

现代物理基础丛书

83

正电子散射物理

吴奕初 蒋中英 郁伟中 编著



科学出版社

现代物理基础丛书 83

正电子散射物理

吴奕初 蒋中英 郁伟中 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍最基本的正电子和正电子素与原子、分子相互作用过程,正电子和单个原子或者分子的碰撞总截面、各个偏截面,以及共振散射和共振湮没。本书重点介绍正电子散射的基础研究,更多地强调实验技术发展,近十几年取得的成果;另外也专题介绍正电子在天体、玻色-爱因斯坦凝聚、反物质和量子纠缠研究等重要领域的应用进展。

本书对从事原子和分子物理、原子核物理、等离子体物理与化学和正电子物理的科学工作者有重要参考价值,对反物质、天体物理和量子纠缠研究感兴趣的读者也有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

正电子散射物理/吴奕初,蒋中英,郁伟中编著. —北京:科学出版社,2017.9
(现代物理基础丛书;83)

ISBN 978-7-03-054456-8

I. ①正… II. ①吴… ②蒋… ③郁… III. ①正电子-散射-研究
IV. ①O572.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 222029 号

责任编辑:钱 俊/责任校对:杨 然
责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年9月第一次印刷 印张:25

字数:482 000

POD定价:139.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

吴奕初：武汉大学教授，博士生导师。1964年生于福建上杭，1983~1991年就读于北京科技大学(原北京钢铁学院)材料物理系金属物理专业，获学士、硕士和博士学位，1991~1993年南京大学物理系博士后，1993~2002年中山大学物理系副教授，2003年至今武汉大学物理科学与技术学院副教授、教授。1995年1~3月在日本理化学研究所访问研究，2000年11月~2002年8月美国密苏里大学 Research Associate，2008年9月~2009年8月英国巴斯大学访问教授。长期从事正电子物理与材料科学领域研究，主持国家自然科学基金、留学回国人员基金等10余项。在 *PRL*, *PRB* 等重要学术刊物上发表论文120余篇，合作出版《正电子应用谱学》专著1本。

蒋中英：教授，新疆大学、伊犁师范学院硕士生导师。现工作单位伊犁师范学院电子与信息工程学院。1986年毕业于新疆大学物理系物理学专业，2005年6月获得南京大学物理系粒子物理与原子核物理专业博士学位。2005年9月~2007年10月在南京大学化学博士后工作站做博士后。2007年10月~2012年9月在南京大学微结构国家实验室马余强教授课题组做二站博士后。主持国家自然科学基金项目和省部级等项目4项。在 *APL*、*Langmuir* 等学术期刊发表SCI论文10余篇。目前研究方向为基于PET技术，设计和实现正电子同位素纳米颗粒示踪技术和原位治疗。

郁伟中：清华大学物理系教授。1973年和1978年清华大学研究生班研究生，获硕士学位。1979年起从事正电子湮没工作，翻译 *Positron in Solids* (《正电子湮没技术》，科学出版社，1983)，编写《正电子物理及其应用》(科学出版社，2003)。

前 言

正电子是电子的反粒子,是人类最早认识的反物质。正电子在科学和技术上的重要应用取决于对正电子与物质基本相互作用的定量了解,而最基本的正电子与原子、分子相互作用过程是了解这些知识的基础。本书主要叙述正电子、正电子素与气体分子、原子的散射,以及电子的类似散射。散射研究在物理学中是非常重要的,如果没有对散射以及透射、折射等的研究,人类大约还处在一个朦胧的时期,不知道太阳光是由不同颜色组成的,不知道天为什么是蓝的。即使知道了物质中有电子和质子,还以为物质就如一块枣饼,玉米糊(电子群)中夹着几个枣核(质子)。人们对散射的研究是很广泛的,重要的有光、电子、质子、中子的散射等。正电子、正电子素的散射属于比较边缘的科学,了解的人更少些,所以我们很有必要介绍一下。

正电子和正电子素与气体中个别原子、分子的相互作用,正电子和单个原子、分子的碰撞总截面、各个偏截面,正电子和原子、分子的湮没、共振湮没,这些都是国内 30 多年来正电子湮没研究中极少涉及的。国内的正电子研究主要涉及正电子和固体(含有很多原子或者分子)的相互作用,本书中也对两种不同的研究作了比较。本书还涉及国内没有的正电子素束研究。

正电子和原子、分子系统发生碰撞时的实验和理论研究其实已经进行了许多年,一些实验早在半个多世纪以前就已经进行,只是国内除了少量理论研究外没有太多的关注。本书除了要介绍历史上的研究,更要注重现代的研究,但是更偏重于实验研究。在过去的十几年内,国外正电子物理的发展是相当快的,但是国内还缺少相关综合性的评论,因此我们相信本书对该内容的介绍有重要意义,希望本书能对促进国内相关研究的发展起到抛砖引玉的作用。

本书共 10 章,第 1、2 章讲述正电子散射物理基础和实验方法;第 3~5 章涉及正电子散射、正电子湮没及共振散射等正电子与原子、分子相互作用的各种行为;第 6 章专门讲述正电子素散射,包括正电子素的基本性质、束流的产生及各种散射截面的测量;第 7~10 章作为专题讨论正电子在反物质研究、天体、玻色-爱因斯坦凝聚及量子纠缠中的应用及展望。参加编写的还有清华大学物理系王合英副教授以及武汉大学的一些博士研究生和硕士研究生。

本书的出版对从事原子分子物理、原子核物理、等离子体物理与化学、生物医学物理和正电子物理的科学工作者有重要参考价值,也为高等学校相关专业高年级本科生和研究生提供了开阔眼界、增长知识的参考书,对天体物理、反物质和量

子纠缠研究感兴趣的读者也有一定参考价值。由于正电子散射物理是一门发展中的基础学科，并在科学和技术上具有重要的应用背景，涉及面广，内容丰富，加之作者水平有限，故书中不完善之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 正电子散射物理基础	1
1.1 引言	1
1.2 国内外正电子研究历史的简单回顾	2
1.3 电子散射和电子动量谱研究	5
1.4 正电子与正电子湮没	6
1.4.1 正电子	6
1.4.2 正电子素	8
1.4.3 包含正电子的其他束缚态	11
参考文献	12
第 2 章 实验技术和设备	15
2.1 引言	15
2.2 基本的实验技术	15
2.3 慢正电子束技术	18
2.3.1 静电束	18
2.3.2 磁场约束正电子束	21
2.3.3 基于装置的正电子束	22
2.4 截面测量中的设备	22
2.4.1 总截面测量的设备	23
2.4.2 弹性散射偏截面测量的设备	26
2.4.3 正电子素形成偏截面测量的设备	27
2.4.4 激发偏截面测量的设备	27
2.4.5 离化偏截面测量的设备	28
2.4.6 缓冲气体阱基慢正电子束 (阱基束)	29
2.4.7 多室阱基束	31
参考文献	32
第 3 章 正电子散射总截面的测量	35
3.1 神奇的散射现象	35
3.1.1 光散射技术和研究的发展历史	35
3.1.2 电子束散射的研究	37

3.1.3 其他粒子和伽马射线散射的研究	37
3.1.4 正电子和正电子束散射的研究	38
3.2 散射总截面的测量	38
3.2.1 散射总截面的大致测量原则	38
3.2.2 总截面中的理论计算	75
3.2.3 国内对正电子散射的理论研究	76
3.2.4 散射总截面的小结	77
3.3 散射偏截面的计算和测量	78
3.3.1 弹性散射的偏截面	79
3.3.2 正电子湮没偏截面	85
3.3.3 正电子素形成的偏截面	85
3.3.4 激发与离化	92
3.3.5 散射偏截面的简单小结	96
参考文献	98
第 4 章 气体中的正电子湮没	108
4.1 引言	108
4.2 在高密度气体中的实验	109
4.3 阱基正电子束	118
4.4 小分子中的正电子湮没	124
4.4.1 研究分子共振湮没的物理意义	124
4.4.2 有效电子数和实验测量	125
4.4.3 低密度气体平均湮没率 $\langle \lambda_e \rangle$ 和气体密度的关系	131
4.4.4 有效电子数的理论研究	131
4.5 大分子的振动 Feshbach 共振 (VFR) 湮没	137
4.5.1 什么是大分子的振动 Feshbach 共振 (VFR)	137
4.5.2 大分子的振动 Feshbach 共振 (VFR) 湮没	138
参考文献	173
第 5 章 高分辨测量总截面和共振散射	179
5.1 引言	179
5.2 共振散射理论基础	180
5.3 实验设备介绍	182
5.4 实验过程和小角散射的甄别	183
5.5 对简单气体 H_2 , N_2 , CO , Ar 绝对高总截面的实验测量	190
5.5.1 对 H_2 的高总截面的理论计算和测量	190
5.5.2 对惰性气体原子的散射高总截面测量	192

5.5.3 Wigner 尖点问题	197
5.5.4 对复杂气体原子的散射 (高) 总截面测量	206
5.6 总结及展望	208
参考文献	209
第 6 章 正电子素的湮没和散射	212
6.1 正电子素原子的基本研究	212
6.1.1 正电子素湮没与寿命	212
6.1.2 研究正电子素形成的设备	213
6.1.3 基态正电子素的超精细结构 (hfs)	219
6.2 正电子素束散射	224
6.2.1 研究正电子素束散射的意义	224
6.2.2 用正电子 - 气体碰撞产生正电子素束的方法	224
6.2.3 产生正电子素束的设备	228
6.2.4 用正电子素束的散射实验	233
6.2.5 正电子素束和水分子的散射	238
6.2.6 正电子素束和 CO_2 分子的散射	239
6.2.7 正电子素束和其他分子的散射	240
6.3 正电子素的散射理论	240
6.4 总结与展望	245
参考文献	246
第 7 章 基于正电子和反氢的反物质研究进展	251
7.1 引言	251
7.2 反物质研究发展简史	252
7.2.1 正电子的研究	252
7.2.2 反物质 (反氢原子) 的研究	254
7.3 正电子捕获、积累及高强脉冲束的形成技术	257
7.3.1 正电子注入装置	257
7.3.2 正电子的热化、冷却和捕获	258
7.3.3 正电子的压缩	259
7.3.4 正电子的约束和积累	260
7.3.5 高强正电子脉冲束形成技术	262
7.4 正电子素分子的观察	264
7.4.1 单个超短脉冲正电子寿命谱技术	264
7.4.2 高密度正电子素气体实验	266
7.4.3 正电子素分子的实验观察	269

7.5 反氢原子的合成	272
7.5.1 为什么研究反氢?	272
7.5.2 反质子的冷却、捕获	274
7.5.3 混合阱中反氢的合成	275
7.6 CERN 反物质研究的现状	278
7.6.1 ALPHA	278
7.6.2 ATRAP	279
7.6.3 AEGIS	280
7.6.4 ASACUSA	281
7.6.5 ACE	282
7.7 展望	283
7.7.1 CPT 标准模型验证	283
7.7.2 WEP 弱等价原理	284
7.7.3 “反物质”武器和宇航深空探测新能源研究	285
参考文献	286
第 8 章 正电子在天体物理学中的应用伽马谱	289
8.1 天体物理	289
8.2 天文学和天体物理基础知识介绍	290
8.2.1 古代对宇宙、地球的认识	290
8.2.2 地球和太阳的基本数据	292
8.2.3 远处恒星的测距	294
8.2.4 星系的性质	297
8.2.5 宇宙大爆炸学说	299
8.2.6 宇宙大爆炸后物质的演化	299
8.2.7 黑洞	300
8.2.8 探寻反物质天体	301
8.2.9 阿尔法磁谱仪计划	302
8.3 天体中的正电子	303
8.3.1 宇宙正电子的测量	304
8.3.2 正电子测量谱的特点	312
8.3.3 什么是正电子过量	314
8.3.4 天体中正电子的来源	316
8.3.5 正电子在星际介质中的传播	320
8.3.6 多环芳香碳氢化合物	322
8.4 天体中正电子小结	333

参考文献	334
第 9 章 在正电子领域中实现玻色-爱因斯坦凝聚的探索	340
9.1 玻色-爱因斯坦凝聚简介	340
9.2 玻色量子统计理论基础	342
9.3 实现 BEC 所用的技术	345
9.4 BEC 的可能应用	346
9.5 BEC 中 Feshbach 共振效应	347
9.6 正电子和 Ps-BEC	349
9.6.1 正电子、正电子素和 BEC	349
9.6.2 Ps-BEC 研究的里程碑	351
9.6.3 Ps-BEC 研究进展	352
9.6.4 Ps-BEC 应用探索	354
参考文献	357
第 10 章 正电子在量子纠缠中的可能应用	360
10.1 引言	360
10.2 清华大学近代物理实验给我们的启迪	360
10.3 量子纠缠	362
10.3.1 一堆问题	362
10.3.2 量子纠缠的定义	362
10.3.3 量子纠缠是超光速吗?	363
10.3.4 量子纠缠是真正的超远距离作用吗?	363
10.3.5 谁第一个提出量子纠缠的概念?	364
10.3.6 第一篇纠缠论文在哪里?	364
10.4 EPR 验证	368
10.4.1 EPR 佯谬	368
10.4.2 贝尔不等式和 CHSH-Bell 不等式	373
10.4.3 阿斯派克特的最后实验判决	375
10.4.4 量子纠缠的幽灵成像	375
10.4.5 三粒子纠缠和 GHZ 定理	376
10.5 正电子在量子纠缠中的可能应用	378
参考文献	379
附录	381
《现代物理基础丛书》已出版书目	

第1章 正电子散射物理基础

1.1 引言

固体物理学的基本任务是从宏观到微观方面理解固体的各种物理性质,阐明其中的规律,它也是材料科学的基础,是近代科学中不可缺少的一个分支。固体物理学研究对象种类繁多,研究手段包括实验和理论研究,其中实验方法中几乎动用了现代能利用的一切手段,包括很多大型的和超大型的设备。其中仅以电子作为入射粒子就派生出很多方法,让我们回顾一下。

具有一定能量的电子与物体相互作用会发生弹性和非弹性碰撞的过程。如果发生非弹性散射,被散射电子的波长会改变,可以测量到能量变化了的电子流,损失的能量导致物体内部的某些激发效应,其表现形式可以是次级电子、俄歇电子、标识和连续 X 射线、热辐射、紫外和可见光区域的光子等,也可以是等离子体激元的激发,其中俄歇电子谱仪是表面物理的重要研究手段。电子在原子的库仑场中运动,经受非弹性碰撞所损失的能量可以转换成连续 X 射线,称为轫致辐射,所发射的 X 射线是一种重要的分析手段,现在同步辐射装置更是大家熟悉的超大型设备。非弹性电子散射过程所产生的各种辐射可作为成分或结构分析的信号。次级电子和背散射电子是扫描电子显微镜中成像的主要信号,它们可以提供试样表面形貌和元素分布信息,扫描电子显微镜是材料科学中最重要的设备之一。当电子穿透薄膜试样时,非弹性散射所导致的电子能量损失谱也有助于进行试样的成分、形貌和结构分析。我们无法罗列所有可能的现象,但是可以肯定,电子的散射是固体物理中应用最广泛的手段之一。以上是众所周知的物理知识。

物理学的研究在于创新,谈到物理学上的发展必然想到电子的反粒子——正电子 (positron, 用 e^+ 表示), 用正电子代替电子会得到什么样的结果? 正电子散射和正电子湮没方法就是应运而生的实验技术, 由于正电子的产生涉及核物理, 所以归于核技术应用。正电子方法已经在物理、化学、生物、天体中得到应用。在国内, 大约在 20 世纪 70 年代末, 中国科学院的几个单位首先开始研究正电子, 后来很快在—批高校中得到发展, 形成了核物理的一个专业分支。现在国内有的实验设备, 如正电子湮没寿命谱仪、多普勒展宽谱仪, 还有一维角关联设备、二维角关联设备 (国内还没有), 均属于正电子物理的第一类研究, 是一些比较传统的设备, 是 20 世纪国内研究的主要方面, 可以在材料的微缺陷和动量研究中得到应用。国外有一些专著 (不一—列举), 而中译本如清华大学何元金、郁伟中翻译, 熊家炯校, 1983 年

科学出版社出版的《正电子湮没技术》^[1], 以及南京大学滕敏康^[2]主编的《正电子湮没谱学及其应用》简单介绍了正电子湮没方法。由清华大学郁伟中编著, 2003 年科学出版社出版的《正电子物理及其应用》^[3] 是对 20 世纪正电子湮没工作很好的总结。

一批新颖的方法, 主要是慢正电子束 (又称为低能正电子束)、双探头符合多普勒谱仪、动量-寿命联合谱仪等也在国内少数几个单位中得到发展, 属于正电子物理的第二类研究, 利用它们可以研究表面微观缺陷等。连同原来的设备, 这两类研究现在仍然主要用在固体物理和材料科学的研究中。武汉大学王少阶等^[4] 2008 年出版的《应用正电子谱学》更好地总结了最新的进展, 还介绍了正电子在医学中的应用。

本书涉及的电子、正电子和气体的散射是另一类研究, 这是一种有别于国内 30 多年正电子研究的新领域, 是正电子物理和原子物理、分子物理领域的交叉, 我们把它归于正电子物理的第三类研究——正电子散射物理, 就是低能正电子束 (或者正电子素束) 和气体原子、分子的碰撞散射, 属于基础物理研究。

由于对设备的要求特别高, 国外也仅有少数单位开展正电子散射物理的研究, 这也是我们把它归于第三类研究的原因。由于实验技术的限制, 很长一段时间国内并不具有该领域研究的实验基础。现在随着国内少数几个单位在慢正电子束设备方面的研究进展, 具备了一定的条件, 如中国科学院高能物理研究所、武汉大学和中国科学技术大学已经进口了有关设备, 这些设备可以加强慢正电子束研究, 而武汉大学也有计划开展正电子散射这种新的研究。但是文献^[3] 没有涉及正电子散射的内容, 文献^[4] 涉及正电子和气体相互作用的内容也不多, 所以我们希望介绍一下正电子第三类研究的最新内容, 以利于读者了解更多国外的研究状况, 也希望国内的正电子研究能进入一个新的高度。

关于正电子研究领域还有大家熟知的正负电子对撞机, 这属于高能物理和基本粒子的领域, 正电子断层照相术 (positron emission tomography, PET) 属于医学领域, 都不在我们讨论的范围之内。此外, 还有反物质和反氢研究^[5]、湮没伽马光子激光以及正电子在天体中的应用等, 应该属于正电子物理的第四类研究, 因为对实验设备的要求更高, 我们将以专题介绍正电子在反物质研究、天体、玻色-爱因斯坦凝聚 (Bose-Einstein condensation, BEC) 及量子纠缠中的应用及展望。在 2015 年 9 月由武汉大学主办的“第 17 届国际正电子会议”^[6] 上, 有比较多的作者涉及正电子等离子体的内容, 我们只作简单介绍。

1.2 国内外正电子研究历史的简单回顾

正电子从预言到被发现是 20 世纪物理学历史上相对论量子力学理论得到

成功应用的范例之一。正电子研究的历史应该从 1928 年英国理论物理学家狄拉克 (Dirac) 开创了相对论量子力学, 到 1930 年狄拉克^[7] 发展了他的电子理论为起点, 他认为静止质量为 m 的粒子, 相对于它的线性动量为 p 的相对论波动方程的解为

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (1.2.1)$$

其中, E 为总能量。开方后 E 会出现一个负的能量, 他认为这个负能解是有实际物理意义的。为此他对负能量的电子态假设了一个“电子海”, 负能量在 $-mc^2$ 到 $-\infty$ 之间。假设负能量的电子态已经被电子完全占据, 根据泡利不相容原理, 它是不能被观察到的。但是如果电子海中出现一个空缺, 即相当于出现了一个带正电荷的粒子, 它应该有正的静止质量, 即使不能计算它的库仑能的修正值, 但粒子应该是存在的。一开始, 狄拉克认为是“质子”, 但很快认识到不能看作质子, 他敏锐地意识到他的理论实际上可以预言一种新粒子的存在, 这种粒子具有和电子一样的静止质量, 但带相反的电荷, 这就是正电子。

1932 年, 安德森 (Anderson)^[8] 在研究宇宙射线用的云室中发现了正电子, 不久就得到了 Blackett 等^[9] 的证实, 他们还观察到正负电子对产物的现象。接着, 人们开始考虑正电子在电子的环境中的各种湮没过程, 包括无辐射的、单 γ 射线的, 但主要是 2γ 射线的湮没, 正负电子对产生的理论也同时得到了发展^[10]。

关于对正电子的预言、正电子被发现, 在文献 [3]、[11] 中已经有详细的描述, 我们不再复述。作为 20 世纪物理学发展的里程碑, 关于“电子海”的狄拉克理论现在已被普遍认为是粒子物理基础的不可分割的一部分。然而它曾有过一段难以被人们接受的时期。是 1932 年正电子的发现, 以及随后对于“电子对”产生和湮没过程的理解, 最终扭转了对它不信任的潮流。我们简要回顾这一段历史, 主要介绍中国学者赵忠尧在正电子被发现前后所作的贡献, 以激励年轻的研究人员, 也是对赵先生的缅怀, 主要源于文献 [12]、[13]。

在比 1933 年更早的几年内, “电子对”的产生和湮没过程实际上已经在实验上被赵忠尧发现了, 但未能从理论上得到理解, 这些早期发现在如下文章中报道^[14-17]:

赵忠尧, 1902 年生于中国浙江省, 1925 年毕业于东南大学化学系, 后来担任清华大学叶企孙先生的助教, 1927 年夏天, 赵忠尧来到美国加州理工学院成为密立根 (Millikan) 的研究生, 密立根安排赵测量硬 γ 射线在不同物质中的吸收系数以检验克莱因-仁科 (Klein-Nishina) 公式。当时能产生 γ 射线的主要是 TC'' 源, 即天然的 ^{208}Tl 同位素源, 产生 2.6MeV 的 γ 射线。赵忠尧研究 ThC'' 的射线被铝和铅散射, 发现对铝的散射遵循克莱因-仁科公式, 但是对铅有额外的辐射, 发现一些射线的能量和强度与散射角 (从 22.5° 到 135°) 无关, 就是说它们不是由散射过程引起的, 赵测量了额外射线的波长为 $0.0225\text{\AA}$, 即相应于 540keV 能量。1929 年

将近年底的时候赵完成了实验,他得到结论:对于轻元素来说,实验结果符合克莱因-仁科公式,而对于重元素(例如铅),实验测得的吸收系数值大于公式给定值。密立根起初不相信赵的结果,因而赵的文章被拖延了数月没有公开发表。

为了更多地了解辐射在物质上的吸收机制,紧接着第一个实验,赵开始进行一个新的实验来研究散射辐射的强度和角分布。这是一个困难的实验,原因在于散射辐射比背景更弱,实验结果发表于 1930 年^[14]。在这以后一年,其他实验组才开始致力于研究散射辐射。德国柏林的梅特纳(Meitner)等^[16]也注意到了这种由 ThC'' 辐射引起的额外辐射;1932 年,英国剑桥的格兰(Gray)等^[17]也进行了类似的实验,得到光子的能量为 0.5MeV 和 1MeV。Gray 等的工作没有赵的精度高,他们没有研究角度分布,而且他们认为是核激发,这些后来的工作做得不漂亮且没有结论,结果引起更多的争议,分散了理论家的注意,因而很不幸地减小了赵的实验结果的影响力。

之后又有一些人^[9,18]不断研究散射实验,意识到这和产生了电子-正电子对有关。1933 年,Blackett 等^[9]意识到这就是“正”的电子又和电子重新结合,由于正电子湮没,正电子又消失了,再次辐射的能量应该和湮没谱所期望的能量在一个量级上。他们估计了在水中按指数衰减,平均寿命 $3.6 \times 10^{-10}\text{s}$ 。Oppenheimer 等^[18]认为电子-正电子对会失去几乎所有的动能,如果发射两个伽马光子,能量应该为 0.5MeV。他们对 Gray 等^[17]看到的 1MeV 能量是什么并不清楚。

1931~1932 年,反常吸收和附加散射线吸引着理论物理学家极大的注意,并激发着进一步的重要的实验研究,为了评估赵的文章的作用,我们在这里引述安德森在 1983 年的一篇文章里写的一段文字:

“我在加州理工学院做研究生论文的工作是用威耳逊云室研究 X 射线在各种不同气体里产生的光电子的空间分布。在我做这项工作的 1927~1930 年间,赵忠尧博士就在我隔壁的屋子里工作。他是用验电器测量 ThC'' 产生的 γ 射线的吸收和散射。他的发现引起我很大的兴趣。当时人们普遍相信,来自 ThC'' 的 2.6MeV 的“高能” γ 射线的吸收,绝大多数应是按照克莱因-仁科公式表达的康普顿散射碰撞。但赵博士的结果清楚地表明,这种吸收和散射显著地大于克莱因-仁科公式的计算。由于验电器很难给出细致的信息,所以他的实验不可能对上述反常效应作出深入的解释。我建议的实验是利用工作在磁场中的云雾室来研究 $\text{ThC}''\gamma$ 射线与物质的作用,即观察插入云雾室中的薄铅板上产生的次级电子,来测量它们的能量分布。从而研究和了解在赵的实验结果中还反映着哪些更深刻的意义。”

安德森和奥恰里尼(Occhialini)都强调,早于他们工作的赵的工作确实激发了他们所完成的革命性的研究。这一研究转而加深了物理学家对量子电动力学的理解,而他们并没有提及当时与之相关的赵的竞争者的工作。

赵忠尧在美国和安德森是同学,赵忠尧研究的硬 γ 射线的异常吸收,实际上

是先产生了电子-正电子对, 然后是电子-正电子湮没。Goworek^[12] 对这段历史作了详细的综述。赵忠尧回国以后在清华大学继续他在美国的研究, 这是国内最早的正电子研究。赵忠尧后来在中国科学院高能物理研究所工作, 他参加了 1981 年在苏州召开的全国第一届正电子湮没会议。

清华大学的张礼教授也在 20 世纪 50 年代对正电子理论方面有很好研究: “关于正电子在多电子系统中的定态和湮没问题”^[19], 直到现在仍然在正电子散射物理中被人引用^[20], 得到国际上专家的好评。另外, 现在在清华大学高等研究院的诺贝尔奖获得者杨振宁先生在 20 世纪 50 年代对正电子理论方面也有研究。

20 世纪 70 年代, 国内的正电子研究比较少, 主要在中国科学院系统内进行, 如高能物理研究所、北京原子能研究所、上海原子核研究所 (现改名为上海应用物理研究所)、沈阳金属研究所等, 其研究设备一般也是自力更生研制的。1980 年, 清华大学在高能物理研究所张天保先生的帮助下从美国第一次进口了整套的正电子湮没寿命谱和多普勒设备, 正电子湮没的研究在武汉大学、南京大学、兰州大学等很多高校内也开始进行, 中国科学技术大学自制了全国第一台一维角关联装置和第一台慢正电子束。随着 20 世纪 80 年代两次正电子寿命谱仪的引进, 正电子作为大学近代物理教学实验得到发展, 一部分设备用在科研上, 正电子湮没研究得到普及。现在国内正电子湮没在研究深度上已经得到很大发展。

1.3 电子散射和电子动量谱研究

关于电子散射和电子动量的研究比正电子研究更普遍, 我们无法详细叙述, 只举一个例子, 如清华大学宁传刚教授等^[21] 正在研究改善的第三代电子动量谱仪。电子动量谱学 (electron momentum spectroscopy, EMS) 的基本过程是在特定的运动学条件下电子与原子分子碰撞的 (e, 2e) 电离实验^[22-25]。在 (e, 2e) 反应中, 具有一定能量的 (keV 量级的) 电子与靶碰撞, 入射电子被散射, 同时敲出一个电子使靶单电离。因此, 在一个 (e, 2e) 事件中将会有有一个入射电子和两个出射电子, 这就是 (e, 2e) 名称的来历。

通过对 (e, 2e) 反应的运动学完备测量, 不仅能获得结合能的信息, 而且能获得各个轨道电子的动量分布。这也是电子动量谱仪和光电子谱仪、正电子湮没谱仪相比的独特之处。光电子谱仪虽然能量分辨率很高, 但是它不能直接提供电子波函数分布信息, 而正电子湮没谱仪正好相反, 只能粗糙地得到电子波函数分布的积分信息, 而且得不到电子结合能的大小^[19]。提出前线轨道理论而获得 1981 年诺贝尔化学奖的日本量子化学家福井谦一曾经说过“现阶段没有人能够从实验上得到轨道的形状。但到目前为止, 也没有人能够断言这是完全不可能的, 我们只要能够从实验上获得任何有关最高占据轨道 (HOMO) 和最低占据轨道 (LUMO) 形状的知

识,都会对化学的发展产生深远的影响”^[25]。从实验上获取电子轨道形状的知识,是科学家长期以来的一个梦想,电子动量谱学终于将这一愿望变成了现实^[22]。目前,随着高分辨高效率的第三代电子动量谱仪的建成^[21],电子动量谱学在研究电子关联、相对论效应、碰撞动力学等方面都取得很有意义的结果^[26-29],帮助人们更好地认识了复杂的多体问题。人们也希望正电子散射研究能够和更普遍的电子散射相呼应。

1.4 正电子与正电子湮没

关于正电子和正电子湮没、正电子素 (positronium, Ps), 文献 [1]~[4] 已经有详细介绍 (注: 早期部分书及文献中, “positronium” 也翻译为 “电子偶数”, 然而, 随着正电子研究的深入, 出现正电子偶素、负电子偶素, 两者没有本质的差别, 因此, 本书统一使用正电子素, 以免引起混淆), 我们在这里仅对没有涉及的部分作一些补充, 主要来源于文献 [30]。

1.4.1 正电子

正电子具有 $1/2$ 的本征自旋, 它是一种费米子, 根据 CPT 定理, 这种态所遵循的基本的物理定律是不变的。在电荷共轭 (C)、宇称 (P)、时间反演 (T) 的共同作用下, 它的质量、寿命和磁旋比是与电子相等的, 它和电子有相同的电荷量, 但符号相反。到目前为至, CPT 定理还没有例外。

包括捕获粒子在内的实验显示电子和正电子的磁旋比在 $2/10^{12}$ 范围内是相等的^[31]。通过在氢和正电子素的能谱中分析荷质比和里德伯常量得到电子和正电子的电荷量在 $4/10^8$ 范围内是相等的^[32], 通过限制中性原子物质的方法可以得到更严格的 (虽然是间接的) 极限 $1/10^{18}$, 因为除非两种粒子的电荷能精确地平衡, 否则它们对极化原子会产生一个净电荷, 现在可以认为电子和正电子贡献给真空极化原子的是相等数目的电荷^[33]。

目前粒子物理的理论预言在真空中正电子是稳定粒子, 实验室的证据也支持这个理论, 实验中单个被捕获的正电子已经存在了三个月^[34], 如果 CPT 定理是适用的, 本征正电子寿命可以大于 4×10^{23} 年, 这也是电子稳定性的实验极限^[34]。

当一个正电子遇到了正常的物质, 它最终会在一个寿命期间内和一个电子发生湮没, 这个寿命反比于局域电子密度, 在凝聚态物质中, 典型的寿命值小于 500ps, 在气体中, 即使在很高的气体密度下, 这个数值可以认为是低值极限, 在原子或者分子中, 正电子形成一种束缚态, 也只能认为是一种寿命稍长的不稳定的基本粒子。

正电子和一个电子的湮没将遵循一定的机理, 根据无辐射过程的费曼图, 结果