

解决光子核子耦合之谜*

胡继峰^{1,†} 周小蓉^{2,††} 黄光顺²

(1 华南师范大学量子物质研究院 广州 510631)

(2 中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2021-12-28收到

† email: hujf@m.scnu.edu.cn

†† email: zxrong@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220206

1 早期探索

19世纪末放射性的发现打开了微观世界的大门。彼时，核物理学家借助天然射线轰击标靶来探索物质内部的结构。今天人们已经知道核子(质子和中子统称核子)是自然界一切可见物质的主要组分。然而核子的基本性质仍有许多问题未被完全理解。从整体角度看，质子携带一个正电荷而中子没有。如果深入到核子内部，又如何理解质子和中子之间的联系及异同呢？实验是一个解决方案。早在20世纪中期，伴随粒子加速器技术的发展，美国物理学家Hofstadter领导了电子质子散射实验，并发现质子具有内部结构^[1]。当时电子已被加速到几百万电子伏特，根据德布罗意物质波的图像，电子的能量越高，相应的波长越短，那么可探测到的物质尺度就越小。随后一系列散射实验诸如JLAB、MAMI等相继开展并积累了丰富的实验数据，还有一类湮没实验也可深入研究核子的电磁结构。如图1所示，考虑正负电子在质心参照系中对撞的情形，电子属于物质而正电子属于反物质，正反物质湮没后释放的电磁探针(γ^*)激发量子真空，从而产生了更多的物质形态。对撞后产生什么物质形态充满各种可能性(一种可能性通常被称为一个过程)。我们无法控制一种可能性使之发生，因此必须从各种可能性中寻找最感兴趣的过程。比如要研究核子的性质，我们要寻找的就是正负电子湮没到中子—反中子对($e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$)、质子—反质子对($e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$)的过程。当前质子的实验结果已日益精确，但是

* 国家自然科学基金(批准号：11805124, 12035013, U1732263, U1832103)资助项目

中子的研究始终进展缓慢，主要困难在于中子的探测与鉴别。在过去数十年，仅有两家实验组发表了 $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ 过程的测量结果。1998年位于意大利的FENICE实验^[2]首次发现虚光子与中子之间的耦合强于虚光子与质子之间的耦合。16年后位于俄罗斯的SND实验^[3]再次确认了上述结果。该结果不仅与夸克模型的预期不符(一般预期光子与质子的耦合应该更强。通常耦合强意味着单位时间内该过程发生的次数更多)，亦与大部分低能有效理论如矢量介子交换模型等不符，即所谓的光子—核子耦合反常之谜。

2 第三代北京谱仪实验

解决上述谜题的关键在于精确测量 $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ 过程的产生截面(记作 σ ，量纲是面积)。升级后的第二代北京正负电子对撞机(BEPCII)与升级前相比亮度提高了100倍，升级后的第三代北京谱

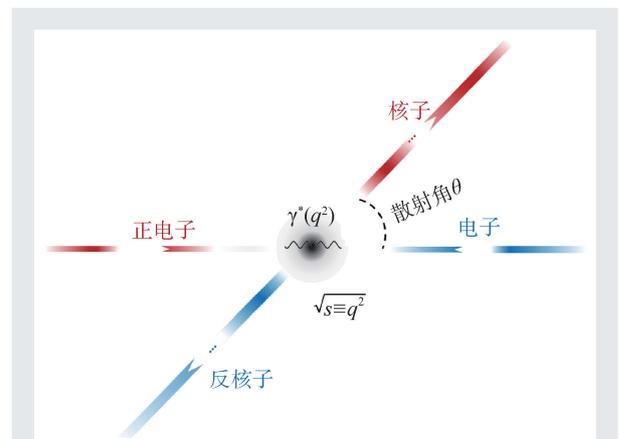


图1 正负电子通过虚光子湮没到核子—反核子对过程的示意图。其中正负电子束流质心能量 \sqrt{s} 亦是电磁探针 γ^* 的能量 $\sqrt{q^2}$

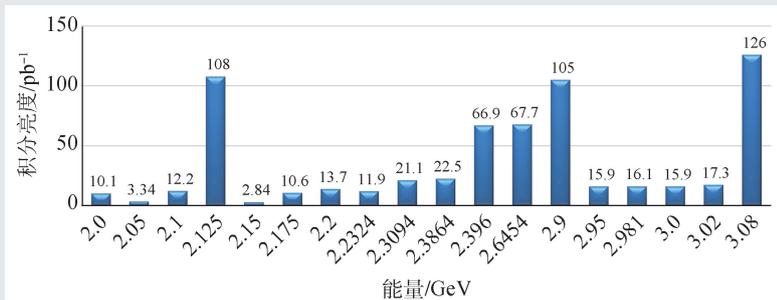


图2 在18个能量点下所采集的数据对应的积分亮度。亮度乘以一个过程的产生截面即得到该过程在单位时间内发生的次数。亮度越高意味着事件发生的次数越多,换句话说,亮度越高意味着统计涨落越小,测量结果越精确。考虑到截面反比于质心能量,通常我们会在高能量点采集更多的数据来弥补截面变小的不利因素。其中,2.125能量点的亮度显著多于其他点是因为其他研究的需求

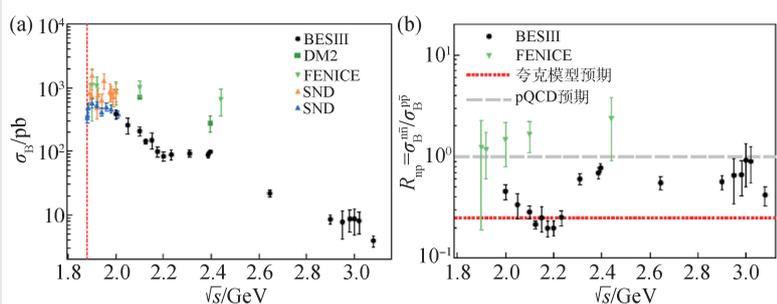


图3 (a) $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ 过程的反应截面随质心系能量的变化; (b) $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ 过程的测量截面与 $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 过程的测量截面之比值^[6]

仪实验(BESIII)^[4]探测器性能在国际同类实验中处于领先水平,这为开展精确测量提供了一个理想平台。从2012年至2015年,BESIII实验国际合作组的粒子物理学家开展了束流能量扫描方案来采集研究所需的数据:利用BEPCII加速正负电子束流到质心能量 $\sqrt{s} \equiv q^2$,再使用BESIII探测器采集正负电子对撞所产生的数据;改变束流能量并重复上述采集过程。如图2所示,在2.0—3.08 GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$)范围内,18个能量点下共计采集了积分亮度为 647 pb^{-1} 的正负电子对撞数据。在2.2324 GeV以及2.644 GeV下,还采集了约1亿非对撞事件,用来研究机器背景和宇宙线背景。所谓非对撞事件指通过控制正负电子束流在储存环中交错运行并保持探测器工作时所采集的数据。此外,还有100亿 J/ψ 事件被用来精确校准(反)中子在BESIII探测器中的系统测量偏差。

采集数据后,实验团队需要从正负电子对撞

所产生的海量背景事件中挑选出 $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ 过程相应的事件。基于两体中性过程的运动学特征(反应前后粒子的能量、动量大小均已知、运动近似直线),实验团队专门开发了重建与鉴别算法。该算法联合(反)中子在电磁量能器、飞行时间探测器或缪子探测器中的击中信息来提高(反)中子的鉴别效率。实验团队分析了正负电子湮没到双光子 ($e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$) 过程、 $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ 过程以及 $J/\psi \rightarrow n\bar{n}$ 过程来检验算法的逻辑是否符合预期。实验团队研究了三个不同的测量方案,一方面,三个方案在效率上互相补充可以最大化地减小信号事件数目的统计误差;另一方面,三个方案在结果上互相验证最大程度地避免了数据分析中的人为偏差;最后合并三个方案独立测量的结果以便给出最精确的测量结果。

与过去的测量结果相比,在2.0 GeV以上统计量提高了约60倍,是目前为止世界范围内最精确的实验结果,如图3(a)所示(黑色数据点)。可以看到, $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ 过程的反应截面随质心能量增加而减少。质心能量增加意味着电磁探针波长变小,反应截面减少意味着虚光子与中子耦合的有效面积在变小。这正是粒子物理对于微观世界的描述:被测量粒子的可见尺度依赖于探针的尺度!然后,我们把 $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ 过程的测量截面除以 $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 过程的测量截面^[5],可以预期,如果比值等于1,表明电磁探针观测不到中子与质子之间的差异;如果比值等于1/4,表明电磁探针仅观测到d/u夸克之间的差异(按照夸克模型简单预期: $\left(\frac{e_d}{e_u} = \frac{1/3}{2/3}\right)^2$, e_d 是d夸克携带的电荷)。所得比值如图3(b)所示(黑色数据点)。比值总体上小于1,这表明在2.0 GeV至3.08 GeV能量范围内,虚光子与中子的耦合强度小于虚光子与质子的

耦合强度。该结果澄清了持续20余年的光子核子耦合反常之谜。

3 总结

2021年11月8日, BESIII 实验国际合作组在 *Nature Physics* 以封面文章发表了“Oscillating features in the electromagnetic structure of the neutron”的研究成果^[6]。该研究解决了实验上的一系列挑战(包括反中子、中子和光子等中性粒子的重建、鉴别和效率校准), 通过综合分析探测器中的数字化时间幅度信号、正负电子对撞周期、机器

背景和宇宙线背景等, 在数十亿事件中成功地找到了数千个信号事件。与之前的实验结果相比, 统计量提高了60倍以上。由此, 该研究取得了目前为止世界范围内最精确的中子电磁形状因子的测量结果, 澄清了在该领域中持续20余年的光子核子相互作用反常之谜, 并首次发现了中子精细电磁结构中的振荡现象。上述结果是理解核子基本性质的新里程碑, 它可与电子散射实验的结果结合在一起, 提供关于中子内部电荷分布的重要信息。此外, 还可用于核物理、高能物理、天文学和宇宙学等领域的研究。

参考文献

- [1] Robert H, Robert W C. *Phys. Rev.* 1955, 98: 217
- [2] Antonelli A *et al.* *Nucl. Phys. B*, 1998, 517: 3
- [3] Achasov M N *et al.* *Phys. Rev. D*, 2014, 90: 112007

- [4] The BESIII Collaboration. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2010, 614: 345
- [5] The BESIII Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 124: 042001
- [6] The BESIII Collaboration. *Nature Physics*, 2021, 17: 1200

新产品 VME 主控和光纤连接器

CAEN Electronic Instrumentation

V/VX4718 - VME 主控单元 USB-3.0/以太网/光纤接口

V/VX4718 新款桥接器 (多种接口):

- USB-3.0, 以太网, 和 CONET (*) 光纤接口
- 板载基于 Linux 的 MPSoC

得益于嵌入式多核 ARM 处理器, 用户可以在设备上运行自定义程序。

V/VX3718 - VME 主控单元 USB-2.0/光纤接口

V/VX3718 完美替代已停产的 V/VX1718 和 V/VX2718 型号的新款桥接器:

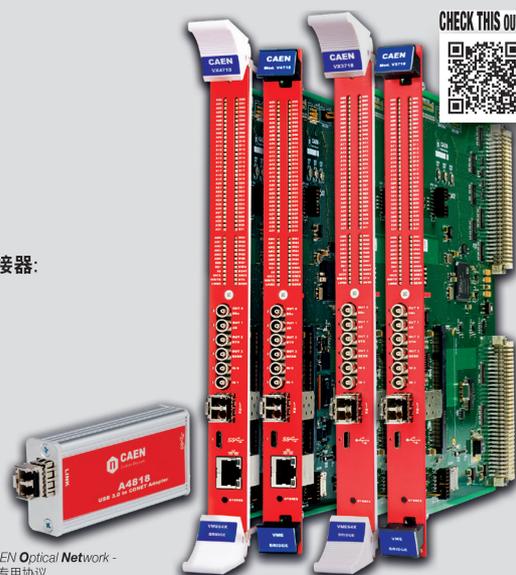
- USB-2.0 和 CONET (*) 光纤接口

A4818 - 光纤连接适配器 USB-3.0 接口

A4818 是一款紧凑型的 USB-3.0 转 CONET (*) 光纤接口适配器 (USB-供电), 可以为便携式电脑提供光纤链接功能。

笔记本电脑最多可以同时控制 8 台设备 (数字化仪和/或机箱) !

多种接口类型: USB-2.0/3.0、以太网、光纤, 满足您任意实验配置需求!



(*) CONET - CAEN Optical Network - CAEN 光纤连接专用协议

官方授权代理商 (中国): 北京中检维康电子技术有限公司
www.phyclover.com - 电话: 86-10-88026700 - 邮箱: info@phyclover.com