

文章编号: 1007-4627(2005)04-0337-06

Jefferson 国家实验室(JLab) 简介*

叶云秀¹, 吕海江^{1,2}

(1 中国科学技术大学近代物理系, 安徽 合肥 230027;

2 黄山学院物理系, 安徽 黄山 245021)

摘要: 简要介绍了 JLab 的一般情况、JLab 高性能加速器 CEBAF(Continue Electron Beam Accelerator Facility)和 3 个实验大厅的主要实验设备。着重介绍了 CEBAF 的连续束流与实验大厅的高密靶及高精度谱仪结合所得到的高精度实验结果, 介绍了 JLab 实验室要解决的根本问题、相应的物理课题以及中国组正在参与数据分析和正在做的实验。最后简要介绍了 CEBAF 升级至 12 GeV 及其带来新的研究机会和新的物理课题, 以及中国组与 JLab 的合作情况。

关键词: CEBAF 连续束流; JLab 物理课题; CEBAF 能量升级; 中国组参与合作

中图分类号: TL57; O572.33 **文献标识码:** A

1 引言

核物理是研究强相互作用、核物质微观结构的前沿学科, 其中包括核子(强子)内部的夸克-胶子结构(强子物理)和原子核结构及其动力学等。核子内部结构的研究主要包括核子的夸克、胶子结构波函数, 如它的电磁形状因子、它的自旋结构函数和它们随各种条件的变化, 以及核介质的影响; 研究夸克囚禁的起因和在夸克-胶子图像下核子-核子力的起因和性质等。同时, 核子与核又是检验强相互作用理论(QCD)的最佳场合之一。自从 20 世纪 60 年代用 e-p 弹性散射、共振激发和 20 世纪 70 年代用深度非弹散射研究核子的形状因子和内部结构, 以及 20 世纪 80 年代末研究核子的自旋结构以来, 轻子-核子相互作用一直是研究核子的最佳途径, 其原因是轻子是点粒子, 只参与电磁相互作用和弱作用, 不参与强作用。电磁相互作用已研究得十分清楚, 弱相互作用在此可忽略不计。核/核子是一个强相互作用的系统。包含在实验数据中的强相互作用部分可以明确地抽取出来, 强作用理论可得到明确的检验。强子物理(以核子物理为典型)目前主要的研究手段仍然是高能轻子对核子、核的散射; 另外还有光子束、强子束打靶。JLab 是一个国际开放

型实验室, 它的 CEBAF 是电子加速器, 能量升级后除有高能轻子外, 还有强的光子束流。中国组(中国科学技术大学、中国原子能科学院及复旦大学)与 JLab 的实际合作已有 3 年多的时间, 本文结合我们与 JLab 的实际合作研究对 JLab 作一简要介绍。

2 JLab 加速器

2.1 一般情况

美国 Jefferson 国家实验室的加速器 1995 年出束运行并开始实验。它的加速器 CEBAF 和实验设备(包括探测系统和高密极化靶)具有特殊的优越性能。高亮度带来实验的高统计精度, 实验周期短, 实验内容非常丰富, 实验课题也很广泛。3 个实验大厅(Hall A, Hall B 和 Hall C)每年可完成约 10—15 个实验; 高性能束流加上高精度谱仪, 致使实验结果一般都有明确的结论。

2.2 CEBAF 性能

CEBAF 为超导回旋电子加速器, 最大能量为 6 GeV, 在 1—6 GeV 之间, 可以有几个分离能量: 1.2, 2.4, 3.6, 4.8 和 6 GeV; 束流的能散度小

收稿日期: 2005-09-15

* 基金项目: 面向 21 世纪教育振兴行动计划(YL1365000001)

作者简介: 叶云秀(1938—), 女(汉族), 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事实验核与粒子物理工作;

E-mail: yeyx@ustc.edu.cn

($\Delta E/E=2.5 \times 10^{-5}$), 且为连续束流; 电子极化率高达 80%; 聚焦性能好(束斑小于 $50 \mu\text{m}$); 束流可同时供 3 个实验厅实验。束流的极化度、强度、斑点大小及位置都有两套监测装置。由于连续束流, 在保证高亮度方面, CEBAF 的束流因子比其他加速器高 3 个数量级以上, 因为一般加速器的占空比小于 10^{-3} , 而 CEBAF 的占空比为 1。

2.3 JLab 的科学任务

JLab 的既定任务是在夸克-胶子水平上对核子和核作基础研究。例如: 强子怎样由 QCD 的夸克和胶子构成? 核子的结构函数什么样? 核子的自旋结构怎样? 它们的电磁形状如何分布? 价夸克、海夸克、胶子对核子自旋、形状因子的贡献怎样? 纵向怎样? 特别是横向, 又是什么样的? 对于核子-核子力, QCD 的基础是什么? 理解核结构的极限在哪里? 描写核可以到什么精度? 描写核时, 在什么尺度上从核子-介子的描写跳到 QCD 的描写? 在什么地方 $q-q$ 相互作用的动力学从强作用(即夸克囚禁)转到微扰 QCD 区? 夸克囚禁的机制是什么? 手征对称性的破缺是怎样发生? ……。

3 3 个实验大厅的设备

3.1 Hall A

3.1.1 Hall A 的实验设备

有两个高分辨率谱仪和小角度磁体以及高密度极化靶。谱仪具有高动量分辨率: $\Delta p/p = 10^{-4}$; 谱仪可在可转动的轨道上转动, 因而可以在不同的角度上测量散射电子, 不同的角度对应不同的四动量转移平方($-Q^2$); 非常小角的磁谱仪可以测量非常小 Q^2 的散射事例。10 个大气压的 ^3He 极化靶的极化度 $\sim 40\%$ 。由于束流斑点小于 $50 \mu\text{m}$, 相互作用的顶点位置可以定得很准。用高频正弦波拉开束流以保护靶材料, 用软件跟踪束流与靶作用位置。高密度靶加连续束流使亮度 L 高达 $10^{39} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$, 保证了实验数据的高统计精度; 高精度谱仪保证了小的系统误差。因此实验结果确定、可信。以下是两个实验结果的例子。

图 1 给出了 JLab 以及其他实验室的结果。JLab 的实验结果误差很小^[1], 从而可信度高; 且首次精确测量了在高 x 处的 A_1^n , 抽取出了价夸克自旋分布, 结合各种理论模型, 加深了对价夸克图像

理解。在 JLab 实验以前, $\mu G_E/G_M = 1$ (虽然误差很大, 但人们认为它符合 Rosenbluth 理论), 其中, μ 为核子磁矩, G_E 和 G_M 分别为电和磁形状因子。JLab 的实验为自旋转移实验, 极化电子散射过程中把自旋转移给质子: $\vec{e}p \rightarrow e\vec{p}$, 其结果完全不同于以上结论, 并给出了确切的值和随 Q^2 的变化趋势。

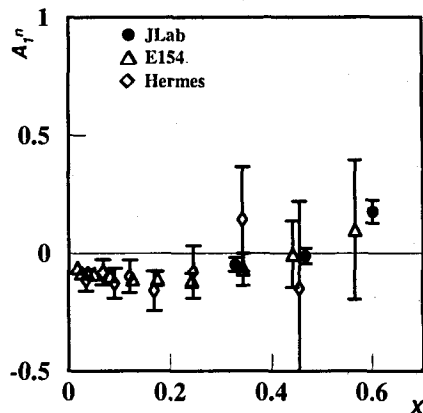


图 1 中子的自旋结构函数

从图 2 清楚地看到, 极化转移时形状因子与 Rosenbluth 理论之间的差别^[2]。而最近 JLab 的非极化实验测量的数据精度有很大提高, 并发现其形状因子与标度形状因子接近, 但与极化转移实验不一致^[3]。可见夸克的自旋极化与电磁形状因子直接相关。

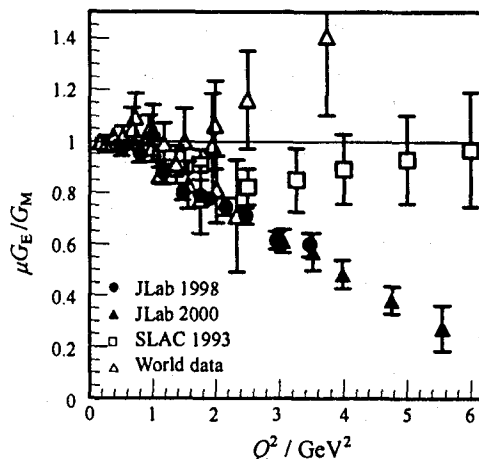


图 2 质子的电磁形状因子

3.1.2 Hall A 的研究课题

(1) 形状因子和共振态: 包括核子电磁形状因子(包括奇异性形状因子)、 $N \rightarrow N^*$ 电磁跃迁形状因子、 $N \rightarrow \Delta$ 跃迁形状因子及轻核形状因子的研究, 以及较高的共振态研究和寻找丢失的共振态。

(2) 核子/轻核结构函数: 首先是对核子的自旋结构函数的研究, 如价夸克的自旋结构, 在高 x 处的 A_1^+ ; 试验各种求和规则: Bjorken, GDH (Gerasimov-Drell-Hearn), 普遍化的 GDH 和 B-C 求和规则; 研究矩和极化能力; 测量夸克-胶子关联函数 g_2^+ ; 研究夸克-胶子二重性; 进行半单举实验测量及研究横度以及研究海夸克的不对称性; 并研究轻核的结构函数。

(3) 少体物理和核介质效应: 研究少体形状因子、光裂; 试验少体的 GDH 求和规则, 研究在核介质中的核子性能的变化——核介质效应、色透明效应、强子化以及库仑求和规则等。

(4) 正在进行数据分析的课题——小角 GDH 求和规则: GDH 求和规则是从最基本的物理原理出发, 由 Lorentz 不变性、规范不变性、低能定理、么正性、光学定理及不相减的扩散关系应用于朝前康普顿散射幅度的计算得到的一个求和规则。它是核子自旋结构与反常磁矩之间的一个基本关系式:

$$I^{\text{GDH}}(Q^2) = \int_{\nu_0}^{\infty} (\sigma_{1/2}(\nu) - \sigma_{3/2}(\nu)) \frac{d\nu}{\nu} = -\frac{2\pi\alpha_{\text{EM}}k}{M}, \quad (1)$$

其中, ν 是散射过程中能量转移量, $\nu = E - E'$, ν_0 是 π 产生阈, $\sigma_{1/2}$ 和 $\sigma_{3/2}$ 分别为散射中虚光子与质子自旋为反平行和平行时的散射截面, M 为质子质量, k 是核子的反常磁矩, $\alpha_{\text{EM}} = e^2/(4\pi)$ 。该实验将尝试把两种极端情况 ($Q^2 \rightarrow \infty$ 和 $Q^2 \rightarrow 0$) 连接起来。在 $Q^2 \rightarrow \infty$ 的区域, 轴荷矩由 Bjorken 求和规则描写: $I^{\text{Bj}}(Q^2) = (16\pi^2\alpha_{\text{EM}}/Q^2)\Gamma_1$, 这里 Γ_1 是轴荷对 Bjorken 变量 x 的积分, 而在 $Q^2 \rightarrow 0$ 的区间由 GDH 求和规则描写。它们分别代表了弱作用区(微扰 QCD 理论范围)和强作用区(非微扰 QCD 理论范围)的求和规则。因此, 实验上测量 GDH 轴荷矩相对 Q^2 的演化规律, 可以提供连接强 QCD 和 pQCD 动力学的桥梁, 有可能把强子的自旋结构在整个运动学区由一个基本理论来描述。图 3 给出了 GDH 求和规则点、夸克模型和手征微扰论给出的在 $Q^2 \rightarrow 0$ 附近随 Q^2 演化的趋势以及现有的实验点^[4]。理论上, 在 $Q^2 \rightarrow 0$ 处, 手征微扰论(χ PT)曾预言 GDH 的斜率是正的^[5], 而唯象学夸克模型预言是负的^[6]; 近期 χ PT 也给出斜率为负的结论^[7]。但在

Q^2 为 0.02—0.2 的区间缺乏实验数据, 这是实验要解决的基本问题之一。在此区间的实验点可决定曲线在区间的走向, 并对手征微扰论给出一个基准检验。因为在该区间, 人们认为手征微扰论是有效的, 同时可合理外推到 $Q^2 = 0$ 的点, 检验 GDH 点。

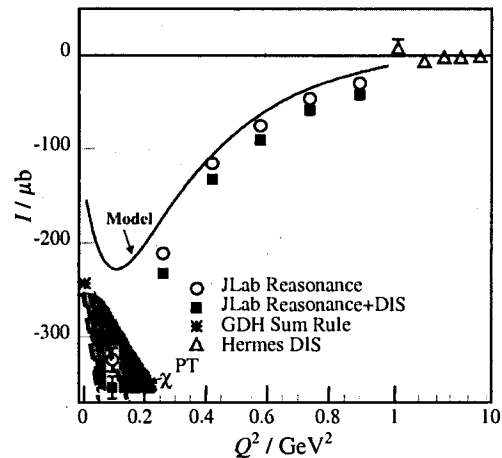


图 3 GDH 的理论和实验现状

小角度 GDH(意味着小 Q^2) 实验只有在 JLab Hall A 的实验条件下进行, 因为它的实验装置可测到非常小角的散射电子, 得到非常小的 Q^2 处的实验点。中国科大组将对该实验的第一期数据进行分析。在做实验数据的物理分析之前, 我们首先对实验数据进行处理, 其中现在已经完成的工作有: Pre-shower 和 Shower 的能量刻度; 它们的电子探测效率的研究, 且研究了探测效率对不同动量的依赖关系, 研究了在保证一定的接收度情况下的 cut 条件; Cherenkov 探测器的单光子峰的刻度; 电子的探测效率和对 π 的排除率的研究。最后, 由 Pre-shower, Shower 和 Cherenkov 联合, 得到了总的电子的探测效率和 pion 的排除率。结果表明, 该探测装置对粒子的鉴别能力非常好。我们的结果得到合作组成员们的高度评价, 并被其他成员采用。

(5) 中国组近期参与的实验:

- 1) Deeply virtual Compton scattering at 6 GeV.
- 2) Deeply virtual Compton scattering on neutron.
- 3) Studying internal small-distance structure of nuclei via the triple-coincidence ($e, e', p + N$) measurement.

4) High resolution hypernuclear 1p shell spectroscopy.

5) Constraining the nucleon strangeness radius in parity violation electron scattering on H.

6) Parity violation from ^4He at low Q^2 : A clean measurement of ρ_s .

这些实验对强作用理论 QCD 的研究非常有意义, 如实验(3), 高精度超核谱是为了研究 Λ -N 的相互作用力, 特别是自旋依赖关系的相互作用动力学。它是由电子与核的散射, 使核中的一个核子转换为 Λ 超子, 研究在核环境下的强相互作用力的性质。通过由于超核自旋引起的成对的能量劈裂得到相关信息。虽然产生截面很小, 但由于 Hall A 的高亮度和可以对散射角很小的散射电子进行测量(小的散射角意味着有大的虚光子流, 因而有较大的事例率)以及谱仪的高精度分辨(能量分别可达 280 keV), 实验仍然可以得到相当高的统计精度。

实验(5)和(6)是为研究核子和轻核的奇异性形状因子。因为核子海的动力学起源仍然难以捉摸, 所以在实验上探索海夸克分布的不对称性和磁矩, 对研究其动力学起源有直接的意义。奇异海夸克的研究是探知核子海的一个直接的、纯的探针。

理论上认为奇异夸克在决定基本的、大量的核子信息时有着不可忽视的作用, 如对核子的电荷半径和磁矩很可能是有贡献的, 因为它们的质量与核子的质量以及强相互作用的标度量是可比较的。另一方面, 以经验为主的成功的 OZI 律指出: 在低能时奇异夸克效应应该是高抑制的。另外, 理论上对奇异性量的估算出入也很大, 如格点 QCD、强子模型和有效强子理论, 对于奇异性电磁形状因子、奇异性半径的理论估算和对 Direc 方均半径的估算都有很大的差别。如 Direc 方均半径的值, 从 -0.2 到 $+0.2$ (fm)²; 对奇异荷半径的估算值从 -3 到 $+3$; 对奇异性磁矩, 理论估算值从 -0.33 到 $+0.03$ 。只有实验才能澄清理论上的矛盾。我们参加的这两个实验是通过测量左右极化电子对核子或核的弹性散射时的宇称破坏幅度来得到奇异性形状因子。宇称不对称幅度 A^{PV} 由标准模型给出, 与奇异形状因子相关^[8]:

$$A^{PV} = \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L} = \frac{-G_F Q^2}{\pi\alpha\sqrt{2}}$$

$$\frac{\epsilon G_E^{PY} G_E^{PZ} + \tau G_M^{PY} G_M^{PZ} - \frac{1}{2}(1 - 4\sin^2\theta_w)\epsilon' G_M^{PY} G_A^{PZ}}{\epsilon(G_E^{PY})^2 + \tau(G_M^{PY})^2}, \quad (2)$$

这里 G_F 是 Fermi 耦合常数, $G_{E(M)}$ 和 $G_{E(M)}^{\prime}$ 分别是光子、 z^0 介子交换的电(磁)形状因子, G_A^{\prime} 为弱轴形状因子。其中上式由 z^0 介子交换产生的电磁形状因子可以表示成光子交换的电磁形状因子和奇异性电磁形状因子(在假定质子和中子同位旋对称后), 即

$$G_{E,M}^{PZ} = \frac{1}{4}(G_{E,M}^{PY} - G_{E,M}^{NY}) - \sin^2\theta_w G_{E,M}^{PY} - \frac{1}{4}G_{E,M}^{\prime}. \quad (3)$$

在质子和中子的电磁形状因子 $G_{E,M}^p$ 和 $G_{E,M}^n$ 很好知道的情况下, 未知量仅仅是奇异性形状因子 $G_{E,M}^{\prime}$, 测得奇异性形状因子后, 原则上可得到奇异性磁矩 μ_s 和奇异荷分布半径 ρ_s , 因为它们与奇异性形状因子间有如下关系:

$$\mu_s \equiv G_s^{\prime}(0), \quad (\text{当 } \tau \equiv \frac{Q^2}{4M_p^2} \rightarrow 0 \text{ 时})$$

$$\rho_s \equiv \left. \frac{dG_s^{\prime}}{d\tau} \right|_{\tau=0},$$

但是, 在电子-质子散射中, 除电磁形状因子外, 还有弱轴形状因子 G_A^{\prime} 的贡献, 因此, 使得完全分离奇异性电磁形状因子和弱轴形状因子成为不可能。所以对液氢的散射实验只能测得奇异性磁矩与奇异性半径的线性组合: $\rho_s + \mu_p \mu_s$ (这里 μ_p 是质子磁矩)。由 ^4He 的散射实验则可直接测量 ρ_s , 因为理论上认为 4 核子态是无自旋的, 是同位旋标量的相干态, 因此, 仅有奇异性形状因子对宇称不对称性的贡献为未知, 得 $G_s^{\prime} \approx \rho_s \tau$ (当 $\tau \rightarrow 0$ 时)。因此这两个实验结合就可得到 μ_s 和 ρ_s 。

3.2 Hall B

实验装置为大接收度的谱仪-大角的电磁量能器, 以探测光子为主, 测量由电子、光子引起反应的产物, 亮度为 10^{34} [cm⁻² s⁻¹]。亮度虽低些, 但它的信息量大, 可以在几乎 4π 立体角范围内把一次反应的产物都记录下来。它的物理课题主要为介子核的研究、超核的研究和手征对称性破缺的研究等。

3.3 Hall C

该实验厅有两个谱仪以及一些特殊设备 ($p_{\max} = 1.7, 1.8 \text{ GeV}/c$) 和高密靶, 亮度达到 $10^{39} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 。研究课题如介子核, 着重对奇异海夸克结构函数的研究。

4 能量升级至 12 GeV

美国能源部作为中长期支持计划的核物理实验室有两个, JLab 是其中之一(2003 年 11 月决定)。JLab 12 GeV 升级预算为 2—3 亿美元; 2005 年完成概念设计, 2007 年建造开始, 2010 年完成。

4.1 12 GeV 的物理目标

(1) 胶子激发: 实验研究胶子激发, 以便理解支撑整个核物理的基本动力学。通过对介子的胶子激发谱的研究, 寻找夸克囚禁的起源(J^{PC} 奇特介子)。

(2) 核子的基本结构: 研究和测定夸克和胶子的波函数, 通过极化和非极化的遍举散射实验, 不仅把三夸克为主的区间延伸到临界区, 而且用单举实验以 GPD(Generalized Parton Distribution) 框架测定部分子分布, 得到更加完整的波函数特征, 以及夸克之间的关联函数; 通过高动量转移实验测定夸克胶子的动力学; 通过半遍举散射测定结构函数、核子的价夸克结构; 测定介子、核子和轻核的形状因子; 测定高扭度效应、色极化率和胶子极化结构函数 g_T^2 。

(3) 核物理: 研究怎样由更基本的夸克-胶子动力学对核性质的描写过渡到介子交换唯象论的描写; 弄清楚核子-核子相互作用怎样由 QCD 的夸克-胶子相互作用引起, 探知核力的起源; 研究夸克-强子二重性; 研究核介质对核子性质的影响, 理解核的夸克-胶子结构和核物质中手征对称性的部分恢复; 核物质色涨落的夸克-胶子结构——色透明和短程 NN 关联; 在高密度和低温下的夸克相互作用, 冷高密物质的相变等。

(4) 标准模型的试验: 试验电-弱相互作用的标准模型和测定该标准模型的参数。

(5) 把目前的实验推向高 x 、高 Q^2 区的实验研究, 更深入到核子的深处及大动量转移区, 研究单夸克的自旋结构和在碎裂中的自旋转移等。

4.2 JLab 升级计划

最大能量达 12 GeV; 保持 100% 的占空比; 为研究胶子激发-介子谱, 建立一个新的实验大厅 (Hall D); 建成一条极化的、标记光子束线(相干韧致辐射); 三个现有实验大厅实验设备的升级。

5 JLab 的长远计划

建立电子-离子对撞机:

电子能量 3—7 GeV

离子(p, d, ^3He) 能量 30—150 GeV

积分亮度 $6 \times 10^{31} (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$

同时保持电子束打固定靶的功能, 电子束能量为 25 GeV, 亮度为 $10^{38} (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ 。

6 中国组与 JLab 的合作

2002 年 7 月, JLab 与中国组(中国科技大学和中国原子能科学研究院)签署了合作协议。2002 年开始讨论研制电磁量能器, 2003 年中国组开始参与物理实验课题的提案。到目前为止, 参与提议并已被批准的实验提案有:

(1) Measurement of single target-spin asymmetry in semi-inclusive pion electroproduction on transversely polarized ^3He target.

(2) Hadronization in nuclei by deep inelastic electron scattering.

(3) Precision measurement of longitudinal and transverse response function of quasi-elastic electron scattering in the momentum transfer range $0.55 \text{ GeV}/c \leq |q| \leq 0.9 \text{ GeV}/c$.

(4) A measurement of the flavor asymmetry through charged meson production in semi-inclusive inelastic scattering.

(5) "Measurement of the target single-spin asymmetry in quasi-elastic $^3\text{He}(e, e')X$ ".

(6) Study internal small-distance structure of nuclei via the triple-coincidence($e, e', p+N$) measurement.

2004 年移植了 JLab Hall A 的实验数据分析的基础软件包, 已在中国科学技术大学和中国原子能科学研究院成功运行, 并继续参与了两个物理课题的提案; 开始参加实验工作和作实验数据的处理和

物理分析,并在国内做数据分析。目前我们主要在 Hall A 做实验,也参与了 Hall B 和 Hall C 的课题提案。2005—2006 年,将以中国组为主提出 1—2

个物理实验课题,并希望扩大中国的合作队伍,特别是在 CEBAF 升级至 12 GeV 的背景下。

参 考 文 献:

- [1] Zheng X, Aniol K, Armstrong D S, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **92**: 012004-1.
- [2] Jones M K, Aniol K A, Baker F T, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **84**: 1 398; Gayou O, Aniol K A, Averett T, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 092301-1.
- [3] Qattan I A, Arrington J, Segel R E, *et al.* Phys Rev Lett, 2005, **94**: 142301-1.
- [4] Amarian M, Auerbach L, Averett T, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **89**: 242301-1.
- [5] Schierholz G. Polarized Structure Functions and the GDH Integral from lattice QCD. In Proceedings of the Third International Symposium on the GDH Sum Rule and its extensions. In: Kukn Sebastian, Chen Jianping. GDH 2004, World Scientific, 2005, 285—293.
- [6] Drechsel D, Kamaloc S S, Tiator L. Phy Rev, 2001, **D63**: 114010-1.
- [7] Ji X, Kao C, Osborne J. Phy Lett, 2000, **B472**: 1.
- [8] Anion K A, Armstrong D S, Baylac M, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **82**: 1 096.

A Brief Introduction for Jefferson National Laboratory(JLab)*

YE Yun-xiu¹, LÜ Hai-jiang^{1,2}

(1 *Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;*

2 *Department of Physics, Huangshan School, Huangshan 245021, Anhui, China*)

Abstract: The general situation of JLab is briefly introduced. The accelerator CEBAF with high quality and the equipments in the three Halls are described. The experimental results with high accuracies, which were obtained by using continue beam with high energy resolution, and high density target and high resolution spectrometers in the halls, are presented with two examples. The basic physics problems which JLab intends to solve, and the programs which JLab completed and is going to do, are stated. The programs which China group is cooperating with other groups are emphasized. The energy escalation for CEBAF will bring new opportunities for scientific researches.

Key words: CEBAF continue Beam; JLab physics program; CEBAF upgrade; collaboration between china group and JLab

* **Foundation item:** Plan for 21st Century Education Progress(YL1365000001)