

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学

校友文库

北京谱仪 II

正负电子物理

BES II: Electron-positron Physics

郑志鹏 主编

李卫国 校阅

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了高能物理的一个重要领域——粲夸克偶素和粲粒子物理的基础理论和实验进展. 实验方面主要描述了北京正负电子对撞机和北京谱仪的升级改造以及在北京谱仪上取得的一系列重要成果, 它大大丰富和发展了粲夸克偶素和粲粒子物理的理论和实验研究. 这些成果包括 R 值($2\sim 5\text{ GeV}$)测量(获国家自然科学二等奖), J/ψ 、 $\psi(2S)$ 、 $\psi(3770)$ 等粲介子偶素物理的创新成果, 如 $X(1860)$ 、 $X(1835)$ 等新粒子的发现, 对有争议粒子 σ 、 κ 的证实和参数测定, 对标量介子、 χ_c 粒子性能的精确测量, $\psi(2S)$ 强衰变以及 $\psi(3770)$ 到非 $D\bar{D}$ 衰变的开创性研究以及利用单标记和双标记进行 D 介子衰变的深入研究等. 这些成果已发表在国际一流水平的杂志上, 并被粒子数据手册(PDG)引用, 得到了国际高能物理界的关注和认可.

本书作者都是工作在第一线, 熟悉该领域的专家、学者, 因此本书内容的科学性和参考价值是毋庸置疑的.

本书可供粒子物理、核物理及相关学科的研究人员和大专院校有关专业师生参考.

图书在版编目(CIP)数据

北京谱仪Ⅱ正负电子物理/郑志鹏主编, 李卫国校阅. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. 1

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书: 中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02236-4

I. 北… II. ①郑… ②李… III. 正负电子对撞—对撞机
IV. O572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 147938 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经 销 全国新华书店

开 本 710 mm×1000 mm 1/16

印 张 36

字 数 636 千

版 次 2009 年 1 月第 1 版

印 次 2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 92.00 元

本书编委会

主 编 郑志鹏

校 阅 李卫国

编 委 (按姓氏笔画为序)

王书鸿 毛泽普 朱永生

乔从丰 刘怀民 李卫国

李 金 吴 宁 沈肖雁

苑长征 金 山 郑汉青

郑志鹏 赵光达 荣 刚

胡海明

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。

鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

序 言

北京谱仪(BES)是工作在北京正负电子对撞机(BEPC)上的大型磁谱仪,于1989年运行以来,至今已有19年历史.BES的发展大致可以分为两个阶段,第一阶段自1989年到1998年,在BES I上运行;第二阶段自1998年至今,在改进后的称为BES II的探测器上运行.

第一阶段是BES的开创时期.在BES合作组的努力下,取得了一批重要成果,如 τ 质量测量,胶球候选者的寻找和观测, $\psi(2S) \rightarrow \rho\pi$ 压低规律的探索, D_s 纯轻子衰变的观测等都受到国际高能物理界的关注.这些结果都总结、记录在《北京谱仪正负电子物理》一书中.该书由广西科学技术出版社出版(1998年),出版后获得广大读者的欢迎和好评,成为高能实验物理研究生、青年科技人员的入门书.

第二阶段是BES的发展、收获时期.合作组成员利用改进后的BES II探测器收集到的大量数据进行分析,取得了一系列创新成果,如在 J/ψ 衰变过程中一系列新粒子($X(1860)$, $X(1835)$ 等)的发现, σ 、 κ 粒子的观察和确认,标量介子、 χ_c 粒子的深入研究, $\psi(2S)$ 强衰变以及 $\psi(3770)$ 到非 $D\bar{D}$ 衰变的开拓性研究, D 介子衰变的精细测量, R 值($2\sim 5$ GeV)的精确测量等.这些成果已被国际高能物理界权威的“粒子数据组”(PDG)所认可,列入了《粒子物理手册》.BES的新成果大大丰富了粒子物理数据,为新型强子态的寻找和确认,为低能区QCD的深入研究提供了必要的实验数据,为标准模型的检验和发展作出了贡献,因而得到了国际高能物理界的高度重视和承认.这些成果都总结记录在本书

当中。

1988年10月,北京正负电子对撞机对撞成功,邓小平和中央领导前来参观、祝贺、邓小平作了非常重要的讲话:“中国必须在世界高科技领域占有一席之地。”20年来,我国的科技人员努力拼搏,BES的研究成果已使中国在世界高能物理领域牢牢占有了重要的一席之地。现在,BES II 即将升级为 BES III。我们确信,在不久的将来,BES III 物理必将在世界高能物理领域占有更加重要的地位。

本书内容包括粲夸克偶素和粲粒子物理理论概述,BEPC II /BES III 的升级改造以及 BEPC II /BES III 的进展和现状。全书内容丰富、全面,围绕着 BES 从理论到实验、从硬件到软件、从历史到未来,能让读者在广阔的知识空间中驰骋。

本书的作者都是多年工作在第一线上的该领域的专家,他们以丰富的经验,求实的态度,严谨的精神提升了本书的科学价值。

中国科学技术大学出版社邀请郑志鹏等人撰写并出版这本书,将使更多人了解我国在高能物理方面所取得的新成就,学习到粲物理理论、实验方法和技术等知识。该书将是大学生、研究生、高校教师和科研人员的高能物理专业的参考书,同时对其他专业的研究生、教师和科研人员也有一定的参考价值。我相信读者会喜欢这本书!

叶铭汉

2008年8月

前 言

在北京正负电子对撞机(BEPC)上工作的北京谱仪(BES)从1989年开始运行,不久后就取得了 τ 质量测量等重要的成果.中国物理学家并不就此满足,从1995年以后开始了BEPC和BES的升级改造.

经过三年多的努力,BEPC的亮度增加了一倍,BES II的性能有很大提高,数据获取率提高了一倍.从1998年,BES II正式开始了数据获取.几年来,获取了 $5.8 \times 10^7 J/\psi$ 事例, $1.4 \times 10^7 \psi(2S)$ 事例,这两项都创造了世界该种事例样本的纪录.此外还获取了 33 pb^{-1} 的 $\psi(3770)$ 数据.大的事例样本提供了好的统计性,优良的探测器指标,提供了好的数据质量,都给今后的物理分析打下了良好基础.

近十年来,在BES合作组中外物理学家的共同努力下,取得了丰硕成果.有八十多篇论文在国际一流的刊物上发表.其实验结果多次在粒子数据表(PDG)上被引用.多次应邀在国际大会上报告.这些成果引起了很大反响,受到了国际高能物理界的关注和承认,使得中国的高能物理在世界粒子物理界拥有一席之地.

本书汇集了北京谱仪II取得的物理成果,包括 R 值($2 \sim 5 \text{ GeV}$)测量, J/ψ 、 $\psi(2S)$ 、 $\psi(3770)$ 等粲介子偶素物理和 D 物理的创新成果.这些成果为粲介子偶素和粲粒子物理的实验和理论研究作出了贡献.

参加本书撰写的都是在第一线工作的人员,他们熟悉该领域的情况,对本专业有深刻的了解和体会,因此写出的内容有极强的科学性和极好的参考价值.

本书第1章作为引论介绍了粲夸克偶素和粲粒子物理的基本理论,给读者必要的理论基础知识.第2章介绍了 BEPC 和 BES II 升级改造的进展以及最终达到的指标,使读者对 BEPC 和 BES II 的硬件设备和软件系统——物理成果的源头有所了解.第3章、第4章、第5章、第6章和第7章分别介绍 J/ψ 、 $\psi(2S)$ 、 $\psi(3770)$ 、 D 介子物理和 R 值测量的物理结果.第8章总结 BES II 的结果,介绍 BES III 探测器的结构和工程进展状况以及对 BES III 未来物理的展望.书后的附录包括粒子物理实验数据的统计分析和分波分析及其应用两部分,它们涉及的都是粒子实验物理的基础方法,相信会对读者有用.

本书作者的分工是:

前言 郑志鹏

第1章 乔从丰 赵光达

第2章 王书鸿 李 金 郑志鹏 刘怀民 毛泽普

第3章 金 山 沈肖雁

第4章 苑长征

第5章 荣 刚

第6章 荣 刚

第7章 胡海明

第8章 李卫国

附录 A 朱永生

附录 B 吴 宁 郑汉青

作为主编,郑志鹏负责全书内容和撰写人的确定,各章节内容的汇总和审定.

作为校阅者,李卫国负责全书内容的校正和审核.

本书的完成有赖于各方面的支持,首先我们要感谢李政道教授,他对中国的高能物理事业一贯热情鼓励,鼎力相助,他亲自为本书题写书名使我们倍感荣幸.

此外,我们要感谢中国工程院叶铭汉院士,他一贯关心和支持 BES II 的升级改造和物理分析,他作为北京谱仪创始人,为本书作序,使本书

增色.

我们还要感谢赵展岳教授,他在事业获得巨大成功后还始终不忘中国的基础研究,特别是粒子物理的理论和实验的发展.他对本书的支持使本书得以如期出版.

本书是 BES II 成果的总结.而成果的获得首先是全体北京谱仪合作者努力的结果,我们要向他们致谢.没有 BEPC 的成功建造和运行就不会有 BES II 的成果,在此作者也向 BEPC 和高能物理所计算中心的同事们致谢.

我们还要向中科院高能物理所领导们致谢,他们成功地组织了 BEPC、BES II 的改造和运行,才可能取得这些物理成果.

我们要感谢张闯和陈江川同志,他们为第 2 章提供了有益的材料.

最后我们要感谢中国科学技术大学出版社,他们的辛勤劳动保证了本书出版印刷的高质量.

郑志鹏

2008 年 8 月

目 次

总 序	i
序 言	iii
前 言	v
第 1 章 粲物理导引	1
1.1 粲物理研究发端	2
1.2 粲物理研究回眸	7
1.2.1 粲偶素物理	7
1.2.2 粲介子和粲重子物理	18
1.3 粲物理研究所面临的挑战和希望	20
1.3.1 粲偶素研究	20
1.3.2 粲介子和粲重子研究	21
1.3.3 粲能区的其他物理问题	22
参考文献	23
第 2 章 BEPC 的升级改造和 BES II	28
2.1 BEPC 的升级改造	28
2.1.1 概况	28
2.1.2 改进主要内容和特点	29
2.1.3 改进研究的主要经过和结果	29
2.2 BES 升级改造	33
2.2.1 引言	33
2.2.2 主漂移室 MDC II	39

2.2.3 飞行时间计数器 TOF II	43
2.2.4 顶点探测器 VC	47
2.2.5 簇射计数器的升级	50
2.2.6 BES II 触发判选	53
2.2.7 在线数据获取系统	60
2.2.8 BES II 总体的物理性能	69
2.3 BES II 离线软件系统	73
2.3.1 概况	73
2.3.2 探测器模拟系统	78
2.3.3 事例重建与刻度系统	89
参考文献	111
第3章 J/ψ 物理	114
3.1 引言	114
3.1.1 J/ψ 粒子	114
3.1.2 J/ψ 粒子的衰变	115
3.1.3 J/ψ 衰变的实验研究	116
3.2 新粒子的寻找和研究	118
3.2.1 多夸克态的寻找与研究	118
3.2.2 胶子球的寻找与研究	141
3.3 标量粒子的研究	150
3.3.1 σ 和 κ 粒子的研究	150
3.3.2 $f_0(980)$	156
3.3.3 $f_0(1370)$	159
3.3.4 $f_0(1790)$	159
3.4 重子激发态的研究	160
3.5 J/ψ 和 η_c 衰变分支比的测量	164
3.5.1 J/ψ 衰变分支比的测量	165
3.5.2 η_c 衰变分支比的测量	171
3.6 J/ψ 和 η_c 的稀有衰变的寻找	177
3.6.1 味对称破坏过程	177

3.6.2 弱衰变过程	178
3.6.3 η_c 的稀有衰变	179
参考文献	181
第4章 $\psi(2S)$ 物理	185
4.1 $\psi(2S)$ 研究综述与 BES II $\psi(2S)$ 数据	186
4.1.1 $\psi(2S)$ 研究综述	186
4.1.2 BES II $\psi(2S)$ 数据样本	189
4.1.3 基本分析工具	195
4.1.4 BES II $\psi(2S)$ 及次生粲偶素衰变研究概况	198
4.2 $\psi(2S)$ 共振参数测量	199
4.2.1 $\psi(2S)$ 共振参数扫描	199
4.2.2 $\psi(2S)$ 轻子衰变分支比	204
4.3 $\psi(2S)$ 强子跃迁与辐射跃迁	208
4.3.1 $\psi(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 跃迁机制研究	209
4.3.2 $\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{cJ}/\psi$	214
4.3.3 $\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{c2}$ 中 χ_{c2} 的极化测量	219
4.4 $\psi(2S)$ 强子衰变	224
4.4.1 $\psi(2S)$ 强子衰变的测量	224
4.4.2 “12%规则”与“ $\rho\pi$ 疑难”	226
4.4.3 $\psi(2S) \rightarrow$ 矢量-赝标量末态	228
4.4.4 $\psi(2S) \rightarrow$ 赝标量介子对	239
4.4.5 $\psi(2S) \rightarrow$ 矢量-张量介子对	242
4.4.6 $\psi(2S) \rightarrow$ 重子对末态	244
4.4.7 $\psi(2S)$ 多体衰变	246
4.4.8 $\psi(2S)$ 强子衰变小结	254
4.5 $\psi(2S)$ 辐射衰变	254
4.6 $\psi(2S)$ 稀有衰变和新物理的寻找	258
4.7 利用 $\psi(2S)$ 数据研究次生粲偶素性质	260
4.7.1 利用 $\psi(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 研究 J/ψ 衰变	260
4.7.2 χ_{cJ} 共振参数测量	262

4.7.3 χ_{cJ} 衰变研究	265
4.8 竞争、机遇与展望	272
4.8.1 CLEO-c 对 $\psi(2S)$ 及次生粲偶素的研究	272
4.8.2 BES III 对 $\psi(2S)$ 及次生粲偶素的研究	272
参考文献	273
第 5 章 $\psi(3770)$ 物理	278
5.1 概述	278
5.2 $\psi(3770)$ 产生的实验研究	284
5.2.1 BES II $\psi(3770)$ 物理实验及 BEPC 能量的绝对刻度	286
5.2.2 利用 R 值测定 $\psi(3770)$ 的共振参数	290
5.2.3 利用拟合单举强子观测截面的方法测量 $\psi(3770)$ 和 $\psi(3686)$ 的共振参数	307
5.3 $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ 及 non- $D\bar{D}$ 衰变分支比的测量	311
5.3.1 利用能量扫描的方法测量 $\psi(3770) \rightarrow D^0\bar{D}^0, D^+D^-$, $D\bar{D}$ 和 non- $D\bar{D}$ 衰变的分支比	312
5.3.2 利用 R 值测定 $\psi(3770) \rightarrow D^0\bar{D}^0, D^+D^-, D\bar{D}$ 和 non- $D\bar{D}$ 衰变的分支比	312
5.3.3 截面扫描数据粒子最大能量的分析方法	316
5.3.4 粒子最大能量判选的 R 值测定方法	321
5.3.5 $\psi(3770) \rightarrow$ non- $D\bar{D}$ 衰变分支比的平均值	325
5.4 $\psi(3770) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 衰变分支比的测定	325
5.4.1 数据分析	326
5.4.2 $\psi(3770)$ 事例总数的确定	334
5.4.3 结果	334
5.5 $\psi(3770) \rightarrow$ 遍举轻强子末态的寻找	335
5.5.1 事例选择	336
5.5.2 背景	337
5.5.3 $\psi(3770) \rightarrow$ 遍举轻强子末态观测截面和分支比的上限	338
5.5.4 $\psi(3770) \rightarrow f$ 结果讨论	348
5.5.5 寻找 $\psi(3770) \rightarrow K^* \bar{K} + \text{c.c.}$ 衰变过程	348

5.6 $S-D$ 混合角 θ_{mix} 的确定	350
5.7 $\psi(3770)$ 物理研究与 QCD 理论检验及新物理现象的探索	351
参考文献	353
第 6 章 D 介子物理	357
6.1 概述	357
6.2 单标记 $\bar{D}^0$ 和 D^- 介子样本	358
6.2.1 事例选择	359
6.2.2 单标记 $\bar{D}$ 介子总数	359
6.3 D 介子的产生	361
6.3.1 单标记方法测量 $D\bar{D}$ 对的产生截面	361
6.3.2 利用双标记方法测量 $D\bar{D}$ 对的产生截面	366
6.4 纯轻子衰变 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 与衰变常数 f_{D^+}	370
6.4.1 事例选择	371
6.4.2 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 衰变分支比	373
6.4.3 D^+ 介子衰变常数 f_{D^+}	374
6.5 D 介子的半轻子衰变	374
6.5.1 D 介子半轻子衰变与 CKM 矩阵元 $ V_{cs} $ 和 $ V_{cd} $	374
6.5.2 D 介子半轻子衰变中同位旋是否守恒	379
6.5.3 其他遍举半轻子衰变	381
6.5.4 D 介子稀有半轻子衰变过程的寻找	382
6.5.5 D 介子单举半轻子衰变	383
6.5.6 $D^+ \rightarrow e^+ X$ 和 $D^0 \rightarrow e^+ X$	383
6.5.7 $D^+ \rightarrow \mu^+ X$ 和 $D^+ \rightarrow \mu^+ X$	386
6.6 D 介子的强子(非轻子)衰变	389
6.6.1 强子衰变的绝对分支比	389
6.6.2 Cabibbo 压制衰变过程的分支比	390
6.6.3 D 介子单举强子衰变	390
6.7 D 物理研究与标准模型检验及超标准模型物理寻找	394
参考文献	395
第 7 章 R 值测量和 QCD 实验研究	401

7.1 R 值测量	401
7.1.1 R 值的定义	401
7.1.2 R 值对标准模型精确检验的意义	402
7.1.3 在 BES II 上进行 R 值测量	407
7.1.4 事例选择	410
7.1.5 初态辐射修正	413
7.1.6 强子化模型	422
7.1.7 系统误差分析	428
7.2 相关的 QCD 实验研究	432
7.2.1 多重数分布	433
7.2.2 ξ 分布和动量 p 分布	435
7.2.3 形状因子测量	436
7.2.4 重粲共振态参数测量	440
参考文献	444
第 8 章 总结和展望	447
8.1 BES II 重要成果	447
8.2 CLEO-c 和其他有关实验	448
8.3 BEPC II / BES III 重大改造	450
8.3.1 北京正负电子对撞机重大改造工程总体设计	450
8.3.2 BES III	456
8.3.3 BES III 物理目标	501
8.3.4 工程进展	503
参考文献	506
附录 A 粒子物理实验数据的统计分析	508
A.1 参数估计	508
A.1.1 均值和方差的估计	509
A.1.2 极大似然法	510
A.1.3 最小二乘法	515
A.2 区间估计、置信区间和置信上限	519
A.2.1 经典置信区间	519

A.2.2 贝叶斯置信区间	527
A.3 假设检验	530
A.3.1 拟合优度检验	531
A.3.2 信号的统计显著性	533
参考文献	538
附录 B 分波分析及其应用	539
B.1 衰变振幅	540
B.2 几率密度和似然函数	543
B.3 分波分析	545
B.4 应用	546
B.5 讨论	547
参考文献	548