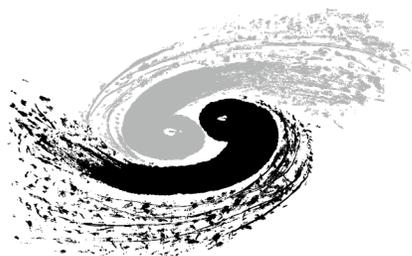


- 第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会 -

硬X射线超导转变边沿探测器 研发进展

闫代康

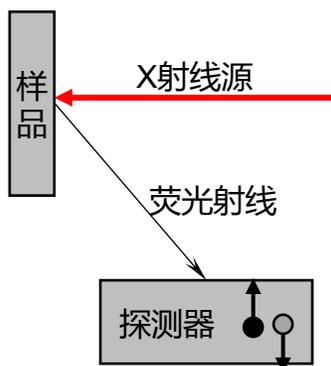
2023-08



中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

能量色散探测器 (半导体)



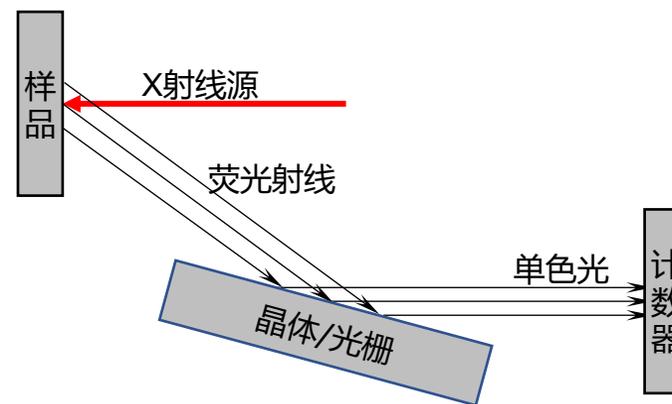
光子激发电子空穴对

缺点：能量分辨率差 (几百eV)

优点：

- 能量覆盖范围广
- 光子收集率高，测量速度快

波长色散探测器



布拉格定律 $n\lambda = 2d \sin\theta$

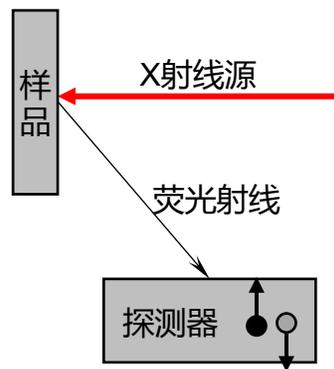
转动晶体/光栅扫描波长

优点：能量分辨率好 (< 1 eV)

缺点：

- 能量覆盖范围窄
- 光子收集率低，测量耗时

能量色散探测器 (半导体)



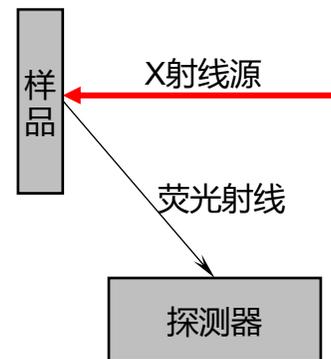
光子激发 **电子空穴对**

缺点：能量分辨率差 (几百eV)

优点：

- 能量覆盖范围广
- 光子收集率高，测量速度快

能量色散探测器 (超导体)



光子激发 **库珀对**

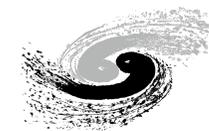
能量分辨率可达几个eV

超导探测器简介

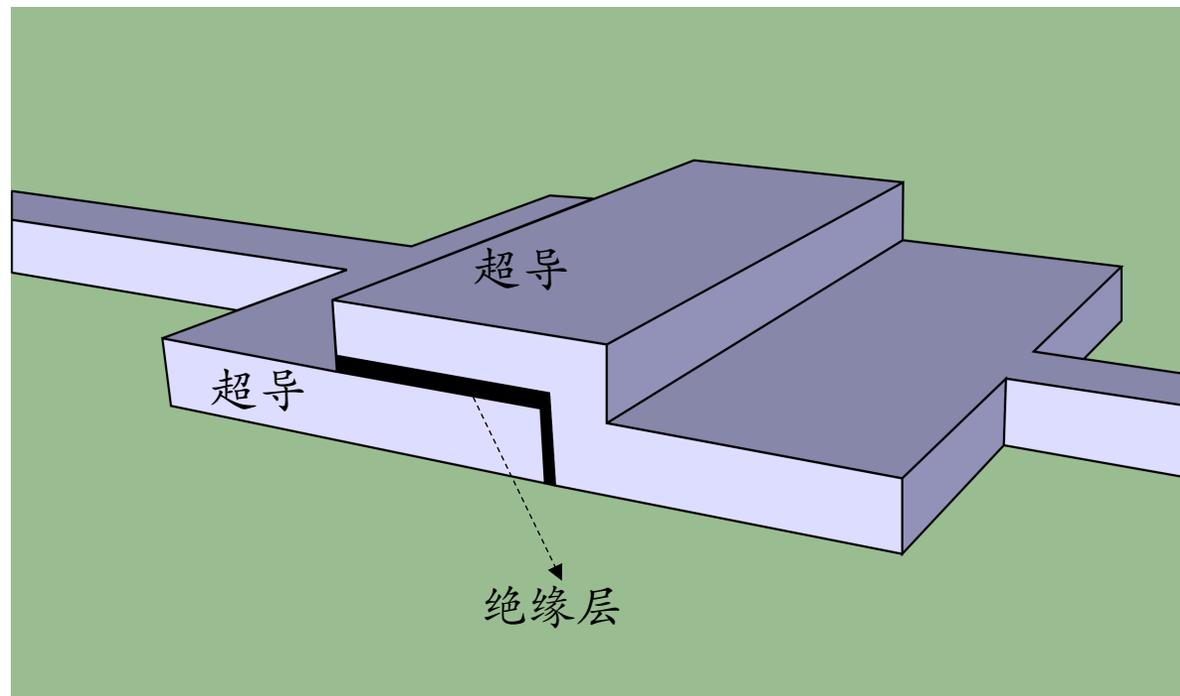


	superconducting tunnel junction (STJ)	microwave kinetic inductance detectors (MKID)	metallic magnetic calorimeter (MMC)	transition-edge sensor (TES)
原理	隧穿电流大小正比于光子激发的准粒子数	准粒子密度变化影响超导LC电路的共振频率	顺磁材料中磁通量的变化	光子热效应引发电阻变化
能量分辨率 (软X射线)	~ 10 eV	几十eV	~ 1eV	~1eV
能量分辨率 (硬X射线)	材料过薄，X射线吸收率低	目前没有开发	暂无实测，但理论预测值很好	5 eV @ 17 keV
最大优势	计数效率极高： 10^4 /秒	方便大阵列复用	能量分辨率高； 能量覆盖范围大	能量分辨率高； 复用技术较为成熟
主要短板	能量分辨率略差； 能量上限低	能量分辨率低； 能量上限低	复用发展不成熟	能量覆盖范围小于MMC

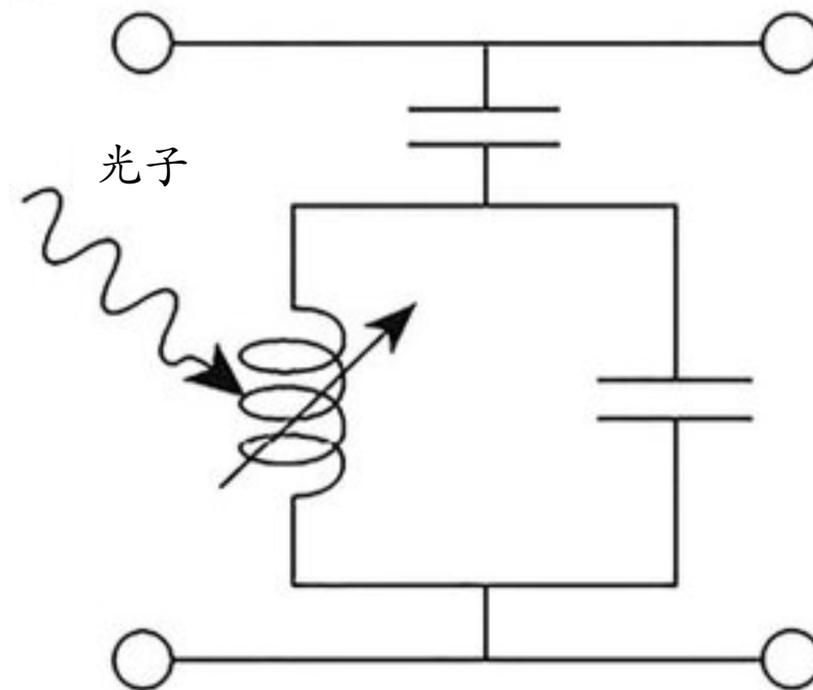
超导探测器简介



	superconducting tunnel junction (STJ)
原理	隧穿电流大小正比于光子激发的准粒子数
能量分辨率 (软X射线)	$\sim 10 \text{ eV}$
能量分辨率 (硬X射线)	材料过薄, X射线吸收率低
最大优势	计数效率极高: $10^4/\text{秒}$
主要短板	能量分辨率略差; 能量上限低



	microwave kinetic inductance detectors (MKID)
原理	准粒子密度变化影响超导LC电路的共振频率
能量分辨率 (软X射线)	几十eV
能量分辨率 (硬X射线)	目前没有开发
最大优势	方便大阵列复用
主要短板	能量分辨率低； 能量上限低



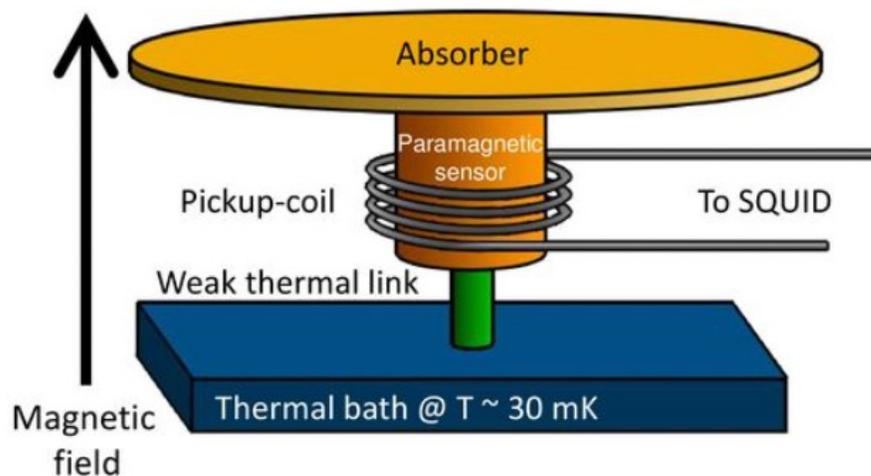
原理

能量分辨率
(软X射线)

能量分辨率
(硬X射线)

最大优势

主要短板



metallic magnetic
calorimeter
(MMC)

顺磁材料中磁通量的
变化

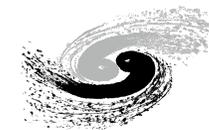
~ 1eV

暂无实测，但理论预
测值很好

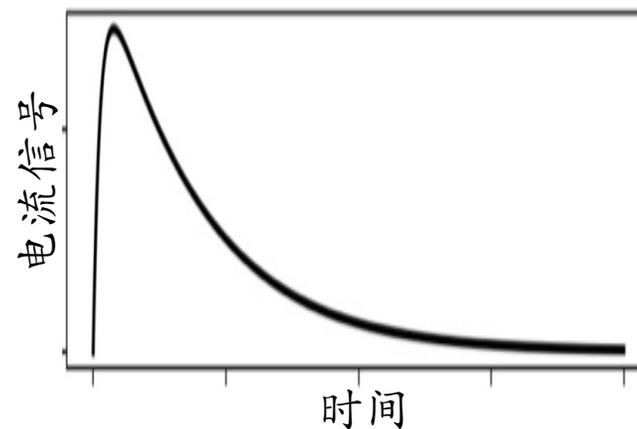
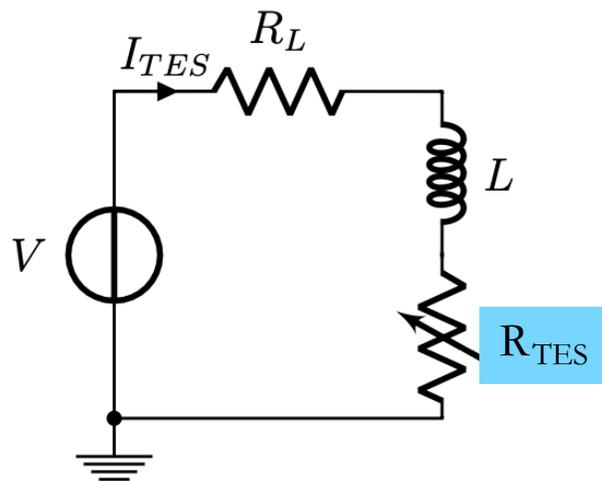
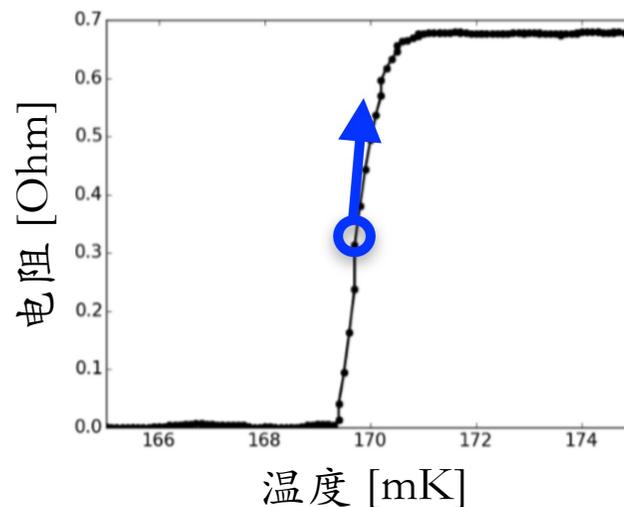
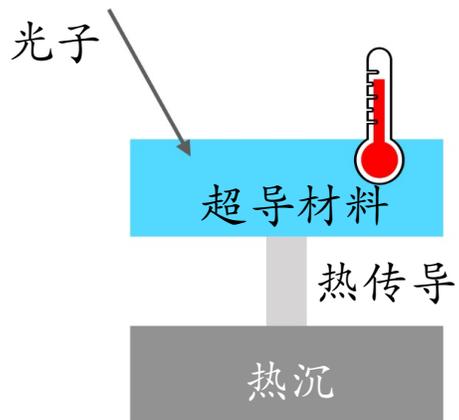
能量分辨率高；
能量覆盖范围大

复用发展不成熟

超导探测器简介

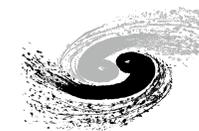


原理
能量分辨率 (软X射线)
能量分辨率 (硬X射线)
最大优势
主要短板

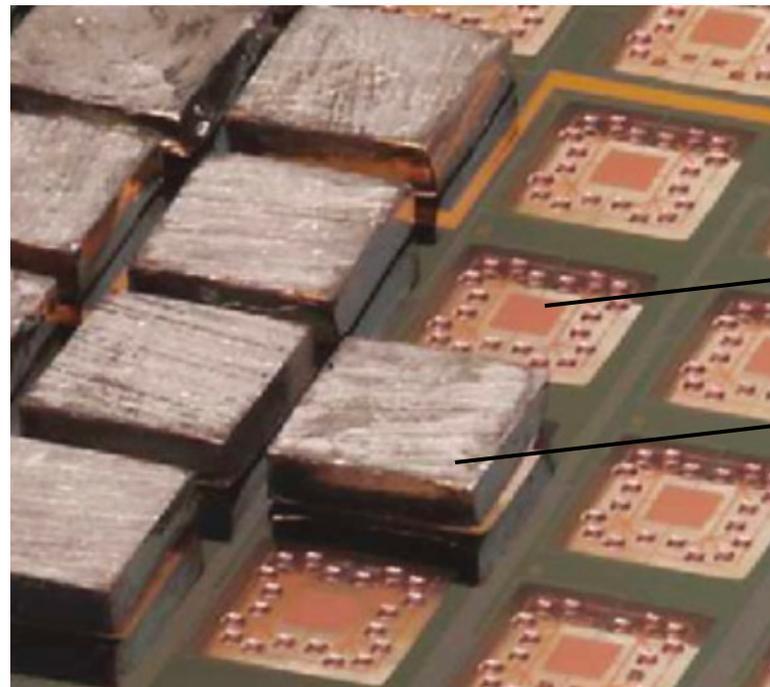
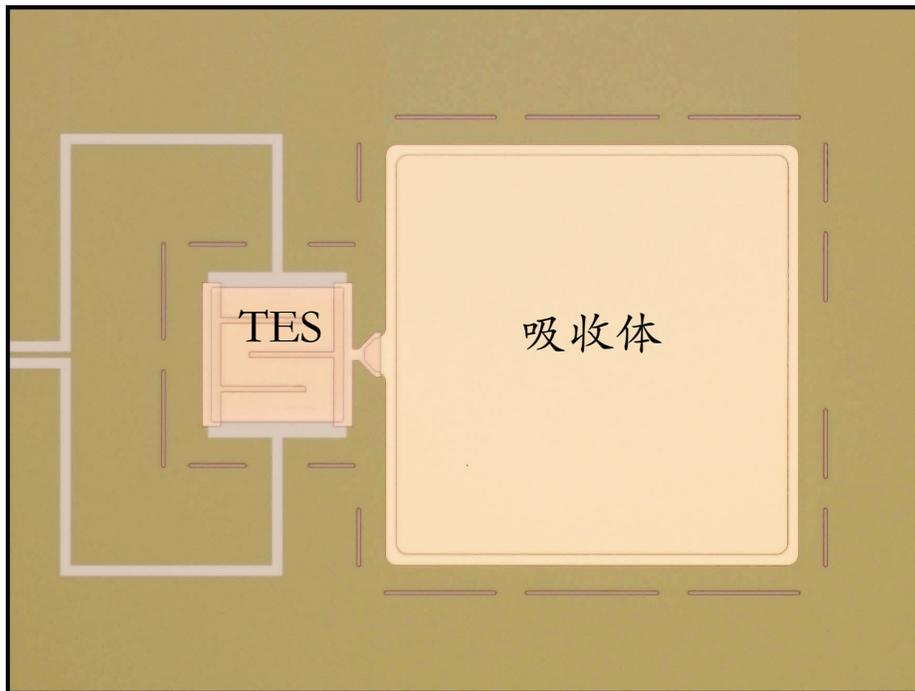
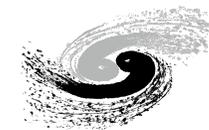


transition-edge sensor (TES)
光子热效应引发电阻变化
~1eV
5 eV @ 17 keV
能量分辨率高； 复用技术较为成熟
能量覆盖范围小于MMC

超导探测器简介

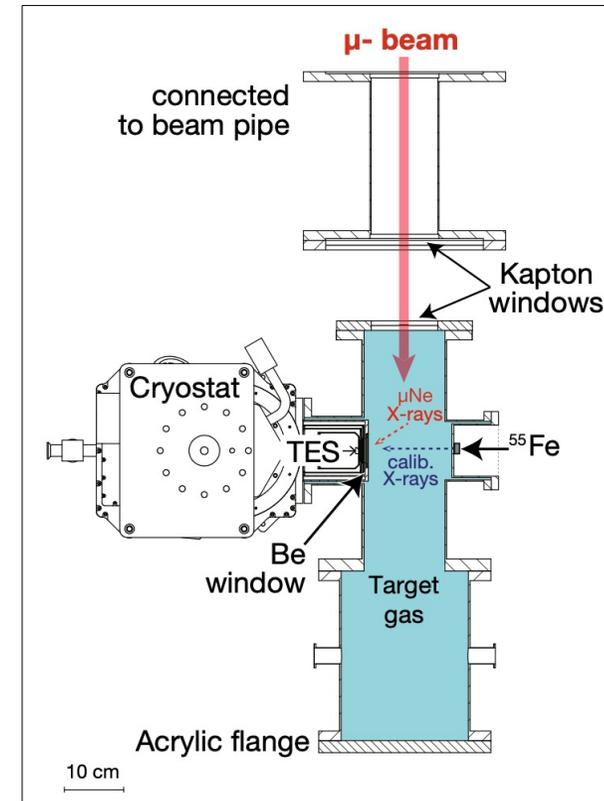
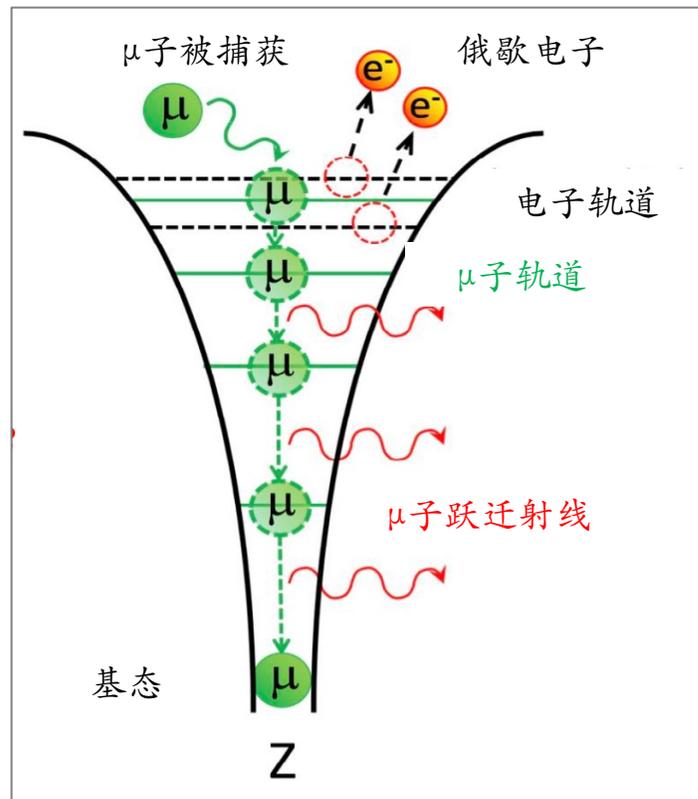
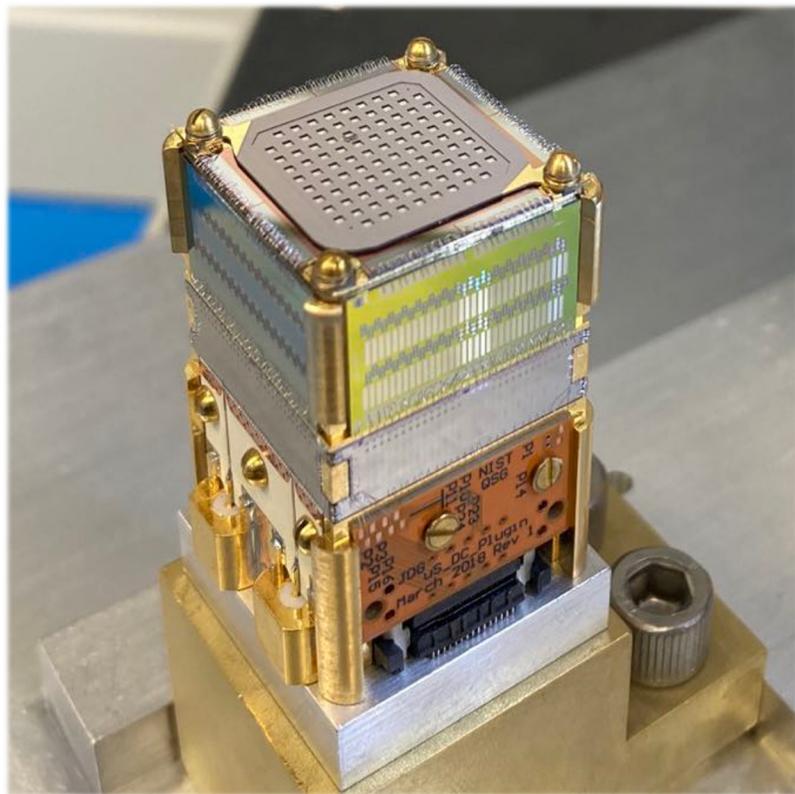


	superconducting tunnel junction (STJ)	microwave kinetic inductance detectors (MKID)	metallic magnetic calorimeter (MMC)	transition-edge sensor (TES)
原理	隧穿电流大小正比于光子激发的准粒子数	准粒子密度变化影响超导LC电路的共振频率	顺磁材料中磁通量的变化	光子热效应引发电阻变化
能量分辨率 (软X射线)	~ 10 eV	几十eV	~ 1eV	~1eV
能量分辨率 (硬X射线)	材料过薄, X射线吸收率低	目前没有开发	暂无实测, 但理论预测值很好	5 eV @ 17 keV
最大优势	计数效率极高: 10^4 /秒	方便大阵列复用	能量分辨率高; 能量覆盖范围大	能量分辨率高; 复用技术较为成熟
主要短板	能量分辨率略差; 能量上限低	能量分辨率低; 能量上限低	复用发展不成熟	能量覆盖范围小于MMC



Bennett *et al.* Rev. Sci. Instrum. **83**, 093113 (2012)

硬X射线TES研发及应用: QED



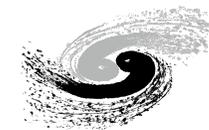
Daikang Yan et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31**, 2100505 (2021).

Daikang Yan et al. *J. Low Temp. Phys.* **209**, 271-277 (2022)

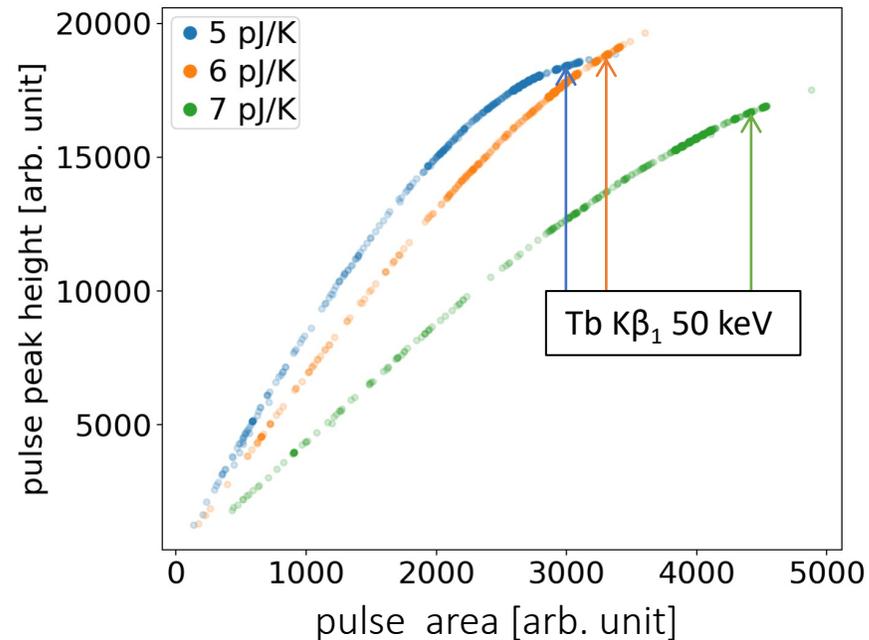
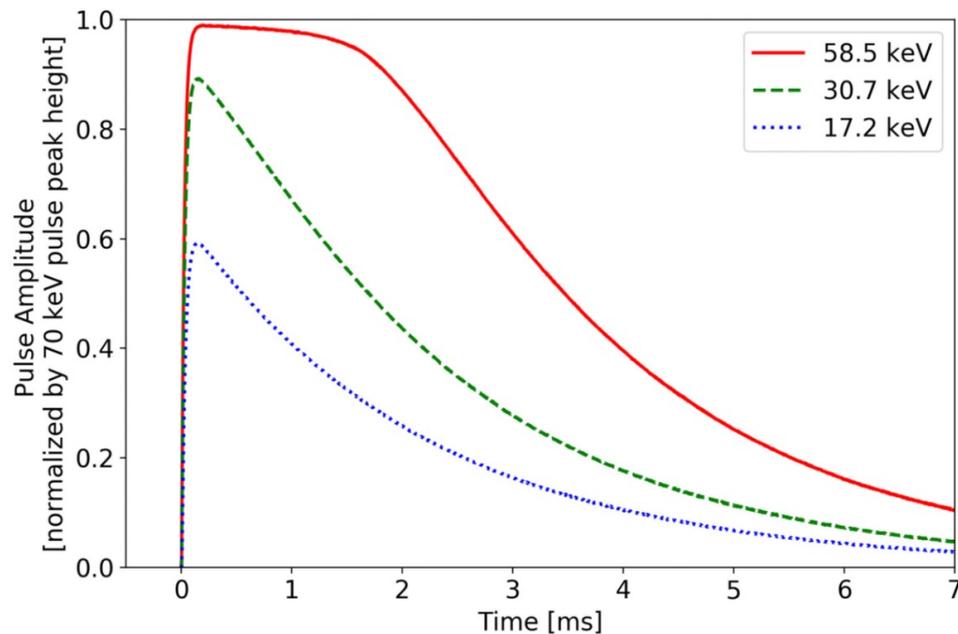
Picture credit: T. Okumura, RIKEN

J-PARC: 预计2024年2月取数

硬X射线TES研发及应用: QED

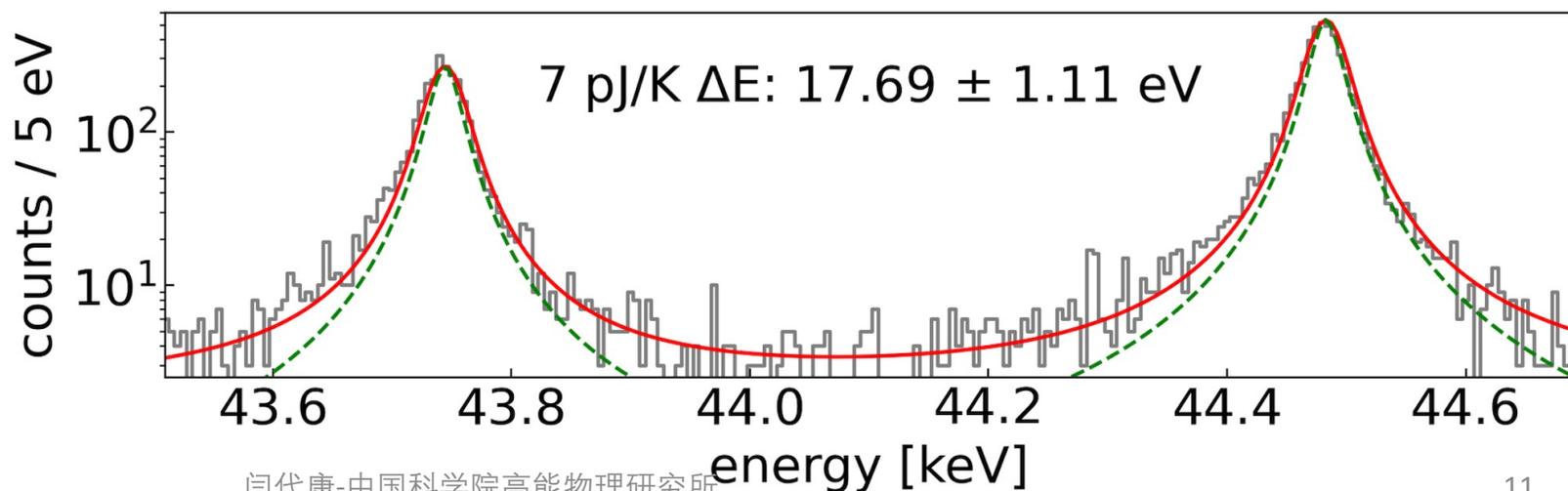


线性度

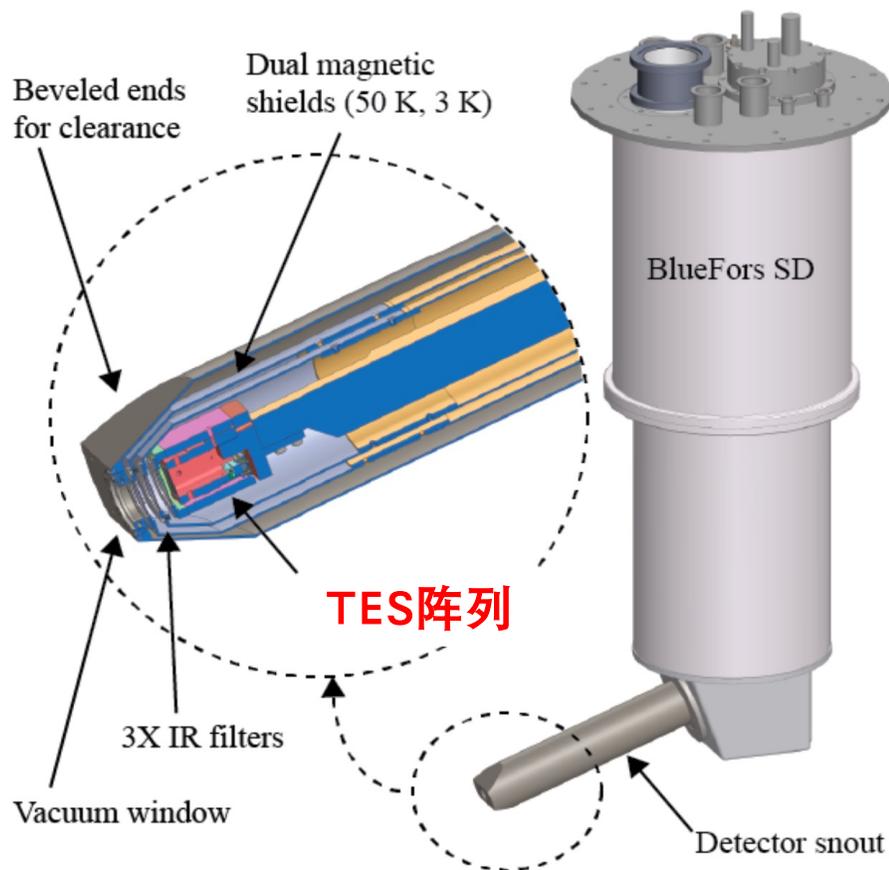


能量分辨率

TES: $\Delta E < 20$ eV @ 44keV
HPGe: 1.2 keV @ 40 keV

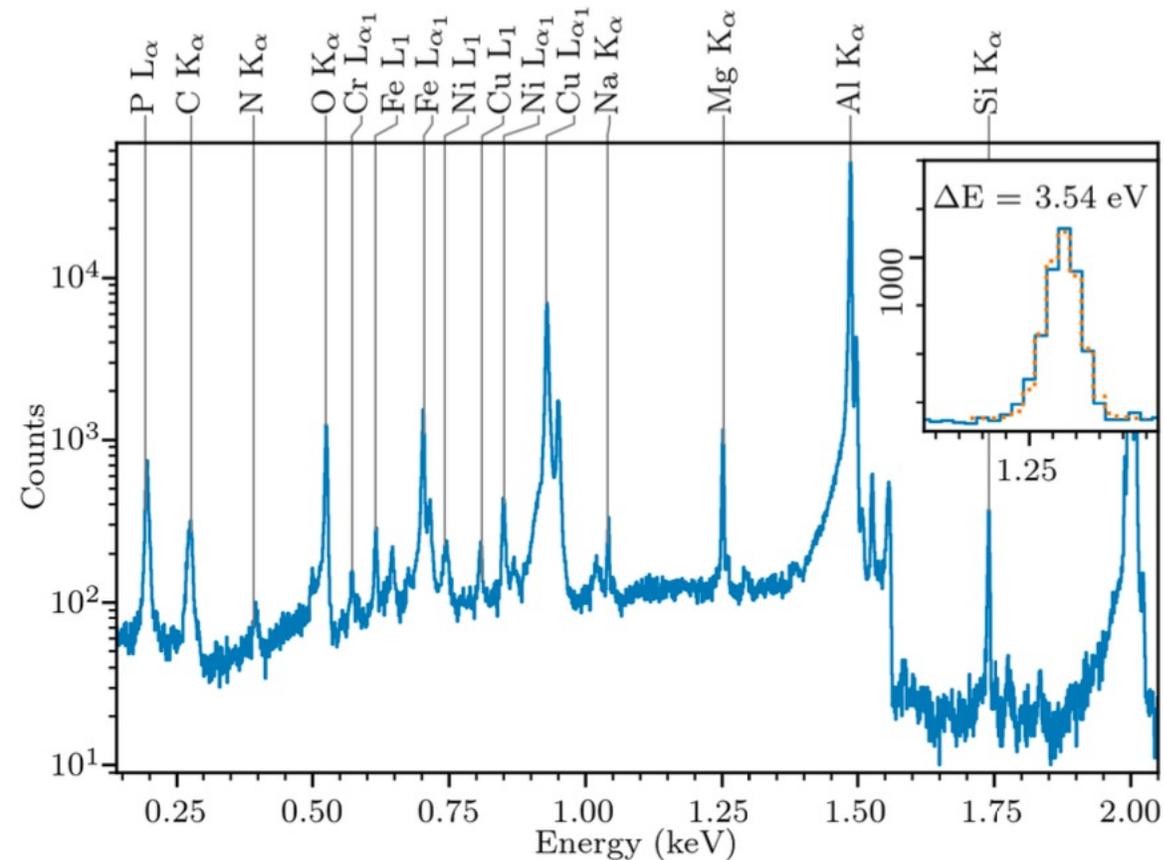
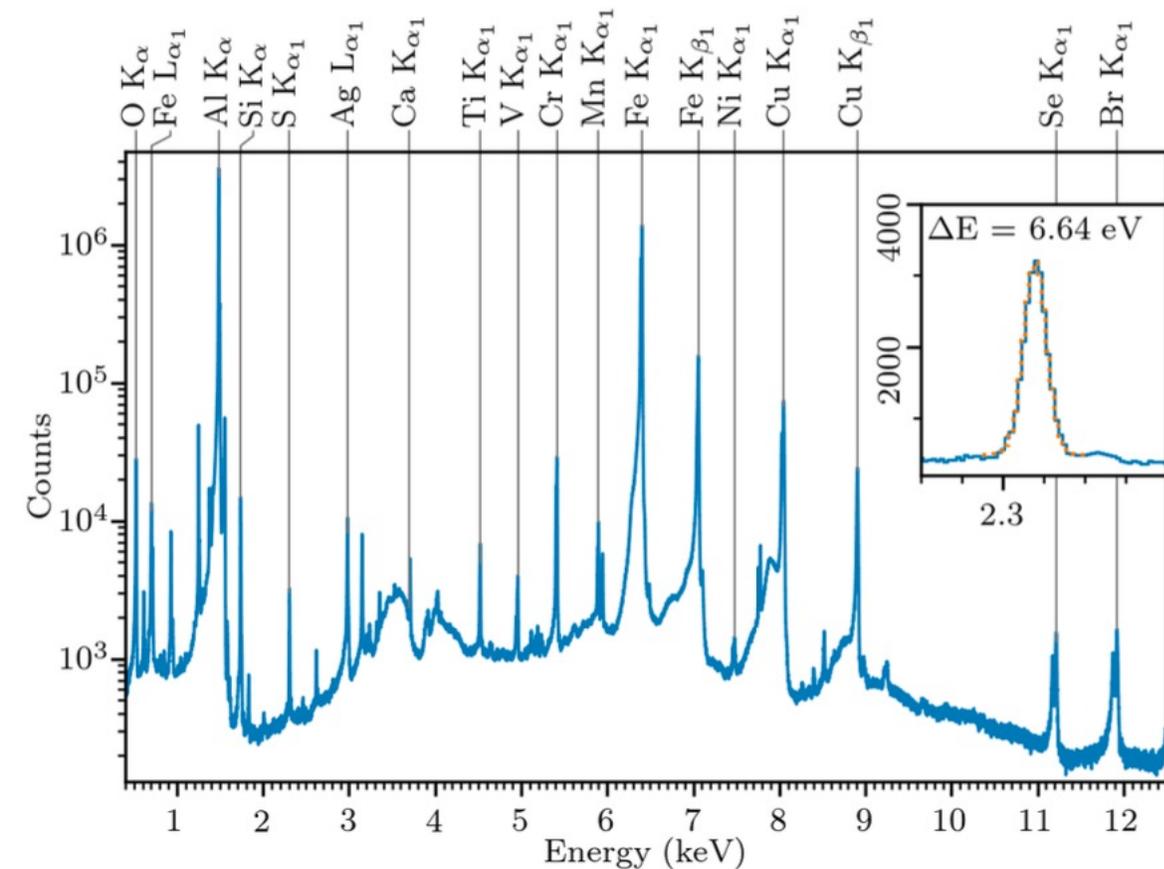
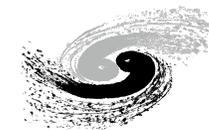


SEM: 高空间分辨率 + TES: 高能量分辨率



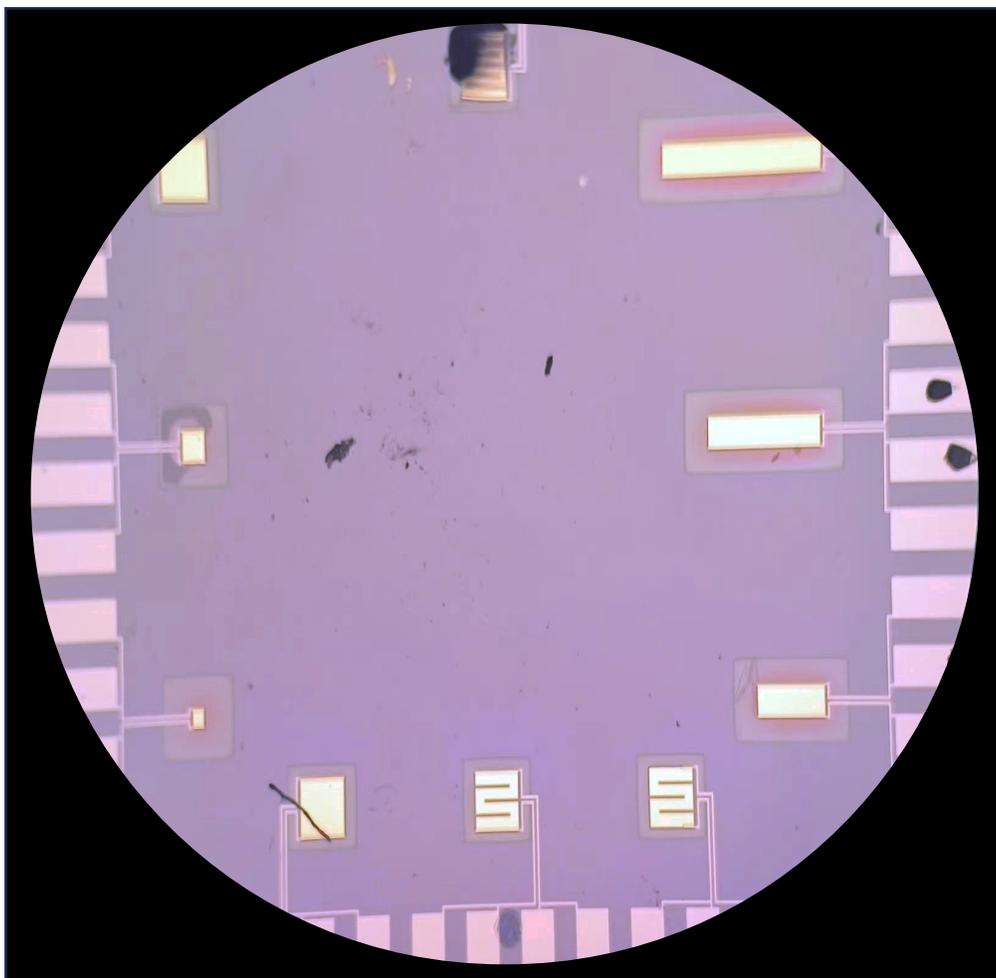
Matthew H. Carpenter *et al.* *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31**, 2102206 (2021).

硬X射线TES研发及应用：SEM



分辨率比硅探测器高20倍

Matthew H. Carpenter *et al.* *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31**, 2102206 (2021).



- 已完成第一批TES样品的加工和部分测试，其热学、电学参数符合设计值
- 将针对第二批样品进行超导参数的调控、能量段的拓展、分辨率的优化

项目目标（到2025年）

1. 在20 keV ~ 50 keV能量段，实现 $E/\Delta E > 300$ 的能量分辨率；
2. 在50 keV ~ 100 keV的能量段，实现 $E/\Delta E > 200$ 的能量分辨率。

北京市科技新星，“硬X射线超导相变边缘探测器”项目，2022-2025，40万，主持

应用领域:

1. 高能同步辐射光源（国际上已安装TES的有SSRL、APS、BESSY等）
2. 科研院所、高校实验室，高精度、低剂量样品检测
3. 放射性核素精确检测（美国NIST、意大利INFN等计量院所）

欢迎合作！ yandk@ihep.ac.cn, yandaikang@gmail.com, 13095698631

1. 对X射线、 γ 射线的高精度测量有需求的应用领域
2. 招研究生、博士后：超导探测器加工、研发、信号处理