

CEBAF 和质子 G^0 实验研究

马中玉

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 本文简单介绍了美国 CEBAF(连续电子束流加速器)的近况和研究方向,以及 C 厅将展开的研究核子内 S 夸克成分的极化电子与质子散射宇称破坏不对称性测量的实验,即质子味单态电形状因子 G^0 实验.

关键词 CEBAF, QCD, 夸克和胶子, 质子味单态形状因子 G^0 , S 夸克.

CEBAF 是美国连续电子束流加速器(The Continuous Electron Beam Accelerator Facility)的简称,它将于 1994 财政年第三季度(即 94 年春)开始物理实验研究.在 1989 年美国核科学咨询委员会(NSAC)提出的美国九十年代核科学的长远计划(LRP)^[1]中,把完成 CEBAF 装置和开始它的研究计划列为美国当前核科学的首位.目前,加速器的安装和调束及实验大厅探测仪器的安装正按计划进行.到今年初统计约有 199 个研究机构的七百多位物理学家将参加 CEBAF 的研究计划,共提出了 65 个课题,已批准 34 个,需要 783 天束流时间.

CEBAF 的研究方向是用中能电子或极化电子与核子或核的散射,在夸克-胶子层次上研究强相互作用的物理机制,研究高能 QCD 的渐近自由区域到低能强相互作用之间的过渡区. CEBAF 提供能量为 4GeV 的电子束流是研究这个过渡区域的理想探针.能量为 4GeV 的电子波长约为核子大小的十分之一.分析认为,用这一能区的电子通过深度非弹性散射可观察到从核子自由度到夸克自由度的过渡.此外,用电子作探针有很多优点,如我们对电磁相互作用了解得很清楚;电磁相互作用强度较弱不会引起靶核内部结构很大的干扰等.正是因为电磁相互作用弱,一般用电子作探针的实验却需要很长的束流时间,即使对 CEBAF 的连续束流,大部分实验课题仍需要 1000 小时以上的束流时间. CEBAF 可以同时提供三个实验终端(A, B, C

厅),用互不相关的能量和强度的电子束流开展实验研究.

1 A 厅

A 厅的主要实验设备是两个相同的高分辨磁谱仪(HRES+HRHS),分别测量电子和强子.可以做高动量转移下电子与轻核非弹性散射($e, e'p$)实验,进行散射电子和敲出质子的精确符合测量,通过研究与传统核模型——核子、介子交换模型的偏离,来测定高动量转移下质子和中子的电磁形状因子,同时它也对微观模型进行检验.

2 B 厅

B 厅内安装有一台大接收度的粒子探测器(CLAS),它由 6 个超导磁线圈产生环形磁场,超导线圈中间的扇形区域装有漂移室、Cherenkov 计数器、示波辐射计数器,以及区分和确定同时发射的带电粒子动量的电磁量热器.示波计数器和量热元件一起还可以确定中性粒子的能量. B 厅主要研究核子的夸克-胶子结构以及它们的激发态.实验上还未观察到,特别是它们之间的跃迁强度还几乎没有实验数据.对核子新的激发态,跃迁强度以及胶子激发态的探测还可以进一步检验现有的理论模型.

3 C 厅

C 厅实验室可根据课题来安装专门的实验

仪器. 最初计划安装一台中等分辨率的高角动量谱仪和一台大接收度短轨道谱仪, 用来测量低动量和短寿命粒子, 如 K 和 π 介子. 目前, 已经批准将在 C 厅内开展的一个重要研究课题是极化电子与质子散射宇称破坏的精确测量, 即测量质子 G°_E , 质子味单态电磁形状因子, 研究质子中奇异夸克的成分^[2]. 另一个极有兴趣的课题是“色透明”(“Color transparency”)或研究在高动量转移时核子的有效相互作用强度逐渐减弱的可能性, 但是在实现这个课题研究之前, 目前还需要大量的实验和理论研究.

4 质子 G° 实验研究

核子中奇异夸克成分的研究是当前国际上极为关注的课题. 已有的一些新实验显示核子内 S 夸克对一些可观察量的贡献不可忽略. 深度非弹性散射实验表明 S 夸克约带有 3% 核子动量^[3]. 由 EMC 实验^[4]和 π -N 项测量^[5]分别给出质子 S 夸克的轴矢量流和标量矩阵元不为零. 至今还没有实验给出质子 S 夸克的矢量流矩阵元的直接测量. 质子 G° 实验就是通过极化电子与质子弹性散射宇称破坏不对称性的测量, 给出质子 S 夸克矢量流的矩阵元, 从而研究核子内 S 夸克成分.

电子与核散射除了通过相互作用与核作用, 还可通过弱相互作用的中性流与核作用(见图 1). 电磁相互作用过程是宇称守恒的过程, 而弱相互作用会引起宇称不守恒. 平行于电子传播方向极化电子和反平行极化电子散射截面的差给出了宇称不守恒的描述, 定义宇称破坏不

对称性 A_{LR} 为

$$A_{LR} = \frac{\sigma_+ - \sigma_-}{\sigma_+ + \sigma_-} \quad (1)$$

其中, σ_+ 和 σ_- 分别为平行和反平行极化电子与核散射截面. 极化电子与质子弹性散射的宇称破坏不对称性可以用质子的电磁流的电、磁形状因子 G°_E, G°_M 和中性流的电、磁、轴矢量形状因子 $\tilde{G}^{\circ}_E, \tilde{G}^{\circ}_M$ 和 \tilde{G}°_A 来表示:

$$A_{LR} = - \frac{G_F Q^2}{\pi \alpha \sqrt{2}} \{A_E + A_M + A_A\} / A_D \quad (2)$$

其中

$$A_E = e G^{\circ}_E \tilde{G}^{\circ}_E, \quad A_M = \tau G^{\circ}_M \tilde{G}^{\circ}_M$$

$$A_A = - \frac{1}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta_w)$$

$$\cdot \sqrt{\tau(1+\tau)(1-\epsilon^2)} G^{\circ}_M \tilde{G}^{\circ}_A$$

$$A_D = e(G^{\circ}_E)^2 + \tau(G^{\circ}_M)^2, \quad \tau = \frac{Q^2}{4M^2}$$

$$\epsilon = [1 + 2(1+\tau) \tan^2 \frac{\theta}{2}]^{-1}$$

G_F, α 分别为弱相互作用和电磁相互作用耦合常数, Q 为电子的四动量转移, θ_w 是 Weinberg 角. 实验测量在相同的动量转移下不同散射角(即不同的 ϵ 值)的 A_{LR} , 类似于 Rosenbluth 方法可以分离出质子中性流的电磁形状因子. 在树图近似下, 不考虑辐射修正以及假定中子和质子的同位旋对称性, 我们可以得到味 SU(3) 基下质子的味单态电磁形状因子和质子中 S 夸克的电磁形状因子分别为

$$G^{\circ}_{E:M} = 4 \left(\frac{1}{2} - \sin^2 \theta_w \right) G^{\circ}_{E:M} - \tilde{G}^{\circ}_{E:M} \quad (3)$$

$$G^{\circ(S)}_{E:M} = (1 - 4 \sin^2 \theta_w) G^{\circ}_{E:M} - G^{\circ}_{E:M} - 4 \tilde{G}^{\circ}_{E:M} \quad (4)$$

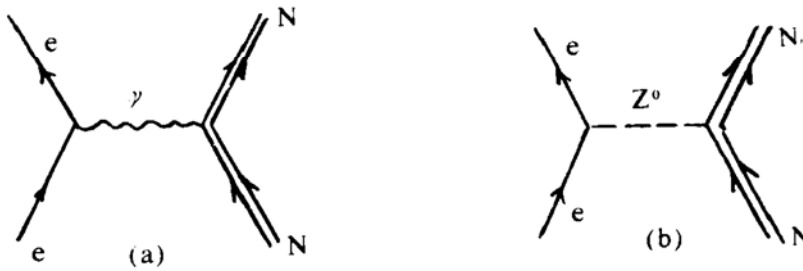


图 1 电子与核散射, 单光子交换(a)和单中性玻色子 Z^0 交换图(b)

下标 E, M 表示电或磁形状因子.

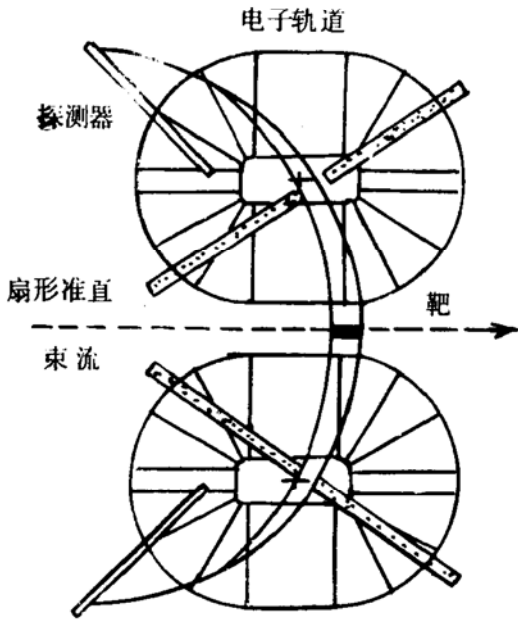


图2 前角测量反冲质子实验草图

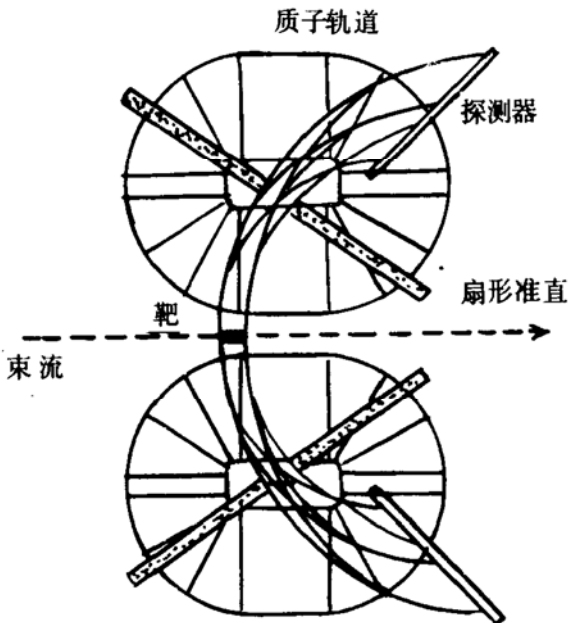


图3 后角测量散射电子实验草图

G° 实验计划研究动量转移在 $0.1\text{GeV}^2 \leq Q^2 \leq 0.55\text{GeV}^2$ 范围内极化电子与质子弹性散射, 在前角(测反冲质子)和后角分别测量宇称破坏不对称性. 因为 A_{LR} 只有约 10^{-6}

量级, 为了达到 5% 的统计精度, 需要约 10^{13} 计数率, 因而需要束流亮度大和探测器具有大的接收度. 实验设计用 20cm 长的 LH_2 靶和 $40\mu\text{A}$ 束流强度(相当于亮度为 $2.1 \times 10^{38}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), 探测器的立体角接收度对前角测量为 0.87Sr , 对后角测量为 0.5Sr . 实验设计要求系统误差达到 $\Delta A \leq 2.5 \times 10^{-7}$, 约为 A_{LR} 测量值的 5% 或更小. 计划建造一台由八个超导磁线圈组成的谱仪, 图 2、3 分别给出了前角和后角测量的实验草图. 八个超导磁线圈相应于束流方向是轴对称安置的, 图中给出的是其中二个线圈中粒子的规迹. 表 1、表 2 分别给出前角和后角测量的运动学. 前角测量反冲质子, 入射电子能量 2.5GeV , 不同的反冲质子角度和动量相应于不同的动量转移. 后角测量时不同的动量转移 Q^2 值, 需要测量不同能量的极化电子散射.

表 1 不对称性前角测量运动学. θ'_p, P' 和 T'_p 分别为反冲质子的角度、动量和动能

$Q^2(\text{GeV}^2)$	$\theta'_p(\text{deg})$	$P'(\text{MeV}/c)$	$T'_p(\text{MeV})$
0.1~0.55	76.8~59.6	321~797	53~293

表 2 不对称性后角测量运动学. ϵ, ϵ' 和 θ_e 分别为入射电子能量、散射电子能量和电子散射角

$Q^2(\text{GeV}^2)$	$\epsilon(\text{MeV})$	$\epsilon'(\text{MeV})$	$\theta_e(\text{deg})$
0.2	335	228	108
0.3	428	268	108
0.4	512	299	108
0.5	590	324	108

G° 实验有包括 CEBAF, Illinois 大学等九个研究机构参加的强有力的国际合作组, 中国原子能科学研究院也参加了这项合作项目. 后角低动量转移 $Q^2 = 1\text{GeV}^2$ 的测量将首先在 MIT Bates 的 SAMPLE 实验上开展, 同时也用来测量电子与氘核的弹性散射, 研究轴矢量形状因子的辐射修正. 目前, 实验的各项准备正在有组织地进行着, 实验设备和谱仪的建造仍需要一定的时间. 人们对这一极有兴趣的实验研究正注以极大的关注.

参 考 文 献

1 "Nuclei, Nucleons, Quarks — Nuclear Science in the 1990's", A Long Range Plan by the DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee, Dec., 1989.

2 CEBAF Proposal : "G° : Measurement of the Flavor Singlet

Form Factors of the Proton", PR91 - 017 - Revised, Spokesman : Beck. D

3 Abramowicz H, et al. Z. Phys., 1982, C15 : 19

4 Ashman J, et al. Nucl. Phys., 1989, B328 : 1

5 Donoghue J, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1989, 39 : 1

CEBAF and Measurement of the Flavor Singlet Form Factor G° of Proton

Ma Zhongyu

(Institute of Atomic Energy of China, Beijing 102413)

Abstract The current status and scientific goal of CEBAF (The Continuous Electron Beam Accelerator Facility) are briefly presented. The project of the measurement of the flavor singlet form factor G° of proton at C hall is outlined. A precise measurement of parity violating asymmetry in the scattering of polarized electron from a proton target enables one to explore the strange quark content in the proton.

Key Words CEBAF, QCD, quark and gluon, flavor singlet form factor G° of proton, S quark.

(上接 70 页)

自然科学基金委应投资支持高电荷态离子源的建设. 目前, 这一领域的研究工作主要有: 双电子复合、分解复合、多电子俘获、多电子电离、高电荷态离子与固体表面相互作用和微分截面测量等. 主要目标: (1) 短波长激光光源, 特别是软 X 射线激光以及 X 射线激光武器的研究; (2) 高温等离子体的原子、分子物理过程; (3) 高电荷态离子的能级结构、有效电荷效应、跃迁几率和寿命等.

- 4 慢离子-原子碰撞中的准直和定向
- 5 多光子电离和多光子负离子分离
- 6 信息

本次会议决定, 第十九届国际电子、原子碰撞物理学术会议将于 1995 年 7 月 26 日至 8 月 1 日在加拿大 Whistler 召开; 建议第二十届和第二十一届会议将分别于 1997 年和 1999 年在奥地利维也纳及日本召开.

7 我国在这一领域研究中的现状及差距

1) C_{60} 、 C_{70} 、 C_{84} 团簇热

90 年代初, 曾轰动全球, 各领域都以各自的角度来研究 C_{60} . 例如, 凝聚态物理、超导物理、激光物理、化学物理、原子分子物理等. 但是, 在我国原子分子碰撞物理领域没有几家开展这方面的研究工作. 这不是大家对此领域不感兴趣, 而是无经

费开展.

2) 离子冷却贮存环上的原子物理研究

前已提到, 从 1987 年到 1992 年的 5 年时间内, 在世界上建成的 10 台离子冷却贮存环中, 位居首位的是德国, 瑞典也有两台. 众所周知, 建造一台离子冷却贮存环并非容易, 约需人民币 1 亿多元. 而我国是一个大国, 连一台离子冷却贮存环都没有, 真是遗憾. 目前, 兰州近代物理所已有详细方案, 正向院部申请.

3) 高电荷态离子碰撞物理实验

中国科学院物理所、上海复旦大学和北京大学等都在或即将开展这方面的研究工作. 但是, 目前全国高电荷态离子源仅有兰州近代物理所以 50 万美元从法国进口的一台. 为了适应原子、分子碰撞物理研究的需要, 他们又仿制了一台, 现正在调试之中. 我们希望国家基金委应大力给予经费资助.

开展高电荷态离子碰撞实验研究, 仅有一台离子源是不够用的, 希望国家有计划、有步骤地资助建立若干个实验点, 以便使我们在这一领域的研究有一个良好的物质条件.

(中国科学院近代物理研究所 潘广炎 杨锋供稿)