

文章编号: 1007-4627(2005)04-0402-05

## 中高能核物理中的几个问题\*

李 磊, 钟显辉, 宁平治  
(南开大学物理系, 天津 300071)

**摘 要:** 简要介绍和评述了近几年来中高能核物理中一些受关注的问题, 重点介绍了核子电磁形状因子和  $K^-$  介子与原子核相互作用势强度问题。

**关键词:** 中高能核物理; 核子电磁形状因子;  $K^-$  介子与原子核相互作用

**中图分类号:** O571 **文献标识码:** A

### 1 引言

中高能核物理近年来不论在实验上还是理论上都有了不少新发展, 高精度、高技术实验揭示了关于核子与核的许多新现象和新规律。理论研究不仅解释了这些有关核子与核的新现象和新规律, 并且预言了可能存在的新现象及其性质。

首先要提到的是美国杰弗逊实验室(JLab)近几年来用电子和光子探测核子内部结构发现的新物理问题。他们发现, 由高能极化电子与核子散射得到的核子电磁形状因子新数据与已应用数 10 年的 Rosenbluth 形状因子存在严重偏离, 从而引起理论界高度重视。第二个值得关注的问题是  $K$  氢原子问题。在过去实验基础上, 近来利用新的实验技术在日本对  $K$  氢原子的 X 射线进行了新的测量, 得到了不同于以往的强相互作用能级移动和宽度数据。迄今能移的计算很多, 但结果很不一致, 连正负号都不一致。新的实验结果解决了长期以来的  $K$  氢原子之谜, 对于进一步研究  $K$ -N 相互作用提供了较可靠的数据。第三个值得关注的问题是  $\Sigma$  超核, 1990 年前后曾报道( $K, \pi^\pm$ )奇异性交换反应实验观测到了窄峰—— $\Sigma$  束缚态(对应  $A \geq 6$  的  $\Sigma$  超核), 随后在理论和实验方面均热了约 10 年, 但这一结果最近已被新的更精确的实验否定。目前的看法是: 唯一观测到的束缚态是  $^3_2\text{He}$ , 没有观测到其他  $\Sigma$  超核束缚态。第四个值得关注的问题是  $K^-$  介子与原子核相互作用势强度问题。已有的实验和理

论研究表明, 不同  $K^-$  过程要求的势强度差别很大。第五个值得关注的问题是  $K^-$  介子在原子核内形成深束缚态的可能性问题, 近几年的研究结果似乎支持存在这种深束缚态, 即  $K$  核, 并且其内部可能达到很高密度。第六个值得关注的问题是核内可能的杂质问题, 包括第一类杂质—— $\pi$  介子和  $K^-$  介子, 第二类杂质——各种超子(含  $s$  夸克), 第三类可能的杂质——重味超子(含  $c, b$  夸克), 第四类可能的杂质——5 夸克粒子  $\Theta^+$  等。下面仅选择两个问题进行仔细地讨论。

### 2 核子的电磁形状因子

高能电子散射一直是一种精确探测核子内部结构的实验研究工具。这种精确性是源于已经确切知道电磁相互作用的性质。通过改变从电子转移到靶核子的动量, 可以通过截面测得核子的电荷和电流的密度。在非相对论近似和四维转移动量平方  $Q^2$  较小的情况下, 电形状因子  $G_{Ep}$  和磁形状因子  $G_{Mp}$  可以由核子的电荷和电流分布的傅立叶变换给出。非极化的电子-质子弹性散射截面可表示为

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 \cos^2 \frac{\theta_e}{2}}{4E_e^2 \sin^4 \frac{\theta_e}{2}} \frac{E_e'}{E_e} \left( \frac{1}{1+\tau} \right) \left[ G_{Ep}^2 + \frac{\tau}{\epsilon} G_{Mp}^2 \right], \quad (1)$$

这里  $E_e$  是束流的能量,  $E_e'$  和  $\theta_e$  分别是散射后电子

收稿日期: 2005-08-02

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10275037); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20010055012)

作者简介: 李 磊(1968-), 男(汉族), 河北衡水人, 博士, 副教授, 从事原子核物理理论研究;

E-mail: lilei@nankai.edu.cn

的能量和角度,  $\tau = Q^2 / (4M_p^2)$  是按质子质量标度的四维散射动量,  $\epsilon = [1 + 2(1 + \tau) \tan^2(\theta_e/2)]^{-1}$  是虚光子的极化率。Rosenbluth 方法利用方程(1)来确定  $G_{Ep}$  和  $G_{Mp}$  各自对微分截面的贡献。1998 年以前, 世界各大实验室测量出的电形状因子和磁形状因子的数据见图 1, 这些由实验测得的形状因子都接近偶极因子  $G_D$  形式:

$$G_{Ep} \approx \frac{G_{Mp}}{\mu_p} \approx G_D = \left(1 + \frac{Q^2}{0.71}\right)^{-2}. \quad (2)$$

在非相对论极限下, 偶极形状因子对应一种指数类型电荷分布的结果。

在高  $Q^2$  区域, 磁形状因子对散射截面的贡献占主要地位, 因此用 Rosenbluth 方法来确定电形状因子越来越困难。

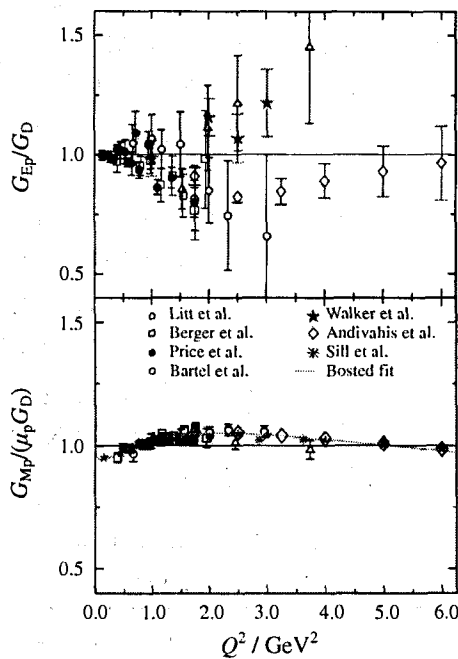


图 1 在 1998 年以前的各家实验数据

1998 年左右, 在电子-质子的极化散射实验中, 通过测量反冲质子的极化作用, JLab 已在  $Q^2 = 0.5 - 5.6 \text{ GeV}^2$  的较宽范围内完成了对比值  $(G_{Ep}/G_{Mp})Q^2$  的测定工作<sup>[1]</sup>。在纵向极化电子与非极化质子的散射过程中, 转移给反冲质子的极化矢量在散射平面上可以有两个分量, 分别将垂直和平行于质子动量方向的分量记为  $P_1$  和  $P_2$ 。实验上, 质子的极化通过安装在质子谱仪焦平面上的带有石墨或  $\text{CH}_2$  分析器的偏振计来确定。电形状因子与磁形状因子的比值直接正比于极化比值:

$$\frac{G_{Ep}}{G_{Mp}} = -\frac{P_2}{P_1} \frac{E_e + E_e'}{2M_p} \tan\left(\frac{\theta_e}{2}\right). \quad (3)$$

因为电形状因子与磁形状因子的比值是直接测得的, 在这类实验中系统不确定度可以得到精细的控制。例如, 这个比值与电子束流的极化和偏振计的分析能力无关, 也不需要了解关于谱仪接收的详细信息, 主要的系统误差来源于经过磁体时的自旋转移计算的不确定性。

测量结果见图 2, 它显示了比值  $\mu_p G_{Ep}/G_{Mp}$  随  $Q^2$  的变化情况。这些令人惊奇的数据表明形状因子的比值随着  $Q^2$  的增加而线性地减小。按照这样的变化趋势, 该比值将在  $Q^2 \approx 7.5 \text{ GeV}^2$  附近达到零值。这一结果已在理论界引起了一场风波。领头阶微扰 QCD 理论计算预言泡利与狄拉克形状因子的比值  $F_2/F_1$  大致按  $1/Q^2$  变化。如果把对数修正也包含在内, 则比值  $F_2/F_1$  基本上按  $1/Q$  的形式变化<sup>[3]</sup>, 这样适当调节参数就可以符合实验数据(如图 2 所示)。只有认为在质子内部的夸克确实携带轨道角动量, 才能解释这个现象<sup>[4]</sup>。

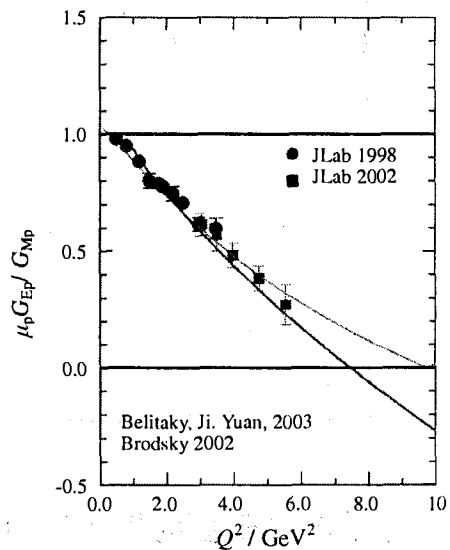


图 2 在 1998 年后, JLab 的 CEBAF 对于  $\mu_p G_{Ep}/G_{Mp}$  随  $Q^2$  变化的高精度极化测量结果和一些理论计算数据

关于  $G_{Ep}$  的这些新数据引起了对质子形状的物理解释的争论。通过选择关于夸克动量和自旋的特定结构模型, 一些计算讨论了质子的图像。从“色”的角度去观察, 一些特定模型中的质子形状可能是非球对称的<sup>[5]</sup>。若要进一步深入探测质子结构, 还需期待更新的实验数据。新的实验预计可以测量转

移动量达  $9 \text{ GeV}/c^2$  的散射过程<sup>[6]</sup>。

最近 Rosenbluth 测量实验<sup>[7]</sup>进一步确认了非极化和极化两种实验方法所获得结果的系统偏离。在以前的非极化碰撞实验中通过探测被散射的电子来确定散射截面，现在的新技术可以探测反冲质子，测量结果的统计误差和系统误差大大减小。新的非极化实验数据与以前获得的 Rosenbluth 测量结果相符，而与高  $Q^2$  的极化转移数据明显偏离（如图 3 所示）。这种偏离可能来源于高阶过程，比如双光子交换，但在这方面的理论计算结果<sup>[8, 9]</sup>对散射截面的修正仅仅给出了一半的偏离。如果这种高阶辐射修正确实与上述测量数据的偏离有关，那么采用 Rosenbluth 方法所给出的并不是真实的形状因子，因为它实际上还包含了相互作用高阶修正的贡献<sup>[7]</sup>。在对质子结构模型和实验测量的形状因子进行更精确的比较之前，必须彻底搞清楚双光子交换修正对核子形状因子的影响。

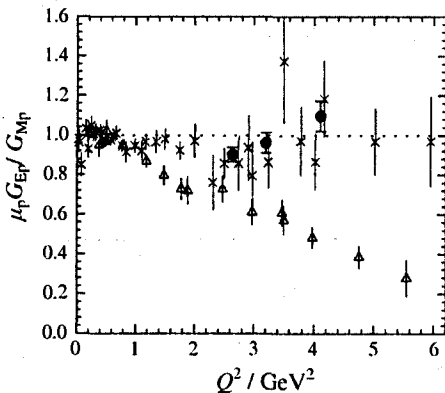


图 3 比值  $\mu_p G_{Ep}/G_{Mp}$  随  $Q^2$  变化的实验测量结果

• 是最新的高精度非极化测量数据，× 是以前的非极化截面数据的系统分析结果，△ 表示高  $Q^2$  极化转移测量结果（说明见正文）。

### 3 $K^-$ 介子与原子核的相互作用势

K-N 相互作用的研究对于了解低能情况下强相互作用的细节具有十分重要的意义。其中，对  $K^-$  介子与原子核相互作用势的研究具有特殊的重要性，因为它与一系列重要的中高能奇异性核物理问题有关，例如  $K^-$  原子态、 $K^-$  核深束缚态、 $K^-$  核散射过程、核碰撞过程中的  $K^-$  产生和核物质中的  $K^-$  凝聚等。例如，有理论分析表明<sup>[10]</sup>，核物质中是否存在  $K^-$  凝聚与  $K^-$  核势的深度相关：如果势

阱较深，为 180 MeV，则可能有  $K^-$  凝聚现象；如果势阱深度较浅，为 80 MeV，则不可能存在  $K^-$  凝聚。在简单的唯象理论中，光学势  $V_{opt}$  的实部通常与核介质内强子的有效质量  $m^*$  有关：

$$m^* = m_0 + \text{Re}[V_{opt}], \quad (4)$$

此处  $m_0$  是真空中强子质量。

测量 K 原子态的 X 射线数据可以得到  $K^-$  核相互作用的信息。现有的理论研究方法主要有：有效场论方法、QCD 求和规则、夸克-介子耦合 (QMC) 模型和 NJL 模型等。目前各种方法对  $K^-$  核光学势的深度给出了定量上完全不同的预言，不确定范围相当宽，有些甚至在大动量区出现排斥作用<sup>[11]</sup>。在正常核物质密度下，部分唯象理论给出的势阱深度值是：(1) 拟合 K 原子数据的唯象密度相关模型， $-200 \pm 20 \text{ MeV}$ ；(2) 拟合 K 原子数据的相对论平均场模型， $-180 \pm 20 \text{ MeV}$ ；(3) 重离子碰撞中对  $K^-$  介子产额分析结果为  $-80 \text{--} -120 \text{ MeV}$ ；K 原子的手征耦合道理论结果为  $-50 \text{ MeV}$ 。

在表 1 中较详细地列出了 1991—2001 年间不同的文献对  $K^-$  核光学势深度的估计值。其中较典型的两类取值是<sup>[12]</sup>：(1) 非常深的吸引势， $-\text{Re}[V_{opt}(\rho_0)] \approx 150\text{--}200 \text{ MeV}$ ；(2) 相对浅得多的势， $-\text{Re}[V_{opt}(\rho_0)] \approx 50\text{--}75 \text{ MeV}$ 。这两种明显不同的相互作用势都可以描述特定的 X 射线实验数据，包括能级移动和能级宽度等。

表 1 正常核物质密度下  $K^-$  介子与原子核相互作用势的深度

$U/\text{MeV}$	动量相关	年份	相关文献
-200	否	1991	[15]
-200	否	1994	[16]
-180	否	1995	[17]
-200	否	1996	[18]
-180	否	1997	[10]
-160	否	1997	[19]
-140—-50	是	1998	[20]
-150	否	1998	[21]
-100—+60	是	2000	[22]
-80—-66	否	2000	[23]
-87—-55	是	2001	[24]
-55	否	2001	[25]

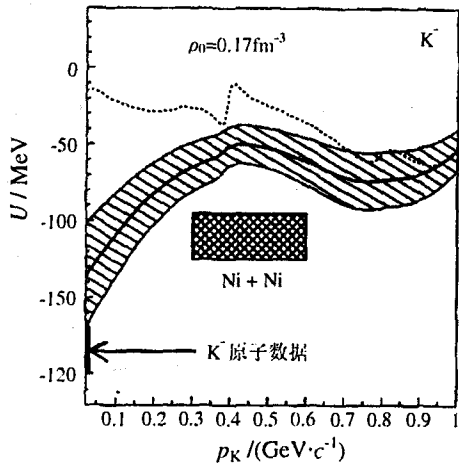


图 4 在核饱和密度附近  $K^-$  核相互作用势深度与  $K^-$  介子动量的关系

虚线是采用真空中  $K^-N$  散射振幅计算的结果，粗实线是去除了  $\Sigma(1385)$  和  $\Lambda(1405)$  共振并对费米动量求平均的结果，斜线区域表示该计算的不确定范围，箭头是分析  $K^-$  原子谱给出的数据，中间的长方形区域表示在  $Ni+Ni$  碰撞中对  $K^-$  产生过程的分析结果。

尽管各种理论模型对  $K^-$  核光学势强度的认识仍有不小分歧，但对其具有强吸引性质的看法是基本上一致的。近年来，有些理论和实验研究认为  $K^-$  核光学势的动量相关性不能忽略<sup>[11, 13, 14]</sup>。 $K^-$  谱低动量部分对势强度最敏感。在小于 300 MeV 的低动量区域，不同方法对  $K^-$  核势估计值的分歧最大(如图 4 所示)。

图 5 给出一个采用动量相关光学势计算动量为  $p_K = 800 \text{ MeV}/c$  时  $K^-$  介子与  $^{12}\text{C}$  和  $^{40}\text{Ca}$  核碰撞弹性散射微分截面<sup>[14]</sup>的例子。可以看到，适当地考虑光学势的动量相关性之后，相对论平均场(RMF)模型、唯象密度相关模(DD)型和混杂(hybrid)光学势模型才都可以比较好地符合  $K^-$  核弹性散射微分截面，其中动量相关的混杂势模型计算出的  $p_K = 800 \text{ MeV}/c$  微分截面曲线与实验结果符合最好，这与 Friedman 等<sup>[26]</sup> 针对  $K^-$  原子数据比较分析的结论一致。

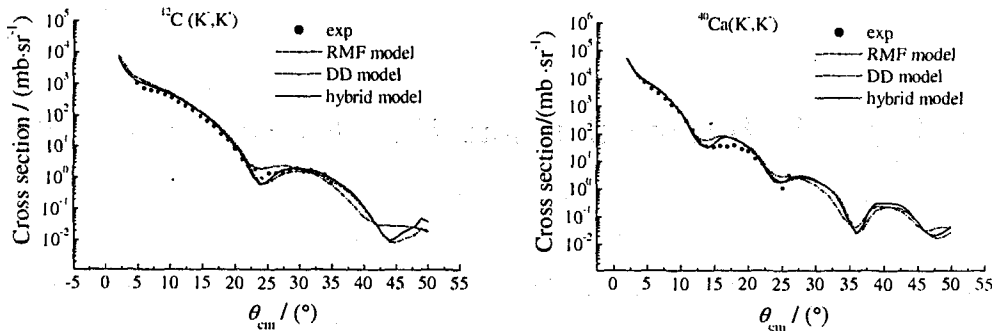


图 5 入射动量为  $p_K = 800 \text{ MeV}/c$  时， $K^-$  介子与  $^{12}\text{C}$  和  $^{40}\text{Ca}$  核碰撞的弹性散射微分截面

### 4 小结

本文简要介绍和评述了近几年来中高能核物理中一些受关注的问题，重点介绍了核子电磁形状因子和  $K^-$  介子与原子核相互作用势强度问题。新的实验发现，由高能极化电子与质子散射得到的核子电磁形状因子新数据与已应用了数 10 年的 Rosenbluth 形状因子存在系统性的偏离。这将使我们对质子形状、内部结构以及核子内夸克之间基本电磁相互作用和色相互作用特征的认识更加细致和深入。

另一方面，近来利用新的实验技术所做的测量得到了不同于以往的  $K^-$  介子强相互作用能级移动和宽度数据，对于进一步研究  $K^-N$  相互作用提供

了更为可靠的数据，但是了解不同  $K^-$  过程所要求的  $K^-$  核相互作用光学势强度的差别依然很大。而  $K^-$  核相互作用吸引势的强弱对于研究一系列与  $K^-$  有关的中高能奇异性核物理过程具有非常重要的影响，例如  $K^-$  核势的深度决定核物质中  $K^-$  凝聚能否产生以及相对论重离子碰撞过程中  $K^-$  介子的产额等。近年来的一些理论和实验分析还表明，必须考虑  $K^-$  核相互作用势的动量相关性，理论模型计算结果才能够与  $K^-$  核散射和  $K^-$  原子的实验数据基本相符。为进一步澄清  $K^-$  核相互作用势的强度大小以及与核密度和  $K^-$  动量的依赖关系，还需要继续进行更细致的相关实验和理论研究工作。

## 参 考 文 献:

- [1] Jones M K, Aniol K A, Baker F T, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **84**: 1 398.
- [2] Gayou O, Aniol K A, Averett T, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 092301.
- [3] Belitsky A V, Ji Xiangdong, Yuan Feng. Phys Rev Lett, 2003, **91**: 092003.
- [4] Miller G A, Frank R. Phys Rev, 2002, **C65**: 065205.
- [5] Ji Xiangdong. Phys Rev Lett, 2003, **91**: 062001.
- [6] Punjabi V, Perdrisat F, Jefferson Lab Hall A Collaboration, *et al.* ArXiv: nucl-ex/0307001.
- [7] Qattan I A, Arrington J, Segel R E, *et al.* Phys Rev Lett, 2005, **94**: 142301.
- [8] Guichon P A M, Vanderhaeghen M. Phys Rev Lett, 2003, **91**: 142303.
- [9] Chen Y C, Afanasev A, Brodsky S J, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **93**: 122301.
- [10] Batty C J, Friedman E, Gal A. Phys Rep, 1997, **287**: 385.
- [11] Schaffner-Bielich J, Koch V, Effenberger M. Nucl Phys, 2000, **A669**: 153.
- [12] Agnello M, Beer G, Benussi L, *et al.* Phys Rev Lett, 2005, **94**: 212303.
- [13] Garcia-Reciö C, Melgarejo A J, Nieves J. Phys Rev, 2003, **C67**: 047601.
- [14] Zhong Xianhui, Li Lei, Cai Chonghai, *et al.* Commun Theo Phys, 2004, **41**: 573.
- [15] Brown G E, Rho M. Phys Rev Lett, 1991, **66**: 2 720.
- [16] Brown G E, *et al.* Nucl Phys, 1994, **A567**: 937.
- [17] Li G Q, *et al.* Nucl Phys, 1995, **A594**: 460.
- [18] Weise W. Nucl Phys, 1996, **A610**: 35c.
- [19] Schaffner-Bielich J, *et al.* Nucl Phys, 1997, **A625**: 325.
- [20] Sibirtsev A, Cassing W. Nucl Phys, 1998, **A641**: 476.
- [21] Tsushima T, *et al.* Phys Lett, 1998, **B429**: 239.
- [22] Schaffner-Bielich J, *et al.* Nucl Phys, 2000, **A669**: 153.
- [23] Ramos A, Oset E. Nucl Phys, 2000, **A671**: 481.
- [24] Tolos L, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A690**: 547.
- [25] Cieply A, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A696**: 173.
- [26] Friedman E, Gal A, Mareš J, *et al.* Phys Rev, 1999, **C60**: 024314.

## Selected Topics in Intermediate and High Energy Nuclear Physics\*

LI Lei, ZHONG Xian-hui, NING Ping-zhi

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Several problems in intermediate and high energy nuclear physics have attracted considerable attention in these years: (1) Nucleon electromagnetic form factors. There is a systematic difference between the recently measured data from high energy polarized electron-nucleon scattering experiments and the previous Rosenbluth results. (2) The strength of  $K^-$ -nucleus optical potentials. It varies qualitatively from different analyses on  $K^-$ -nucleus interactions. In this paper, the above problems are discussed and reviewed briefly.

**Key words:** intermediate and high energy nuclear physics; nucleon electromagnetic form factor; interaction between  $K^-$  meson and nuclei

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10275037); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20010055012)