

文章编号: 1007-4627(2014)04-0453-07

## 电子-质子对撞机上的 Primakoff 物理

涂丽萍<sup>1</sup>, R. Miskimen<sup>2</sup>, A. Gasparian<sup>3</sup>, J. Goity<sup>4, 5</sup>, 王荣<sup>6</sup>, 陈旭荣<sup>6</sup>

- (1. 北卡罗来纳大学, 北卡罗来纳州, 威明顿市 NC28403, 美国;
2. 马萨诸塞大学阿默斯特分校, 马萨诸塞州, 阿默斯特镇 MA01003, 美国;
3. 北卡罗来纳农工州立大学, 北卡罗来纳州, Greensboro 镇 NC27411, 美国;
4. 杰弗逊国家实验室, 弗吉尼亚州, 纽波特纽斯市 VA23606, 美国;
5. 汉普顿大学, 弗吉尼亚州, 汉普顿市 VA23668, 美国;
6. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** Primakoff 效应具有独特的动力学筛选条件, 是研究原子核和粒子物理的强大的实验工具。未来电子-离子对撞机 (EIC) 机器具有质心能量高、亮度高、动力学范围广、本底低、探测器探测效率高以及碰撞离子种类丰富等优点。这将为我们开启一扇通往 Primakoff 物理研究的新时代的大门。在 EIC 机器上开展 Primakoff 物理实验可以严格检验量子色动力学的基本对称性, 研究强子的电弱相互作用性质, 并探索超出标准模型的新物理。Primakoff 效应实验是 EIC 物理研究的又一亮点。

**关键词:** Primakoff 物理; QCD 对称性; 强子极化度; 中性轴矢耦合; 新物理

**中图分类号:** O571.1; O572.23      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.453

### 1 引言

入射粒子  $h$  与原子核库仑场中的虚光子的相互作用过程  $h+(Z, A) \rightarrow a+(Z, A)$  称为 Primakoff 效应<sup>[1]</sup>。1951 年, H. Primakoff 首次提出该过程来测量  $\pi^0$  的辐射衰变宽度 (参见图 1)。该效应具有显著典型特征: (1) 它是一个相干过程; (2) 微分截面的峰值在极小的前冲角度 (小的四动量转移  $t$ ), 并且强烈地依赖于束流能量。以实光子的 Primakoff 反应作为例子, 微分截面的峰值满足  $(d\sigma_{Pr})/(d\Omega) \propto (E^4/m^3)$ , 并且峰值角度位于  $\theta_{Pr} \sim (m^2/2E^2)$ 。这些特点是 Primakoff 反应自然的动力学筛选条件, 从而使 Primakoff 效应成为高能核物理和粒子物理的强有力的工具。电子-离子(质子)对撞机 (Electron Ion Collider, EIC) 是目前国内外正在论证的研究核子结构的下一代最重要的加速器装置。EIC 装置具有较高的质心能量, 亮度以及电磁探针的本底低等优点, 被称为“超级电子显微镜”。目前, 国际上提议的 EIC 机器包括美国

的 eRHIC、ELIC、欧洲核子中心的 LHeC 以及德国的 ENC<sup>[2]</sup>。在中国, 中国科学院近代物理研究所计划建设一台强流重离子加速器装置 (High Intensity heavy ion Accelerator Facility, HIAF)<sup>[2-3]</sup>, 并已经列入“十二五”国家重要战略装置计划。在此装置的基础上, 中国科学院近代物理研究所提出增加强流极化电子束流和建造先进的 EIC 机器 (EIC@HIAF)。EIC@HIAF 初期对撞能量为电子能量 3 GeV, 质子能量为 12 GeV; 亮度最低为  $4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[2]</sup>。

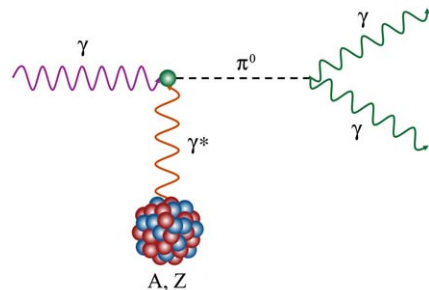


图 1 (在线彩图) Primakoff 效应

收稿日期: 2014-03-29; 修改日期: 2014-07-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB845406); 国家自然科学基金资助项目(NSFC11175220); 中国科学院百人计划资助项目(Y101020BR0)

作者简介: 涂丽萍(1964-), 女, 四川泸州人, 教授, 博士, 粒子物理与原子核物理; E-mail: ganl@uncw.edu.

通信作者: 陈旭荣, E-mail: xchen@impcas.ac.cn.

EIC 机器是研究 Primakoff 物理的绝佳平台。高能量和高亮度的电磁探针与原子核反应将会产生大量的介子 Primakoff 产生事例。这将提供一个利用 Primakoff 效应研究几个物理学基本问题的前所未有的机会。本文中，我们提议在中国的 EIC@HIAF 上开展 Primakoff 物理研究。所提议的实验包括：Primakoff 过程中  $\pi^0$ ， $\eta$  和  $\eta'$  的双光子衰变宽度和转变形状因子的测量，双介子的 Primakoff 产生，纵向极化质子的 Primakoff 过程以及  $\eta$  和  $\eta'$  的稀有衰变测量。

## 2 QCD 对称性检验

通过 Primakoff 效应，可以测量  $\pi^0$ ， $\eta$  和  $\eta'$  的双光子衰变宽度  $\Gamma_{\gamma\gamma}$  以及转变形状因子  $F_{\gamma\gamma^*}$ 。我们知道量子色动力学 (QCD) 色禁闭的一个效果是传统的微扰论在低能量下的失效。对该区域强相互作用的定量理解仍然是当代物理学的最具智力挑战的问题之一。对 QCD 对称性的研究，包括动力学和异常手征对称性破缺，提供了一个有希望解决该问题的方案。低能量下 QCD 的对称性最清晰的表现是轻赭标介子多重态  $\pi^0$ ， $\eta$  和  $\eta'$  (如图 2 所示)。该系统包含了手征对称性自发破缺、手征异常以及 u, d, s 夸克质量差异引起的同位旋和  $SU(3)$  对称性破缺的重要信息。对这些介子精确的实验和理论研究，将有助于我们理解低能量下的 QCD 对称性结构以及 QCD 对称性破缺的来源和动力学。

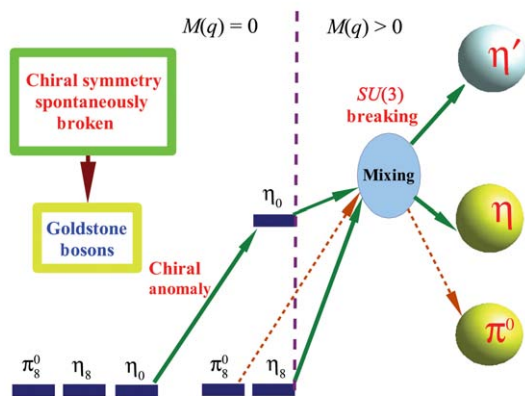


图 2 (在线彩图) QCD 在低能下的对称性

在无质量夸克的极限下 (手征极限)，QCD 拉氏量在增大的味道对称性群变换下保持不变。这个群写做  $SU_L(3) \times SU_R(3) \times U_A(1) \times U_{\text{baryon}}(1)$ 。在

完整的量子理论中，这些对称性是通过不同方式实现的。 $U_A(1)$  由于诺特流  $j_A^\mu = \bar{q}\gamma^\mu\gamma_5q$  和胶子场联合 (参见文献[4]) 参与的轴矢异常而明确的发生破缺。这使得  $\eta^0$  在手征极限下获得质量 (如图 2 所示)。这意味着 QCD 在量子层次上对称性更小，即， $SU_L(3) \times SU_R(3) \times U_{\text{baryon}}(1)$ 。QCD 真空中的夸克反夸克对的凝聚引起手征对称性  $SU_L(3) \times SU_R(3)$  自发破缺到味道对称性  $SU(3)$ 。结果导致了 8 个无质量的 Goldstone 玻色子，对应于 8 个自发对称性破缺算子。这 8 个 Goldstone 玻色子被确定为赭标介子八重态 ( $\pi^0$ ， $\pi^\pm$ ， $K^\pm$ ， $K^0$ ， $\bar{K}^0$  和  $\eta$ )。实际上，夸克的质量不为零 (虽然很小)，所以手征对称性发生明确的破缺，并且使得 Goldstone 玻色子获得质量。

由于轴矢异常， $\eta'$  不属于 Goldstone 玻色子。但值得一提的是，在特定的 QCD 极限下， $\eta'$  可以成为 Goldstone 玻色子。这个极限就是颜色自由度  $N_c$  很大。轴矢流异常大小正比于  $\alpha_s \sim 1/N_c$ ，在这个极限下，轴矢流异常消失。最近，人们利用该极限建立了一个关于  $\eta'$  研究的高度预言性的理论框架。当考虑电磁机制作用时，将会出现第 2 种类型的异常。这将导致类似于轴矢流不会消失的发散：

$$\partial_\mu j_{Aa}^\mu |_{\text{em Anomaly}} = \frac{C_a \alpha_{\text{em}}}{4\pi} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma}, \quad (1)$$

其中： $a = 0, 3, 8$  标号  $U(3)$  的生成元； $C_0 = \sqrt{8/3}$ ； $C_3 = 1$  和  $C_8 = \sqrt{1/3}$ ； $\alpha_{\text{em}}$  是精细结构常数； $F_{\mu\nu}$  是电磁场。这里的电磁异常在 ( $\pi^0, \eta, \eta'$ ) 混合物理中扮演重要的角色，直接影响这 3 个介子到光子对的衰变。在手征极限下，他们导出一个关于  $\pi^0$ ， $\eta$  和  $\eta'$  衰变到双光子振幅的严格预言：

$$A(P \rightarrow \gamma\gamma) = A_{P\gamma\gamma} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \epsilon_\mu \epsilon'_\nu k_\rho k'_\sigma, \quad (2)$$

其中 P 是赭标介子 ( $\pi^0, \eta, \eta'$ ) 中的一个介子， $\epsilon$  和  $k$  分别代表光子的极化和动量，并且  $A_{\pi^0\gamma\gamma} = -i[\alpha_{\text{em}}/(8\pi F_\pi)]$ ， $A_{\eta_8\gamma\gamma} = -i[\alpha_{\text{em}}/(8\sqrt{3}\pi F_{\eta_8})]$ ， $A_{\eta_0\gamma\gamma} = -i[\alpha_{\text{em}}/(\sqrt{24}\pi F_{\eta_0})]$ 。振幅 A 表达式中的 F 是相应介子的衰变常数。在手征极限下  $SU(3)$  对称性意味着  $F_\pi = F_{\eta_8}$ ， $F_{\eta_0}$  不受对称性限制。然而，在大  $N_c$  极限下，我们有  $F_{\eta_0} = F_\pi$ 。所以在手征极限和大  $N_c$  极限下，我们可以预言这三介子中的任何一个介子的双光子衰变。

现在重要的问题是夸克有质量将会有何影响,  $N_c = 3$  又会带来哪些修正。实际上, 夸克质量不为零时, 相对直截了当的手征极限情形变得很复杂。在现实的世界中, QCD 重整化标度大约为 1 GeV 时, 流夸克的质量估计为  $m_u \sim m_d/2 \sim 5$  MeV,  $m_s \sim 150$  MeV。这使得  $\pi^0$  和  $\eta$  有质量, 并使得手征对称性明确的破缺从而导致了  $\eta'$  质量的移动。在这个过程中,  $SU(3)$  和同位旋破缺导致 3 个介子之间的混合。

将 QCD 手征拉氏量推广到一阶的  $\pi$  介子场, 得到  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  振幅<sup>[4-6]</sup>

$$A_{\gamma\gamma} = \frac{\alpha_{em} N_c}{3\pi F_\pi} = 2.513 \times 10^{-2} \text{GeV}^{-1}, \quad (3)$$

其中:  $N_c$  是 QCD 理论中颜色自由度的数目;  $F_\pi = (92.42 \pm 0.25)$  MeV<sup>[7]</sup> 是  $\pi$  衰变常数。这个振幅预言的宽度为

$$\Gamma = \frac{m_\pi^3 |A_{\gamma\gamma}|^2}{64\pi} = (7.725 \pm 0.044) \text{eV}。 \quad (4)$$

$F_\pi$  存在实验误差, 从而预言的宽度有 0.6% 的不确定度。这个表达式最关键的地方是它没有需要通过唯象方法确定的自由参数。上面给出的衰变振幅只有在手征极限下才是严格的。由于  $\pi^0$  的质量在强子谱中最小, 非零夸克质量导致的对这个预言的高阶修正小, 并且有三个独立的理论组给出了百分之几精度的计算结果<sup>[8-11]</sup>。精度达到理论计算精度的  $\pi^0$  辐射衰变宽度测量将是 QCD 理论最重要的检测之一。

因为  $\eta$  的质量比较大, 它对夸克质量引起的效应更加显著。  $SU(3)$  对称性破缺首先表现在  $\eta$  与  $\eta'$  介子的混合, 这是手征微扰论计算 NLO 项的主要贡献。根据一个 NLO 手征展开得到的结果<sup>[8]</sup>, 宽度  $\Gamma_{\eta \rightarrow \gamma\gamma}$  的误差将带来混合角的不确定度, 估计为  $\delta\theta \sim -[(\delta\Gamma_{\eta \rightarrow \gamma\gamma})/\Gamma_{\eta \rightarrow \gamma\gamma}] \times 15^\circ$ 。因此, 实验上对  $\eta$  的双光子衰变宽度的精确测量很重要。图 3 展示的是我们提议通过 Primakoff 效应测量  $\eta$  的双光子衰变宽度与以前实验测量结果的比较。所提议实验的测量精度得到了大幅度的提高。对提议的  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$  衰变宽度的 3% 精度的测量将可以显著地提高  $\eta - \eta'$  的混合角 ( $\delta\theta = 0.45^\circ$ ) 的精度 (如图 4 所示)。

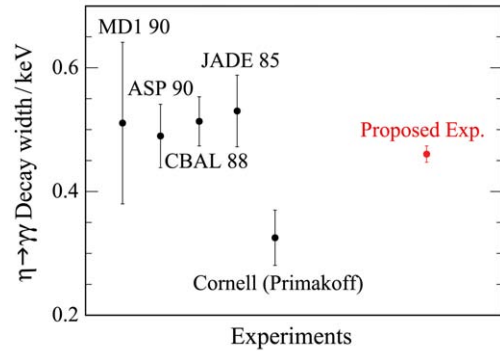


图 3 (在线彩图)  $\eta$  介子的双光子衰变宽度  
从左边数前 5 个点是目前实验数据<sup>[7]</sup>。其中前 4 个点是正负电子对撞实验的结果<sup>[7]</sup>; 第 5 个点是 Primakoff 实验的结果<sup>[12]</sup>。从左边数第 6 个点是所提议实验的结果: 预计总误差为 3%, 值的大小任意地取为以前实验的平均结果。总误差包括统计误差和计算积分时的系统误差。

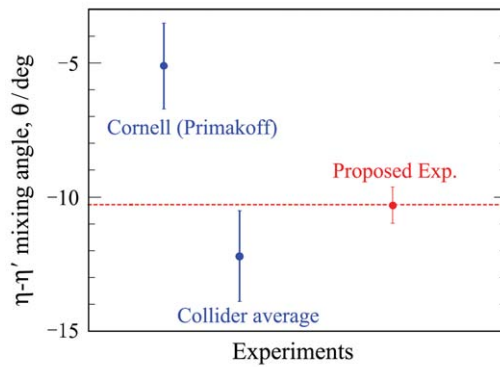


图 4 (在线彩图) 从不同实验中抽取得到的混合角。  
左边两个点分别用 Primakoff 实验结果<sup>[12]</sup>和关于  $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$  的正负电子对撞实验平均结果<sup>[13]</sup>计算得到的。所提议实验的误差期望为 3% 左右。实验的期望结果任意地设置为左边两个点的平均结果。

提高  $\eta$  辐射衰变宽度测量的精度将会广泛影响 PDG 中  $\eta$  其它衰变道的宽度, 因为其它衰变道的宽度由相应的实验测量的分支比和  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$  衰变宽度得到。一个突出的例子是  $\eta \rightarrow 3\pi$  的衰变。这些衰变过程只能通过由于质量差异导致的同位旋破缺过程发生。衰变的振幅正比于  $m_d - m_u$ , 或者正比于夸克质量平方的比例  $Q^2 = (m_s^2 - m^2)/(m_d^2 - m_u^2)$ , 其中  $m = (m_u + m_d)/2$ 。图 5 的左侧展示了用  $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$  的不同实验结果在  $\eta \rightarrow 3\pi$  衰变道确定  $Q$  的结果。由于手征对称性, 电磁相互作用对这个衰变道的影响比较小。因此, 这个衰变道被大多数人认为是精确测量夸克质量比例的唯一途径<sup>[14, 15]</sup>。另外一种获得夸克质量比例的方法是测量 K 介子的质量差异, 如图 5 右



侧所示。然而，第 2 种测量方法的最大缺点是理论上对电磁作用贡献大小的不确定度(同样也在图 5 右侧展示)。很显然，提议的对  $\eta$  辐射衰变测量的实验将提供一个新的确定轻夸克质量比例的一种模型无关的方法。

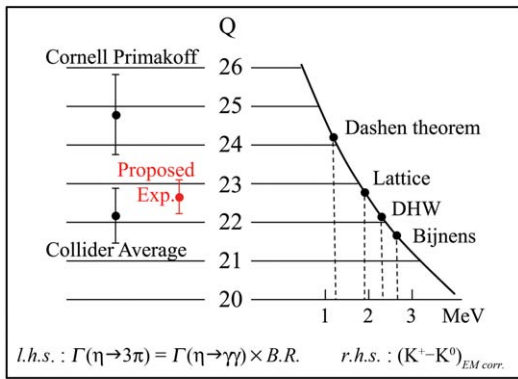


图 5 (在线彩图) 两种不同方法得到的轻夸克质量的比值

*l.h.s.* 展示的夸克质量比  $Q$  来自  $\eta$  衰变。 $\eta$  的双光子衰变宽度  $\Gamma_{\eta \rightarrow \gamma\gamma}$  测量来自 Primakoff 实验<sup>[12]</sup> 和目前对撞机实验的平均结果<sup>[13]</sup>。*r.h.s.* 展示的  $Q$  值结果是从  $K$  介子质量差异获得的<sup>[15]</sup>。对于  $K$  介子质量差异的电磁修正采用了 4 种不同的理论进行了计算。

如上所述， $\eta'$  的质量在手征极限下由于轴矢异常而不会消失。一个有趣的问题涉及到  $\eta'$  的本质：它究竟是不是一个近似的 Goldstone 玻色子？更多精确的测量加上当前的理论框架对涉及  $\eta$  和  $\eta'$  的不同过程的整体分析，将会有助于回答这个问题。例如，如果这样的分析表明  $1/N_c$  修正的大小是自然的，则表明认为  $\eta'$  是 Goldstone 玻色子是合理的。同样地，获得更加精确的双光子分波宽度的实验数据对我们理解 QCD 基本问题产生重要的影响。

除了辐射宽度的测量，我们还可以研究顶点  $\gamma\gamma^*P$ ，其中  $P$  表示  $\pi^0$ ， $\eta$  或者  $\eta'$  赝标介子， $\gamma^*$  是虚光子。这样的测量将使我们研究软的非微扰物理到硬的微扰 QCD 的转变区域。我们提议测量低  $Q^2$  (约  $0.001 \sim 1 \text{ GeV}^2$ ) 区域的光子动量依赖的形状因子  $F_{\gamma\gamma^*P}(Q^2)$ ，从而找出轴矢异常的范围，提供 QCD 预言遍举反应过程的一个干净的检测。测量低  $Q^2$  下  $\pi^0$ ， $\eta$  和  $\eta'$  的转变形状因子对模型无关地抽取转变形状因子的斜率特别的重要(如图 6 所示)，这可以测量介子的电磁相互作用的半径。目前，没有从第一性原理计算形状因子的理论计算。在 ChPT 理论

中，有两项贡献<sup>[17]</sup>。一个是来自介子圈的长程贡献，另外一个是对应项短程的贡献。ChPT 要求有第一项，第二项是模型需要的。长程的贡献很小，它们只提供形状因子下降的一小部分。最简单的模型是忽略长程贡献并假设一个 VMD (磁单极子) 类型的形状因子

$$F_\pi = \frac{1}{1 + Q^2/m_V^2}, \quad (5)$$

其中： $m_V$  是矢量介子的质量。用这样的模型，高  $Q^2$  的数据在  $m_V$  约为  $0.75 \sim 0.85 \text{ GeV}$  的范围内符合得很好。VMD 模型与目前数据 ( $Q^2 > 0.6 \text{ GeV}^2$ ) 符合得很好。提议的实验测量在当前数据很少的低  $Q^2$ ，对这个模型的检测特别的重要(如图 6 所示)。要很好地理解  $\pi^0$ ， $\eta$  和  $\eta'$  的转变形状因子的另外一个更重要的原因是赝标介子圈图的贡献是  $\mu$  子反常磁矩强子光光散射部分的主要贡献<sup>[18]</sup>。这对于  $a_\mu$  测量明显很重要，可以用来探索超出标准模型的“新物理”。

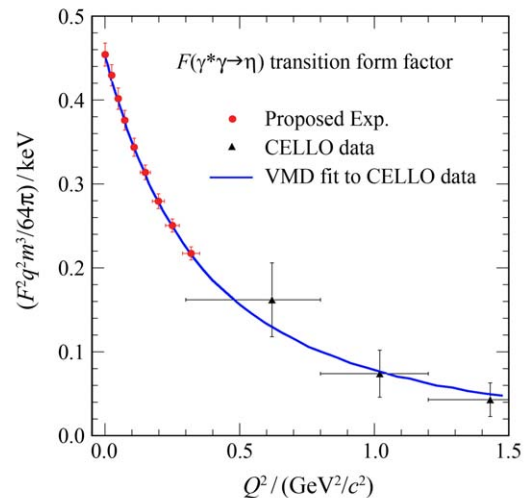


图 6 (在线彩图)  $\eta$  介子的转变形状因子

提议实验的结果是 VMD 预言的一个展现，并与 CELLO 实验数据比较<sup>[16]</sup>。提议实验结果的点展示了总误差的期望值。

在过去的 10 年里，美国杰弗逊实验室(JLab)的 PrimEx 团队通过 6 GeV 和 12 GeV 电子束研究赝标介子<sup>[19-20]</sup>，形成发展了一个全面综合的 Primakoff 实验项目。EIC 机器将会为系统开展 Primakoff 实验提供一个非常好的机遇。对于更重介子的产生，Primakoff 的截面显著地减小，由于有较大的质量，产生的角度也比较大。所以它们的 Primakoff 微分截面和本底核关联过程有更多的重叠。

提高束流的能量可以增大 Primakoff 的截面, 同时相对于核关联产生  $\{\theta_{NC} \sim [2/(EA^{1/3})]\}$  会更多地降低 Primakoff 的峰值角度  $[\theta_{Pr} \sim (m^2)/(2E^2)]$ , 从而减少本底。由于 EIC 的质心总能量比 JLab 高, 在 EIC 上开展 Primakoff 实验在产生重的介子 (比如  $\eta'$ ) 方面更有优势。

显然, 提议对  $\pi^0$ ,  $\eta$  和  $\eta'$  系统的测量将会对物理学产生深远的影响。它能让我们了解以下内容: 精确地检测手征异常, 通过模型无关的方法确定轻夸克质量的比值  $((m_u - m_d)/m_s)$ 、 $\eta$  和  $\eta'$  的混合角, 认识  $\eta'$  的 Goldstone 玻色子本质, 抽取这些介子电磁作用的半径大小。

除了轻介子系统, 更高能量的 EIC 使我们可以扩展 Primakoff 实验去测量双光子衰变宽度,  $\Gamma_{\gamma\gamma}$ , 和通过更重的介子 (比如  $f_0(980)$ ,  $f_2(1270)$ ,  $a_2(1320)$  和  $f_0(1370)$ ) 测量转变形状因子  $F_{\gamma\gamma^*}$ 。

### 3 强子极化度

电磁相互作用的极化度是强子的基本性质。它是通过在外电磁场下的分解来测量的<sup>[21]</sup>。它提供了一个很重要的检测有效场论<sup>[22]</sup>、色散理论和格点理论的方法。举个例子,  $\pi$  介子的极化度是实验上还未做的对低能 QCD 最重要的检验之一。与检验 QCD 内禀奇宇称区域的精确测量  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  类比,  $\pi$  介子的极化度是对 QCD 内禀偶宇称区域的检测。它可以通过外部电磁场诱导的介子成分的重排来探测强子内部的坚硬。

对强子极化度最好的测量是康普顿散射。我们通过有电磁矩但没有内部结构的探针, 观察微分截面的偏离来得到强子的极化度。例如, 对于带电的  $\pi$  介子 (自由的  $\pi$  介子靶是不存在的), 截至到目前的带电  $\pi$  介子的极化度实验和理论值都有很大的误差。图 7 显示目前实验获得  $\alpha_\pi - \beta_\pi$  值的分布范围较广。对  $\alpha_\pi - \beta_\pi$  新的精确测量显然很需要。另外一方面, 通过测量双介子的 Primakoff 产生  $\gamma\gamma \rightarrow pp$  的截面可以得到介子的极化度, 其中 p 代表  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$  以及其它的介子。利用交叉对称性,  $\gamma\gamma \rightarrow pp$  振幅和康普顿散射  $\gamma p \rightarrow \gamma p$  振幅相关。

JLab 正在开展一个新的通过测量  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  截面得到带电  $\pi$  介子  $\alpha_\pi - \beta_\pi$  的实验。他们利用 Hall D

大厅的最新建造的 GlueX 探测器测量。图 8 展示了来自 MARK-II  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  的实验数据<sup>[23]</sup>。图中的曲线表明 MARK-II 的数据没有足够的统计精度, 也没有覆盖完双  $\pi$  的质心总能量, 对  $\alpha_\pi - \beta_\pi$  不能起到很好的限制作用。利用 GlueX 探测器有能力在 100 个小时的实验中在阈值能量上获取上万个  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  的事例。将来 EIC 的高能量高亮度束流对这样的测量很重要, 可以获得更重介子 ( $\eta$  和  $\eta'$ ) 的高统计量数据。

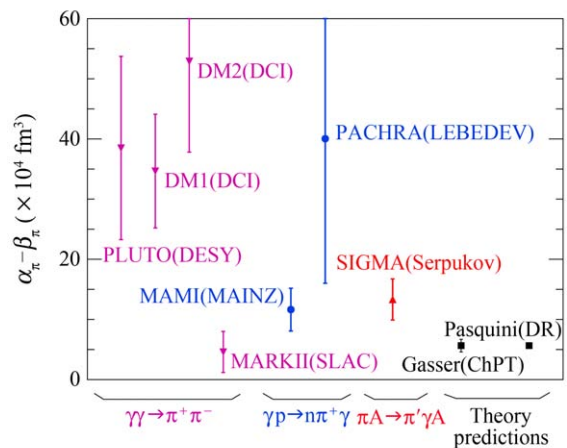


图 7 (在线彩图)  $\alpha_\pi - \beta_\pi$  的测量

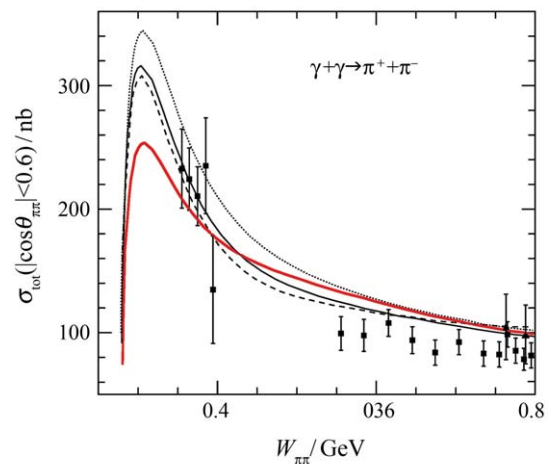


图 8 (在线彩图)  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  的截面。曲线是色散模型在不同  $\alpha_\pi - \beta_\pi$  下的计算结果<sup>[24]</sup>。

### 4 质子中性轴矢耦合

单一极化的质子或者电子对撞机装置将会提供通过  $\pi^0$ ,  $\eta$  和  $\eta'$  的 Primakoff 产生  $\gamma + p \rightarrow \pi^0/\eta/\eta' + p$  测量质子的中性轴矢耦合  $G_A$  一个新的机会<sup>[25-26]</sup>。如文献<sup>[25-26]</sup>中指出, 采用纵向极化质子进行实验, Primakoff 产生过程中的宇称对称性破缺排除了

质子的中性矢量耦合, 从而观测量只剩下中性轴矢耦合  $G_A$ 。Primakoff 产生过程中的宇称对称性破缺是源于  $\gamma-Z^0-\pi^0/\eta/\eta'$  三角异常。由于  $\gamma-Z^0$  干涉, 极化的不对称性对中性轴矢耦合  $G_A$  敏感。在  $-q^2$  约  $0.1\sim 0.5\text{ GeV}^2$  的动力学区间内,  $\eta$  和  $\eta'$  产生过程中的不对称性预言为约  $10^{-4}$ 。

## 5 其它物理

除了 Primakoff 物理, 我们还可以研究关于  $\eta$  和  $\eta'$  的稀有和禁迁衰变的分支比和上限。它将提供一个检测 QCD 基本对称性的灵敏探针, 例如, 手征对称性、电荷共轭对称性  $C$ 、宇称  $P$ 、时间反演对称性  $T$  以及 CP 和 CPT 对称性<sup>[27]</sup>。与正负电子对撞机和低能量设备上的  $\eta$  和  $\eta'$  产生比较, 高能量高亮度电子质子不对称能量对撞机在产生实验室系下更高能的  $\eta$  和  $\eta'$  方面更有优势。这在消除本底, 改善不同衰变道的分离和提高探测器的分辨率和效率方面很重要。这个研究可以提供探索超出标准模型新物理的一个非常好的机会。

## 6 总结和展望

EIC 的建造将为我们开展新的 Primakoff 实验来检验 QCD 的基本对称性和研究强子的电弱相互作用性质提供了一个前所未有的机遇。我们强调了几个实验, 其中包括: (1) 介子的双光子衰变宽度  $\Gamma_{\gamma\gamma}$  和转变形状因子  $F_{\gamma\gamma^*}$ ; (2) 强子极化度; (3) 质子中性轴矢耦合。除了 Primakoff 实验, 我们还可以测量  $\eta$  和  $\eta'$  的稀有衰变来检验电磁和强相互作用过程中的  $C$ ,  $P$  和  $T$  变换的不变性。这些测量为标准模型提供严格的检验, 并且可以用来探索超出标准模型的新物理。

在 EIC@HIAF 上开展 Primakoff 物理研究的内容十分丰富, 意义重大。为了取得预期的物理成果, 我们需要大力培养中高能核物理人才, 进一步加强国际学术合作和经验交流。随着中国经济实力的不断提升和科学技术的发展需要, 中国将逐步建造一批重大科学装置。EIC 机器是下一代最主要的加速器装置之一, 是探索物质微观世界深层结构的重要工具。EIC@HIAF 的建造将会为中国核物理基础研究提供新的动力, 并为人类探索物质结构做出巨大贡献, 同时推动经济社会的发展前进。

## 参考文献:

- [1] PRIMAKOFF H. Phys Rev, 1951, **81**: 899.
- [2] XIE Jujun, He Jun, CHEN Xurong, *et al.* Nuclear Physics Review, 2014, **31**(2): 119. (in Chinese)  
(谢聚军, 何军, 陈旭荣, 等. 原子核物理评论, 2014, **31**(2): 119.)
- [3] [2014-10-10]. [EB/OL]http://www.imp.cas.cn/xwzx/snxw/2013-03/t20130301\_3784087.html.
- [4] DONOGHUE J F, GOLOWICH E, HOLSTEIN B R. Dynamics of the Standard Model. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [5] BELL J S, JACIWI R. Nuovo Cimento A, 1969, **60**: 47.
- [6] ADLER S L. Phys Rev, 1969, **177**: 2426.
- [7] BARNETT R M, CARONE C D, GROOM D E. Phys Rev D, 1996, **54**: 1.
- [8] GOITY J L, BERNSTEIN A M, HOLSTEIN B R. Phys Rev D, 2002, **66**: 076014.
- [9] ANANTHANARAYAN B, MOUSSALLAM B. JHEP, 2002, **0205**: 052.
- [10] KAMPF K, MOUSSALLAM B. Phys Rev D, 2009, **79**: 076005.
- [11] IOFFE B L, OGANESIAN A G. Phys Lett B, 2007, **647**: 389.
- [12] BROWMAN A, DEWIRE J, GITTLEMAN B, *et al.* Phys Rev Lett, 1974, **32**: 1067.
- [13] AMSLER C, DOSER M, ANTONELLI M, *et al.* Phys Lett B, 2008, **667**: 590.
- [14] BIJNENS Johan, GASSER Jürg. Physica Scripta T, 2002, **99**: 34.
- [15] LEUTWYLER H. Phys Lett B, 1996, **374**: 181.
- [16] BEHREND H J, CRIEGEE L, FIELD J H *et al.* Z Phys C, 1991, **49**: 401.
- [17] BIJNENS J, BRAMON A, CORNET F. Phys Rev Lett, 1988, **61**: 1453.
- [18] CZARNEKI Andrzej, MARCIANO William J. Phys Rev D, 2001, **64**: 013014.
- [19] LARIN I, MCNULTY D, CLINTON E, *et al.* (PrimEx Collaboration). Phys Rev Lett, 2011, **106**: 162303.
- [20] CARDMAN LAWRENCE, ENT ROLF, ISGUR NATHAN, *et al.* The Science Driving the 12 GeV Upgrade of CEBAF. [2014-10-10]. [EB/OL]. http://www.jlab.org/div\_dept/physics\_division/GeV/WhitePaper\_V11.pdf.
- [21] HOLSTEIN B R. Comments Nucl Part Phys, 1990, **19**: 221.
- [22] BABUSCI D, BELLUCCI S, GIORDANO G, *et al.* Phys Lett B, 1992, **277**: 158.
- [23] BOYER J, BUTLERT F, GIDAL G, *et al.* Phys Rev D,

- 1990, **42**: 1350.
- [24] PAQUINI B, DRECHSEL D, SCHERER S. *Phys Rev C*, 2008, **77**: 065211.
- [25] BERNABEU J, GONZALEZ-SPRINBERG G A, VIDAL J. *Z Phys C*, 1996, **69**: 431.
- [26] BERNABEU J, GONZALEZ-SPRINBERG G A, VIDAL J, *et al.* *Phys Lett B*, 1993, **305**: 392.
- [27] DUGGER M, RITCHIE B, ANASSONTZIS E, *et al.* (The GlueX Collaboration and Other Participants). Symmetry Tests of Rare Eta Decays to All-Neutral Final States: The JLab Eta Factory (JEF) Experiment. [2014-10-10]. [EB/OL]. <http://wwwold.jlab.org/exp-prog/proposals/12/PR12-12-003.pdf>.

## Primakoff Physics with an e-p Collider

GAN Liping<sup>1</sup>, R. Miskimen<sup>2</sup>, A. Gasparian<sup>3</sup>, J. Goity<sup>4,5</sup>, WANG Rong<sup>6</sup>, CHEN Xurong<sup>6</sup>

(1. *University of North Carolina Wilmington, Wilmington, North Carolina, NC28403, USA;*

2. *University of Massachusetts Amherst, Amherst, Massachusetts, MA01003, USA;*

3. *North Carolina A&T State University, Greensboro, North Carolina, NC27411, USA;*

4. *Jefferson Lab, Newport News, Virginia, VA23606, USA;*

5. *Hampton University, Hampton, Virginia, VA23668, USA;*

6. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** The Primakoff effect is a powerful experimental tool in the nuclear and particle physics, as it has excellent kinematic filters. The future electron-ion collider (EIC) facility has a lot of advantages, such as high center-of-mass energy, high luminosity, broad kinematic range, low background, high particle detection efficiency and various ion species. It will open a door for new era of the Primakoff experiments to test fundamental QCD symmetries, to study the electro-weak properties of hadron and to search for new physics beyond the standard model. The Primakoff experiment is another highlight of the EIC machine.

**Key words:** Primakoff physics; QCD symmetry; hadron polarizability; neutral axial coupling; new physics

---

**Received date:** 29 Mar. 2014; **Revised date:** 7 Jul. 2014

**Foundation item:** National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB845406); National Natural Science Foundation of China (11175220); Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences (Y101020BR0)

**Corresponding author:** CHEN Xurong, E-mail: [xchen@impcas.ac.cn](mailto:xchen@impcas.ac.cn).

<http://www.npr.ac.cn>