

文章编号: 1007-4627(2005)03-0243-05

兰州冷却储存环上可开展的强子物理研究*

李希国, 徐珊珊, 肖国青, 刘新宇

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 介绍了当前强子物理的研究现状和兰州冷却储存环的能量特点, 以及国内强子物理专家的分析和建议。在兰州冷却储存环上, 可利用中能轻离子束核反应产生强子激发态研究强子内部夸克态的结构和性质、强子性质随核环境的变化和手征对称破缺与部分恢复。尤其是通过兰州冷却储存环上限能区附近的 $p+p$ 反应, 研究奇异夸克的不对称性和形状因子, 寻找超子激发态和 pentaquark 的实验证据, 发现双重子态的实验事例。

关键词: 冷却储存环; 强子激发谱; 多夸克态; 奇异夸克

中图分类号: O572.21⁺1; O572.33; O572.34

文献标识码: A

1 引言

通过中能轻离子(包括质子、氘、氚)核反应以及重离子核反应产生强子激发态、多夸克态, 是当前国际核物理研究中十分活跃的领域。利用重离子束可以产生不同密度的高温核物质, 用于研究和提取核状态方程, 探索相变(例如液气相变、手征对称恢复相变、夸克退禁闭相变等)存在的可能性。利用中能轻离子束核反应产生强子激发态, 研究其内部夸克和胶子的结构和性质; 研究强子性质随周围核物质密度的变化而改变, 为理解强相互作用以及强作用物质性质和量子色动力学(QCD)低能行为——禁闭和手征对称破缺与恢复提供实验基础。这些研究将为基于夸克自由度描述原子核性质和 QCD 基本自由度间的关系, 为探索早期宇宙形成和天体演化、超新星爆炸、中子星性质提供物理基础。

1964 年, Gell-Mann 和 Zweig 根据当时已经发现的强子谱, 提出了夸克模型, 能够很好地描述已知的重子和介子性质。20 世纪 70 年代建立的 QCD^[1], 作为强作用基本理论已经被人们普遍接受, 非常成功地描述了高能区的强相互作用。这是因为 QCD 的渐近自由性质, 在 高能区, 微扰方法适用。但在低能区(约 1 GeV 以下), 由于 QCD 的非

微扰特征, 如夸克、胶子禁闭和手征对称破缺, 使得 QCD 描述低能强相互作用物质的困难很大, 目前只能使用格点 QCD^[2] 和有效场论^[3] 以及大 N_c QCD^[4] 等描述部分现象。已知的强作用物质存在形式有强子(重子和介子)、原子核和中子星。如何直接从 QCD 理论研究这些强作用物质的结构和性质, 是物理学面临的重大挑战。另一方面, 有效 QCD 理论及其模型理论也预言了强作用物质多种存在形式及丰富的相结构, 如丰富的强子激发谱、双重子态、奇特介子、奇特重子等多夸克态、混杂态、奇异粒子团和超核、奇异星, 强子物质的液相气相、手征对称破缺恢复相、夸克胶子等离子相、高密度超导相等, 这些新强作用物态和相结构有待进一步的实验探索和证实, 对它们的系统研究将丰富人们对夸克层次上强作用物质结构和性质的认识。

2003 年以来, 从实验上寻找理论预言的奇特强子新物态取得了突破性的进展^[5]。北京 BEPC 的 BES 合作组在 J/Ψ 衰变道中发现了 $p\bar{p}$ 阈值增强现象, 但目前还不能完全解释; BABAR 合作组报告了在阈下发现 $D_{sJ}(2\ 317)$ 和 $D_{sJ}(2\ 457)$ 态的证据^[6]; SELEX 合作组报告了在阈上发现具有非正常衰变类型的 $D_{sJ}(2\ 634)$ 态的证据^[7]; BELLE/CDFII 报告了

收稿日期: 2005-01-31; 修改日期: 2005-04-11

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJ9XZ-SW-No2); 国家自然科学基金资助项目(10435080)

作者简介: 李希国(1961-), 男(汉族), 甘肃庆阳人, 博士, 从事理论物理与中高能核物理研究; E-mail: xgl@impcas.ac.cn

发现 X(3872) 粲态的证据^[8]; E852 也报告了在 1709 或 2001 MeV 发现具有 $J^{PC} = 1^{-+}$ 的两个奇特介子态, 这些新的强子物态可能被解释为四夸克态^[9]。更具戏剧性的是对五夸克奇特重子态 Θ^+ 的实验研究。目前, 有 12 个独立实验报告了五夸克奇特重子态 Θ^+ 存在的实验证据, 而另外有一些独立实验报告了五夸克奇特重子态 Θ^+ 不存在的实验证据^[10], NA49 合作组和 H1 合作组也分别报告了 Ξ^{-} 和 Θ_c 的存在证据^[11]。所以, 目前多夸克态已经成为强子物理研究领域中的热点, 吸引了几乎全部中、高能实验工作者和许多理论工作者的注意力。

近 10 年来的理论研究已经显示, 核密度在 1—3 倍 ρ_0 的区域, 夸克和胶子凝聚随核密度增加而明显降低, 强子性质和强子相互作用等都将随着强作用物质的密度和温度的变化而变化, 手征对称破缺得到部分恢复^[12]。例如, π , K, ρ , ω , σ , η , η' , ϕ 等介子和 p, n 的质量改变。重离子碰撞形成的高于正常核物质密度的核环境, 提供了研究 QCD 低能行为和强作用物质性质随着物质密度变化而变化及其产生机制的实验途径。

核介质中强子质量的改变和介质效应, 是手征对称破缺恢复的重要信息。1997 年以来, 世界上许多实验室试图寻找核介质中强子质量改变和介质效应的实验证据。GSI 的 SIS 在核-核碰撞中发现了 K 介子阈下产生的实验证据^[13], 由于理论预言 K^- 介子的有效质量随密度增加而明显下降, 理论上考虑介质效应能够很好的解释 K^+/K^- 降低现象^[14]; SPS 的 CERES 合作组在核-核反应中发现双轻子不变质量谱前移现象^[15], 可以通过 ρ 介子有效质量的介质效应解释; BEVALAC 的 DLS 合作组在轻核-核碰撞和重核-核碰撞系统也发现双轻子不变质量前移现象^[16], 只有考虑 ρ , η 介子的介质效应才能很好的解释; KEK 在质子与轻核和重核的反应中也发现了双轻子谱的差异^[17], 也可以用 ϕ , ω 和 ρ 的介质效应来解释。目前, 这方面的实验数据尚少, 有待更多的实验装置提供更多的实验数据。

2 目前强子物理中的挑战和机遇

QCD 真空和它的强子激发谱是一个包括夸克-胶子强耦合的量子力学系统, 强子态的结构和性质取决于非微扰 QCD 的性质, 对强子谱和强子-强子

相互作用的研究为理解色禁闭和手征对称破缺物理机制提供了机遇。目前, 虽然格点 QCD 从原则上能够给出 QCD 真空结构和强子谱, 但实际上由于计算技术的限制, 还不能完全做到, 需要建立一些有效理论和模型描述强子的结构和性质, 而且实验数据少。下面列举了一些需要解决的主要问题:

- 强子结构与强子-强子相互作用。近几年来来的理论研究表明, 夸克模型中唯象引用的旋-味对称性直接出现在大 N_c 极限下的 QCD 中, 所以, 大 N_c 极限在强子性质的研究中已经被系统地、广泛地使用, 对强子谱和性质的计算可以检验夸克相互作用的旋-味依赖性质^[18,19]。大 N_c 极限也分清了手征展开中 Δ 共振的角色, 结合大 N_c 极限和手征展开方法, 可以计算许多强子的观测量。例如, 奇异夸克的形状因子、电磁极化因子、部分子分布等, 需要精细的实验数据来检验。

- N^* 重子激发态的结构是一个悬而未解的问题^[20]。从理论上而言, 它都有可能是重子态、混杂态、奇特介子或奇特重子态, 问题是目前的实验数据非常少。最近, 在质子-质子反应中也有存在 N^* 中间过程的实验证据报告。研究 N^* 的结构和性质是富有挑战性的问题。

- 提供 pentaquark、四夸克态和双重子态存在与否的可信赖的数据。2003 年, 许多独立实验给出了多夸克态存在的实验证据, 但这些证据还不能确定五夸克态的存在与否, 需要进一步的实验验证。对双重子态的实验探索已进行了多年, 尚缺一个可靠证据, 有待进一步探索。

- 高密核物质中强子性质改变的实验信号与分析。目前, 在几个 GeV 能区的质子-核和核-核碰撞中, 有关 π , K, ρ , ω , σ , η , η' 和 ϕ 质量及宽度改变的实验数据仍很少, 而且对已有的实验数据分析也未得到可靠的结论, 有待给出令人信服的实验数据和分析结果。

3 兰州 CSR 概况

如图 1 所示^[21], 兰州冷却储存环 (CSR) 由主环 (CSRm) 和实验环 (CSRe) 组成, 主环的左边小方块就是用于进行强子物理实验的内靶位置, 实验环下方的大方块位置是外靶, 可以进行质子-核和核-核反应实验。兰州 CSR 对 $^{12}\text{C}^{+6}$ 离子加速的入射能

达到 1.1 GeV/u, U 离子达到 0.6 GeV/u。对质子的人射动能到达 2.88 GeV/c², 动量达到 3.7 GeV/c。

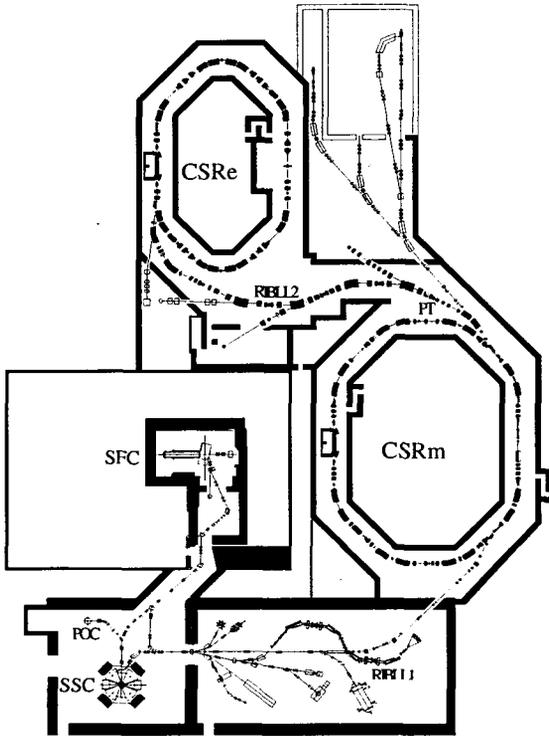


图 1 兰州 CSR 平面布局图

目前, 对于质子束和内靶, 理论估算 CSR 的亮度为 10³²—10³⁴ particles/(cm² · s), 极化实验的亮度为 10³¹ particles/(cm² · s) 左右。

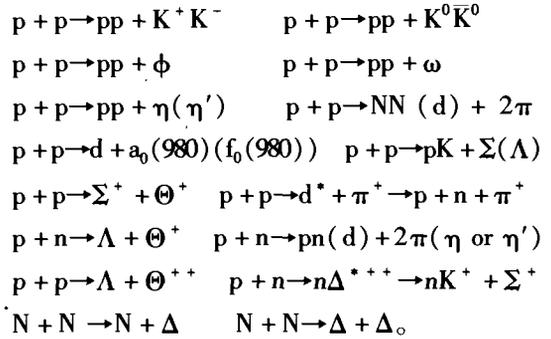
4 CSR 可进行强子物理研究的内容

兰州 CSR 装置为我国开展奇异核结构、核状态方程和强作用物质性质随物质密度变化、重子共振态、多夸克态及双重子态、介子阈下产生机制、手征对称破缺恢复等核物理问题的研究提供了良好的机遇。因此, 如何充分发挥兰州 CSR 重大科学工程的作用, 及时或超前进行理论研究, 探讨具有重大创新意义的物理课题, 推动强作用物质研究, 是摆在我国强子物理和中能核物理研究人员面前的战略任务。下面列举的是在兰州 CSR 上能开展的强子物理实验内容, 并指出可能有重要物理意义或有突破性成果的反应道。

4.1 质子-质子碰撞

从兰州 CSR 上质子入射动能的上限可知, 奇异

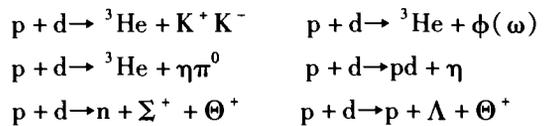
以下强子的产生道均被打开, 而且能够产生 N* 和 Δ 共振态, 现列举如下^[22-24]:



上述这些反应道表明, 兰州 CSR 上质子-质子碰撞可以产生以上、下、奇异夸克为主的强子, 研究它们的产生截面、宽度和衰变产物, 可以获得这些强子的结构和性质, 以及它们的激发态、强子-强子强相互作用和同位旋破缺的信息。最近研究显示, 可能存在 p + p → pN* 的情况, 即产生 N* 的中间态。如果采用极化实验, 还可以研究强子中夸克的空间分布、电磁极化因子和形状因子等具有重要物理意义的问题。

4.2 质子-核碰撞

在兰州 CSR 上也可以进行质子-核碰撞实验。根据阈能, 在 p + d 的反应中, 能够产生 4.1 节中所列举的强子, 而且阈能也相应的有所降低。除此之外, 还有



的反应道。在 p + A 的反应中, 上述的强子也都可以产生, 有比较重要意义的物理是通过轻重反应系统探测 K⁺K⁻ 的不变质量, 研究 φ 的介质效应, 通过轻重反应系统探测双轻子不变质量, 研究 ρ, ω 和 η 等介子的介质效应^[25]。另外, 在质子-核碰撞中, 可以产生超核, 利用 d 核束可以进行 d + p 反应, 提供 p + d 反应不能提供的信息。

4.3 核-核碰撞

在兰州 CSR 上可以进行重离子碰撞实验, 能产生 2—2.5 倍 ρ₀ 的核物质, 并且产生 π 介子, 阈下产生 K⁺ 和 η 介子, 通过观测 π, K⁺ 的产额和截面

等来研究介质效应。另外,还有如下的次级过程:

$$\begin{aligned} \pi N &\rightarrow 2\pi + N (\rho^+); 3\pi + N; 4\pi + N \\ \pi N &\rightarrow 2K + N; K + \Sigma; K + \Lambda \\ \pi N &\rightarrow N^* \\ \pi^+ N &\rightarrow \Delta^{++} (1232) \\ \eta N &\rightarrow N^* (1532). \end{aligned}$$

在这些次级过程中,也产生了所关注的 N^* , Δ^{++} 共振态,从这两个中间过程可提取核子-核子强相互作用和介质效应的相关信息。

4.4 具有重要物理意义的反应道

在 4.1 节所列举的反应道中,具有重要意义的反应道是:

$$(1) p + p \rightarrow pp + \phi \rightarrow pp + K^+ K^-$$

因为 $\phi \sim s\bar{s}$, 用这个反应道可以研究奇异夸克的性质^[26], 通过极化实验, 提取奇异夸克的空间分布和形状因子等信息, 探索衰变性质。

$$(2) p + p \rightarrow (pK) + \Sigma(\Lambda)$$

这个反应道是研究五夸克奇特重子态 Θ^+ 的最佳产生道。首先重复 COSY 的实验结果, 进一步验证五夸克奇特重子态 Θ^+ 存在的实验数据, 如果它存在, 通过极化实验确定五夸克奇特重子态 Θ^+ 的宇称。目前, 有关 Λ 超子激发态的数据还很少, 通过这个反应道还可以提供 Σ 和 Λ 超子的激发态信息。这为兰州 CSR 参与强子物理重大问题研究提供了难得的机遇。

$$(3) p + p \rightarrow d^* + \pi^+ \rightarrow p + n + \pi^+$$

在这个反应道中有可能寻找到双重子态存在的

实验证据^[27]。

(4) $p + A$ 碰撞

考虑 $p + \alpha(C, O, Ca)$ 的反应, 提取 N^* 的信息^[28]。通过质子与轻核和重核的碰撞, 探测双轻子不变质量, 提取核介子中 ρ , ω 和 η 的有效质量信息, 研究它们的介质效应, 为手征对称破缺部分恢复提供实验证据。

(5) 稀有的衰变道

观测 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$, $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$ 和 $\Lambda \rightarrow n\gamma$ 衰变道, 可以获得不同夸克之间交换中间玻色子过程和夸克对湮灭产生 γ 过程的信息; 观测 $\eta \rightarrow 4\pi^0$ 或 $\pi^+ \pi^- e^+ e^-$ 衰变道, 可以获得 CP 信息。

5 结论

兰州 CSR 为国际研究轻夸克 (u, d, s 夸克) 强子物理提供了不可多得的实验平台, CSR 对研究重子激发谱, 寻找新物态——双重子、奇特重子等多夸克态, 以及探索核介质中强子性质改变和手征对称部分恢复将发挥重要的作用。总之, 兰州 CSR 配以高精度的强子探测装置能使我国轻夸克强子物理研究进入国际前沿, 完全有可能获得一些国际先进的重要成果。

致谢 感谢姜焕清研究员、邹冰松研究员、庄鹏飞教授、王凡教授、郭华教授、马伯强教授和朱世琳教授等在兰州冷却储存环上开展强子物理研究给予的关注和建议, 尤其感谢王凡教授对此文提出的修改意见。

参 考 文 献:

- [1] Yndurain F J. Quantum Chromodynamics. New York: Springer-Verlag, 1983, 1—225.
- [2] Kogut J. Reviews of Modern Physics, 1983, **55**: 775; Greiner W, Schafer A. Quantum Chromodynamics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994, 311—363.
- [3] Weinberg S, Kunihiro T. The Quantum Theory of Field. II. New York: Cambridge University Press, 1996, 163—246.
- [4] 't Hooft G. Nucl Phys, 1974, **B72**: 461; Jenkins E, Manohar A. Phys Rev Lett, 2004, **93**: 022001-1.
- [5] Zhu Shilin. Int J Mod Phys, 2004, **A19**: 3 439.
- [6] BABAR Collaboration, Aubert B, Barate D, Bouffigney D, et al. Phys Rev Lett, 2003, **90**: 242001; 2004, **93**: 041801.
- [7] SELEX Collaboration, Evdokimov A, Akgun U, Alkhazov G, et al. Phys Rev Lett, 2004, **93**: 242001.
- [8] BELLE Collaboration, Abe K, Abe K, Abe N, et al. hep-ex/0408126.
- [9] Chen Yuqi, Li Xueqian. Phys Rev Lett, 2004, **93**: 232001.
- [10] HERA-B Collaboration, Abt I, Adams M, Agari M, et al. Phys Rev Lett, 2004, **93**(21): 212003-1.
- [11] NA49 Collaboration, Alt C, Anticic T, Baatar B, et al. Phys Rev Lett, 2004, **92**: 042003.
- [12] Brown G E, Rho M. Phys Rep, 1996, **269**: 333.

- [13] Barth R, Senger P, Ahner W, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **78**: 4 007; Shin Y, Aher W, Barth R, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **81**: 1 576; Laue F, Sturm C, Böttcher I, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **82**: 1 640.
- [14] Li G Q, Lee C H, Brown G E. Phys Rev Lett, 1997, **79**: 5 214.
- [15] Agakichiev G, Baur R, Breskin A, *et al.* Phys Rev Lett, 1995, **75**: 1 272.
- [16] Porter R J, Beedoe S, Bossingham R, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **79**: 1 229.
- [17] Ozawa K, En'yo H, Funahashi H, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 5 019.
- [18] Jenkins E, Ji X, Manohar A V. Phys Rev Lett, 2002, **89**: 242001.
- [19] Cohen T D, Lebed R F. Phys Rev Lett, 2003, **91**: 012001.
- [20] 邹冰松. 原子核物理评论, 2003, **20**(3): 167.
- [21] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文. 原子核物理评论, 2001, **18**(1): 35.
- [22] 姜焕清. 原子核物理评论, 2002, **19**(3): 301.
- [23] 宁平治, 李磊, 闵德芬. 原子核物理基础. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [24] Perkins D H. Introduction to High Energy Physics (4th edition). Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [25] 庄鹏飞. 原子核物理评论, 2002, **19**(3): 306.
- [26] Ding Yong, Xu Rongguang, Ma Boqiang. Phys Lett, 2005, **B607**: 101.
- [27] Ping J L, Wang F, Goldman T. Nucl Phys, 2001, **A688**: 871.
- [28] 袁宏宽, 邹冰松, 陈洪等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9): 961.

Hadrons Physics at Lanzhou CSR*

LI Xi-guo, XU Hu-shan, XIAO Guo-qing, LIU Xin-yu

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to both the development on hadrons physics and the aspect of Lanzhou cooling storage ring (CSR) and based on the analysis and propositions given by experts in China, we propose some hadrons physics program at CSR. The hadron spectroscopy produced in light nucleus collisions at CSR used to probe the quark and gluon structure of hadrons, to study the modification of the hadron properties in nuclear matter and to investigate the spontaneous breaking of the chiral symmetry and its partial restoration. Especially, the proton-proton collisions at beam energies per proton below 2.8 GeV at CSR should be used to measure the strangeness asymmetry and strange form factor, to probe the existence of hyperon and pentaquarks and to find the evidence for the existence of dibaryon d^* .

Key words: cooling storage ring; hadrons spectroscopy; pentaquark; strange quark

* **Foundation item:** Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCXZ-SW-No2); National Natural Science Foundation of China (10435080)