

低能实验核物理及其应用

卢希庭

(北京大学技术物理系, 北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 简要地介绍了北京大学技术物理系和重离子物理研究所近年来在低能实验核物理及其应用方面的部分研究工作.

关键词 碳放射性 DSA B-H 核反应截面 氢分布 硼分布 阻止本领

1 前 言

高等学校具有培养高级专门人才和进行科学的研究的双重任务. 对如何把两者有机地结合起来, 做到互相促进, 共同提高, 我们在自己的教学和科研岗位上做了一点探索. 下面介绍的几项低能实验核物理及其应用的研究工作, 是基于学校的有限经费和设备, 力图把教学和科研结合起来的想法, 主要在 $2 \times 1.7\text{MV}$ 串列加速器上进行的.

2 碳离子放射性

在《原子核物理》课程教学中, 不可避免地要碰到一个核物理的基本问题: 自然界是否存在放射出比 α 粒子更重的所谓“重离子放射性”? 以往人们对此是否定的. 我们经过深入分析, 于 1980 年提出了“存在碳离子放射性的可能性”, 并指出“选择 ^{223}Ra 和 ^{222}Ra 作为研究对象也许是最有希望的”. 1984 年, H. G. Rose 和 G. A. Jonse 利用 ^{223}Ra 首次观察到 ^{14}C 衰变: $^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{209}\text{Pb} + ^{14}\text{C}$, 得到发射碳离子和发射 α 粒子的分支比 $R = (8.5 \pm 2.5) \times 10^{-10}$. 他们测量用的是半导体望远镜探测器. 通过使用固体径迹探测器证实了 Rose 和 Jonse 的发现^[1], 所得结果 $R = (8.7 \pm 1.7) \times 10^{-10}$, 与 Rose 等人的结果完全一致. 我们认为, 碳粒子原先并不存在于母核内, 而是在母核衰变过程中形成的, 并计算了形成几率的大小, 其值远小于 1. ^{223}Ra 与 ^{224}Ra 和 ^{222}Ra 发射 ^{14}C 的几率比较表明, 前者的 ^{14}C 形成几率比后两者要小得多, 似乎反映了核结构的奇偶效应, 而且发现三者之中 ^{222}Ra 的 ^{14}C 形成几率最大, 如果考虑到核结构的幻数效应, 这一点就不难得到合理解释, 因为 ^{222}Ra 发射 ^{14}C 后生成的子核 ^{208}Pb 是一个双幻核.

3 用 DSA 方法测量核能级寿命

测量核激发能级的寿命, 从而给出核能级间的跃迁几率, 是检验核结构模型的重要手段. Doppler 线移衰减方法(DSA)适用于测定 $10^{-15} \sim 10^{-12}\text{s}$ 范围内的能级寿命. 用 DSA 方法测量轻核的激发态寿命时, 通常利用 p 和 α 等轻粒子核反应较多, 利用重离子核反应的很少. 在 $2 \times 1.7\text{MV}$ 小串列加速器上, 利用重离子核反应 $^1\text{H}(^{19}\text{F}, \alpha)^{16}\text{O}^*$ 和 $^1\text{H}(^{11}\text{B}, \gamma)^{12}\text{C}^*$ 测量了 ^{16}O 的 7. 12 MeV 能级和 ^{12}C 的 4. 44 MeV 能级寿命^[2], 所得结果分别为 7. 7 \pm 3. 7 fs 和 60. 4 \pm 12. 5 fs. 对于 ^{16}O 的 7. 12 MeV 能级, 前人未用过 DSA 方法, 只用共振荧光方法测量过这个能级的寿命, 得到结果在 4 ~ 14 fs 不等. 分析前人未用 DSA 方法的原因, 可能是由于轻粒子入射所产生的反冲核的速度太小 ($v = 0.0073c$), 难以实现 DSA 测量. 采用重离子入射, 反冲核的速度比轻粒子入射情形大得多 ($v = 0.0315c$), 从而实现了 DSA 测量. 7. 12 MeV 至基态的跃迁是同位旋 $0 \rightarrow 0$ 的电偶极跃迁. 根据同位旋选

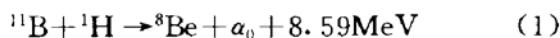
择定则,它应该是禁戒的.实验测得存在一定的跃迁几率表明,在该跃迁中库仑力起了重要作用.对于¹²C的4.44MeV能级,前人有过DSA测量,但用的是轻粒子反应⁹Be(α, n)¹²C*,所得结果(57±²³ fs)误差很大.采用重离子入射,显著地提高了实验精度.

4 硼-氢核反应截面测量

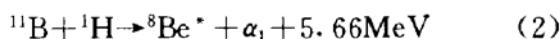
长期以来,人们把最终解决能源问题寄希望于实现D-T受控热核反应.但鉴于该反应有释放高能中子和要求氚耗等缺点,近年来¹¹B-¹H聚变核反应的研究又引起人们的关注,因硼-氢聚变能源的最大优点是几乎无中子释放和有丰富的天然资源,而且核反应率也比较高(仅次于D-T聚变反应).若能实现,硼-氢聚变反应将是一个理想的干净核能源.

为了开发设计硼-氢干净核能源,低能¹¹B+¹H核反应截面是关键数据.已发表的各实验室测量结果彼此分歧很大,对低能¹¹B+p→3 α 截面值可以相差两倍以上.

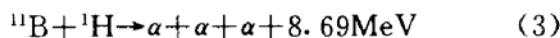
硼-氢聚变释放核能的主要反应道为



$$\rightarrow \alpha_{01} + \alpha_{02} + 0.093\text{ MeV}$$



$$\rightarrow \alpha_{11} + \alpha_{12} + 3.03\text{ MeV}$$



由于⁸Be*激发态的能级宽度很大($\Gamma_{cm}=1.56\text{ MeV}$),因而 α_1 的能谱不是单值的,而有一很宽的分布. α_{11} 和 α_{12} 则为能量分布很宽而低能端延伸至零的连续谱.显然,反应(3)的 α 也为低能端延伸至零的连续谱.而低能 α 粒子的测量并不容易,因此,要通过测量 α 连续谱求得准确的反应截面是比较困难的.采用¹¹B离子轰击含氢固体靶,由于存在核反应运动学的圆锥效应,(2)式中的⁸Be*只可能产生于入射束流方向小于某一临界角的圆锥体内,而且对于能量较高的⁸Be*粒子,在它行进中分裂生成的 α 粒子也只可能在一很小的圆

锥内.因此,当探测器放置于远大于临界角时,实验中对反应(2)只可能探测到 α_1 粒子, α_{11} 和 α_{12} 粒子不被记录,从而可以准确地测到反应(2)的截面.实验表明,在低能段,反应(1)和(3)的截面比反应(2)的小两个量级.利用从2×1.7MV加速器引出的¹¹B离子在质心系能量 $E_{cm}=300\sim 500\text{ keV}$ 范围测量了¹H(¹¹B, α_1)⁸Be*反应截面,获得了初步结果^[3],进一步的实验和分析正在进行中.

5 用重离子核反应测量氢分布

材料中的氢含量及其分布往往对材料的物理、化学性质有很大影响.对氢含量及其分布的测定是材料科学中的一个重要课题.例如,氢的测量对非晶硅太阳能电池材料、贮氢材料、耐辐射金属材料、钢的氢脆等研究是十分重要的.但传统的分析手段不能测量氢分布.十多年前发展起来的重离子共振核反应方法能有效地测量氢的深度分布.在2×1.7MV小加速器上率先在国内建立了利用¹H(¹⁹F, α γ)¹⁶O和¹H(⁷Li, γ)⁸Be反应测量氢分布的方法^[4];研究了不同样品在¹⁹F和⁷Li束轰击下氢游动性;研究了荧光放电慢速沉积非晶硅的一些特点,找到了快速沉积非晶硅的最佳条件.此外,对氧化硅膜、氮化硼掩膜、钯表面、纳米硅中氢分布进行了研究.

6 硼分布测量方法

在半导体器件制造工艺中,硼经常作为一种注入介质.它在半导体基体中的含量和深度分布与器件的性能密切相关.测量硼的深度分布通常用二次离子质谱(SIMS)等非核物理方法,从而给样品造成破坏.测量硼元素的非破坏性的核物理方法,一般用¹¹B(p, α_1)⁸Be*核反应分析,但它只能测硼的含量,很难给出硼浓度的深度分布.在2×1.7MV加速器上建立了一种测量硼浓度的深度分布的新方法^[5],该方法利用¹¹B(p, α_0)⁸Be反应.由于¹¹B(p, α_0)⁸Be反应的激发函数在质子能量

$E_p = 2.62 \text{ MeV}$ 附近存在一个宽的平台 ($\sim 100 \text{ keV}$), 可以利用该平台建立核反应能谱分析法, 从而实现了硼浓度的深度分布测量。结果表明, 对于硅中硼的测量, 分析深度可达 $4\mu\text{m}$, 在近表面范围 ($\leq 300 \text{ nm}$), 平均深度分辨大约为 50 nm 。

7 阻止本领研究

随着低能粒子加速器的大量出现, 核物理实验手段的应用已不局限于核物理本学科, 而广泛地应用于固体物理、材料科学、化学、地质学及生命科学等领域。在众多的应用中, 离子在固体中的阻止本领是一个不可缺少的物理量, 往往起着举足轻重的作用, 许多核物理研究和核技术应用工作的质量的改进有赖于阻止本领精度的提高。显然, 对它的研究具有重要的实际意义, 同时, 对于了解离子与固体相互作用也有重要的理论意义。于是, 于 1988 年在 $2 \times 1.7\text{MV}$ 和 $2 \times 6\text{MV}$ 加速器上开始了此项研究, 利用多种离子束对在 Ag、Au、Al 及化合物 Mylar 膜、 CaF_2 和 MoO_3 中的阻止本领进行了系统的测量^[6~9]。主要结果如下: 获得了一批阻止本领数据, 它们是: ^{11}B 、 ^{12}C 、 ^{19}F 、 ^{35}Cl 和 ^{79}Br 等低能重离子在 Ag 和 Al 中的阻止本领; ^{11}B 、 ^{12}C 和 ^{16}O 低能重离子在 CaF_2 和 MoO_3 中的阻止本领。其中绝大部分数据以前是空白。

发展了测量重离子阻止本领的新方法。它们是弹性反冲探测质子法, 重离子共振核反应法和重衬底背散射法。这三种方法的共同特点是可以用有衬底靶代替自撑靶, 解决了制备很薄靶的难题。前两种方法还将测量质子能谱代替测量重离子能谱, 克服了直接测量重离子所带来的困难。另外, 提出并实现了用比较法的 RBS 来测量阻止本领, 从而省去了对样品厚度的测量, 而样品厚度的测量往往是决定实验精度的关键因素。

对目前通用的 ZBL 半经验阻止本领理论进行了检验。表明离子在单元素中的阻止本领, ZBL 理论与实验结果基本符合, 但在化合物中的阻止本领, Bragg 法则需要修正, CAB 模型需要改进。

8 结束语

上述几项研究工作是试图把原子核物理的教学和科研结合起来的一个缩影。在教学进行过程中, 不时会产生一些闪光点, 关键是如何善于捕捉它。事实上, 碳离子放射性的设想就是在讲授 α 衰变时产生的, 在讲授核反应运动学时得到的启发下, 还提出了重离子中子源的设想。学校的经费、设备等许多条件都有限, 关键是如何因地制宜的利用有限条件, 挖空心思、力求创新。上述的重离子束 DSA、B-H 核反应截面测量、硼深度分布和阻止本领测量新方法的建立等就是在“挖空心思、力求创新”思想指导下实现的。另一方面, 学校中的科研若能面向教学, 则对提高教学质量大有好处。结合上述研究工作, 培养了八名硕士研究生、一名博士研究生和一些大学本科生, 使他们在学校学习期间, 就能得到如何进行科学的研究的较全面的训练。

参 考 文 献

- 1 Lu Xiting, et al. Chinese Phys. Lett., 1987, 4:227.
- 2 Lu Xiting, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1988, A272:909
- 3 陈刚. 北京大学技术物理系毕业论文, 1995 年 6 月
- 4 罗飞等. 原子核物理, 1986, 8:257
- 5 Lu Xiting, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1989, B43:565
- 6 Lu Xiting, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1989, B36:350
- 7 Lu Xiting, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1991, B58:280
- 8 Jin Changwen, et al. Phys. Rev., 1993, B48:6858
- 9 Wu Zeqing, et al. Chinese Phys. Lett., 1994, 11:537

(下转第 12 页)

- Ma B Q, Zhang Q R, Rischke D H, et al. Phys. Lett., 1993, B315:29
- 5 Chodos A, Jaffe R L, Johnson K, et al. Phys. Rev. 1974, D9:3471
- 6 Zhang Q R, Li X G. Z. Phys., 1992, A343:337
- 7 Zhang Q R. Z. Phys., 1995, A351:89
- 8 张启仁. 高能物理与核物理, 1979, 3:75
- 9 Aufert J J, et al. Phys. Lett., 1983, B123:275
Clark A R, et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 51:1826
Bodek A, et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 50:1431
- Arnold G R, et al. Phys. Rev. Lett., 1984, 52:727
- 10 DeGrand T, Jaffe R L, Johnson K, et al. Phys. Rev. 1975, D12:2060
- 11 Zhang Q R. J. Phys., 1990, G16:545
Zhang Q R. J. Phys., 1990, G16:559
- Zhang Q R. Comm. Theor. Phys., 1991, 16:223
- 12 Zhang Q R, Derreth C, Schafer A, et al. J. Phys. 1986, G12:L19
Zhang Q R, Liu H M. Phys. Rev., 1992, C45:2294

Non-nucleon Degrees of Freedom in Nuclei and ABC Plan for Developing Fundamental Nuclear Theories

Zhang Qiren

(Institute for Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract We emphasize that to develop a fundamental nuclear theory one has to consider various non-nucleon degrees of freedom in nuclei and to make the theory relativistic. A three step ABC Plan for this Purpose is proposed. The A plan is to reform the relativistic hadron field theory by taking the finite baryon size into account. We call finite size baryons atoms in contrast with points. The fundamental nuclear theory in this form is therefore a quantum atom dynamics (QAD). The B plan is to reform the bag model for hadrons by making it be quantum bag dynamics (QBD). This is a model fundamental nuclear theory on the quark level. The fundamental nuclear theory should eventually be developed on the basis of quantum chromodynamics (QCD). This is the C Plan.

Key Words QHD QAD QBD QCD

(上接第 22 页)

Low Energy Experimental Nuclear Physics and Its Application

Lu Xiting

(Department of Technical Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Some recent studies on the low energy experimental nuclear physics and its applications at the Department of Technical Physics and the Institute of Heavy Ion Physics of Peking University are briefly introduced in this paper.

Key Words carbon radioactivity DSA B-H nuclear reaction cross section hydrogen profiling boron profiling stopping power