

电核物理实验

石宗仁

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 评述电子探针、现代连续波加速器极化技术和核电技术的科学计划。

关键词 电子探针 连续波 极化 单举 遍举 标记光子

1 引言

目前,核物理主要集中于四个前沿方面,即电核物理、相对论核核碰撞、K 介子物理和放射性核束核物理.技术的进步提供了开展这些领域研究的机遇.

电核物理,即用电子和 γ 作为探针研究核、核子、强子的电磁结构.现代高能、强流连续束(CW)电子加速器已经建成,如 MAMI、AmPS、MIT/Bates 和 CEBAF,可做遍举和极化实验,特别是 CEBAF 具有极好的性能.

核物理的理论基础是标准模型(SM).核物理的中心问题之一是研究核、核子、强子如何由夸克胶子构成,色力的夸克禁闭和强子化性质等.电子是研究这个问题的有力工具,由于许多大型的 CW 电子直线加速器已经建成,使新一代电核物理实验研究成为现实.

本文介绍了电子探针的优点、研究的物理课题、CW 电子加速器、几个重要的实验技术和几台电子加速器的科学计划.

2 电子探针的优点

用电子散射研究核、核子、强子结构有许多优点.(1)它是初级束,束流品质好:流强、能量和空间散度小、能量可调等.(2)电子可视为无结构的点粒子.(3)可用极端相对论极限 ERL 处理电子散射,即取电子质量 $m=0$.在 ERL 下电子仅有纵向极化,即左、右手极化,螺旋性 $h=\pm 1$,散射中螺旋性守恒.(4)理论上电磁相互作用力清楚,即 QED 理论.(5)

由于相互作用力的强度小($\alpha=1/137$),电子散射反应是可微扰处理的单步过程,可以得到精确的结构信息.(6)易调节时间、空间分辨本领,从而研究不同层次的核结构及其过渡性质.(7)电弱相干,弱形状因子被放大,成为研究核、核子、强子的奇异夸克结构及检验标准模型的重要手段.因此,电子一直是核物理研究的重要探针.CW 和极化实验技术,使它成为更有力的研究工具.

3 电子散射反应运动学^[1,2,3]

3.1 反应截面

电子与靶核电磁相互作用主要是通过交换单光子,平面波 Bonn 和 ERL 近似.散射计算中 Lorenz 不变,矢量流、时间、宇称及电子螺旋性守恒等.由于上述条件,反应截面可表达为

$$\sigma = \sigma_{\text{Mott}} f_{\text{rec}}^1 \{v_L R^L + v_T R^T + v_{LT} R^{LT} + v_{TT} R^{TT} + h(v_{TL} R^{TL} + v_T R^T)\} = (\Sigma + h\Delta)$$

v_k 是电子的运动学因子.六个独立的响应函数 R^k 完全表达了核电磁结构,每个 R^k 又包含了核极化相关和不相关两部分.通常, R^k 是迁移四动量 (ν, q) 、靶极化角 (θ^*, φ^*) 和强子探测角 (θ, φ) 的函数,最后从 R^k 分出靶极化角和强子探测角,得到约化矩阵元.

实验的任务是测出所有六个独立的响应函数,特别是测出有新物理意义的响应函数.不同的实验得到的响应函数不同.

3.2 实验类型与响应函数

不测量强子末态,称为单举;测量强子末

态并与散射电子符合, 称为遍举. 其优点: 单个反应道、本底小、终态关联灵敏、对核模型不灵敏和出现纵横向相干项等. \bar{e} 和 \bar{A} 表示电子和靶的极化, 上标 h 和 t 表示电子和靶的极化截面, W^* 表示部分约化的响应函数.

1) 单举实验 $A(e, e')$

$$\sigma_0 = (\nu_L R^L + \nu_T R^T) = \Sigma_0$$

2) 遍举实验 $A(e, e' X)$

$$\sigma_1 = \nu_L R^L + \nu_T R^T + \nu_{LT} \cos \varphi W^{LT} + \nu_{TT} \cos(2\varphi) W^{TT}$$

3) 极化单举实验 $A(\bar{e}, e')$

$$\sigma_0^h = \Sigma_0 + h(\nu_L W_{AV}^L + \nu_T W_{AV}^T + \nu_T W_{VA}^T)$$

$$\bar{A}(e, e')$$

$$\sigma^t = \nu_L R^L + \nu_T R^T + \nu_{LT} \cos \varphi^* W^{LT} + \nu_{TT} \cos(2\varphi^*) W^{TT} = \Sigma_0^t$$

$$\bar{A}(\bar{e}, e')$$

$$\sigma_0^h = \Sigma_0^t + h(\nu_{TL} R^{TL} + \nu_T \cos \varphi^* W^T)$$

同时极化靶和电子可以得到六个独立的响应函数 R .

4) 极化遍举实验 $A(\bar{e}, e' X)$

$$\sigma = \sigma_1 + h(\nu_{TL} \sin \varphi W_{TL}^t)$$

极化遍举实验中宇称守恒出现第五响应函数 W_{TL}^t , 它对相干反应和终态相互作用灵敏.

3.3 实验类型和典型的物理课题^[4,5]

表 1

(1) 单举	
实验类型	典型物理课题
$A(e, e')$	W_L, W_T
$A(\bar{e}, e')$	宇称不守恒物理(强子奇异夸克结构, 检验标准模型)
$\bar{A}(\bar{e}, e')$	中子、质子自旋结构函数
(2) 遍举	
实验类型	典型物理课题
$A(e, e' X)$	相干项 W_{LT} , 超核物理, 核子关联, 色透明性
$A(\bar{e}, e' X)$	第五响应函数 W_{LT}^t
$A(\bar{e}, e' X)$	中子电荷形状因子
$\bar{A}(e, e' X)$	用 1^+ 的靶, 寻找六夸克态
$\bar{A}(\bar{e}, e' X)$	中子电荷形状因子

(3) 标记光子

实验类型	典型物理课题
$A(\gamma_e, \text{Compton})$	核子的电荷化率, 非线性 QED
$A(\gamma_e, X)$	介子产生, 核子共振态, 三体力
$A(\bar{\gamma}_e, X)$	自旋观测量

电核物理实验可分为三类: 单举, 遍举和标记光子; 每类又分为极化和非极化. 典型物理课题是: 核介质效应、核子的各种形状因子、核子共振态、核子关联、宇称不守恒物理、超核物理、色透明性、夸克的强子化等. 实验类型和典型的物理课题见表 1.

由于理论上容易计算少体系统, 所以主要研究轻靶核, $A \leq 4$. 为了研究核介质效应也用较重的核.

4 CW 电子加速器

实验上计数率

$$N = I \cdot n \cdot D \cdot \Omega \cdot \sigma$$

$$D = \tau \cdot f$$

$$\bar{I} = I \cdot \tau \cdot f$$

$$L = \bar{I} n$$

其中: I 是电子脉冲峰流强度; n 是单位面积的靶核数; τ 是电子脉冲宽度; f 是电子脉冲频率; Ω 是探测器的立体角即接受度. σ 是截面, 它包含了结构相关的矩阵元; L 称为照度; D 称为占空因子, $D=100\%$ 称为 CW.

CW 的优点是: 克服小 τ 和大 I 引起的探测系统过载; 可做计数测量; 适合遍举实验, 即做符合测量; 产生强度高的准单色标记光子束等.

CW 的产生方式: 低梯度电子感应加速器(MAMI); 超导电子加速器(SDALINAC, CEBAF); 拉长、储存环方式, 分别适合外靶和内靶(AmPS, MIT/Bates). 储存环方式是电子在环内运行一周的时间等于电子脉冲宽度 τ , 拉长方式是在两个电子脉冲的间隔慢慢取出电子束流, 实现 CW. 表 2 列出了世界上用于电子散射实验的现代电子加速器^[6].

表2 新一代电子加速器一览表

装 置	地 点	类 型	$E_{max}(\text{GeV})$	$I(\mu\text{A})$	$D(\%)$	状 态
SDALINAC	Darmstadt	SC-linac+recirc	0.13	20	100	1991年运行
Lebedev	Moscow	microtron	0.14	100	100	在 建
EROS	Saskatoon	linac+PSR	0.30	50	~70	1990年运行
AmPS	Amsterdam	linac+PSR	0.91	70	≥ 90	1992年运行
		SR	0.91	100mA	~100	计 划
MAMI	Mainz	3 cascaded microtron	0.86	100	100	1991年运行
BATES	Middleton MA	linac+PSR	1.0	50	≥ 85	1993年运行
		SR	1.0	80mA	~100	1994年运行
ELSA	Bonn	SYN+PSR	2.0	0.2	≥ 80	1989年运行
		SYN+booster	3.5	0.5	10~80	在 建
		SR	2.0~3.5	0.5mA	~100	计 划
CEBAF	Newport	SC linac	4.0	200	100	1994年运行
	News, VI	+recirc				
EEF	Europe	SC linac+recirc	15.0	>10	100	计 划
VEPP-3	Novosibisk	SR	2.0	200mA	1	运 行
HERA	DESY Hamburg	SR	30	58mA	1	计 划

SYN 为同步加速器; PSR 为脉冲拉长环; SR 为储存环, 束流单位 mA; linac 为直线加速器; recirc 为循环; microtron 为电子感应加速器.

5 几个重要的实验技术

由于极化实验可以得到更多的结构信息, 所以极化技术受到重视. 高性能的探测器也是重要的.

1) 极化气体内靶. 它的优点是: 易实现高极化度、易改变极化方向和易测量低能反应产物等. 如何提高气体内靶的密度是待研究的课题.

2) 用圆极化 Laser 光照射半导体化合物 GaAs 和 $\text{GaAs} + \text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ 产生极化电子束, 提高极化度和极化束流强度是待研究课题.

3) 极化固体和液体靶是十分困难的. 一是忍受强流电子的能量耗损, 二是克服原子间的吸引力实现高极化度, 三是改变极化方向困难等.

4) 实现圆极化和线极化实光子束.

5) 测量出射粒子或反冲核的高接收度的

极化仪, 例如中子极化仪.

6) 用于超核研究的高分辨多粒子探测器等.

6 几台加速器上的科学计划

加速器上的科学计划取决于反应运动学的区域、计数率 N 和本底. 计数率 N 与照度 L 、探测器立体角 Ω 和截面 σ 成正比. 截面 σ 反比 Q^4 , 实际能达到的区域受到计数率限制. 本底主要来自竞争反应的产物, 例如 π^- 和 e^\pm 对中的 e^- 等在电子探测器中产生的本底. 探测器应具有粒子种类和轨迹鉴别功能. 科学计划可根据加速器能量分为下列几类.

1) $E_e \leq 1\text{GeV}$ (MAMI, MIT/Bates, AmPS) 核子形状因子、核形变、 Δ 波函数、核子关联、宇称不守恒、第五响应函数 W_{LT} 及介子的产生等.

2) $E_c \leq 4\text{GeV}$ (ELSA, CEBAF) 除上述之外, 研究核内的六夸克态、核子形变和 Δ 激发态的含量, 即核介质效应, 超核物理和寻找漏失的核子共振态等.

3) $E_c = 15\text{GeV}$ (EEF) 色透明性、Charm 夸克的产生和夸克强子化等.

4) $E_c = 25, 50\text{GeV}$ (SLAC) 核子自旋结构函数, 非线性 QED 等

5) 电子质子对撞能 $E \approx 1\text{TeV}$ (HERA) HERA 是电子质子对撞机. 借左右手极化电子的喷注 jet 不同, 研究宇称不守恒, 检验 SM.

作者感谢郑林生先生给予的指正.

参 考 文 献

- 1 Donnelly T W, and Raskin A S. *Annals of Physics*, 1986, 169:247
- 2 Raskin A S, Donnelly T W. *Annals of Physics*, 1989, 191:78
- 3 Arenhovel H, et al. *Z. Phys.*, 1988, A331:123
- 4 Gross F. CEBAF Scientific Program, 1986
- 5 Kowalski S. *Nucl. Phys.*, 1993, A553:630c
- 6 Walcher T. *Nucl. Phys.*, 1993, A553:235c

Experiments of Electronuclear Physics

Shi Zongren

(*Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

Abstract The electron probe, modern continuous wave accelerators, polarization techniques and the scientific programs for electronuclear physics are surveyed.

Key Words electron probe continuous wave polarization inclusive exclusive tagged photon

最新消息二则

[本刊讯]

我国原子能混合堆研究取得新进展

最近在成都召开了“863”能源领域混合堆专题专家会议, 会上肯定了我国原子能混合堆专题研究在“八五”期间取得了显著成绩, 有力地推动了我国受控核聚变研究的发展. 混合堆专题共有五个课题. 核工业西南物理研究院承担的“高功率多种辅助系统联合下 HL-1M 装置边缘等离子体研究”课题, 已于 1994 年 10 月完成了中国环流器新一号的改建并成功地投入了运行实验, 环向磁场达到 2.5T, 等离子体电流达到 325kA, 等离子体存在时间达到 1040 ms. 最近, 他们又在 HL-1M 装置上成功地进行了较高等离子体参数下的低杂波电流驱动实验, 圆满完成了“863”计划的要求. 另外, HL-1M 装置的多发弹丸加料与排灰系统, MW 级中性束注入系统都将在年内完成研制工作. 中科院合肥等离子体所承担的“HT-7 超导托卡马克装置上的等离子体研究”

课题, 已在“HT-7”装置上成功地进行了首次等离子体放电, 超导纵场达 2.5 T, 等离子体电流达 160kA, 等离子体存在时间达 300ms. 该装置的 MW 级长脉冲离子回旋装置共振加热系统也接近完成. 其余三个课题: “聚变裂变混合堆 2000 年发展目标论证”, “混合堆详细概念设计研究”, “混合堆材料及工艺研究”, 亦均已圆满完成.

放射性药物生产线在沪建成

中国科学院上海原子核研究所与中国新兴集团总公司合作, 投资总额为 5400 万元的放射性药物工程最近完成. 利用比利时政府贷款从 IBM 公司引进的旋风-30 回旋加速器, 已调试出束并通过专家验收. 该加速器是目前同类加速器中性能较好的先进设备, 对癌症、心脑血管疾病等, 具有独特诊断价值, 能生产 ^{67}Ga 、 ^{123}I 、 ^{201}Tl 等放射性药物及 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{15}O 等正电子显像药物.