

高能电子束流引发的横向极化气体 氢靶共振退极化研究*

王思广¹ 周书华² 叶云秀³ 叶震宇³ 冒亚军^{1;1)} M. Bouwhuis⁴ Y. Holler⁵
P. Lenisa⁶ D. Reggiani⁷ H. Marukyan⁸ P. Tait⁷

1 (北京大学物理学院 北京 100871)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

3 (中国科学技术大学 合肥 230026)

4 (Department of Physics, University of Illinois, Urbana, Illinois 61801, USA)

5 (Desy, Deutsches Elektronen-Synchrotron, 22603 Hamburg, Germany)

6 (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare,

Sezione di Ferrara and Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara, 44100 Ferrara, Italy)

7 (Physikalisches Institut, Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Germany)

8 (Yerevan Physics Institute, 375036 Yerevan, Armenia)

摘要 对于HERMES横向极化气体氢靶, 高能电子束流所激发的高频磁场会引发共振退极化. 本文就该极化度下降的产生机制进行研究, 并给出 σ_{24} 共振点发生位置的测量结果, 并且将极化靶磁场的强度稳定在远离共振点处, 挽回了数据获取时极化度近3%的共振损失.

关键词 共振 极化气体靶 极化度

1 引言

德国DESY实验室HERMES合作组利用HERA储存环中的极化电子束轰击非极化或极化气体靶来研究核子的自旋结构. 该实验使用的靶室是束流管道的一部分(称之为气体内靶). 极化靶的气体原子经过六极磁体的筛选和高频自旋态转换器的转换, 成为我们需要的处于特定自旋态的极化原子, 然后注入处于磁场中的靶室^[1-4]. 该外磁场一方面提供靶自旋的参考方向, 另一方面有效地消除原子核与核外电子之间的自旋耦合, 延缓退极化速度, 从而保持靶的极化度^[5].

对于核子自旋结构的实验研究, 靶的极化度是一个重要参量. 故在数据获取的整个过程中, 连续利用极化度监测系统BRP(Breit-Rabi Polarimeter)进行测量. 实际运行显示: 靶的极化度偶尔会下降2%—

3%左右. 进一步探究表明, 该下降是由27.6GeV的电子束流激发的高频磁场所致. 本文就该极化度下降的产生机制进行研究, 并给出 σ_{24} 共振点发生位置的测量结果及有效避免方法.

2 极化氢靶共振退极化原理

束流引发的氢靶共振退极化与3种因素有关: a) 电子束流激发的高频磁场的频谱特性; b) 磁场中氢原子能级劈裂状况与外磁场磁感应强度的关系; c) 外加磁场的强度的稳定性.

处于磁场中的氢原子, 由于其核子的自旋及核外电子的自旋与外磁场之间的耦合及自旋-自旋耦合, 处于基态的原子的能级将劈裂为4条超精细结构态. 各精细结构态之间的能级间距与外磁场场强有关(图1).

2005-12-05 收稿, 2006-02-06 收修改稿

* 国家自然科学基金(10375002), 教育部科学技术研究重大项目(305001)和高等学校博士学科点专项科研基金资助

1) E-mail: maoyj@hep.pku.edu.cn

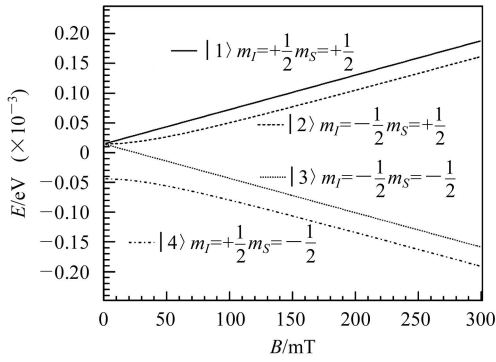


图1 磁场中氢原子超精细结构能级 $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$ 相对值随外磁场磁感应强度的变化

HERA 储存环中 27.6 GeV 的电子束包含 220 个束团(Bunches), 每个束团含 $\sim 3.6 \times 10^{10}$ 个电子以接近光速环绕长度 6.3 km 的储存环管道飞行. 通过 HERMES 气体靶的相邻两束团时间间隔为 $\tau = 96$ ns. 束团电流的时间分布可用高斯函数描述为

$$I(t) = I_0 \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right], \quad (1)$$

其中 I_0 为单个束团的峰值电流; 时间区间为: $-\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2}$. 对于 HERA 束流, 其宽度 $\sigma_t = 37.7$ ps.

对(1)式进行傅里叶变换可得其频谱分布函数为

$$a_n = 2I_{\text{tot}} \exp\left[-\frac{\nu_n^2}{2\sigma_\nu^2}\right], \quad (2)$$

其中 I_{tot} 为束流函数的积分值. $\nu_n = \frac{n}{\tau}$ 为相应于 $n = 1, 2, 3, \dots$ 的各谐波的频率.

相邻谐波之间的间隔为

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau} = 10.42 \text{ MHz}, \quad (3)$$

频谱分布函数的宽度为

$$\sigma_\nu = \frac{1}{2\pi\sigma_t} = 4.22 \text{ GHz}, \quad (4)$$

在该宽度范围内, 谐波数目为 405 (利用 $\frac{\sigma_\nu}{\Delta\nu}$ 计算), 其幅度可以与基波的幅度相比拟.

束流的频谱分布见图2.

对于 HERMES 横向极化气体靶, 当向靶室注入处于 $|1\rangle$, $|4\rangle$ 态的氢原子时, 得到原子核为正向极化的靶; 当注入 $|2\rangle$, $|3\rangle$ 态的氢原子得到负向极化靶. 当原子核的两能级 $|a\rangle$, $|b\rangle$ 之差与 HERA 束流激发的谐波的频率满足下列条件时:

$$\nu_n = \frac{|E_a - E_b|}{2\pi\hbar} = \nu_{ab} \quad (n = 1, 2, \dots), \quad (5)$$

就会引发原子核的共振退极化: 即能级间的跃迁. 在可能的跃迁中, 能改变原子核极化方向的为 $|2\rangle \Leftrightarrow |4\rangle$ (命名为 σ_{24} 跃迁), $|1\rangle \Leftrightarrow |2\rangle$ (命名为 π_{12} 跃迁) 及 $|3\rangle \Leftrightarrow |4\rangle$ (命名为 π_{34} 跃迁) 态之间的跃迁. 其中 σ_{24} 跃迁既改变原子核的自旋方向, 同时又改变核外电子的自旋方向; π_{12} 及 π_{34} 跃迁仅改变原子核的自旋方向. HERMES 实验条件下, 各共振点位置随外磁场磁感应强度的分布理论计算值如图3所示.

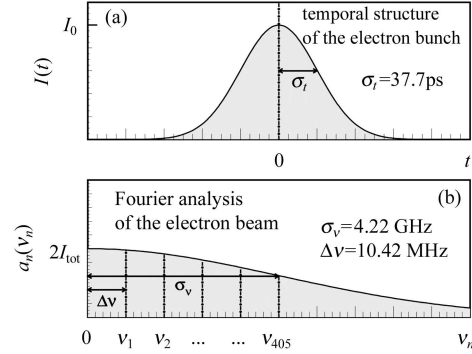


图2 HERA 束流中单一电子束团的电流的分布(a); 利用傅里叶变换将时域转换到频域后的束团的谐波分布图(b)

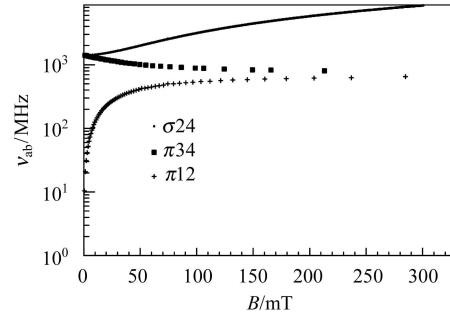


图3 HERA 束流可能引发的 HERMES 横向极化氢靶共振点位置随外磁场的变化(理论计算值) 对于 π_{12} 和 π_{34} 共振, 图中工作点附近(约 297 mT), 共振点之间可以清晰区分; 对于 σ_{24} , 由于相邻共振点间距约 0.37 mT, 点与点之间在图中无法区分.

当外磁场磁感应强度约为 297 mT (工作点) 时, 由于 π_{12} 和 π_{34} 共振点之间的间距比较大, 微调工作电流可以将外磁场有效控制在相邻两共振点之间, 避免共振的发生. 但对于 σ_{24} 共振, 由于相邻共振点间距约 0.37 mT, 为确保有效地将外磁场磁感应强度控制在两共振点之间, 必须具备两个条件:

- 1) 明确知道 σ_{24} 各共振点所对应的外磁场场强(共振点位置);
- 2) 外磁场的稳定度要高, 变化值应远小于 0.37 mT.

3 σ_{24} 共振测量及避免

HERMES 横向极化靶的外磁场由两个加有 545A 的线圈提供. 在靠近主线圈处, 安装有两个辅助线圈. 结构见图 4.

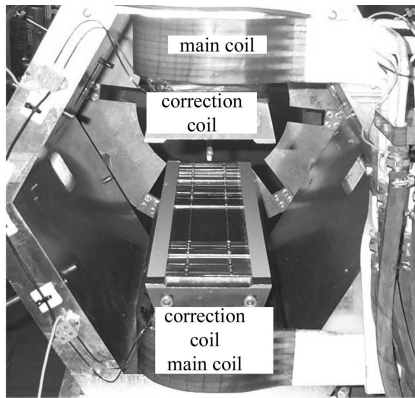


图 4 HERMES 横向极化靶电磁铁的主线圈及修正线圈

对于该电磁铁, 测量发现其磁感应强度随打开时间的增加而逐渐下降. 究其原因: 该电磁铁的铁芯及其支架在主线圈加载电流后, 其温度在 5—7 个小时内会逐渐上升 (尽管主线圈中空, 且有冷却水流通, 铁芯的温度依然可由室温上升到 70℃ 左右). 受铁磁物质中原子热运动的影响, 在主电流恒定的情况下, 两磁极在不同温度下所能提供的磁场的磁感应强度却不同. 为得到一稳定的磁场, 本工作中安装了一套由辅助线圈和磁感应强度测量系统组成的全自动负反馈磁场稳定系统.

获取数据时, 该系统利用靠近极化气体靶靶室处的探头, 连续监测磁场的磁感应强度. 根据测量出的场强数值, 调节辅助线圈中的电流值, 起到稳定磁场的作用. 辅助线圈中电流调节范围为 -10—10A, 电流的控制由 12 位数字模数转换器驱动, 控制精度为 10/1024A. 利用该系统, 可以将磁场稳定在:

$$\pm 0.004(\text{Stat.}) \pm 0.048(\text{Syst.})\text{mT}$$

范围内^[6].

为避免极化靶共振退极化, 必须知道 σ_{24} 共振位置, 利用该磁场稳定系统, 将磁场的强度稳定在相邻两共振点之间.

本工作利用该磁场稳定系统, 通过扫描磁场获得 σ_{24} 共振位置:

1) 固定电磁铁主线圈中的电流为数据获取时的数值.

2) 在工作点附近, 扫描磁场的同时利用 BRP 测量靶的极化度.

因极化靶的共振退极化幅度与 HERA 束流成正比关系, 故在 HERA 束流较强, 通常大于 25mA 时进行操作. 扫描过程中, 由大到小顺序改变磁场的控制目标值. 负反馈磁场自动稳定系统会根据磁场的目标值和实际测量值之差, 调节辅助线圈中的补偿电流, 在控制精度范围内 ($\pm 0.005\text{mT}$) 保持磁感应强度与目标值一致.

图 5 给出扫描结果. 由于开始扫描时 HERA 束流最强, 随着扫描的进行, 两小时后束流由最初的 32.5mA (对应扫描起始点 341.2mT) 指数衰减到扫描结束时的 24.5mA (对应扫描结束点 340.2mT), 故靶的极化度在不发生明显共振时因受来自束流的影响越来越弱而逐渐改善 (图 5 中非共振时靶的极化度由右到左逐渐升高). 该图显示束流引发的共振退极化幅度接近 3%. 两共振点所对应的测量位置处的磁感应强度之差约为 0.45mT. 由离线测量数据: 主线圈加载 545A 电流时, 中间靶室处磁场数值为 297mT, 监控位置为 340mT, 可推算出两共振点处所对应的实际磁感应强度之差为 $\sim 0.39\text{mT}$, 理论计算值 (0.37mT) 与之相符.

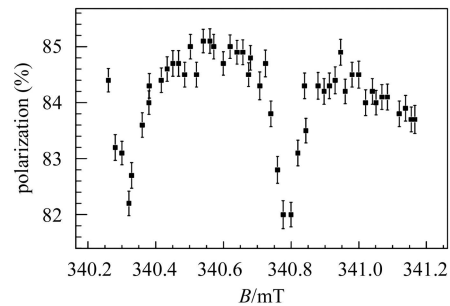


图 5 HERA 束流存在时 HERMES 横向极化氢靶的极化度随外加磁场的变化

磁感应强度为靠近靶室处数值, 极化度为 BRP 测量结果. 磁场扫描由强到弱. 其间 HERA 束流由 32.5mA 指数衰减为 24.5mA.

在该极化氢靶的运行中, 利用扫描结果, 将外磁场的磁感应强度控制在两共振点之间. 尽可能避免了共振的发生.

本工作为 HERMES 极化靶的最佳运行状况提供了有力的技术保障.

4 结论

少束流引发的极化靶共振退极的方法, 可用于类似实验中, 以提供高质量实验数据.

本文示出的通过扫描测量及通过动态稳定磁场减

参考文献(References)

- 1 Baumgarten C, Braun B, Contalbrigo M et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A508**: 268—275
- 2 Nass A, Baumgarten C, Braun B et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A505**: 633—644
- 3 Baumgarten C, Braun B, Carassiti V et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A496**: 227—285
- 4 Baumgarten C, Braun B, Court G et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A496**: 263—276
- 5 Reggiani D, Ph D Thesis. Università degli Studi di Ferrara, Italy, 2000—2002
- 6 WANG Si-Guang, Bouwhuis M, Holler Y et al. Nuclear Techniques, 2005, **28**(4): 297—300(in Chinese)
(王思广, Bouwhuis M, Holler Y等, 核技术, 2005, **28**(4): 297—300)

Research on Depolarization of Transversely Polarized Gas Target Induced by High Energy e-Beam^{*}

WANG Si-Guang¹ ZHOU Shu-Hua² YE Yun-Xiu³ YE Zhen-Yu³ MAO Ya-Jun^{1;1)}
M. Bouwhuis⁴ Y. Holler⁵ P. Lenisa⁶ D. Reggiani⁷ H. Marukyan⁸ P. Tait⁷

1 (School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

3 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

4 (Department of Physics, University of Illinois, Urbana, Illinois 61801, USA)

5 (Desy, Deutsches Elektronen-Synchrotron, 22603 Hamburg, Germany)

6 (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare,

Sezione di Ferrara and Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara, 44100 Ferrara, Italy)

7 (Physikalisches Institut, Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Germany)

8 (Yerevan Physics Institute, 375036 Yerevan, Armenia)

Abstract High frequency electromagnetic fields induced by high-energy e-beam can cause resonance depolarization of the HERMES transversely polarized gas target. This paper presents the research results on the mechanism of depolarization and the position where resonance σ_{24} takes place. About 3% depolarization has been saved after avoiding such resonance by fixing the magnet field far from resonance position according to the measured results.

Key words resonance, polarized gas target, polarization

Received 5 December 2005, Revised 6 February 2006

^{*} Supported by National Science Foundation of China (10375002), the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (305001) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education

1) E-mail: maoyj@hep.pku.edu.cn