

Doctor Curious 36：奇特强子会为强相互作用带来新意吗？

原创 尼加提·亚力坤等 中国科学院理论物理研究所 2022-07-13 09:16 发表于北京

作者简介 /Profile/

尼加提·亚力坤，中科院理论物理研究所2019级博士研究生。

董相坤，中科院理论物理研究所2020级博士研究生。

导师为邹冰松研究员，研究方向为强子物理。

1、引言

在1960年代初，粒子物理学家发现自己进入了一个杂乱的丛林——随着实验仪器和探测手段的发展，人们观测到了大量被称为强子的新粒子。截止1963年，粒子数据表 [1]中已经收录了近百个“基本粒子”，数量如此众多，使得人们很难相信他们都是构成我们宇宙的最基本的粒子。1964年，Murray Gell-Mann 和George Zweig独立地提出了夸克（George Zweig称之为Ace）模型将杂乱的强子丛林梳理得井井有条。他们引入了夸克这种更基本的自由度，已发现的大量强子态分为介子和重子两大类，由上（ u ）、下（ d ）和奇异（ s ）3味夸克以及它们的反夸克构成，其中介子由一对正反夸克组成，而重子由三个夸克组成 [2,3]。进一步的深度非弹性散射实验以及第四味粲夸克的发现进一步确定了夸克的存在。与此同时，描述夸克间相互作用的基本理论——量子色动力学（QCD）——也在70年代被提出并逐渐成熟。

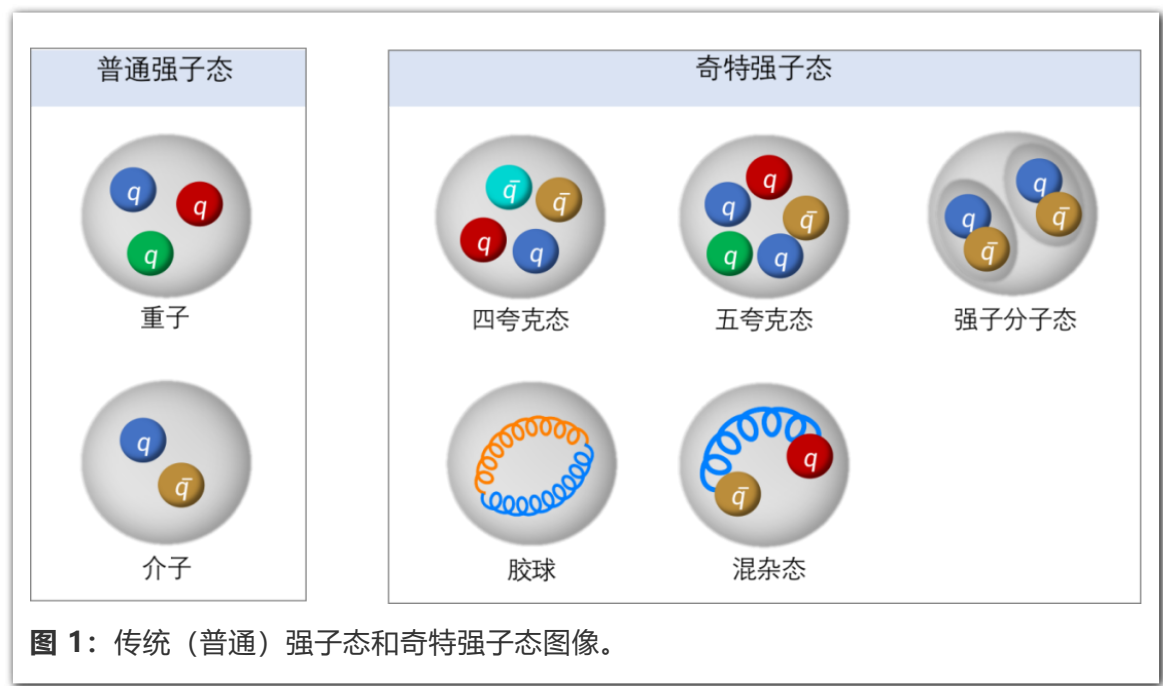


图 1：传统（普通）强子态和奇特强子态图像。

不过需要注意的是，成功对强子进行分类的夸克模型以及QCD并不禁止除了上述的介子和重子（传统强子态）之外的其他强子结构的存在，比如包含更多夸克的多夸克态，包含胶子的混杂态，完全由胶子构成的胶球等等，他们被统称为奇特（exotic）强子态（图1）。经过几十年的搜寻，终于在2003年出现了一个明显有别于传统强子态的粒子， $X(3872)$ ，括号中的数字代表它们以 MeV 为单位的质

里，数十个奇特强子态或是其候选者在世界各地的高能物理实验中被发现。奇特强子态的研究已俨然成为强子物理的研究焦点之一。本文中我们将介绍近二十年来奇特强子态的实验与理论研究进展，及其为我们带来对低能强相互作用的新的理解。

2、强相互作用的基本理论

强相互作用的基本理论是量子色动力学，简称 QCD。类似于电磁相互作用中的电荷，参与强相互作用的每味夸克可以具有红、绿、蓝三种颜色（色荷）。QCD具有色SU(3)规范对称性，此对称性下通过引入规范粒子（胶子）来精确地描述夸克之间的强相互作用。作为基本理论，一个通用的耦合常数 α_s 及每味夸克的质量 m_f 可以完全确定 QCD，这意味着 QCD原则上可以解释强相互作用的所有现象。在高能物理实验中，QCD 通过了严格的测试，赢得了我们的信任。例如，不同类型的实验对强相互作用耦合常数的数百个独立测量结果都可以与 QCD通过重整化群给出的随能标的跑动保持一致。

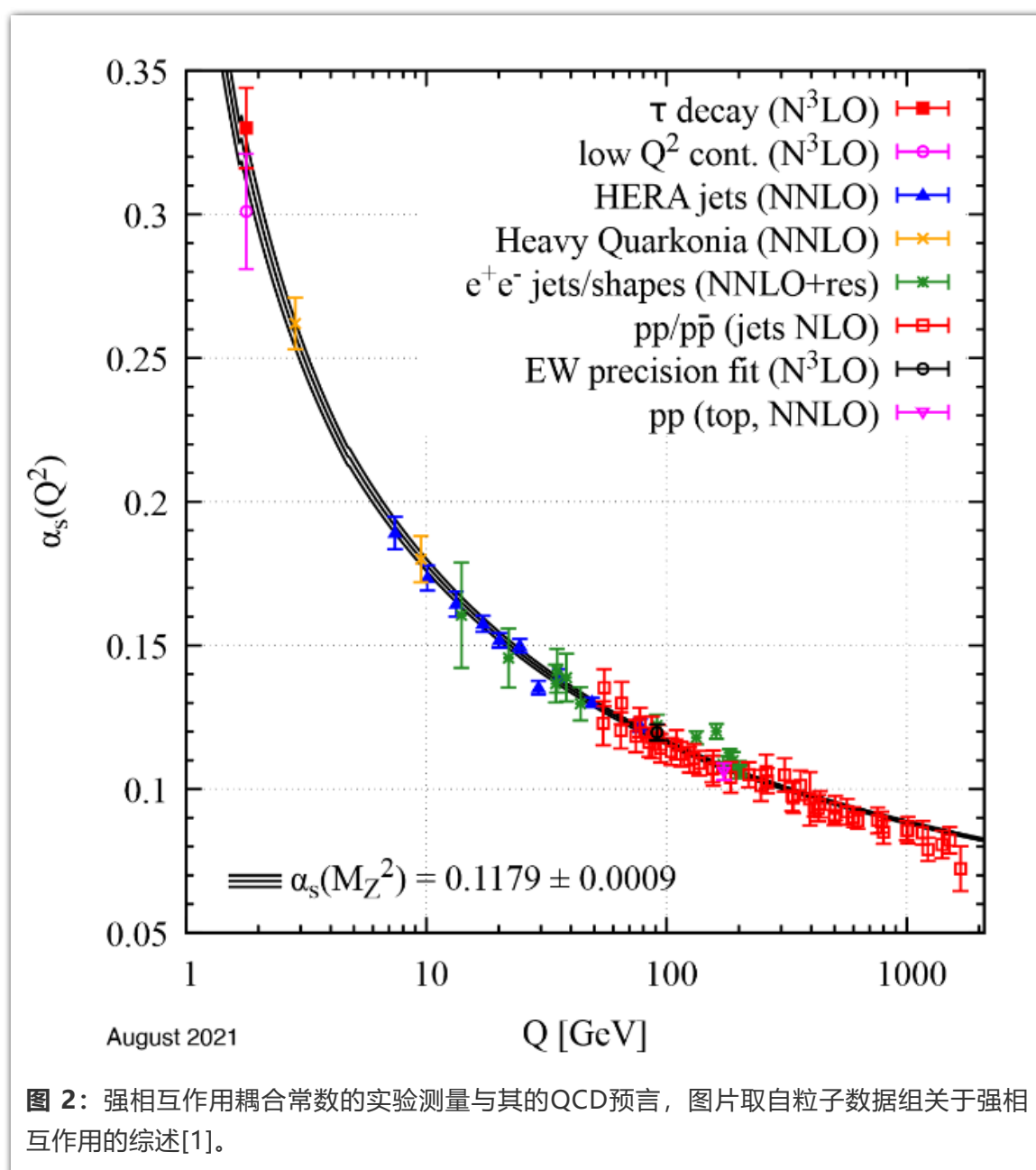


图 2：强相互作用耦合常数的实验测量与它的QCD预言，图片取自粒子数据组关于强相互作用的综述[1]。

QCD具有两个非常重要的性质：渐进自由和夸克（色）禁闭。前者可从图 2中耦合系数随着相互作用能标的跑动看出，即夸克和胶子之间的耦合强度在 高能（短距离）下变小，这意味着夸克在近距离时表现为自由粒子。而后者表现为实验中发现的所有自由的粒子都是无色的（承载颜色SU(3)对称群的单位表示）。

尽管目前我们相信QCD是描述强相互作用的基本理论，但并不意味着我们可以以此出发精确地回答强相互作用的所有问题，这源于QCD低能下非微扰的特性。强子的尺度对应的能标大约是 $\lesssim \Lambda_{\text{QCD}} \sim \mathcal{O}(300) \text{ MeV}$ ，此时 $\alpha_s \sim 1$ ，从而微扰论（ α_s 的幂次展开）不再有效，因此我们很难像描述氢原子中电子的分布那样精确地计算出强子中夸克和胶子的分布。尽管利用基于第一性原理的格点QCD，科学家们可以在超级计算机上得到强相互作用的一些非微扰物理量，但对很多问题，格点QCD仍面临着很大的挑战。因此我们需要一些其他的理论工具，比如有效场论，唯象模型等等来描述强相互作用的低能行为，进而理解实验中看到的现象。

3、夸克模型

夸克模型的提出实际上早于 QCD，正如我们前面提到的，此模型是为了解释当时发现的近百个粒子。夸克模型假设强相互作用中的基本自由度不是我们直接观测到的粒子，而是夸克和反夸克。实验中观测到的粒子应该是两种传统强子结构之一，即 $q\bar{q}$ 介子和 qqq 重子，其组分夸克有五种味道：上、下、奇异、粲和底夸克（顶夸克寿命太短，不能形成强子），它们的自旋可以以多种方式排列，每个夸克也可以处于不同的空间轨道上。通过对夸克的质量及其相互作用做出简单的假设，夸克模型可以定量地估算数百种强子的质量和其它性质。

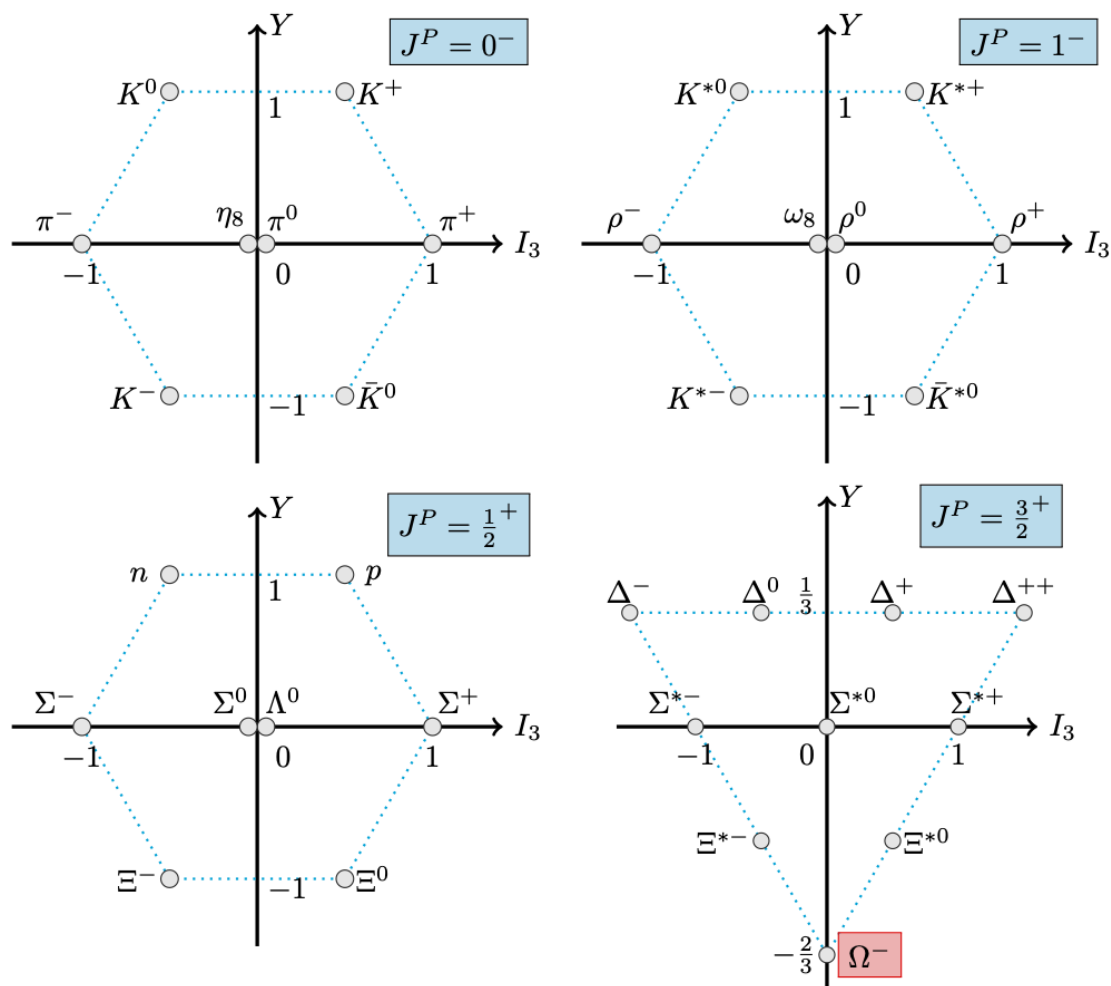


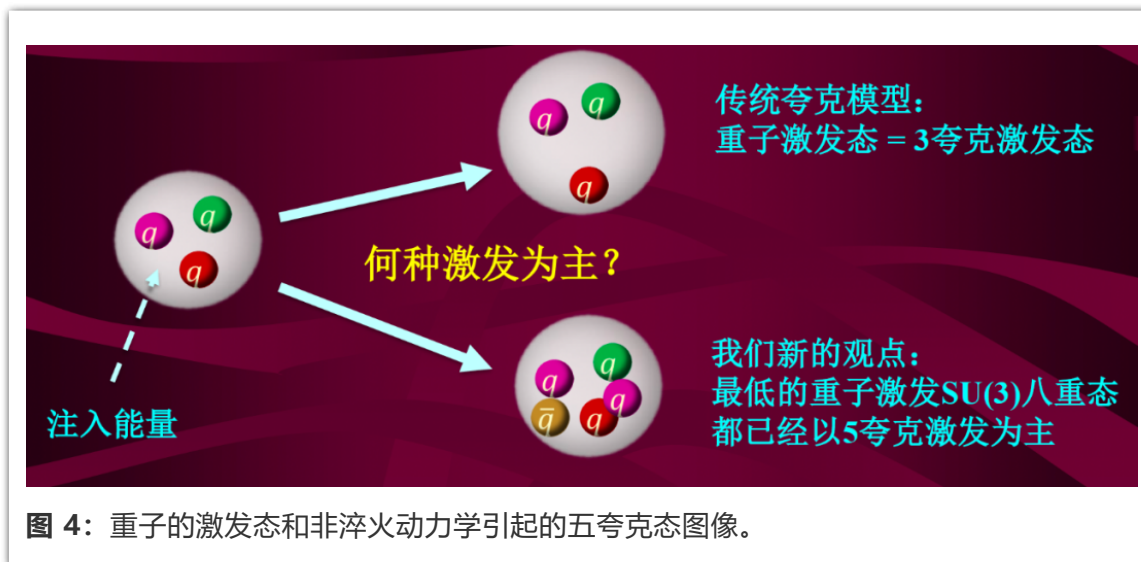
图 3：夸克模型中由三味夸克构成的基态介子和重子。

夸克模型可以把广阔的丛林修剪成一个易于管理的花园，但该模型中相互作用与底层的 QCD 理论并没有直接的联系。作为一种严格的量子场论，QCD 指出强子内部的夸克和胶子自发辐射不断地产生胶子和夸克对。夸克模型掩盖了这个深层的结构，当我们通过用电子轰击质子时，我们发现质子含有大量的胶子和轻夸克-反夸克对。即使我们忽略这些量子涨落，只考虑色禁闭的要求，像四夸克态和五夸克态这样的新植物也必然在强子丛林中出现。

4、淬火 (quenched) 与非淬火 (unquenched)

强子物理学的主要目标之一是了解强子基态和激发态的有效自由度。夸克模型和 QCD 理论指出，在最底层，强子的这些有效自由度是夸克和胶子。尽管在格点 QCD 方面取得了进展，但非微扰区域计算强子谱仍然是一个艰难的问题。因此，一些夸克层面的唯象模型，如组分夸克模型，通过模仿 QCD 在低能区域的非微扰行为来描述强子结构。它们可以比较好地描述基态的强子，但对激发态预言与实验观测吻合得较差 [4]。例如，对于非奇异轻重子激发态 N^* 和 Λ^* ，其质量的理论预言和实验观测不符：组分夸克模型中（该模型也被称淬火的夸克模型，淬火是指向强子注入能量，内部夸克能级升高，但并不会产生新的 $q\bar{q}$ ，因此强子的激发态仍是纯的 $q\bar{q}$ 和 qqq ，而不会出现多夸克态的成分），自旋-宇称为 $J^P = 1/2^-$ 的轨道激发态 N^* 低于 $J^P = 1/2^+$ 的第一个径向激发态 N^* ，而实验观测的 $N^*(1535)$ ，量子数为 $J^P = 1/2^-$ ，其质量高于

$J^P = 1/2^+$ 的 $N^*(1440)$ 。对于轻标量介子 $f_0(500)$ 和 $a_0(980)$ ，在组分夸克模型中，他们是基态赝标量介子的第一轨道激发态，其夸克组分分别为 $(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$ 和 $(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$ ，因此它们的质量应该近似简并，但实验观测的 $a_0(980)$ 的质量与 $f_0(980)$ （被认为由 $s\bar{s}$ 构成）接近而非预期的 $f_0(500)$ 。在粲偶素 $c\bar{c}$ 领域，2003年以来实验发现的大量被称为 X, Y, Z 的奇特强子态(或其候选者)，比如 $X(3872)$ ，不能用传统夸克模型的 $c\bar{c}$ 激发态来解释。这些结果表明，在传统的 $q\bar{q}$ 介子和 qqq 重子态波函数中，必须考虑非淬火动力学引起的额外产生的 $q\bar{q}$ 成分，尤其是高能量的激发态。非淬火动力学的主要思想是当夸克间距被拉长时（对强子注入能量来实现），真空会被极化，进而产生新的正反夸克对，注入的能量转化为强子质量。



这种非淬火动力学的引入可以帮助我们更好地理解强子激发态以及奇特强子态。比如实验中观测到的 $N^*(1535)$ ，更可能是价夸克为 $uuds\bar{s}$ 的五夸克态而非核子的第一轨道激发态 [5]。而标量介子 $f_0(980)$ 作为 $\pi\pi$ 相互作用产生的共振态，其质量自然与作为 $K\bar{K}$ 强子分子态的 $f_0(980), a_0(980)$ 相去甚远。在粲偶素能区， X, Y, Z 粒子的能量相对于基态粲偶素的能量差 $\sim \mathcal{O}(1 \text{ GeV})$ ，其中不可避免地会产生新的 $q\bar{q}$ 价夸克对，进而变成多夸克态。诸此种种，近些年来实验中涌现出来的与传统淬火夸克模型不符的强子态都预示着非淬火动力学在强子谱研究中的必要及重要性。

5、强子分子态

上节提到，强子，尤其是其激发态中，会不可避免地产生新的正反夸克对，这是大部分领域内人士的共识。但目前争议比较大的是，这些多夸克态的内部结构是什么：紧致得多夸克态还是弱束缚的强子分子态？

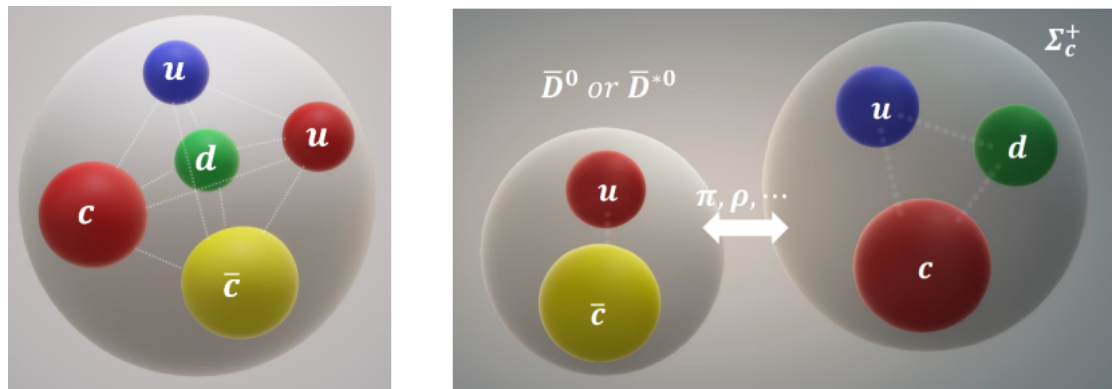


图 5: P_c 态的紧致五夸克态 (左) 和强子分子态 (右) 图像

强子分子态是由两个或者多个强子构成的系统。这样的系统最早可追溯到氦核。1932年中子被实验发现之后不久，氦核也被发现，并且其质量小于质子和中子系统的阈值仅 2.2 MeV。作为一个强子复合系统，且其尺度（约 4.3 fm）较传统强子（ ~ 1 fm）大。这种松散、近阈特点是强子分子态的重要标志。1947年，Yukawa于1935年提出的传递核力的粒子—— π 介子在宇宙线中被发现；同一年，另外一个粒子—— K 介子也被发现了。从此，在实验中寻找更多像氦核一样的强子复合系统是科学家们的一个愿望。1959年Dalitz和段三复预言了强子分子态 $\bar{K}N$ ，两年后 $\Lambda(1405)$ 被实验观测到 [6]，可作为 $\bar{K}N$ 强子分子态的候选者。夸克模型提出之后， $\Lambda(1405)$ 被解释为三夸克构成的 P 波激发态。但是这种解释存在一个显著的难点：尽管 $\Lambda(1405)$ 包含 s 夸克，但其的质量显著的低于同类型的不含 s 夸克的核子激发态 $N^*(1535)$ 。

近二十年来，实验上发现了大量含有正反重夸克对的粒子（ X, Y, Z 粒子）、双粲四夸克态（ T_{cc} ），隐粲五夸克态（ P_c, P_{cs} ）等等。这些粒子大部分具有一个很明显的特征——它们的质量非常接近于某对可以与之耦合的传统强子的阈值，这是强子分子态的典型特征 [7,8]。例如隐粲五夸克态 $P_c(4312), P_c(4440)$ 和 $P_c(4457)$ 的质量与 $\bar{D}\Sigma_c, \bar{D}^*\Sigma_c$ 阈值很近，类粲偶素 $X(3872)$ 与 $D\bar{D}^*$ 的阈值、双粲四夸克态 T_{cc} 与 DD^* 的阈值几乎重合等等。这种质量的“巧合”是很难用紧致多夸克态来解释的。在最近的文献 [9,10] 中，通过简单的相互作用模型，作者们估计了大量粲-粲，粲-反粲强子对形成的强子分子态的能谱，他们发现目前实验中观测到的典型的奇特强子态的质量都与文章的结果吻合。由此看来，考虑非淬火动力学机制之后，强子内部产生的正反夸克对更倾向于与已有的夸克形成无色的集团进而通过强相互作用的剩余相互作用形成强子分子态，而非形成紧致的多夸克态。

6、结语

虽然QCD作为强相互作用的基本理论，主宰着夸克、胶子的行为，但是目前我们还无法直接从QCD出发精确地描述强子内部的夸克和胶子的行为。传统夸克模型可以比较好地描述基态强子结构，但一些强子激发态，尤其是近二十年来发现的大量奇特强子态及其候选者，不能从淬火夸克模型中得到满意的解释，因此需要引入非淬火的机制，即考虑多夸克态图像 [11]。另一方面，现实中这些多夸克态的实验结果大多支持强子分子态的图像，即两个色单态的强子通过强相互作用的剩余相互作用形成类似于氦核的浅束缚

态。我们有理由相信，随着各大高能实验的进一步探索，越来越多的奇特强子态会被发现，这将为我们揭示更多的非微扰QCD的特征，为我们理解宇宙的基本相互作用提供重要的支撑。

致谢

非常感谢理论物理研究所郭奉坤研究员和中国科学院大学吴佳俊副教授认真校阅本文并提出宝贵的修改建议。

参考文献

- [1] M. Roos, Tables of Elementary Particles and Resonant States, Rev Mod Phys 35, 314 (1963).
- [2] M. Gell-Mann, A Schematic Model of Baryons and Mesons, Phys Lett 8, 214 (1964).
- [3] G. Zweig, An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking. Version 1, (1964).
- [4] P. A. Zyla and others, Review of Particle Physics, PTEP 2020, 083C01 (2020).
- [5] B. C. Liu and B. S. Zou, Mass and Λ Coupling of $N^*(1535)$, Phys Rev Lett 96, 042002 (2006).
- [6] R. H. Dalitz and S. F. Tuan, A Possible Resonant State in Pion-Hyperon Scattering, Phys Rev Lett 2, 425 (1959).
- [7] F.-K. Guo, C. Hanhart, U.-G. Meißner, Q. Wang, Q. Zhao, and B.-S. Zou, Hadronic Molecules, Rev Mod Phys 90, 015004 (2018).
- [8] H.-X. Chen, W. Chen, X. Liu, and S.-L. Zhu, The Hidden-Charm Pentaquark and Tetraquark States, Phys Rept 639, 1 (2016).
- [9] X.-K. Dong, F.-K. Guo, and B.-S. Zou, A Survey of Heavy-Antiheavy Hadronic Molecules, Progr Phys 41, 65 (2021).
- [10] X.-K. Dong, F.-K. Guo, and B.-S. Zou, A Survey of Heavy-Heavy Hadronic Molecules, Commun Theor Phys 73, 125201 (2021).
- [11] B.-S. Zou, Building up the Spectrum of Pentaquark States as Hadronic Molecules, Sci Bull 66, 1258 (2021).