

物质最微观结构探寻

邹冰松

中国科学院理论物理研究所

提纲

- 一. 原子、原子结构、原子核结构
- 二. 核子的内部组元和基本粒子
- 三. 强子谱与强子结构前沿简介
- 四. 展望

一. 原子、原子结构、原子核结构

门捷列夫1871年的
化学元素周期表

与1906年的诺贝尔化学
奖失之交臂，于
1907年去世

Reihen	Gruppe I. — R ¹ O	Gruppe II. — R ² O	Gruppe III. — R ³ O ³	Gruppe IV. RH ⁴ R ⁴ O ⁴	Gruppe V. RH ⁵ R ⁵ O ⁵	Gruppe VI. RH ⁶ R ⁶ O ⁶	Gruppe VII. RH R ⁷ O ⁷	Gruppe VIII. — R ⁸ O ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Ca=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=86	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	— — — —
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —



卢瑟福 Ernest Rutherford (1871-1937)

原子物理、原子核物理、放射化学之父

1899年发现天然 α 射线-带电的氦原子

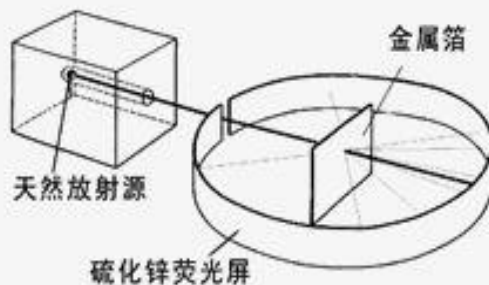
放射性元素放射 α 射线变成另一种元素

→ 1908年诺贝尔化学奖

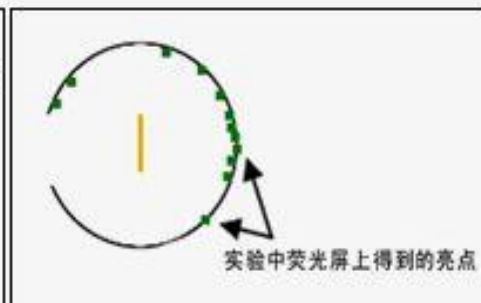
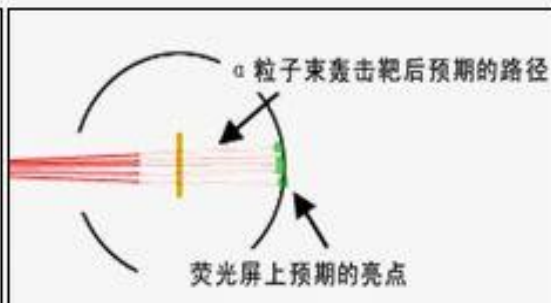
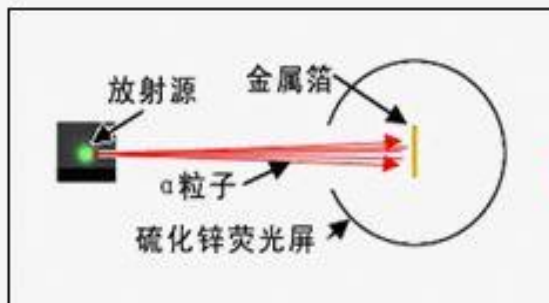
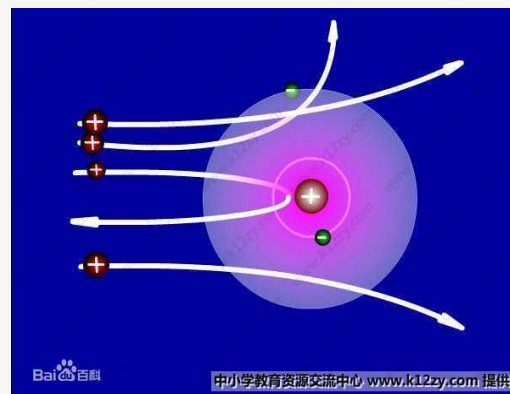
卢瑟福1911年发现原子核 → 原子 = 原子核 + 外围电子



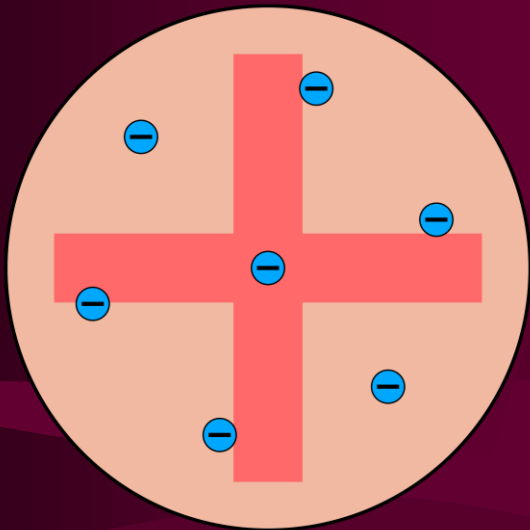
卢瑟福的实验装置



卢瑟福第一次人工核反应实验装置示意图



原子的布丁模型



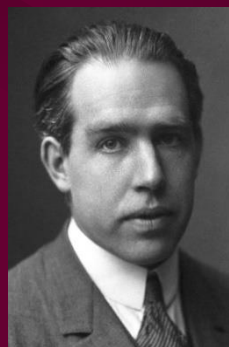
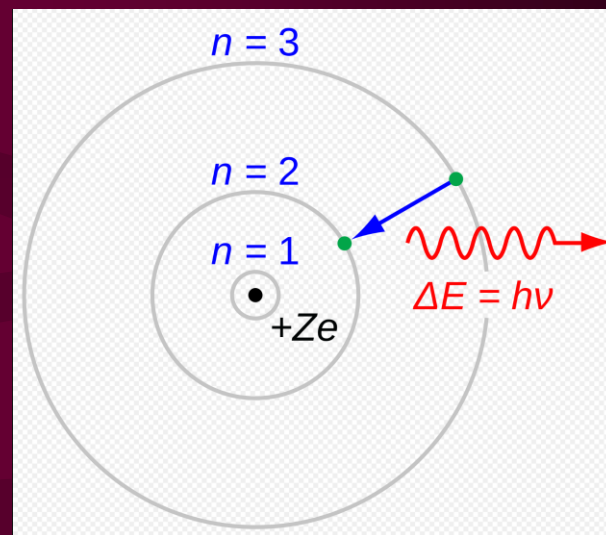
汤姆孙 J.J.Thomson

1897年发现电子

1906年诺贝尔物理奖

卢瑟福的导师

原子的玻尔模型



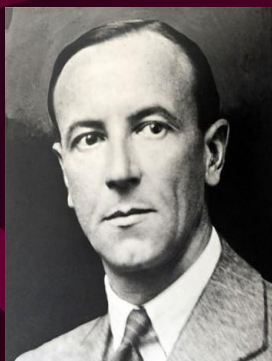
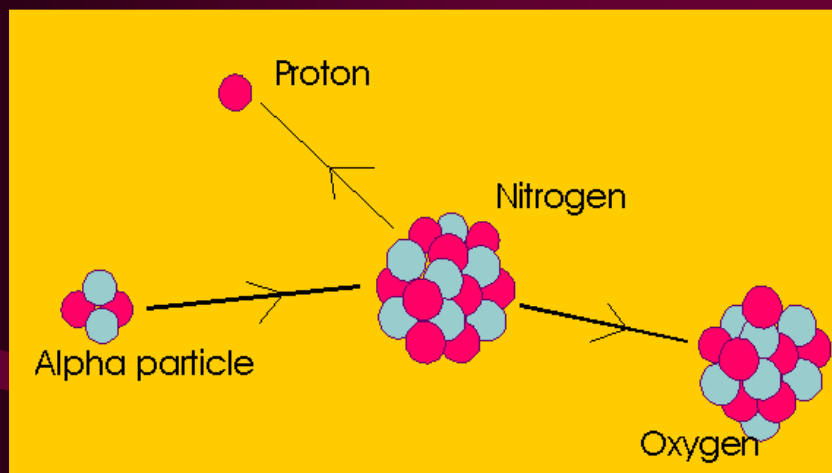
玻尔 Niels Bohr

1913年原子结构模型

1922年诺贝尔物理奖

卢瑟福的博士后

卢瑟福1919 年发现质子 – 最轻的原子核，第一个强子



James Chadwick

1932年发现中子



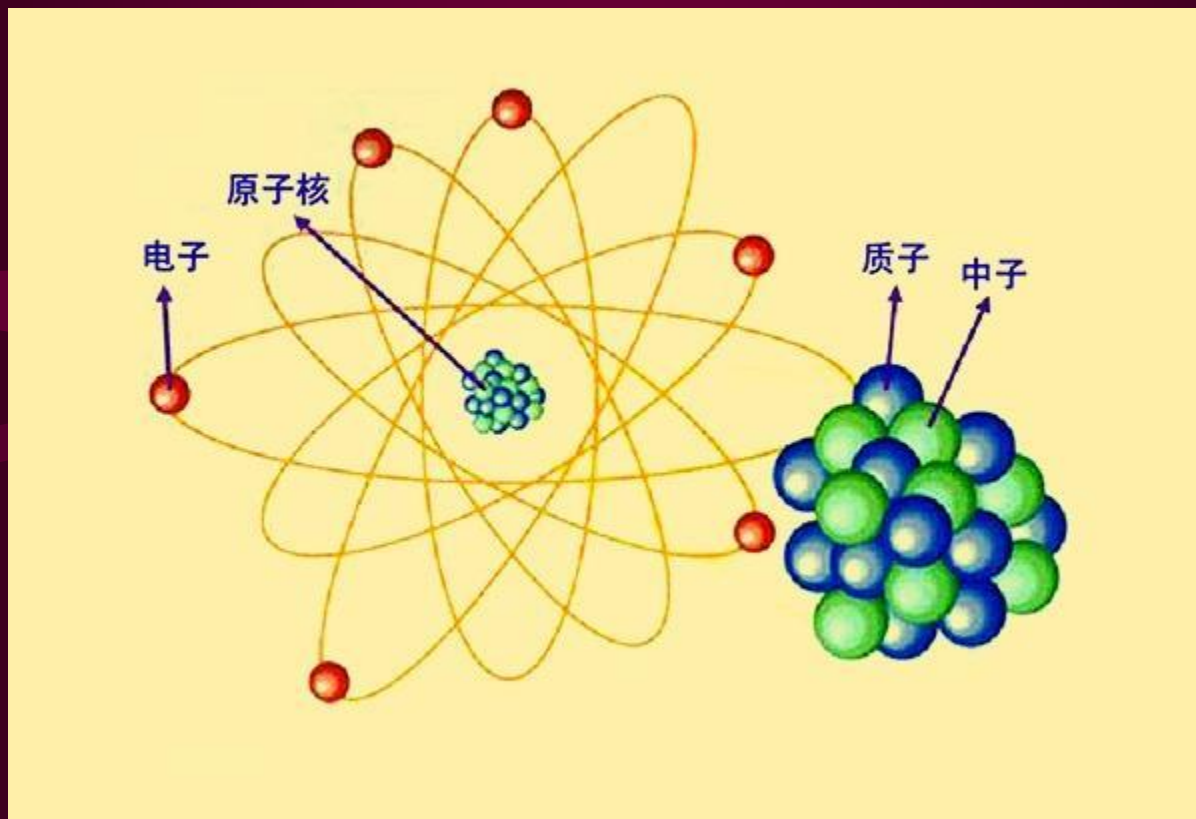
1935年诺贝尔物理奖

卢瑟福的学生

德国物理学家博特&贝克及法国小居里夫妇分别在1930、1931年观测到这种中性辐射，误认为是高能光子；查德威克证明是他导师卢瑟福预言的中子

三代师徒 (J.Thomson, E.Rutherford, J.Chadwick)

分别发现构成原子的三种成分：电子、质子、中子

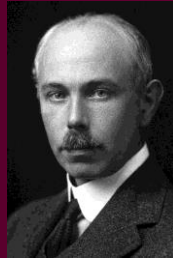


博士后(N.Bohr)给出了轨道量子化的原子结构模型

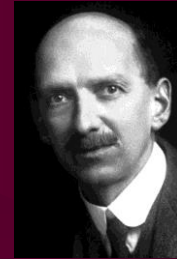
卢瑟福 – 伟大的科学导师



索迪 **Fred Soddy**
1913年发现同位素
1921年诺贝尔化学奖



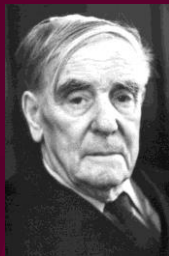
阿斯顿 **Francis Aston**
1919年发明质谱仪，
发现大量新的同位素
1922年诺贝尔化学奖



威尔逊 **C. Wilson**
1911年发明云雾室
1927年诺贝尔物理奖



布莱克特 **P. Blackett**
1932年改进云雾室，
观测到丰富的宇宙线
1948年诺贝尔物理奖



卡皮茨 **Pyotr Kapitsa**
1934年发明液氦批量
制作方法→低温物理
1978年诺贝尔物理奖



哈恩 **Otto Hahn**
1939年发现重核裂变
1945年诺贝尔化学奖



John Cockcroft & Ernest Walton
1932年发明直流高压加速器：
取代卢瑟福天然放射 α 束流，
用人工加速粒子实现核反应
1951年诺贝尔物理奖

中子物理



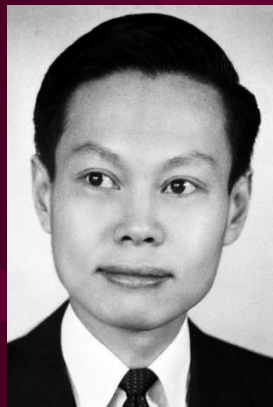
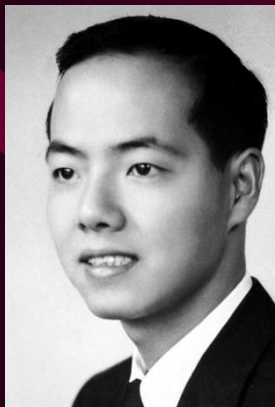
费米 Enrico Fermi (1901-1953)

中子物理学之父、原子能之父

1934年发现慢中子诱发核反应优势，
人造新的放射性“元素” → 同位素
→ 1938年诺贝尔物理奖

1934年 弱相互作用四费米子VV模型： $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$

$V \rightarrow V-A$



李政道 & 杨振宁

1956年发现弱相互作用宇称不守恒
1957年获诺贝尔物理奖

核力的介子交换理论

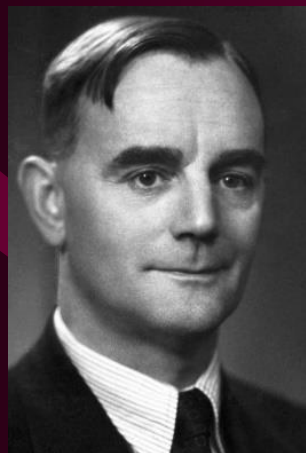


汤川秀树 **Hideki Yukawa (1907-1981)**

1934年提出核力的介子交换理论，
预言了 π 介子的存在

1949年诺贝尔物理奖

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\mu r}}{r}$$

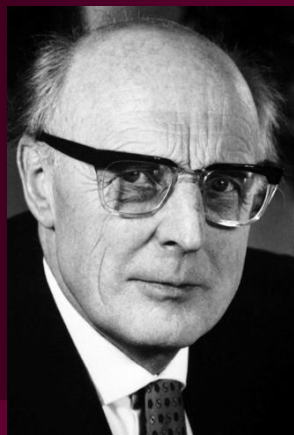


鲍威尔 **Cecil F. Powell (1903-1969)**

1947年用照相乳胶法发现 π 介子

1950年诺贝尔物理奖

原子核结构



Maria Goeppert Mayer & Hans Jensen

1949年发现原子核的壳层结构

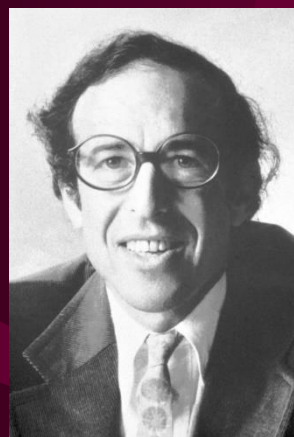
Eugene P. Wigner

1933年对核力性质的研究

1963年诺贝尔物理奖



↓
“女性想做科学家，必须嫁一个科学家丈夫”



Aage Bohr & Ben Mottelson

1952年原子核集体运动模型

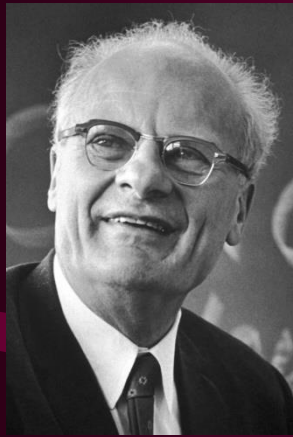
Leo J. Rainwater

1950年推测原子核形变

1975年诺贝尔物理奖



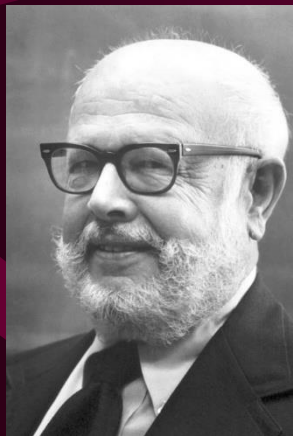
天体核物理



Hans A. Bethe

1938年发展核反应理论，用核聚变反应解释恒星中能源的产生

1967年诺贝尔物理奖

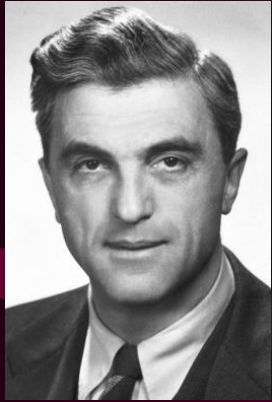


William A. Fowler

1957年对宇宙中形成化学元素的核反应的理论和实验研究

1983年诺贝尔物理奖

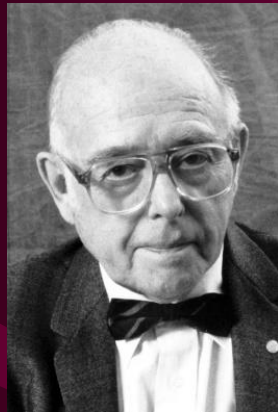
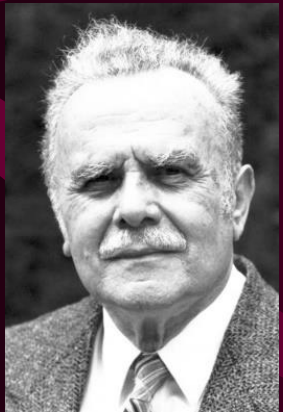
核技术应用



Felix Bloch & Edward Purcell

1946年开发核磁共振精密测量的新方法，
有效地研究了各种材料的成分

1952年诺贝尔物理奖



Bertram Brockhouse & Clifford Shull

1951年开发中子频谱学和中子衍射技术，
有效地研究了分子和各种材料结构

1994年诺贝尔物理奖

二. 核子的内部组元与基本粒子

质子有结构！



Otto Stern

1933年测出质子磁矩 $\mu_p = 2.5 \mu_N$ vs prediction

1943年诺贝尔物理奖

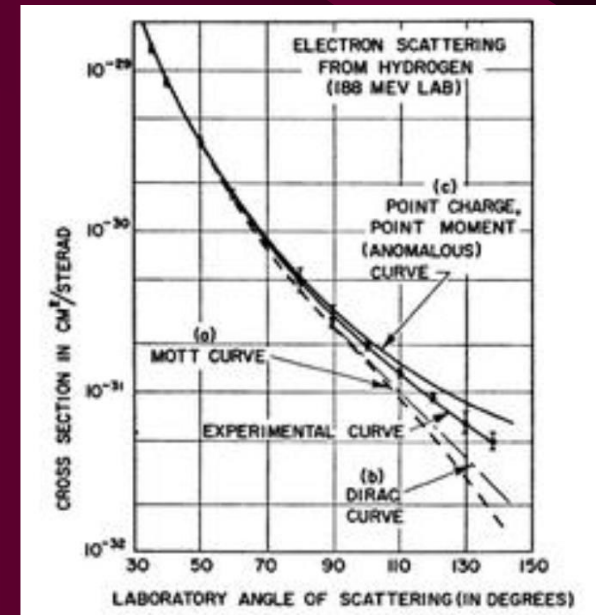
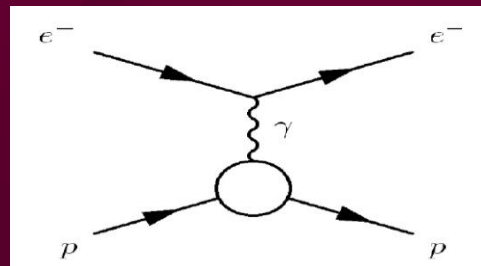
$$\mu_p = \frac{e\hbar}{2m_N c} \equiv \mu_N$$



Robert Hofstadter

1955年ep散射测出质子尺寸

1961年诺贝尔物理奖



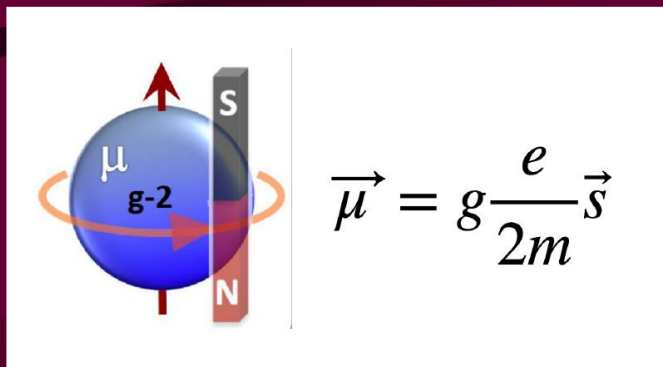


Carl Anderson

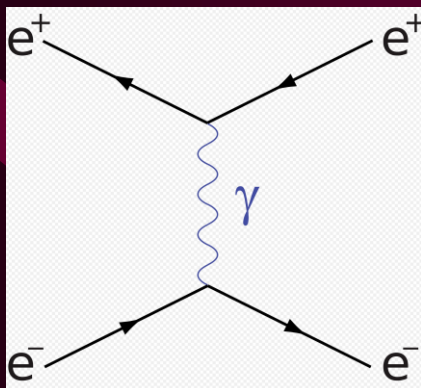
1932年发现正电子

1936年诺贝尔物理奖

同年发现 μ 子



Particle	g-factor	Relative uncertainty
Electron	2.002 319 304 361 18(26)	1.3×10^{-13}
Muon	2.002 331 841 10(47)	2.3×10^{-11}
Proton	5.585 694 689 3(16)	2.9×10^{-10}
Antiproton	5.585 694 690 6(60)	1.5×10^{-9}



LEP@CERN 209GeV $\rightarrow r_e < 10^{-18}$ m



C. Rubbia & S. van der Meer

1983年发现 W、Z 粒子

1984年诺贝尔物理奖

奇异介子、超子及强子共振态的发现

云雾室、乳胶室及气泡室发挥重要作用



Donald A. Glaser

1952年发明气泡室, 对强子谱研究
做出重要贡献

1960年诺贝尔物理奖

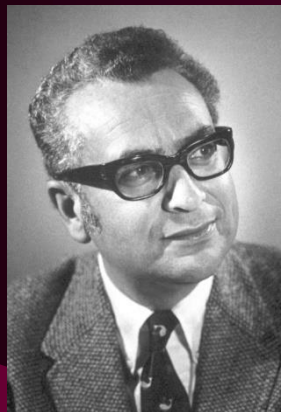


Luis W. Alvarez

1958年发展了氢气泡室技术和数据分析
方法, 从而发现了一大批共振态

1968年诺贝尔物理奖

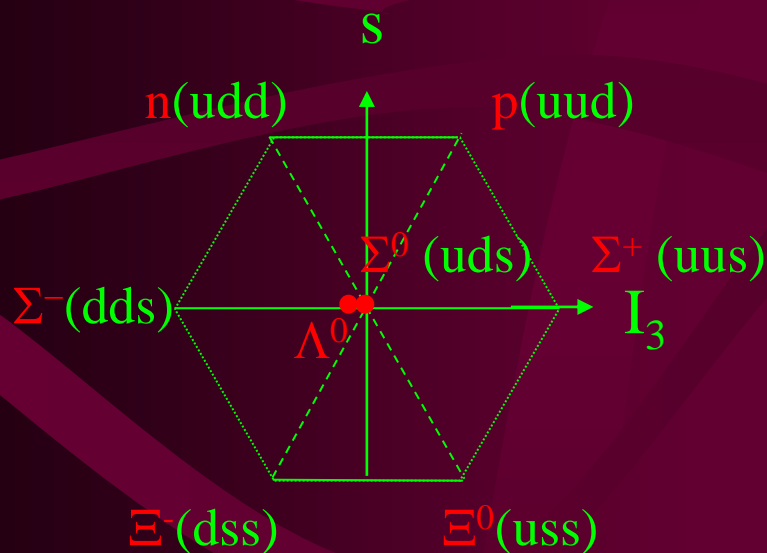
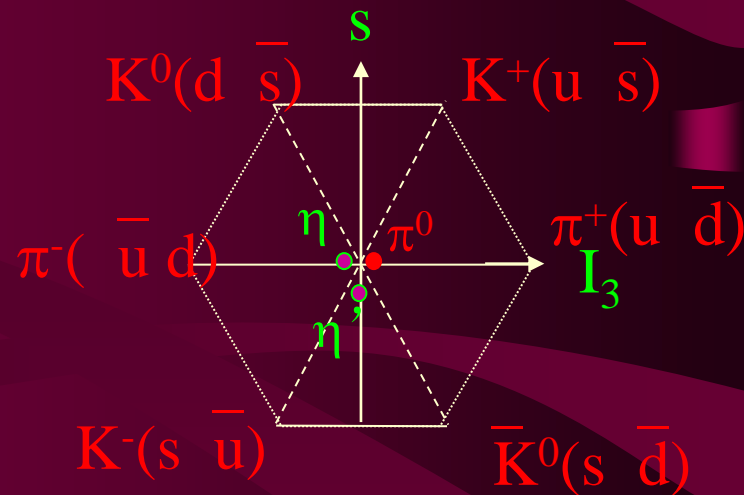
强子的夸克模型



盖尔曼 Murray Gell-Mann

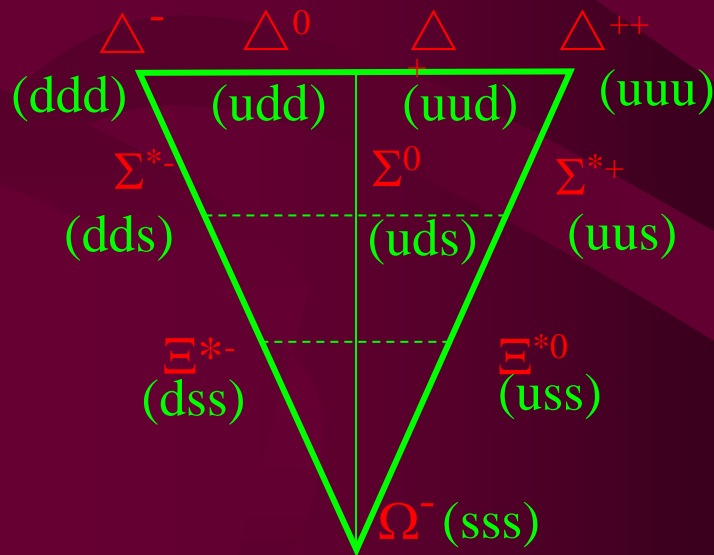
1964年 提出强子夸克模型

1969年诺贝尔物理奖



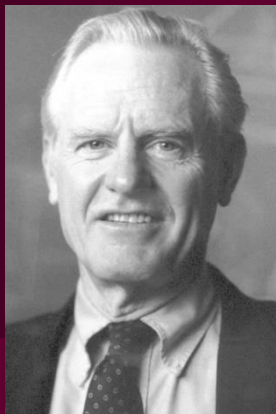
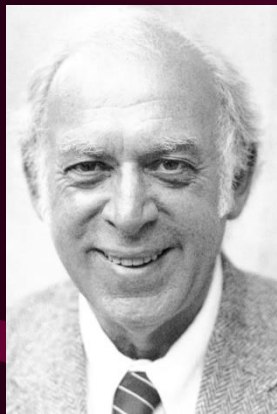
$1/2 +$

自旋-宇称



$3/2 +$

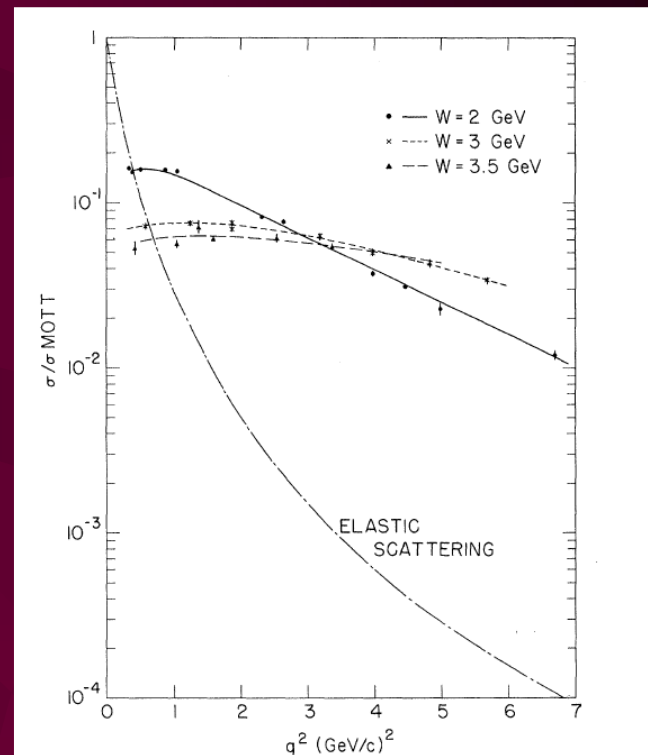
核子由夸克组成的实验验证



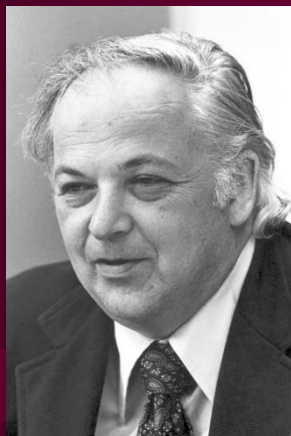
Jerome Friedman, Henry Kendall & Richard Taylor

1969年 ep 深度非弹散射证实核子内夸克的存在

1990年诺贝尔物理奖



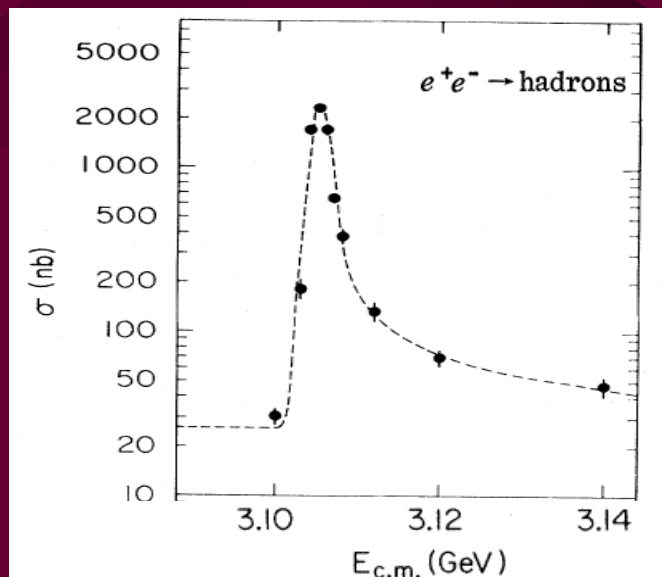
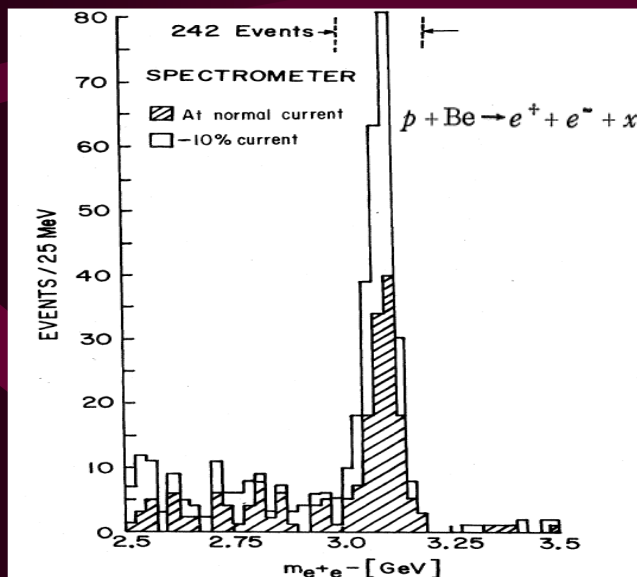
重味夸克组成的强子



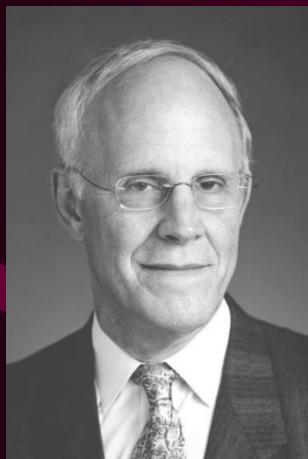
丁肇中 & Burton Richter

1974年发现J/ ψ 粒子，证明存在
第4种夸克-粲夸克

1976年诺贝尔物理奖



夸克-胶子的量子色动力学QCD理论



David Gross, Frank Wilczek &
David Politzer

1973年 推出渐近自由的QCD理论

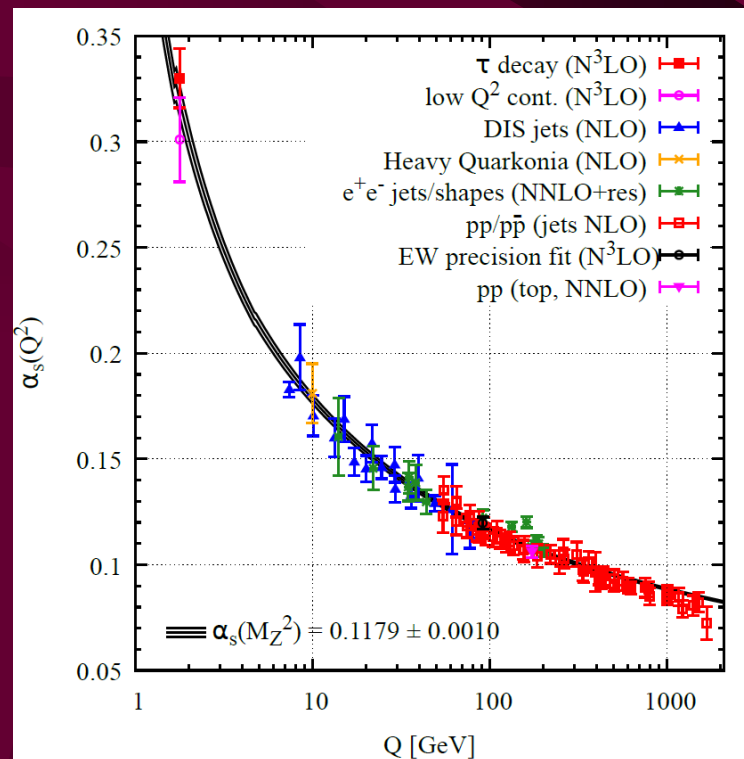
2004年诺贝尔物理奖

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{q}_f (i \gamma^\mu D_\mu + m_f) q_f$$

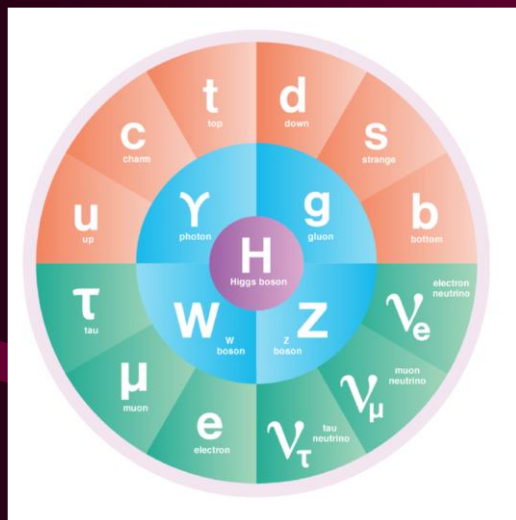
where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$

and $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$

That's it!



基本粒子及其标准模型



1954年杨-米尔斯理论：将U(1)规范不变的麦克斯韦理论拓展到不可交换群。在接下来的20年里，随着希格斯机制、电弱统一、可重整化、夸克禁闭、渐近自由等一系列物理概念的提出和研究，建立了粒子物理的标准模型。

前沿问题：

- Higgs 性质的全面系统研究
- 中微子质量等性质的研究
- 强子的夸克胶子结构
- ...
- 夸克、轻子内部结构？
- 新的基本粒子？相互作用？
- 宇宙中正反物质不对称的根源？
- ...

三. 强子谱与强子结构前沿简介

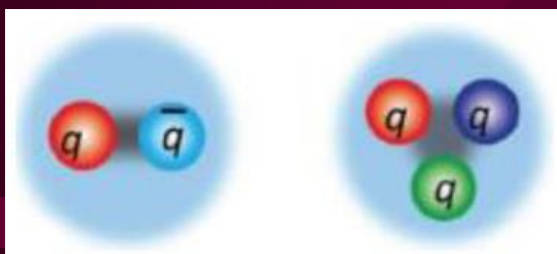
1. 强子结构的经典夸克模型及其问题

2. 质子的多夸克成分

3. 奇特强子态

1. 强子结构的经典夸克模型及其问题

夸克模型

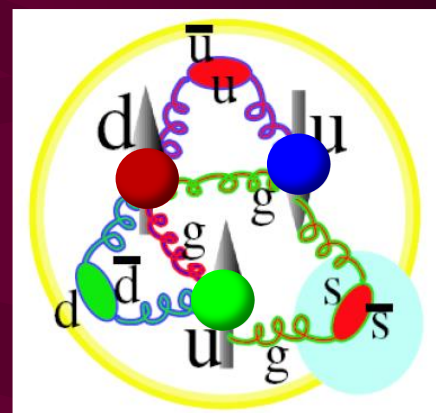


介子

重子

$$q = u, d, s, c, b, t$$

QCD



QCD 两大特性： 渐近自由 + 夸克禁闭

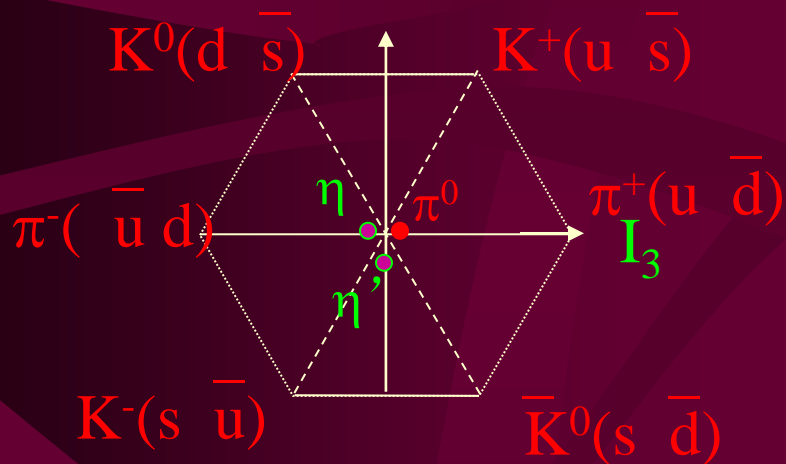
夸克唯象势模型： $V(r) = kr - a/r$

介子的 $SU(3)$ $\bar{q}q$ -夸克模型

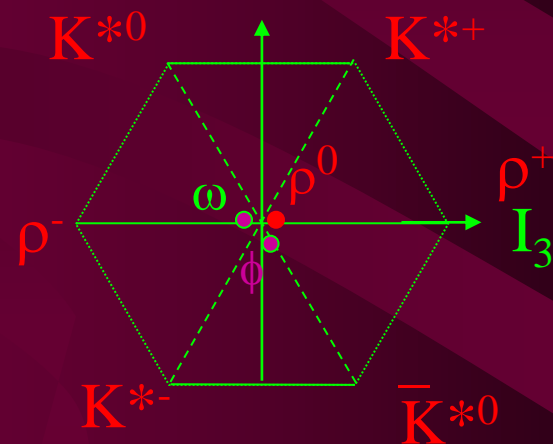
$\bar{q}q$ - 介子: $^{2S+1}L_J$ J^{PC} $P=(-1)^{L+1}$

1S_0 0^-

3S_1 1^-



$$\pi^0 = \frac{u \bar{u} - d \bar{d}}{\sqrt{2}}$$

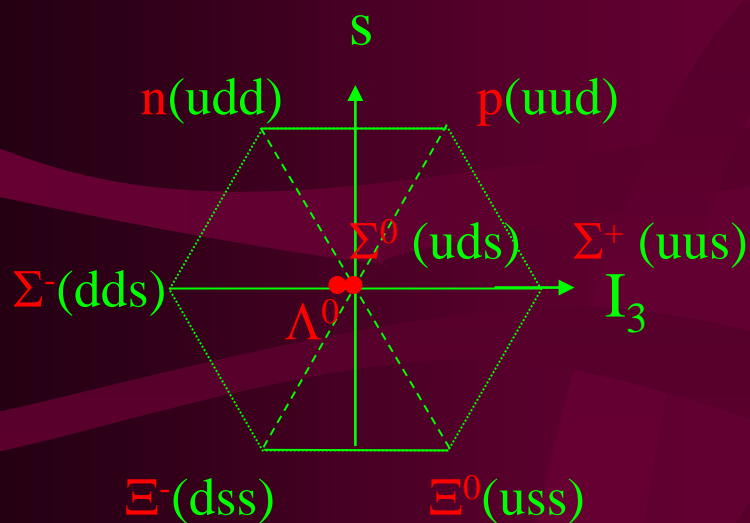


重子的 $SU(3)$ $3q$ -夸克模型

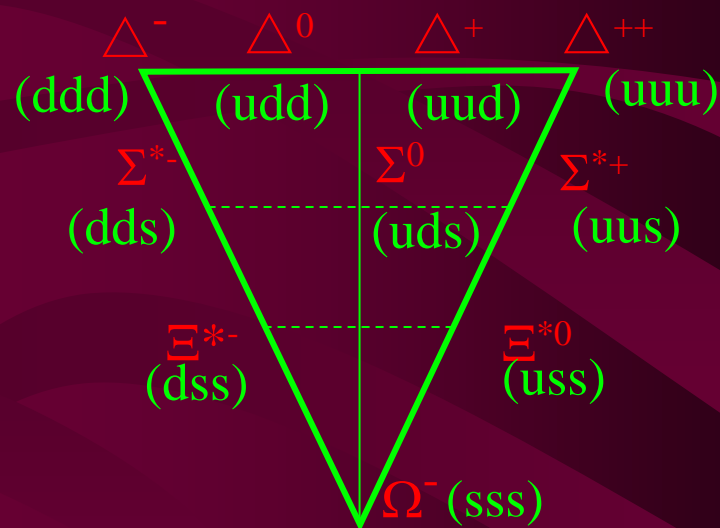
$1/2 +$

自旋-宇称

$3/2 +$



空间轨道基态
相当成功!



质量公式预言 $m_{\Omega^-} \cong 1670 \text{ MeV}$

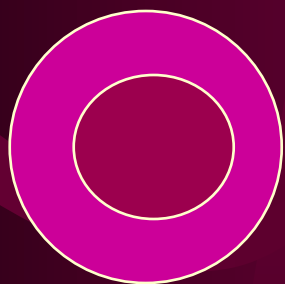
实验 $m_{\Omega^-} \cong 1672.45 \pm 0.29 \text{ MeV}$

问题：非淬火效应对夸克禁闭和强子结构的影响？！

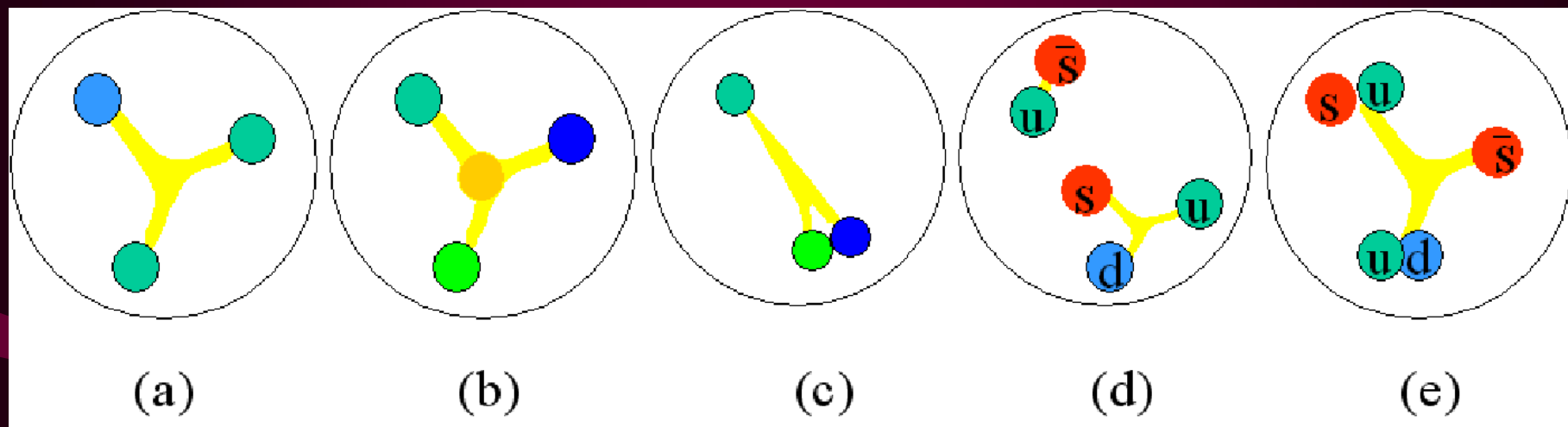


夸克模型：重子 = 3 夸克 介子 = 夸克-反夸克
QCD : 新的自由度 --- 具有自相互作用的胶子

胶球、夸克-胶子混杂态、多夸克态？



重子是如何构成的？



A. 3夸克态 B. 夸克-胶子混杂态 C. 偶夸克-夸克态 D-E. 多夸克态

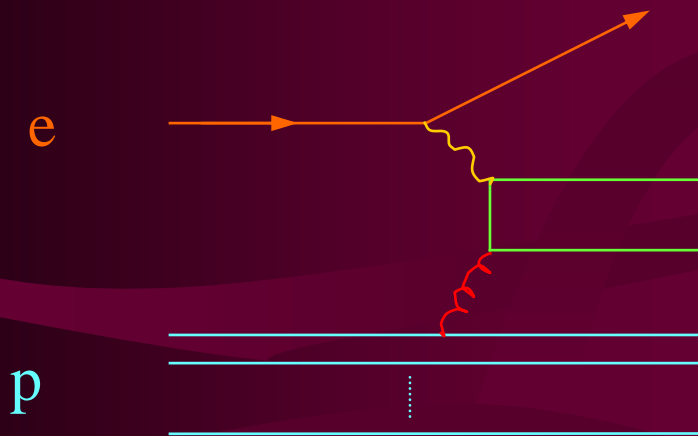
预言的核子激发态 N^* 数目: $D-E > B > A > C$

实验已观测到的 N^* 数目 $< A$, “失踪” ?

人类对重子谱的了解还非常贫乏
缺乏行之有效的理论计算

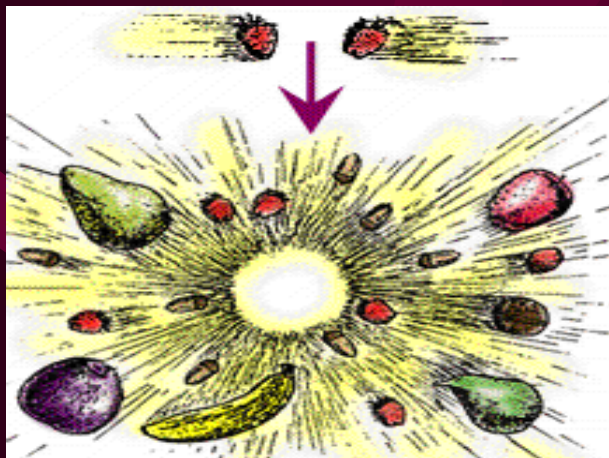
探索强子内部结构的基本途径

1) 高能轻子-质子散射 \rightarrow 质子内部夸克-胶子分布函数



问题：光子、胶子与海夸克的相互转化，原有的、再生的？

2) 强子、轻子、光子束流打靶 \rightarrow 强子谱、强子衰变



原子谱 \Rightarrow 玻尔原子的量子理论

核 谱 \Rightarrow 壳模型 & 集体运动模型

强子谱 \Rightarrow ?

北京正负电子对撞机 (BEPC)、北京谱仪 (BES)

周恩来：

这件事不能再延迟了！



李政道：

三代领袖尧舜禹，影响文化三千年。

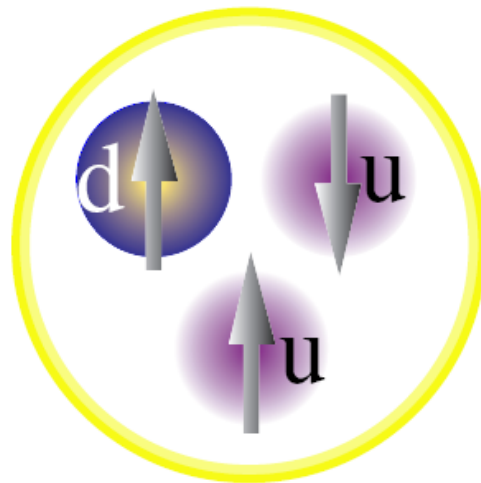
夸克轻子皆三代，BES也需第三代。



2. 质子中的多夸克成分

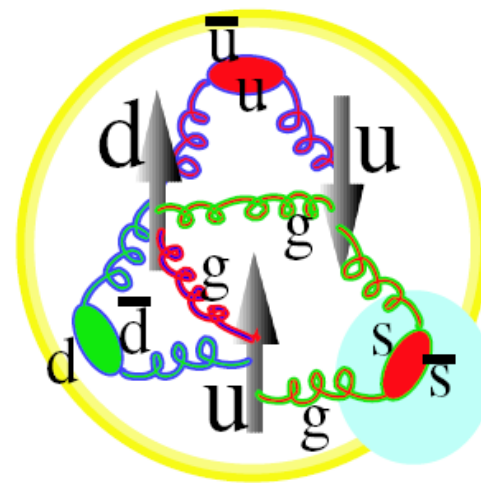
Classical picture of the proton

Constituent Quarks



($Q^2 = 0 \text{ GeV}^2$)
baryon octet
masses, magn. momenta

Parton Distributions



($Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$)
structure functions
momentum, spin

$$\bar{u}(x) = \bar{d}(x), \quad \bar{s}(x) = s(x)$$

1964-1974

1974-1992

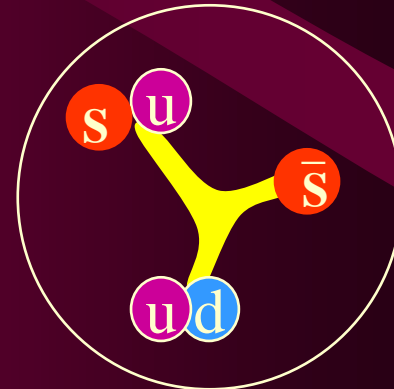
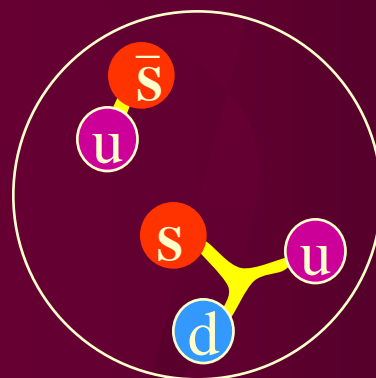
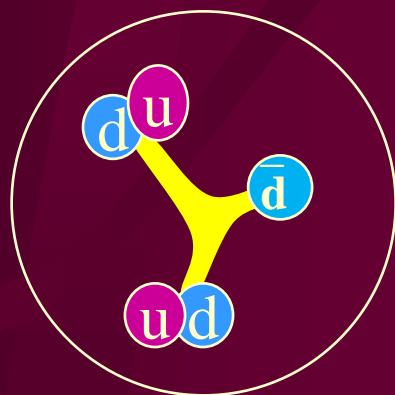
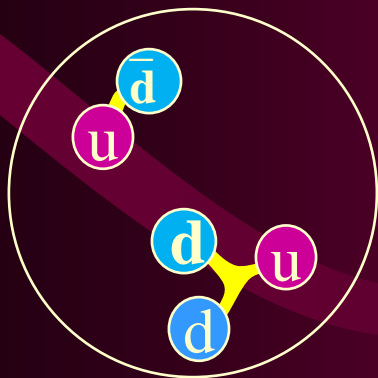
质子自旋“危机”、 $\bar{d} - \bar{u} \sim 0.12$ 、 $\bar{s}(x) \neq s(x)$ 等问题
两种不同的唯象解释：

介子云图像： Thomas, Speth, Weise, Oset, Brodsky, Ma, ...

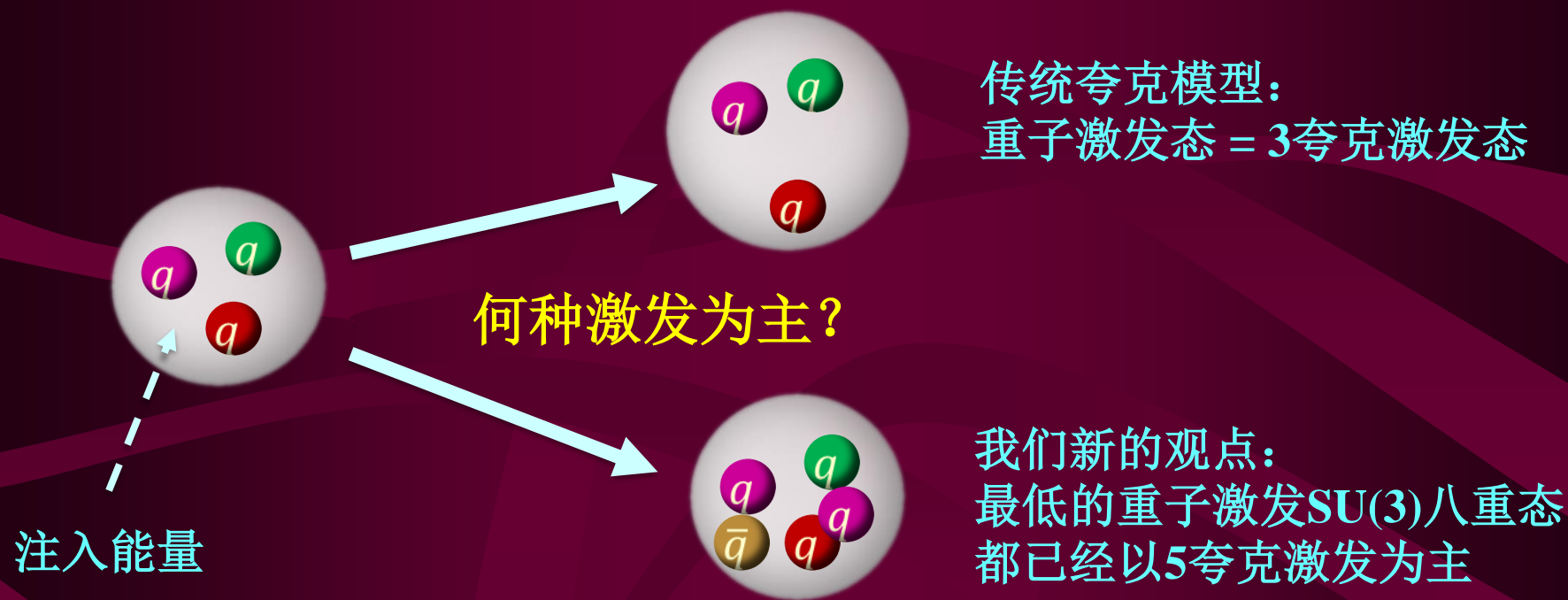
$$|p\rangle \sim |uud\rangle + \varepsilon_1 |n(udd)\pi^+(\bar{d}u)\rangle + \varepsilon_2 |\Delta^{++}(uuu)\pi^-(\bar{u}d)\rangle + \varepsilon' |\Lambda(uds)K^+(\bar{s}u)\rangle + \dots$$

夸克对图像： Riska, Zou, Zhu, ...

$$|p\rangle \sim |uud\rangle + \varepsilon_1 |[ud][ud]\bar{d}\rangle + \varepsilon' |[ud][us]\bar{s}\rangle + \dots$$



质子含有~30%的五夸克成分，那么重子激发态呢？



要真正了解重子谱，必须研究五夸克态

3. 奇特强子态

Fate of the first pentaquark predicted and observed: $1/2^-$

1959: $\bar{K}N$ molecule predicted by Dalitz-Tuan, PRL2, 425

1961: $\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma\pi$ observed by Alston et al., PRL6, 698

1964: Quark model (uds) for $\Lambda(1405)$

1995: $\bar{K}N$ dynamically generated -- Kaiser et al., NPA954, 325

2001: 2 pole structure by $\bar{K}N$ - $\Sigma\pi$ -- Oller et al., PLB500, 263

PDG2010: “The clean Λ_c spectrum has in fact been taken to settle the decades-long discussion about the nature of the $\Lambda(1405)$ —true 3-quark state or mere $\bar{K}N$ threshold effect?— unambiguously in favor of the first interpretation.”

Fate of the last famous fading pentaquark $\theta^+(1540)$: $1/2^+$

1997: $Z^+(1530)$ predicted by Diakonov et al., ZPA359, 305

2003: $\theta^+(1540) \rightarrow K^+n$ claimed by LEPS, PRL91, 012002

2003: $\bar{s}(ud)(ud)$ for $\theta(1540)$ by Jaffe&Wilczek, PRL91, 232003

2003: $\bar{s}ud)(ud)$ for $\theta(1540)$ by Karliner&Lipkin, PLB575, 249

2004: supported by 10 expts $\rightarrow \theta(1540)$ well-established by PDG

2004: not supported by BESII, PRD70, 012004

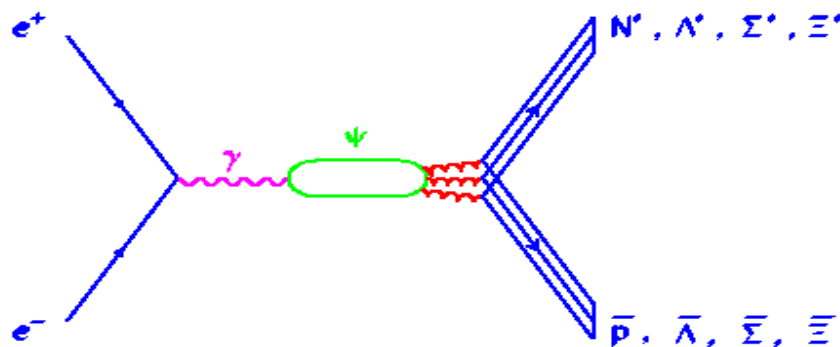
2005: not supported by many high stats experiments

2006: removed from PDG

Note: $\theta^+(1540)$ is not supported by hadronic molecule model & chiral quark model by Huang, Zhang, Yu, Zou, PLB586(2004)69

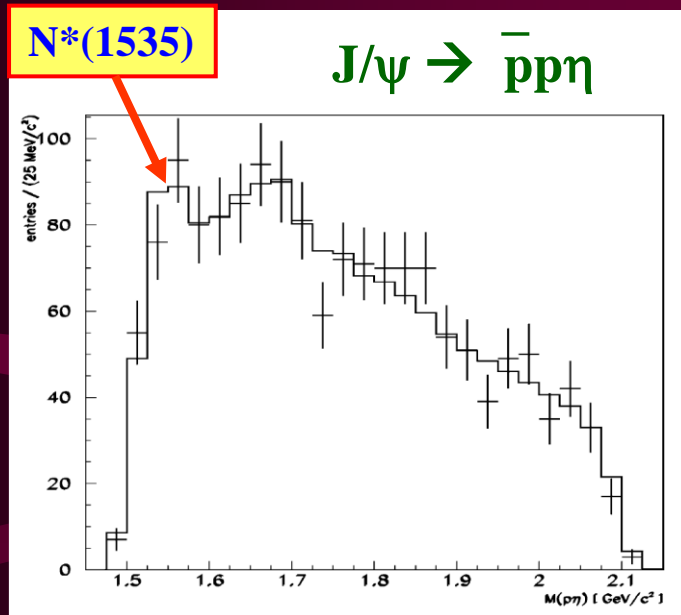
BEPC核子和超子激发态 (N^* , Λ^* , Σ^* , Ξ^* , Ω^*) 新项目

$$\Psi \rightarrow \bar{B} B M \Rightarrow N^*, \Lambda^*, \Sigma^*, \Xi^*, \Omega^*$$

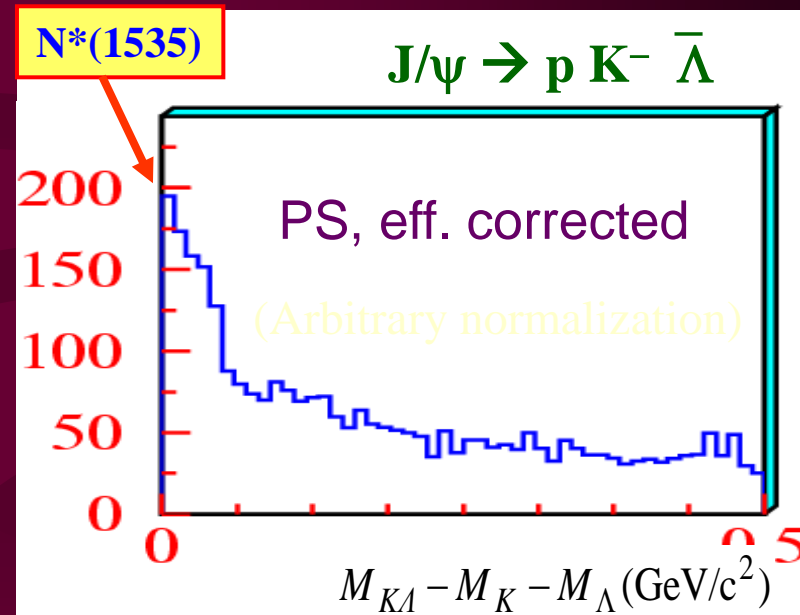


特点和优势： 理想的同位旋、低自旋分离器，独具特色
国际上其它实验 ($e p$, γp , πp , $K p$) 不具备这些优点

K Σ molecule - N*(1535) in J/ ψ decays



BES, PLB510 (2001) 75



BESII, IJMPA20 (2005) 1985

B.C.Liu, B.S.Zou, PRL96 (2006) 042002 : N*(1535) ~ $\bar{s}s u u d$!

$\bar{s}s u u d \rightarrow \bar{c} c u u d$ 预言了 P_c 五夸克态 - 被 LHCb 实验证实

- 我们首次预言了3个可衰变到 J/ψ - p 的五夸克态 (P_c), 建议通过 J/ψ - p 衰变道寻找:

Wu, Molina, Oset, Zou, PRL 105 (2010) 232001

Wang, Huang, Zhang, Zou, PRC 84 (2011) 015203

Wu, Lee, Zou, PRC 85 (2012) 044002

→ 3个 $\bar{c} c u u d$ - P_c 五夸克态: 1个 $D\Sigma_c$ + 2个 $D^*\Sigma_c$ 分子态

- 国际系列会议特邀大会报告: HYP2012 (西班牙), NSTAR2015 (日本), MENU2016 (日本), CHARM2018 (俄国)
- 列入美国 JLab-12GeV 和德国 PANDA 实验寻找计划
- LHCb 实验 2015-2019 年观测到3个与我们预言相符的 P_c 态

LHCb观测到与我们预言相符的3个 P_c 五夸克态

PRL 115, 072001 (2015)

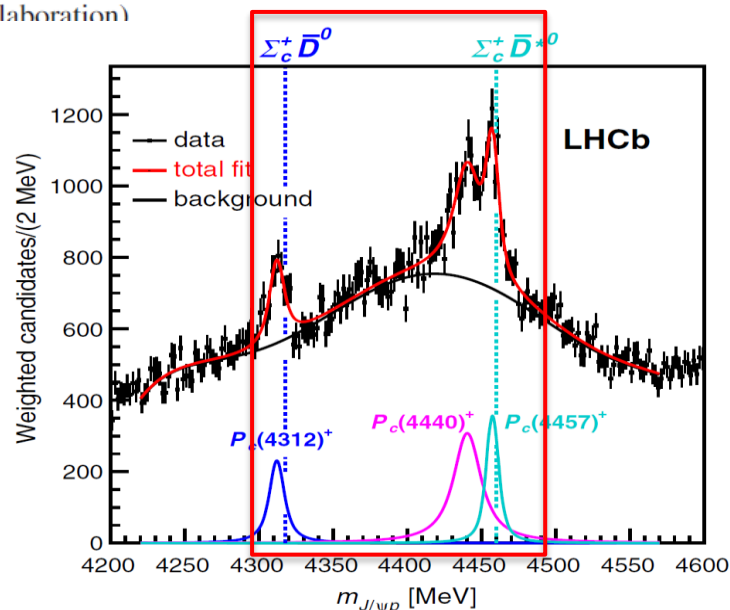
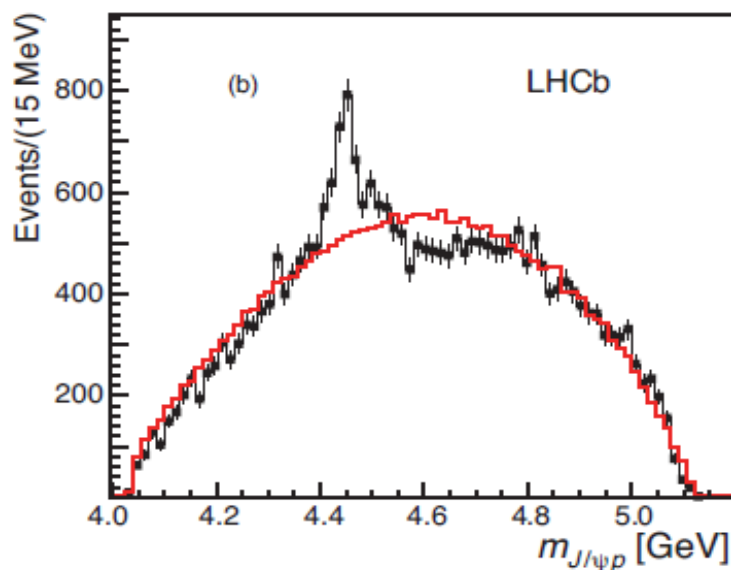
Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
14 AUGUST 2015

Observation of $J/\psi p$ Resonances Consistent with Pentaquark States in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ Decays

R. Aaij *et al.**
(LHCb Collaboration)

PRL 122 (2019) 222001



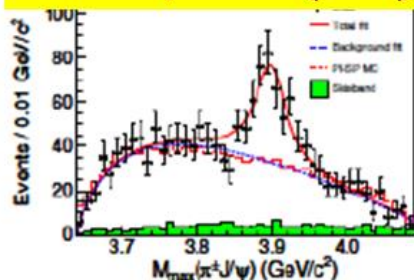
入选美国物理杂志2015年度八大突破之一
各类五夸克态半个多世纪的寻找，终获确证！

BESIII上发现的Zc家族



$Z_c(3900)^+$

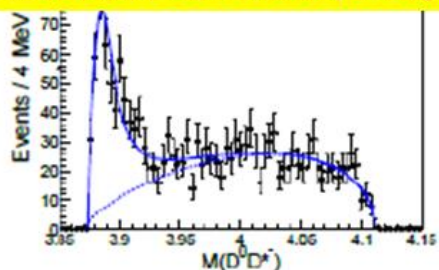
PRL 110, 252001 (2013)



$e^+e^- \rightarrow \pi^- \pi^+ J/\psi$

$Z_c(3885)^+$

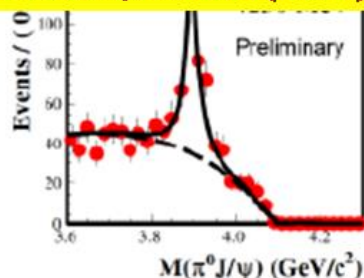
ST: PRL 112, 022001 (2014)
DT: PRD92, 092006 (2015)



$e^+e^- \rightarrow \pi^- (D\bar{D}^*)^+$

$Z_c(3900)^0$

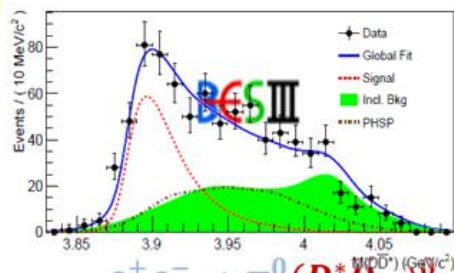
PRL 115, 112003 (2015)



$e^+e^- \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$

$Z_c(3885)^0$

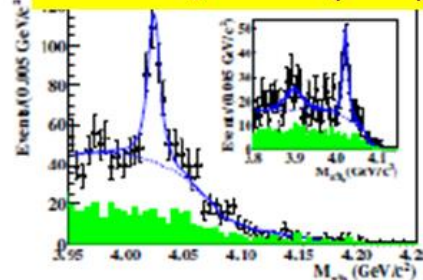
PRL 115, 222002 (2015)



$e^+e^- \rightarrow \pi^0 (D^* \bar{D}^*)^0$

$Z_c(4020)^+$

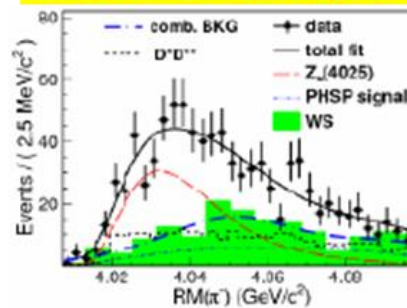
PRL 111, 242001 (2013)



$e^+e^- \rightarrow \pi^- \pi^+ h_c$

$Z_c(4025)^+$

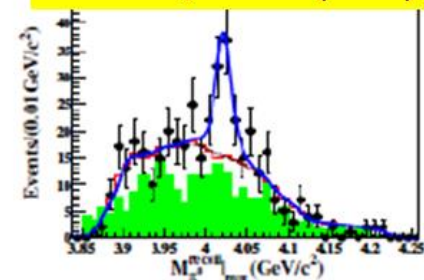
PRL 112, 132001 (2014)



$e^+e^- \rightarrow \pi^- (D^* \bar{D}^*)^+$

$Z_c(4020)^0$

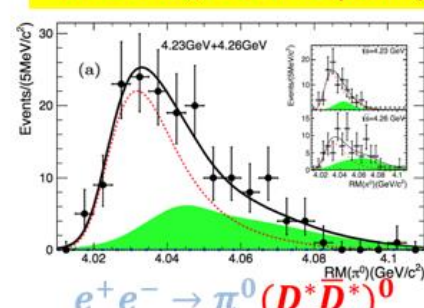
PRL 113, 212002 (2014)



$e^+e^- \rightarrow \pi^0 \pi^0 h_c$

$Z_c(4025)^0$

PRL 115, 182002 (2015)



$e^+e^- \rightarrow \pi^0 (D^* \bar{D}^*)^0$

“Y(4260)的结构以及带电Zc(3900)的产生”

a

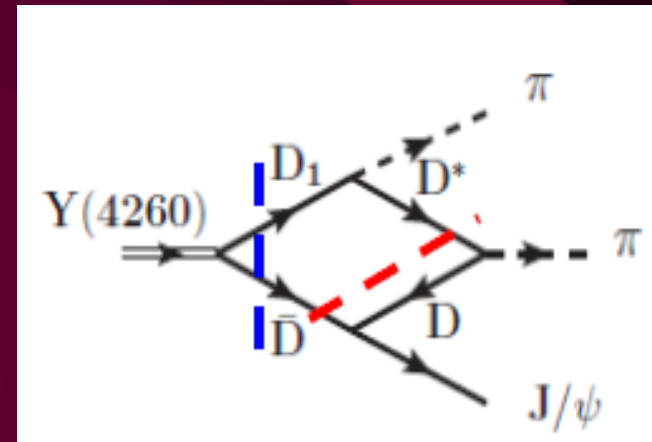
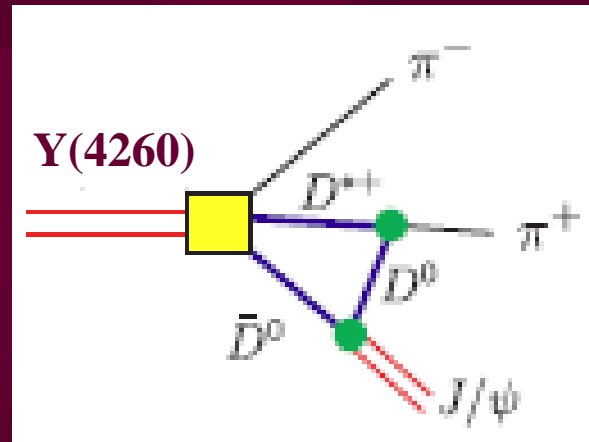
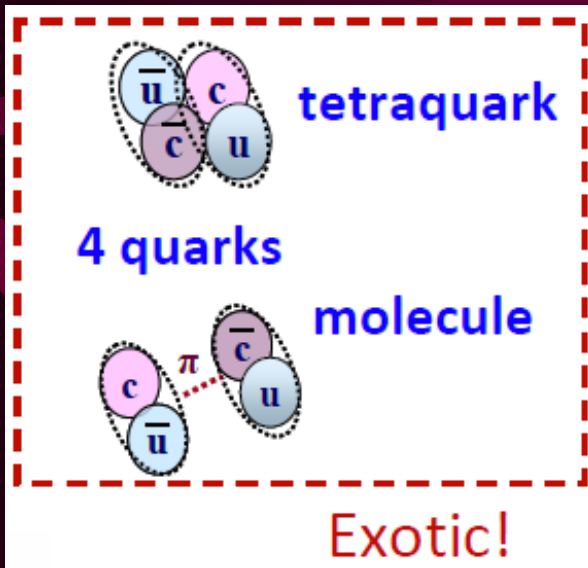
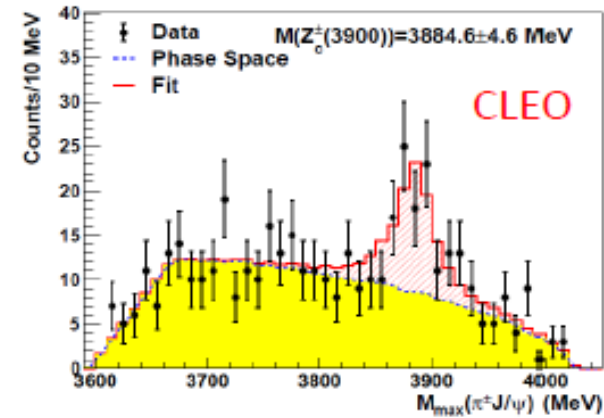
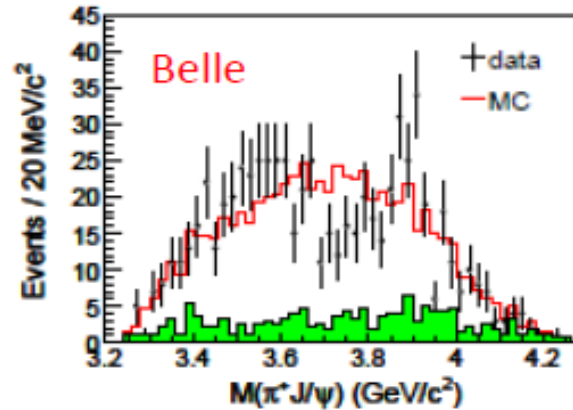
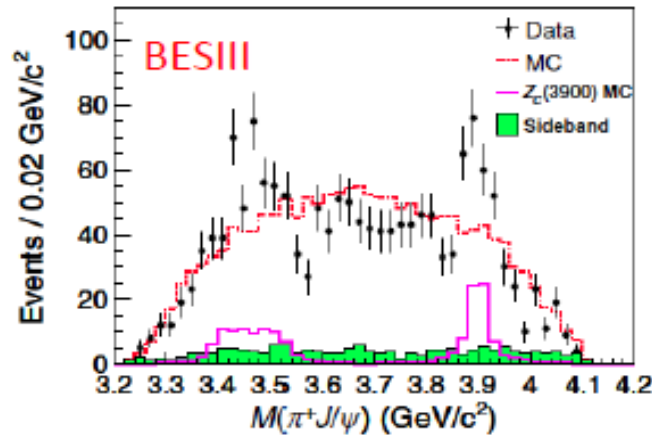
PRL 110, 252001 (2013)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

WEEK ENDING
21 JUNE 2013



Observation of a Charged Charmoniumlike Structure in $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ at $\sqrt{s} = 4.26$ GeV



D.Y.Chen, X.Liu, Q.Wang, C.Hanhart, Q.Zhao
PRD84(2011)034032 PRL111(2013)132003

Multiquark states – crucial for hadron structure !

X(3872) → top cited paper for Belle (2003) 2403 cites

Z_c(3900) → top cited paper for BES (2012) 1061 cites

P_c states → top cited paper for LHCb (2015) 1648 cites

**H.X.Chen, W.Chen, X.Liu, S.L.Zhu, Phys.Rept. 639 (2016) 1:
“The hidden-charm pentaquark and tetraquark states” 1015 cites**

**F.K.Guo, C.Hanhart, U.Meissner, Q.Wang, Q.Zhao, B.S.Zou,
Rev.Mod.Phys. 90 (2018)015004: “Hadronic molecules” 1029 cites**

New Particles

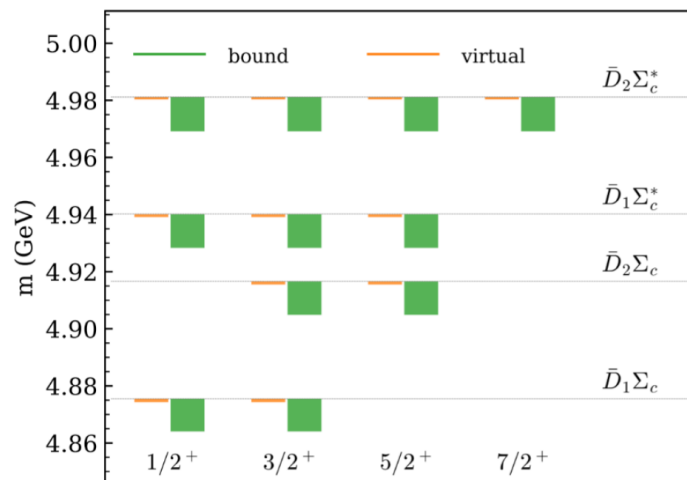
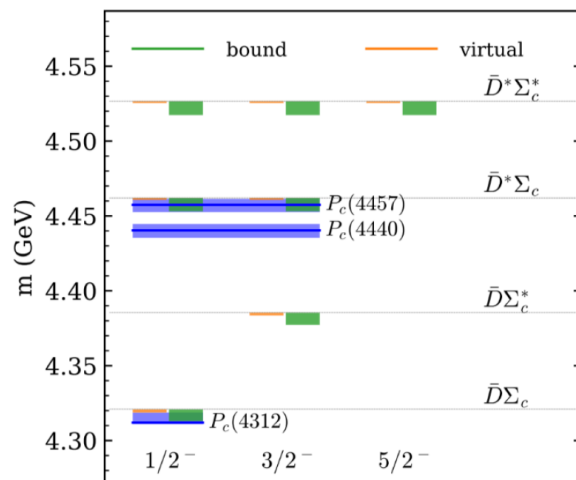
relevant thresholds

Zc(3900)	$\bar{d}u \bar{c}c$	D*D	3880 MeV
Zc(4020)		D*D*	4020 MeV
Zb(10610)	$\bar{d}u \bar{b}b$	B*B	10605 MeV
Zb(10650)		B*B*	10650 MeV
Pc(4380)	$uud \bar{c}c$	DΣ _c *	4382 MeV
Pc(4450)		D*Σ _c	4459 MeV

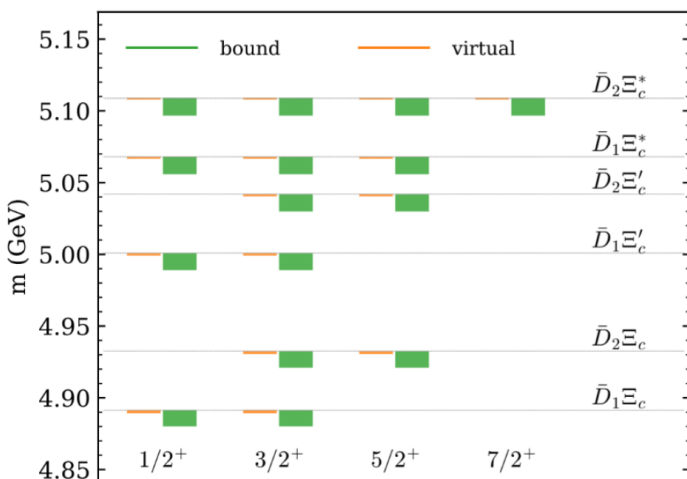
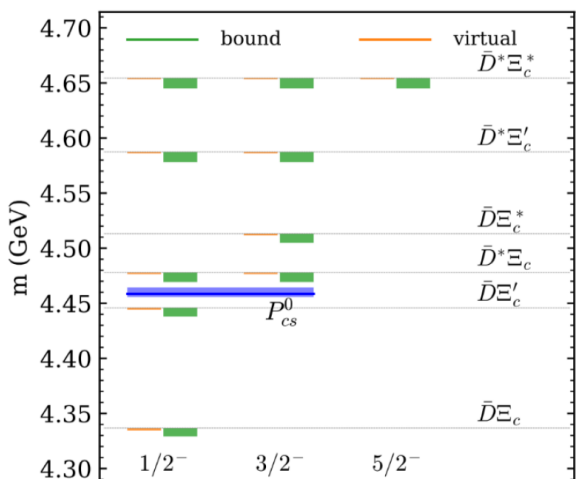
Hadron-hadron resonances ?

A survey of hadronic molecules with hidden charm

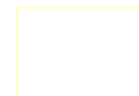
X.K.Dong, F.K.Guo, B.S.Zou *Progr. Phys.* 41 (2021) 65



P_c

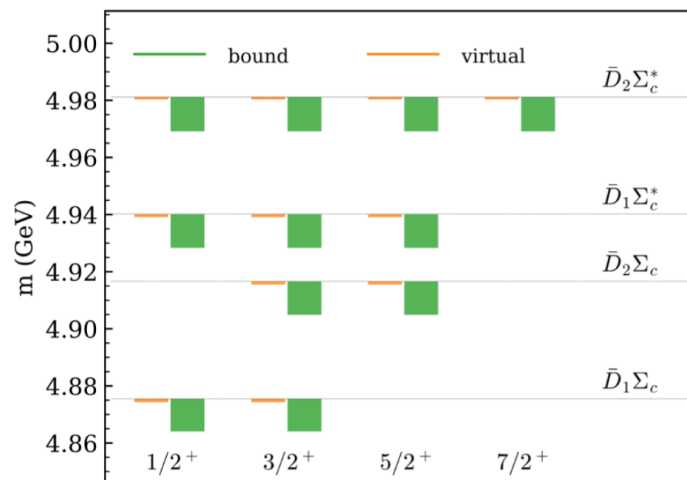
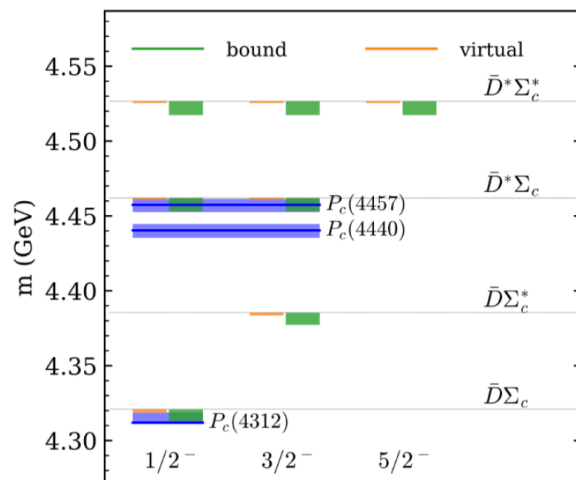


P_{cs}

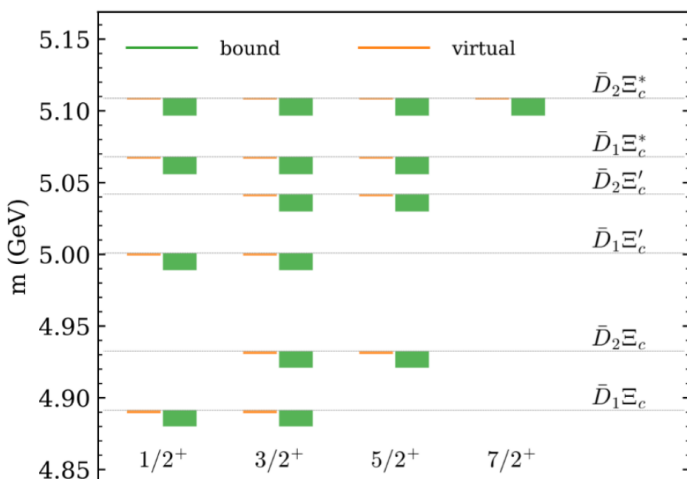
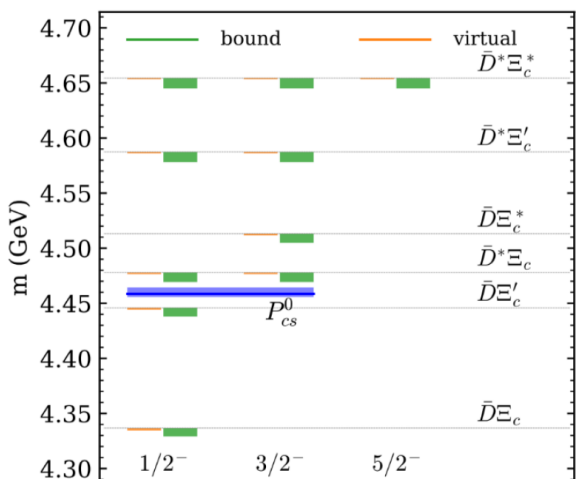


A survey of hadronic molecules with hidden charm

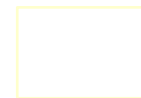
X.K.Dong, F.K.Guo, B.S.Zou *Progr. Phys.* 41 (2021) 65



P_c

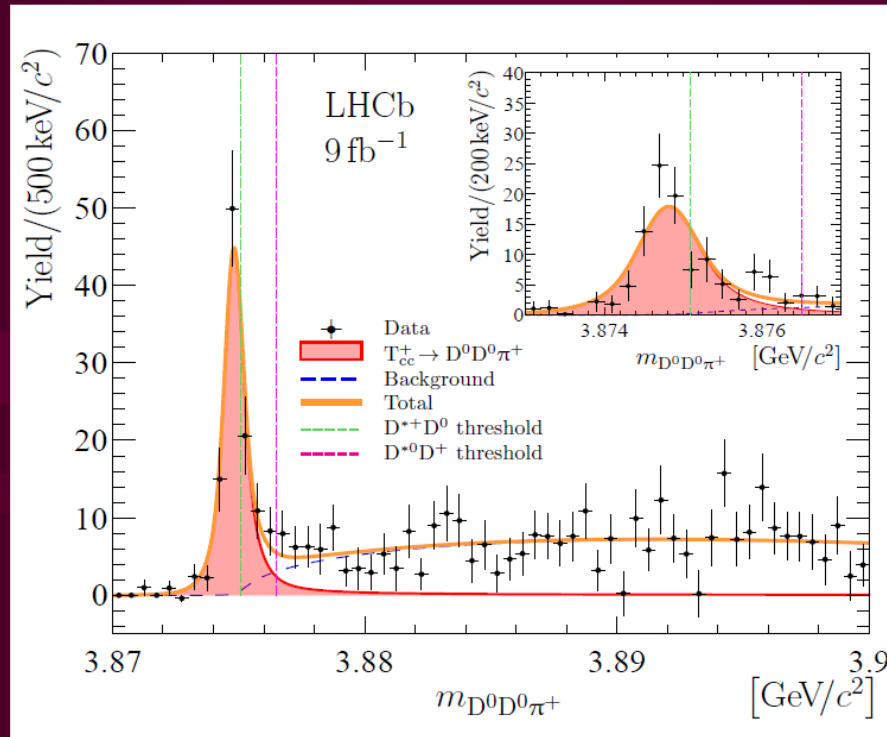


P_{cs}



Observation of T_{cc}^+ by LHCb

Nature Phys. 18 (2022) 7, 751



Consistent with expectation for D^*D molecule

X.K.Dong, F.K.Guo, B.S.Zou, Commun.Theor.Phys.73(2021)125201

T.Barnes, N.Black, D.Dean, E.Swanson, Phys.Rev.C60(1999)045202

D.Janc, M.Rosina, Few Body Syst. 35(2004)175

Y.Yang, C.Deng, J.Ping, T.Goldman, Phys.Rev.D80(2009)114023

T.Caramés, A.Valcarce, J.Vijande, Phys.Lett.B699(2011)291

S.Ohkoda, Y.Yamaguchi, S.Yasui, K.Sudoh, A.Hosaka, Phys.Rev.D86(2012)034019

N.Li, Z.F.Sun, X.Liu, S.L.Zhu, Phys.Rev.D88(2013)114008

M.Z.Liu, T.W.Wu, M.P.Valderrama, J.J.Xie, L.S.Geng, Phys.Rev.D99(2019)094018

H.Xu, B.Wang, Z.W.Liu, X.Liu, Phys.Rev.D99(2019)014027

M.Z.Liu, J.J.Xie, L.S.Geng, Phys.Rev.D102(2020)091502

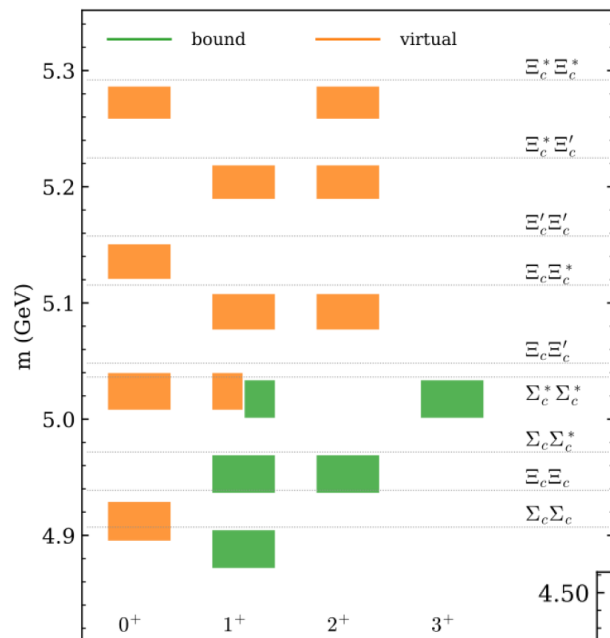
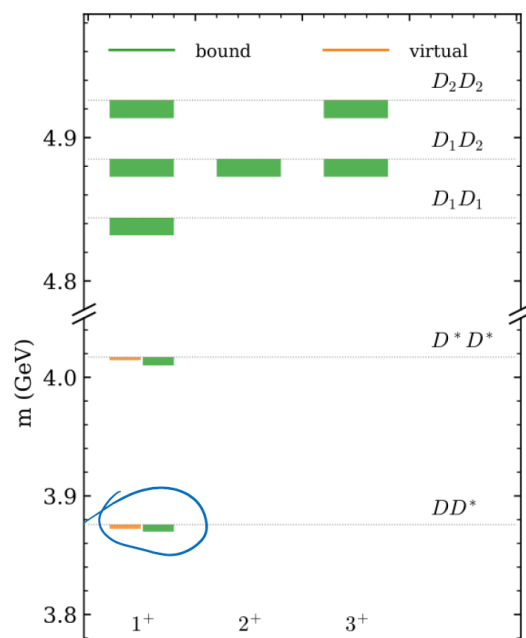


$$V_{\rho,\omega} + V_{\pi} + \dots$$

DD*(I=0, J^P =1⁺) bound state -- T_{cc}⁺

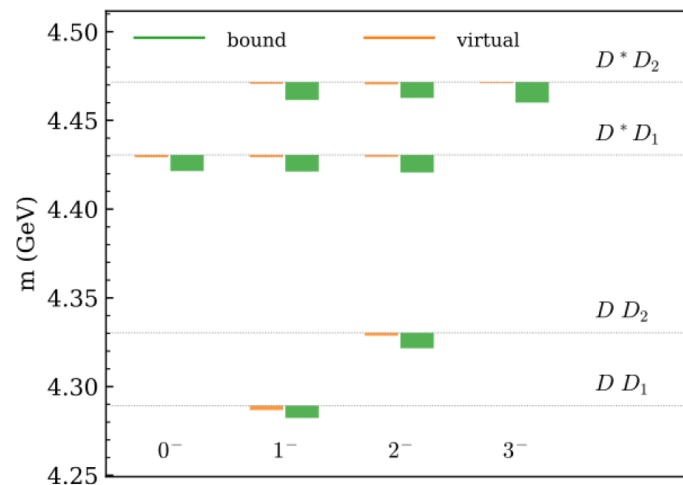
A survey of heavy-heavy hadronic molecules

X.K.Dong, F.K.Guo, B.S.Zou, Commun.Theor.Phys.73(2021)125201



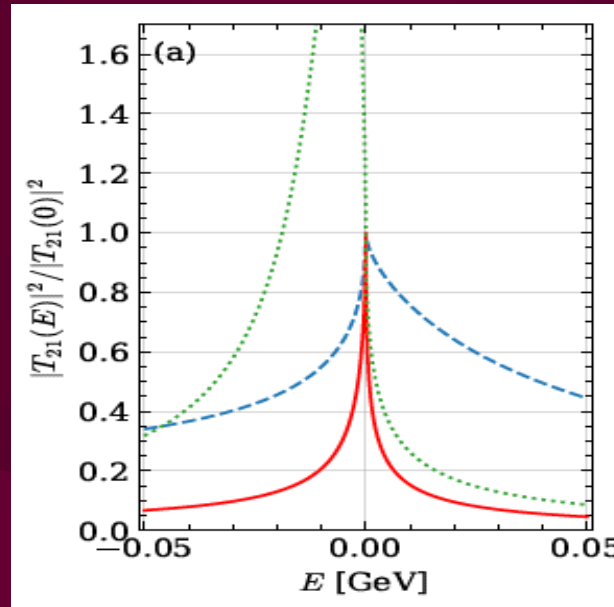
✓ Isoscalar $\Sigma_c^{(*)} \Sigma_c^{(*)}$ dibaryons very likely bound

- ✓ T_{cc} as an isoscalar DD^* bound or virtual state, D^*D^* predicted to be similar, with $P = +$
- ✓ Similar in $P = -$ sector



Explaining the many threshold structures in hadron spectrum with heavy quarks

X.K.Dong, F.K.Guo, B.S.Zou, PRL126 (2021) 152001



Prediction of a narrow exotic D^*D_1 molecule with $J^{PC} = 0^{--}$

T.Ji, X.K.Dong, F.K.Guo, B.S.Zou, PRL129 (2022) 102002

$$e^+e^- \rightarrow \eta\psi_0(4360) \rightarrow \eta\eta\psi$$

Hybrid, Glueball or hadronic molecules ?

Observation of $\eta_1(1855)$ with exotic $J^{PC}=1^{-+}$ in $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$

BESIII Collaboration, PRL 129 (2022) 192002

Interpretation of the $\eta_1(1855)$ as a $\bar{K}K_1(1400)+$ c.c. molecule

X.K.Dong, Y.H.Lin, B.S.Zou, SCIENCE CHINA PMA 65 (2022) 261011

M.J.Yan, J.M.Dias, A.Guevara, F.K.Guo, B.S.Zou, Universe 9 (2023) 109

Two dynamical generated a_0 resonances by VV interactions

Z.L.Wang, B.S.Zou, EPJC 82 (2022) 509

$\rho\rho / \rho\omega$ molecules $\rightarrow f_0(1500) / a_0(1450)$

$\bar{K}^*K^*(I=0,1)$ molecules $\rightarrow f_0(1710) / a_0(1710)$

Observation of $a_0(1710-1817) \rightarrow K_s^0 K^+$ in $D_s^+ \rightarrow K_s^0 K^+ \pi^0$ decay

BESIII Collaboration, PRL 129 (2022) 182001

四. 展望

1) 核子结构函数方面 ep

CEBAF12GeV **E_{cm} : ~ 5 GeV**

EIC **E_{cm} : 20 ~ 100 GeV**

EicC@HIAF **E_{cm} : ~ 15 GeV**

also $\bar{c}cuud$, $\bar{b}buud$ pentaquarks & cqq , bqq states

νN experiments

$$\bar{\nu}_{e/\mu} + p \rightarrow e^+/\mu^+ + \pi + \Lambda/\Sigma$$

2) 强子谱方面

$Z_{b/c}$ & P_c 的发现打开了研究多夸克态的窗口,
需要进一步系统的研究

BEPCII/超级 τ -c、BelleII、 $\pi 10/K10@JPARC$ 、LHCb、
ep@JLab、PANDA、EicC、EIC等大有可为

3) 夸克和轻子结构

CEPC、Fcc、ILC、Muon collider、SPPC ... ?

结束语

强相互作用决定了强子、原子核两个物质微观基本层次的结构，也是基本粒子、宇宙天体演化物理的重要组成部分，还有很多待解之谜。

我国大科学装置的发展（BEPCII & HIAF等）、理论和实验的相互配合使我国强相互作用物理的研究走在国际前列，大有可为。

人员短缺，欢迎有志青年加入我们的队伍！

谢谢大家！