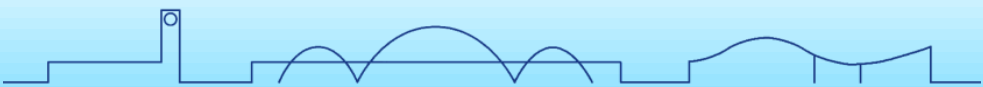


# 强子物理理论研究进展

吴佳俊（中国科学院大学）

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会 2022.8.8 online



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

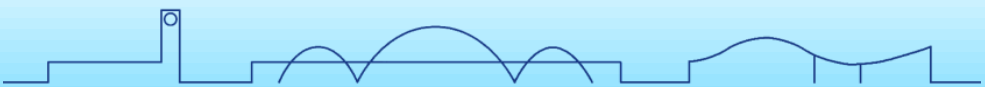


# 强子物理理论研究进展

吴佳俊（中国科学院大学）

本会议是两年一次，由于疫情2020的会议是在去年举行，去年**华南师范大学王倩教授**也给了相同题目的报告。所以我主要介绍在最近一年国内科研人员在该方向上参与的相关工作，如有遗漏，请批评指正。

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会 2022.8.8 online

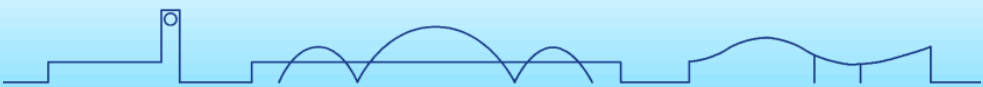


中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences



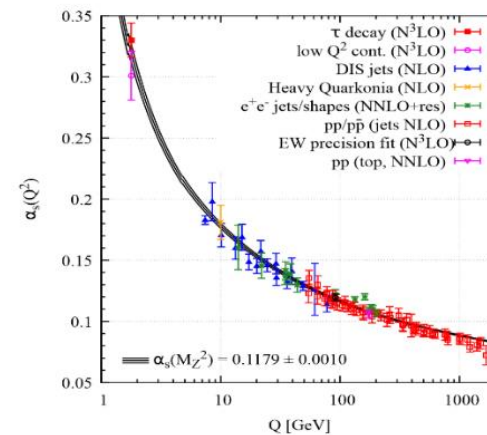
# 目录

- 强子物理介绍
- 新文献小结
- 进展小结
- 个人的思考
- 总结和展望



# 强子物理介绍

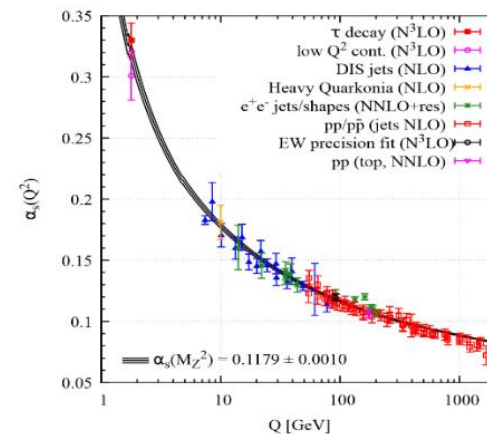
- 强相互作用的基本理论是量子色动力学—QCD。
- QCD理论的基本单元是夸克和胶子。
- 由于低能区的强耦合，单独的夸克和胶子不可见，由夸克和胶子形成的无色集团，是强相互作用中**最小的可见粒子**，统称为**强子**。
- 强子物理是以这些强子为研究对象的学科。



# 强子物理介绍

- QCD在低能区的强耦合导致夸克禁闭和非微扰特性。
- 因此无法从夸克和胶子的QCD拉氏量直接得到强子的性质。
- 强子的基本构成是夸克和胶子，如何构成**未知!**
- 强子间的相互作用是强相互作用，相互作用的细节**未知!**
- 强子物理的理论问题去理解

**“强子反应，强子能谱，强子结构”**



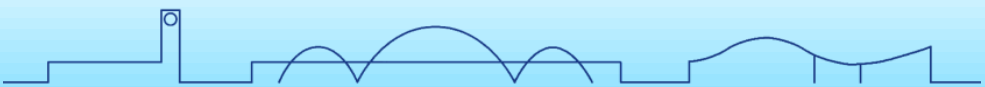
# 强子物理介绍

主要内容：强子反应，强子能谱，强子结构

强子反应：通过对衰变和散射的理论计算预言或者拟合实验数据。

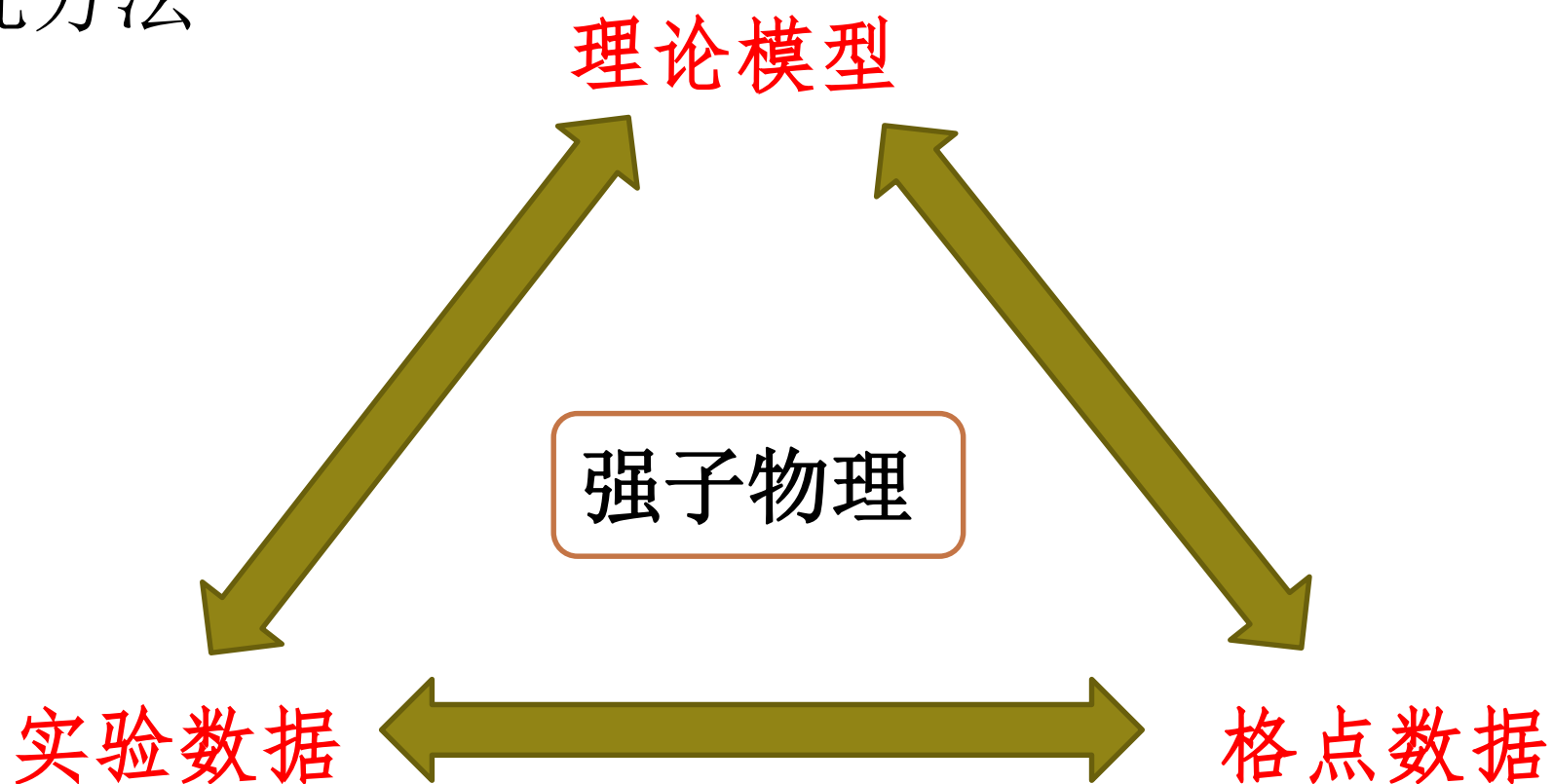
强子能谱：对强子质量谱给出系统性的解释，以期得到强子内部信息。这就好比通过元素周期表可以预示原子的内在结构。

强子结构：直接研究稳定强子的部分子分布，以及各种形状因子和质量的构成。



# 强子物理介绍

基本的研究方法



# 新文献小结

2021年1月到2022年8月，国内单位的同仁投稿arXiv的强子物理相关的文章近**500**篇。基本的分布是，

轻强子研究：一共108篇文献

部分子，质量，电磁形状因子的研究：53篇

轻强子谱学的研究：30篇

轻强子相关反应的研究：25篇

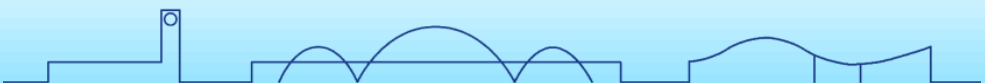
含有重味强子的研究：342篇

利用重味强子电弱衰变的研究：93篇

对传统量子数的强子态的研究：58篇

对奇特态的研究：191篇

理论方法研究：29篇





# 新文献小结

轻强子研究：一共有文献108篇，大致分成以下几个方面：

## 部分子，质量，电磁形状因子的研究：一共53篇文章

1. C.D.Roberts课题组和常雷课题组利用DS方程对质子， $\Delta$ 和 $\pi$ 的部分子分布及成分进行研究(16篇)，[2203.12083](#), [2108.02306](#), [2203.00753](#), [2108.11493](#), [2106.08451](#), [2109.08768](#), [2201.00884](#), [2102.01765](#), [2201.07870](#), [2204.05418](#), [2206.12518](#), [2103.02054](#), [2102.12568](#), [2207.13811](#), [2101.08340](#), [2207.04339](#)
2. 陈旭荣课题组以及谢亚和王荣课题组研究了质子的质量半径部分子分布，[2108.12807](#), [2103.10017](#), [2201.08535](#), [2104.12962](#), [2102.01610](#), [2108.03550](#)，和史潮课题组研究了光前波函数下的基态赝标介子并给出他们的部分子分布，[2108.10625](#)，和谢聚军课题组，王凡课题组研究了非相对论中的 $\pi$ 的部分子函数，[2204.06798](#)
3. 梁作堂课题组研究了 $e+e$ -湮灭超子横向纵向极化和 $3/2$ 自旋粒子的单举半单举产生，[2108.07740](#), [2206.11742](#)
4. 马伯强课题组研究了TMD，光锥量子场论下的 $\gamma\pi$ 形状因子和质子中的奇异夸克成分，[2110.14070](#), [2207.04074](#), [2109.06854](#)
5. 王平课题组研究了GPD，超子核子电磁形状因子以及依赖于螺旋度的奇异夸克分布，[2202.00266](#), [2110.13089](#), [2206.09361](#), [2203.06628](#)
6. 谢聚军，安春生和李刚课题组合作基于夸克模型研究了质子等重子八重态的轴荷，超子核子电磁形状因子，[2205.14419](#), [2112.06264](#), [2106.00866](#), [2107.10499](#)
7. 赵行波课题组基于光前哈密顿方法研究了GPD等一系列核子结构相关问题，[2202.00985](#), [2107.02225](#), [2108.03909](#), [2108.03905](#), [2208.00355](#) (和刘翔课题组合作)
8. 曹须和代建平课题组研究了类时核子电磁形状因子，[2109.15132](#)
9. 陈云华研究了在 $\pi$ 矢量形状因子中的 $\rho$ - $\omega$ 混合，[2205.14656](#)
10. 平加伦课题组研究了NJL模型中 $\rho$ 的GPD，[2204.14032](#)
11. 刘尊课题组在光锥夸克模型下研究 $\pi$ 介子的自旋和轨道角动量关联，[2110.08502](#)
12. 梁剑课题组和国外合作的联通和非联通海部分子贡献，[2108.06768](#)
13. 刘柳明，杨一玻，梁剑课题组基于格点QCD计算了核子的同位旋矢量标量荷，[2103.12933](#)
14. 王伟，孙鹏，杨一玻，张其安，张建辉课题组和国外合作者在格点QCD下计算 $\pi$ 和K的光锥分布振幅，[2201.09173](#)
15. 杨一玻和张建辉课题组基于格点QCD计算了横动量依赖的部分子部分，[2205.13402](#)
16. 杨一玻和孙鹏课题组QCD迹反常和强子质量起源，[2101.04942](#)
17. 高俊课题组利用机器学习研究部分子分布，[2201.06586](#)
18. 龙炳蔚课题组研究氘核形状因子，[2205.02000](#)
19. 王晓云课题组研究质子质量半径，[2206.11644](#)
20. 张印杰课题组研究nPDF的核效应和初态部分子能量丢失对Drell-Yan过程的核修正，[2101.11248](#)
21. 王玉明课题组利用NNLO QCD预言 $\pi$ 和光子的形状因子，[2106.01390](#)

轻强子谱学的研究：30篇文献

轻强子相关反应的研究：25篇文献

文章排名不分先后，作者名字只提取了我查到具有固定教职的老师，有多位老师时尽可能罗列了，作者排名完全随机。



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# 新文献小结

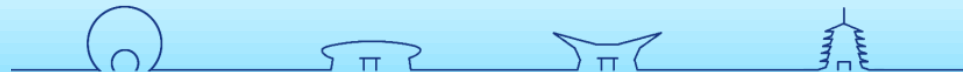
轻强子研究：一共有文献108篇，大致分成以下几个方面：

部分子，质量，电磁形状因子的研究：53篇文献

轻强子谱学的研究：一共30篇文章

1. 邹冰松课题组利用耦合道分析对 $a_0(1855)$ ,  $f_1(1710)$ 的性质进行研究, 2203.02899, 2202.00863, 2107.14470
2. 朱世琳和陈华星课题组和刘翔课题组都研究了 $\eta_1(1855)$ , 2202.04918, 2205.09283, 他们还和陈伟课题组研究了 $a_0(1817)$ , 2204.13092
3. 乔从丰课题组也研究了 $\eta_1(1855)$ , 和轻重子-反轻重子系统, 2203.14014, 2109.07130
4. 赵强课题组对轻混杂九重态进行研究, 2202.00904, 和陈莹合作研究强子圈对 $\eta$ 和 $\eta'$ 激发态的贡献, 2106.12483
5. 郑汉青课题组对轻 $1/2$ -九重态重子谱研究, 2203.03747
6. 李德民和王恩课题组 $\rho$ 介子激发态以及 $K_0(1950/2130)$ 进行研究, 2102.05356, 2206.10132, 2203.17082
7. 孙宝玺课题组研究赝标和重子九重态在 $S=-2$ 时的相互作用, 2111.10579
8. 平加伦课题组从手征夸克模型研究 $\Omega(2012)$ 粒子, 2207.05598
9. 戴凌云和秦文课题组对 $X(2370)$ 进行研究, 2110.08827
10. 沈彭年和董宇兵课题组研究了 $d(2380)$ 的性质, 2205.11712
11. 康现伟课题组研究了 $a_0(980)$ 和 $f_0(980)$ 的性质, 2201.00492
12. 肖楮文课题组研究了 $\Lambda(1405)$ 的性质, 2106.10511
13. 耿立升课题组含有两个反奇异数的双重子态研究, 利用格点数据研究NN相互作用, 2201.04997, 2105.06113
14. 谢聚军课题组和国外研究者合作研究了KKKbar系统, 2107.03168
15. 魏科伟冯学超课题组研究了介子九重态的同位旋标量混合角, 2205.05260
16. 秦思学课题组对in-hadron condense的分波分析研究了 $\pi(1300)$ 和 $\rho(1450)$ 的性质, 2205.05981
17. 郭志辉基于大 $N_c$ 展开研究轻介子共振态, 2109.14240
18. 陈华星陈伟课题组合作研究了 $N\Omega$ 系统2103.09739
19. 冯旭课题组利用格点计算 $\pi$ 介子质量劈裂, 2108.05311
20. 孟杰, 吕岩, 童辉课题组研究了双重子态的格点算符, 2102.00181, 2201.02782

轻强子相关反应的研究：25篇文献



# 新文献小结

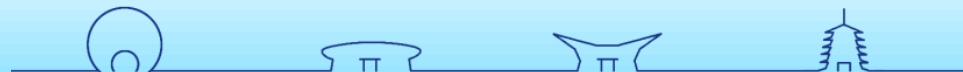
轻强子研究：一共有文献108篇，大致分成以下几个方面：

部分子，质量，电磁形状因子的研究：53篇文献

轻强子谱学的研究：30篇文献

轻强子相关反应的研究：一共25篇文章

1. 黄飞课题组对 $\gamma N$ 过程的各种末态有系统性研究（7篇），  
2201.06831, 2201.10778, 2111.01368, 2204.13922, 2105.00186, 2102.10404, 2101.08988(和李德民合作)
2. 刘占伟利用HEFT对格点数据的分析对 $\gamma N \rightarrow \pi N$ 过程进行了研究，2201.11555
3. C.D.Roberts课题组对电生过程的矢量介子产生VMD进行研究。2107.03488
4. 耿立升课题组对超子的弱光辐射进行研究。2206.11773
5. 郑汉青课题组用Manifestly 洛伦兹不变的重子手征微扰就算了辐射修正 2112.06230
6. 刘翔课题组对 $e+e^-$ 湮灭中的矢量介子产生过程研究，2207.00267, 2201.06393, 2106.14582
7. 梁伟红和国外合作者对 $K_1(1279) \rightarrow \pi K_0^*(1430)$ ,  $a_1(1200) \rightarrow \pi f_0(980)$ 研究 2105.11768, 2107.074439
8. 郭奉坤和国外合作组对  $aN \rightarrow \pi N$ 过程进行了研究，2202.00268
9. 郭志辉，周智勇课题组基于格点数据对 $\pi\pi$ 散射的分析，2202.03124
10. 龙炳蔚合作组基于手征有效场论研究了NN散射，2203.06840, 2207.04241
11. 孟杰，耿立升合作组基于相对论手征有效场论研究精确计算NN相互作用到NNLO，2111.07766
12. 戴莲蓉和国外合作者研究了在 $K^-d \rightarrow p\Sigma^-$ 中的涉及 $\Lambda(1405)$ 的三角奇异性贡献，2105.09654
13. 周海清课题组在小 $t$ 时研究 $ep \rightarrow en\pi^+$ ，2203.14570
14. 赵强和陈莹课题组研究三角奇异性对轴矢介子和 $K^*K$ bar的耦合，2206.05211
15. 黄英课题组研究 $\Xi(1620)\Xi(1620)$ 的辐射衰变，2101.02872



# 新文献小结

重味强子弱衰变相关反应的研究：一共94篇文章，主要方法是PQCD计算

1. C.D.Roberts课题组对重夸克轻夸克介子的半轻衰变, 2103.15964, 2104.10261, 2111.06473
2. 程山课题组研究B衰变, 2207.04190, 2109.00664, 2102.04691, 与秦溱和于福升合作Ds\*弱衰变, 2203.06779
3. 周锐课题组研究B, Bs和 $\Lambda_b$ 弱衰变, 2103.00642, 2107.13882, 2206.04501, 2202.09181, 2107.10684(肖振军合作),
4. 赵振兴课题组利用QCD sum rule 研究 $\Lambda_b$ 和 $\Xi_c$ 衰变, 2103.09436, 2101.11874
5. 张志清课题研究B介子和含粲介子的衰变, 2207.02043, 2105.02688, 2203.04561
6. 吕才典课题组和王玉明, 沈跃龙, 朱瑞林等研究B衰变, 2106.13855, 2204.0681, 2101.01344, 2202.08073, 2204.04357
7. 吴兴刚课题组研究了Bc,D,Ds衰变以及 $\chi_c \rightarrow \gamma\gamma$ , 2112.1052, 2107.08405, 2107.02758, 2104.00180, 2205.1547 (与王国利合作), 2105.13210
8. 孙俊峰课题组研究了介子的纯轻衰变, 以及 $\eta_c(1s), Y(1s), J\psi, D^*, Ds^*$ 到两介子摩天的衰变, 2109.05650, 2101.10607 (与房双世合作), 2101.00549, 2102.03580, 2207.10277, 2204.06694
9. 于福升课题组研究了含粲重子的衰变, 2101.12019, 2208.01589, 与肖振军合作Bbc衰变和 $\Lambda_b$ 衰变, 2102.00961, 2202.04804, 与刘翔合作 $\Lambda_{bc}$ 衰变, 2104.04962
10. 余先乔课题组研究了Bs的衰变, 2108.06447, 2202.05172, 2207.13228
11. 王国利课题组研究了B, Bc和D(2300)的衰变以及Bc的质量谱和波函数, 2207.12069, 2103.12921, 2203.04171, 2201.02318
12. 王伟课题组研究了研究了D,  $\Lambda_b$ 和三重味重子的衰变, 2105.06207, 2203.13524, 2203.14446
13. 李营, 沈跃龙, 李润辉课题组研究了B和Bs介子和 $\Lambda_b$ 衰变, 2103.145031, 2111.04235, 2108.06942, 2205.05528, 2107.11079, 2206.12189, 14. 贾宇课题组研究了光生过程, 2207.14171, 和桑文龙合作研究了用NNLO QCD计算Jpsi- $\chi_c$ 产生, 2202.11615, 和桑文龙, 冯峰合作研究了NLO QCD 对重夸克碎裂到 $^1S_0^{(1,8)}$ 夸克偶素过程, 2106.02027
14. 格点QCD相关计算, 冯旭, 刘川课题组 研究 $\eta_c, \chi_{c0}$ 到两光子过程2109.09381, 2111.00768, 吕才典, 张其安, 王伟, 杨一玻, 孙鹏等合作研究了 $\Xi_c$ 的半轻衰变2103.07064, 陈莹, 宫明, 刘朝峰等合作研究了 $J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma$ 的衰变宽度2206.02724
15. 还有27篇相关文献由于篇幅仅仅罗列如下, 鲍守山2208.00557, 何小刚2112.10556, 胡晓会2202.07540, 黄明球2204.00409, 2201.03802, 黄英2107.03773, 蒋军2206.06123, 李新强2104.04942, 卢龙生2108.11700, 吕齐放2106.11045, 乔从丰2105.12066, 王玉明-秦溱-沈跃龙2207.02691, 孙浩2104.01047, 2204.03924, 2208.00557, 孙延军2102.12241, 孙嶷2107.02047, 2206.05965, 王文飞2111.12307, 王玉明2112.12674, 徐繁荣2204.03149, 张鸿飞2109.15223, 2110.10268, 张其安2108.06110, 赵强-王倩2111.14111, 王迪2207.11053, 2204.05915, 王建雄2204.02331, 肖楮文2110.05359, 2112.14165, 李学潜-柯红卫-刘晓海2106.07013





# 新文献小结

传统重味强子的研究：一共**58篇**文章，主要方法是各种夸克模型  
利用重味强子衰变研究轻强子：

- 1.戴莲蓉，耿立升课题组利用 $D_s^+ \rightarrow \pi^+ K_S^0 K_S^0$ 研究 $f_0(1710)$  [2111.10230](#)
- 2.李德民，王恩课题组利用 $D_s^+ \rightarrow \pi^+ K^+ K^-$ 研究 $a_0(980)$ 和 $f_0(980)$  [2105.04907](#)
- 3.梁伟红课题组和国外合作者利用 $\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^0 \eta$ 和 $D_s^+ \rightarrow a_0(980) e^+ \nu_e$ 研究 $a_0(980)$ 和 $f_0(980)$  [2203.13786](#), [2109.08405](#) 利用 $\Omega_c \rightarrow \pi^+ \Omega$ 研究 $\Omega(2012)$  [2204.13396](#)
- 4.张振华课题组研究用 $\pi^0 - \eta - \eta'$ 解释 $B \rightarrow K\pi$ 中的 $K\pi$ 反常 [2112.01878](#)
- 5.马爱军和王文飞利用 $B \rightarrow DKK$ 研究 $f_0(1450/1710)$  [22001.06881](#)
- 6.肖楮文和孙志峰课题组利用 $D_s^+ \rightarrow \pi^+ K^+ K^-$ 研究相关的共振结构 [2109.00153](#)
- 7.谢聚军和耿立升合作利用 $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta$ 研究 $a_0(980)$  [2102.05349](#)，他们还和王恩合作利用 $\Lambda_c^+ \rightarrow \eta \Lambda \pi^+$ 研究 $a_0(980)$ ， $\Lambda(1670)$ ， $\Sigma(1385)$  [2203.13786](#)，还和王恩，李德民合作利用 $D_s^+ \rightarrow \pi^+ K_S^0 K_S^0$ 研究 $f_0(1710)$  [2204.09384](#) 谢聚军和钟显辉合作利用 $\Omega_c \rightarrow \pi^+ \Omega$ 研究 $\Omega(2012)$  [2203.04458](#)

## 非夸克偶素重味介子：

- 1.钟显辉课题组研究了 $B$ 和 $B_s$ 谱学 [2102.03694](#)
- 2.张振华课题组研究了 $D_{(s)}^*$ 的电磁衰变的达利兹分析 [2111.04932](#)
- 3.王国利和刘玉斌合作研究了 $D_{s0}(2590)$  [2107.01751](#)
- 4.庞成群利用修正Rovibrational模型研究含 $b$ ， $c$ 夸克的介子谱 [2207.06752](#)
- 5.乔从丰和王国利合作寻找 $B_c(3s)$ 信号 [2101.01958](#)

## 含 $b$ 夸克的重子：

- 1.吕齐放和董宇兵合作研究了 $\Xi_b$  [2102.07391](#)， $\Xi_b(6100)$  [2205.07224](#)
- 2.钟显辉课题组研究了 $\Xi_b(6327, 6333)$  [2202.05426](#)
- 3.陈华星课题组 $\Xi_b(6100)$  [2205.07224](#)
- 4.刘翔课题组研究 $\Omega_b$  [2110.02481](#)
- 5.王志刚课题组利用QCD sum rule系统计算 $\Xi_{bc}$ 谱 [2202.03828](#)
- 6.秦臻，朱瑞林，于福升和王国利合作研究 $\Xi_{bc}$  [2108.06716](#)
- 7.赵光达，马滢青合作研究 $\Omega_{QQQ}$  [2104.07384](#)
- 8.谢聚军，邓成荣，安春生，李刚合作研究 $\Omega_{cc}$  [2110.06408](#)

## 格点的计算

陈莹和刘朝峰，宫明合作研究了 $\eta_c$ 中的胶子成分 [2107.12749](#)，湮灭图对粲偶素质量的贡献 [2110.01755](#)

## 粲，美夸克偶素介子：

- 1.刘利娟美夸克偶素在 $3P_0$ 下的能谱 [2205.07169](#)
- 2.刘翔Y(10753)的相关研究 [2106.14123](#)，[2205.04049](#)，[22021.12715](#)
- 3.乔从丰和赵光达合作研究 $\gamma^* \rightarrow Q\bar{Q}$ 雷吉顶点的NLO QCD 修正 [2201.09007](#)
- 4.刘翔课题组研究高分波粲偶素 [2107.14438](#)，研究从 $B \rightarrow D\bar{D}K$ 确定 $\chi_{c0}(2p)$ 态 [2104.09132](#) 粲偶素衰变到 $\Lambda_c \bar{\Lambda}_c$  [2104.12370](#)，和平荣刚合作研究 $\chi_{cJ} \rightarrow \phi\phi$  [2102.07104](#)
- 5.谢亚平课题组研究 $J/\psi$ 和 $\Upsilon$ 的光生阈产生 [2103.12568](#)
- 6.许晓明课题组 $\psi(4040, 4160, 4415)$ 在强子物质中的产额 [2202.05999](#)
- 7.陈旭荣课题组研究光生介子产生 [2205.02396](#)
- 8.乔从丰课题组研究 $\gamma\gamma$ 的重味赝标介子产生 [2203.14204](#)
- 9.孙鹏课题组研究了大动量转移时的重夸克偶素的光生 [2103.12047](#)
- 9.吴兴刚课题组研究 $e^+e^- \rightarrow \eta_c + J/\psi$  [2102.01842](#)
- 10.苑长征课题组研究 $e^+e^- \rightarrow p\pi\bar{p}$ 末态产生的线形对 $\psi(3770, 4230)$ 的约束 [2206.11536](#)
- 11.邹冰松和吴佳俊课题组利用 $\psi \rightarrow B\bar{B}$ 的分波研究其反应半径 [2104.09908](#)

## 只含 $c$ 夸克的重子：

- 1.陈华星课题组利用QCD sum rule计算 $p$ 波单粲重子能谱 [2106.15488](#)
- 2.王志刚课题组利用QCD sum rule系统计算单重 $S = -1/0$ 的重子谱 [2206.08128](#)，[2207.04167](#)
- 3.钟显辉课题组研究了最低 $P$ 波 $\Sigma_c$ 谱 [2110.12443](#)
- 4.杜孟林和合作者研究 $\Lambda_c(2625)$ 的衰变 [2207.02109](#)
- 5.刘翔课题组研究 $\Lambda_c(2860)$  [2110.12441](#)，单重重子的质量差 [2101.10806](#)
- 6.吕准课题组研究 $\Lambda_c$ 的电磁形状因子 [2102.03092](#)
- 7.黄英研究 $\Xi_c(2923)$  [2112.0413](#)
- 8.耿立升研究了 $\Xi_{cc}$ 的磁动量 [2103.07260](#)

另外，陈慕杨课题组通过DS和BS方程研究了标量，轴矢，径向激发重介子谱 [2106.08782](#)，[2105.03063](#)



# 新文献小结

奇特态强子的研究：一共191篇文章，主要方法是各种夸克模型

## 胶球以及混杂态的研究，4篇

1. 陈莹和杨一玻课题组合作研究了 $\eta$ 和胶球的混合2205.12541  $J/\psi$ 辐射衰变到 $1^-+$ 杂混态粒子2207.04694,
2. 朱世琳, 陈伟和陈华星课题组利用QCD sum rule研究了双胶子三胶子胶球系统2107.05271, 2103.17201

## 两个重子态的研究，14篇

1. 耿立升课题组研究了 $\Omega_{bbb}\Omega_{bbb}$ 和 $\Sigma_c\Sigma_c$ 2107.04957, 2110.13792
2. 郭建友和李刚课题组利用complex scaling method研究了双重强子系统2109.01259
3. 刘翔, 刘占伟课题组研究了 $qqc\bar{q}\bar{q}\bar{c}$ 系统2112.02510
4. 平加伦, 黄虹霞课题组研究了双重味双重子系统2105.14723
5. 王志刚课题组利用QCD sum rule研究了多种双重子系统2109.02217, 2107.04751, 2104.03103, 2110.14133, 2201.02955
6. 朱世琳课题组研究了 $\Sigma_c\Sigma_c$ 和全双重子系统2204.13316, 2207.05505
7. 王伟, 刘柳明和杨一玻课题组研究了隐粲的正反重子六库克态2207.00183
8. 何军 $\Lambda_b\bar{\Lambda}_b$ , 2207.13957

## 三强子系统的研究，7篇

1. 耿立升课题组合作研究了 $DD\Sigma_c$ ,  $DDK$ ,  $DDN$ ,  $D^*D^*D^*$ ,  $H_{ccc}$ , 等系统2204.02295, 2105.09017, 2208.00882, 和刘翔合作2105.09703, 2206.04586, 2108.00923,
2. 谢聚军课题组研究了 $DD\bar{K}$ 系统2205.12526

## 五夸克重子态的研究，41篇

1. **Pc系统**, S. Nakamura 2109.15235, 2103.06817, 陈刚 2111.03241, 陈锐-孙志峰-刘占伟 2106.15053, 耿立升 2106.12250, 2204.12356, 郭奉坤-王倩-杜孟林 2102.07159, 刘翔 2110.09423, 王志刚 2103.08239, 2201.06710, 邹冰松-郭奉坤 2109.03504, 邹冰松 2204.12122
2. **Pcs系统**, 陈殿勇 2103.052057, 黄英 2110.04746, 2107.13267, 陈锐 2101.10614, 刘翔 2207.10493, 陈伟 2203.15616, 耿立升2104.10303, 耿立升-刘晓海 2106.11450, 郭志辉-杜孟林 2109.14237, 王志刚 2207.06060, 2205.02530, 何军 2101.12441, 严茂俊 2207.11144, 肖楮文-邹冰松-吴佳俊 2102.02607
3.  $\Omega_c$ 分子态, 何军 2205.07586
4.  $\bar{c}qqqq$  刑晔 2203.03248
5.  $D^{(*)}\Sigma_c^{(*)}$  刘翔2207.08660, 朱世琳-刘翔-孙志峰2108.12730, 2102.3868
6.  $\Omega_c\bar{D}_s$ , 刘翔2101.11200
7.  $QQQQ\bar{q}$  刘翔-刘占伟 2106.02837
8.  $c\bar{s}qqq$ , 刘翔-于福升-刘占伟2207.02813
9.  $QQQQQ$ , 刘翔-刘占伟2203.03448 平加伦-黄虹霞2205.11548, 王志刚2104.12090
10. 系统性研究, 刘翔-陈锐 2201.07603, 朱世琳-陈锐 2109.13507, 谢聚军-邓成荣-安春生2204.13320

## 系统性的研究，6篇

1. 郭奉坤和国外合作者用ERE展开研究近阈共振态2110.07484
2. 邹冰松郭奉坤课题组研究 $J^{PC} = 0^{--}$ 粒子的窄奇特态2205.10994 重味和反重味强子分子态小结2101.01021, 重味重味的强子分子态小结2108.02673
3. 朱世琳, 刘言锐, 陈华星, 陈伟课题组新强子态总结【Review Paper】2204.02649
4. 朱世琳课题组总结了手征微扰理论下重强子和手征有效场论下重强子分子态【Review Paper】2204.08716

## 四夸克介子态的研究，119篇

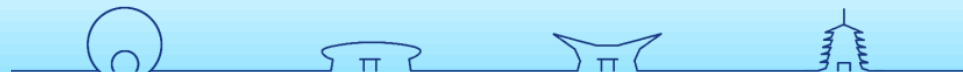
1.  $X(2600, 2866)$ , 乔从丰2206.13133, 戴莲蓉 2202.11973
2.  $Z_c$ 和 $Z_{cs}$ , 平荣刚-陈宏2201.09066, 曹须-杨智2110.09760, 陈晓云2103.07347, 郭奉坤-杜孟林2201.08253, 耿立升2205.03878, 平加伦-黄虹霞-陈殿勇2204.08104, 柯红卫-刘晓海2103.05282, 李德民-王恩 2109.00731, 李刚-陈殿勇2111.13347, 孙志峰2205.11150, 王志刚2207.00947, 2205.03203, 肖丽叶2203.00168, 严茂俊2102.13058, 郑汉青2108.02387, 朱世琳2104.08469
3.  $QQ\bar{Q}\bar{Q}$  陈华星2207.08593, 陈华星-陈伟2106.05550, 陈伟2102.10605, 2109.08091, 平加伦2202.10380, 平加伦-杨刚2104.08814, 戴凌云2207.07537, 刘翔2207.04893, 刘晓海2103.13140, 王国利2104.12372, 王倩-马远卓2111.14028, 王志刚2207.08059, 姚德良2104.08589, 赵行波2201.06428, 赵强-钟显辉2110.09052, 朱世琳2105.13109, 邹冰松-郭奉坤2107.03946
4.  $\bar{Q}Q\bar{q}s$  平加伦-杨刚2109.04311, 柯红卫2202.13380, 陈伟2206.06051, 平加伦-杨刚2204.08556, 戴莲蓉2201.04840, 平加伦-黄虹霞2112.05967, 耿立升2207.12178, 王志刚2106.12400, 朱世琳2112.13203
5.  $QQ\bar{q}\bar{q}$  王振洋2112.12633, 史君-王思科-王倩2205.05234, 何联意2108.10462, 戴莲蓉2110.15270, 康现伟2108.06002, 刘晓海-柯红卫2207.09900, 王恩-陈殿勇2207.03930, 李学潜-刘晓海-柯红卫2112.14142, 何军2107.00855, 耿立升-王荣-黄英2108.13028, 郭奉坤-杜孟林-王倩2110.13765, 梁伟红2108.02730, 刘翔2108.09925, 刘翔-何军2202.07248, 陈晓云2206.10917, 王志刚2108.12597, 谢聚军-耿立升-王恩2108.00947, 严茂俊2108.04758, 朱瑞林2109.02531, 朱世琳2205.04628, 2104.14784, 2204.11079, 2112.12472, 2108.01911, 2107.13748, 2108.07242
6.  $X$ , Satoshi 2108.01118, 陈殿勇2102.08637, 郭奉坤-杜孟林2207.08563, 郭奉坤2107.12247, 何军-陈殿勇2108.00148, 刘晓海2108.00969, 王志刚2207.09910, 2103.04236, 2112.04776, 2108.05759, 谢聚军2206.14456, 谢聚军-王倩2206.14456, 郑汗青2108.04758, 朱世琳2109.013333, 2205.13335
7.  $QQQ\bar{q}$  董宇兵-陈殿勇-吕齐放2107.13930, 平加伦-陈殿勇-黄虹霞22205.08281, 朱世琳2109.05243
8.  $qq\bar{q}\bar{Q}$ , 何联意2108.06222
9.  $D_s$ , 耿立升2108.12993 吕齐放2201.00852, 郭奉坤2117.09481 何军2106.07272 平加伦2111.04477,
10.  $Y$ , 陈云华2104.01752, 黄英2110.14253 刘翔2111.13821, 严茂俊2205.13590, 朱凯2109.01367, 朱世琳-杨智-吴佳俊2107.04860, 2207.07320
10.  $D+D$ -原子态, 郭奉坤2106.15391
10. 系统性研究, 刘翔-陈锐 2103.04698, 谢亚平-陈旭荣-王晓云2108.03767 平加伦-黄虹霞2109.14242 王振洋2207.11450 朱凯2101.10622, 朱世琳2205.02619, 2112.13702



# 新文献小结

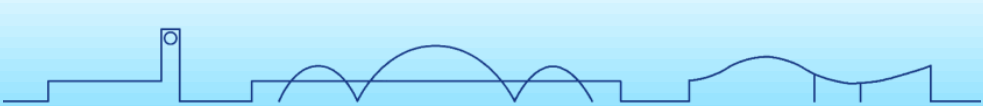
理论模型的拓展研究：29篇

1. 郭新恒和张振华课题组提出重子中寻找CP破坏的新方法及应用, 2103.11335, 2102.12263, 和在三体末态中由于共振带来的CP破坏, 2201.02385, 2102.02538 (王振洋合作)
2. 黄梅课题组利用全息理论研究强子物理, 2206.00917, 2110.08215
3. 刘伯超课题组通过自旋观测量研究三角奇异性, 2206.09308
4. 乔从丰课题组应用迹振幅方法进行NLO QCD计算, 2101.01106
5. 王建雄, 龚斌课题组提出涉及多费米子线时振幅书写的新方法, 2203.14346
6. 苑长征课题组讨论共振态和连续态之间的干涉问题, 2203.00244
7. 郑汉青课题组基于Roy-Stiner Equation 研究1/2-核子共振态, 2207.09743
8. 郑汉青课题组利用神经网络区分强子分子态, 2205.03572
9. 胡继峰, 王倩课题组利用神经网络研究强子态, 2202.04929, 2208.03165
10. 庞锦毅, 吴佳俊和国外合作者研究在有限体积下三体体系量子化, 2110.09351, 2204.04807
11. 吴佳俊课题组对HEFT在运动系和拉升系的拓展, 格点两强子算符的新构造, 逆散射问题的研究, 2103.12260, 2110.14113, 2109.01557, 2204.05510, 和李德民课题组合作研究了四体末态相空间各种运动学变量公式的解析表达, 2111.08901
12. 王迪课题组提出联系夸克层次的拓扑图和强子层次的重散射的理论框架, 2111.11201, 2203.02930
13. 清华研究生陈航两体螺旋度分波公式, 2207.02020
14. 张双南和钱文斌在 $\Lambda_b^0 \rightarrow D\Lambda$ 中测量CKM的 $\gamma$ 角, 2112.1295454
15. 耿立升课题组利用有效场论和格点QCD数据研究 $\Lambda_c N$ 相互作用, 2104.02380
16. 蒋军, 司宗国, 李世渊, 刘言锐课题组研究重子手征有效场论中的低能常数的对称性关系, 2206.06570
17. 姚德良课题组给出了有限体下单圈张量积分的统一形式, 2207.11750
18. 郭奉坤和国外合作者研究了轴子和重子的耦合, 2104.10413



# 进展小结

- 利用PQCD对重介子弱衰变分析。
- 部分子分布和强子质量起源的分析。
- 强子谱学和强子反应的研究





# 强子谱学的研究进展

## 1. 从几个树图的计算

→ 耦合道计算, 即需要解适当的散射方程得到T矩阵

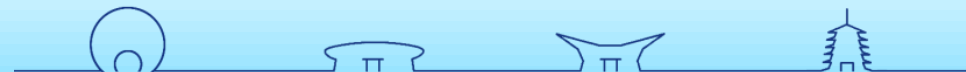
## 2. 从简单的组分夸克模型 (quenched Quark model)

→ 更多夸克组分的系统。



## 3. 格点QCD从遥远的非物理区

→ 实现了对真实强子模型的约束。



# 强子谱学的研究进展

## 1. 从几个树图的计算

→ 耦合道计算, 即需要解适当的散射方程得到T矩阵

## 2. 从简单的组分夸克模型 (quenched Quark model)

→ 更多夸克组分的系统。



## 3. 格点QCD从遥远的非物理区

→ 实现了对真实强子模型的约束。

共振态的三种描述方法

Breit-Wigner的计算

Flatte 形式描述

耦合道的T矩阵在复平面上极点

$$t_{\alpha,\beta}(k_\alpha, k_\beta, E) = V_{\alpha,\beta}(k_\alpha, k_\beta) + \sum_\gamma \int k_\gamma^2 dk_\gamma \frac{V_{\alpha,\gamma}(k_\alpha, k_\gamma) t_{\gamma,\beta}(k_\gamma, k_\beta, E)}{E - \sqrt{m_{\gamma 1}^2 + k_\gamma^2} - \sqrt{m_{\gamma 2}^2 + k_\gamma^2} + i\epsilon}$$

$$t_{\alpha,\beta}(k_\alpha, k_\beta, E) = V_{\alpha,\beta}(k_\alpha, k_\beta) + \sum_\gamma \int k_\gamma^2 dk_\gamma \frac{V_{\alpha,\gamma}(k_\alpha, k_\gamma) t_{\gamma,\beta}(k_\gamma, k_\beta, E)}{E - \sqrt{m_{\gamma 1}^2 + k_\gamma^2} - \sqrt{m_{\gamma 2}^2 + k_\gamma^2} + i\epsilon}$$

在耦合道计算下, 阈效应, 圈图效应和末态相互作用等等非常模型化的计算都会自然而直接的进入计算。



# 强子谱学的研究进展

## 1. 从几个树图的计算

→ 耦合道计算, 即需要解适当的散射方程得到T矩阵

## 2. 从简单的组分夸克模型 (quenched Quark model)

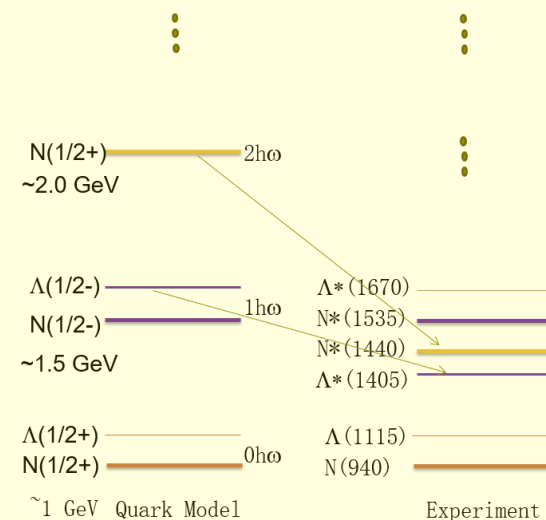
→ 更多夸克组分的系统。



## 3. 格点QCD从遥远的非物理区

→ 实现了对真实强子模型的约束。

组分夸克模型对基态能谱有非常好的描述, 但是在激发态出现了问题。



随着X(3872)的发现,  $P_C$ 态 $P_{CS}$ 态的确立, 我们基本肯定, 多夸克态一定存在。更多更丰富的强子结构也被计算得到。



# 强子谱学的研究进展

## 1. 从几个树图的计算

→ 耦合道计算, 即需要解适当的散射方程得到T矩阵

## 2. 从简单的组分夸克模型 (quenched Quark model)

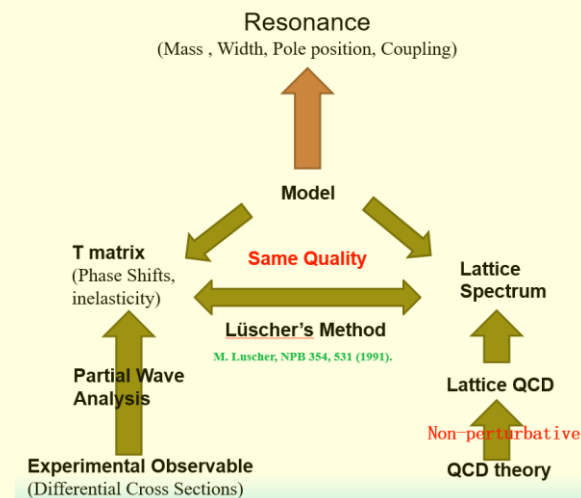
→ 更多夸克组分的系统。



## 3. 格点QCD从遥远的非物理区

→ 实现了对真实强子模型的约束。

做个不恰当的比喻, 20年前的格点QCD就好像是现在的弦论, 很优美但是离我们很远很远。现在格点数据已经是我们理解强子物理的重要约束, 一个粒子是不是个确定的态, 格点的结果有很大的发言权。



在散射振幅的计算中, 格点已经能够提供实验提供不了的信息, 而这些  $2 \rightarrow 2$  的散射信息极其重要

# 强子谱学的研究进展

## 1. 从几个树图的计算

→ 耦合道计算, 即需要解适当的散射方程得到T矩阵

耦合道计算的确更加准确, 但是依然没有完整表达非微扰的所有信息。应用于计算的势能已经做了简化; 四维散射方程尚无法解, 我们通常的散射方程是做了三维约化的。

## 2. 从简单的组分夸克模型 (quenched Quark model)

→ 更多夸克组分的系统。



每一个模型都有自己的参数, 最后对于每一个共振态, 很难区分是那个模型主导的。紧致多夸克是否真的存在? 如何链接这些模型?

## 3. 格点QCD从遥远的非物理区

→ 实现了对真实强子模型的约束。

格点的数据产生花费还是比较大, 能提供的信息还很有限。因而散射振幅的获取还要依赖模型, 如何解读格点数据还有待于研究。



# 个人的思考

- 大体上，强子的形成有两种源头。
- 一种是在夸克和胶子层次上形成了一个束缚态。



介子



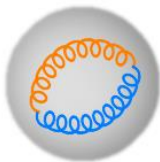
重子



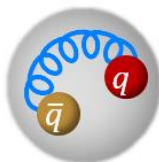
四夸克态



五夸克态



胶球

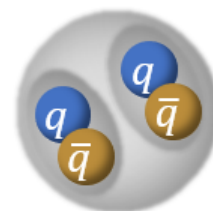


混杂态

需要QCD理论来描述它们

裸态

- 另一种是在强子层次上形成一个束缚态。  
无色集团通过吸引相互作用形成的束缚态。



强子分子态

通过实验数据很好的确定所有的裸态，是不是就给出了完整的基于夸克胶子相互作用的强子谱？

多强子耦合道



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences



# 个人的思考

- 模型可以提供物理图像。
- 在强子物理中，由于非微扰无法直接解析解决，那么能够确定模型的只有实验数据。
- 我们通常的做法是搭建带有参数的模型，然后拟合实验数据确定模型，问题是，最后确定的模型有多少信息是真实反应数据的，而不是模型天然自带的。
- 实验物理分析要充分展现数据内的信息，减少模型带来的影响；理论方面我们要为实验分析提供帮助，理论模型也要尽可能减少不必要的参数依赖。
- 神经网络和机器学习可能是一条新路径，用多参数对抗大数据，可能恰恰就避免了模型带来的影响，真实呈现数据的信息。

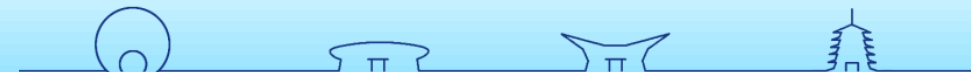
郑汉青课题组利用神经网络区分强子分子态，[2205.03572](#)

胡继峰，王倩课题组利用神经网络研究强子态，[2202.04929](#),[2208.03165](#)

高俊课题组利用机器学习研究部分子分布，[2201.06586](#)



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences





# 思考

- 模型可以提供物理图像。
- 在强子物理中，由于非微扰无法直接解析解决，那么能够确定模型的只有实验数据。
- 我们通常的做法是搭建带有参数的模型，然后拟合实验数据确定模型，问题是，最后确定的模型有多少信息是真实反应数据的，而不是模型天然自带的。
- 实验物理分析要充分展现数据内的信息，减少模型带来的影响；理论方面我们要为实验分析提供帮助，理论模型也要尽可能减少不必要的参数依赖。
- 神经网络和机器学习可能是一条新路径，用多参数对抗大数据，可能恰恰就避免了模型带来的影响，真实呈现数据的信息。

郑汉青课题组利用神经网络区分强子分子态，2205.03572

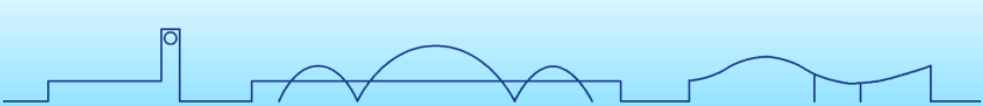
胡继峰，王倩课题组利用神经网络研究强子态，2202.04929,2208.03165

高俊课题组利用机器学习研究部分子分布，2201.06586

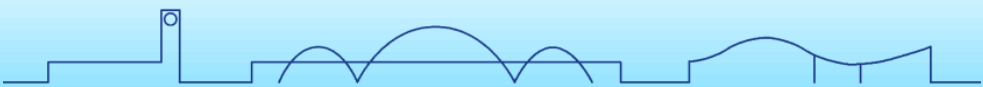


# 总结和展望

- 特别感谢国内强子物理同仁勤奋和坚持。
- 大致一年多的时间理论方面都有了一定的进展。
- 有一些持之已久的问题仍然没有回答，比如奇特态的内部结构是什么？
- 需要更多的思考和合作！



# 谢谢



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

