

# ハドロン物理

## — クォークからの挑戦 —

保坂 淳

大阪大学 核物理研究センター  
首都大学東京物理学教室談話会

1. まえおき

2. ハドロンとは

3. エキゾチックハドロン

4. チャームバリオン

5. まとめ

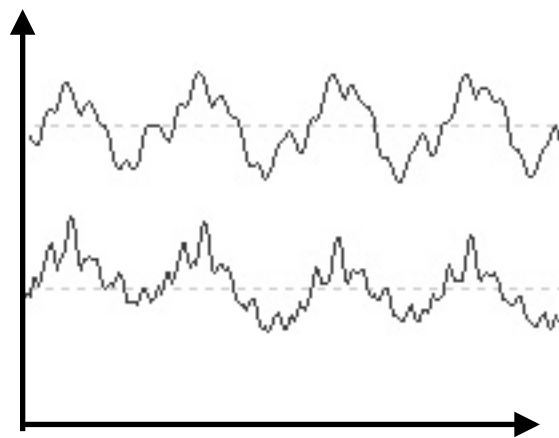
基本的な法則をもつも  
説明できない

その解決に向けて

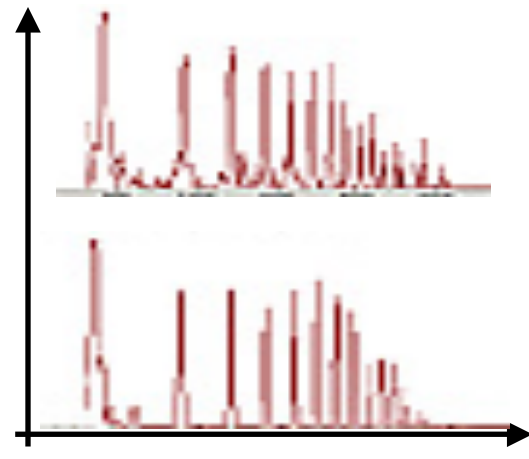
# 1. まえおき

# 共鳴＝たたけば響く

## フーリエ分解



時間



周波数/エネルギー

音を聞くことで

硬さ、大きさ、形状、組成、振動の仕方、さらにこれらから  
銅、鉄、他の不純物の割合が予想できる

→ わかった

原子・分子レベルから説明することは難しい

# たたく方法と道具

鐘の場合は**周波数（エネルギー）**を投入した

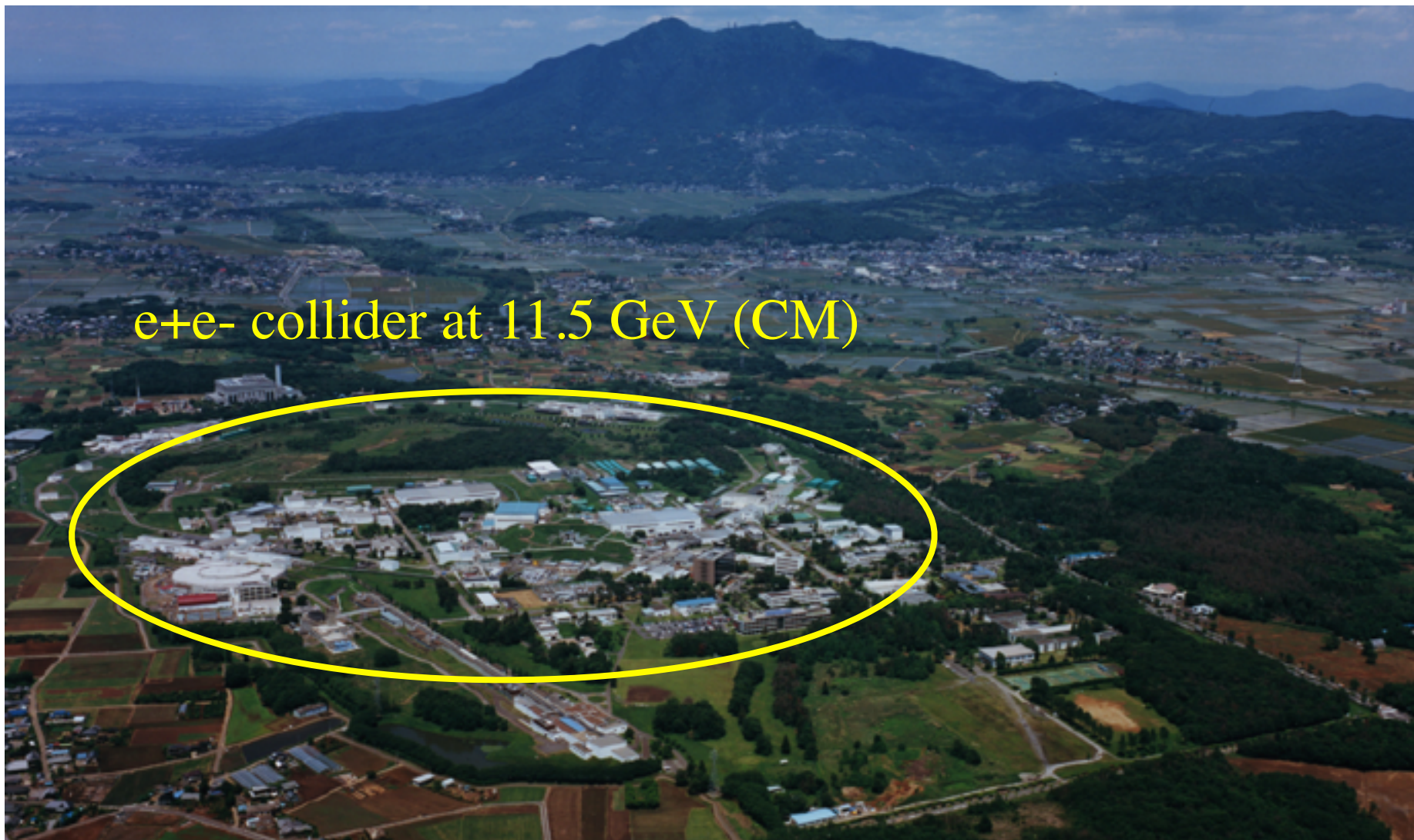
ハドロン（素粒子や原子核）では

エネルギーの他、**運動量、角運動量、スピン、フレーバー**  
様々な**量子数**を投入する

## 粒子加速器

# 高エネルギー加速器研究機構

e+e- collider at 11.5 GeV (CM)



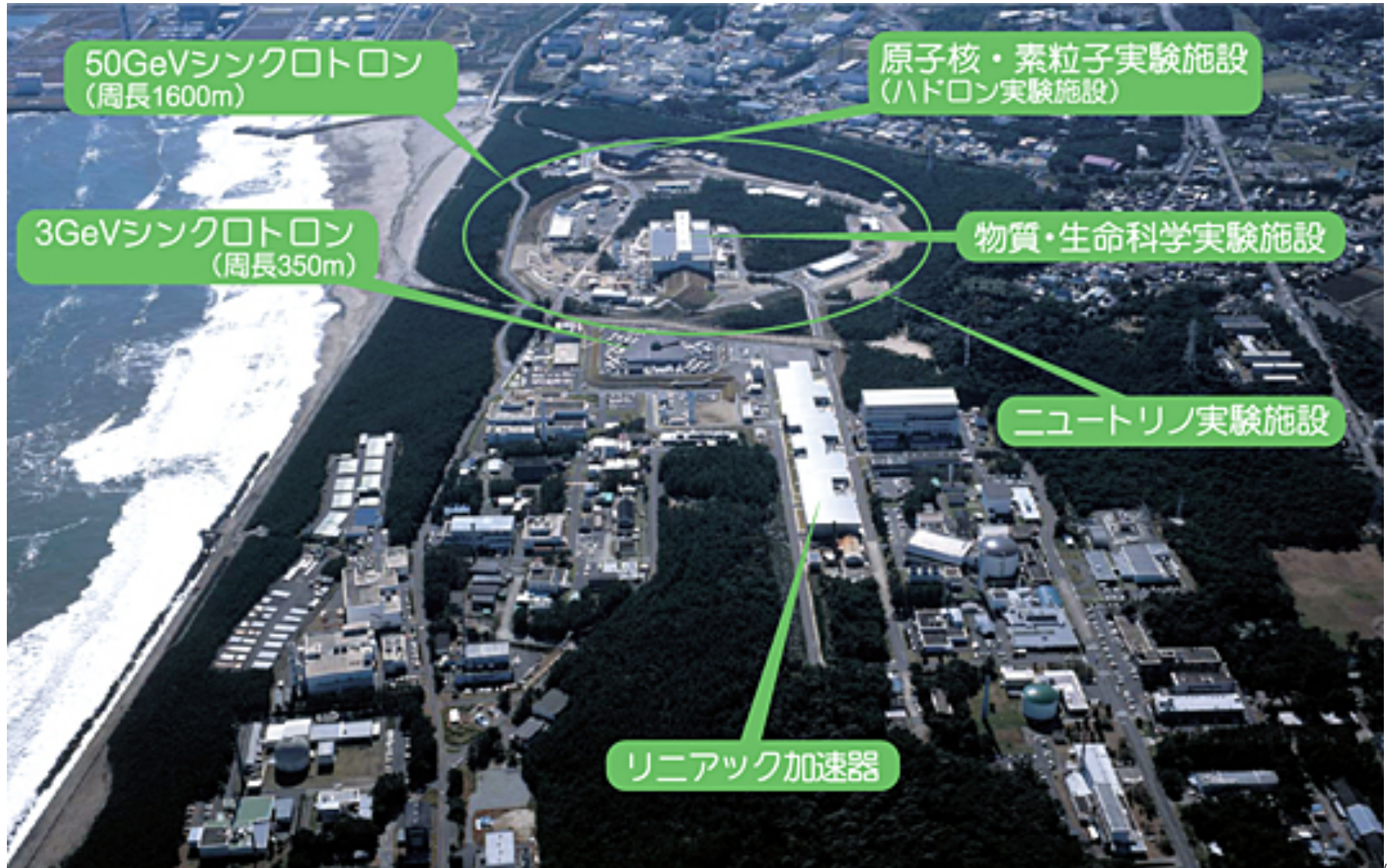
# Large Hadron Collider



## The birth of the web

The World Wide Web, invented at CERN in 1989 by British scientist Tim Berners-Lee, has grown to revolutionize communications worldwide

# J-PARC @ 東海村



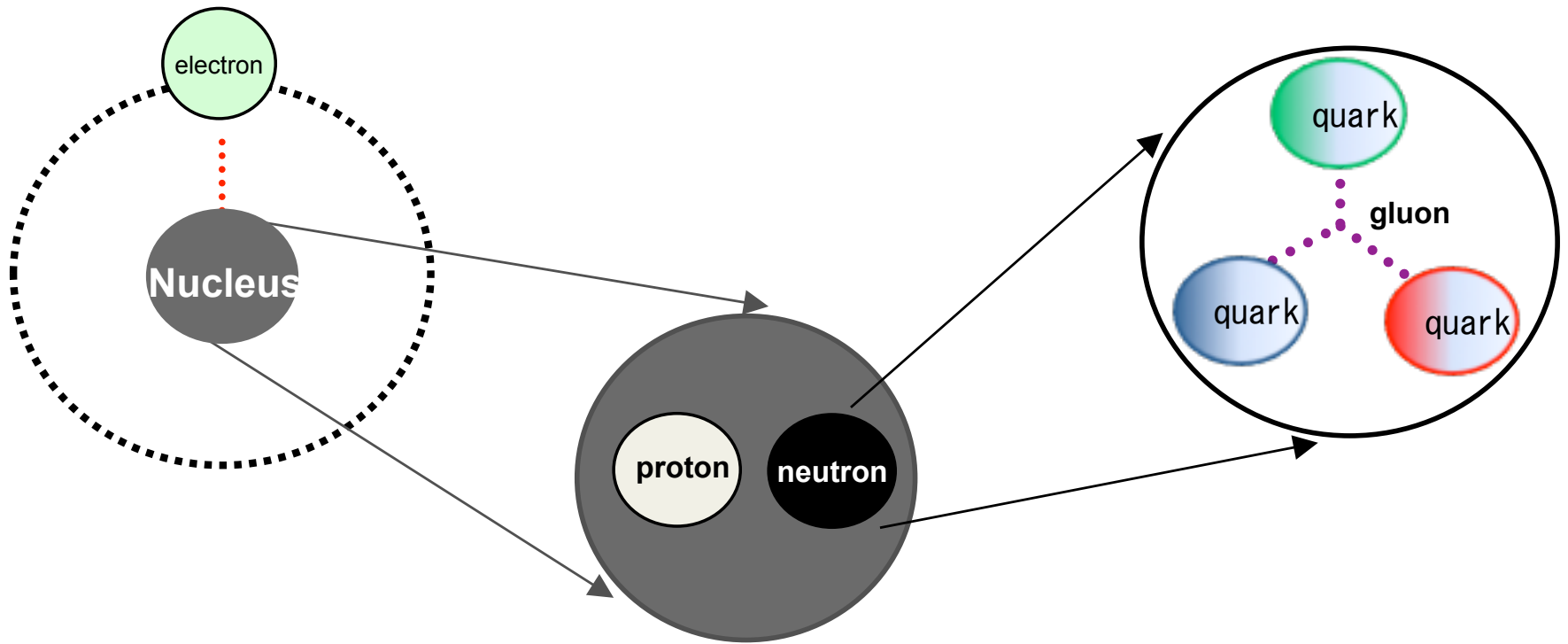
## 2. ハドロンとは

- **クォーク**からできる物質で、強い相互作用をする  
陽子や中性子 (**バリオン**) =  $qqq$ 、中間子 (**メソン**) =  $q\bar{q}$
- クォークはハドロンの中に**閉じ込め**られている
- **カイラル対称性が自発的に破れ**クォークは質量を獲得する  
(見える物質質量の99%)
- これらの基礎理論は**量子色力学**として確立している

しかしながら、ハドロンは

- **裸のクォークとグルーオン**では効率良く説明できない
- ハドロンを説明する効率良い方法は？ (**有効理論**)
- **究極**の探求と現実の**再構成** = 出来上がる仕組みの解明





### Mass of an Atom

Nucleon: 99.95 %

electron: 0.05 %

EM binding < 0.00001 %

### Nucleus

Nucleons: 99%

Nuclear binding < 1 %

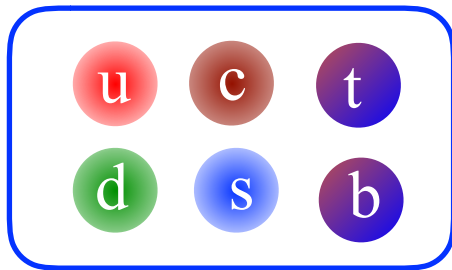
From S.H. Lee

# クォークの種類

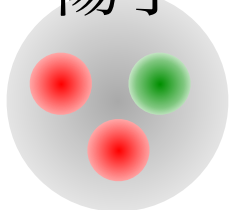
クォークを支配する法則は**量子色力学 (QCD)**

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{2} \text{tr} G^{\mu\nu} G_{\mu\nu} + \sum_{f=u,\dots,b} \bar{q}_f (i\not{D} - m) q_f$$

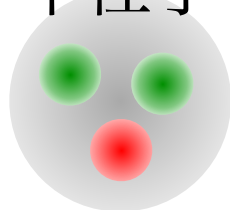
6種類のクォークとグルーオン



陽子



中性子



南部陽一郎

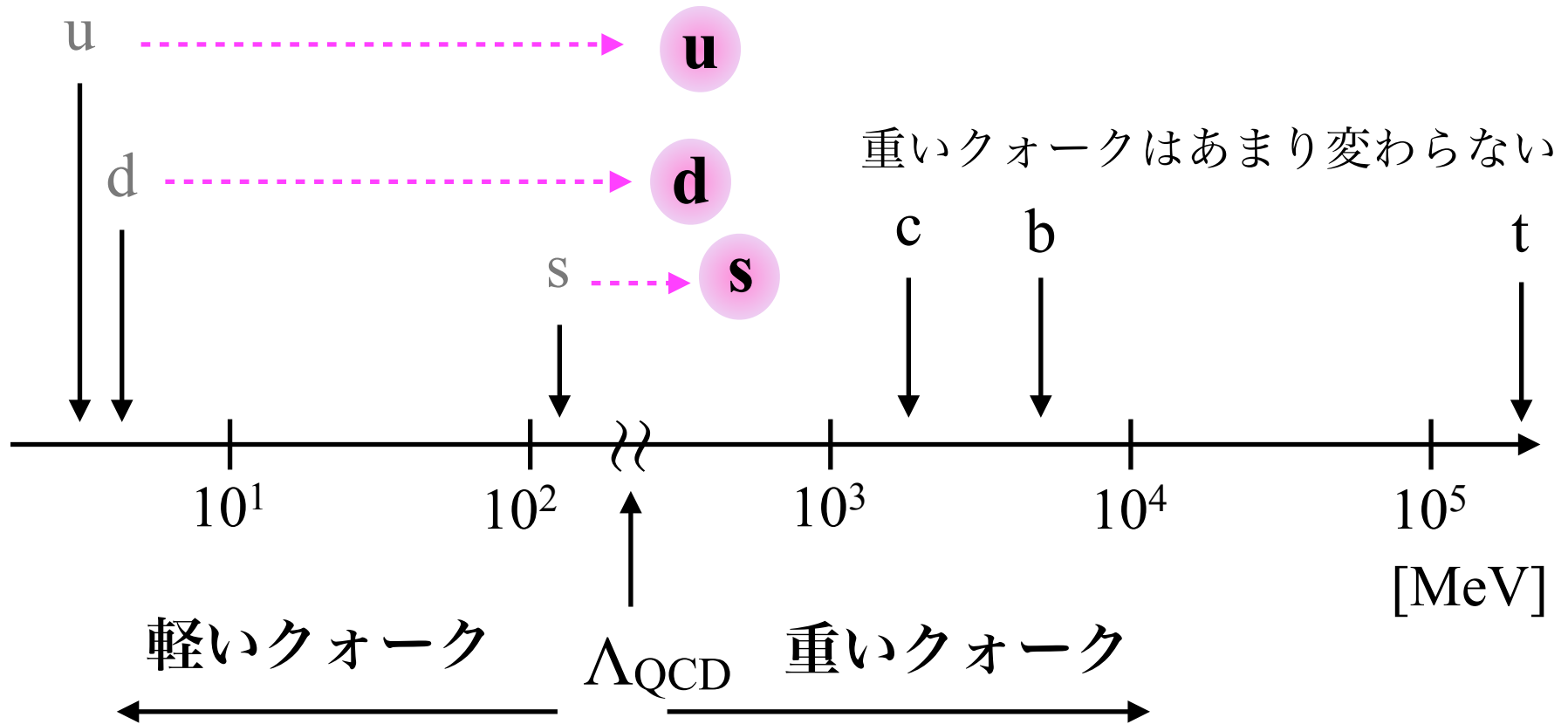


小林誠



益川敏英

# 軽いクォークが質量を獲得し変わる



質量を獲得したクォークを**構成クォーク**

それに基づいていたのがGell-MannとZweigの**クォーク模型**

QCDよりはるか以前に導入された「**現象論**」

# さて 少し歴史と余談





少量のラジウムを入れたガラス管をポケットに入れていたら数日後に腹部の皮膚に紅斑ができたよ

じゃあ僕も腕にラジウムを接触させてみよう。

1901年 ベクレル

ピエール

同じことが起きたよ！

From M. Bando

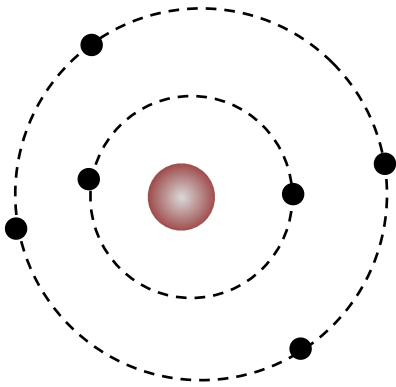
<http://gendai.ismedia.jp/articles/-/10728>

光り輝く放射性物質は、人類に幸せをもたらす魔法の物質、夢の新薬のように喧伝され、さまざまな商品がつくられることになる。

その狂騒ぶりを記す『被曝の世紀』（キャサリン・コーフィールド著、友清氏訳）には、数々の実例が挙がっている。コロンビア大学の薬学部長は、ラジウムを肥料にすれば『味の良い穀物を大量につくれる』と主張したという。薬剤師はウラン薬やラジウム薬を薬局の棚に並べ、また医師たちもラジウム注射のような放射性物質を使った治療法を次々と開発、糖尿病、胃潰瘍、結核、がんなど、あらゆる病に活用しようとした。

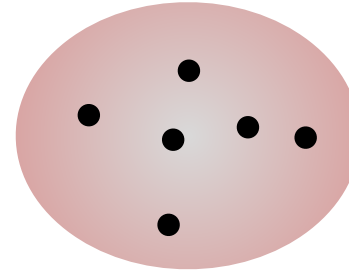
ほかにも、膨大なラジウム関連商品が欧米で販売されている。放射性歯磨き、放射性クリーム、放射性ヘアトニック、ラジウム・ウォーター、ラジウム入りチョコバーなどなど。「ラジウムはまったく毒性を持たない。天体が太陽光と調和するように、ラジウムは人体組織によく調和する」—これは当時の医学雑誌『ラジウム』（1916年）の一節だ。当然のことかもしれないが、放射性物質の危険性に対する意識は、まったくのゼロだったのである。

# Atomic nuclei



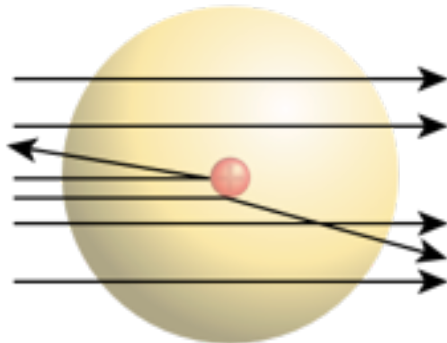
Nagaoka model

First president of Osaka University



Thomson model

**Rutherford's** (Marsden) experiments supported Nagaoka  
As if a cannon ball was rebound by a piece of paper...



$$R_{\text{Atomic nuclei}} \sim 10^{-15} \text{ m}$$
$$\sim 10^{-5} \text{ of atom}$$



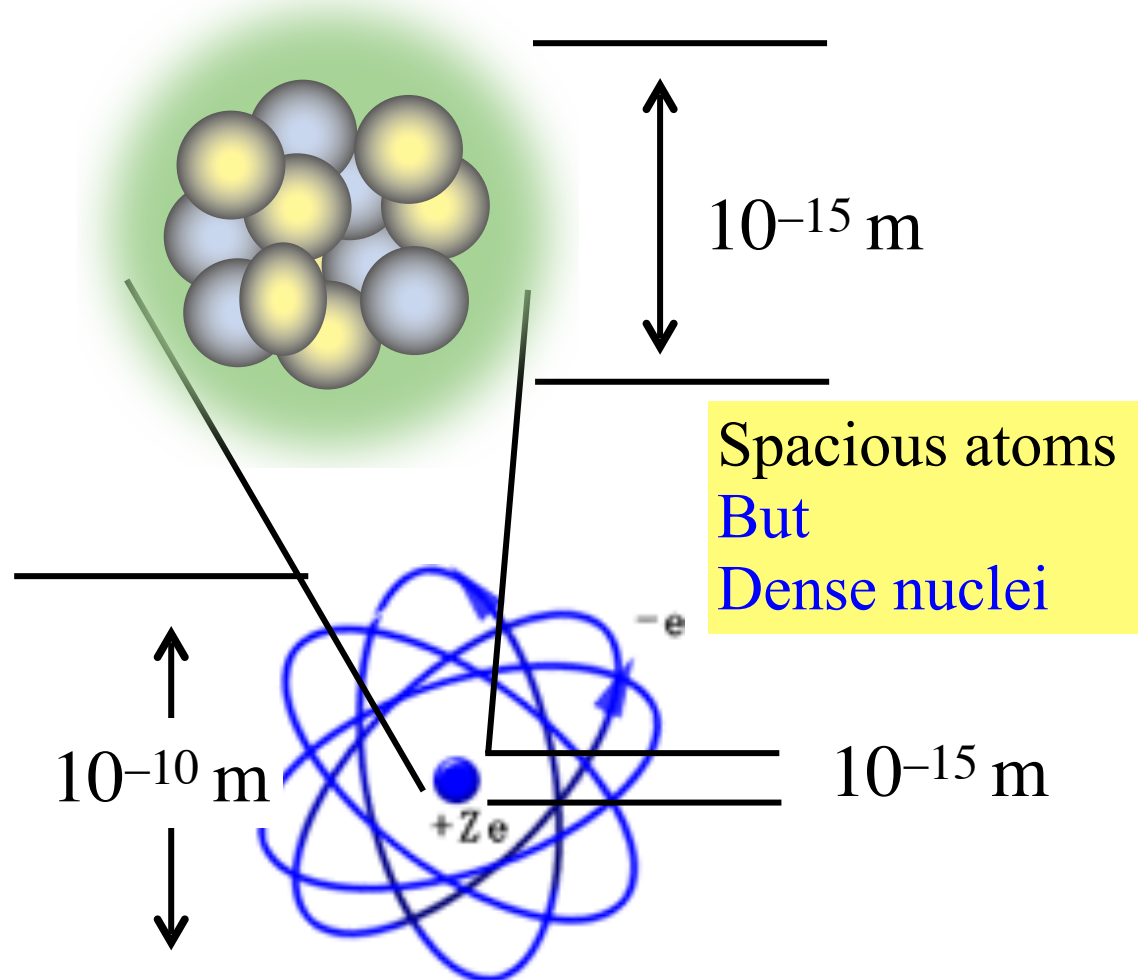
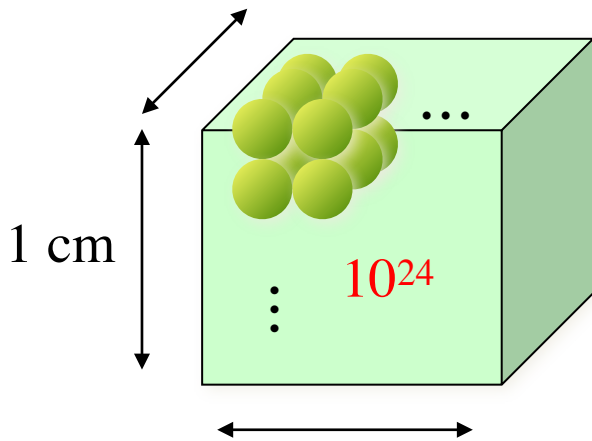
# Discovery of neutrons

1932

Establishes the structure of the nucleus



James Chadwick



# What binds nucleons

Hideki Yukawa, 1934 @ Osaka Univ

- Used an analogy with the EM force but
- The nuclear force reaches only inside a nucleus ( $\sim$  fm)

$$-\nabla^2\phi(\vec{x}) = \frac{Q}{\epsilon}\delta^3(\vec{x}) \quad \rightarrow \quad (-\nabla^2 + m^2)\phi(\vec{x}) = g\delta^3(\vec{x})$$

The solution is

$$\phi(\vec{x}) = \frac{g}{4\pi} \frac{\exp(-mr)}{r}$$

Meson  
Pion

$$\frac{e^{-x}}{x}$$

Yukawa func.

$$m \sim 200 \text{ MeV}$$



Cecil Frank Powell  
1948

# Yukawa

湯川博士と大阪大学 大阪大学適塾記念会発行「適塾」No.15(1982)p19-p26 (昭和五十六年十一月十七日適塾記念講演会の講演要旨)

・・・

さて八木先生は、湯川博士にもっと勉強するよう叱った後で、「本来なら朝永君に来て貰うことにしていたのに、君の兄さんから依頼されたので、やむなく君を採用したのだから、朝永君に負けぬよう、しっかり勉強してくれなければ困る」といった意味の注意をされたそうです。八木先生は、口の悪いことと、八木アンテナで有名で、特に人の胸をグサリと刺すような毒舌は、先生の周囲の人々を縮みあがらせていたそうです。湯川先生に対する、この止どめの一言は八木先生ならではの毒舌といえましょう。この言葉は湯川先生を励ます為のもので、善意の言葉とは思いますが、後に湯川先生がノーベル賞を受賞されたとき、八木先生はどんな気持で、その朗報を聞かれたのでしょうか。私にとって、八木、湯川両博士の心中は、まことに興味深いものであります。・・・

# その後

坂田、Gell-Mann, Zweig, 南部、小林-益川らのアイデアと  
加速器実験を実行した多くの実験研究者の努力によって



よくわかっていそうだが、、

基本的な量子数は $q\bar{q}$ ,  $qqq$ で説明できるが、  
質量、寿命、大きさ、遷移確率などは説明できない

こうしたなか、2002年頃から異色のハドロンが見つかってきた

$X(3872)$ ,  $Y(4260)$ ,  $Z(4430)$ ,  $\Theta^+(1520)$ , ...

これらは、既知のハドロン以上に説明困難

→ **エキゾチックハドロン**

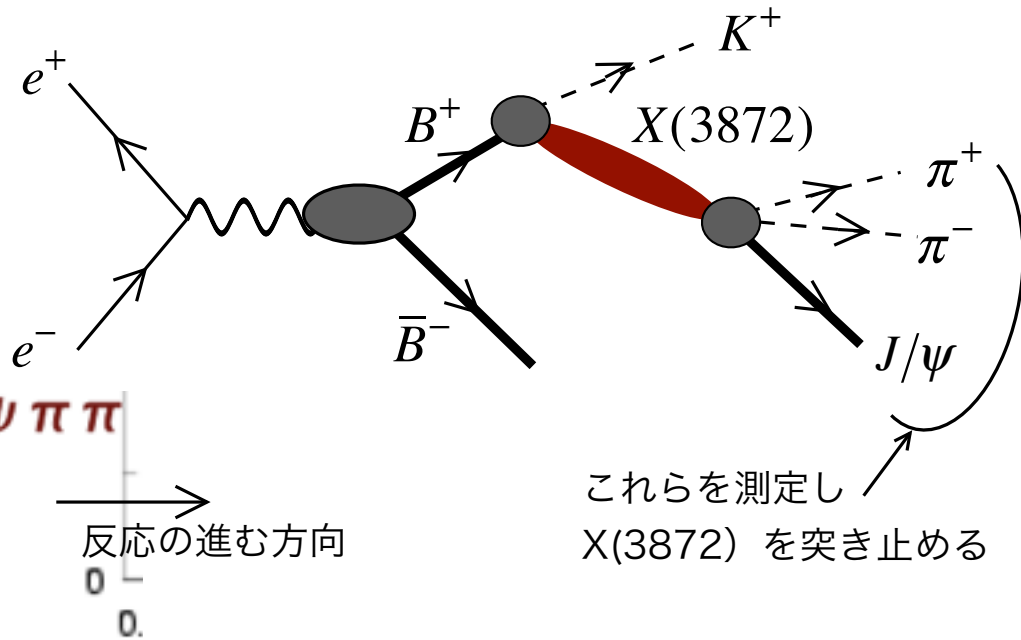
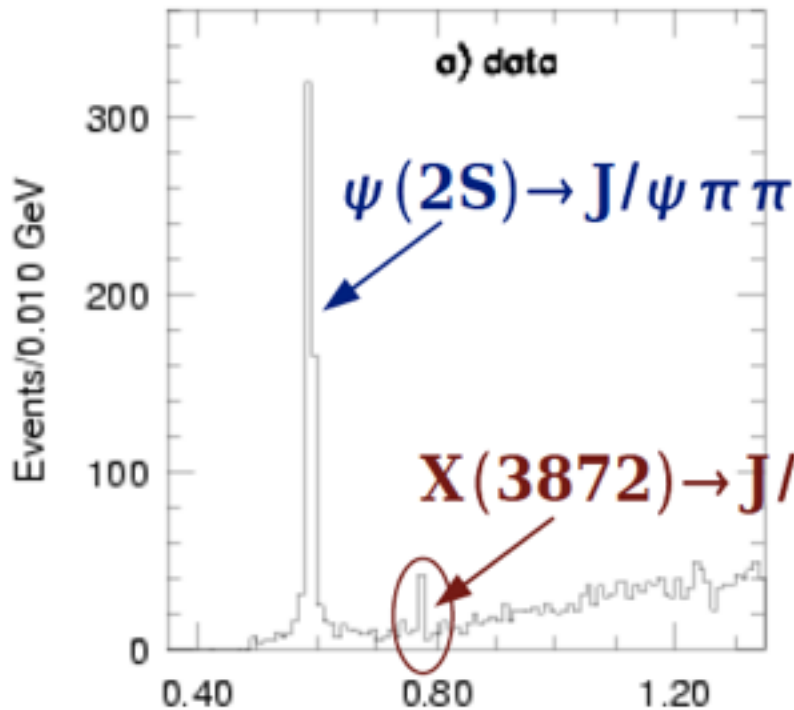
# 3. エキゾチックハドロン

**X(3872), テトラクォーク (?) の発見:**

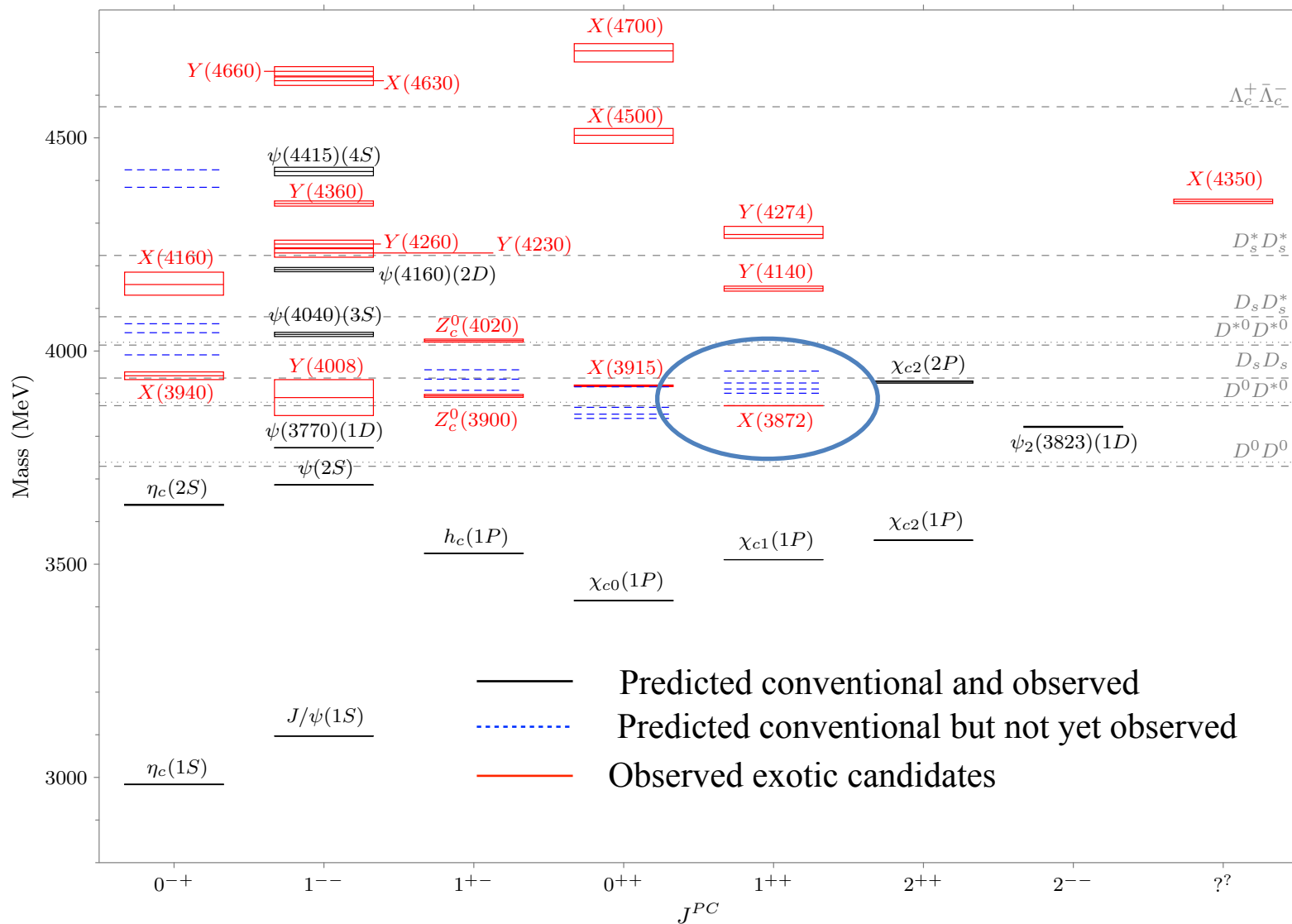
Bell 実験の論文のなかでも最も引用数が多い Inspires:1261

S. K. Choi et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. Lett. 91, 262001 (2003)

$B \rightarrow K \pi^+ \pi^- J/\psi$  using  $140 \text{ fb}^{-1}$



# これまでに観測されたX, Y, Z





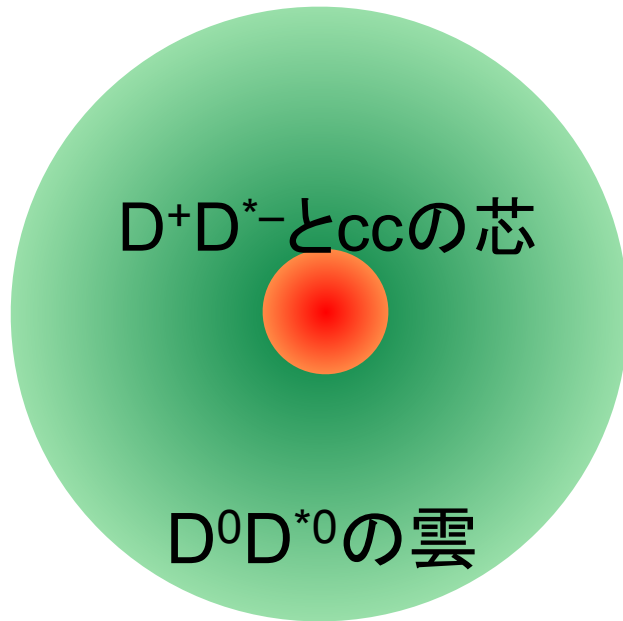
# X(3872)の性質

1.  $X(3872)$  exists
2. The mass is close to the threshold
3. The decay width is small = long life time
4. No isospin partner
5. Isospin is broken
6. Spin and parity  $1^{++}$
7. The large decay rate into  $DD^*$
8. A large production rate in the prompt reactions

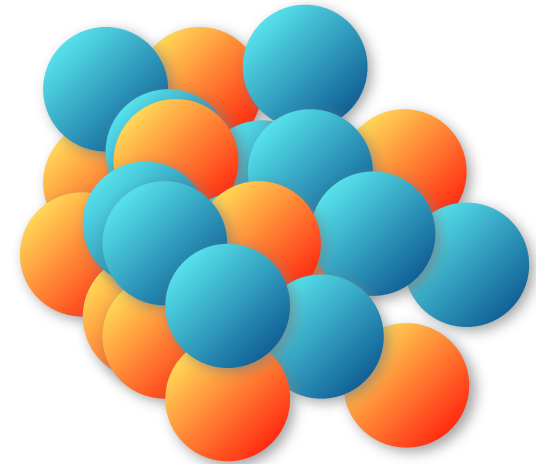
Dominated by  $DD^*$  molecule but with a small fraction of  $c\bar{c}b\bar{b}$

X(3872)

Ar nucleus



~ 7 fm



単独でこれほど大きなハドロンが本当にあるのか？

身長 10 m の巨人がいたらどう思う？

# 新粒子の発見はKEKが先導

$Z_c(4430)$ ,  $Z_b(10610)$ ,  $Z_b(10650)$ , ...

LHCbとBESが追い上げている

$Z_c(3900)$ ,  $P_c(4450)$ , ...

現在までに多くのデータが報告されている

しかし、QCDによる満足のいく説明には至っていない

R.L. Jaffe (2005):

The absence of exotics is one of the most obvious features of QCD

F. Wilczek (2005):

The story of pentaquark shows how poorly we understand QCD

# そこで

## 温故知新の教えに戻って

- QCDについて知らないことが多いように見える
- ハドロン現象を説明する「うまい」方法は？  
(QCDの直接計算は膨大すぎる、かつ原理的な困難がありそう)

## より簡単な系の性質を詳しく調べる

- **チャームバリオン「 $qqQ$ 」**は、**q**や**qq**を調べるのに通常のバリオンより便利。ただし作るのが難しい。
- 多くのエキゾチックハドロンは**重いクォーク**、**c**や**b**を含んでいるので、その直接的な解明にもつながるのでは。

# 4. チャームバリオン

作る必要がある



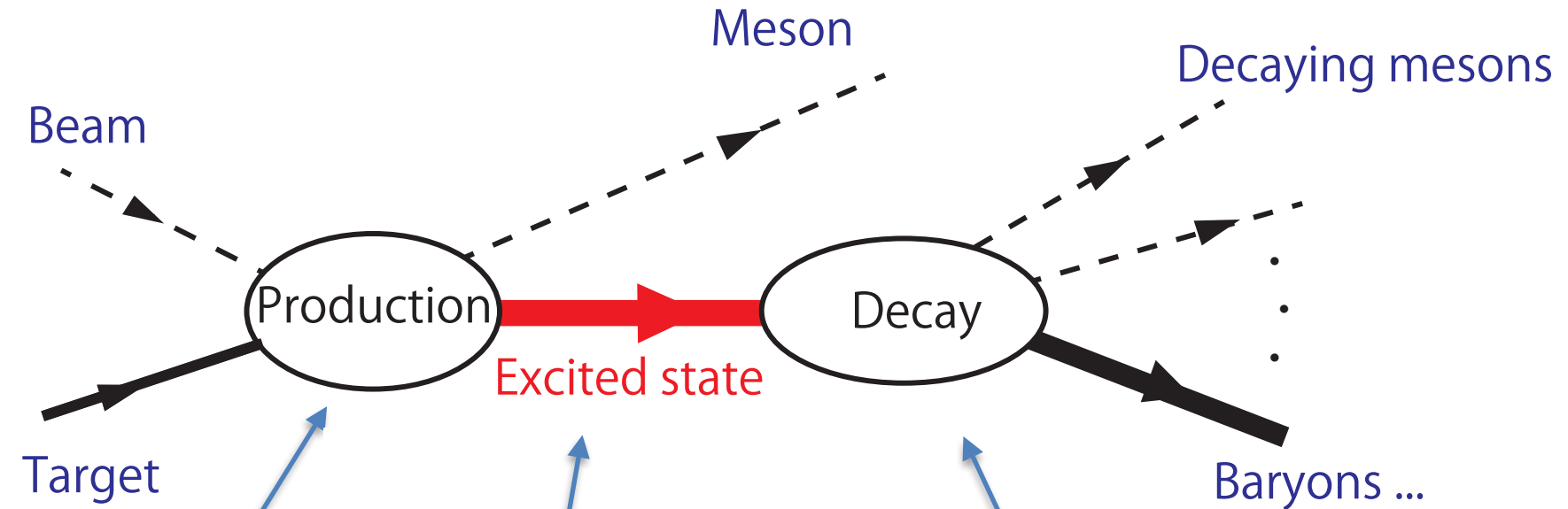
# 作って壊す

@KEK, J-PARC

しかし

- ・クォークは**閉じ込め**られているので直接見えない
- ・ハドロンの**生成・崩壊を通して間接的に**見えてくる

# 作って壊す @J-PARC



(A)  $cc$ 対を作る

(B) チャームバリオンを形成

(C) チャームバリオンが崩壊

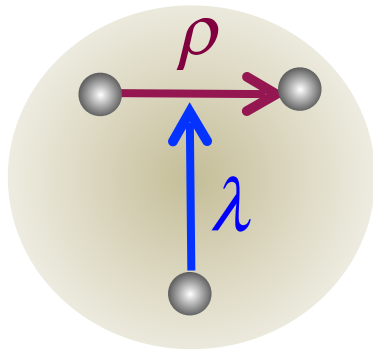


# Heavy quarks distinguish the internal modes $\lambda$ and $\rho$

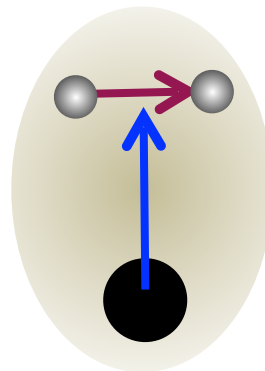
**Isotope-shift:** Copley-Isgur-Karl, PRD20, 768 (1979)

Single heavy baryons

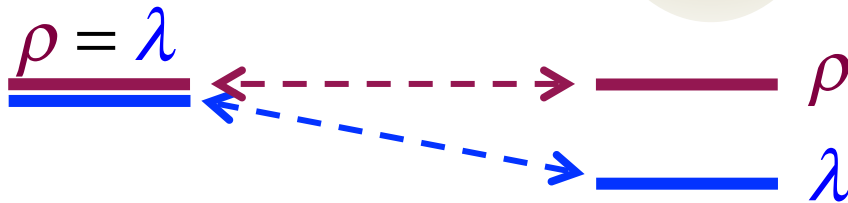
$N, \Delta, \dots$



$\Lambda_c, \Sigma_c, \dots$



$\lambda$ モードの準位が下がり  
最初の励起状態に現れる  
陽子や中性子では2つの  
モードが混ざるEntanglement



$$m_Q = m_{u,d}$$

$$m_Q \rightarrow \infty$$

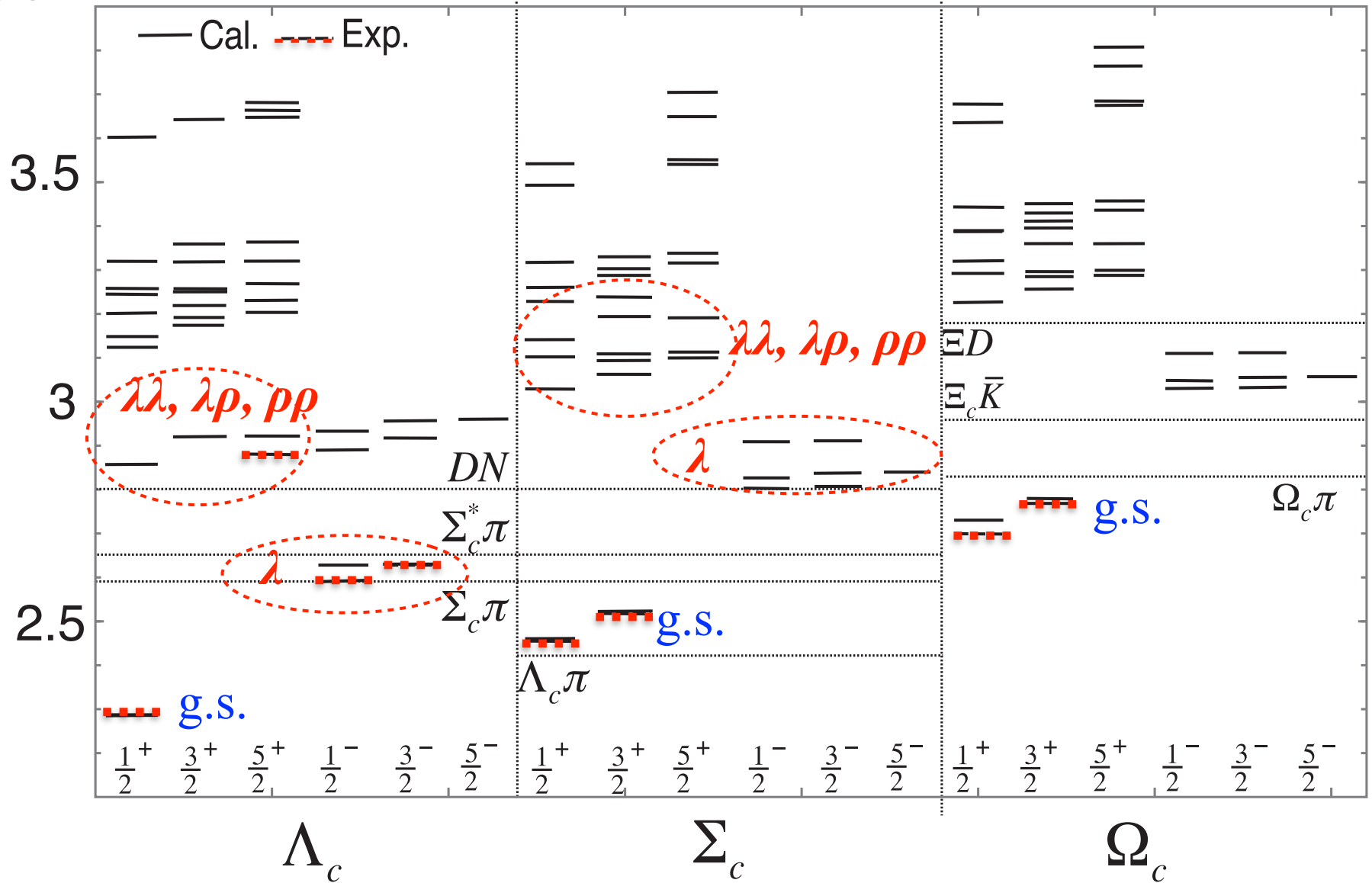
このような簡単なことも確かにはわかっていない

# もう一つの問題

- ・ 観測されるハドロンはクォーク模型でよく説明される。
- しかし
- ・ クォーク模型が予言する状態の全ては見つかっていない

「消えた共鳴問題」 Missing resonance

GeV



# もう一つの問題

観測される状態より多くの状態が予言されている

→ 「消えた共鳴問題」 Missing resonance

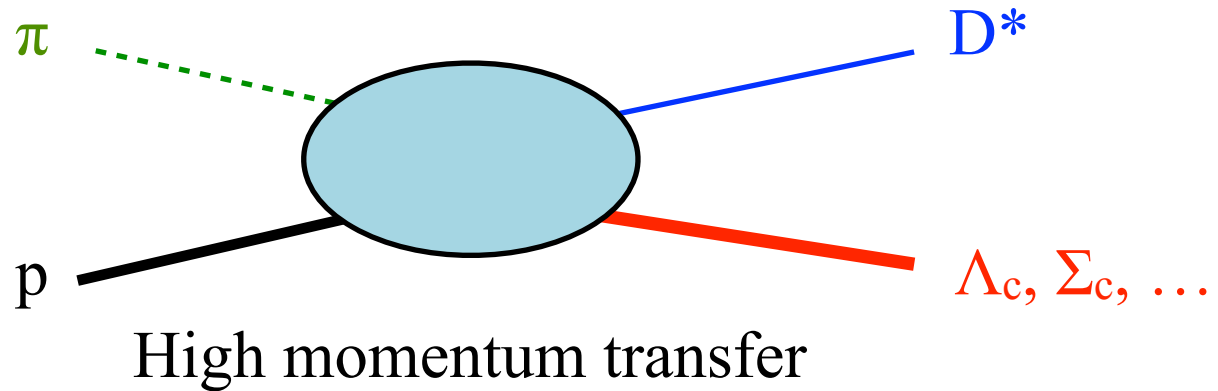
さらに

観測される（普通の）状態でさえ、必ずしもよく説明されない

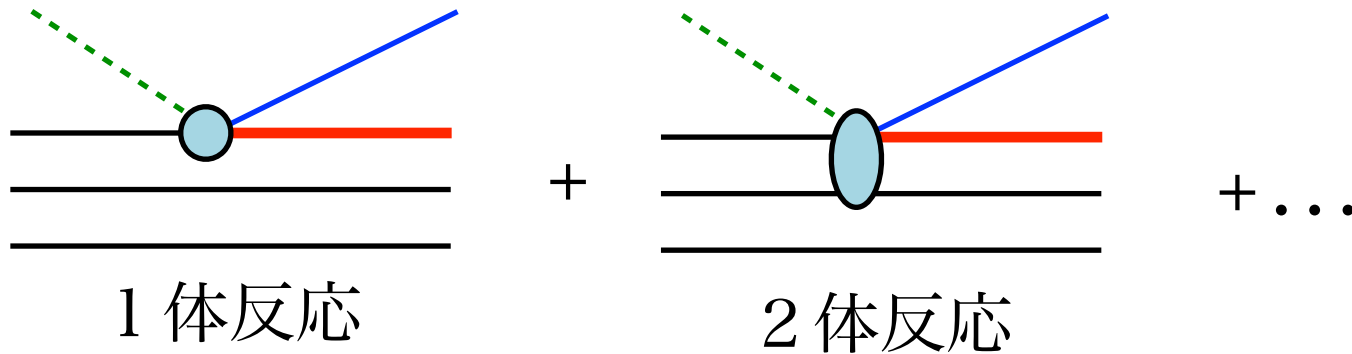
そこで

実験と理論の詳しい比較が必要

# J-PARCで作る



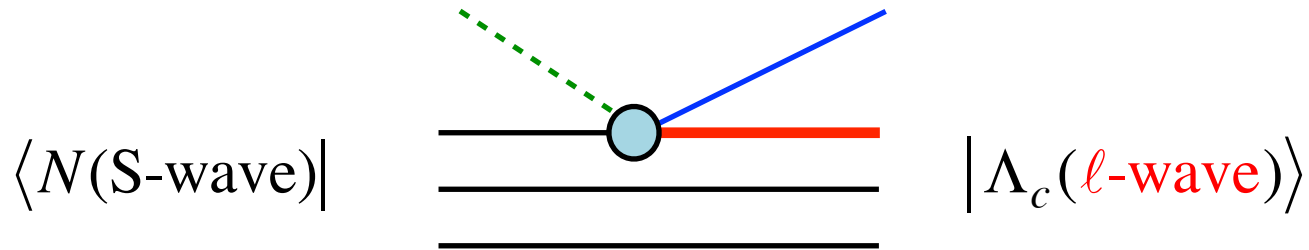
クォークによる構造を考慮して



# J-PARC @ 東海村



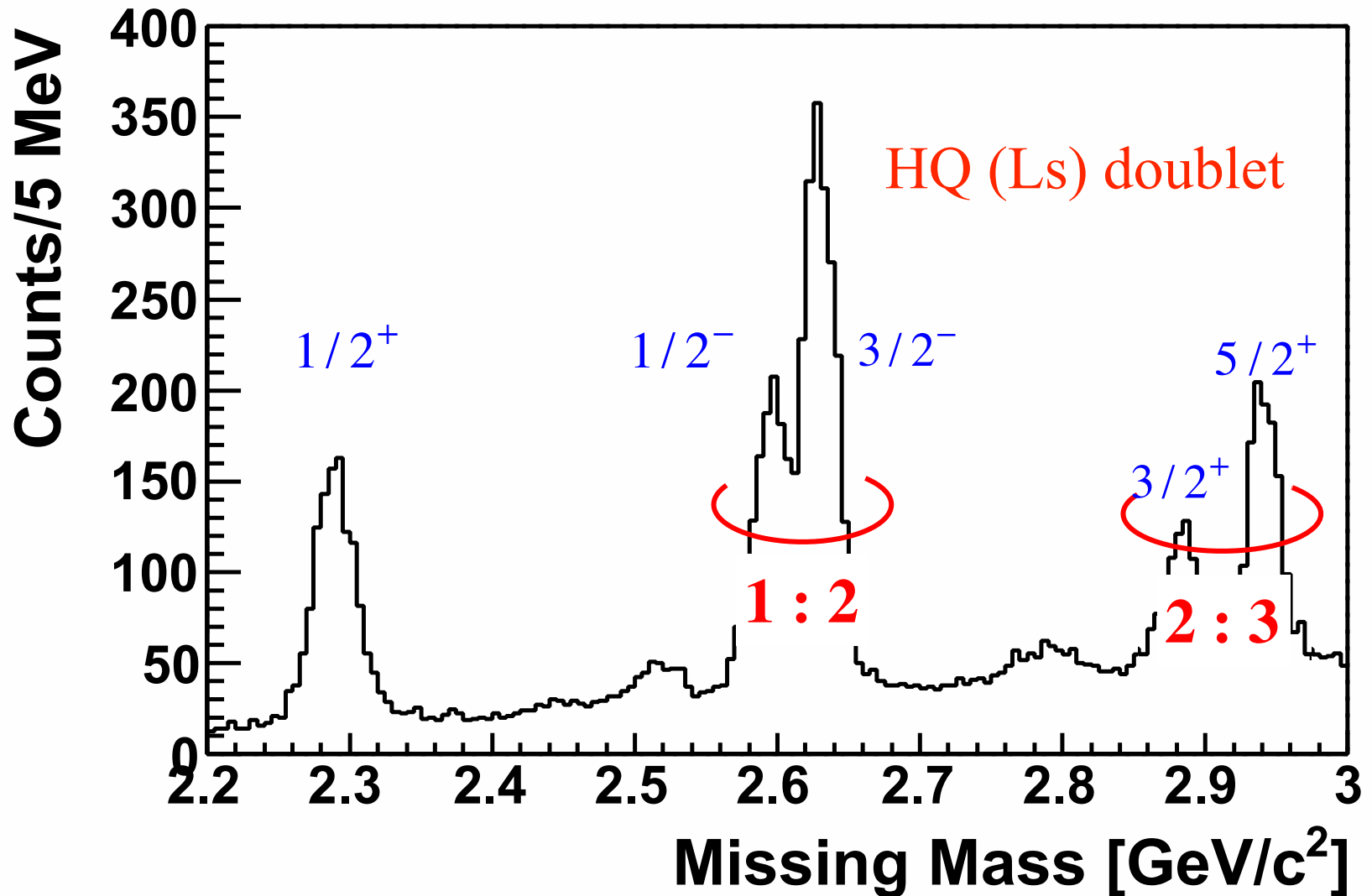
# 1 体反応の簡単な計算



$$\langle B_c(\ell\text{-wave}) | \vec{e}_\perp \cdot \vec{\sigma} e^{i\vec{q}_{eff} \cdot \vec{x}} | N(\text{S-wave}) \rangle_{radial} \sim \left( \frac{q_{eff}}{A} \right)^\ell \times \exp\left( -\frac{q_{eff}^2}{4A^2} \right)$$

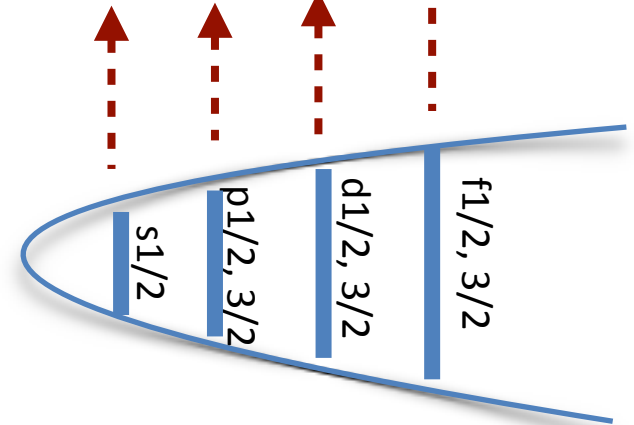
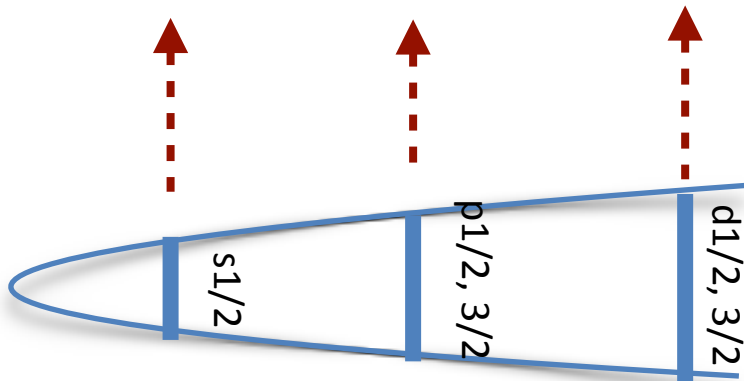
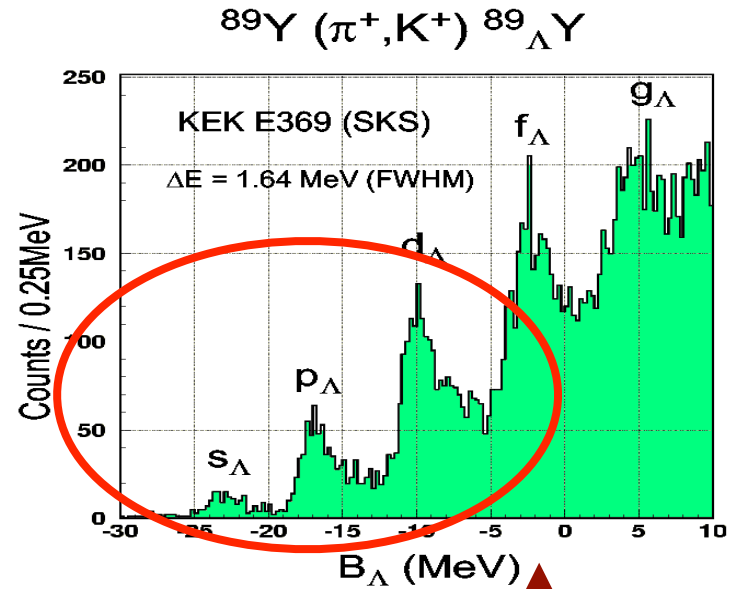
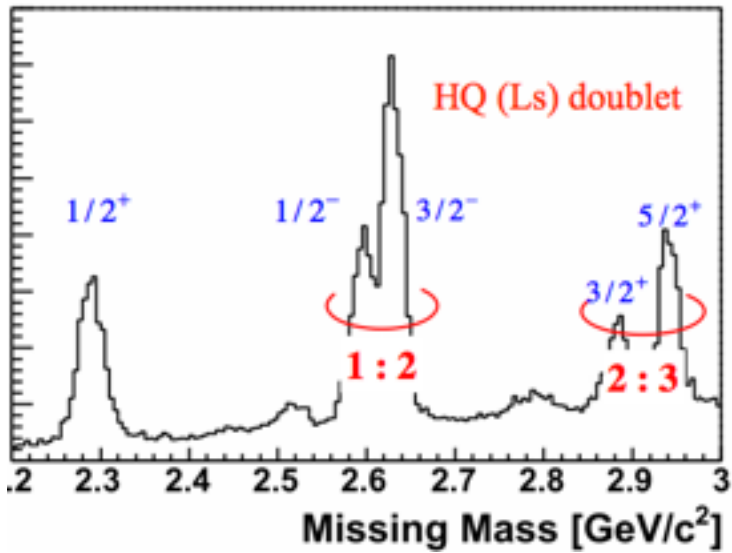
- Higher  $l$  states are produced abundantly
- Angular momentum matching
- Analogous situation with hyper nuclear production

# 生成率のエネルギー（周波数）分布

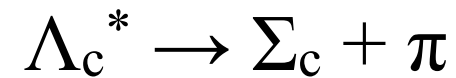
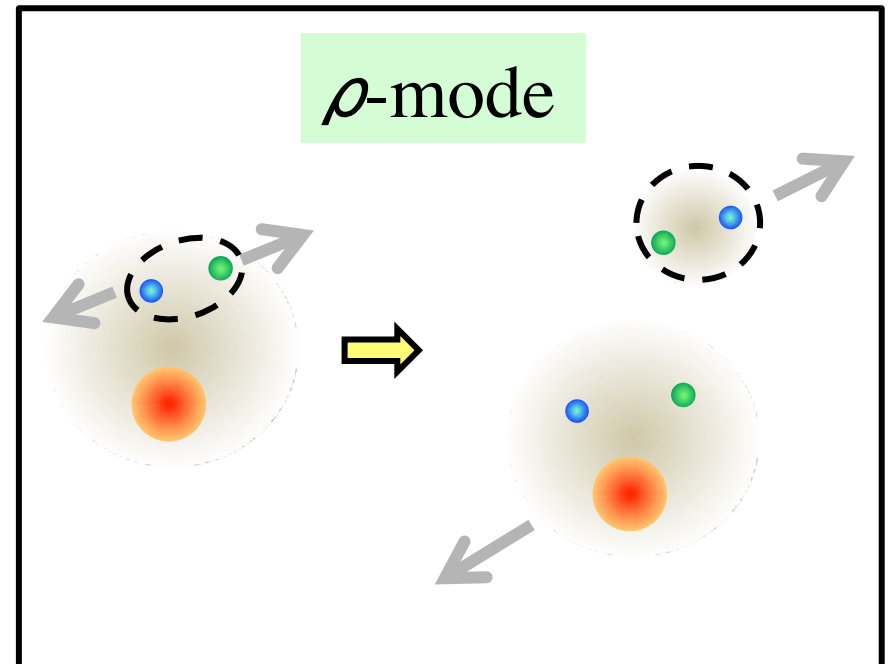
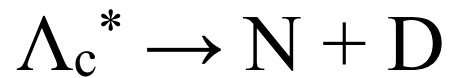
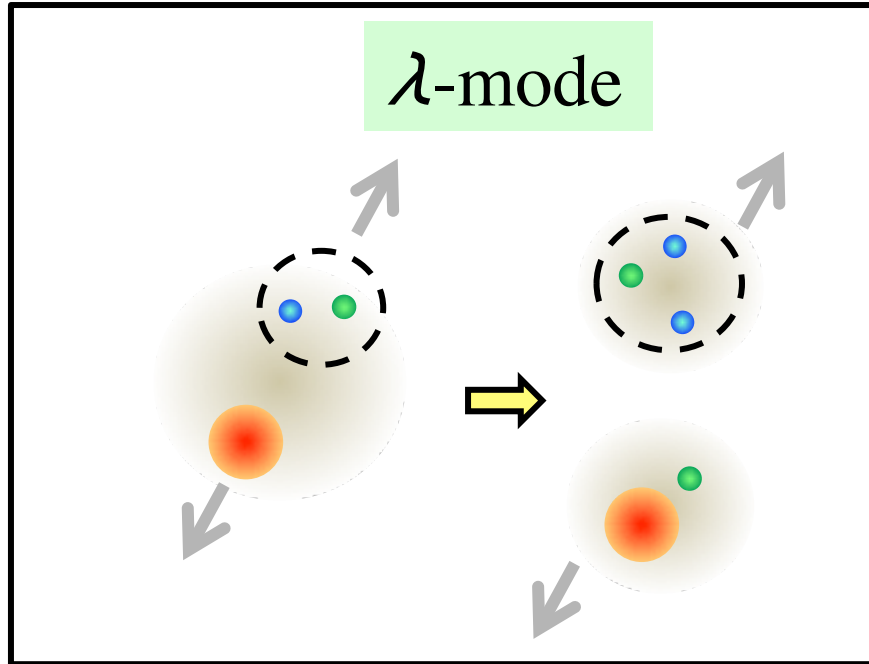




# ハイパー原子核生成反応と酷似



# Decays



# 励起状態の崩壊＝共鳴の減衰

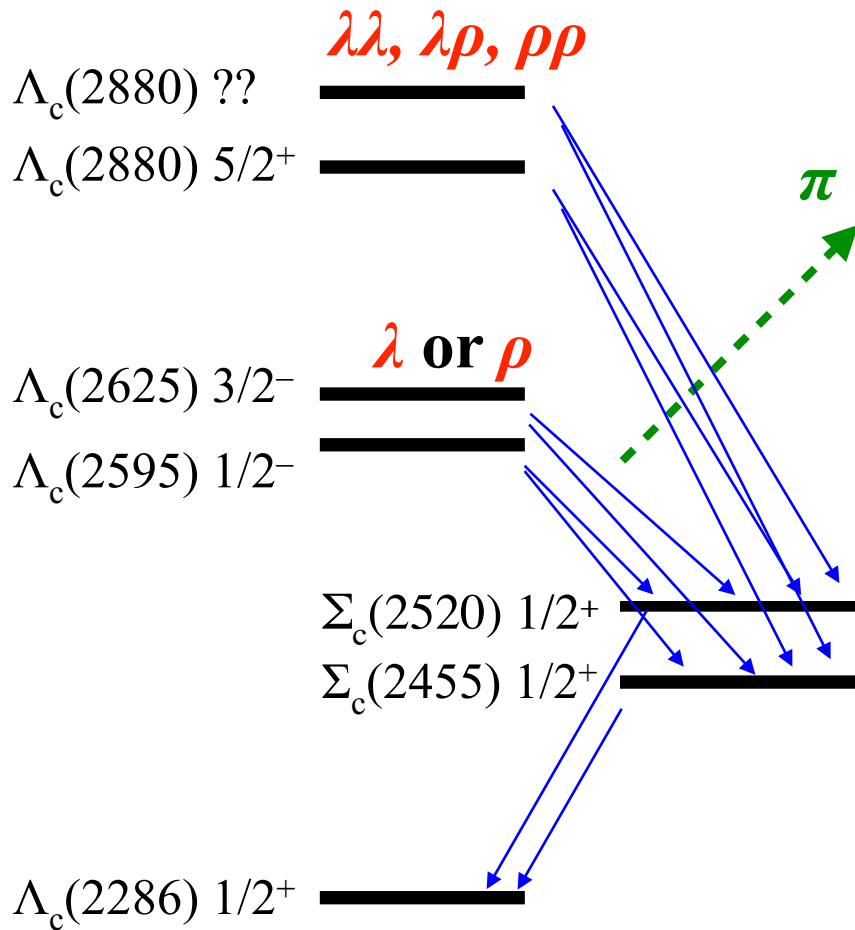
$\Lambda_c(2880) ??$   $\lambda\lambda, \lambda\rho, \rho\rho$   
 $\Lambda_c(2880) 5/2^+$                      

$\Lambda_c(2625) 3/2^-$   $\lambda$  or  $\rho$   
 $\Lambda_c(2595) 1/2^-$                      

$\Sigma_c(2520) 1/2^+$                        
 $\Sigma_c(2455) 1/2^+$   $gs$

$\Lambda_c(2286) 1/2^+$   $gs$

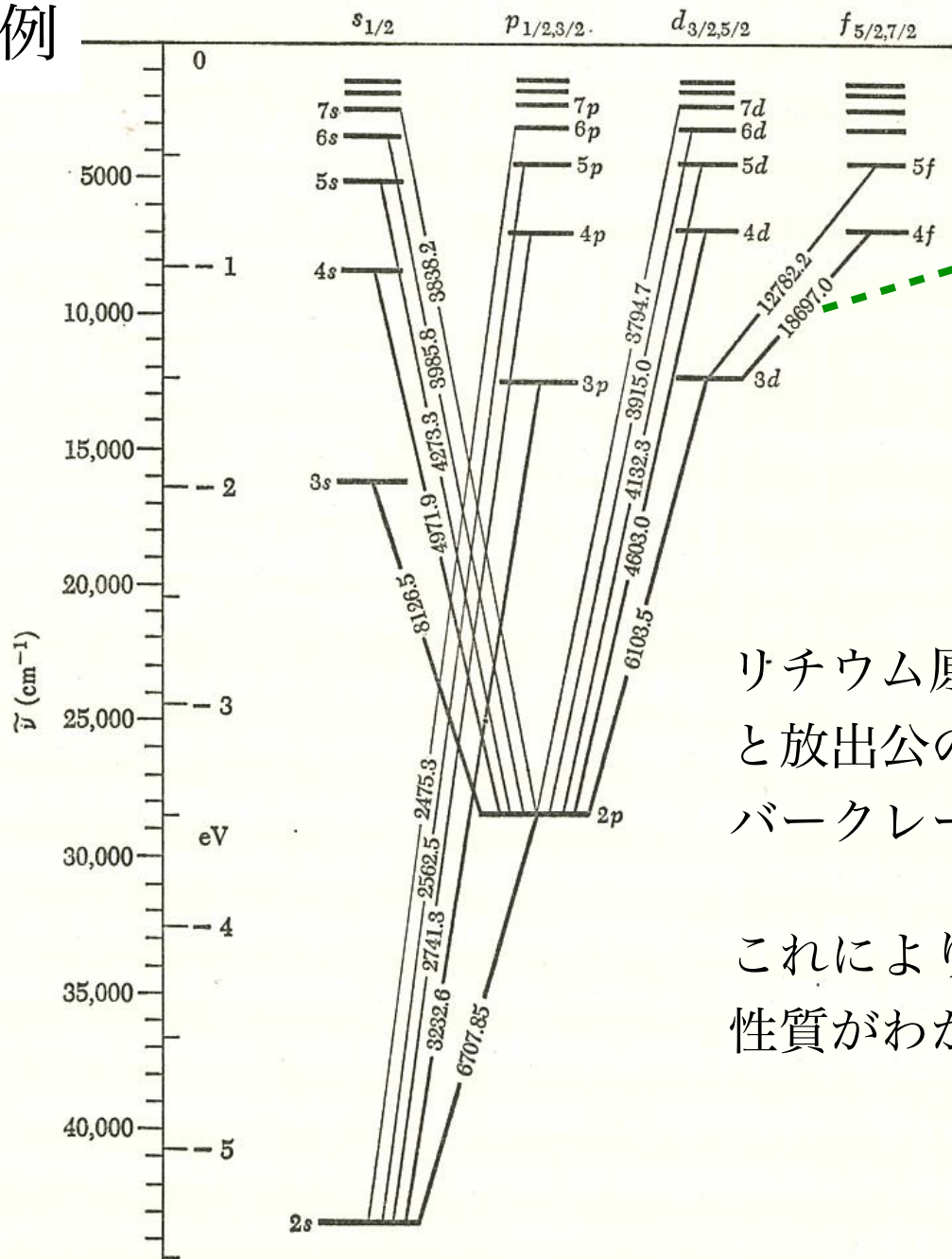
# 励起状態の崩壊＝共鳴の減衰



(1), (2)の遷移は  
 $\lambda$ モード励起で説明可  
 (3)の遷移から $\Lambda_c(2880)$ の  
 量子数を予言できる  
 $J^P = 7/2^-$

閉じ込められたクォークの  
 運動を予想し、実験と比較

# 分光図の例



光を放出

リチウム原子のエネルギー準位  
と放出光の波長  
バークレー物理学教程より

これにより励起（共鳴）準位の  
性質がわかる

## (2) $L = 1 \rightarrow L = 0$

$\Lambda_c(2595) 1/2^-$

	decay channel	full	$[\Sigma_c \pi]^+$	$\Sigma_c^{++} \pi^-$	$\Sigma_c^0 \pi^+$	$\Sigma_c^+ \pi^0$
Experiments	(MeV) [5]	$2.6 \pm 0.6$	-	<u>0.624 (24%)</u>	<u>0.624 (24%)</u>	-
Momentum	$q$ (MeV/c)	-	-	†	†	29
$(n_\lambda, \ell_\lambda), (n_\rho, \ell_\rho)$	$J_\Lambda(j)^P$					
(0, 1), (0, 0) $\lambda$	$1/2(1)^-$	$1.5-2.9$	<u>0.13-0.25</u>	<u>0.15-0.28</u>	<u>1.2-2.4</u>	
(0, 0), (0, 1) $\rho$	$1/2(0)^-$	0	0	0	isospin violated	
	$1/2(1)^-$	$6.5-11.9$	0.57-1.04	0.63-1.15	5.3-9.7	

- Total decay width is explained by the  $\lambda$  mode,  $\Gamma(\lambda) < \Gamma(\rho)$
- Isospin violation should be confirmed

# (3) $L = 2 \rightarrow L = 0$

$\Lambda_c(2880) 5/2^+$

$$R = \frac{\Gamma(\Sigma_c^*(3/2^+)\pi)}{\Gamma(\Sigma_c(1/2^+)\pi)}$$

decay channel	full	$[\Sigma_c^{(*)}\pi]_{\text{total}}$	$[\Sigma_c\pi]^+$	$[\Sigma_c^*\pi]^+$	$R$
Experimental value $\Gamma_{\text{exp}}$ (MeV)	$5.8 \pm 1.1$ [24]				0.225 [40]
momentum of final particle $q$ (MeV/c)			375	315	
$(n_\lambda, \ell_\lambda), (n_\rho, \ell_\rho)$	$J_\Lambda(j)^P$				
(0, 2), (0, 0)	$5/2(2)^+ \lambda\lambda$	11.2–26.1	1.2–2.8	9.9–23.3	8.1–8.4
(0, 0), (0, 2)	$5/2(2)^+ \rho\rho$	27.8–52.2	1.4–2.6	26.4–49.5	18.7–18.9
(0, 1), (0, 1)	$5/2(2)_2^+$	51.7–109.6	1.8–3.5	49.9–106.1	27.5–30.1
	$5/2(2)_1^+$	0.63–1.68	0	0.63–1.68	( $\infty$ )
	$5/2(3)_2^+$	2.9–5.8	2.1–4.0	0.85–1.73	0.41–0.43

- Both  $\Gamma$  and  $R$  ratio are sensitive to configurations
- Only  $\lambda\rho j = 3$  (*brown muck*) seems consistent. *Missing  $\lambda\lambda$  ??*
- This implies that  $\Lambda_c(2940)$  could be  $7/2^+$

# まとめと関連する話題

- エキゾチックハドロンは存在する
- 何がどのような仕組みで出来るかは未知が多い
- そこでチャームバリオンの研究が進められている

他の研究＝環境を変えて真空とハドロンの性質を変える

- 有限温度で相転移を起こす、RHICにおけるQGPの生成  
<http://www.riken.jp/pr/press/2010/20100216/>
- 有限密度中でカイラル対称性を回復させる  
[http://www.riken.jp/~media/riken/pr/press/2006/20061207\\_1/20061207\\_1.pdf](http://www.riken.jp/~media/riken/pr/press/2006/20061207_1/20061207_1.pdf)
- 京スーパーコンピュータを使った理論研究

様々な手法を用いてハドロンの成り立ちの研究が行われている



# ハドロンは

- ・構成クォークが支配している。
- ・その性質は環境（エネルギーや密度）によって変わる。  
質量や相互作用など

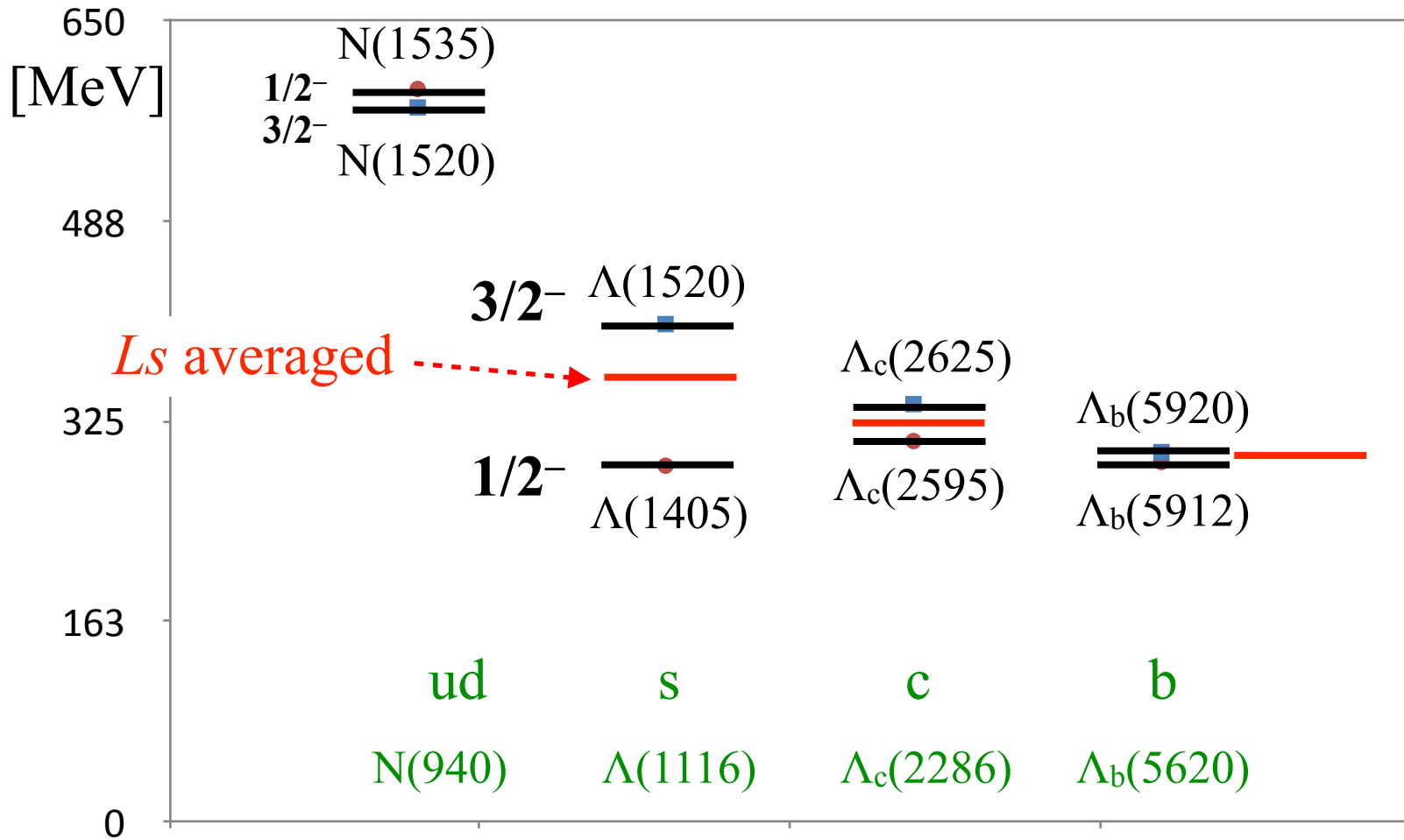
例えば：

水素原子や金原子（それらの励起状態）の電子の性質は変わらないと考えられるが、ハドロンの中の構成クォークの性質は変わる可能性がある。

従って：

それらを作って、性質を丹念に調べる必要がある。

# Excitation energies of $l = 1$



# Quark Model Calculations

Yoshida, Hiyama, Hosaka, Oka, Phys.Rev. D92 (2015) no.11, 114029

$$H = \frac{p_1^2}{2m_q} + \frac{p_2^2}{2m_q} + \frac{p_3^2}{2M_Q} - \frac{P^2}{2M_{tot}} + V_{conf}(HO) + V_{spin-spin}(Color - magnetic) + \dots$$

$\Lambda_c^*, \Sigma_c, \dots$

$$\Lambda_c(J^-; \lambda) = \left[ \left[ \psi_1(\vec{\lambda}) \psi_0(\vec{\rho}), d^0 \right]^1, \chi_c \right]^{J=\frac{1}{2}, \frac{3}{2}} D^0_c$$

Wave function: **Brown muck**  $\times$  Charm quark

$$j + 1/2 = J = j + -1/2$$

# prompt reactions in comparison with the deuteron

A.Guerrieri,F.Piccinini,A.Pilloni,A.Polosa Phys.Rev.D90(2014)034003.arXiv:1405.7929

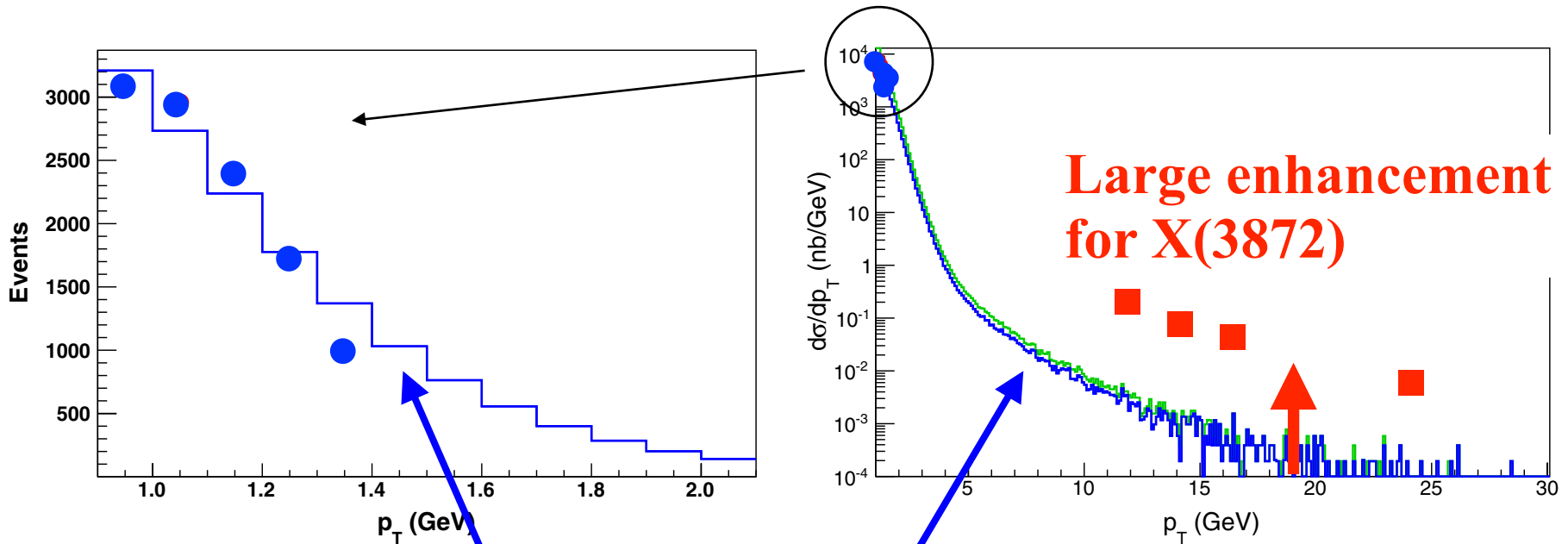


FIG. 6 (color online). Antideuteron events produced in  $pp$  according to  $10^9$  HERWIG events. We confront with ALICE deuteron production data (red circles) [23], and with CMS X(3872) data (green squares) [26]. The blue solid line is the MC prediction in the  $|\eta| < 0.9$  region, as in ALICE data, which we use for the normalization. The green line (a bit higher in the right panel) corresponds to the  $|\eta| < 1.2$  region, as in CMS data, and is normalized accordingly.

Simulations for the production of weakly bound state, Deuteron