### Hadron Physics Overview

Atsushi Hosaka RCNP, Osaka Univ.

Nov. 27-28, 2009 新学術領域 「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」 キックオフ会議

Nov 27-28, 2009

新ハドロンキックオフ

1

### なにを目指すのか

#### 電磁気学の確立, T.D. Lee

- マックスウエルの理論によっ て光の本質とそれが電磁気的な 現象であることが理解できた
- 全ての現代情報機器の開発が 可能になった
- 、、、相対論へと発展し量子
   力学の基礎を築いた、、、
- 前人未踏の領域に大きな一歩 を踏み出す、、、知的報酬、、

## なにを目指すのか

#### 電磁気学の確立, T.D. Lee

- マックスウエルの理論によっ て光の本質とそれが電磁気的な 現象であることが理解できた
- 全ての現代情報機器の開発が 可能になった
- 、、、相対論へと発展し量子
   力学の基礎を築いた、、、
- 前人未踏の領域に大きな一歩 を踏み出す、、、知的報酬、、

#### QCDの確立

- QCDによって物質形成の本質
   がクォークとグルーオンの現象
   であることが理解できた
- 全ての\*\*\*\*の開発が可能
   になった
- 、、、\*\*論へと発展し\*\*
   力学の基礎を築いた、、、
- 前人未踏の領域に大きな一歩 を踏み出す、、、知的報酬、、

# Quantum ChromoDynamics $L_{QCD} = \sum_{f} \overline{\psi}_{f} (iD - m_{f}) \psi_{f} + \frac{tr}{4} F_{\mu\nu}^{2}$ *Not easy to solve*

#### Millennium Problems of Clay math inst.

In order to celebrate mathematics in the new millennium, The Clay Mathematics Institute of Cambridge, Massachusetts (CMI) has named seven Prize Problems. . ... The Board of Directors of CMI designated a \$7 million prize fund for the solution to these problems, with \$1 million allocated to each. ....

> Mass generation, Color confinement and Spontaneous breakdown of chiral symmetry

### Strong interaction



 $m_e \sim 500,000 \text{ eV}$  $E_B \sim 1 \text{ eV}$ 

 $E_{\rm int}$  / Mass ~ 1 / 100000

Perturbation works well

Nuclei

 $m_N \sim 1,000 \text{ MeV}$  $E_B \sim 10 \text{ MeV}$   $E_{\rm int}$  / Mass ~ 1 / 100

Perturbation is NOT perfect

Hadrons



 $m_q \sim 10 \text{ MeV}$  $E_{\text{int}} \sim 300 \text{ MeV}$ (Light flavors)

### 質量生成からハドロンの構造と相互作用まで ハドロンは構造を持つ: クォークとグルーオン ハドロン形成の機構 質量の起源 現在の宇宙 初期の宇宙 ハドロンの世界 クォークの世界

#### 我が国の理論研究

- *π*中間子の発見と核力の理解(湯川)
- ・カイラル対称性の自発的破れ(南部)
- ・クォーク模型による分光・相互作用
- ・有限温度・密度でのハドロン物質

実験施設の稼働とユニークなデータ・ 新粒子の発見を基盤にした研究 量子色力学から標準模型への発展 多体系の多様性の追求

### **最近の成果**

- カイラル対称性とクォーク動力学
- ・エキゾチック粒子の反応・構造
- ・質量・相互作用の起源と変化

"マルチ"クォークのダイナミックス







#### 計画研究E01の研究内容と組織









QCDから現象を再現 現象の予言

Nov 27-28, 2009

### QCD複合系としてのハドロン、質量生成

- 標準としてのクォーク模型
- カイラルダイナミックスに基づいた相互作用

対称性の自発的な破れとその回復=>質量生成

- ハドロン分子の生成と固有な状態との混合
   =>励起状態の理解
- マルチクォーク系の様々な相関(挑戦的な課題)

# クォーク模型から ハドロンの動力学まで

Nov 27-28, 2009

新ハドロンキックオフ

11

#### 構成クォーク模型によるハドロン分光

SU(6)クォーク模型(+chiral meson)の成功~現象論

状態の分類、質量、電磁・強・弱結合(F/D比)

#### 構成クォーク模型によるハドロン分光

SU(6)クォーク模型(+chiral meson)の成功~現象論

状態の分類、質量、電磁・強・弱結合(F/D比)

Takayama-Toki-Hosaka, PTP101 (1999) 1271-1283.

\*\*\*\*, \*\*\* uds baryons



#### Magnetic moments of octet baryons

	<i>SU</i> (3)	SU(3)fit	QM SU(6) Exp		
р	$F + \frac{D}{3}$	2.56	2.79	$2.793 \pm 0.000$	
п	$-\frac{2}{3}D$	-1.60	-1.86	$-1.913 \pm 0.000$	
$\Sigma^+$	$F + \frac{D}{3}$	2.56	2.79	$2.458 \pm 0.010$	
$\Sigma^{0}$	$\frac{D}{3}$	0.80	0.93	_	
$\Sigma^{-}$	$-F + \frac{D}{3}$	-0.97	-0.93	$-1.160 \pm 0.025$	
Λ	$-\frac{D}{3}$	-0.80	-0.93	$-0.613 \pm 0.004$	
$\Sigma^0 - \Lambda$	$\Lambda = \frac{D}{\sqrt{3}}$	1.38	1.61	$\pm 1.61 \pm 0.08$	
$\Xi^0$	$-\frac{2}{3}D$	- 1.60	-1.86	$-1.250 \pm 0.014$	
Nov <sup>王</sup>	$-F + \frac{D}{3}$	-0.97	-0.93	$-0.651 \pm 0.003$	

14

#### Lattice calculation for mBB

Erkol-Takahashi-Oka, Phys.Rev.D79:074509,2009. arXiv:0805.3068[hep-lat]



### 軽い構成クォークは構成子とみなせる?

Nov 27-28, 2009

#### 問題

- Spin-flavor対称性、構成クォークの起源
- 励起状態=何が励起するのか



- 構成クォーク間の有効(残留)相互作用
- 散乱状態まで含めた5体系計算
- Nov 格子QCDによるマルチクォーク系の解析

16

重いフレーバー

udsMass m = 1.5 to 3.3 MeVMass m = 3.5 to 6.0 MeVMass  $m = 105 + 25 \\ Mass m = 105 + 25 \\ M$ 

 $\begin{array}{c} c \\ m = 1.27 \substack{+0.07 \\ -0.11} \text{ GeV} \end{array} \begin{array}{c} b \\ m = 4.20 \substack{+0.17 \\ -0.07} \text{ GeV} \end{array} \begin{array}{c} t \\ m = 171.3 \pm 1.1 \pm 1.2 \text{ GeV} \end{array}$ 

Strong interactionが作り出す質量~数百MeV =>軽いクォークでは大きい 重いクォークでは小さい

重いクォークの領域では裸のクォークがいい自由度

Nov 27-28, 2009

### 重いクォークは構成子とみなせる?

Heavy quark hadrons

Jonathan L. Rosner, e-Print: hep-ph/0606166, AIP Conf. Proc. 870: 63-83, 2006





Nov 27-28, 2009

### ハドロンの構造~中間子の動力学

現象論的なシナリオ カイラル対称性の自発的な破れ=>NGボソンの出現 =>低エネルギー現象を支配=>バリオンの構造に反映 パイオンの雲、スキルミオン

QCDからのシナリオ Large-Nc極限 ~ 弱く相互作用する中間子理論 バリオンはソリトン解

ゲージ/重力対応 適当なブレインの配置により5次元のゲージ理論に帰着 4次元に射影し様々なハドロン(中間子)モードを生成

Nov 27-28, 2009

#### クォーク模型では記述しにくい現象

- 中性子の電荷半径  $\langle r^2 \rangle_n = (-0.113 \pm 0.003 \pm 0.004) \, \text{fm}^2$
- 核子スピン  $\left\langle \sum \sigma_z(n) \right\rangle = 0.33 \pm 0.03 \pm 0.05$

ハドロンの有効理論では中間子の雲によって説明できる



### カイラル対称性の自発的な破れ が引き起こす動力学

質量生成 =>カイラル対称性の部分的な回復

#### NGボソンの動力学 ハドロンの異状構造の形成

軽いフレーバー <=> 重いフレーバー

Nov 27-28, 2009



Nov 27-28, 2009

Exotic hadron resonances Θ<sup>+</sup>, Λ(1405), ..., X(3872), Z<sup>+</sup>(4430), etc *Pentaquarks Hadronic molecule Tetraquarks* 



Key question:

What multiquark configurations are possible?

Exotic hadron resonances Θ<sup>+</sup>, Λ(1405), ..., X(3872), Z<sup>+</sup>(4430), etc *Pentaquarks Hadronic molecule Tetraquarks* 



Key question:

What multiquark configurations are possible?





Meson-baryon molecule Colorless correlation



### **Example in Nuclear Physics**



#### Charmonium



28

#### Hadronic Molecule



- Relatively large, 1 fm or larger
- Small momentum transfer



カイラルダイナミックス、格子QCD

Nov 27-28, 2009

X(3872) 
$$J^{PC} = 1^{++}$$
  $DD* 分子?$   
ユニークな位置  $D^{+}D^{*-(3880)}$  Small phase space  $J/\psi \omega(3879)$   
X(3872.3)  $D^{0}D^{*0}(3871.8)$   $J/\psi \rho(3871.6)$   
Large phase space

アイソスピン? I = 0, or isospin breaking

$$\frac{Br(X(3872) \to \pi^+ \pi^- \pi^0 J/\psi)}{Br(X(3872) \to \pi^+ \pi^- J/\psi)} = 1.0 \pm 0.4 \pm 0.3$$

Nov 27-28, 2009

新ハドロンキックオフ

30

#### Gammerman et al, ArXiv:0911.4407 Dynamically generated model ~ hadronic molecule

$$\sum_{\substack{\text{SU(4) extension of}\\ \text{Chiral interaction}}} SU(4) = V + VG(\sqrt{s})T(\sqrt{s})$$
*a*-parameter

This needs renormalization => Genuine state

Takizawa et al

ccbar + DD\* coupled channel

Core of I = 0 Source of isospin violation

### 相互作用の問題



しかし、π交換も存在(NG->Vの様な場合)安井-須藤



長距離、強い力 テンソル力 チャンネル結合により引力

Nov 27-28, 2009

### Dynamically generated Resonances

Hadron-Hadron scatterings  $\rightarrow$  Molecular state

Hyodo, Jido, Hosaka Phys.Rev.C78:025203,2008. e-Print: arXiv:0803.2550 [nucl-th]

基底状態と カイラル相互作用を基盤にした散乱問題 <sup>理論的に確立した</sup> ハドロン相互作用

ハドロン励起状態の起源を探る = ハドロン分子 + 固有(クォーク)のもの

Nov 27-28, 2009

#### **Example: Large-Nc**



34

### **Determination of the T-matrix**

Dispersion theory, N/D method *Solving the LS equation* 

$$T(\sqrt{s}) = V + VG(\sqrt{s})T(\sqrt{s})$$

**Required conditions:** 

- 1. Renormalization of  $G \Rightarrow a$ -parameter
- 2. Natural  $a_{natural}$  for molecular state
- 3. Deviation of *a* from  $a_{natural}$  is absorbed in V

Consider KN ( $\Lambda(1405)$ ) system

Nov 27-28, 2009

### Input V: WT interaction

$$L = \operatorname{tr}(\overline{B}iDB) + \dots$$

$$D_{\mu}B = \partial_{\mu}B + \left[\frac{1}{2}(\partial_{\mu}\xi^{\dagger}\xi + \partial_{\mu}\xi\xi^{\dagger}), B\right] \qquad \xi = \exp(i\phi/2)$$
$$L_{WT} = \frac{1}{4f_{\pi}^{2}}\operatorname{tr}\overline{B}i\gamma^{\mu}[\phi\partial_{\mu}\phi - \partial_{\mu}\phi\phi, B] \sim \underbrace{\frac{\sqrt{s} - M}{2f_{\pi}^{2}}\overline{B}B\phi\phi}_{2f_{\pi}^{2}}$$

Piont like

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\Sigma^{0}}{\sqrt{2}} + \frac{\Lambda}{\sqrt{6}} & \Sigma^{+} & p \\ \Sigma^{-} & -\frac{\Sigma^{0}}{\sqrt{2}} + \frac{\Lambda}{\sqrt{6}} & n \\ \Xi^{-} & \Xi^{0} & -\frac{2}{\sqrt{6}}\Lambda \end{pmatrix} \qquad \phi = \begin{pmatrix} \frac{\pi^{0}}{\sqrt{2}} + \frac{\eta}{\sqrt{6}} & \pi^{+} & K^{+} \\ \pi^{-} & -\frac{\pi^{0}}{\sqrt{2}} + \frac{\eta}{\sqrt{6}} & K^{0} \\ K^{-} & \overline{K}^{0} & -\frac{2}{\sqrt{6}}\eta \end{pmatrix}$$

Nov 27-28, 2009

### **Loop function**

$$G(\sqrt{s}) \sim i \int \frac{d^4 q}{\left(2\pi\right)^4} \frac{2M}{\left(P-q\right)^2 - M^2 + i\varepsilon} \frac{1}{q^2 - m^2 + i\varepsilon}$$

G is divergent for the *contact interaction*  $V_{WT}$ 

$$\begin{split} G(\sqrt{s}) = & \frac{2M_T}{(4\pi)^2} \Big\{ \underline{a(\mu)} + \ln \frac{M_T^2}{\mu^2} + \frac{m^2 - M_T^2 + s}{2s} \ln \frac{m^2}{M_T^2} \\ & + \frac{\bar{q}}{\sqrt{s}} [\ln(s - (M_T^2 - m^2) + 2\sqrt{s}\bar{q}) - \ln(-s + (M_T^2 - m^2) + 2\sqrt{s}\bar{q}) \\ & + \ln(s + (M_T^2 - m^2) + 2\sqrt{s}\bar{q}) - \ln(-s - (M_T^2 - m^2) + 2\sqrt{s}\bar{q})] \Big\} \end{split}$$



## Determination of *natural a*<sub>natural</sub>

### (1) Natural G

T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka, Phys.Rev.C78:025203,2008; arXiv:0803.2550 [nucl-th]



For 
$$M < \sqrt{s} < M + m$$
  
 $G(\sqrt{s}) < 0$  Natural *G*

Nov 27-28, 2009

#### (2) Boundary condition (matching)

$$T(\sqrt{s} = M) = V_{WT}$$



### When $a_{\text{pheno}} \neq a_{\text{natural}}$ How to interpret the difference

$$G(\sqrt{s},a) = \frac{2M_T}{(4\pi)^2} \left\{ \underline{a(\mu)} + \ln \frac{M_T^2}{\mu^2} + \frac{m^2 - M_T^2 + s}{2s} \ln \frac{m^2}{M_T^2} + \dots \right\}$$
$$G(\sqrt{s}, a_{pheno}) = G(\sqrt{s}, a_{natural}) + \frac{2M}{2s} \left( a_{pheno} - a_{natural} \right)$$

$$G(\sqrt{s}, a_{pheno}) = G(\sqrt{s}, a_{natural}) + \frac{2m}{(4\pi)^2} \left(a_{pheno} - a_{natural}\right)$$
$$= G(\sqrt{s}, a_{natural}) + \Delta A$$

$$T(\sqrt{s})_{pheno} = \frac{1}{V_{WT}^{-1} - G(\sqrt{s}, a_{pheno})} = \frac{1}{V_{WT}^{-1} + \Delta A - G(\sqrt{s}, a_{natural})}$$

Nov 27-28, 2009

### Modify the interaction



$$M_{\text{eff}} \equiv M_T - \frac{16\pi^2 f^2}{CM_T \Delta a}.$$

- The deviation from the natural value (different a) is absorbed into the interaction as a pole term
  (1) of mass M<sub>eff</sub> and (2) of higher order
- If  $\Delta a$  is small (close to natural),  $M_{\text{eff}} \rightarrow$  large  $\Delta a$  is large (different from natural),  $M_{\text{eff}} \sim M_{\text{T}}$

Nov 27-28, 2009

### **Realistic case**



### Subtraction constants

TABLE I: Natural values and phenomenological values [43] for the subtraction constants with the regularization scale  $\mu =$  $M_i$ .

Λ(1405)	S = -1	$\bar{K}N$	$\pi\Sigma$	$\eta\Lambda$	$K\Xi$
	$a_{\mathrm{pheno},i}$	-1.042	-0.7228	-1.107	-1.194
	$a_{\text{natural},i}$	-1.150	-0.6995	-1.212	-1.138
	S = 0	$\pi N$	$\eta N$	$K\Lambda$	$K\Sigma$
N*(1535)	$a_{\mathrm{pheno},i}$	1.509	-0.2920	1.454	-2.813
	$a_{\text{natural},i}$	-0.3976	-1.239	-1.143	-1.138

For S =-1 (~ $\Lambda(1405)$ ),  $a_{\text{pheno}}$  and  $a_{\text{natural}}$  are similar but For S = 0 (~N(1535)), they are very much different

### Poles



▲ Dynamically generated (=  $V_{WT}$  + Natural *G*)

+ Phenomenological

Nov 27-28, 2009

### Natural schemeとの比較

力学的に生成される状態と、固有の状態を判定 することができる

現実の共鳴はその重ね合わせ

その内訳はそれぞれ(力学的vs固有)の性質と 結合の強さによる

それらを理論的に変化させることで共鳴の性質を探る ことができるであろう。

Nov 27-28, 2009

#### まとめと今後

- まずはクォーク模型での考察は便利
- カイラルダイナミックスの重要性
   対称性の自発的な破れ=>NGボソンの出現
- ハドロン分子の形成
   重要なインプット=>ハドロン間相互作用 強さ、エネルギー依存性 チャンネル結合 フレーバーの破れ

ハドロン相関

 マルチクォーク系におけるカラー相関 高エネルギー反応、破砕関数で探る?



#### 関連 す る meeting

#### HNP09 11/16(Mon) - 19(Thu) 阪大

新ハドロン旗あげ、総括班主催研究会 11/27(Fri) - 28(Sat)、名古屋

ストレンジネス・新ハドロン(理論)合同研究会 12/11(Fri) - 12/12(Sat)、阪大

NFQCD 2/1(Mon) - 2/18(Thu)基研