

正电子湮没谱学技术及应用



报告人：杜海燕
束流扩展应用组
2025年8月15日

正电子简介

- 正电子，基本粒子的一种，带正电荷，质量和电子相等，是电子的反粒子。

	正电子 (e^+)	电子 (e^-)
静止质量	$9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
电荷	$-e$	$-e$
自旋	$1/2 \hbar$	$1/2 \hbar$
磁矩	$-\mu_e$	$+\mu_e$

- 1928年，狄拉克在求解电子的相对论运动方程时，得出具有动量P的自由电子的能量本征值E具有正负两种 $E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$ ，预言了正电子的存在
- 1930年，赵忠尧先生首次从实验上观察到了正电子的湮没辐射
- 1932年，安德森使用威尔逊云室观测到了宇宙射线中的正电子轨迹，证实了正电子的存在，成为人类发现的第一个反粒子

正电子科学

基础物理：

- 反物质与对称性
- 量子电动力学
- 宇宙学与高能天体物理
- 超出标准模型-新物理探索

应用：

- 材料科学领域（微观结构和缺陷）
- 医学成像PET
- 核能工程反应堆状态检测
- 反物质能源

正电子源（束流）：

- 同位素、加速器、反应堆正电子源
- 慢化、脉冲化、捕获、存储等技术

正电子能量-应用对映

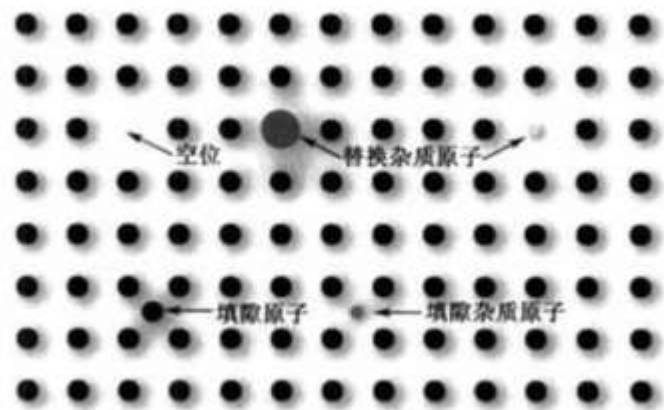
正电子能量	应用
eV量级	量子力学基础物理和材料表面特性
几百keV 以内	材料微观缺陷表征
GeV-几十GeV	研究核子结构
几百GeV	研究超出标准模型的新物理

表 1.1 几种典型物质的能量密度

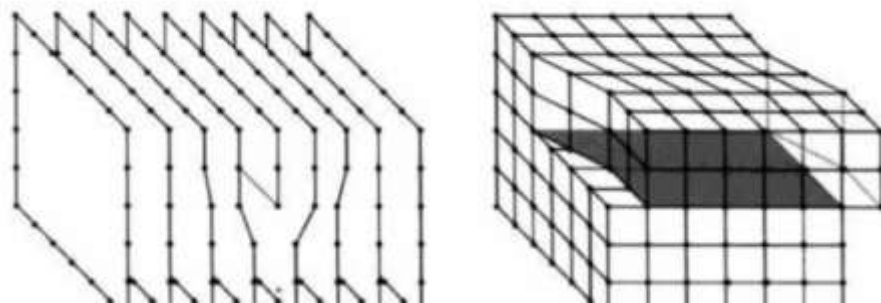
物质	能量密度 J/kg
TNT	4.7×10^6
裂变 (100%)	7.1×10^{13}
聚变 (100%)	7.5×10^{14}
正电子	1.8×10^{17}

正电子用于能源方面具有很高的能量密度，1mg 正电子的能量当量相当于40吨TNT

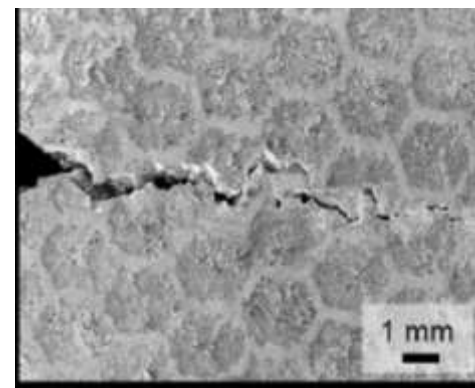
正电子表征材料微观缺陷（正电子湮没谱学技术）



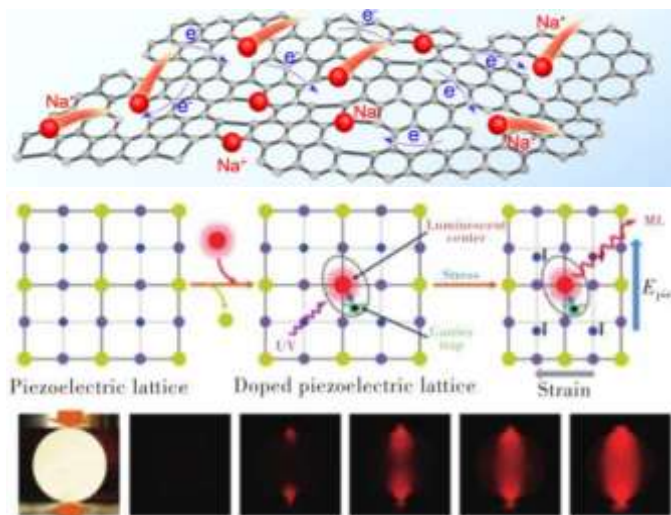
点缺陷



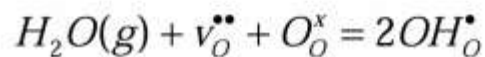
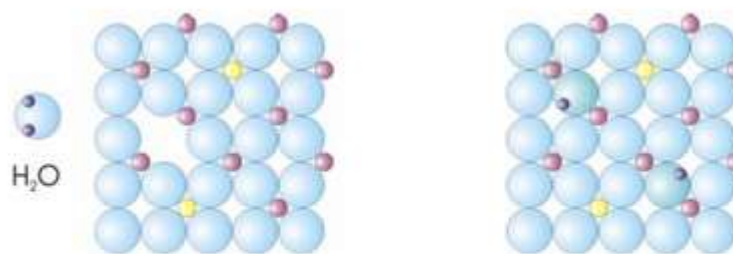
位缺陷与面缺陷



体缺陷



物理性能（电学、光学、热传导）



化学性能（溶解、氧化、腐蚀）



宏观性能（强度、塑性、韧性）

材料缺陷表征

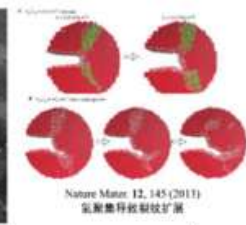
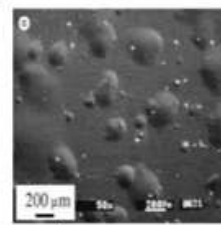
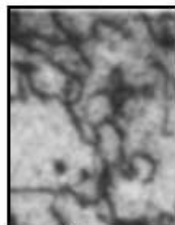
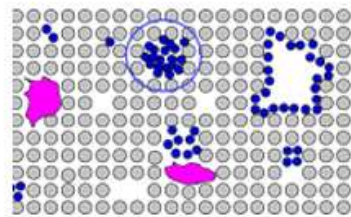
- **宏观指引 (毫米级-微米级, 如X-CT, XRD):** 锁定目标区域和整体特征。
- **介观定位 (微米级-亚微米级, 如SEM):** 精确定位感兴趣的特征 (特定晶粒、晶界、析出相) 。
- **微观/原子尺度解析 (纳米-亚纳米级, 如 (S)TEM, APT, PAS):** 深入剖析该特征的原子/电子结构、化学成分和缺陷本质。
- **表面/特定缺陷探测 (如 AES, PAS):** 获取关键界面或特定缺陷的信息。
- **原位动态追踪:** 结合多种原位技术, 观察结构在力、热、电、化学环境下的实时演变。

材料缺陷表征手段

间隙原子/空位/
空位团/微孔洞

位错/氦泡/析出相

肿胀、裂纹、脆化等宏观缺陷



Å

nm

TEM

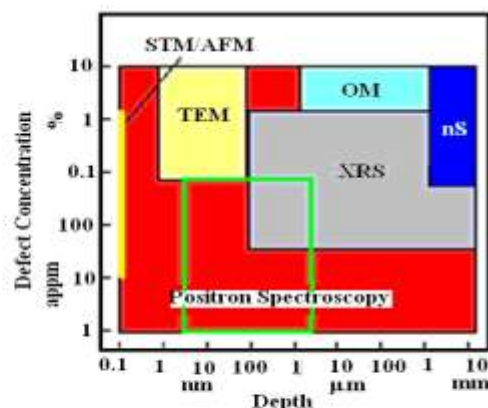
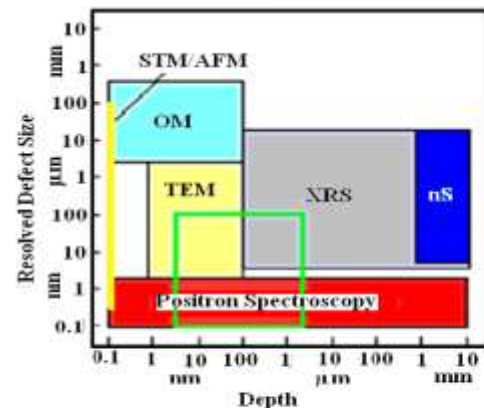
μm

mm

Synchrotron radiation/X-ray Scattering

PAS

Neutron Scattering



OM: Optical Microscopy
TEM: Transmission Electron Microscopy
STM: Scanning Tunneling Microscopy

nS: neutron Scattering
XRS: X-Ray Scattering
AFM: Atomic Force Microscopy

正电子湮没谱学的特点:

- ✓ 原子尺度缺陷
- ✓ ppm量级缺陷浓度
- ✓ “自寻找”探测

缺陷种类 + 缺陷浓度 + 缺陷化学环境 + 缺陷深度分布

正电子湮没寿命、相对强度;
正电子湮没多普勒测量

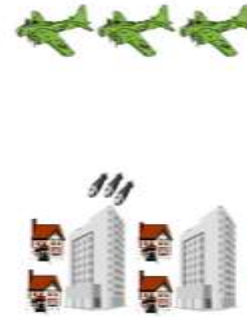
正电子湮没多参数技术

慢正电子束流技术

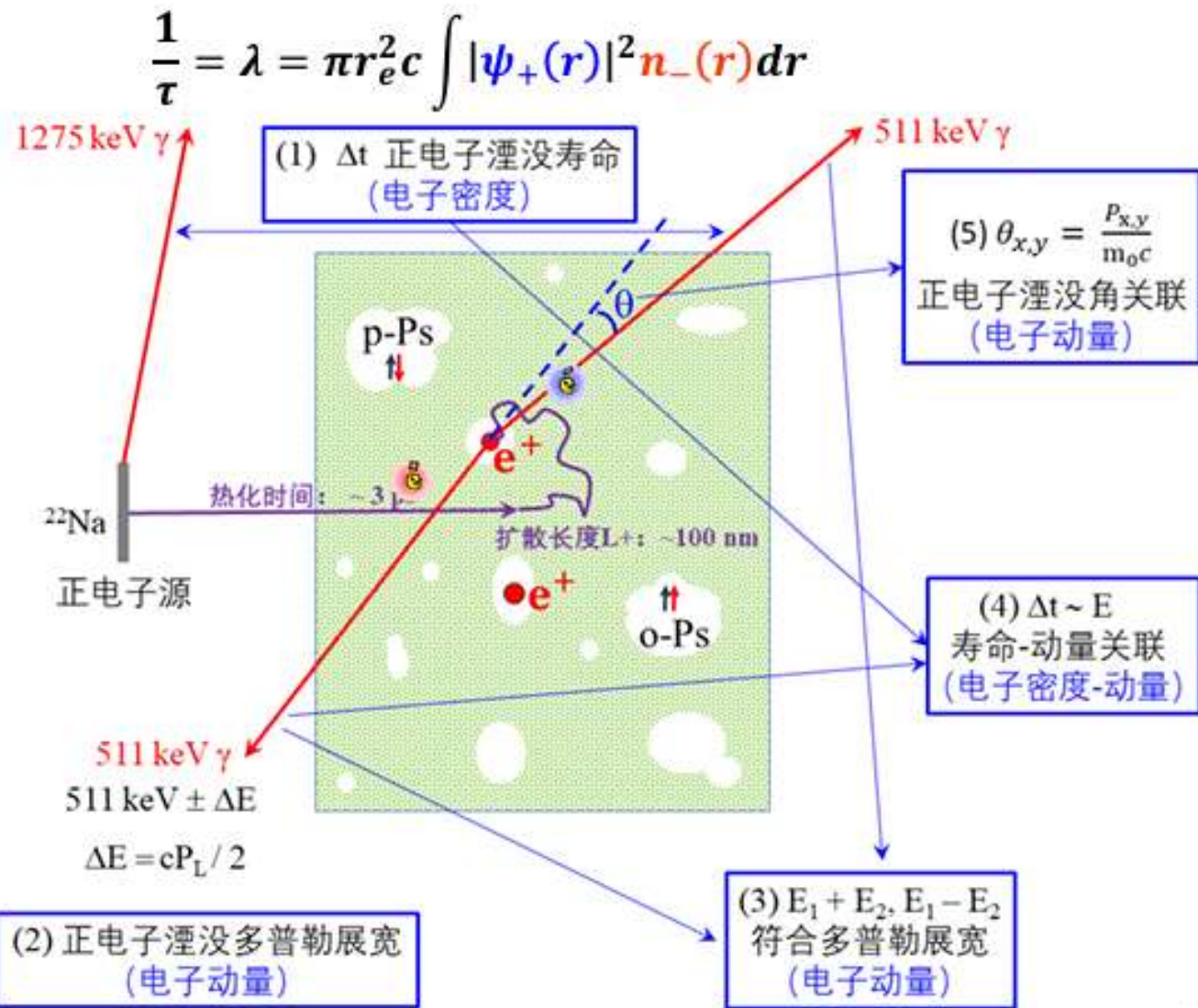
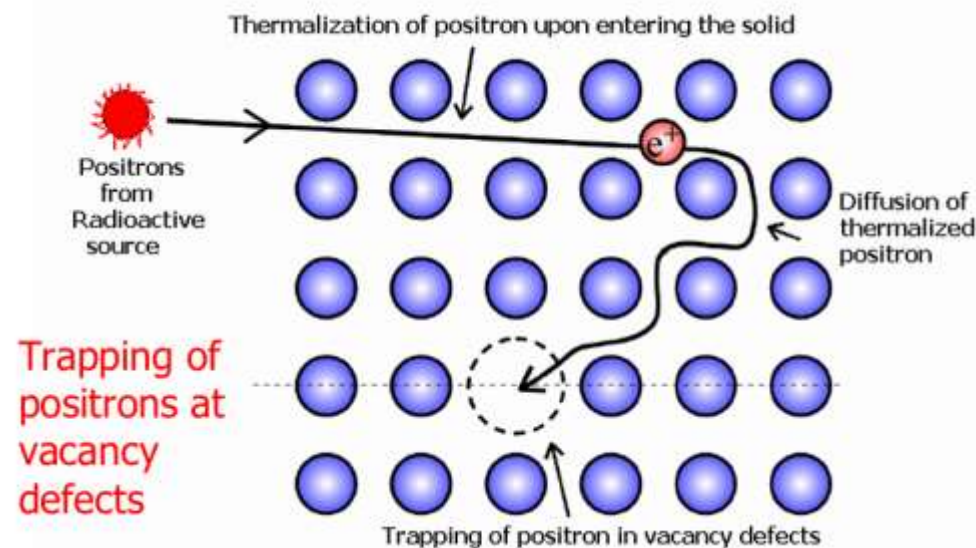
一般探针

定位探针

主动搜寻式探针

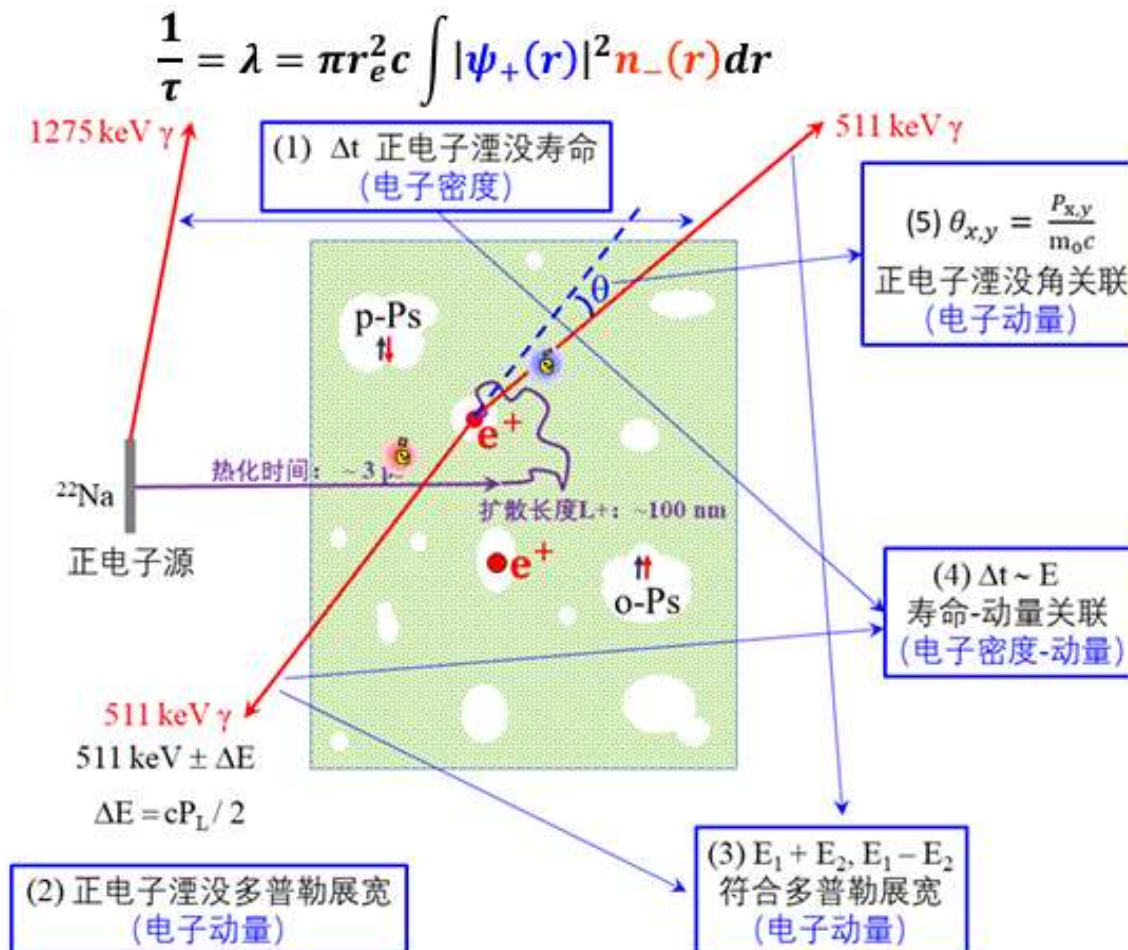


正电子湮没谱学原理



主要的湮没谱学技术

- 利用正电子研究材料微观缺陷和结构
- 正电子湮没技术(基本技术):
 - 正电子寿命谱学
 - 电子密度: 缺陷类型、浓度
 - 多普勒展宽谱学
 - 电子动量: 缺陷类型、化学环境
 - 正电子湮没角关联技术
 - 电子动量 (能量分辨率相对更高)
 - 电子能级、固体能带结构

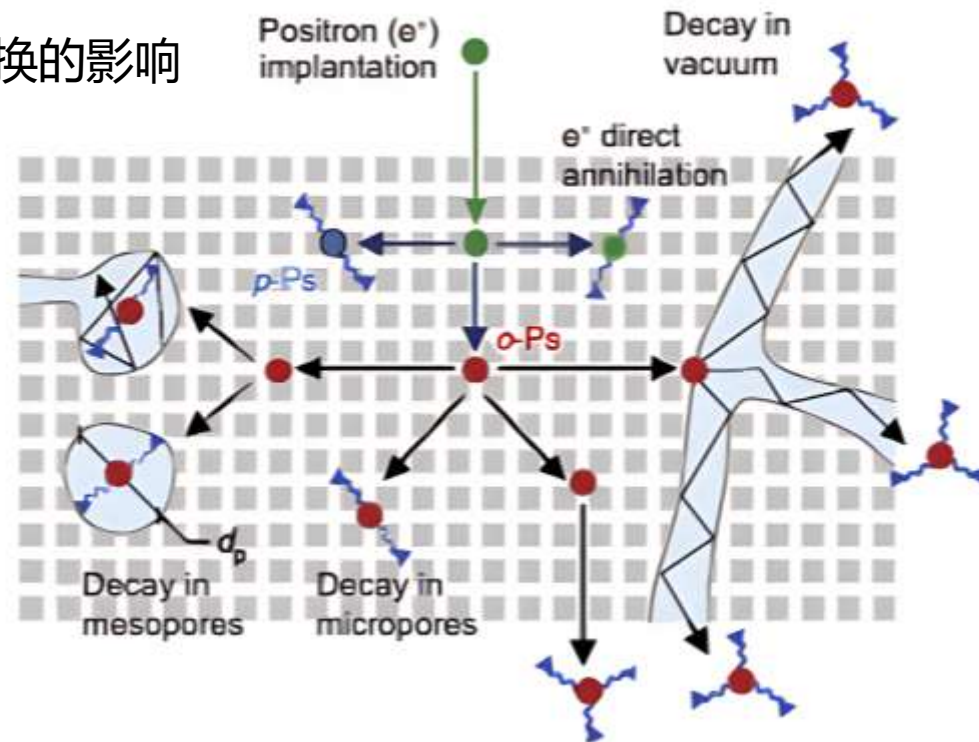


正负电子偶素

- 正负电子偶素 (Positronium, Ps) 是由一个电子和一个正电子组成的亚稳定束缚态, 其结构类似于氢原子
- 自旋三重态 (正电子偶素, o -Ps) : 电子自旋与正电子自旋平行
- 自旋单态 (仲电子偶素, p -Ps) : 电子自旋与正电子自旋反平行
- Ps 容易在多孔材料中形成, o -Ps的寿命受孔径大小、化学和物理环境的影响

正电子和正负电子偶素的寿命对比

Annihilation state	Lifetime (ns)	Transfer
e^+ free state	0.1–0.2	2γ
e^+ trapped state	0.2–0.4	2γ
p -Ps intrinsic annihilation	0.125	2γ
o -Ps intrinsic annihilation	142	3γ
o -Ps pick-off annihilation	1–10 ns	2γ



正负电子偶素的湮灭

正电子湮没谱学的应用

Positron annihilation in semiconductors: defect studies

半导体

R Krause-Rehberg, HS Leipner - 1999 - books.google.com

... applications of positron annihilation are described in Chap. 8. The comparison of positron annihilation with other techniques ... The different positron techniques dealt with in this chapter ...

☆ 被引用次数: 1985 相关文章 所有 6 个版本

Positron annihilation in chemistry

化学

OE Mogensen - 2012 - books.google.com

... The experimental techniques of positron annihilation are based upon the techniques of ... -1953 was of great importance for positron annihilation studies. Somewhat later the introduction ...

☆ 被引用次数: 627 相关文章 所有 5 个版本 网页快照

Positron annihilation as a method to characterize porous materials

多孔材料

DW Gidley, HG Peng, RS Vallery - Annu. Rev. Mater. Res., 2006 - annualreviews.org

... positron annihilation spectroscopy (PAS) in porous materials, our primary focus is on materials that form the Ps bound state by electron capture when positrons ... Although the techniques ...

☆ 保存 被引用次数: 402 相关文章 所有 5 个版本 2024年IF分区表

Positrons in surface physics

表面物理

C Hugenschmidt - Surface Science Reports, 2016 - Elsevier

... and material science positron annihilation spectroscopy (PAS... technique for defect spectroscopy of bulk materials since ... of the negative positron work function of the moderator material. ...

☆ 被引用次数: 148 相关文章 所有 7 个版本

Positron annihilation in metals

金属

S Kahana - Physical Review, 1963 - APS

An adequate description of positron annihilation rates in metals is obtained by extension of the high-density limit, for annihilation in an electron gas, to realistic densities. A short-range ...

☆ 保存 被引用次数: 317 相关文章 所有 4 个版本 2024年IF分区表

Positron annihilation spectroscopy of defects in nuclear and irradiated materials: a review

核材料与材料辐照效应

FA Selim - Materials Characterization, 2021 - Elsevier

... It discusses positron annihilation spectroscopies, techniques, and data analysis methods in a context more relevant to radiation damage and the nuclear materials research communities...

☆ 被引用次数: 126 相关文章 所有 4 个版本 网页快照

Positron annihilation spectroscopy for chemical analysis: a novel probe for microstructural analysis of polymers

聚合物

YC Jean - Microchemical Journal, 1990 - Elsevier

... Noticeable probes on this line of microanalysis are positron annihilation spectroscopy (4, 5), ... In this paper, I present a new microanalytical probe, positron annihilation spectroscopy for ...

☆ 保存 被引用次数: 1014 相关文章 所有 5 个版本 2024年IF分区表

Production of dark sector particles via resonant positron annihilation on atomic electrons

物理学

F Arias-Aragón, L Darmé, G Grilli di Cortona, E Nardi - Physical Review Letters, 2024 - APS

... mass reach of searches for new particles with positron beams. Resonant cross section.—... positron annihilation on atomic electrons. The differential cross section for positron annihilation ...

☆ 保存 被引用次数: 7 相关文章 所有 3 个版本 2024年IF分区表

正电子湮没谱学的优势应用方向

- 晶体材料：原子尺度的缺陷结构（掺杂、单空位、双空位、空位团.....）

- 高分子材料：自由体积（无其他可靠量化技术）

- 多孔（直径 < 200 nm）材料：

平均孔径；孔径分布；孔浓度；孔壁最外原子层的元素信息；

特别优势【N₂吸附脱附失效】：（1）封闭孔；（2）极微孔（直径 < 0.7 nm）

- 薄膜材料（厚度 > 50 nm）：微结构随深度的变化

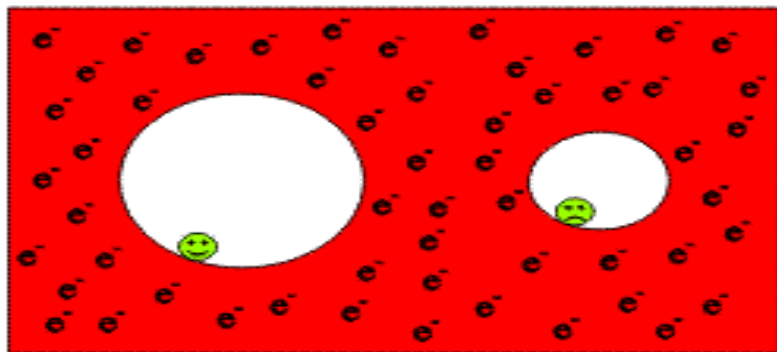
- 各种材料：温度引起的相变
- 合金：析出、析出/溶质界面
- 自旋电子学材料：金属薄膜最外原子层的电子自旋极化

正电子湮没谱学技术

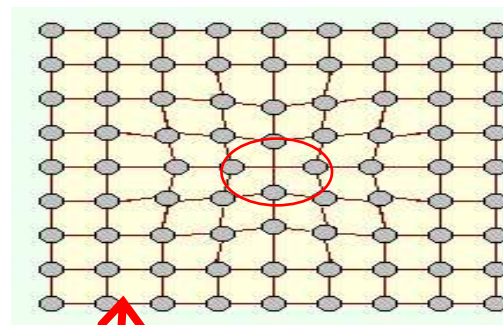
- 正电子寿命谱学技术
- 正电子多普勒展宽谱学技术
- 正电子湮没角关联谱学技术
- 寿命-动量关联谱
- 慢正电子

正电子寿命谱学技术

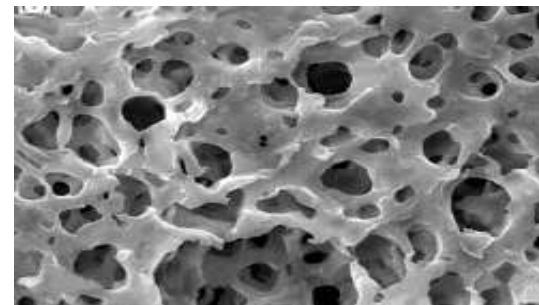
正电子湮没时间关联于电子态密度，直接反映缺陷类型、缺陷尺寸



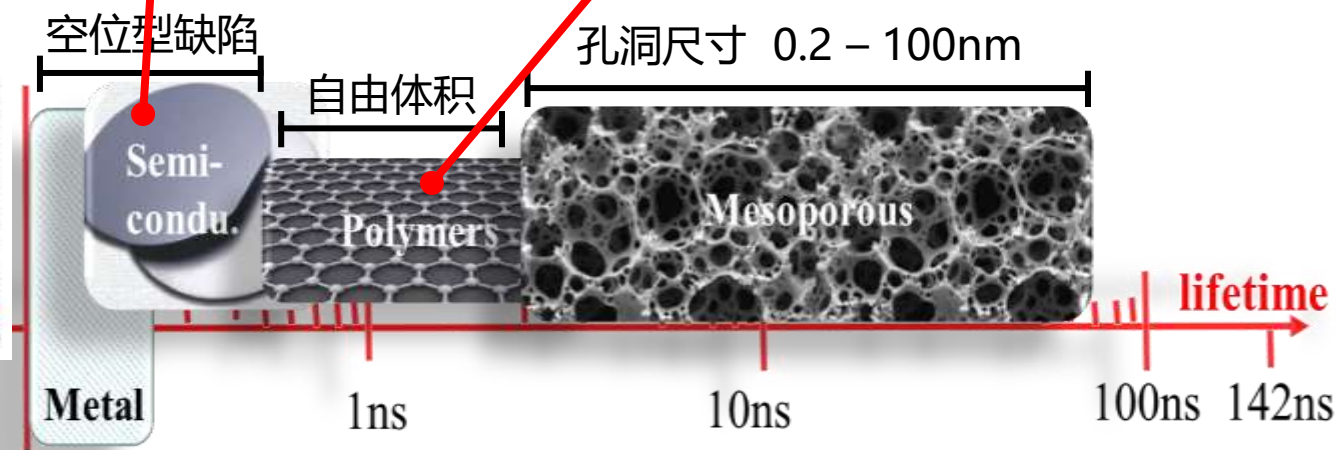
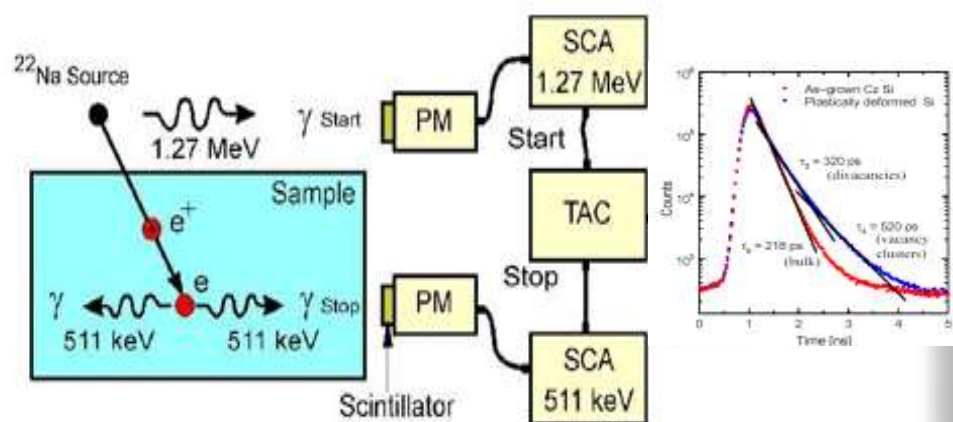
寿命 $\tau \propto 1/n_e$ (n_e 局域电子密度)



晶格空位 $\sim 200\text{ps}$

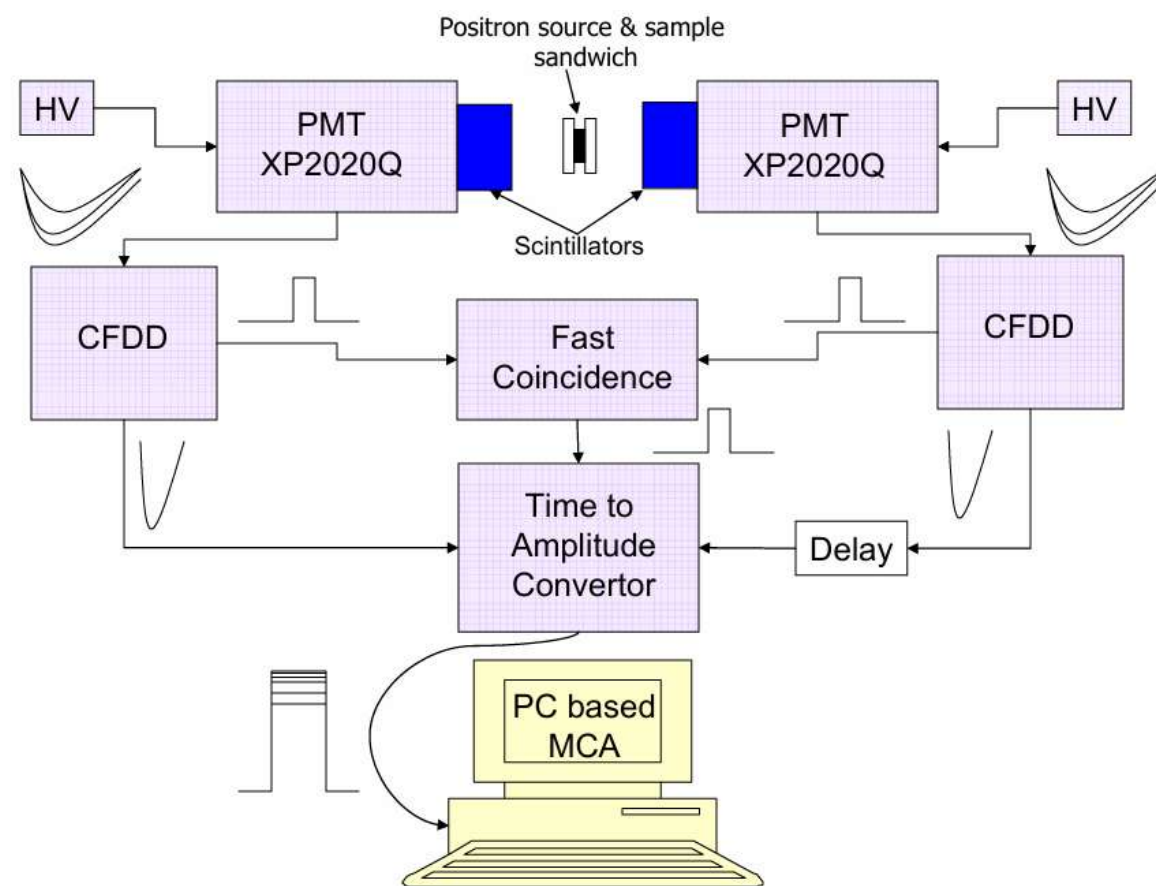
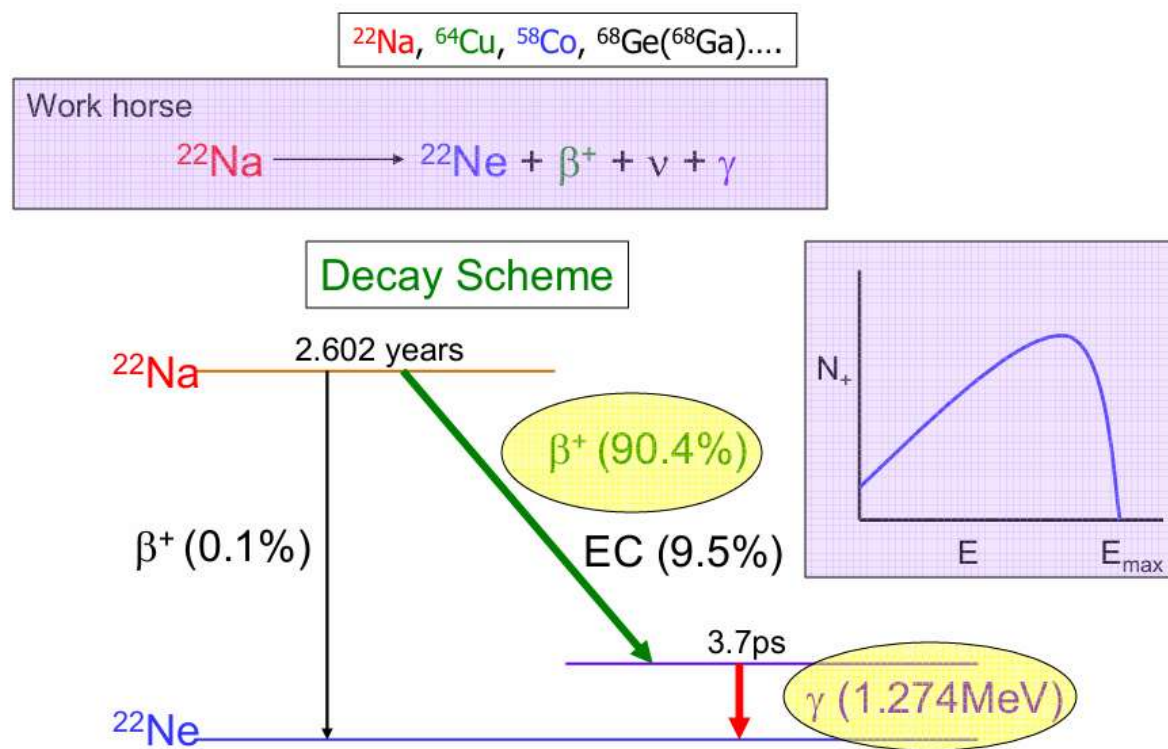


聚合物空洞 $\sim 2\text{ns}$



独特优势：定量分析晶体材料缺陷类型和缺陷浓度

正电子寿命谱学



正电子湮没谱学技术

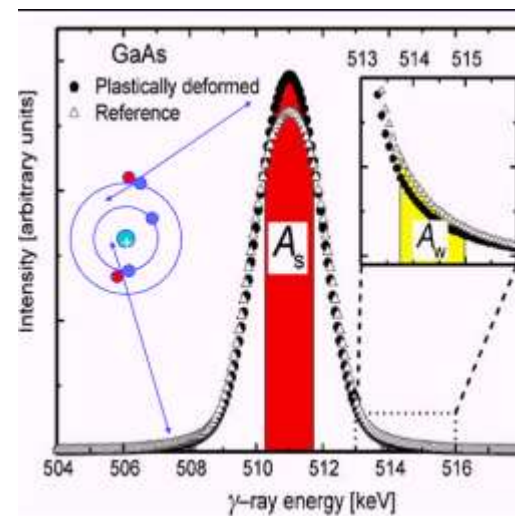
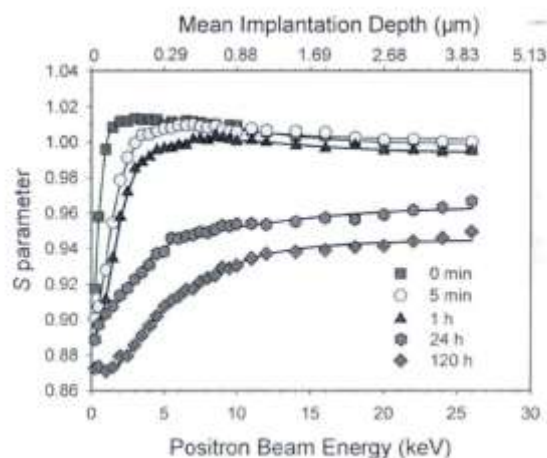
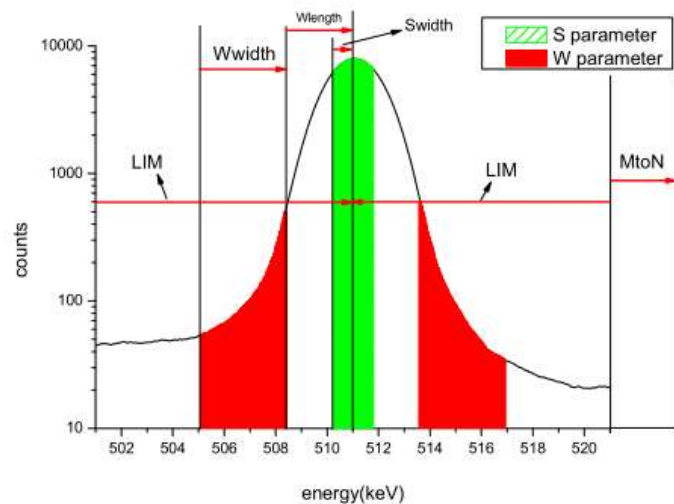
- 正电子寿命谱学技术
- 正电子多普勒展宽谱学技术
- 正电子湮没角关联谱学技术
- 寿命-动量关联谱
- 慢正电子束流

正电子多谱勒谱学

- **理想静止情况:** 正电子湮没的两条 γ 能量为511 keV （但实际电子具有动量分布，导致 γ 能量偏离511keV）
- **电子动量影响:** 湮没前，电子具有动量 p ，正电子-电子对的总动量转移到 γ 光子上导致光子能量发生偏移

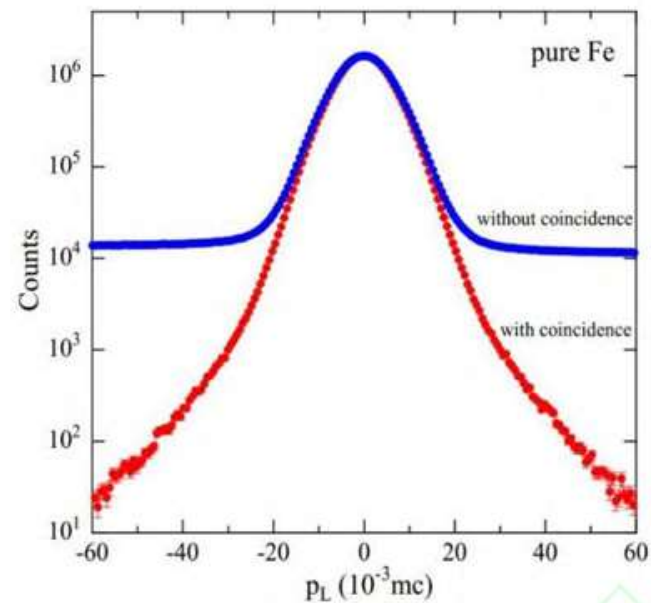
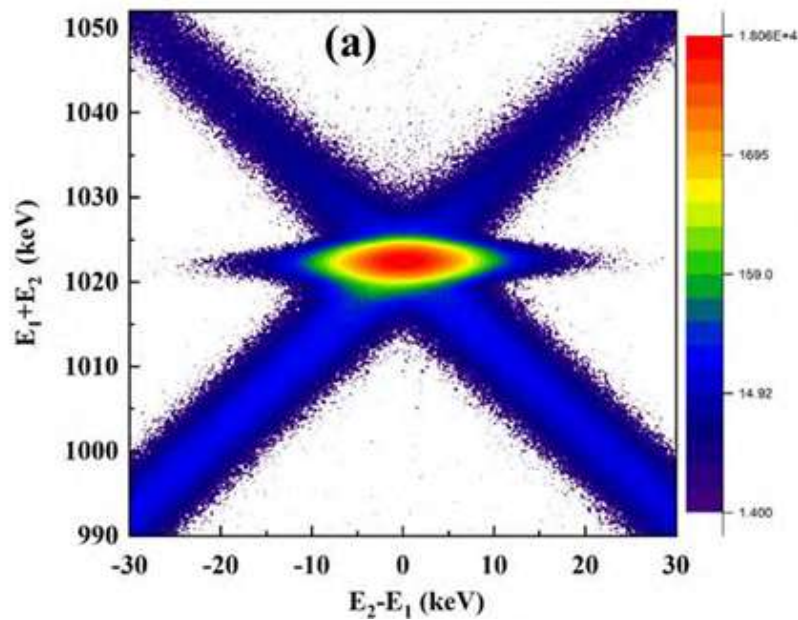
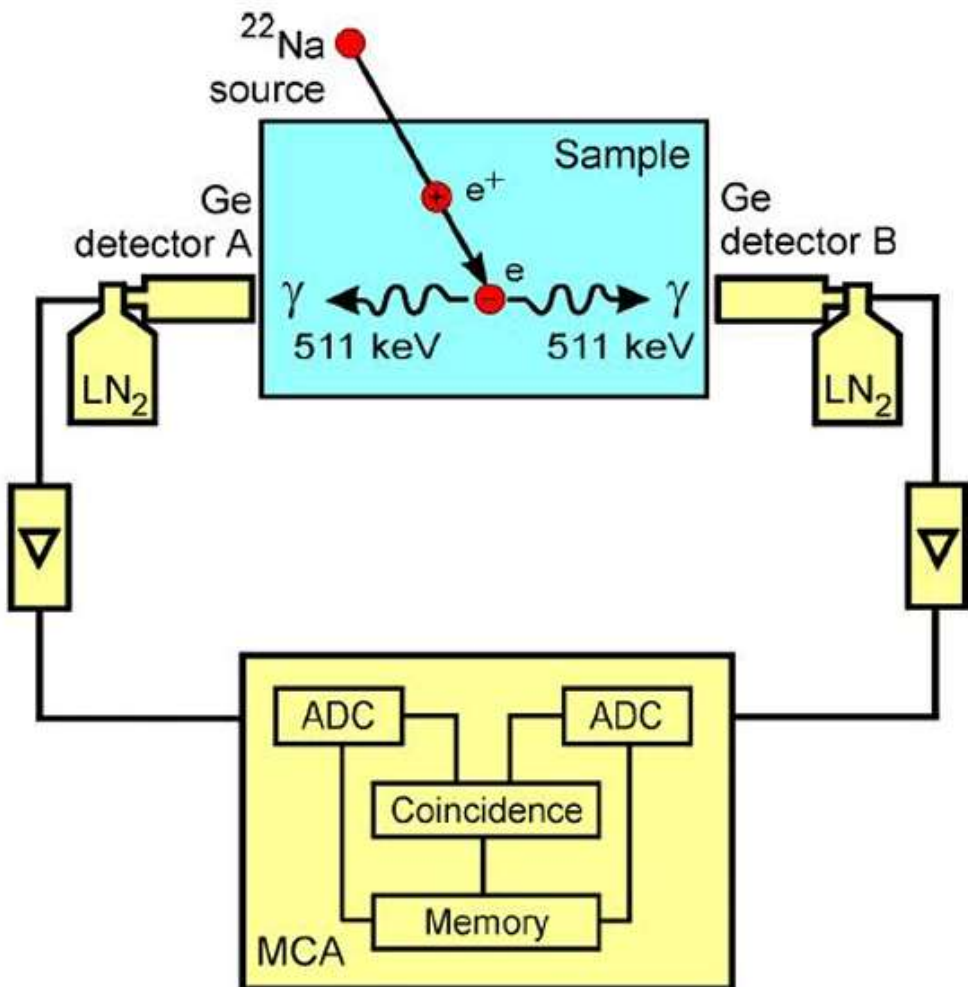
$$\Delta E = p_L c / 2 \quad (p_L \text{ 为电子动量在光子发射方向的分量, } c \text{ 为光束})$$

- **展宽现象:** 材料中电子动量分布越宽（如自由电子或缺陷处电子），湮没光子的能量分布展宽越明显
- **探测能力:** 可探测 ppm级别的缺陷、区分不同元素的电子环境



腐蚀不同时间镁合金的S参数随正电子束注入能量的变化

符合多普勒展宽测量系统



符合多普勒能谱和常规谱的对比

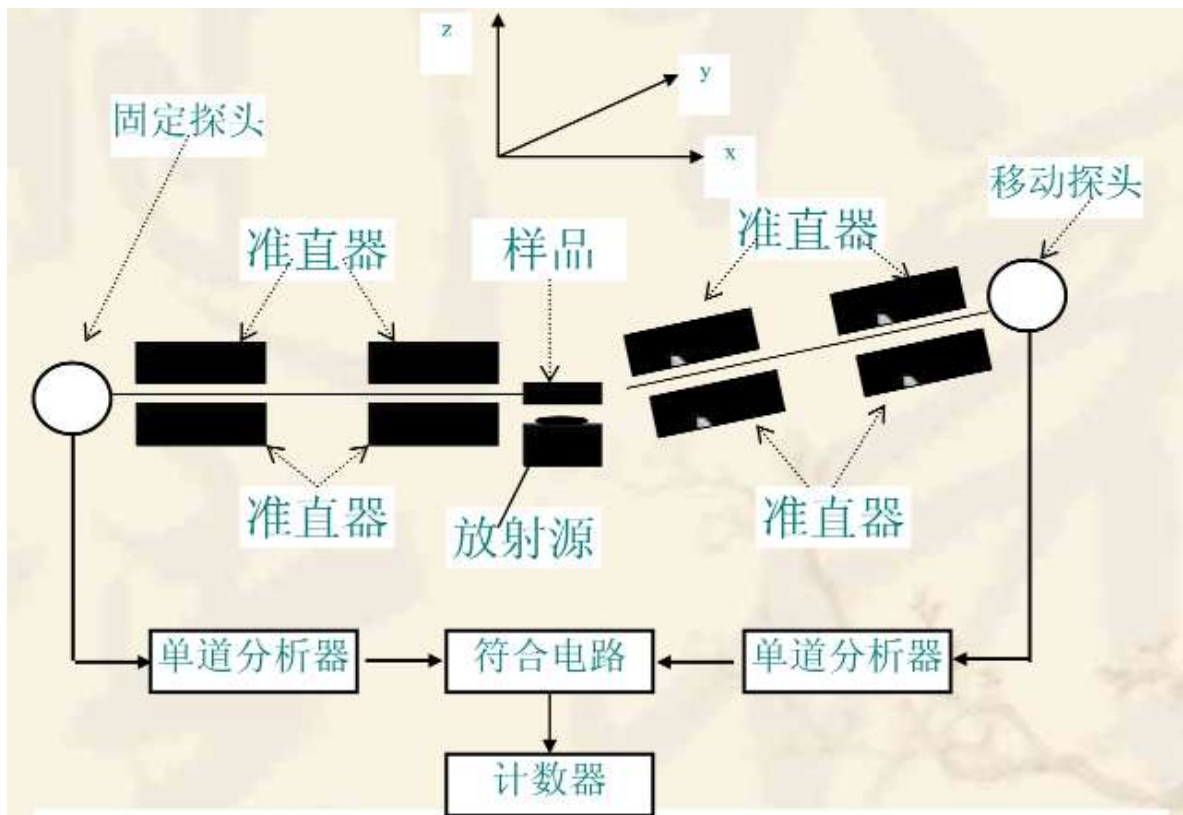
符合多普勒谱仪示意图

正电子湮没谱学技术

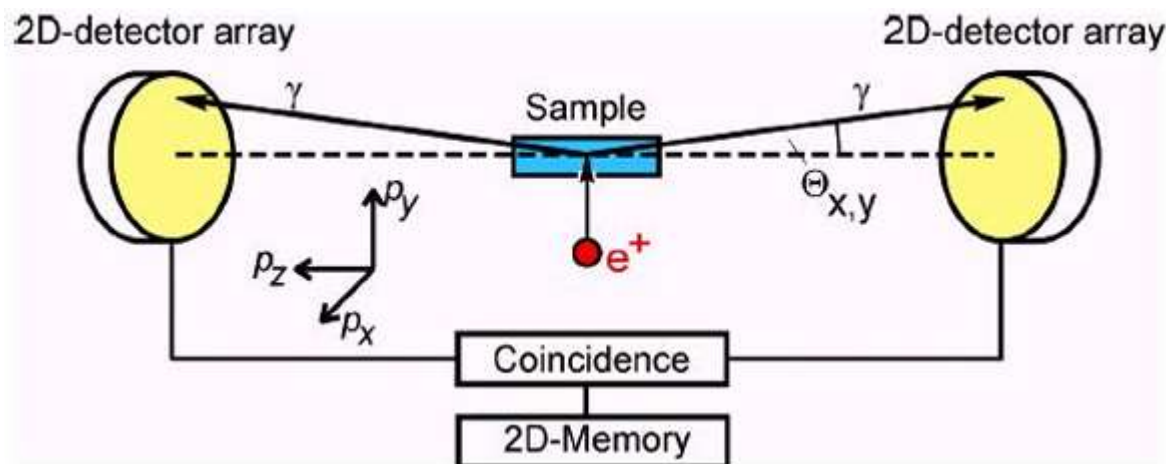
- 正电子寿命谱学技术
- 正电子多普勒展宽谱学技术
- 正电子湮没角关联谱学技术
- 寿命-动量关联谱
- 慢正电子束流

正电子湮没角关联谱学技术 (ACAR)

- 正负电子湮没产生的 2γ 夹角与 180° 存在微小偏离，关联角与电子动量相关，可获取费米面形貌、能带结构信息
- ACAR (能量分辨率 $0.05 \times 10^{-3} \text{mec}$) 比多普勒展宽技术具有更好分辨率(能量分辨率 $4 \times 10^{-3} \text{mec}$)
- 需要较多的计数，因而需要较强的正电子源和较长的测量时间



一维角关联谱仪



Coincidence counting rate N_c :

$$N_c(\Theta_x, \Theta_y) = A_c \int \sigma(\Theta_x m_0 c, \Theta_y m_0 c, p_z) dp_z$$

$$Q_{x,y} = p_{x,y} / m_0 c$$

Resolution: 0.2~5mrad (0.05~1.2keV)

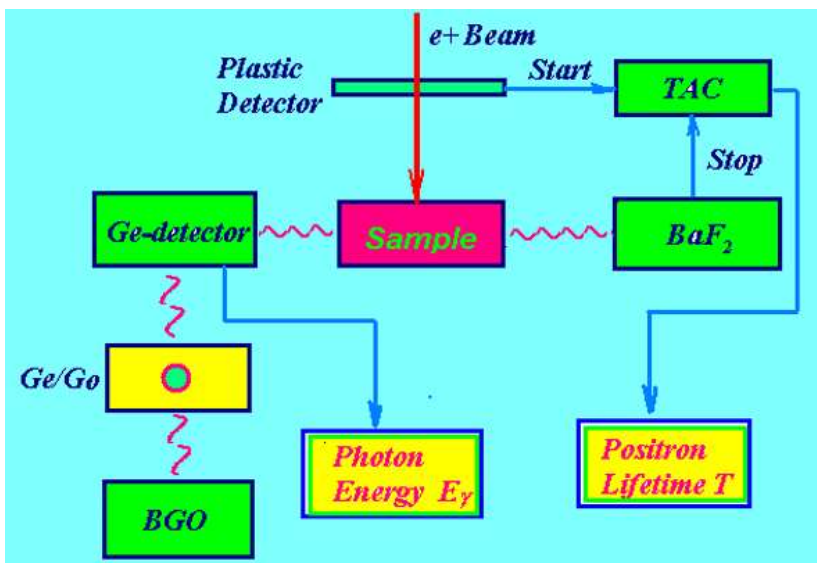
二维角关联谱仪 (获取三维电子动量信息)

正电子湮没谱学技术

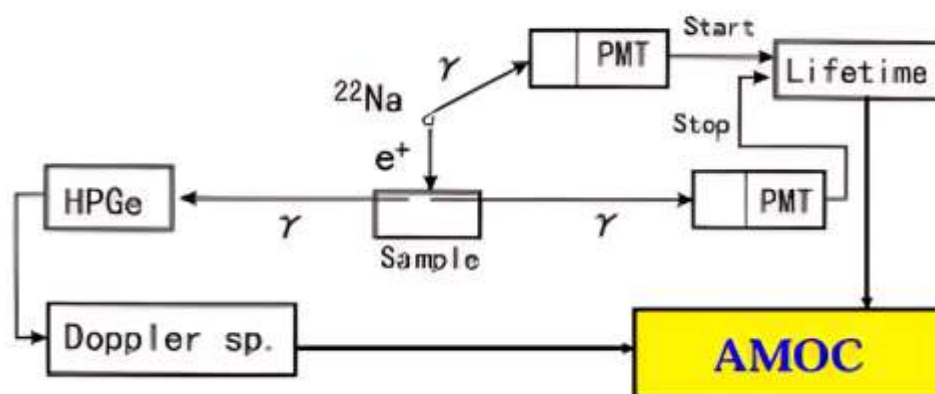
- 正电子寿命谱学技术
- 正电子多普勒展宽谱学技术
- 正电子湮没角关联谱学技术
- 寿命-动量关联谱
- 慢正电子束流

正电子寿命-动量关联 (AMOC)

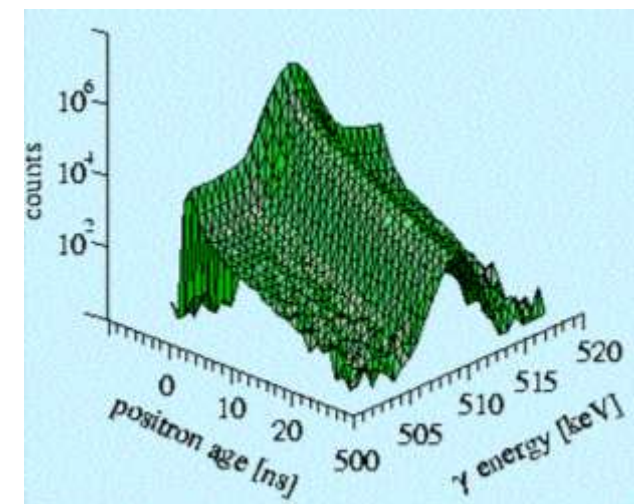
- AMOC同时测量正电子寿命和多谱勒展宽谱，获取寿命-动量的二维谱图
- 通过对寿命-动量关联谱的二维图进行切片，可观察不同动量对应的寿命，可使一些强度弱或者寿命长的湮没过程得到细致和清晰的展现，从而更加深入地揭示物质的微观结构
- 重要应用：研究正电子偶素 (Ps) 的形成和湮没机制，Ps 在化学多孔材料和孔表面化学研究



基于正电子束流的AMOC

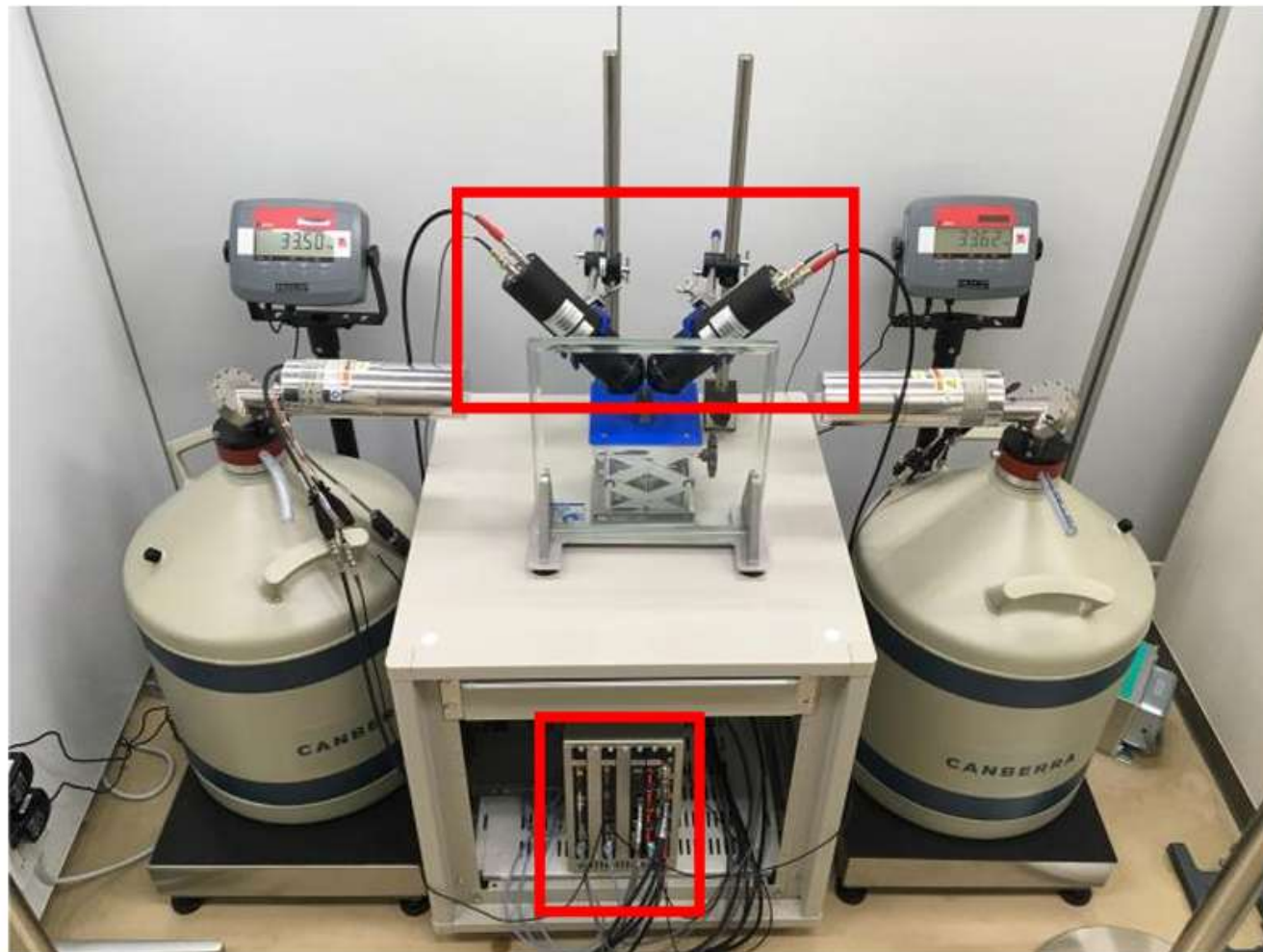


基于放射源的AMOC



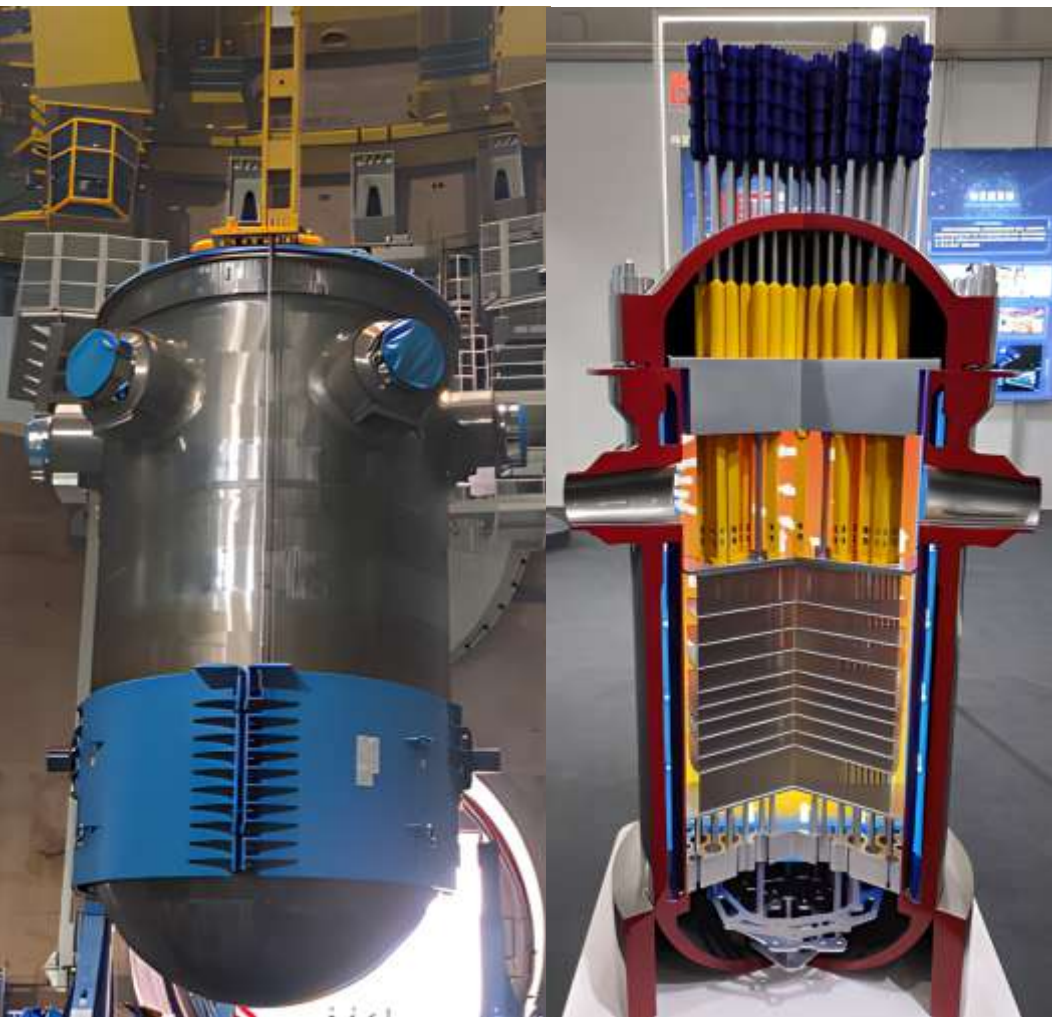
正电子寿命-动量关联谱

正电子谱仪

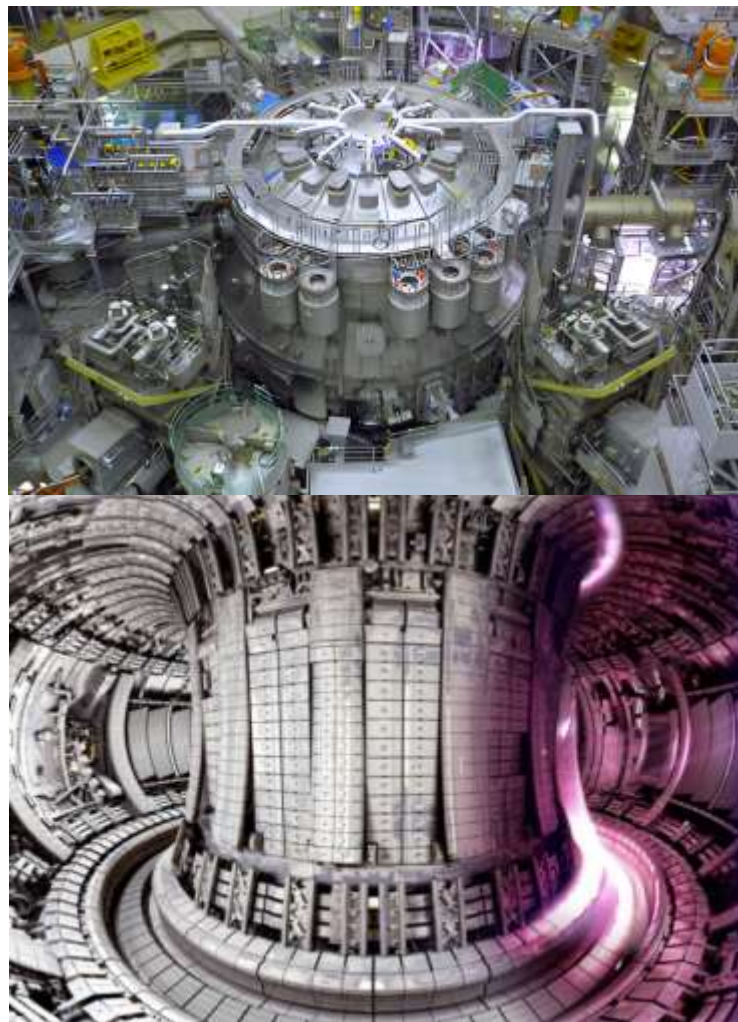


正电子寿命-动量关联谱仪

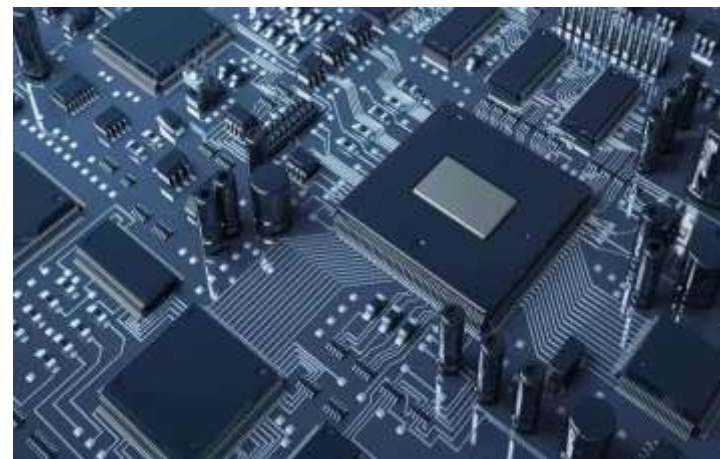
材料辐照损伤影响



反应堆压力容器和内部结构示意图
定期更换（停堆）+ 不可更换（退役）



聚变堆及内部图



电子半导体

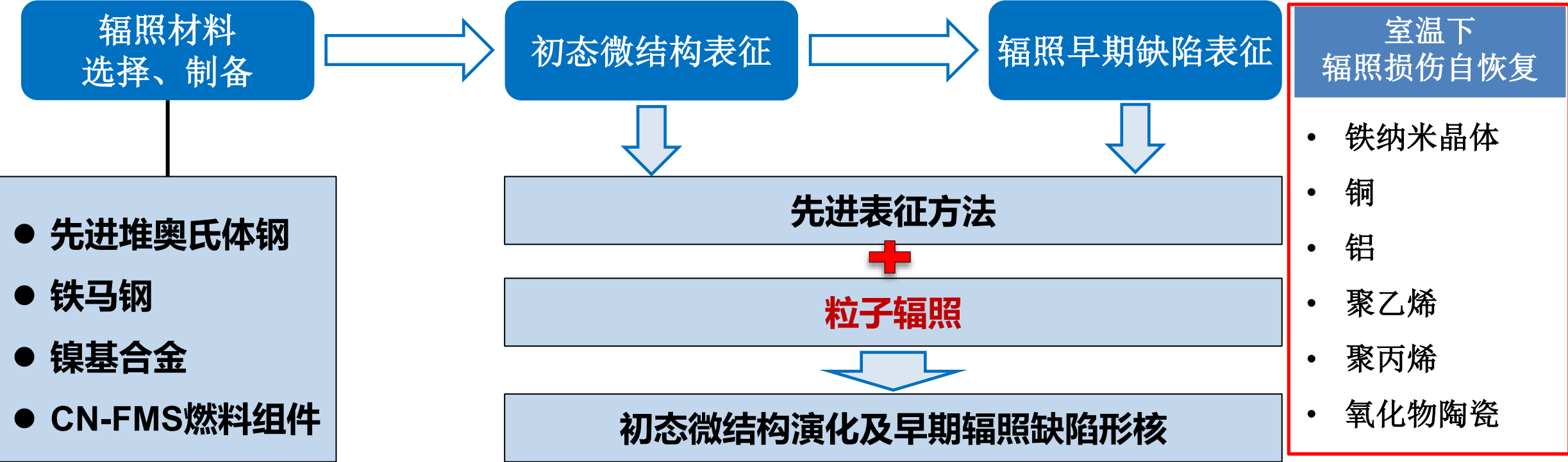


CSNS-靶站

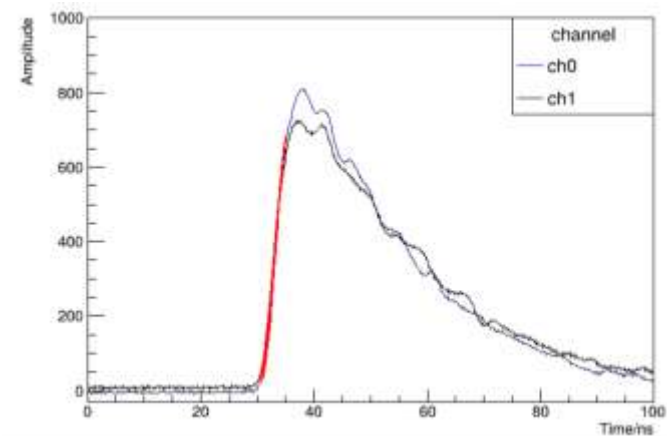
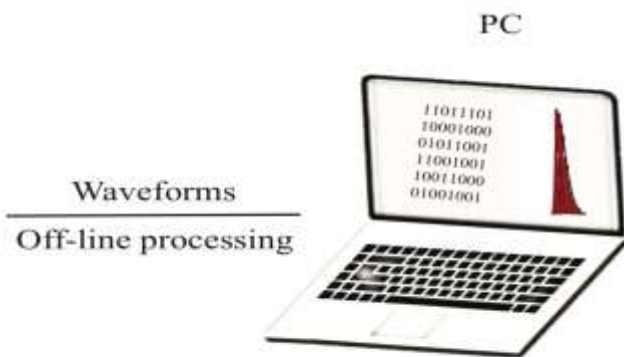
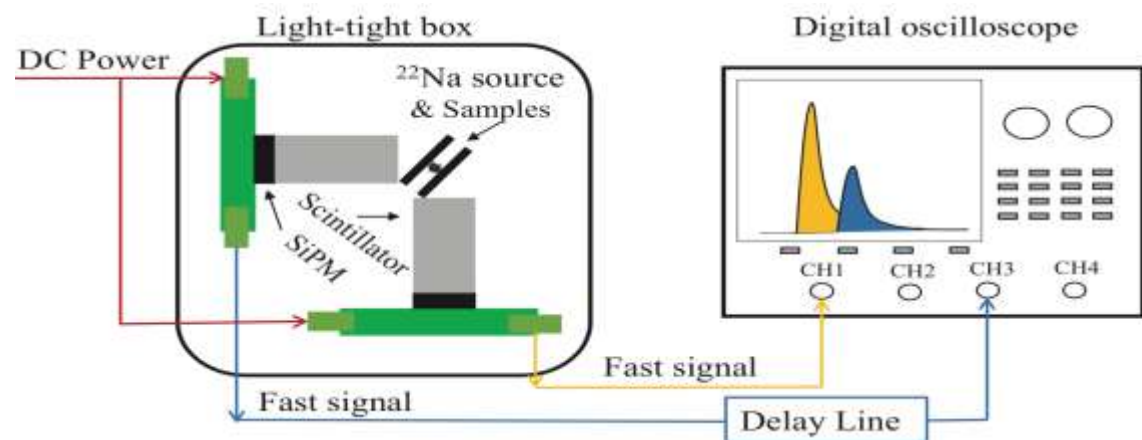
辐照缺陷过程研究

- 利用不同条件**射线源辐照材料**
- 利用**先进表征技术**对材料初态微结构以及早期辐照缺陷进行表征

初态结构	早期辐照缺陷	表征方法
- 位错结构、纳米析出 - 溶质团簇、空位缺陷	- 单空位、小空位团 - 空位-H/He复合体 - 辐照诱导析出，位错	- 正电子：原子-亚纳米尺度空位类型缺陷 - 同步辐射：析出结构尺寸分布 - 中子谱学：应力分布、织构变化

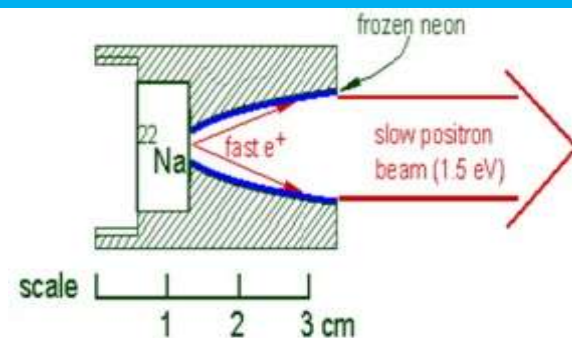


正电子寿命谱仪系统

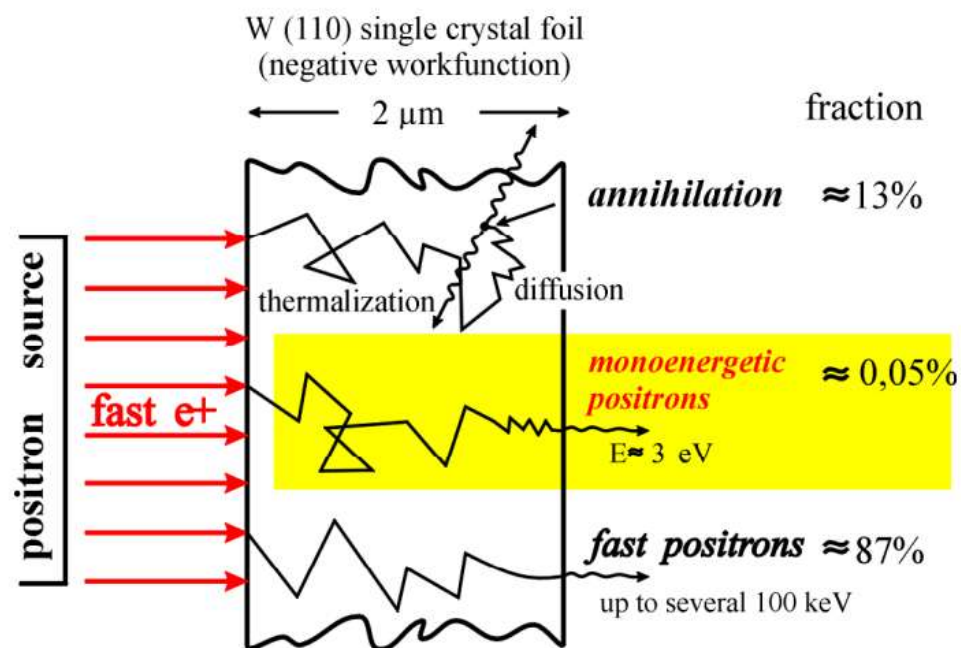


慢正电子束流技术

- 薄膜、纳米材料、材料表面和界面的需求
- 单晶金属、绝缘体和固态稀有气体，钨最常用
- 固态氖慢化效率最高 (7×10^{-3})，需复杂低温制冷装备
- 装置进口、实验操作复杂、效率低



固态Ne慢化体示意



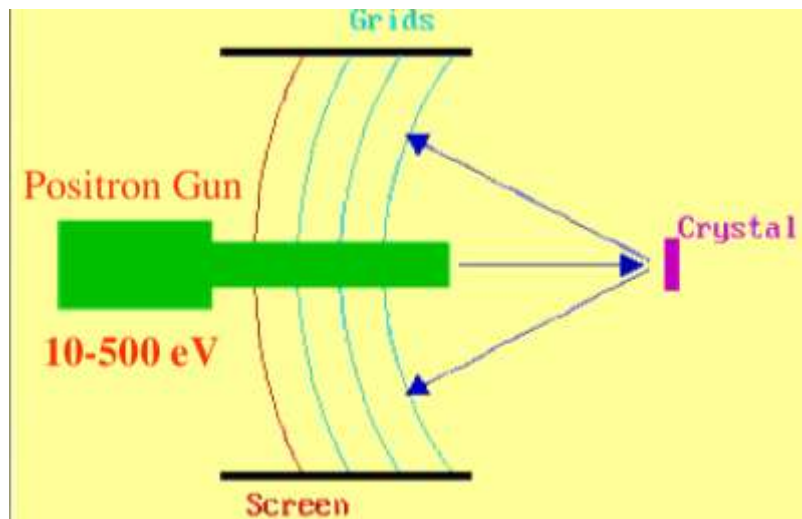
正电子在单晶钨中的慢化，慢化效率 10^{-4}



慢正电子源分布

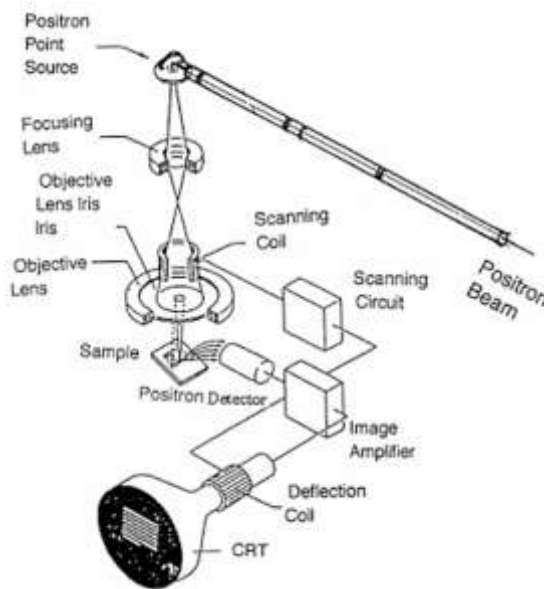
基于慢正电子的其它技术

正电子诱发俄歇电子谱仪



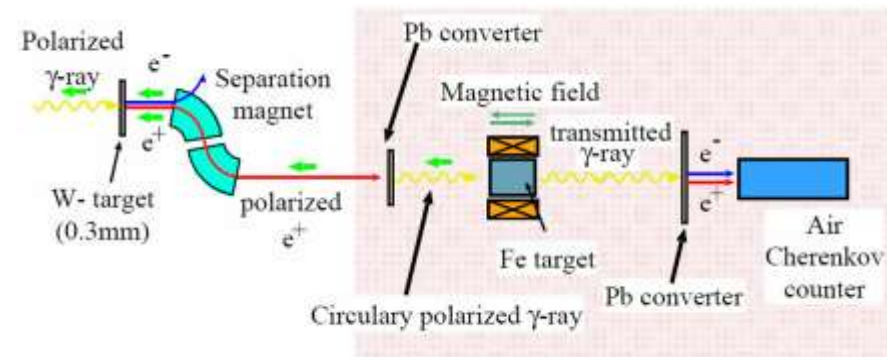
特点：俄歇峰周围无二次电子本底

正电子显微镜



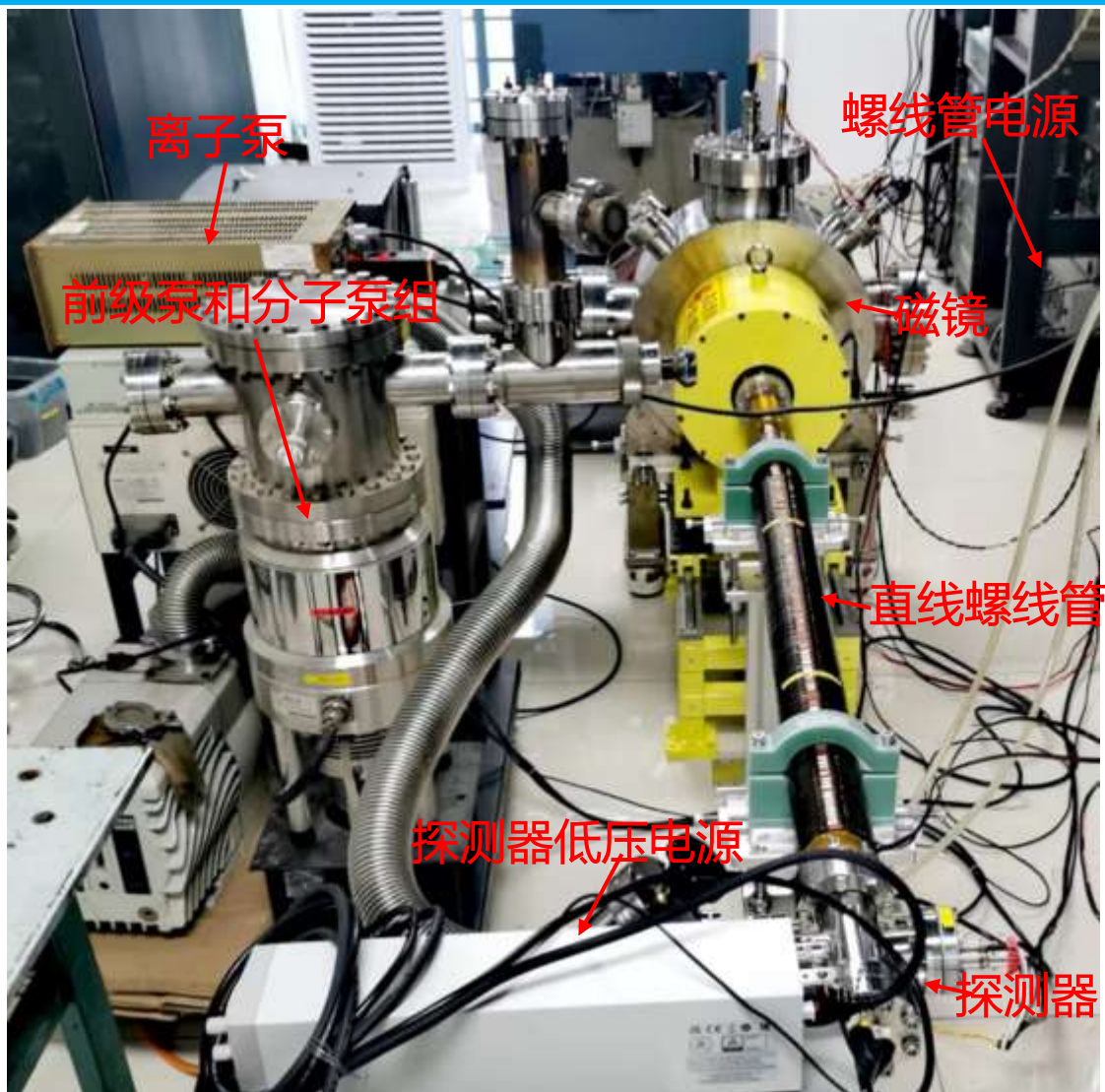
特点：以单原子态的区域显像空位
突显化学差异

极化正电子束流（正电子自旋弛豫技术）



用于探测表面电子的自旋态

慢正电子技术



磁镜正电子慢化实验装置

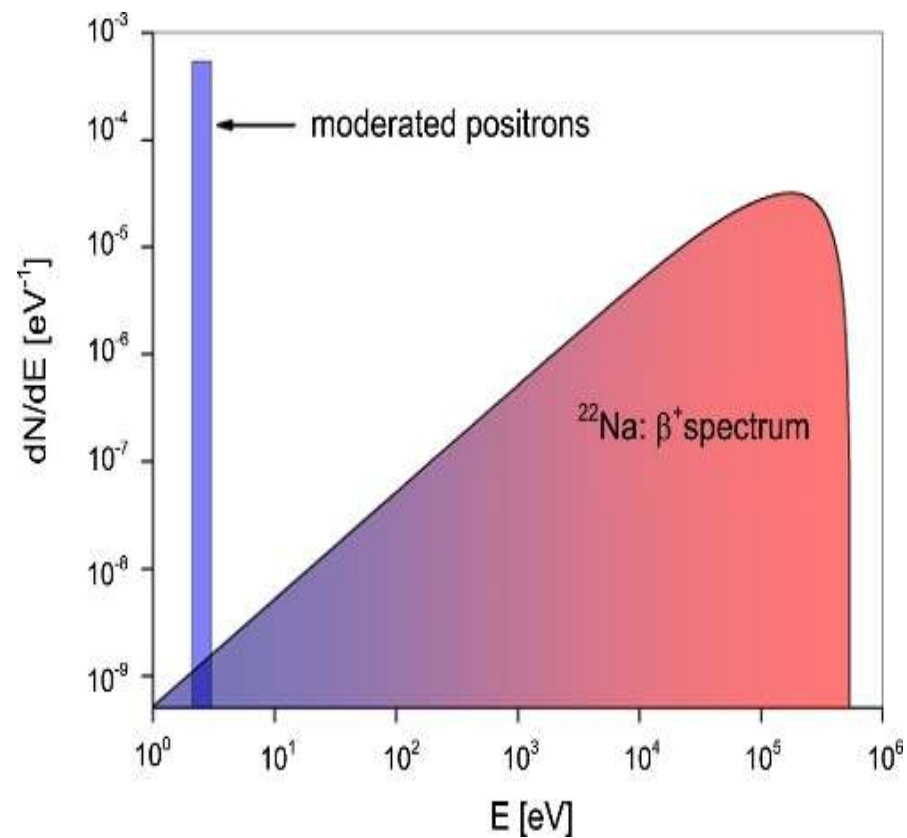


图 1. ^{22}Na 放射源产生的 e^+ 和经过慢化后的 e^+ 的能谱[2].

同位素正电子源

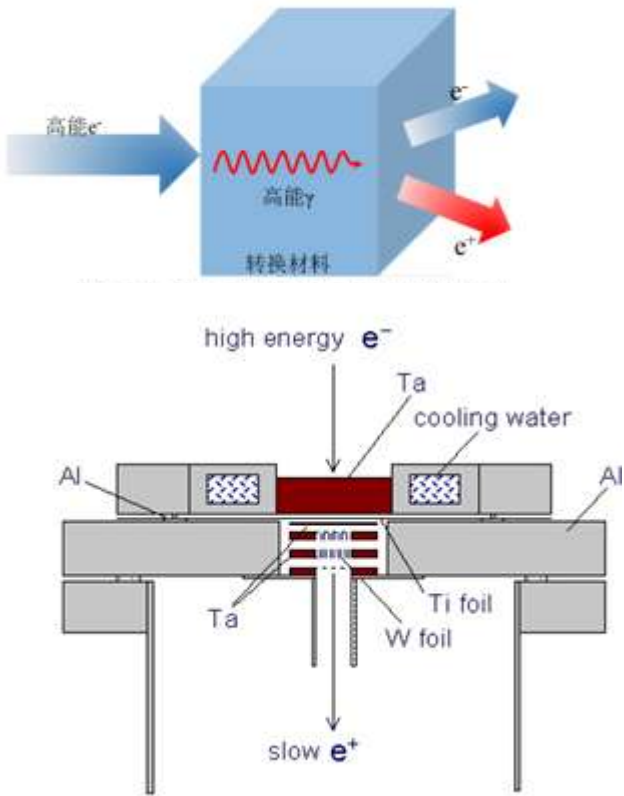
常用同位素正电子源

同位素	β^+ 分支比	最大能量 (MeV)	半衰期	产生机制
^{22}Na	0.89	0.545	2.6y	$^{24}\text{Mg}(\text{d},\alpha)$
^{58}Co	0.15	0.474	71d	$^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$
^{68}Ge	0.86	1.89	275d	$^{66}\text{Zn}(\alpha,2\alpha)$
^{64}Cu	0.19	0.653	12.6h	$^{63}\text{Cu}(\text{n},\gamma)$
^{44}Ti	0.95	1.47	47.3y	$^{45}\text{Sc}(\text{p},2\text{n})$
^{26}Al	0.85	1.17	$8 \times 10^5\text{y}$	
^{11}C	0.99	0.96	20.3m	$^{11}\text{B}(\text{p},\text{n})$
^{81}Rb	0.27	1.05	4.6h	$^{79}\text{Br}(\alpha,2\text{n})$

主要类型的正电子源对比

主要类型的正电子源及特点

参数 \ 类型	核反应/放射性同位素	基于 γ 光	基于加速器
机理	放射性同位素的核反应/中子产生轰击产生 e^+	光致正负电子对的生成	高能电子轰击金属或合金的电磁级联过程
束流强度	$10^4 \sim 10^6 e^+ / s$	最高纪录 $(9.8 \pm 0.8) \times 10^8 e^+ / s$	$10^7 \sim 10^9 e^+ / s$
优点	体积小，技术要求和设备要求低	不再依赖于传统加速器源，脉冲可控制	亮度高，可持续性好，稳定性高，脉冲控制程度高
缺点	亮度低，产额低，寿命短，脉冲不可控，有潜在辐射危害	设备要求复杂度和技术难度较高，技术不成熟，不稳定	设备体积大，成本高



反应堆正电子源：

- $^{113}\text{Cd} + n \rightarrow ^{114}\text{Cd} + \gamma \text{ (9MeV)}$
- 通过中子活化产生正电子的放射性同位素

上海SLEGS (γ 射线正电子源)

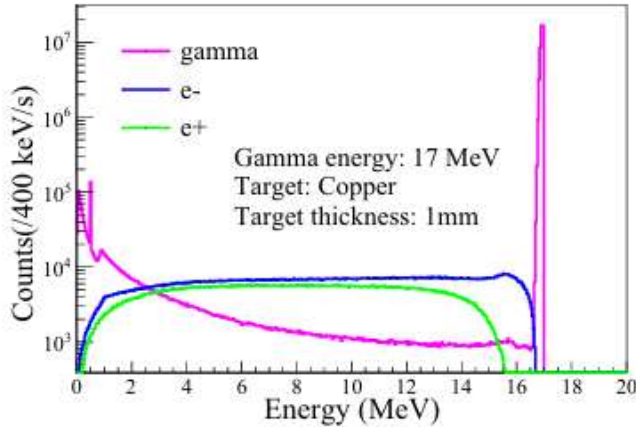
正电子产生系统包括伽马射线驱动部分、正电子产生靶、磁分离部分

伽马射线的发射角限制在小于0.5 mrad，束斑直径在1–25 mm范围内

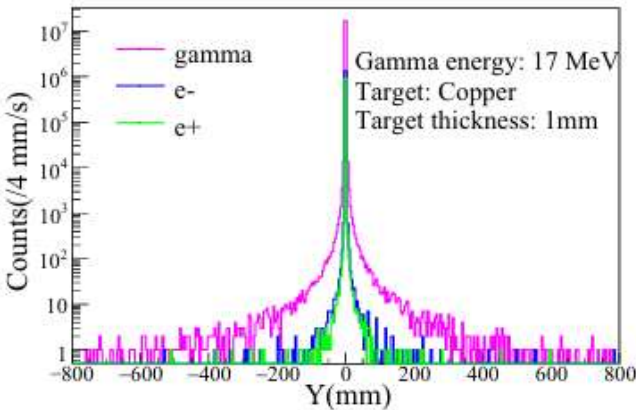
SLEGS在单束模式下运行时，可以产生 10ps 持续时间的高能伽马脉冲束，从而获得 10ps 持续时间的正电子束

Table 2 Parameters of positron generation and separation section

Target	Material	Be/Cu/Pb
	Purity (%)	100%
	Diameter (mm)	20
	Thickness (mm)	1.0–10.0
Electromagnet	Electromagnetic strength (Tesla)	0.1–0.5
	Electromagnetic gap, z_1 (mm)	100
	Field, length $\times$ width (mm^2)	100 $\times$ 100
Imaging plate	Size, length $\times$ width (mm^2)	400 $\times$ 400
	Position z_2 (mm)	0–600



能量分布



正电子空间分布

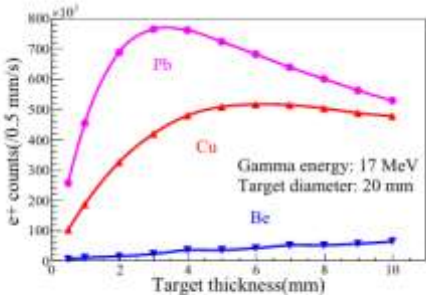
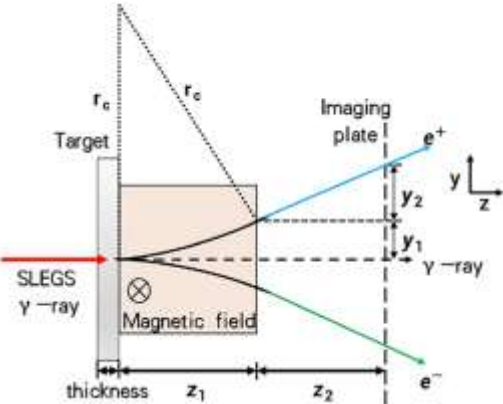
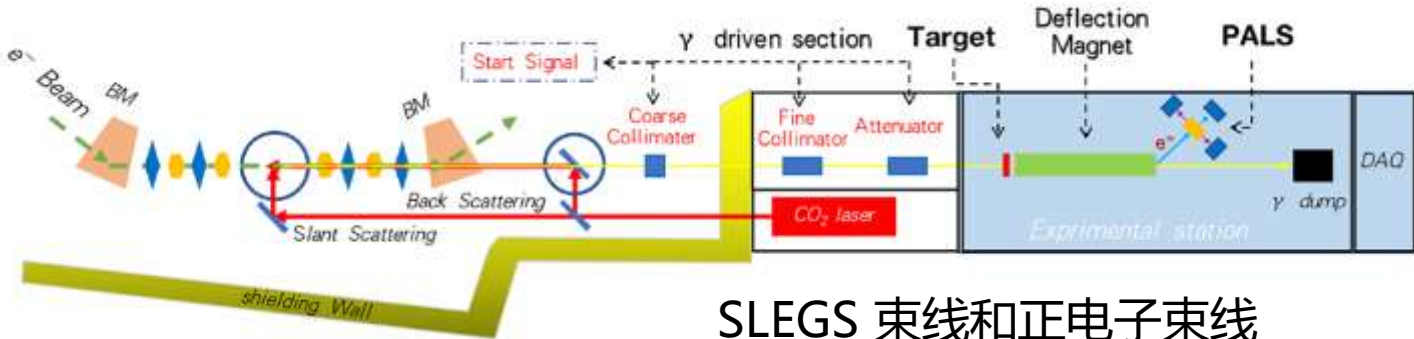


Fig. 5 Normal positron yield with Be, Cu and Pb target



SLEGS 束线和正电子束线

德国NEPOMUC (反应堆正电子源)

- 基于慕尼黑工业大学FRM-II研究反应堆的正电子源

NEPOMUC 提供高亮度、低能量的正电子束，用于固体物理、表面物理以及核物理和原子物理的基础研究
正电子束强度超过每秒 10^9 个慢化后的正电子，束流能量为1 keV

- 正电子产生与传输

正电子通过¹¹³Cd中热中子俘获产生的高能 γ 射线的湮灭产生。

使用80%的¹¹³Cd富集镉作为中子- γ 转换器，其设计寿命为25年，高能 γ 射线在铂箔结构中转化为正电子-电子对，通过施加正高压提取慢化后的正电子，然后通过5-7毫特斯拉的螺线管磁场传输

- 实验仪器

- 已投入常规运行的仪器：

脉冲低能正电子系统 (PLEPS)

符合多普勒展宽光谱仪 (CDBS)

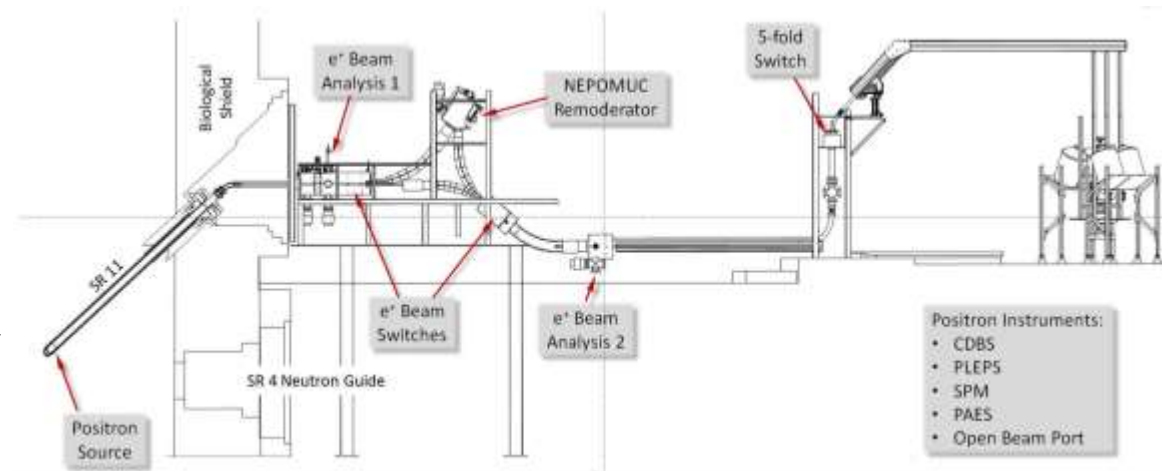
开放束流口 (目前用于产生等离子体对的磁阱实验)

- 正在开发或计划使用的仪器：

正电子湮灭诱导的俄歇电子能谱仪 (PAES) 已用于表面实验

正电子衍射仪 (TRHEPD) 最近在此进行了测试

正在设置扫描正电子显微镜 (SPM)



日本AIST (加速器正电子源)



70MeV 电子轰击Ta靶经电子对效应产生正电子
再通过25 μm 的钨箔进行慢化

- 常规束
束斑10mm,
流强 $2-3 \times 10^7$ counts/s
- 微束
微束斑30-100 μm
流强 $\sim 10^6$ counts/s

慢正电子源

类型	装置 / 来源	能量范围	束流强度
基于放射性同位素	中国科学技术大学 ^{22}Na 源	0~25 keV	$10^5 \text{ e}^+/\text{s}$
	中科院高能所 ^{22}Na 源	-	$10^6 \text{ e}^+/\text{s}$
	武汉大学 ^{22}Na 源 (固态惰性气体慢化)	-	$5 \times 10^6 \text{ e}^+/\text{s}$
	德国慕尼黑大学脉冲束装置	0.5~28 keV	-
	日本 KEK ^{22}Na 源装置	200 eV~10 keV	短脉冲: $2 \times 10^5 \text{ e}^+/\text{s}$ 长脉冲: $6 \times 10^6 \text{ e}^+/\text{s}$
基于加速器	美国 Lawrence Livermore 国家实验室 120 MeV 电子直线加速器	-	$10^8 \text{ e}^+/\text{s}$
	日本 KEK 55 MeV 直线加速器	-	短脉冲 (22 ns) : $2 \times 10^5 \text{ e}^+/\text{s}$ 长脉冲 (1 μs) : $6 \times 10^6 \text{ e}^+/\text{s}$
	日本 AIST 70MeV 直线加速器		束斑10mm, 流强 $2\text{-}3 \times 10^7 \text{ counts/s}$ 微束斑30-100 μm ,流强 $\sim 10^6 \text{ counts/s}$
	德国 EPOS 直线加速器	0.2~40 keV	$10^7 \sim 10^8 \text{ e}^+/\text{s}$
基于反应堆	中国科学院高能所 BEEP 直线加速器	-	$10^6 \text{ e}^+/\text{s}$ (后续未使用)
	荷兰 Delft 研究堆 POSH 装置	-	$8 \times 10^7 \text{ e}^+/\text{s}$
	德国研究堆装置	-	$2 \times 10^8 \text{ e}^+/\text{s}$
	美国 PULSTAR 研究堆装置	-	$6 \times 10^8 \text{ e}^+/\text{s}$
	德国 NEPOMUC 研究堆 FRM II 装置	-	$3 \times 10^9 \text{ e}^+/\text{s}$
	日本京都大学 KUR 研究堆装置	-	$1.4 \times 10^6 \text{ e}^+/\text{s}$
	中国中物院 CMRR 研究堆 (推算)	-	$8.5 \times 10^8 \text{ e}^+/\text{s}$

正电子源的其它产生方法

1.核聚变：四个质子聚合成一个氦核，同时释放两个正电子和两个电子中微子

2. 激光正电子源（高能量高亮度源）

通过激光加速电子，然后再通过高能电子与靶相互作用产生正负电子对

