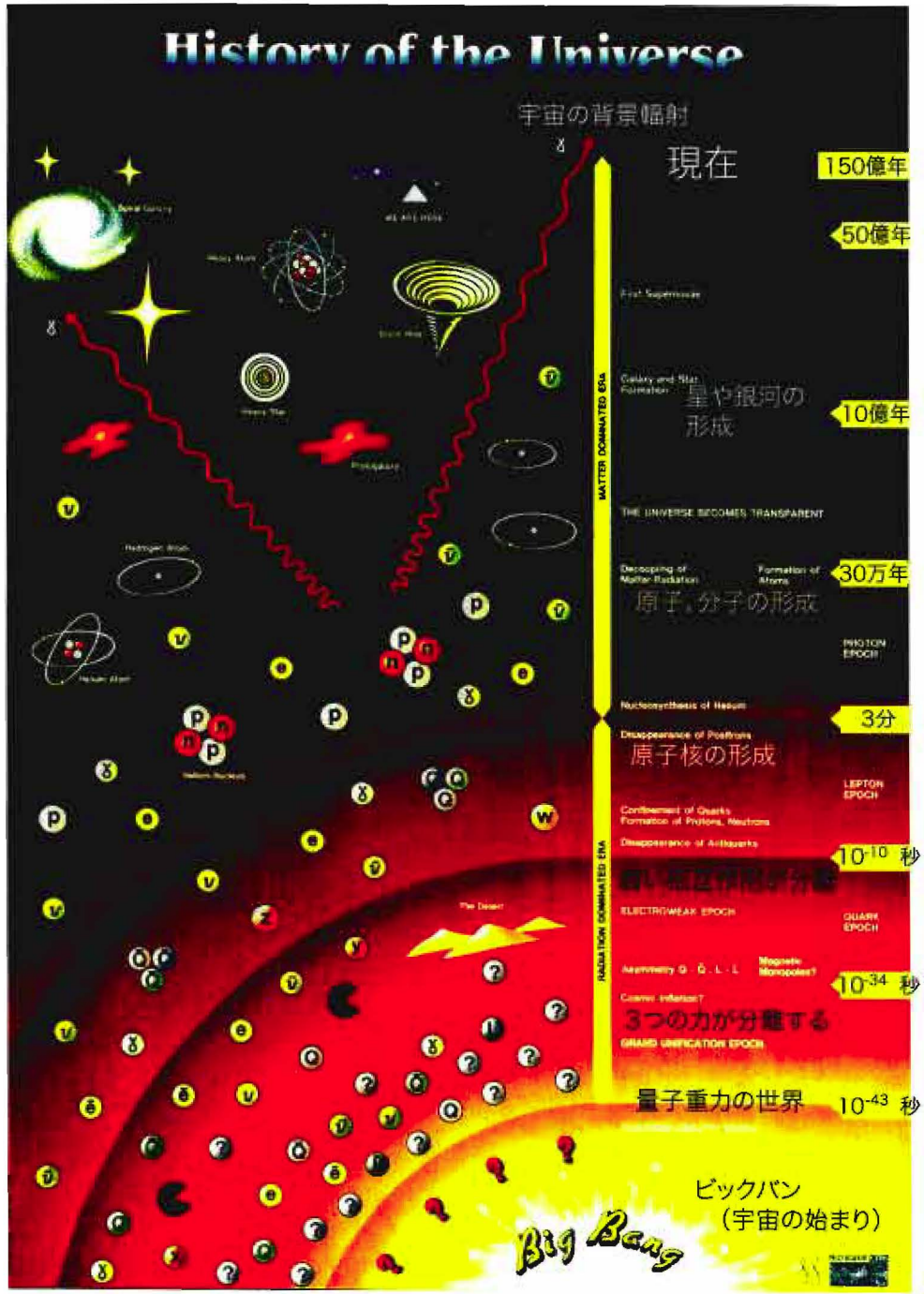
$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$



"素"粒子の発見年代

「力の統一」の歴史


磁石
ルネッサンス（紀元前の中国）
Higgs
何故 W,Z 質量があるのか
電磁気力
マックスウエル
(QED)
ボルタの電池
電気
電弱理論
ワインバーグなど
超対称性による大統一？
反ニュートリ
と
弱い力
電子（β粒子）
フェルミ
標準モデル（LEPで精密検証）
原子核
量子色力学（QCD）　強い力
湯川
天体の運行
ケプラー
時空
幾何学
重力
量子重力
ニュートン
アインシュタイン
ガリレオ
① 超対称による時空の理解
② 何故弱いのか？
地球上での物体の運動
4つの力はゲージ原理に対応


History of the Universe
宇宙の背景輻射
現在
150億年
50億年
星や銀河の形成
10億年
30万年
原子、分子の形成
3分
原子核の形成
10^{-10} 秒
10^{-34} 秒
3つの力が分離する
量子重力の世界
10^{-43} 秒
ビックバン
（宇宙の始まり）
Big Bang
MATTER DOMINATED ERA
RADIATION DOMINATED ERA

アイソスピン

$\begin{cases} p & 938\,\mathrm{MeV} \ (\text{電荷 } +1) \\ n & 939\,\mathrm{MeV} \ (\text{〃 } 0) \end{cases}$ 核子の反応は同じ

↓

この大小関係と差

'32 ハイデルベルグ $p = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ $n = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

同じ核子 (nucleon) の二重項であると考えた。

spin $\frac{1}{2}$ と同じ構造 Pauli 行列

$\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ $\tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ $\tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$

昇降演算子 $\tau^{\pm} = \frac{1}{2}(\tau_1 + i\tau_2)$

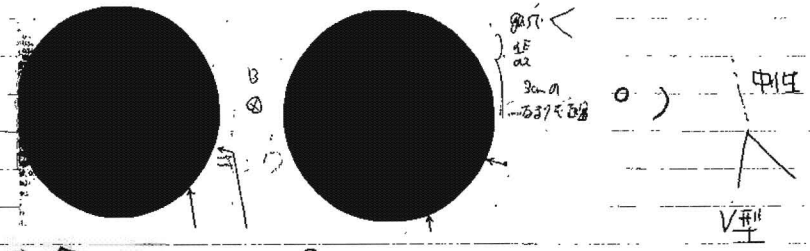
$\begin{pmatrix} \tau_3 p = p \\ \tau_3 n = (-1) n \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \tau^+ n = p \\ \tau^- p = n \end{pmatrix}$

p: u u d
n: u d d で構成 $u = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ $d = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

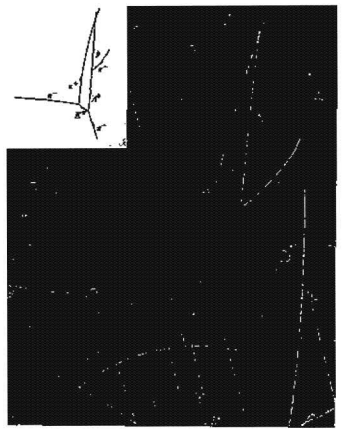
↑ $+\frac{1}{2}$ ↓ $-\frac{1}{2}$ で

ストレンジネス

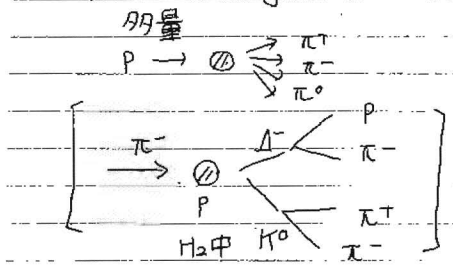
ストレンジ粒子の発見 (~1940) ロチェスター 宇宙線の中に



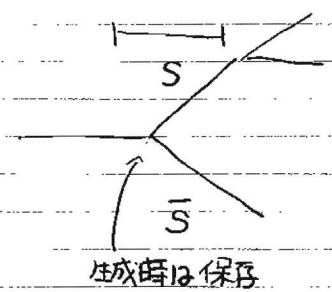
長寿命 (10^{-10} ~ 10^{-8} 秒) 1cm ~ 1m
頻度は 多い
↳ decay とは別のプロセスで出来ている



LBL: Bevatron (1950代後半)
6GeV p を target にぶつける
多量



$c\tau \sim 1\mathrm{cm} - 1\mathrm{m}$



p, n, π+, π−, π0 へ decay

- 長寿命
- ちょっと重い
- 電荷 バリオン数 保存
-

西島 ゲルマン が "S" ストレンジネス 新しい量子数

$\pi^- + p \longrightarrow K^0 + \Lambda$

S 0 0 +1 −1 （K^+ に対して $S=+1$）

(1.16GeV)

$\Lambda \to \pi^- + p$

$S=-1$ 0 0

$K^0 \to \pi^+ + \pi^-$

$S=1$ 0 0

(500MeV)

泡箱で 運動量 ← 粒子を同定

B（泡の濃さ $\frac{dE}{dx} \sim \frac{1}{\beta^2}$）

↓

出てきた粒子の 4次元 運動量を求めて

組んで 不変質量 $\sqrt{E^2-p^2}$ → 一定の値（粒子の質量）

ゲルマン・西島

$Q = I_3 + \frac{(B+S)}{2}$

ゲルマンの命名

'64 Gell Mann-Zweig Quark model

	B	spin	I	I_3	S	Q
u	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$+\frac{2}{3}$
d			$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{3}$
s			0	0	−1	$-\frac{1}{3}$
$\bar{u}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{2}{3}$
$\bar{d}$			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$+\frac{1}{3}$
$\bar{s}$			0	0	+1	$+\frac{1}{3}$

meson → 一番簡単なシステム

メソン（$q\bar{q}$ システム、スピン 0, 1、軌道角運動量 $L=0,1,2\cdots$）

組み合わせ $3\times3=9=8+1$（色を消す為）→ 次のページ

（フレーバー SU3）

・spin 0の状態を考える（スカラー） $|\uparrow\downarrow\rangle$ → $P=-(-1)^L$ $J^{PC}=0^{-+}$

"指定スカラー" $C=(-1)^{L+S}$

↓

spin $\frac{1}{2}$ の粒子2つの系 $S=0$ (singlet) $|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle$ 次回説明します

$S=1$（三重項）

おまけ

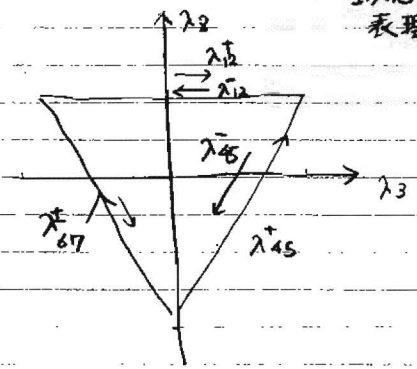
SU3

Pauli 行列を拡張して SU3 の元

$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ $\lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ $\lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$

$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & & \\ 1 & & 0 \end{pmatrix}$ $\lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & & \\ & 0 & 1 \\ & 1 & 0 \end{pmatrix}$ $\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & & \\ & 0 & -i \\ & i & 0 \end{pmatrix}$

$\lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & 1 & \\ 0 & & -2 \end{pmatrix}$ $\underbrace{\lambda_0}_{\text{1次元表現}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{pmatrix}$



$\lambda_{12}^{\pm} = \frac{1}{2}(\lambda_1 \pm i\lambda_2)$

$\lambda_{45}^{\pm} = \frac{1}{2}(\lambda_4 \pm i\lambda_5)$

$\lambda_{67}^{\pm} = \frac{1}{2}(\lambda_6 \pm i\lambda_7)$

昇降演算子

単独クォークは発見されない。色は強い力で（閉じ込め） 1fm よりはなれると 強くて 真空から 別の対

R $\bar{R}$

余談

2体 − $R\bar{R}$, $G\bar{G}$, $B\bar{B}$ 色を消す メソン

3体 − RGB（$\bar{R}\bar{G}\bar{B}$）白色 バリオン（

4体 $R\bar{R}G\bar{G}$ … ダイメソン（最近 KEK-B で発見）

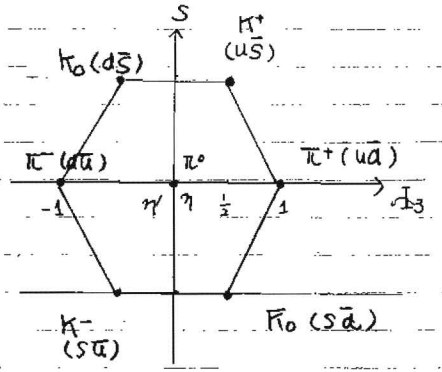
5体 RGBR$\bar{R}$ … ペンタクォーク（??）

6体 RGBRGB ダイバリオン 3体メソン

複合系の方がエネルギーが低いと束縛状態

Date . . No.

△の粒子 SU(3)の表現



$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$ 140 MeV

$\eta = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$ 547 MeV

$\eta' = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$ 960 MeV

係数は SU3の表現(クォーク)

・対角線が 粒子・反粒子の関係

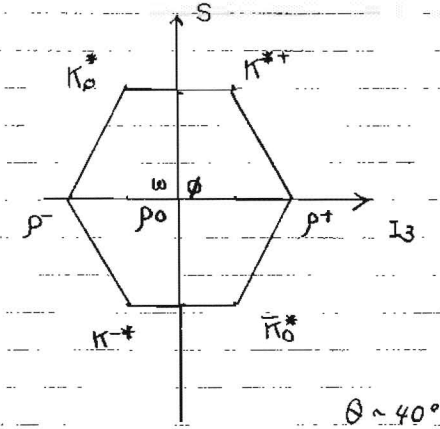
・不完全な対称性 質量が ちがう u, d だけ $\pi \sim 140$ MeV

u, d, s $K, \eta \sim 500$ MeV

スカラー

→ 9つの粒子は u, d, s の 3つのクォークの $q\bar{q}$ 状態で説明出来る

・spin 1 (vector) 状態 $|1^{++}\rangle$ J^{PC}, 1^{--}



$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$

$\rho^{\pm 0}$ 770 MeV $\rho \to 2\pi$

K^* 900 MeV $K^* \to \pi K$

ω, ϕ は スカラーの時と ちがい 混合している

$\phi_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$

$\phi_8 = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$

$\theta \sim 40°$ mix

1 GeV

$\phi \doteq s\bar{s}$ ⟶ $K\bar{K}$ $K\bar{K}\pi$ } Λ

$\omega \doteq \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$ ⟶ $\pi^+\pi^-\pi^0$

Λ decay

スカラーの時より 500 MeV 重い

780 GeV

Spin-Spin 相互作用 → (ρ_0 と ほぼ)

Date . . No.

磁気 モーメント

Spin-Spin 相互作用 $\vec{\mu}_i = \frac{e}{2m}\vec{\sigma}$

Hyper Fine Split

(超微細構造)

そろうと エネルギー 高くなる

水素原子の時 この差 21.11cm (天文学で大切な 電波)

Positronium e^+e^- 203 GHz

Colour $= \frac{8\pi}{9}\alpha_s \frac{\vec{s}_1\vec{s}_2}{m_q m_{\bar{q}}}\delta(x)$ $\vec{s}_1\vec{s}_2 = \begin{cases} -3 & S=0 \\ 1 & S=1 \end{cases}$

$\delta(x) = |\psi(0)|^2$ (overlap) $\sim \frac{1}{r^3}$

L=0だけでなく L=1, 2, と 高次の項が存在する。 f, a, φ b, ρ, π

SEIGA かなり 雑然としている (増えるごと

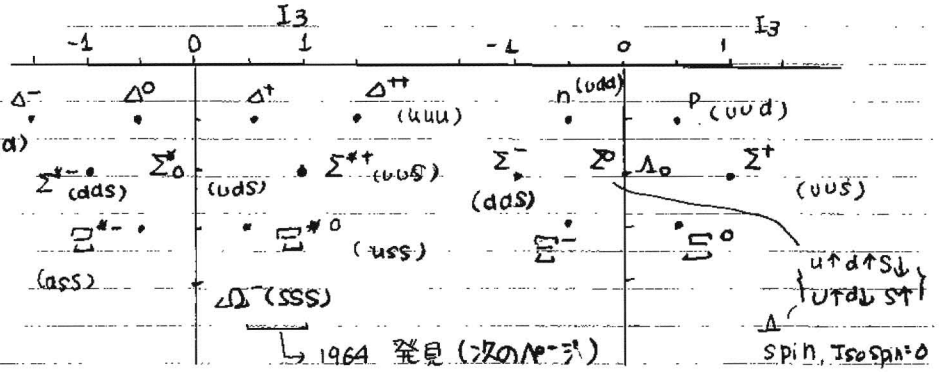
$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	I = 1 $u\bar{d}, \bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$	I = ½ (K) $u\bar{s}, d\bar{s}; \bar{d}s, -\bar{u}s$	I = 0 f'	I = 0 f	θ_{quad} [°]	θ_{lin} [°]
1^1S_0	0^{-+} V	π	K	η	$\eta'(958)$	−11.5	−24.6
1^3S_1	1^{--} V	$\rho(770)$	$K^*(892)$	$\phi(1020)$	$\omega(782)$	38.7	36.0
1^1P_1	1^{+-}	$b_1(1235)$	K_{1B}†	$h_1(1380)$	$h_1(1170)$		
1^3P_0	0^{++}	$a_0(1450)$	$K_0^*(1430)$	$f_0(1710)$	$f_0(1370)$		
1^3P_1	1^{++}	$a_1(1260)$	K_{1A}†	$f_1(1420)$	$f_1(1285)$		
1^3P_2	2^{++}	$a_2(1320)$	$K_2^*(1430)$	$f_2'(1525)$	$f_2(1270)$	29.6	28.0
1^1D_2	2^{-+}	$\pi_2(1670)$	$K_2(1770)$†	$\eta_2(1870)$	$\eta_2(1645)$		
1^3D_1	1^{--}	$\rho(1700)$	$K^*(1680)$†		$\omega(1650)$		
1^3D_2	2^{--}		$K_2(1820)$†				
1^3D_3	3^{--}	$\rho_3(1690)$	$K_3^*(1780)$	$\phi_3(1850)$	$\omega_3(1670)$	32.0	31.0
1^3F_4	4^{++}	$a_4(2040)$	$K_4^*(2045)$		$f_4(2050)$		
1^3G_5	5^{--}	$\rho_5(2350)$					
1^3H_6	6^{++}	$a_6(2450)$			$f_6(2510)$		
2^1S_0	0^{-+}	$\pi(1300)$	$K(1460)$	$\eta(1475)$	$\eta(1295)$		
2^3S_1	1^{--}	$\rho(1450)$	$K^*(1410)$‡	$\phi(1680)$	$\omega(1420)$		

† The $1^{+\pm}$ and $2^{-\pm}$ isospin ½ states mix. In particular, the K_{1A} and K_{1B} are nearly equal (45°) mixtures of the $K_1(1270)$ and $K_1(1400)$.
‡ The $K^*(1410)$ could be replaced by the $K^*(1680)$ as the $2\,^3S_1$ state.

バリオンへの応用　3つ quark
↳ fermion (spin $\frac{3}{2}$, $\frac{1}{2}$)

u, d だけ (S=0)　核子 (p, n), Δ
S を含む　(ハイペロン・ハイパー核)

	N	デルタ Δ	ラムダ Λ	シグマ Σ	グザイ Ξ	オメガ Ω
アイソスピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	0,	1	1/2	0
S		0	-1		-2	-3
		1.2	1.16	1.38	1.53	1.67



↳ 1964 発見 (次のページ)

spin $\frac{3}{2}$　　spin $\frac{1}{2}$

$\psi_{(全)} = \psi_l \, \psi_{fla} \, \chi_{spin} \, \chi_{colour}$

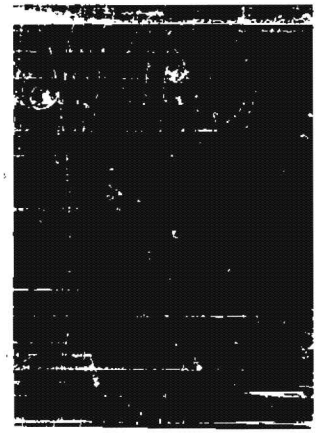
$l=0$ symmetric

Δ^{++}　uuu　↑↑↑　$l=0$

全て対称 → fermion にならない
⇓
χ_{colour} が反対称

カラーの存在 ←

$R = \frac{ee \to Had}{ee \to \mu\mu}$　$N_c = 3$ が確認された (P.12)



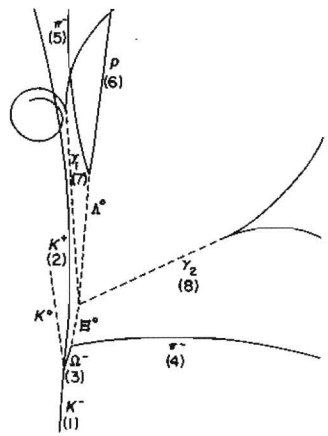


Fig. 4.11. The first Ω^- event (Barnes *et al.* 1964), courtesy Brookhaven National Laboratory). It depicts the following chain of events:

$$K^- + p \to \Omega^- + K^+ + K^0$$
$$\hookrightarrow \Xi^0 + \pi^- \ (\Delta S = 1 \text{ weak decay})$$
$$\hookrightarrow \pi^0 + \Lambda \ (\Delta S = 1 \text{ weak decay})$$
$$\hookrightarrow \pi^- + p \ (\Delta S = 1 \text{ weak decay})$$
$$\hookrightarrow \gamma + \gamma \ (\text{electromagnetic decay})$$
$$\downarrow \qquad \downarrow$$
$$e^+e^- \qquad e^+e^-$$

← 検器
(何の物理現象?)

← 泡箱
電荷を持った粒子が通って周りの液体を電離する
これが核となって減圧(過冷却)された状態が気化して泡となって飛程が見える.

quarkの磁気モーメント　$\vec{\mu} = \frac{e}{m}\vec{\sigma}$ から陽子, 中性子の μ が計算出来る

陽子の　$\vec{\mu}_p = \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_u + \vec{u}_d$

$= \frac{4}{3}\vec{\mu}_u - \frac{1}{3}\mu_d = \frac{3}{2}\mu_u$　($-2u_d = \mu_u$ ← charge mass を同じ)

一方 中性子は $\vec{\mu}_n = \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_d + \vec{\mu}_d$

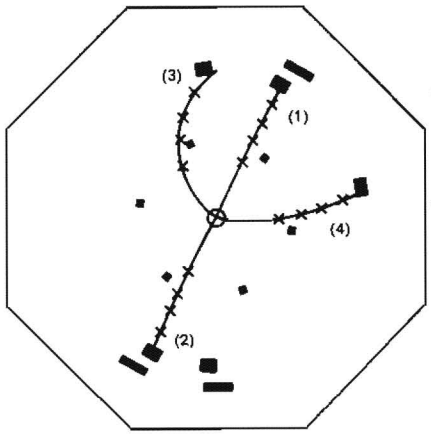
$= \frac{4}{3}\mu_d - \frac{1}{3}\mu_u = -\vec{\mu}_u$

$\frac{\mu_n}{\mu_p} = -\frac{2}{3}$ となり (実験値 −0.685)

新しいクォーク, c, bの発見 (11月革命・現代物理学の幕開け)

'74 BNL $P+Be \to X \to e^+e^-$ (サム・ティン) } 次のページ
SLAC $e^+e^- \to X$ (リヒター)

異常に細い共鳴(resonance)を発見 J/ψ ($c\bar{c}$) → charm quark の発見



ψの名前の由来

$e^+e^- \to \psi'(2S)$
$\to \psi(3.1) + \underbrace{\pi^+\pi^-}_{\text{soft}}$
e^+e^-, had, $\mu^+\mu^-$

Fig. 4.4. Example of the decay $\psi(3.7) \to \psi(3.1)+\pi^+ + \pi^-$ observed in a spark chamber detector. The $\psi(3.1)$ decays to $e^+ + e^-$. Tracks (3) and (4) are due to the relatively low energy (150 MeV) pions, and (1) and (2) to the 1.5 GeV electrons. The magnetic field and the SPEAR beam pipe are normal to the plane of the figure. The trajectory shown for each particle is the best fit through the sparks, indicated by crosses. (From Abrams *et al.* 1975.)

(1)共鳴(Breit-Wigner)

$\frac{1}{\tau} = \Gamma$

$$\psi(t) = \psi(0)\, e^{-imt}\, e^{-\frac{t}{2\tau}}$$

$$|\psi(t)|^2 = |\psi(0)|^2\, e^{-\frac{t}{\tau}}$$ ← 寿命τで崩壊する。

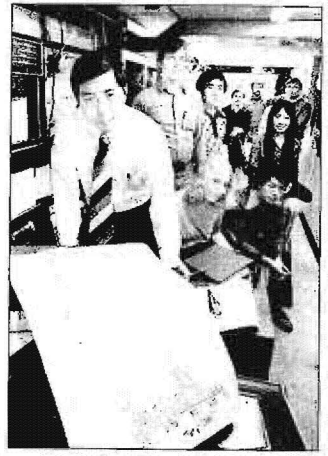
この時間の波動関数をエネルギーで見るフーリエ変換

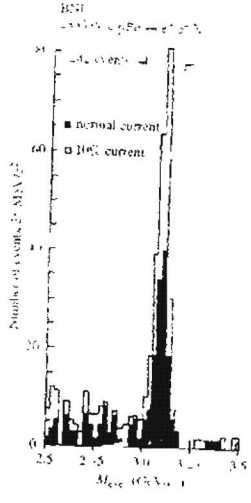
$$\chi(E) = \int \psi(t)\, e^{iEt}\, dt = \psi(0) \int e^{-t\left[\frac{\Gamma}{2} + i(m-E)\right]}\, dt$$

$$= \frac{A}{(E-m) - \frac{i}{2}\Gamma}$$ になる。

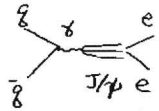
アメリカ東海岸 BNL

P->Be->e^+e^-





□ Be



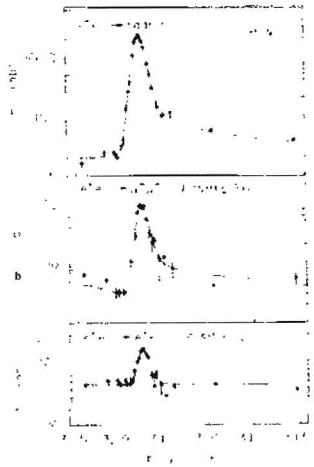
加速した陽子

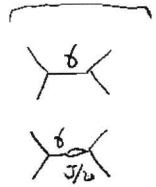
逆の反応を見ている

一方、西海岸SLAC (SPEAR)

バートン・リヒター

電子・陽電子コライダー
ECM=3.1GeV 不安定な動き
反応が2桁くらいふらつく?





の2つの効果の干渉で非対称になっている

← e^+e^-

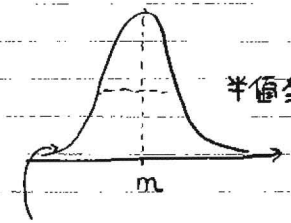
駐車場に磁石並べて作った程度
(ガレージ実験)
(Spear 翌75年に $\sqrt{s}=4$ GeV
第3世代レプトンτ発見 パール)

Date . . No.

$$|\chi(E)|^2 = \frac{\frac{1}{4}\Gamma^2}{(E-m)^2+\frac{1}{4}\Gamma^2} \nearrow = \frac{\Gamma^2 m^2}{(s-m^2)^2+\Gamma^2 m^2}$$

$(E+m)^2$ をかけて ローレンツ不変な形に直す.

($E \sim m$ として) $s \equiv E^2$



半値全幅 Γ

E^{-2} ゆっくり落ちてゆく

不確定性原理

↕

"うそついていい時間"

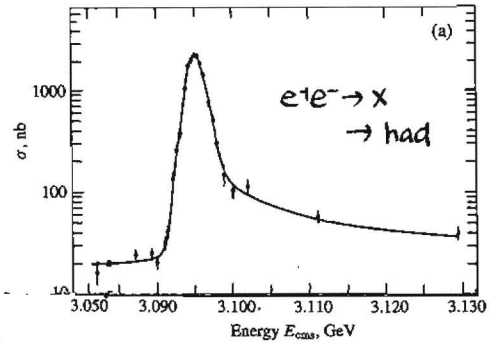
$\Delta E \Delta t \leq t$

短寿命 ↔ 短い間なら 嘘(本当の質量)でなくても良い

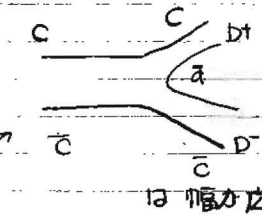
(固有質量)

m の状態 : 質量殻上にいる. "on-shell"

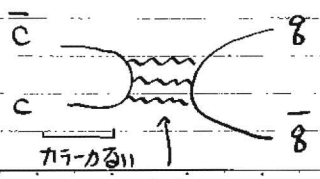
細い ↔ Γ が小さい ↔ $\frac{1}{\tau}=\Gamma$ (寿命が長い)



幅 $\Gamma \sim 87$ keV (小さい)



は幅が広い.



カラーがない

3gluonと カラーなしに出来ない.

3g交換でないと崩壊出来ない

→崩壊しにくい

"OZI則"

(Okubo, Zweig, Iizuka)

Date . . No.

'77に同様

$p + Be \to \mu^+\mu^- + X$ 9.4 GeV resonance

Υ (ウプシロン) $b\bar{b}$ が発見され $m_b \sim 5$ GeV

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ の現在のクォークモデル確立

(tは 1994年 $m_t \sim 175$ GeV)

bやcクォークを含むメソン発見されている.

(Tevatron, KEK B で最近も)

Table 14.3: $q\bar{q}$ quark-model assignments for the observed heavy mesons. Mesons in bold face are included in the Meson Summary Table.

$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	I = 0 $c\bar{c}$	I = 0 $b\bar{b}$	I = ½ $c\bar{u}$, $c\bar{d}$; $\bar{c}u$, $\bar{c}d$	I = 0 $c\bar{s}$; $\bar{c}s$	I = ½ $b\bar{u}$, $b\bar{d}$; $\bar{b}u$, $\bar{b}d$	I = 0 $b\bar{s}$; $\bar{b}s$	I = 0 $b\bar{c}$; $\bar{b}c$
$1\,^1S_0$	0^{-+}	$\eta_c(1S)$	$\eta_b(1S)$ ν	D	$D_s^{\pm}$	B	B_s^0	$B_c^{\pm}$
$1\,^3S_1$	1^{--}	$J/\psi(1S)$	$\Upsilon(1S)$	D^*	$D_s^{*\pm}$	B^*	B_s^*	
$1\,^1P_1$	1^{+-}	$h_c(1P)$ ν		$D_1(2420)$	$D_{s1}(2536)^{\pm}$			
$1\,^3P_0$	0^{++}	$\chi_{c0}(1P)$	$\chi_{b0}(1P)$		$D_{s0}^*(2317)^{\pm\dagger}$			
$1\,^3P_1$	1^{++}	$\chi_{c1}(1P)$	$\chi_{b1}(1P)$		$D_{s1}(2460)^{\pm\dagger}$			
$1\,^3P_2$	2^{++}	$\chi_{c2}(1P)$	$\chi_{b2}(1P)$	$D_2^*(2460)$	$D_{s2}(2573)^{\pm}$			
$1\,^3D_1$	1^{--}	$\psi(3770)$						
$2\,^1S_0$	0^{-+}	$\eta_c(2S)$	ν					
$2\,^3S_1$	1^{--}	$\psi(2S)$	$\Upsilon(2S)$					
$2\,^3P_{0,1,2}$	$0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$		$\chi_{b0,1,2}(2P)$					

† The masses of these states are considerably smaller than most theoretical predictions. They have also been considered as four-quark states (See the "Note on Non-$q\bar{q}$ Mesons" at the end of the Meson Listings). The $D_{s1}(2460)^{\pm}$ and $D_{s1}(2536)^{\pm}$ are mixtures of the $1^{+\pm}$ states.

ψ, η $\Upsilon(1S)$ $\chi(P)$ $c\bar{q}$ Dメソン $c\bar{s}$ Dsメソン $b\bar{q}$ Bメソン $b\bar{s}$ Bsメソン $b\bar{c}$ 最近

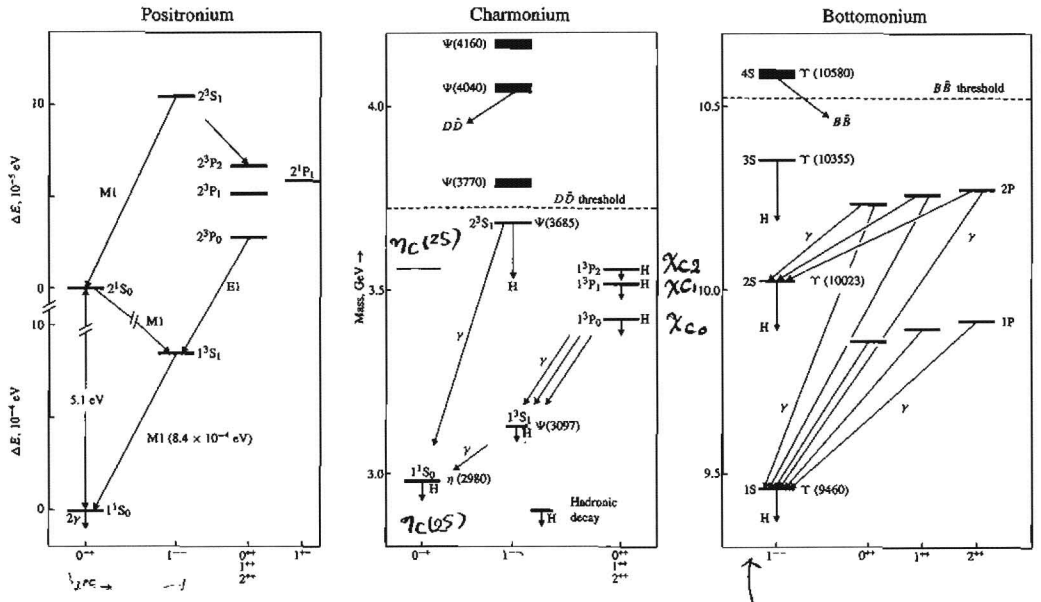
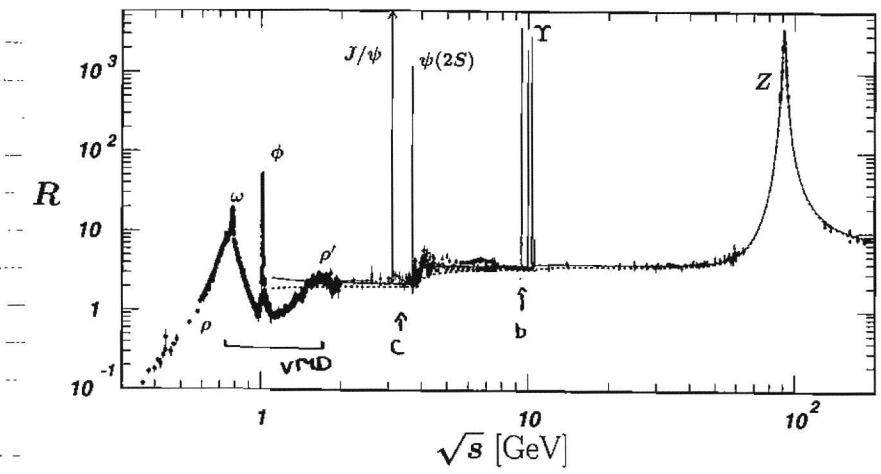


Fig. 4.8. The energy-level diagrams for positronium, charmonium and bottomonium. Note the changes in scale for positronium. Only states with $J^{PC} = 1^{--}$ can be accessed in e^+e^- annihilation experiments. Note that the atomic physics convention is to label the lowest-lying P states of positronium as 2P, while for the charmonium and bottomonium states the nuclear physics nomenclature 1P is employed. The shading indicates broad states.

$\eta_b(1S)$ $\eta_b(2S)$ 0^{-+} para $b\bar{b}$ も存在するはずだが未発見

1^{+-} (2^1P_1) まだ発見されていない

カラー $N_c=3$の実験データー



① $R = \dfrac{\sigma(ee\to had)}{\sigma(ee\to\mu\mu)}$

u, d, s $\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{2}{3}$ ⇔実験2

ee→ hadにfactor 3の自由度 color R, G, B

(ee系は無色なので 3×3のうち $R\bar{R}$ なと無色3つ)

② c, bと resonanceの細さ , Z→EWの章で

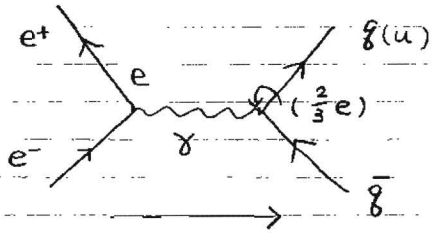
③ ω, φ, ρ, ρ'の幅

⇩

クォーク11 型の崩壊が出来るので広くなる

ファイマン図の基礎

例として $e^- e^+ \xrightarrow[\text{光}]{} q\bar{q}$ になる



時間の流れ

- 入ってくる 出てくる粒子 外線
  → on-shell mass
- 内部で飛んでいる粒子 内線
  → off-shell
  この反応が起きる長さ(時間)

- Dirac方程式の時に話しますが 反粒子 ≡ 時間を逆行する粒子
  → 粒子だけで書く

- vertex(頂点) 運動量, スピン保存 $\int d^4x$: action

  fermionの波動関数 mass$^{\frac{3}{2}}$
  ボソン 〃 mass
  → mass^{4}の次元

  ほとんど f-f-B
  B-B-B(-B)

  → 結合の強さ (coupling constant)
  - 電磁 (e) $\alpha_{EM} = \frac{e^2}{4\pi}$
  - 弱い g' α_W
  - 強い α_S

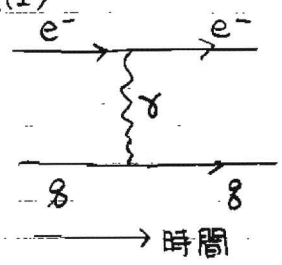
- 内線(プロパゲーター) 運動量保存

  γ, W, fermion でも良い

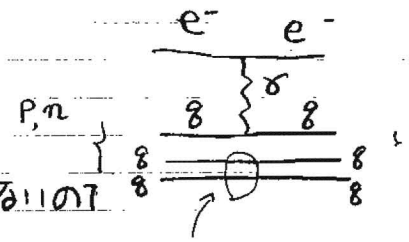
  対消滅
  対生成を伴う → Sチャンネル

$p^2 - m^2$
↑
off-shell

練習(1)



散乱タイプ

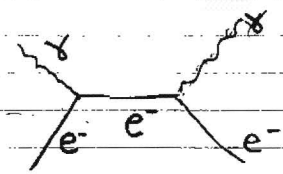


(実際には q は単体では存在しないので

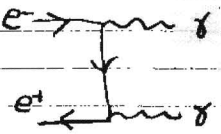
スペクテーター

外線, 内線, 頂点 同じ
t ↔ s を入れかえる
γ: p − p′

練習 (2)



compton散乱 ↔ 光電吸収

e⁻がプロパゲーター

外線のe⁻とγの運動量 ↔ s↔t