

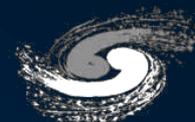


中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

d^* 结构研究

沈彭年

合作者：张宗焯、董宇兵、黄飞、吕齐放



- I、 什么是 d^* —— 实验结果
- II、 可能的理论解释
- III、 d^* 是否具有 $6q$ 为主的结构
- IV、 结论



I、什么是 d^* —— 实验结果

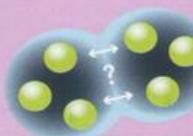
INTERNATIONAL JOURNAL OF HIGH-ENERGY PHYSICS

CERN COURIER

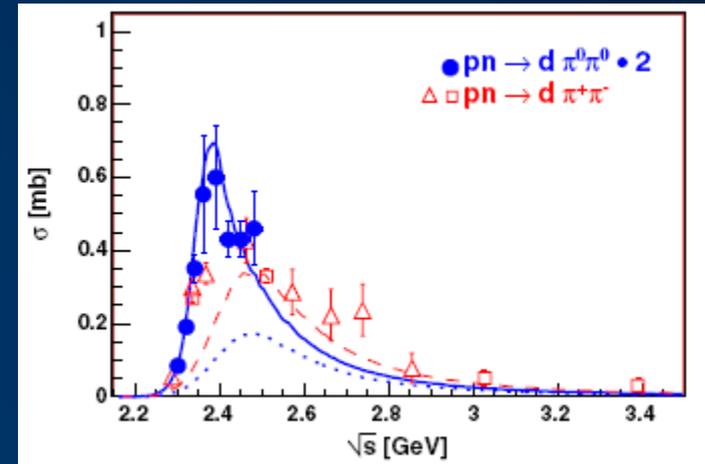
VOLUME 54 NUMBER 6 JULY/AUGUST 2014

Experiments at the Jülich Cooler Synchrotron (COSY) have found compelling evidence for a new state in the two-baryon system, with a mass of 2380 MeV, width of 80 MeV and quantum numbers $I(J^P) = 0(3^+)$. The structure, containing six valence quarks, constitutes a dibaryon, and could be either an exotic compact particle or a hadronic molecule. The result answers the long-standing question of whether there are more eigenstates in the two-baryon system than just the deuteron ground-state. This fundamental question has been awaiting an answer since at least 1964, when first Freeman Dyson and later Robert Jaffe envisaged the possible existence of non-trivial six-quark configurations.

EXOTICS
COSY's new evidence for a six-quark state



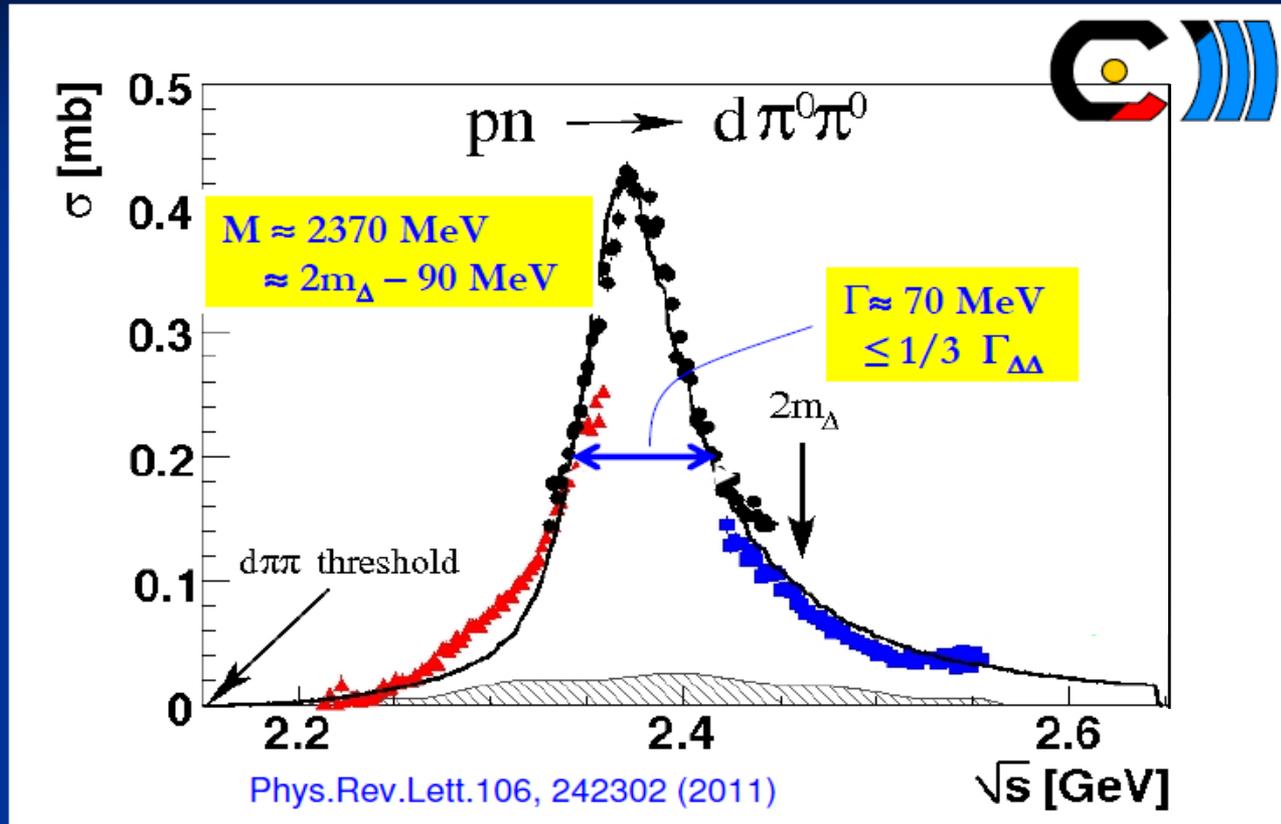
PRL 112 (2014) 202301



Experiments at the Jülich Cooler Synchrotron (COSY) have found compelling evidence for a new state in the two-baryon system, with a mass of 2380 MeV, width of 80 MeV and quantum numbers $I(J^P) = 0(3^+)$.



The d^* Resonance $I(J^P) = 0(3^+)$



$$M_{\Delta N\pi} = 2310 \text{ MeV}$$

$$M_{d^*} \approx 2380 \text{ MeV}$$

$$M_{\Delta\Delta} = 2464 \text{ MeV}$$

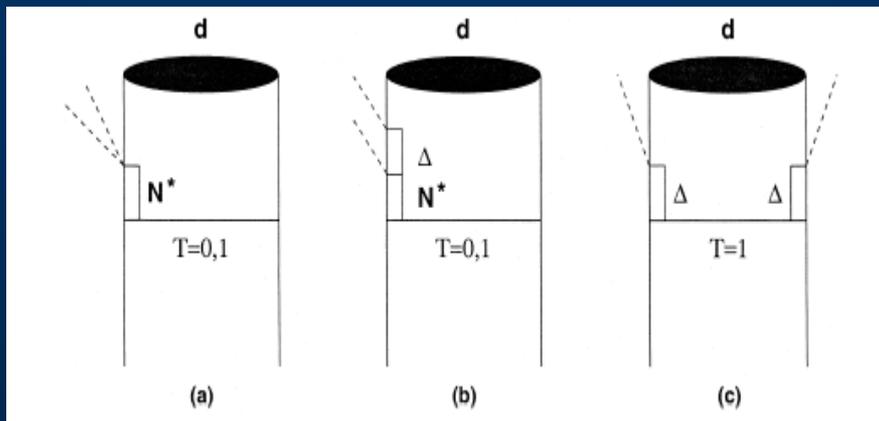
$$\Gamma_{d^*} \approx 70 \text{ MeV}$$

Fusion 2π 产生过程

$pd \rightarrow p_{\text{spectator}} d \pi^0 \pi^0$ 的可能物理解释

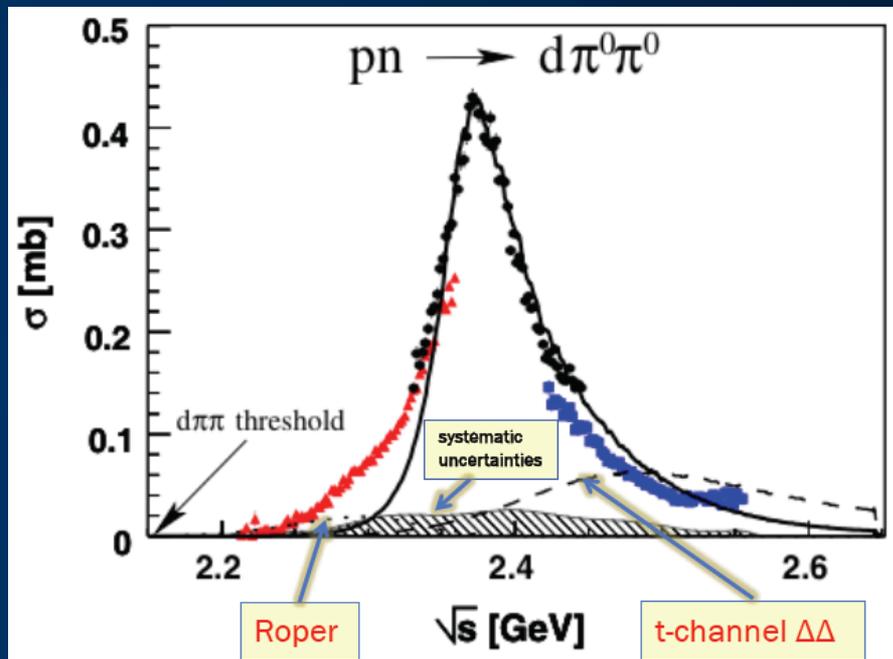


中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

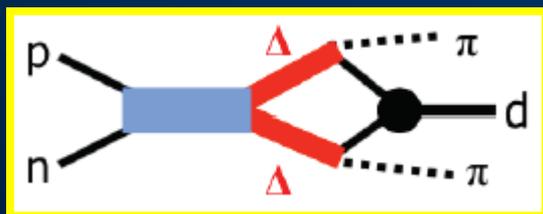


WASA-at-COSY

PRL106(2011)242302



是否存在 $\Delta\Delta$ 共振态的可能?



$$I(J^P) = 0(3^+)$$

$$M \approx 2380 \text{ MeV}$$

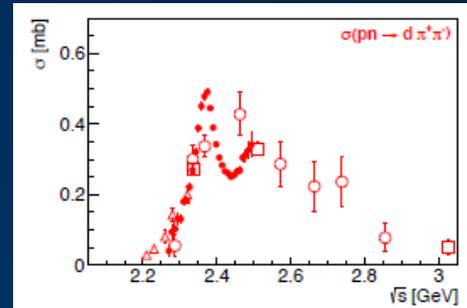
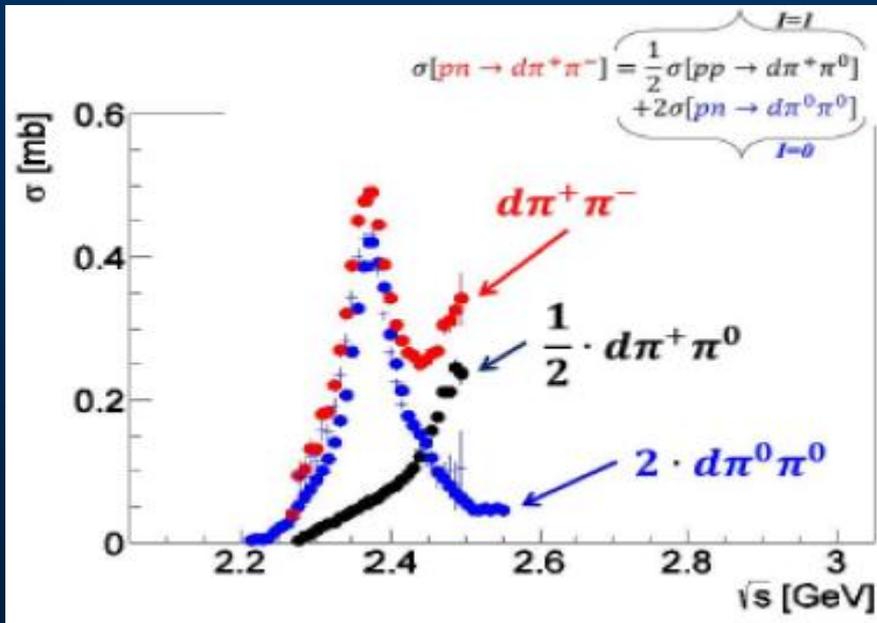
$$\Gamma \approx 70 \text{ MeV}$$



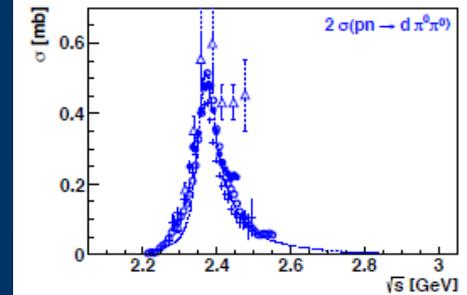
Isospin



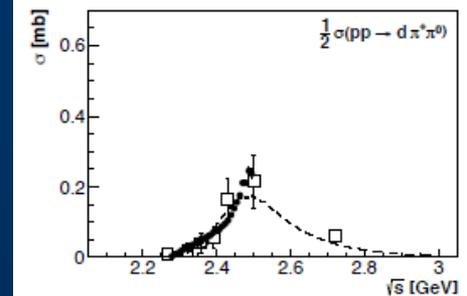
PLB 721 (2013) 229



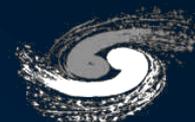
Mixed



Scalar



Vector



其它fusion 2π 产生过程

Measured also in fusion reactions
to helium isotopes:





Non-fusion 2π 产生过程

$$pn \rightarrow pn\pi\pi$$

PRC 88 (2013) 055208

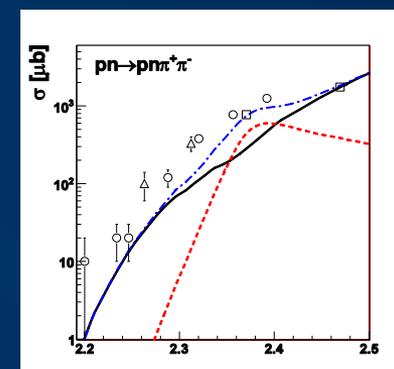
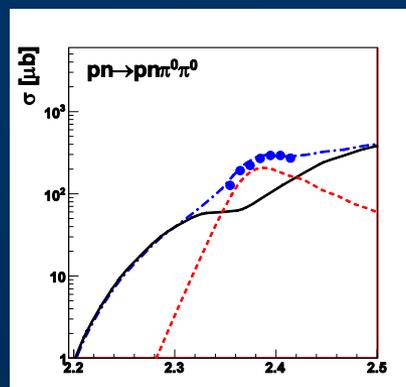
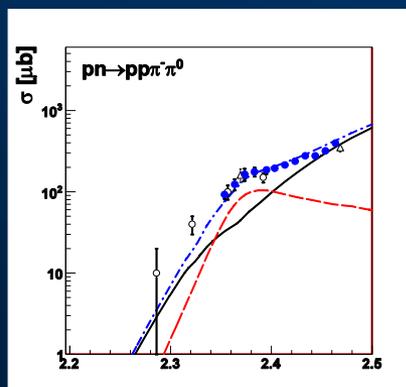
PLB 743 (2015) 325

Proc. STORI 2015

$$pn \rightarrow pp\pi^-\pi^0$$

$$pn \rightarrow pn\pi^0\pi^0$$

$$pn \rightarrow pn\pi^+\pi^-$$

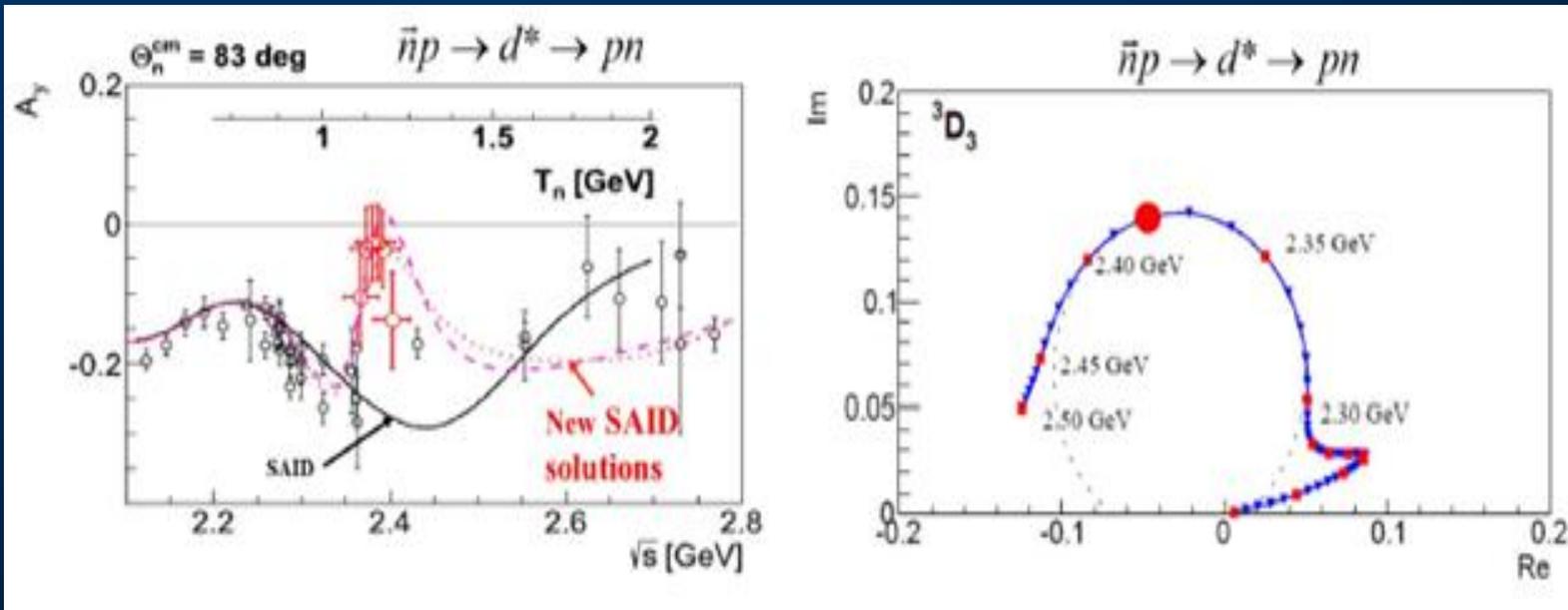


Scattering 过程



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

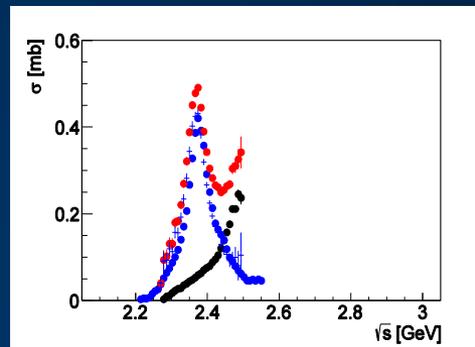
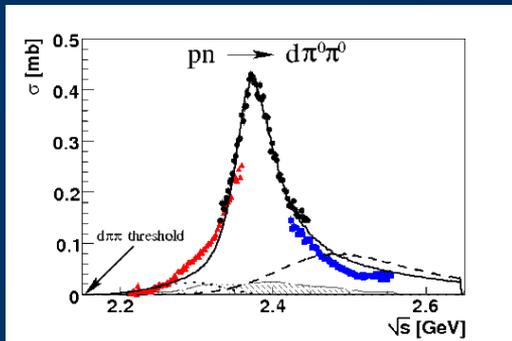
$pn \rightarrow pn$



d^* 的强衰变

PRL 106 (2011) 242302

●●● WASA data



PLB 721 (2013) 229

$pn \rightarrow d^*(2380)$

$d\pi^0\pi^0$

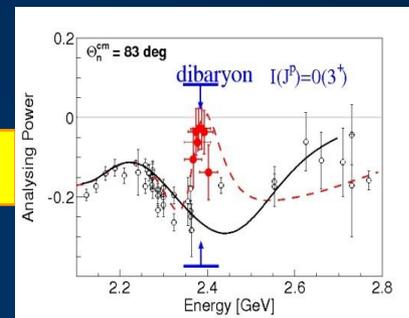
$d\pi^+\pi^-$

pn

$pp\pi^-\pi^0$

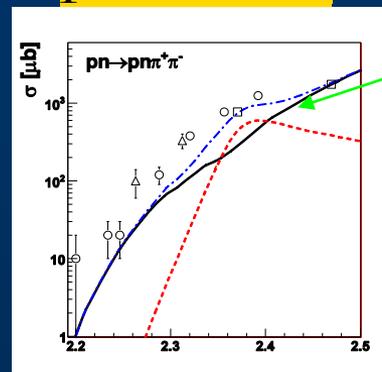
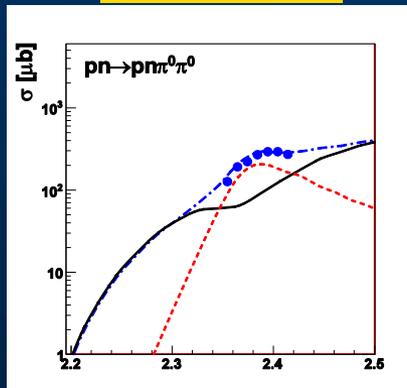
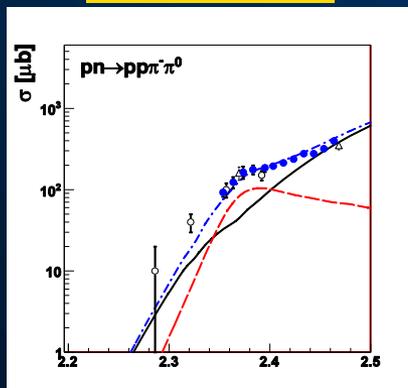
$pn\pi^0\pi^0$

$pn\pi^+\pi^-$



PRL 112 (2014) 202301

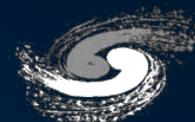
HADES



PRC 88 (2013) 055208

PLB 743 (2015) 325

Proc. STORI 2015



$d^*(2380)$ 的尺度

P.R.L.103(2009)162001

$$r \approx \frac{\hbar c}{\sqrt{2m\epsilon}}$$

d^* 的结合能约为 80 MeV



d^* 的 rms 约为 0.5fm

可能具有非常compact 的结构



We conclude from such observations that d^* must be of an unconventional origin, possibly indicating a genuine six-quark nature. With the predominant decay of d^* being $d^* \rightarrow \Delta\Delta$ ($BR(d^* \rightarrow \Delta\Delta)/BR(d^* \rightarrow pn) = 9:1$), one could naively expect d^* to be a so-called a "deltaron" denoting a deuteron-like bound state of two Δ s. However, the narrow width of d^* contradicts this simple assumption. A deltaron would need to have 90 MeV binding energy, i.e. 45 MeV per Δ , which would lead to a reduction of width from $\Gamma_{\Delta\Delta} = 230$ MeV to $\Gamma_{\Delta\Delta} = 160$ MeV, using the known momentum dependence of the width of the Δ resonance. This is more than twice what is observed.

自由的 $\Delta\Delta$ 的宽度: $\Gamma_{\Delta\Delta} = 230\text{MeV}$

束缚能为 90MeV 的 $\Delta\Delta$ 的宽度: $\Gamma_{\Delta\Delta} = 160\text{MeV}$

所以可以认为 现在观察到的 d^* must be of an unconventional origin, 可能显示具有 6q 性质。



BashkanovBrodskyClement ansatz

According to M. Harvey [66] there are only two possible quark structures for an $I(J^P) = 0(3^+)$ resonance in the two-baryon system:

$$|\Psi_{d^*}\rangle = \sqrt{\frac{1}{5}}|\Delta\Delta\rangle + \sqrt{\frac{4}{5}}|6Q\rangle \quad \text{and}$$

$$|\Psi_{d^*}\rangle = \sqrt{\frac{4}{5}}|\Delta\Delta\rangle - \sqrt{\frac{1}{5}}|6Q\rangle.$$

Here $\Delta\Delta$ means the asymptotic $\Delta\Delta$ configuration and $6Q$ is the genuine “hidden color” six-quark configuration. The first solution denotes a S^6 quark structure (all six quarks in the S-shell), the second one a S^4P^2 configuration (4 quarks in the S-shell and 2 quarks in the P-shell). The quark structure with the large $\Delta\Delta$ cou-



d^* 不寻常的特点

- d^* 质量介于 $\Delta\Delta$ 阈和 $\Delta N\pi$ 阈之间
阈效应影响相对小

- d^* 宽度很小

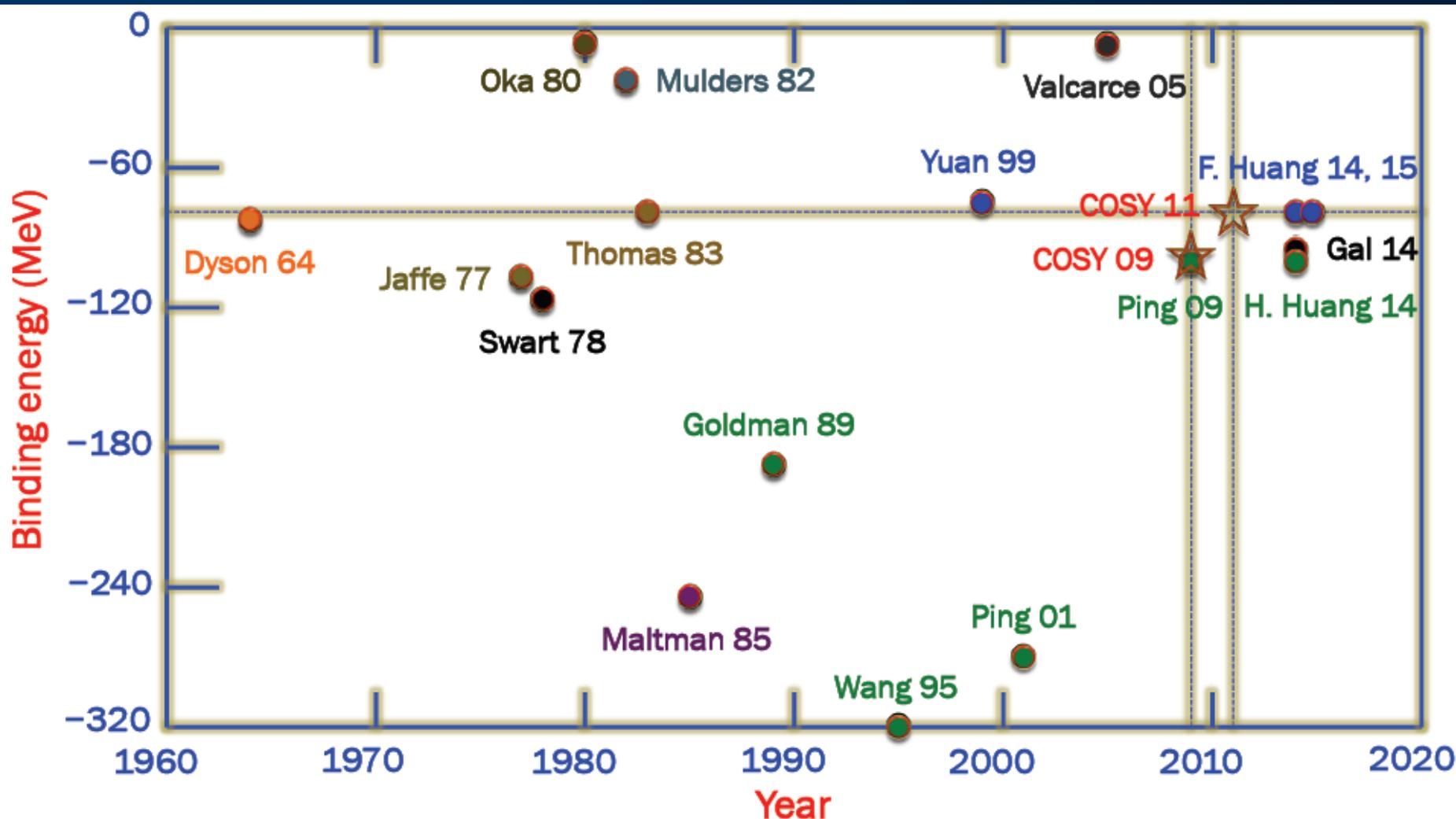
与常规强子结构的差距很大

—————> 意味着可能存在 $6q$ 结构

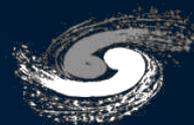
II、可能的理论解释



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



09年实验发现之前 (与实验值相近的预言)



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

• 对称性分析

J. Dyson, PRL 13, 815 (1964)

根据两个重子系统的 $SU(6)$ 分类

反对称的 490 维表示里, 非奇异的态只有

$$(I, J) = (3, 0)(2, 1)(1, 0)(1, 2)(0, 1)(0, 3) \quad 6 \text{ 个态}$$

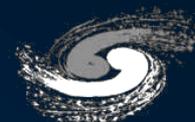
Casimir 算子给出的质量公式为

$$M = A + B' (T(T+1)) + B'' (J(J+1))$$

假定 $B' = B'' = B$, 拟合氘核的质量 1876 MeV , 得到 A ,

$$\text{若取 } B = 50 \text{ MeV, 则 } M_{d^*} = 2376 \text{ MeV}$$

不足: 非动力学的估算



• 云袋模型

A.W.Thomas, JPG 9,1159 (1983)

Table 2. Masses of the non-strange ($Y=2$) dibaryons in the original MIT bag-model calculation (Jaffe 1977, Aerts *et al* 1978) (A) and in the present calculation including pionic corrections (B).

I	S	Δ	Σ	A		B	
				$R(\text{GeV}^{-1})$	$M(\text{GeV})$	$R(\text{GeV}^{-1})$	$M(\text{GeV})$
0	1	$\frac{3}{2}$	-76	6.60	2.16	6.41	2.18
1	0	2	-76	6.68	2.23	6.45	2.24
1	2	4	-52	6.79	2.35	6.52	2.36
0	3	4	-36	6.79	2.35	6.52	2.38
2	1	$\frac{5}{2}$	-52	6.93	2.50	6.61	2.46
3	0	12	-36	7.19	2.79	6.78	2.69

不足：氘核的结合能为2.18 GeV

- 手征 $SU(3)$ 夸克模型

X.Q.Yuan, Z.Y.Zhang, Y.W.Yu, P.N.Shen, PRC 60, 045203 (1999)

$\Delta\Delta + CC$ 结构

- √ 模型参数符合了NN 散射、YN截面、氦核结合能等实验数据
- √ 动力学计算了 $d^*(\Delta\Delta + CC (IS=03))$ 系统的结合能

- 预言: d^* 的结合能

$BE \cong 40-80 \text{ MeV} [SU(3)]$

(现在的实验结果: 84 MeV)

- 结论: CC 道很重要, 可以增加约 20 MeV 的结合能。

- 不足: 没有计算波函数和宽度。

TABLE III. Deltaron binding energy $B(\text{MeV})$ with different parameters. $B = -(E_{\text{deltaron}} - 2M_{\Delta})$.

	$(\Delta\Delta + CC) (L=0+L=2)$			
$B(\text{OGE} + \pi, \sigma)$	79.7	97.1	97.9	113.4
$B[\text{OGE} + SU(3)]$	37.3	64.2	52.4	79.2
$b_N(\text{fm})$	0.505	0.60	0.505	0.60
$m_{\sigma}(\text{MeV})$	625	625	550	550



09年实验发现之后的解释

- **6q 为主的结构（夸克层次）**

- * **Argument**

M.Bashkanov, S.J.Brodsky, H.Clement, PLB727,438(2013)

- * **$\Delta\Delta+CC$ 结构解释**

arXiv: 1408.0458 [nucl-th] (CPC 39 (2015) 071001)

SCIENCE CHINA 59 (2016) 622002

PRC 91 (2015) 064002

arXiv: 1603.08748 [hep-ph], PRC 94, 014003 (2016)

结合能、波函数、衰变宽度的计算



• $\Delta\Delta$ +耦合道的结构 (夸克层次)

J.L.Ping, F.Wang et al. PRC 89, 034001 (2014)

采用 ChQM 模型 (考虑了包括了隐色道的 10 个道)

$IJ^P = 03^+$	1	2	3	4		
	$\Delta\Delta(^7S_3)$	$NN(^3D_3)$	$\Delta\Delta(^3D_3)$	$\Delta\Delta(^7D_3)$		
	5	6	7	8	9	10
	$^2\Delta_8\ ^2\Delta_8(^3D_3)$	$^4N_8\ ^4N_8(^3D_3)$	$^4N_8\ ^2N_8(^3D_3)$	$^2N_8\ ^2N_8(^3D_3)$	$^4N_8\ ^4N_8(^7S_3)$	$^4N_8\ ^4N_8(^7D_3)$

BE= 71 MeV $\Gamma = 150$ MeV

采用 QDCSM 模型 (考虑了4 个道)

$\Delta\Delta^7S_3, NN^3D_3, \Delta\Delta^3D_3, \Delta\Delta^7D_3$

BE= 107 MeV $\Gamma = 110$ MeV

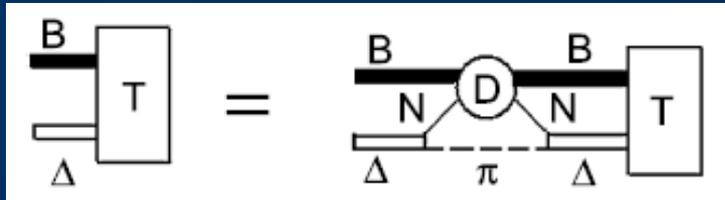
TABLE III. $\Delta\Delta$ or resonance mass M and decay width Γ , in MeV, in two quark models for the $IJ^P = 03^+$ state.

	QDCSM		ChQM		
	sc	4 cc	sc	4 cc	10 cc
M	2365	2357	2425	2413	2393
Γ_{NW}	—	14	—	14	14
Γ_{inel}	103	96	177	161	136
Γ	103	110	177	175	150



• $\Delta N \pi$ 三体束缚态结构 (π 辅助的 $D_{12} \pi$ 强子模型)

A. Gal et al. NPA 928, 73(2014) 中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



$B = \Delta'$ (无宽度 Δ)

a). 将 $\Delta' N$ 看作 $NN\pi$ 的三体系统:

$N\pi$ 作用取 $P33$ 道的分离势 (Δ'), NN 作用取分离势,
求解三体 Faddeev 方程, 得到 $\Delta' N$ 相互作用势,

D_{12} 极点: $(2165 \sim 2174) - i(64 \sim 60) \text{ MeV}$

b). 将 $\Delta' \Delta$ 看作 $\Delta' N \pi$ 的三体系统:

$\Delta' N$ 作用取 a) 的解, $N\pi$ 作用同上, 略去 $\Delta\pi$ 作用
求解三体 Faddeev 方程, 得到 $\Delta' N \pi$ 共振态

$$\begin{aligned} M_{\Delta' N \pi} &= 2383 \text{ MeV} & \Gamma &\cong 82 \sim 94 \text{ MeV} \\ M_{\Delta' N \pi} &= 2343 \text{ MeV} & \Gamma &\cong 48 \sim 62 \text{ MeV} \end{aligned}$$

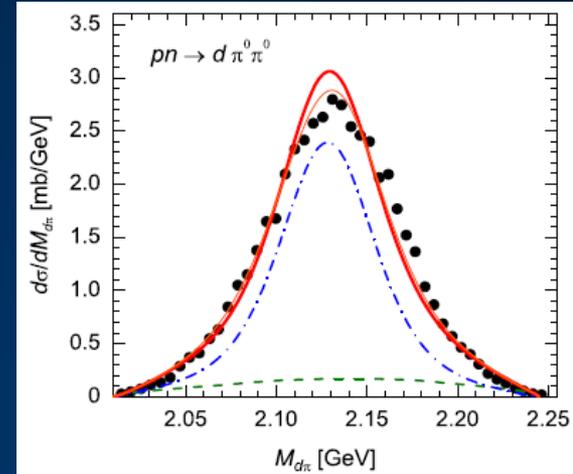
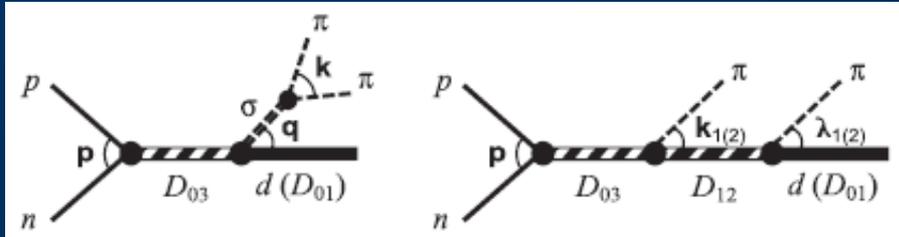
$$m_{\Delta} = (1211 + i X 49.5) \text{ MeV}$$

其中 $X = 1$ 或 $2/3$



- $d\sigma$ 和 $D_{12}\pi$ 强子模型

V. Kukulín et al. PRC87,025208(2013)
 Institute of High Energy Physics
 Chinese Academy of Sciences
 NPA 946,117(2016)



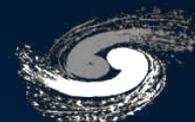
- QCD 求和规则 (6q)

H.X.Chen, PRC 91, 025204 (2015)

$$M_{d^*} = 2.4 \pm 0.2 \text{ GeV}$$

- LQCD 计算

.....



III、 d^* 是否具有 $6q$ 为主的结构

- 研究工具 —— 手征SU(3)夸克模型

q-q 相互作用势

$$V_{ij} = V_{ij}^{\text{conf}} + V_{ij}^{\text{OGE}} + V_{ij}^{\text{ch}} + V_{ij}^{\text{chv}}$$

$$V_{ij}^{\text{ch}} = \sum_a (V_{ij}^{\text{s(a)}} + V_{ij}^{\text{ps(a)}})$$

相互作用拉氏量

$$\mathcal{L}_I = -g_{ch} \bar{\Psi} \left(\sum_{a=0}^8 \sigma_a \lambda_a + i \sum_{a=0}^8 \pi_a \lambda_a \gamma_5 \right) \Psi$$



6q 系统的哈密顿量

$$H = \sum_{i=1}^6 t_i - T_{\text{CM}} + \sum_{i < j=1}^6 V_{ij}$$

模型参数

(1) 输入部分的参数

$$b_u = 0.45 - 0.5 fm, \quad m_u = 313 MeV$$

(2) 手征场部分的参数

$$\frac{g_{\text{ch}}^2}{4\pi} = \frac{9}{25} \frac{m_u^2}{M_u^2} \frac{g_{\text{NN}\pi}^2}{4\pi}, \quad m_\sigma \text{ 为可调参数}$$

(3) OGE 和 conf 部分的参数

g_u 由 $M_\Delta - M_N$ 确定

a_{cu} 由 N 的稳定性条件确定



b_u, m_σ 通过拟合 NN 系统的实验数据确定

$$BE_d^{exp't} = 2.22 \text{ MeV}$$

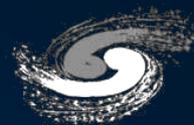
		SU(3)	Ext. SU(3) (f/g=0)	Ext. SU(3) (f/g=2/3)
Deuteron Binding energy(MeV)		2.09	2.24	2.20
Fraction of Wave Function (%)	NN (L=0)	93.68	94.66	94.71
	NN (L=2)	6.32	5.34	5.29

$$b_u = 0.5 \text{ fm}$$

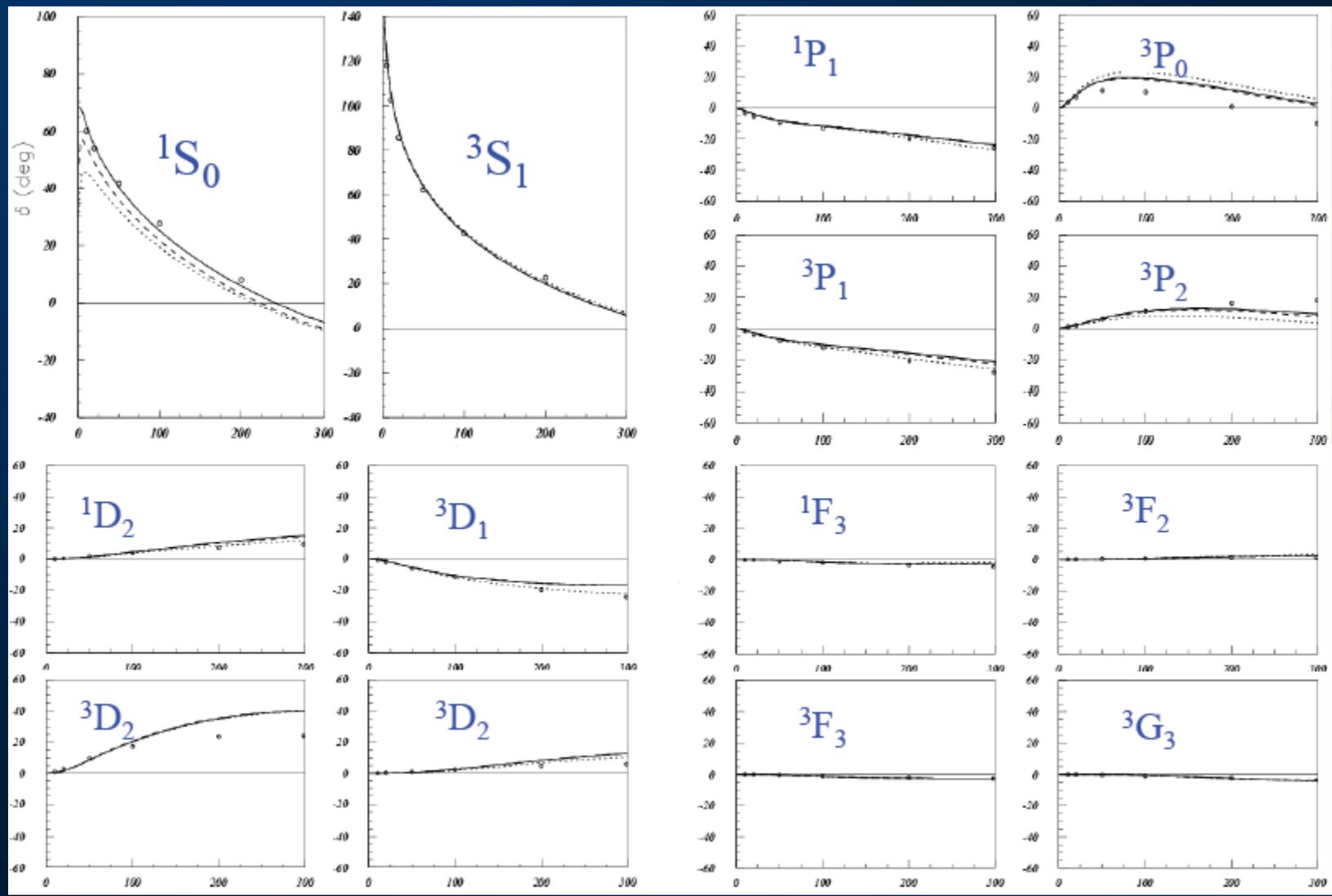
$$b_u = 0.45 \text{ fm}$$

$$m_\sigma = 595 \text{ MeV}$$

$$m_\sigma = 535 \sim 547 \text{ MeV}$$



NN 散射相移





- 在RGM方法中试探波函数为:

$$\Psi_{6q} = \mathcal{A} [\phi_{\Delta}(\xi_1, \xi_2) \phi_{\Delta}(\xi_4, \xi_5) \eta_{\Delta\Delta}(\mathbf{r}) + \phi_C(\xi_1, \xi_2) \phi_C(\xi_4, \xi_5) \eta_{CC}(\mathbf{r})]_{S=3, I=0, C=(00)} \cdot$$

$$\Delta: (0s)^3 [3]_{\text{orb}}, S = 3/2, I = 3/2, C = (00),$$

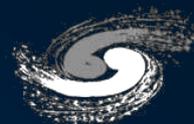
$$C: (0s)^3 [3]_{\text{orb}}, S = 3/2, I = 1/2, C = (11),$$

\mathcal{A} : 表示全反对称化算符

ϕ : 表示集团内部波函数

η : 表示相对运动波函数, 通过求解RGM方程得到

$\mathcal{A} = 1 - 9P_{36}$, P_{36} : 为两个集团之间的两个 q 间的交换算符



● 强子化

这个波函数的表达式中有**夸克交换算符**，各项都不正交。

$$\Psi_{6q} = \begin{matrix} \text{(1)} & \text{(2)} \\ \downarrow & \downarrow \\ \mathbf{1} - \mathbf{9P}_{36} & \mathbf{1} - \mathbf{9P}_{36} \\ \uparrow & \uparrow \\ \text{(3)} & \text{(4)} \end{matrix} [\phi_{\Delta} \phi_{\Delta} \eta_{\Delta\Delta}(\mathbf{r})]_{\text{SIC}=30(00)} + [\phi_{\text{C}} \phi_{\text{C}} \eta_{\text{CC}}(\mathbf{r})]_{\text{SIC}=30(00)}$$

用**投影方法**对夸克内部坐标积分（或称**强子化的方法**），得到**等效相对运动波函数**（即：**道波函数**）

$$\chi_{\Delta\Delta}(\mathbf{r}) \equiv \langle \phi_{\Delta}(\xi_1, \xi_2) \phi_{\Delta}(\xi_4, \xi_5) | \Psi_{6q} \rangle,$$

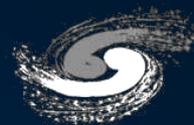
包括 (1) (2) (4) 项

$$\chi_{\text{CC}}(\mathbf{r}) \equiv \langle \phi_{\text{C}}(\xi_1, \xi_2) \phi_{\text{C}}(\xi_4, \xi_5) | \Psi_{6q} \rangle,$$

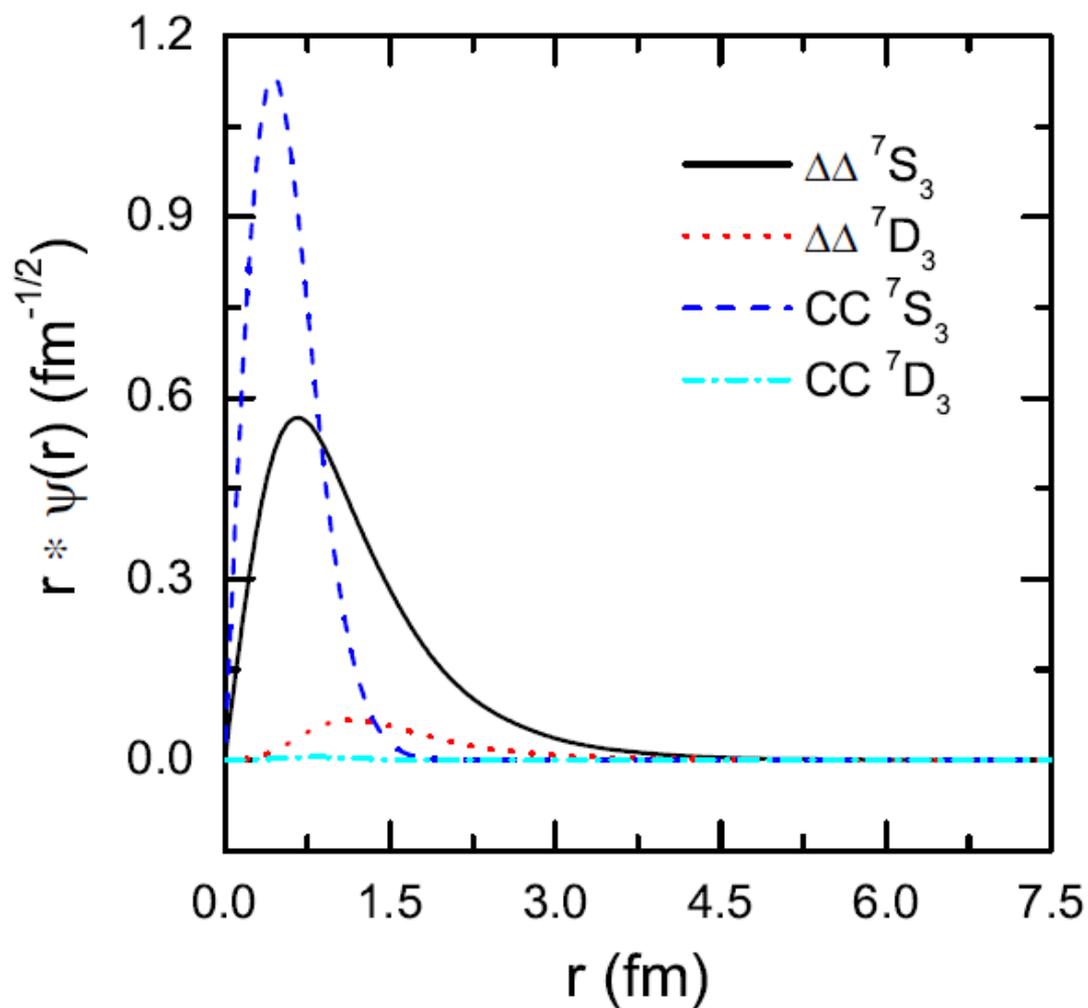
包括 (3) (4) (2) 项

$$\Psi_{d^*} = |\Delta\Delta\rangle \chi_{\Delta\Delta}(\mathbf{r}) + |\text{CC}'\rangle \chi_{\text{CC}}(\mathbf{r})$$

$\chi_{\Delta\Delta}$ 和 χ_{CC} 相互正交
且包含了夸克交换效应



d^* 的波函数





● 结合能和相对运动波函数

用严格符合 NN 实验数据的参数，计算了 d^* 的结合能、各个道的相对运动波函数。

		SU(3)		Ext. SU(3) (f/g=0)		Ext. SU(3) (f/g=2/3)	
		$\Delta\Delta$ (L=0,2)	$\Delta\Delta$ -CC (L=0,2)	$\Delta\Delta$ (L=0,2)	$\Delta\Delta$ -CC (L=0,2)	$\Delta\Delta$ (L=0,2)	$\Delta\Delta$ -CC (L=0,2)
d^* Binding Energy(MeV)		28.9	47.9	62.3	83.9	47.9	70.3
Fraction of Wave Function (%)	$\Delta\Delta$ (L=0)	97.18	33.11	98.01	31.22	97.71	32.51
	$\Delta\Delta$ (L=2)	2.82	0.62	1.99	0.45	2.29	0.51
	CC (L=0)	0	66.25	0	68.33	0	66.98
	CC (L=2)	0	0.02	0	0.00	0	0.00

$$BE_{d^*}^{\text{exp't}} = 84\text{MeV}$$



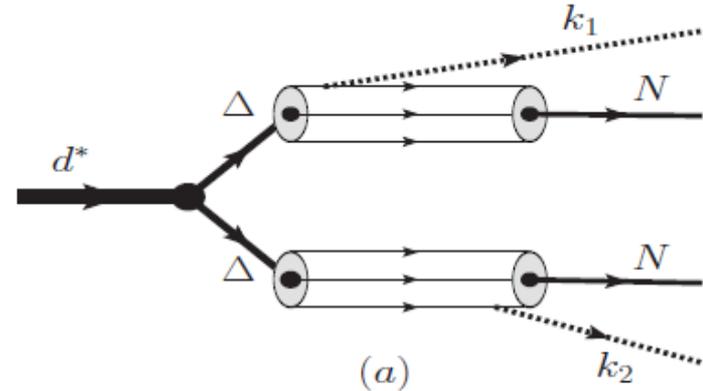
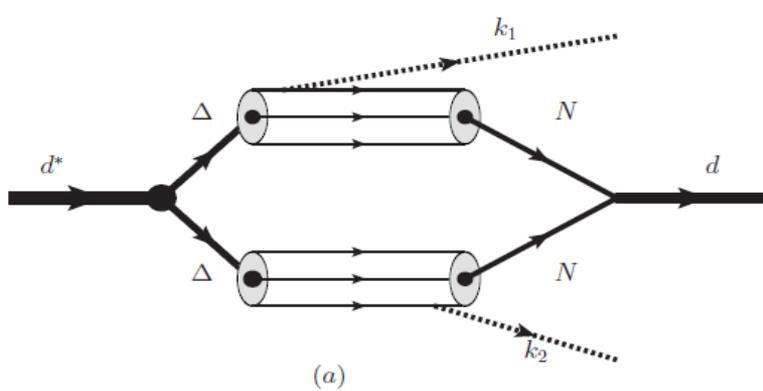
d^* 的衰变宽度

$$d^* \rightarrow d\pi^0\pi^0 \quad (d\pi^+\pi^-)$$

$$d^* \rightarrow np\pi^0\pi^0 \quad (np\pi^+\pi^-)$$

$$d^* \rightarrow pp\pi^-\pi^0$$

$$d^* \rightarrow nn\pi^0\pi^+$$



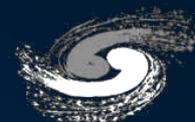
Simon Capstick, PRD46,2864

$qq\pi$ 相互作用

$$\mathcal{H}_{qq\pi} = g_{qq\pi} \vec{\sigma} \cdot \vec{k}_\pi \tau \cdot \phi \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{2\omega_\pi}},$$

$\Delta \rightarrow N\pi$ 顶角耦合常数和形状因子

$$\Gamma_{\Delta \rightarrow \pi N} = \frac{4}{3\pi} k_\pi^3 (g_{qq\pi} I_0)^2 \frac{\omega_N}{M_\Delta},$$

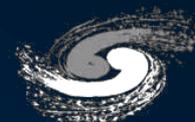


√ 三体衰变宽度

Y.B.Dong, et al., PRC 91 (2015) 064002

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{if}^{\pi^0\pi^0} \sim & \int d^3q \left[\frac{\chi_d^*(\vec{q} - \frac{1}{2}\vec{k}_{12})}{E_\Delta(q) - E_N(q - k_1) - \omega_1} \right. \\ & + \frac{\chi_d^*(\vec{q} + \frac{1}{2}\vec{k}_{12})}{E_\Delta(q) - E_N(q - k_2) - \omega_2} \\ & + \frac{\chi_d^*(\vec{q} + \frac{1}{2}\vec{k}_{12})}{E_\Delta(-q) - E_N(-q - k_1) - \omega_1} \\ & \left. + \frac{\chi_d^*(\vec{q} - \frac{1}{2}\vec{k}_{12})}{E_\Delta(-q) - E_N(-q - k_2) - \omega_2} \right] \chi_{d^*}(\vec{q}) \end{aligned}$$

$$\Gamma = \int \frac{1}{2!} d^3k_1 d^3k_2 d^3p_D 2\pi \delta^3(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{p}_D) \delta(E_{k_1} + E_{k_2} + E_{p_D}^D - M_{d^*}) |\overline{\mathcal{M}}_{if}|^2$$



√ 四体衰变宽度

Y.B.Dong, et al., PRC 49, 140003(2016)

$$\begin{aligned}\mathcal{M}^a(k_1, k_2; p_1) &= \int d^3 p_2 d^3 q \left[\mathcal{H} \mathcal{S}_f \mathcal{H} \right] \Psi_{d^*}(q) \delta^3(\vec{p}_1 + \vec{k}_1 - \vec{q}) \delta(\vec{p}_2 + \vec{k}_2 + \vec{q}) \\ &= \int d^3 p_2 \delta^3(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{k}_1 + \vec{k}_2) \left[\mathcal{H} \mathcal{S}_f \mathcal{H} \right] \psi_{d^*}(-\vec{p}_2 - \vec{k}_2)\end{aligned}$$

$$\Gamma_{d^* \rightarrow pn\pi^0\pi^0} = \frac{1}{2!2!} \int d^3 k_1 d^3 k_2 d^3 p_1 (2\pi) \delta(\Delta E) \left| \overline{\mathcal{M}(k_1, k_2; p_1)} \right|^2$$

四体末态中 **np** 的末态相互作用必须考虑



基于 BSE 在壳因子化形式

$$\overline{\mathcal{M}(k_1, k_2; p_1)} = \mathcal{M}^{bare}(k_1, k_2; p_1) \times \mathcal{I}$$

\mathcal{I} 是末态相互作用引起的增强因子，在 s 波近似下

$$\mathcal{I} \approx \mathcal{J}^{-1}(k) = \frac{k + i\alpha}{k - i\kappa}$$

把 Jost 函数近似联系到 $np \ ^3S_1$ 相移实验值

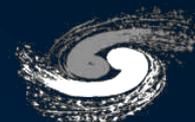
—— Watson-type 增强因子

$$\mathcal{I} \approx \mathcal{J}^{-1}(k) = C(k^2) \frac{\sin\delta e^{i\delta}}{k}$$

$$C(k^2) = \frac{k^2 + \alpha^2}{\alpha + \kappa}$$

$$\kappa^2 = 2\mu\epsilon_d$$

$$\alpha = 178.7 \text{ MeV}$$

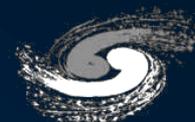


衰变宽度的计算结果

	Theor.(MeV)	Expt.(MeV)
$d^* \rightarrow d\pi^+\pi^-$	16.8	16.7
$d^* \rightarrow d\pi^0\pi^0$	9.2	10.2
$d^* \rightarrow pn\pi^+\pi^-$	20.6	21.8
$d^* \rightarrow pn\pi^0\pi^0$	9.6	8.7
$d^* \rightarrow pp\pi^0\pi^-$	3.5	4.4
$d^* \rightarrow nn\pi^0\pi^+$	3.5	4.4
$d^* \rightarrow pn$	8.7	8.7
Total	71.9	74.9

讨论:

* 各分宽度与实验数据一致



* 末态相互作用的效应约 26~30%

* 总宽度与实验数据一致

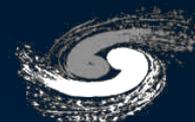
$$\Gamma^{exp't} = 70 \sim 75 \text{ MeV}$$

$$\Gamma^{th} \approx 72 \text{ MeV}$$

* 同位旋破缺与实验数据基本一致

$$\frac{\Gamma(d^* \rightarrow d\pi^+\pi^-)}{\Gamma(d^* \rightarrow d\pi^0\pi^0)} \sim 1.8 \quad (1.6, \quad 2.0)$$

$$\frac{\Gamma(d^* \rightarrow pn\pi^+\pi^-)}{\Gamma(d^* \rightarrow pn\pi^0\pi^0)} \sim 2.2 \quad (2.5, \quad 2.5)$$



- * 若 d^* 仅有 $\Delta\Delta$ 结构，其衰变宽度与实验数据相差甚远

$M_{d^*}(\text{MeV})$	(100%) $\Delta\Delta$	Expt
	2374	2375
Decay channel	$\Gamma(\text{MeV})$	$\Gamma(\text{MeV})$
$d^* \rightarrow d\pi^0\pi^0$	17.0	10.2
$d^* \rightarrow d\pi^+\pi^-$	30.8	16.7
Total	132.8	74.9

- * d^* 的窄宽度源自于波函数中有很大CC成分



分析：d* 中为什么有这么大的 CC (67%) 成分？

$$\Psi_{6q} = \begin{matrix} \text{(1)} & \text{(2)} \\ \downarrow & \downarrow \\ \mathbf{1} - \mathbf{9P}_{36} & \end{matrix} [\phi_{\Delta} \phi_{\Delta} \eta_{\Delta\Delta}(\mathbf{r})]_{\text{SIC=30(00)}} \\ + \begin{matrix} \mathbf{1} - \mathbf{9P}_{36} \\ \uparrow & \uparrow \\ \text{(3)} & \text{(4)} \end{matrix} [\phi_{\text{C}} \phi_{\text{C}} \eta_{\text{CC}}(\mathbf{r})]_{\text{SIC=30(00)}}$$

$$\chi_{\Delta\Delta}(\mathbf{r}) \equiv \langle \phi_{\Delta}(\xi_1, \xi_2) \phi_{\Delta}(\xi_4, \xi_5) | \Psi_{6q} \rangle,$$

包括 (1) (2) (4) 项

$$\chi_{\text{CC}}(\mathbf{r}) \equiv \langle \phi_{\text{C}}(\xi_1, \xi_2) \phi_{\text{C}}(\xi_4, \xi_5) | \Psi_{6q} \rangle,$$

包括 (3) (4) (2) 项

$$\Psi_{d^*} = |\Delta\Delta\rangle \chi_{\Delta\Delta}(\mathbf{r}) + |\text{CC}\rangle \chi_{\text{CC}}(\mathbf{r})$$

χ_{CC} 中有相当一部分来自(2)项，也就是 $\Delta\Delta$ 的交换项。

因此 \mathbf{P}_{36} 的特点十分重要！



$$P_{36} = P_{36}^r P_{36}^{sfc}$$

d^* 有两个基 $\Delta\Delta$ 和 CC

$\langle P_{36}^{sfc} \rangle$ 由 spin-flavor-color 空间对称性决定

	$(\Delta\Delta)_{SI=30}$	$(\Delta\Delta)_{SI=30}$	$(CC)_{SI=30}$
	$(\Delta\Delta)_{SI=30}$	$(CC)_{SI=30}$	$(CC)_{SI=30}$
$\langle P_{36}^{sfc} \rangle$	$-\frac{1}{9}$	$-\frac{4}{9}$	$-\frac{7}{9}$

但是它必须在 $\langle P_{36}^r \rangle \sim 1$ 时才起重要的作用

$\langle P_{36}^r \rangle$ 的大小是由动力学解的波函数决定的

在 d^* 的情况下,

由 OGE 和矢量介子 引起的等效 $\Delta-\Delta$ 相互作用,

在短程是吸引的

→ 使 $\Delta\Delta$ 靠近, $\langle P_{36}^r \rangle$ 就不会很小



1). d^* 的特殊的对称性

spin-flavor-color 空间夸克交换效应 —— 模型无关

2). $\Delta\Delta(1S=03)$, $\Delta-\Delta$ 间短程相互作用是吸引的

动力学的效应 —— 模型相关

P_{36} 的效应很大, d^* 中的 CC 成分很大

—————→ d^* 的 深束缚和窄宽度

d^* 可能是一个 $6q$ 为主的奇特态



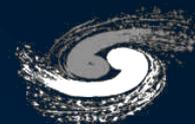
IV、结论

- d^* 的结构以隐色 CC 成分为主 ($\sim 66-68\%$)

$$M \approx 2380 \text{ MeV} \quad \Gamma \approx 72 \text{ MeV}$$

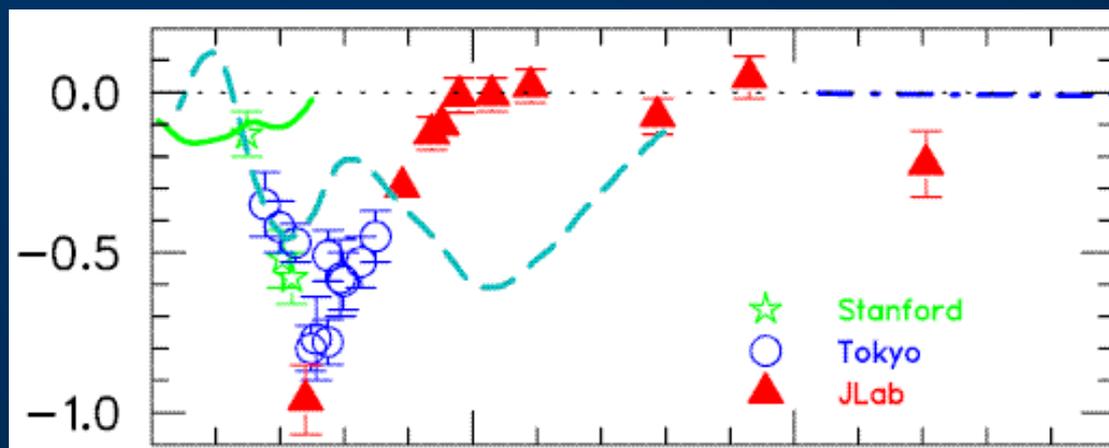
$$(M^{\text{exp't}} \approx 2380 \text{ MeV} \quad \Gamma^{\text{exp't}} \approx 70-75 \text{ MeV})$$

- 各种结构的鉴别



- d^* 的存在有待实验的进一步证实

其它实验上存在迹象 $\gamma d \rightarrow \vec{p}n$



德国 Mainz 已于今年6月开始 $\gamma d \rightarrow d^*$ 实验



其它可实验寻找的地方

$$e^+ + e^- \rightarrow \bar{d}^* + p + n$$

$$\Upsilon \rightarrow \bar{d} + d^*, \quad d + \bar{d}^*, \quad \bar{d}^* + d^*$$

$$\text{BR}(\Upsilon \rightarrow \bar{d} + X) \sim 2.86 \times 10^{-5}$$

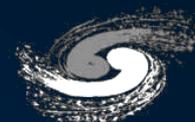
- 短程相互作用的研究

更为紧致的系统有利于短程相互作用的研究

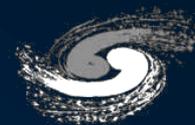
在 d^* 中

OGE (VM) 引起的等效 Δ - Δ 相互作用的短程部分都是吸引的

短程的 q - q 相互作用  单胶子交换 (OGE) ?
矢量介子交换 (VME) ?

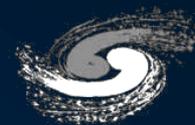


如果 d^* 在实验上得到进一步确认，那么我们相信这个图像应该是对的。不仅看到了 $6q$ 态，并且由此可以得到更多的关于短程作用的信息，因为这是目前仅有的一个短程吸引的系统。



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

谢 谢



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences