



正电子湮没技术

〔芬兰〕P. 豪托贾维 主编

科学出版社

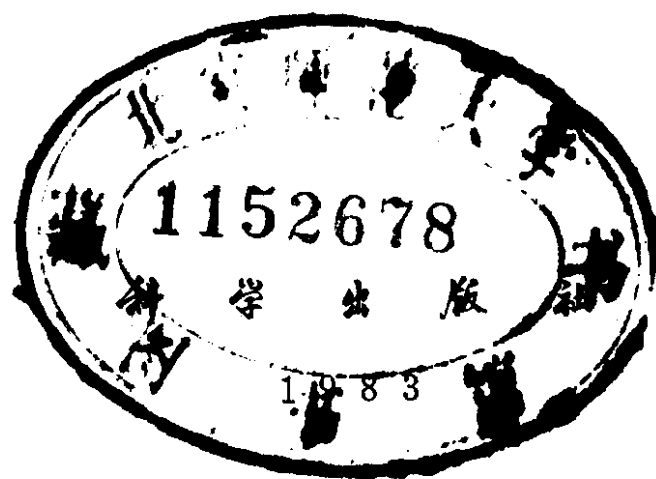
正电子湮没技术

〔芬兰〕P. 豪托贾维 主编

何元金 郁伟中 译

熊家炯 校

1991/168/07



内 容 简 介

正电子湮没技术是近年来迅速发展起来的一种研究物质微观结构的实验技术。利用正电子可以获得有关凝聚物质内部的电子结构、缺陷与相变等信息。由于测量设备比较简单,灵敏度较高,这种技术正在成为固体物理、金属物理、半导体物理、非晶态物理、表面物理以及化学反应动力学等领域的新型探测手段,并有着广阔的发展前途。本书系统地阐述了正电子湮没技术的物理原理和基本概念,特别对七十年代以来将正电子技术应用于固体物理的研究进展进行了综合评述。

本书可作为正电子湮没技术的入门书,也可供从事核技术应用的工作者和应用正电子技术研究物理、化学和生物学以及材料科学的工作者参考。

P. Hautojärvi(Editor)

POSITRONS IN SOLIDS

Springer-Verlag, 1979

正电子湮没技术

〔芬兰〕P. 豪托贾维 主编

何元金 郁伟中 译

熊家炯 校

责任编辑 王鸣阳

科学出版社出版

·北京朝阳门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年10月第一版 开本: 787×1092 1/32

1983年10月第一次印刷 印张: 10 7/8

印数: 000—1,200 字数: 235,000

统一书号: 13.31·2402

本社书号: 3280·13-3

定价: 1.70元

译者前言

利用辐射或微观粒子与物质的相互作用，可以研究凝聚态物质内部的原子和电子结构，获得有关微观世界的信息。这些辐射或微观粒子有X射线、电子、正电子、质子和中子……等。正电子湮没技术（PAT）就是利用正电子与物质的相互作用来获得有关凝聚物质内部微观结构和缺陷的信息的一种实验技术。由于正电子对原子尺度的缺陷（如空位、空位团、位错、微空洞和多种色心）十分敏感，正电子湮没技术可以弥补其他实验技术的不足，而用于研究固体中低浓度的原子缺陷。这是正电子湮没技术的一个显著特点。

正电子湮没技术的另一个特点是应用范围极其广泛，几乎可用于研究一切形态的凝聚物质，其中包括金属、离子化合物、共价绝缘体化合物、半导体和分子化合物，也包括固体单晶、多晶、非晶态、液晶和生物膜。在材料科学中，正电子湮没技术可用于研究各种相变，如金属及合金中的马氏体相变、有序-无序转变、G.P. 区的形成和沉淀以及晶态-非晶态转变，绝缘体化合物中的顺电-铁电相变，以及液晶和生物膜中的相变。在固体理论方面，早就采用正电子湮没技术研究金属及合金中的费密面和电子动量密度。近年来由于采用二维角关联装置，更极大地提高了这种技术的精度和效率。此外，近年来慢正电子技术也一直在稳步发展，并已开始进入实用阶段。由于慢正电子的入射动能很低，可用于研究固体纯真表面的电子态和结构缺陷，这种技术正在

成为表面物理学研究的一种新的重要手段。正电子湮没技术在化学中也有广阔的应用前景。在医学中，正电子照相术也正在趋于实用化。

目前正电子湮没实验方法尚在不断改进，新的应用领域也在不断扩展，由于这种状况，目前关于正电子物理学的专著尚极缺乏。本书系统阐述了正电子物理学的基本原理，概括了七十年代来正电子湮没方法在实验和理论两方面的最新发展，并指出了它的发展方向，是一本很好的入门书。为此，我们将本书译出，以满足国内读者的需要。我们认为，本书不仅可用作正电子湮没技术工作者的入门书，对于研究原子核技术应用的工作者，以及应用这一技术的固体物理、金属物理、半导体物理、非晶态物理、表面物理、材料科学以及化学反应动力学等领域的工作者，无疑也有很好的参考价值。本书原名《固体中的正电子》，为了更符合内容，中译本改为《正电子湮没技术》。在翻译过程中，对正电子湮没方面的术语，我们尽可能地参照《英汉物理学词汇》中的相近译名和国内习惯加以翻译。原书中有不少疏忽或打印错误，凡发现的都已改正，一般未加译注。译文不妥之处，恳望读者批评指正。

在本书译校过程中，曹必松同志提供了许多宝贵意见，特致谢意。

译 者

原 序

快速运动的正电子射入凝聚物质，在与周围环境达到热平衡以后就会湮没。这种正电子与物质的相互作用服从普通量子力学的定律，只有在产生高能光子的湮没过程中才涉及场论方法和反粒子的性质。用核谱学方法监测湮没辐射可提供关于电子-正电子系统的有用信息，而这些信息可以直接与介质的电子结构联系起来。由于正电子是带正电荷的电子，所以它在物质中的行为是固体物理学家和原子物理学家们特别感兴趣的。正电子的质量很小，这使得正电子确实是一种量子力学的粒子，而且完全不同于任何其它粒子和原子。正电子物理学早在二十五年前就开始形成了，但是，正电子与物质相互作用的新特点的发现，一直使人们对这一领域始终保持着兴趣，而且积极性越来越大。今天，正电子湮没方法正在逐渐成为实验物理学的一种常规手段。

正电子湮没的一个突出特点，是它能够应用于各种不同的领域。除了本书所讨论的固体物理学外，它在原子物理学中也有着强大的活力，而在化学的应用中，则有正电子素化学这一传统名称。关于这些，现已有以综述性专著和会议录形式出版的大量早期文献。然而，正电子湮没的近代发展和成就，特别是在动量密度和缺陷研究方面的进展，已经迅速地引起了传统正电子物理学以外的更广泛科学界的兴趣，而这正是我们要组织编写本书的理由。

第一章(P. Hautojärvi 与 A. Vehanen 执笔)是为不熟

悉正电子湮没的读者写的引论，简短地叙述了湮没过程和常用的实验技术，并且十分简要地谈到了正电子研究的一些最新课题。

第二章(P. E. Mijnarends 执笔)介绍以 2γ 湮没辐射角关联为手段对电子动量密度的研究，讨论了当前应用独立粒子理论的现状，介绍了二维探测器几何学的新近发展，这种二维探测器几何学大大提高了正电子方法的分辨本领及效率。这一章还对金属和合金方面的最新成果作了全面评述。

正电子对于金属中晶体不完整性的高度敏感性，是通过正电子捕获效应反映出来的。这使得正电子湮没方法能够提供关于固体中点阵缺陷的浓度、位形和内部结构的独一无二的信息。捕获效应发现之后不过几年，正电子方法就被证明是一种新型的研究微观世界的工具，利用这种工具已经在点阵缺陷物理学方面取得了重大的成就。新的实验结果和理论解释方面的进展，则分别在第三章(R. N. West 执笔)和第四章(R. M. Nieminen 与 M. J. Manninen 执笔)中加以讨论。

第五章(A. Dupasquier 执笔)讨论了离子固体，以作为正电子在非金属中应用的一个例子。本章中对卤化碱中复杂的湮没特性的来源提供了一个解答，还评述了正电子与各类缺陷中心的相互作用。

我要借此机会向本书的作者们表示谢忱，他们不仅为本书撰写了各章，而且事实上是他们共同创作了这本书。融洽的合作关系使得编辑工作极少。此外，我还要特别感谢尼米南(R. Nieminen)先生，他的批评和建议大大改进了本书的内容。

P. 豪托贾维

1978年12月于赫尔辛基

目 录

第一章 正电子湮没引论	1
1.1 正电子方法	2
1.2 自由正电子的湮没	4
1.3 实验技术	5
1.3.1 寿命测量	5
1.3.2 角关联测量	8
1.3.3 线形测量	10
1.3.4 寿命和动量之间的关联	13
1.4 正电子素的形成和湮没	13
1.5 正电子研究的课题	16
1.5.1 金属	16
1.5.2 金属缺陷	17
1.5.3 离子晶体	18
1.5.4 慢正电子和正电子素	19
1.5.5 气体和低温现象	21
1.5.6 分子固体	23
1.5.7 正电子素化学	25
1.6 小结	27
参考文献	28
第二章 金属与合金中的电子动量密度	31
2.1 理论	32
2.1.1 动量密度	33
2.1.2 多体效应	37

2.1.3	正电子热化、有效质量和其它热效应	42
a)	热化	42
b)	有效质量	43
c)	其它热效应	44
2.2	波函数	45
2.2.1	正电子波函数	45
2.2.2	电子能带结构和波函数	49
a)	OPW 法	50
b)	APW 法	52
c)	KKR 法及其有关方法	55
d)	其它方法	57
2.2.3	$A_f(p, k)$ 的对称性质	57
a)	径向特性	58
b)	方向对称性	59
2.3	实验技术	59
2.3.1	2γ 角关联测量	60
2.3.2	旋转样品法	64
2.3.3	多普勒增宽	64
2.3.4	样品制备	65
2.3.5	修正	66
a)	“束分布”修正	66
b)	衍射效应	67
c)	角分辨率及正电子热运动	67
d)	有限缝长	68
2.3.6	分析	68
2.4	关于金属中动量密度的工作	74
2.4.1	碱金属	75
2.4.2	其它简单金属	78
2.4.3	定向石墨、金刚石、硅和锗	83
2.4.4	贵金属	86
2.4.5	过渡金属与稀土金属	90
2.5	无序合金和有序金属化合物	96

2.5.1	无序合金	96
2.5.2	金属化合物	103
2.6	结论	104
	参考文献	105
第三章	金属中点阵缺陷的正电子研究	121
3.1	缺陷研究中的湮没参数	122
3.1.1	缺陷捕获现象及其影响	122
3.1.2	正电子态和寿命谱	124
3.1.3	动量密度参数	130
3.2	平衡态中的单空位	134
3.2.1	温度效应的初步处理方法	134
3.2.2	先兆空位效应	136
3.2.3	其它复杂性	139
3.2.4	空位形成焓的测量	146
3.2.5	特征温度或阈温度	154
3.2.6	压力实验	159
3.3	非平衡研究	160
3.3.1	“多缺陷”问题	160
3.3.2	形变、淬火和辐照实验	163
3.3.3	退火研究	166
3.3.4	空洞的正电子研究	170
3.4	合金中缺陷的研究	173
3.4.1	缺陷和杂质问题	173
3.4.2	空位研究	176
3.4.3	相变和边界效应	180
3.5	液态金属和非晶态金属	183
	参考文献	186
第四章	非完整固体中的正电子：理论	198
4.1	正电子分布、迁移和捕获	199

4.1.1	正电子的入射、减速和热化	199
4.1.2	迁移和扩散	200
4.1.3	正电子在固体中的分布	203
4.1.4	纯金属中的湮没特性与电子-正电子关联	207
4.1.5	温度对湮没特性的影响	213
4.1.6	正电子被缺陷捕获	215
4.1.7	自陷	220
4.2	金属中的缺陷	222
4.2.1	缺陷的电子结构	222
4.2.2	正电子-缺陷相互作用	227
4.2.3	湮没特性	233
4.2.4	应用	235
a)	空位	236
b)	位错	242
c)	杂质与合金	245
d)	空位团	250
e)	表面	253
4.3	非金属	258
4.4	结论	259
	参考文献	259
第五章 离子固体中的正电子		267
5.1	实验方法	268
5.1.1	标准实验技术	268
5.1.2	特殊实验技术	269
a)	二参数年龄-动量测量	269
b)	磁猝灭测量	270
5.1.3	实验的困难	272
a)	多成分寿命谱的分析	273
b)	多成分动量分布的分析	275
c)	源和表面对寿命谱的贡献	275
d)	正电子源造成的辐照损伤	276

5.2	卤化碱的湮没特性	277
5.2.1	室温下低缺陷浓度晶体的测量	277
a)	寿命谱	277
b)	角关联曲线	280
c)	多普勒增宽湮没线形	283
d)	三量子湮没	284
5.2.2	温度效应	284
5.2.3	高缺陷浓度晶体中的湮没	286
a)	热缺陷的产生	288
b)	热淬火	289
c)	增色过程	291
d)	$F \rightarrow F^-$ 转变	293
e)	F 心的聚集	294
f)	二价杂质掺杂	294
g)	电离辐射产生缺陷	295
h)	范性形变	299
i)	固溶体	299
5.2.4	磁场效应	300
a)	低缺陷浓度晶体	300
b)	增色晶体	302
c)	掺杂晶体	303
5.3	卤化碱中的正电子态	304
5.3.1	本征态	305
a)	完整点阵中的近自由正电子	305
b)	完整晶体中的准正电子素	308
5.3.2	湮没中心	312
a)	cA 心	313
b)	$^aA^+$ 心	314
c)	$^cA^-$ 心和 $^cA^-(Ca^{2+})$ 心	315
d)	aA 心	315
e)	$^a_2A^+$ 心和 $^a_3A^+$ 心	316
5.3.3	态形成动力学	316
a)	减速	317

b) 在完整晶体中准正电子素的形成	318
c) A 心的形成	319
5.4 其它离子化合物中的正电子湮没	321
5.4.1 碱金属和碱土金属的氢化物	321
5.4.2 铜、银、金、铊的卤化物	322
5.4.3 碱土金属卤化物	323
5.4.4 碱土金属氧化物	324
参考文献	325
补充参考文献	331

第一章 正电子湮没引论

正电子物理学研究低能正电子与物质的相互作用。关于正电子的存在，早在四十多年以前就为狄拉克所预言，并为安德森所证实。正电子物理学的诞生及其初期的迅速发展在五十年代初就出现了，当时人们已经认识到，这种量子电动力学湮没过程的特性几乎完全取决于物质中正电子-电子体系的状态。图1.1中给出了每年发表的论文数目^(1.1)。如图所示，在过去十年中，这一领域已开始成长并迅速发展起来。迅速发展的原因在于，人们已注意到正电子能够提供凝聚物质物理学许多问题的独一无二的信息。今天商业上已能提供不太昂贵的实验设备，这对正电子研究的普及也起了一定的作用。

到目前为止，已经召开过几次关于正电子湮没研究的国际会议。

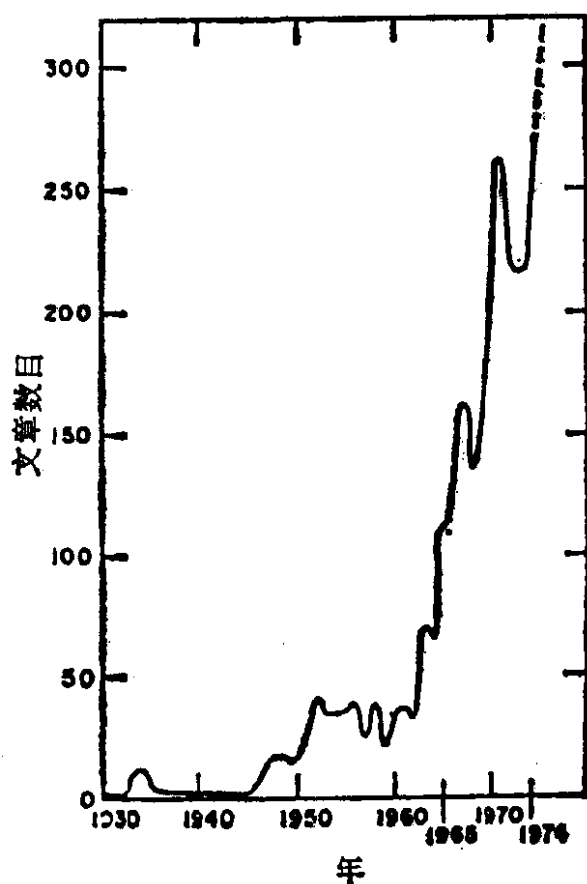


图1.1 每年发表的关于低能正电子和正电子素研究的论文数目^(1.1)。

第一次国际会议于1965年在美国底特律举行^[1.2]。1969年在法国萨克莱组织了一次欧洲会议。第二次国际会议于1971年在加拿大金斯敦召开^[1.3]，第三次于1973年在芬兰奥塔涅米举行^[1.4]，第四次于1976年在丹麦赫尔辛格^[1.5]召开。第五次于1979年在日本山中湖举行，而第六次国际会议已预定于1982年在美国召开。

用正电子技术研究物质有许多优点。它提供了一种非破坏性的研究方法，这是因为信息是由贯穿的湮没辐射带出物质的。它不需要特殊制备的样品，并且在某些应用中，它还可能做现场研究，例如，能在升高温度的情况下研究动力学现象。已经发表过一些关于用正电子研究凝聚态物质的评论文章和文献综述^[1.1-1.8]。

本章是为不熟悉正电子湮没的读者提供的一些入门材料。节1.1介绍正电子方法的原理。节1.2讨论自由正电子的湮没过程。在节1.3中，讨论用于测量正电子寿命、 2γ 湮没辐射角关联和湮没线形状的常用测量系统以及一些例子。节1.4讨论正电子素的形成及其对湮没特性的影响。节1.5简要地讨论正电子研究的某些新近的课题。节1.6是简短的小结。

1.1 正电子方法

当高能正电子从放射源射到凝聚态物质中时，它们首先在约为 1ps^* 那样很短时间内减速到热能。注入的平均射程在

* ps是 picosecond 的缩写，意为 10^{-12} 秒，旧译为微微秒，按1979年我国新规定应译为皮可秒或皮秒。因为它是正电子湮没中的常用单位，故不译出。类似的还有ns(10^{-9} 秒)，即纳秒(旧译为毫微秒)。下面不再说明。

——译者

10到 1000 μm 之间变化，这就保证了正电子可以到达样品材料的体内。正电子在热平衡态存在一段时间后，最终与周围介质中的一个电子湮没，在大多数情况下变成为两个 511keV 的 γ 量子。正电子的平均寿命是表示每种材料的一个特征量，它在 100 到 500ps 之间变化。上述这种图象在分子介质中会发生改变，因为在分子介质中，正电子在减速过程中可以形成正电子素。不过，这种现象将在节 1.4 中单独讨论。

图 1.2 是正电子湮没实验的示意图，这里采用的是最常用的放射性同位素 ^{22}Na 。在射出正电子以后的几个皮可秒内， ^{22}Na 核还放射出一个能量为 1.28MeV 的光子，可用它作为起始信号。这样，根据起始 γ 量子 and 湮没 γ 量子之间的时间延迟，就能够测量正电子的寿命。湮没的电子-正电子对的动量转交给了湮没 γ 量子，这个动量可以通过测量两个 511keV 光子的方向相对于共直线的小偏角检测出来。电子-正电子对的运动还会造成湮没辐射的多普勒能移，对其中一个光子进行精确的能量测量就可以知道这种能移。

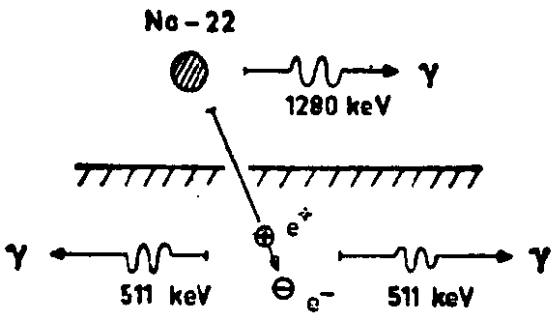


图1.2 正电子实验。从如 ^{22}Na 那样的放射源射出的正电子在样品材料中湮没。正电子寿命可由起始 γ (1.28 MeV) 开始到发出两个湮没量子为止之间的时间延迟来确定。电子-正电子对的动量可由两个511keV 量子间的角度偏离或由湮没辐射能量的多普勒移动来测定。

1.2 自由正电子的湮没

正电子-电子湮没是一个相对论性过程，在此过程中，粒子质量转变成电磁能量，即转变成湮没光子。由量子电动力学的不变性可以导出几条选择定则。单 γ 湮没只有当存在着能吸收反冲动量的第三个粒子时才是可能的，它的相对几率可以忽略。又因为发生三 γ 湮没的按自旋平均的截面是发生二 γ 湮没的截面的0.27%，所以主要的过程是二 γ 湮没。三 γ 湮没仅在象正正电子素那样的自旋相关态中才是重要的，那时，选择定则禁止二量子过程发生。这种情况在节1.4中讨论。

根据狄拉克^[1·10]导出的二 γ 湮没截面的非相对论性极限，我们得到单位时间的湮没几率或湮没率：

$$\lambda = \pi r_0^2 c n_e, \quad (1.1)$$

它与正电子的速度无关。式中 r_0 是经典电子半径， c 是光速，而 n_e 是正电子所在处的电子密度。湮没率 λ 的倒数是平均寿命 τ ，通过测量 λ ，我们就能直接求得正电子所遇到的电子密度 n_e 。这样一来，正电子就能作为检测介质中电子密度的一种检验粒子。然而，因为正电子与电子电荷相反，它们之间存在着很强的库仑吸引，结果，由于对正电子的库仑屏蔽作用，电子密度 n_e 比它原来在物质中的平衡值增大了。计算这种正电子-电子对的关联是一个复杂的多体问题，只有在电子气体的情况下才对它了解得比较清楚。

湮没对的动能一般为几个电子伏。在它们的质心坐标系中，光子能量精确地为 $m_0 c^2 = 511 \text{ keV}$ ，并且两个光子严格地向相反方向运动。在实验室坐标系中，由于湮没对的动量不为

• • •