

# JLab 及其物理研究

周书华

高能轻子与核子的相互作用是研究强子物理的主要手段。美国 JLab (Thomas Jefferson National Accelerator Facility) 实验室以其 CEBAF (Continue Electron Beam Accelerator Facility) 加速器提供的优良性能的电子束(高的能量分辨率、小的束斑、大的流强和高达 85% 的极化度)和三个实验厅中建有高精度谱仪成为世界上研究强子物理的重要基地。

JLab 实验室位于美国弗吉尼亚州的纽波特纽斯 (Newport News)。实验室成立于 1984 年, 工程建造费用约 6 亿美元。CEBAF 加速器于 1995 年开始运行。每年运行费约 7 千 3 百万美元。实验室有约 675 名工作人员, 两千多名来自世界上 40 多个国家约 300 个研究单位的科学家在 CEBAF 上开展科学研究。实验研究的课题很广泛。3 个实验大厅 (Hall A、Hall B 和 Hall C) 每年可完成 10~15 个实验。

JLab 的科学任务是在夸克-胶子水平上对核子和核作基础研究。例如: 强子怎样由夸克和胶子构成? 核子-核子相互作用力的量子色动力学 (QCD) 基础是什么? 核子的结构函数什么样? 核子的自旋结构有何特点? 它们的电磁分布是怎样的? 价夸克、海夸克和胶子对核子自旋和形状因子的贡献有多少? 理解核结构的极限在哪里? 对核的描写可以精确到什么程度? 以及在什么尺度上从核子-介子的描写过渡到 QCD 的描写? 在什么尺度上夸克-夸克相互作用的动力学从强作用 (即夸克囚禁) 过渡到微扰 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的? 等等。

## 连续电子束加速器装置 CEBAF 及实验设备

CEBAF (结构如图 1 所示) 由极化电子源、注入机、一对 1400 米长的超导射频直线加速器和将两个直线加速器连接起来的两个偏转磁铁组成。每一段直线加速器使注入的电子增加 0.6 GeV 的能量。偏转磁铁使电子在两段直线加速器中循环加速。目前可循环 5 次, 这样获得的电子束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 ( $\Delta E / E \sim 2.5 \times 10^{-5}$ ), 电子极化率高达 85%; 聚

焦性能好 (束斑小于 50 微米); 最大流强可达 200 微安。若累积  $10^{39}$  的照度, CEBAF 需 30 天, 而一般的加速器照度达到  $10^{32} \sim 10^{33}$  时需 8300~83 000 年。CEBAF 束流的占空比为 1, 可同时供 3 个实验厅 (Hall A、Hall B 和 Hall C) 进行实验。CEBAF 加速器即将通过增加电子在直线加速器中循环的次数, 升级到 12 GeV。

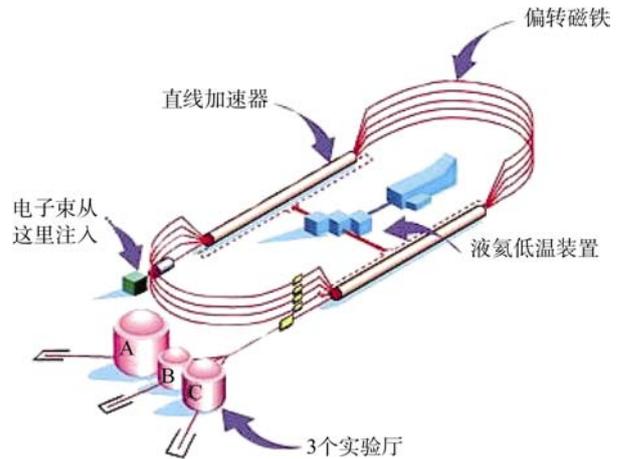


图 1 CEBAF 结构示意图

三个实验厅中装备有先进的谱仪等设备。在 Hall A 中, 有一对高分辨率 ( $\Delta p/p = 10^{-4}$ ) 谱仪, 可分别用来测量散射的电子和强子。此外另有一台小角度磁谱仪, 主要用来测量四动量转移 ( $Q^2$ ) 非常小的事件。还有 10 个大气压的  $^3\text{He}$  极化靶, 极化度达到  $\sim 40\%$ 。Hall B 中有大接收度谱仪 (对带电粒子的接收度为  $8^\circ < \theta < 140^\circ$ ) 和韧致辐射标记仪。Hall C 有分别测量 K 介子和散射电子的 HKS 及 HES 高动量谱仪以及短轨道谱仪。

由于 CEBAF 加速器和 3 个实验厅中设备的优良性能, 使得 JLab 可以开展一些在其他实验室无法进行的特别是需要高亮度和高精度的实验研究。

## JLab 进行的有代表性的实验

### EMC 效应的核相关性

1982 年, 欧洲 EMC 合作组用  $\mu$  子在氢、氘和铁核上做深度非弹性散射实验时, 发现束缚在核

内的核子的结构函数与自由核子的结构函数明显不同，称之为 EMC 效应。核子是由强相互作用将夸克和胶子束缚在一起形成的强子。EMC 效应反映了原子核中的质子与中子的结构可能会由于密度较高的核环境而发生改变。强子结构在核环境中的变化对于理解描述强相互作用的量子色动力学是非常重要的，因此这一发现引起很大反响，出现了大量的关于 EMC 效应的理论解释，但是都还没有得到公认。

在核中的深度非弹性散射实验表明，在重核中夸克的分布并不等于组成重核的质子与中子的夸克分布的简单相加。核效应除了来自核子间的束缚能与核子的费米运动外，还来自核子内部的变化。许多模型预言 EMC 效应与母核的质量或密度有关。以前的数据主要是集中在较重的核区，不能从实验上确定 EMC 效应是否随着核的质量或密度而变化。为了验证这一预言，在 JLab 的 HallC 对各种不同的轻核进行了实验研究。

图 2 是 EMC 效应随有效核密度的变化。可以看出，在轻核区 EMC 效应随有效核密度变化的趋势中， ${}^9\text{Be}$  的 EMC 效应明显增大。这可能反映了  ${}^9\text{Be}$  特殊的核结构：两个转动的  $\alpha$  集团加上一个中子（图 3）。 ${}^9\text{Be}$  的平均密度虽然并不高，但是在  $\alpha$  集团中的

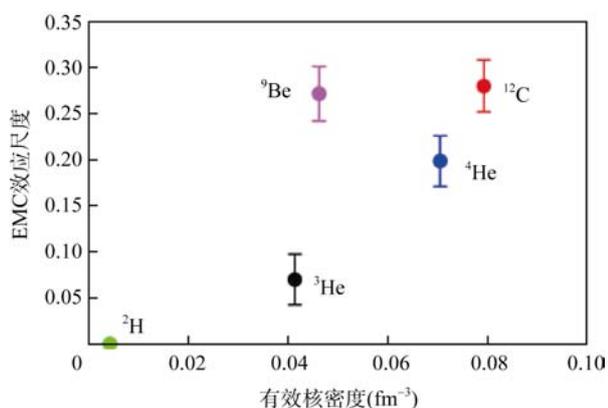


图 2 EMC 效应随有效核密度的变化

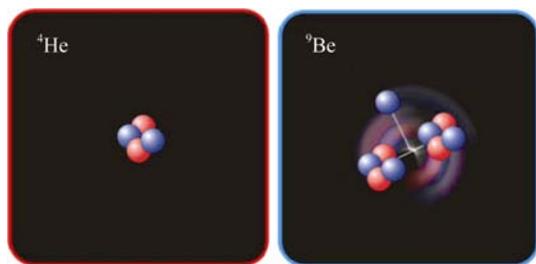


图 3  ${}^9\text{B}$  特殊的核结构

质子和中子却处在高密度的环境中，这意味着核内核子局部的密度决定着核子性质的改变。计划在 JLab 的 12GeV 升级工程完成后，对更多的轻核进行实验，验证这一假设。

### 标准模型的精确检验

电弱标准模型已取得非常大的成功。寻找超出标准模型的物理现象有两种互补的实验策略。其一是建造能量越来越高的对撞机，如 CERN 的大型强子对撞机 LHC，将物质激发成一种新的形态。另一策略是进行高精度的测量，探索与标准模型相矛盾的现象，以揭示新形态物质存在的迹象。在 JLab 进行的宇称破缺电子散射 (PVES) 测量确定了迄今为止最精确的夸克的弱荷。这个实验确定的发现新物理所需要达到的能量，比以前由原子宇称破缺确定的能量提高了两个数量级。可为在 LHC 和 JLab 准备进行的 Qweak 实验，选择可能发现新现象的最合适的能量窗口。

### 质子中的奇异夸克

在最简单的描述中，质子是由 2 个 u 夸克和 1 个 d 夸克组成的束缚态，更完全的描述则要包括由于这三个夸克间的相互作用所产生的胶子和虚的夸克-反夸克对。虽然平均地讲，质子是没有任何奇异性的，但是奇异夸克-反夸克对存在于夸克海中。这种内禀的奇异性，对质子的电磁性质所产生的效应可以通过使用弱相互作用 (Z 玻色子交换) 探针精确地研究。虽然在有占优势的电磁力的情况下，通常弱力小得很难探测，但它却是任何宇称破缺过程中所必须存在的相互作用。

因此，为了研究质子中奇异夸克的效应，JLab 和其他实验室的研究人员转向对宇称破缺电子散射 (PVES) 非对称性的高精度测量。PVES 已成为一种重要的测量电磁形状因子的味成分的重要工具。用这种测量来揭示出奇异性夸克的作用，可以为非微扰 QCD 的动力学基础提供直接信息。在最小动量转移 ( $Q^2$ ) 情况下，与奇异磁矩及电荷半径直接相关的数据，确定了部分奇异夸克对质子的形状因子贡献大小的极限。综合已有数据表明奇异电荷半径是非常小的，而奇异夸克对质子磁矩的贡献小于 10%。

### 推广的部分子分布

JLab 的一个重要目标是提供一个由夸克与胶子组成的核子的详细的三维图像，并且弄清楚这种复杂的结构如何决定着核子的性质，如：质量、自

旋和磁矩。“推广的部分子分布”(GPD)提供了解决这一问题的最有希望的理论框架。GPD由一般的形状因子和部分子分布结合而成,同时包括了不同的纵向与横向动量的状态之间的关联。

从深度虚康普顿散射(DVCS)和深度虚介子生成(DVMP)过程的数据中能够提取GPD,并且提供考察GPD的基础。在这些过程中,散射发生在核子中的一个单个的夸克上,在末态产生一个高能量的光子(DVCS过程)或介子(DVMP过程)。

在JLab的Hall B的e1-DVCS实验首次对DVCS进行了综合研究。实验中,电子束的极化方向交互地与束流方向平行和反平行,能够在600个以上的运动学区间测量束流自旋的非对称性(BSA)。

在Hall A,在分别用质子靶和氘靶进行的E00-110实验(质子上的DVCS)和E03-106实验(氘核上的DVCS)中精确测量了螺旋性相关的 $ep \rightarrow ep\gamma$ 和 $en \rightarrow en\gamma$ 的DVCS截面。质子截面的 $Q^2$ 相关性表明散射是在单个的夸克上发生的,这就可以用GPDs来解释DVCS数据。用氘靶进行的实验还演示了从实验上得到夸克轨道角动量的可能性。夸克轨道角动量可能是核子自旋疑难中所缺少的一个环节。

质子的电与磁弹性形状因子( $G_E^p/G_M^p$ )

测量质子的电与磁弹性形状因子比值 $G_E^p/G_M^p$ 的实验数据显示出质子的电形状因子 $G_E^p$ 和磁形状因子 $G_M^p$ 对4动量转移的平方 $Q^2$ 的相关性明显不同。这一出乎预料的现象可解释为在短距离上电与磁的空间分布不同。使用新的极化转移方法进行的两个JLab实验得到的结果与由截面测量得到的比值 $\mu_p G_E^p/G_M^p$ 不一致,其中 $\mu_p$ 是质子的磁矩。用Rosenbluth方法通过截面测量得到的比值在直到6 GeV<sup>2</sup>时接近于1,可是反冲极化实验的结果给出的比值在 $Q^2$ 等于6 GeV<sup>2</sup>时大约为0.3。

这种用Rosenbluth方法和反冲极化方法得到的比值之间明显的差别在JLab的Hall A用传统的Rosenbluth方法对 $G_E^p/G_M^p$ 所进行的精确测量中得到证实。这一结果表明,这种分歧是由于在从实验数据提取 $G_E^p/G_M^p$ 时没有考虑到的物理原因,而不是数据本身的原因。一个可能的原因是两光子交换过程,这种过程对截面和极化转移有百分之几的影响。但是,由于Rosenbluth方法对于截面的角度相关性的微小变化都很灵敏,两光子效应对于

Rosenbluth方法得到的比值影响较大,而对于极化方法得到的比值只有百分之几的影响。

中子的电荷分布( $G_E^n$ )

中子的电荷形状因子 $G_E^n$ 的 $Q^2$ 相关性能够提供关于中子的电荷分布的重要信息。40多年来 $G_E^n$ 的精确测定一直困扰着物理学家们,这主要是因为自由的中子靶和中子的电荷形状因子非常小。JLab有两个实验精确测量了大的 $Q^2$ 值时中子的电荷形状因子。这些独特的实验使人们对中子的电荷形状因子的了解达到与其他核子的形状因子同样的水平。第一次有了约束描述全部4个核子的形状因子(质子的电与磁形状因子和中子的电与磁形状因子)的现代理论的数据。

核子- $\Delta$ 跃迁

JLab的共振物理研究中许多有名的实验之一使我们了解了 $\Delta$ 共振,这是核子最低的能量量子激发。有几种方法可以使核子电磁激发到 $\Delta$ 共振态。其中磁偶极矩 $M1$ 可以告诉我们关于核子与 $\Delta$ 中夸克的电流分布情况。电四极矩 $E2$ 则描述夸克的电荷分布与球形分布的偏离程度。

在最简单的夸克图像中核子与 $\Delta$ 都是球形的,所以 $E2 = 0$ ,而激发则完全通过 $M1$ 进行。在JLab的实验显示,比值 $E2/M1$ 很小,但不为零,表明核子与 $\Delta$ 都不是完全的球形。由此所揭示的物理图像是:核子是一个由3个夸克组成的核心,外面被非球形的 $\pi$ 介子“云”包围着,而电磁激发时光子更多的是与 $\pi$ 介子“云”而不是与核心相互作用。预期在非常高的 $Q^2$ 或短的波长时,光子可以穿过 $\pi$ 介子“云”而观察核子的核心,所看到的核心与 $\pi$ 介子“云”是很不相同的,因而 $E2/M1$ 将发生重大变化,在非常高的 $Q^2$ 时甚至接近于1。

在JLab的实验中,在前所未有的高 $Q^2$ 值处对比值 $E2/M1$ 进行了测量。 $Q^2$ 所对应的空间分辨小于0.05 飞米。值得注意的是,测到的 $E2/M1$ 变化不大,几乎是一个小的负常数值。目前还不理解核子与 $\Delta$ 的何种特性导致这种现象。有迹象表明,格点QCD理论工具的进一步发展可能提供答案。

$\pi$ 介子的形状因子

在JLab Hall C,一个研究 $\pi$ 介子的形状因子 $F_\pi$ 的合作组在研究强力如何将自然界基本的基石结合成由夸克组成的最轻的粒子: $\pi$ 介子。这是最重要的介子,具有异常小的质量。我们可以简单地认为 $\pi$

介子是由一对最轻的夸克和反夸克组成的。但是作为基于夸克的图像,对 $\pi$ 介子更实际的描述还要包括夸克-胶子海:由强力驱动的一群时隐时现的夸克、反夸克和胶子作为 $\pi$ 介子结构的基础。

这种结构由形状因子  $F_\pi$  描述出来,  $F_\pi$  提供了在 $\pi$ 介子内部的电荷分布的信息。通过在更短的距离上测量  $F_\pi$ , 可以研究 $\pi$ 介子从一个夸克-胶子海在其结构中起重要作用的粒子向一个简单的夸克-反夸克系统的过渡。

2001年, JLab 测得了第一个通过 $\pi$ 介子电生成在  $Q^2$  等于 0.6 和 1.6 (GeV/c)<sup>2</sup> 之间研究  $F_\pi$  的高精度数据。新的结果  $Q^2=2.45$  (GeV/c)<sup>2</sup> 处的结果, 尽管距离过渡到 $\pi$ 介子可看作简单的夸克-反夸克对的  $Q^2$  区很远, 但是对企图将重要的“软”夸克海的贡献包含进来的模型提供了严格的检验。利用 JLab 升级到 12 GeV 后更高能量的电子束可达到过渡区域。升级后的加速器将可以使  $F_\pi$  的测量扩展到  $Q^2$  约等于 6 (GeV)<sup>2</sup>, 对 $\pi$ 介子探测的分辨将提高一倍。

#### 核子-核子短程关联

原子核常常可以近似看作是限制在一定体积内的彼此无关的质子和中子的集合, 但是在短瞬的时间内, 核中的核子会发生重叠。这种量子力学的重叠称作核子-核子短程关联, 这是核的强力的一种表现。强力不仅产生长程引力, 将物质集合在一起, 而且产生短程斥力, 使物质不致被压塌。

直接观察短程关联是核物理中的一个难题, 因为其他现象经常掩盖了短程关联的信号。 $Q^2 > 1.4$  (GeV/c)<sup>2</sup> 时, 不同重核在 <sup>3</sup>He 上单举散射截面比值及其随 Brokjen 变量  $x$  的变化显示出标度化区域, 可以解释为 2 或 3 核子关联。为了直接观察从核中发射出的高动量对, 设计了三重符合实验 <sup>12</sup>C(e, e'pN) 来探测  $Q^2 > 1.5$  (GeV/c)<sup>2</sup>, Brokjen  $x > 1$  和丢失动量大于 300 (MeV/c)<sup>2</sup> 的事件。三重符合实验 <sup>12</sup>C (e, e'pN) 即电子在 <sup>12</sup>C 上的深度非弹性散射实验中, 入射的电子通过虚光子与 <sup>12</sup>C 中的一个核子-核子对相耦合, 散射末态产生的散射电子与被击出的质子以及与此质子相关联的核子 (质子或中子) 一起测量。

实验发现在这种特定的条件下, 对于每个被击出的质子都有一个关联的伙伴。如理论所预期的那样, 关联的核子对大部分是质子-中子对, 只有小部分是质子-质子对。由于一对关联的核子对的核

密度大约比平均核物质的密度大 5 倍, 这些结果可以使科学家对于如中子星那样的高密度核系统有新的洞察。

#### 结构函数中的夸克-强子二重性

QCD 的一个主要难题是强的核相互作用在小尺度和大尺度之间的衔接。在短距离上, 微扰 QCD 在按照夸克和胶子来描述核子的结构上是非常成功的。在大距离上, 禁闭效应使按照强子的集体自由度描述更有效。尽管存在这种明显的差别, 在低能和高能核子结构函数数据之间却观察到有趣的联系, 这就是“夸克-强子二重性”。

在 Hall C 进行的对非极化的结构函数的详细的实验研究发现, 在比预期的更宽的能量区间上和更多的观察量中, 发现夸克-强子二重性出现在低得多的动量转移中。

在 Hall B 对夸克-强子二重性对质子和氘的  $g_1$  结构函数的自旋相关性进行了研究。在 Hall A 用 <sup>3</sup>He 靶对质子进行了测量。Hall A 的 E01-012 实验显示, 在中子和 <sup>3</sup>He 中极化  $g_1$  结构函数出现在  $Q^2$  低到 1.8 (GeV/c)<sup>2</sup> 的区域。

这些结果使得可以首次对夸克-强子二重性的自旋和味的相关性进行研究, 并且为解决 QCD 长期以来在描述大距离上的核力方面所面临的困难提供重要的线索。

#### 核子的自旋结构

在 JLab 对核子自旋进行着广泛的研究, 探讨早一代实验未能回答的基本问题。尽管以前的实验对于我们理解核子自旋 (例如单用夸克自旋不能解释核子自旋) 有很大帮助, 但是决定性的问题, 如胶子极化和夸克轨道角动量的作用, 仍然没有解决。JLab 利用其独具的研究设备, 通过高精度测量对这些问题进行了研究。在 JLab 极化结构函数的数据加入到已有的各家数据中并且经过重新分析后, 明显增进了我们对胶子极化的了解。

此外, 实验上很难测量的夸克的轨道角动量的效应可在大的  $x$  值处看到, 如果忽略夸克的轨道角动量, 基于微扰 QCD 的预言与大  $x$  处的测量值不符。只有在将夸克的轨道角动量加入到核子的波函数中, 微扰 QCD 的结果才能与实验数据符合。

#### $\pi^0$ 寿命的精确测量

量子色动力学(QCD)中色禁闭效应是传统的微扰理论在大距离和低能量处失败的地方。定量理解

在该区域的强相互作用仍然是物理学面临的最大的挑战之一。在手征极限范围（夸克质量消失）QCD 对称性是解决主要问题的重要元素。

在强子谱中最轻的粒子  $\pi^0$  是研究在低能区 QCD 的基本对称性问题的最灵敏平台。手征对称性破缺导致戈德斯通粒子（Goldstone particles） $\pi^0$  的生成，手征轴向反常主要确定  $\pi^0$  的寿命。因此， $\pi^0$  寿命的精确测量将为在禁闭的距离上对 QCD 做重要的检验。目前  $\pi^0$  衰变宽度实验测量的不确定性比理论值的不确定性约高 1 个数量级。因而以与理论计算可比较的精度对  $\pi^0$  的寿命进行测量将为 QCD 的预言提供重要的检验。

JLab 的 PrimEx 合作组开展了高精度测量  $\pi^0$  寿命的实验工作，该实验利用  $\pi$  在核的库仑场中的小角度相干光产生技术，并使用了 Hall B 的高强度和高分辨光子标记装置和新建成的高分辨电磁混合量能器（HYCAL）。第一期实验使用了  $^{12}\text{C}$  和  $^{208}\text{Pb}$  靶，初步得到  $\pi^0$  的衰变宽度  $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.93 \text{ eV} \pm 0.18 \text{ eV (stat)} \pm 0.13 \text{ eV (sys)}$ ，总误差为 2.8%，这比粒子数据手册中的平均值改进了约 2.5 倍。截面测量的系统误差控制在 1.3% 的水平，此外，还通过康普顿散射和对生成截面测量进行了检验。

#### 电生成超核谱学

迄今为止，所研究过的绝大多数核中的核子是由 u 夸克和 d 夸克组成的。当核中的一个或多个核子被含有奇异夸克 s 的超子（如  $\Lambda$ 、 $\Sigma$  等）取代时，所生成的核称为超核。研究超核的谱学，可以扩展对物质的研究，即由 u 和 d 夸克组成的物质扩展到由 u、d、s 组成的物质，乃至扩展到对中子星的研究；可将对核力的研究由核子-核子相互作用的研究扩展到对重子-重子相互作用的研究；还可研究当原子核中加入超子时，核的大小、形状、对称性、壳结构及集团结构等的变化（杂质效应），及研究超子的特性在核内可能发生的变化（核介质效应）等。总之，当核中增加了奇异性这一新的自由度时，对传统的强子多体系统的核模型提出了挑战。

与强子引起的反应生成的超核相比，利用产生奇异性的电子非弹性散射（ $e,e'K^0$ ）或（ $e,e'K^+$ ）生成的超核可具有大的动量转移和大的质量范围、产生高的自旋拉长态、激发深束缚态及非自然宇称态并可生成丰中子超核等特点。JLab 高精度、高强度的束流及高分辨谱仪，为高分辨的电生成的超核谱

学研究提供了极好的条件。其质量分辨为几百  $\text{keV}/c^2$ ，而用强子引起的反应产生超核时，实验测量达到的质量分辨大于  $1.5 \text{ MeV}/c^2$ 。

在 Hall C 进行的（ $e,e'K^+$ ）实验中，分别利用高分辨谱仪 HKS 和 HES 测量散射的  $K^+$  粒子及散射的电子，对所产生的  $^7_\Lambda\text{He}$ 、 $^9_\Lambda\text{Li}$ 、 $^{10}_\Lambda\text{Be}$ 、 $^{12}_\Lambda\text{B}$  和  $^{52}_\Lambda\text{V}$  进行了谱学研究。 $^7_\Lambda\text{He}$ 、 $^9_\Lambda\text{Li}$ 、和  $^{10}_\Lambda\text{Be}$  对于研究  $\Lambda$  超子与核子相互作用中电荷对称性破缺及  $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$  耦合很重要，而  $^{52}_\Lambda\text{V}$  是用（ $e,e'K^+$ ）反应研究的第一个中重核，可为研究超核中  $\Lambda$  的单粒子行为提供重要的数据。此外，在 JLab 还进行了超核寿命的测量，研究  $\Lambda$ -N 相互作用的短程特性等。

#### 12 GeV 能量升级工程

Jlab 的 12 GeV 升级工程的主要物理目标是研究夸克禁闭的物理原因、质子与中子的自旋和味结构、核的夸克结构及通过对标准模型的高精度检验，探索可能的物理。JLab 12 GeV 升级工程完成后，最高的电子能量将达到 12 GeV，仍保持 100% 的占空比，束流功率保持在 1 兆瓦，最大流强达 80 微安。除对现有的实验厅中的设备加以改进以适应升级后更高的束流能量外，还新增加一个新的实验厅 Hall D，主要用于介子谱学测量，研究奇异介子。

自 2002 年由美国原子能科学研究所和中国科技大学与 JLab 签订了合作备忘录后，现在中国已有十多个研究单位参加了与 JLab 的合作。中美物理学家联合提出在 JLab 12 GeV 升级装置上进行夸克横向性分布、夸克扭转性分布（与核子极化方向垂直的夸克极化分布）和宇称破缺深度非弹性散射实验研究的建议。已获得美国专家顾问委员会（PAC）批准，并被列入 2010 年“中美高能物理合作协议”。

（中国原子能科学研究所 102413）

