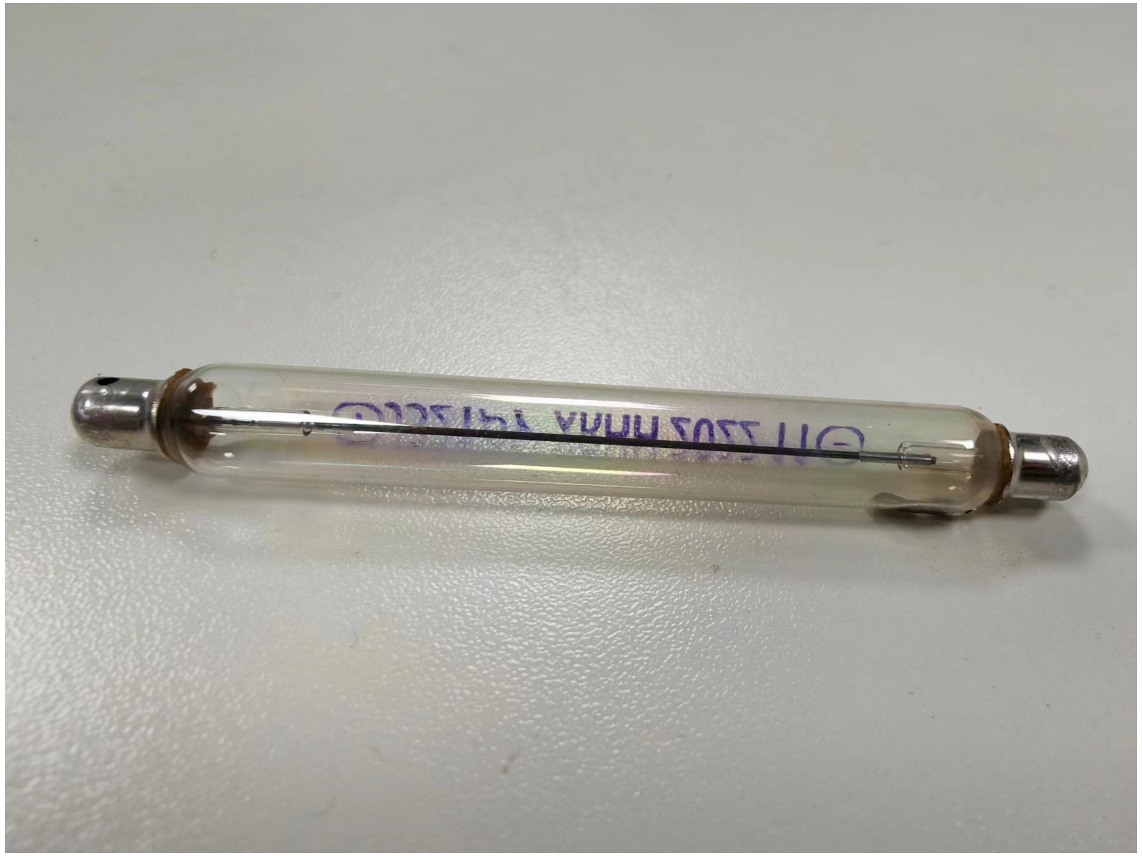
# 超导探测器的研发及应用

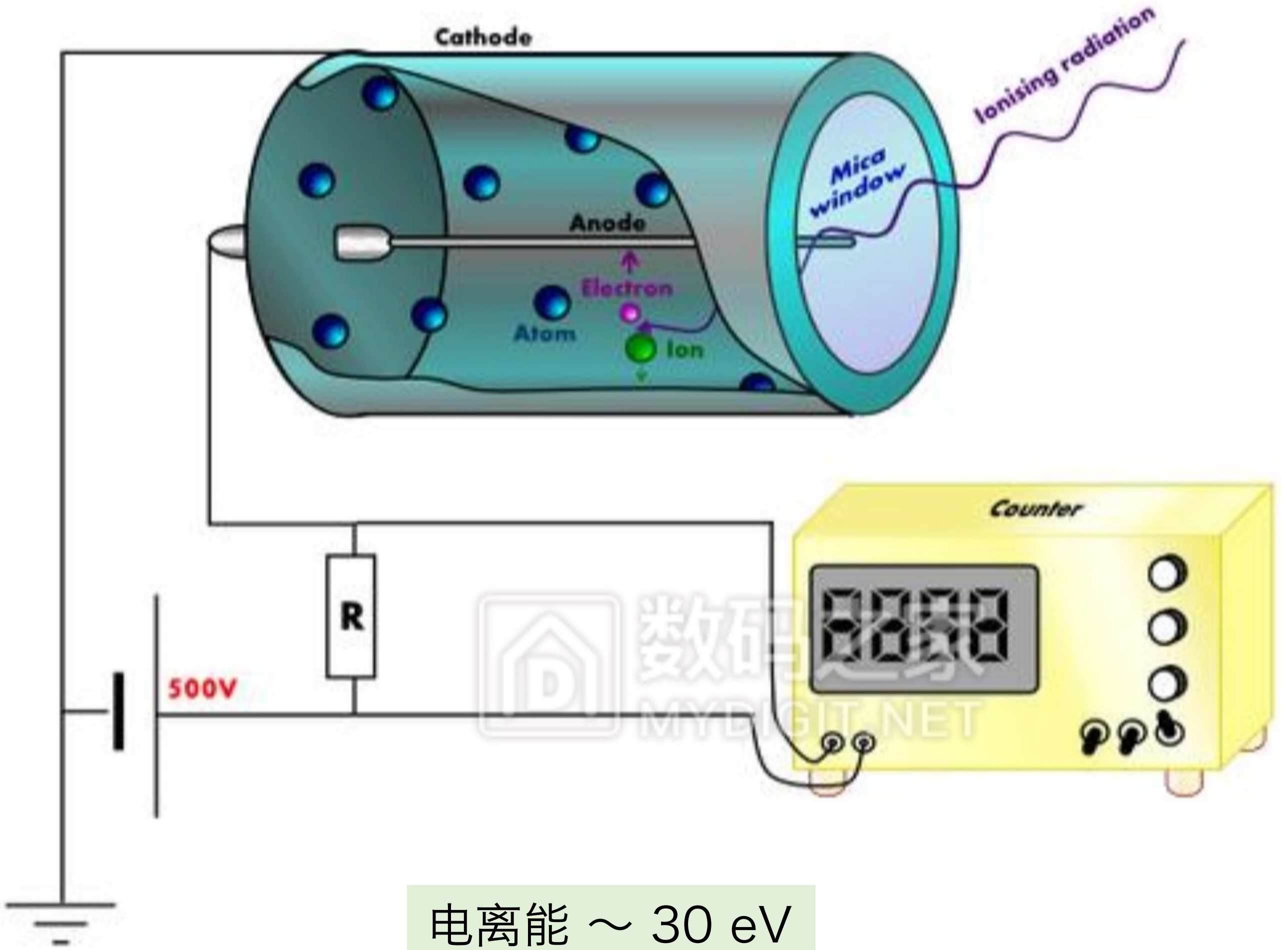
闫代康

2025-09

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

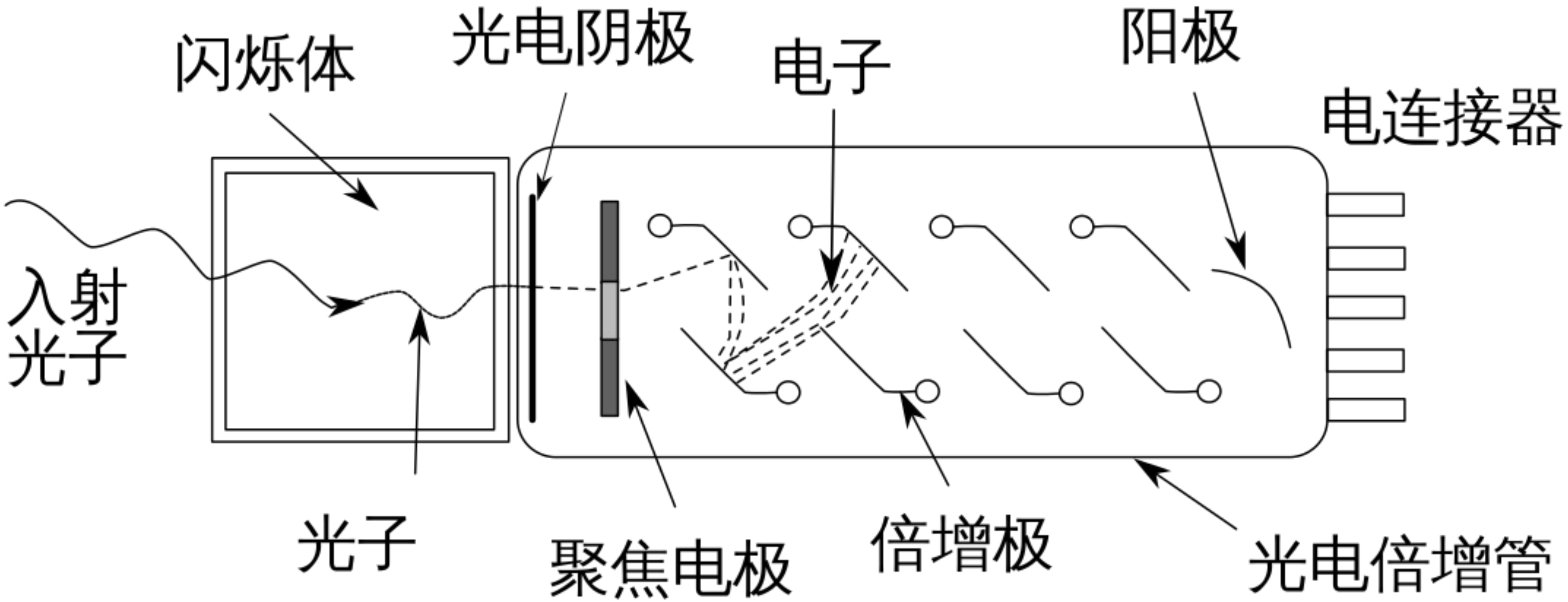
# 光子探测器：第一代 气体探测器 1920s






电离能 ～ 30 eV

# 光子探测器：第二代 闪烁体探测器 1940s



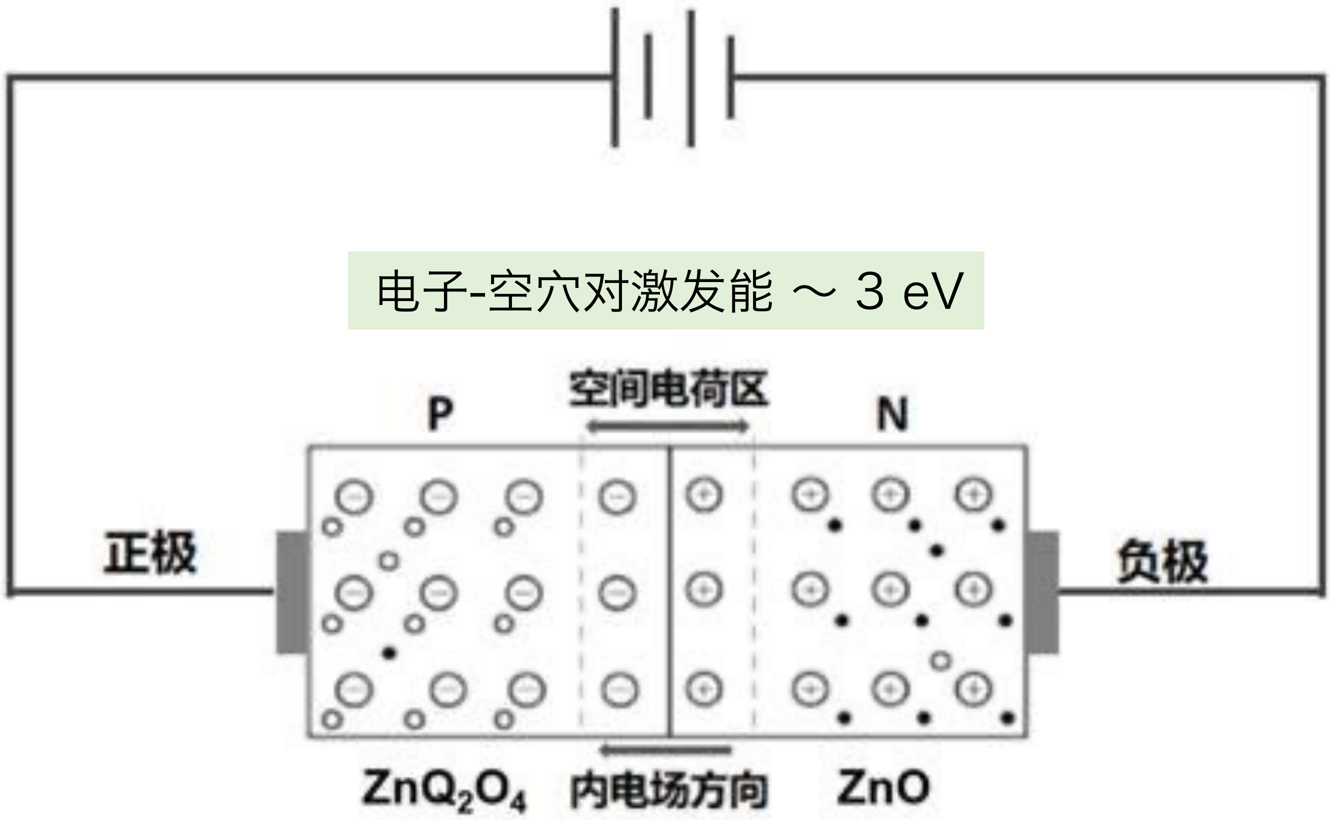

离子激发能 ～ 20 eV
光子能量 ～ 3 eV

能量分辨率 E/ΔE ~ 15

# 光子探测器：第三代 半导体探测器 1950s



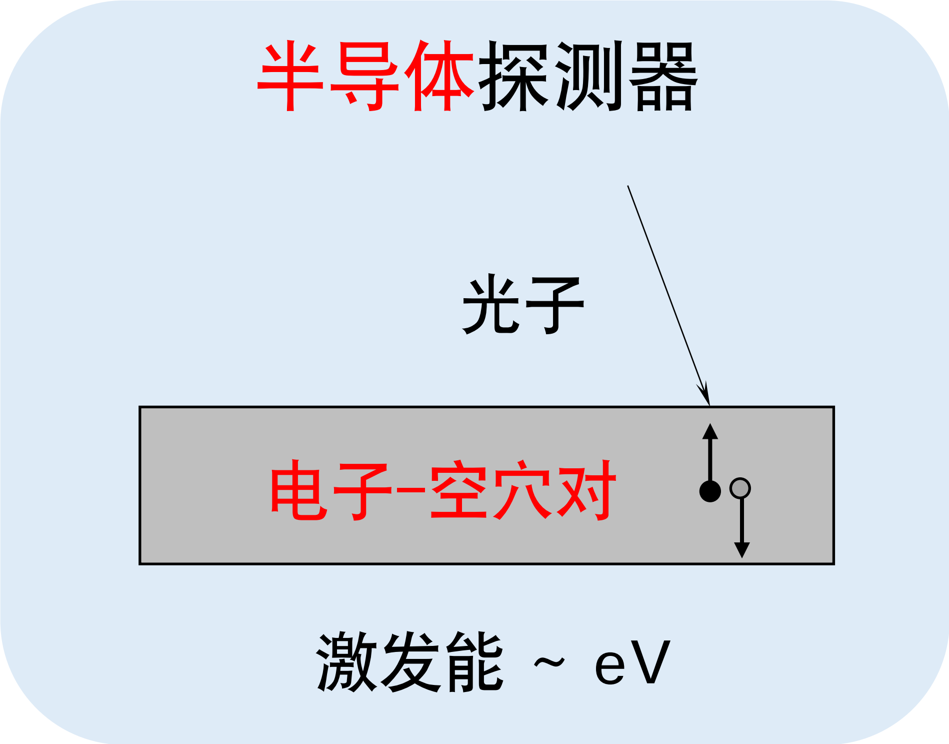
电子-空穴对激发能 ～ 3 eV



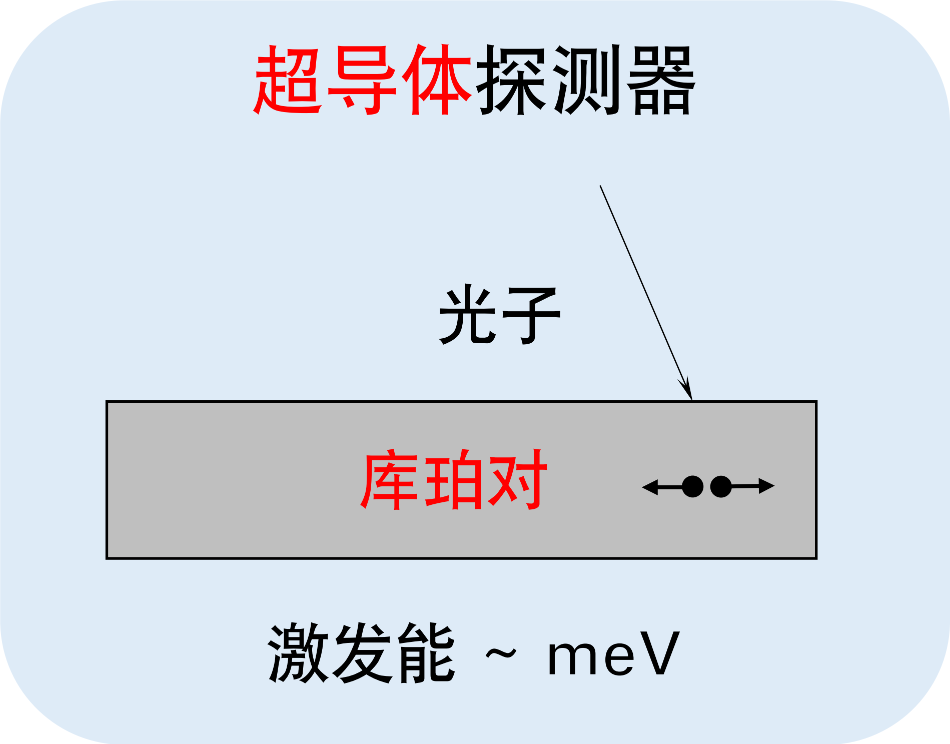

能量分辨率 E/ΔE ~ 50

# 光子探测器：第四代 超导体探测器 1990s



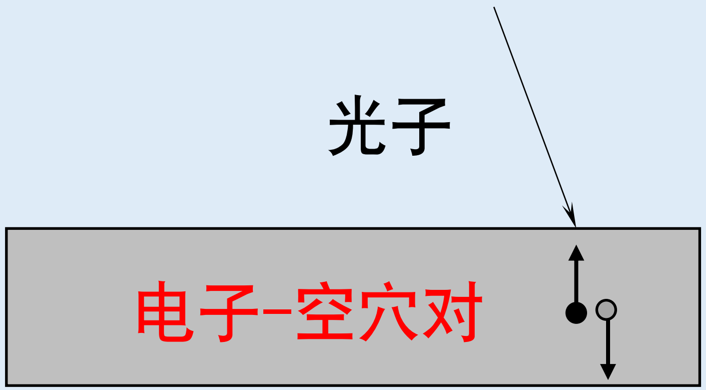



vs.



# 光子探测器：第四代 超导体探测器 1990s

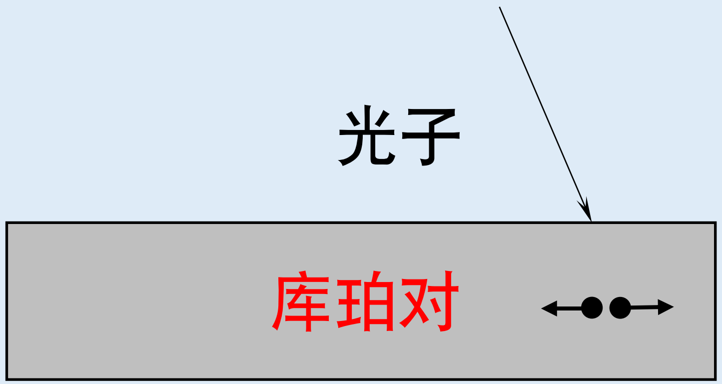
## 半导体探测器




激发能 ~ eV

vs.

## 超导体探测器




激发能 ~ meV

10 keV → 半导体： $10^4$个电子空穴对
超导体： $10^7$个库珀对

粒子涨落噪声 = $1/\sqrt{N}$ →

半导体： 0.01 → 分辨率 100 eV
超导体： 0.0003 → 分辨率 3 eV

# 超高分辨率意味着什么

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

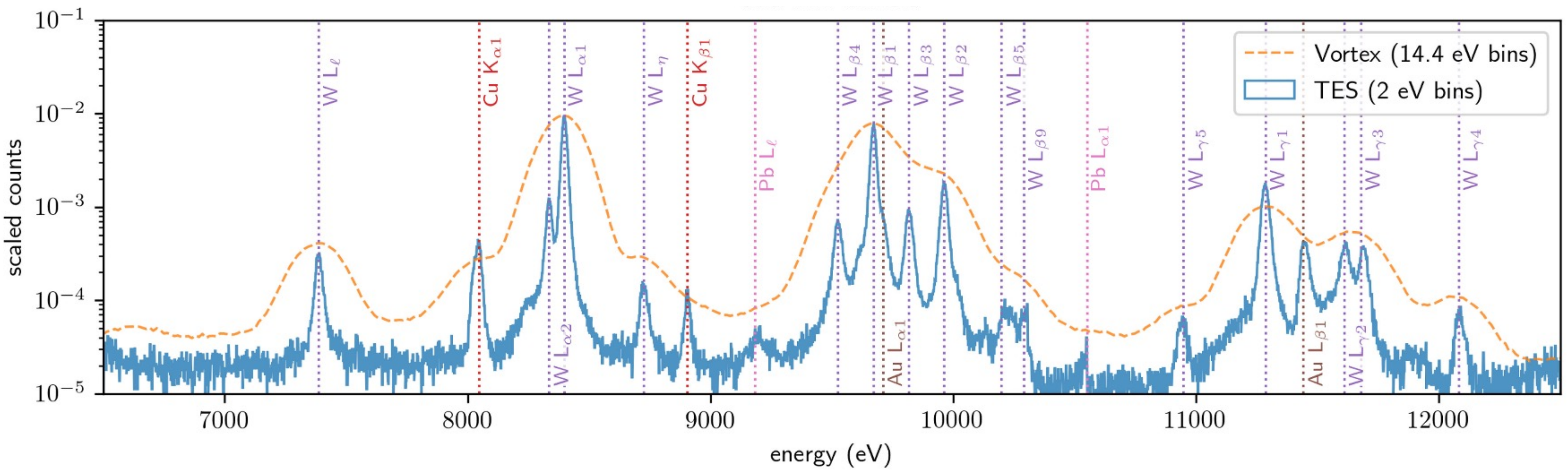



Fig. 3. Fluorescence spectra of a 350 nm CMOS integrated circuit chip, measured with a TES sensor (blue solid line) and a Vortex silicon-drift detector (orange dashed line). Prominent peaks are labeled with their corresponding element and line name.

Tejas Guruswamy et al. (2021)

硅探测器 ΔE = 130 eV

超导探测器 ΔE = 12 ~ 15 eV

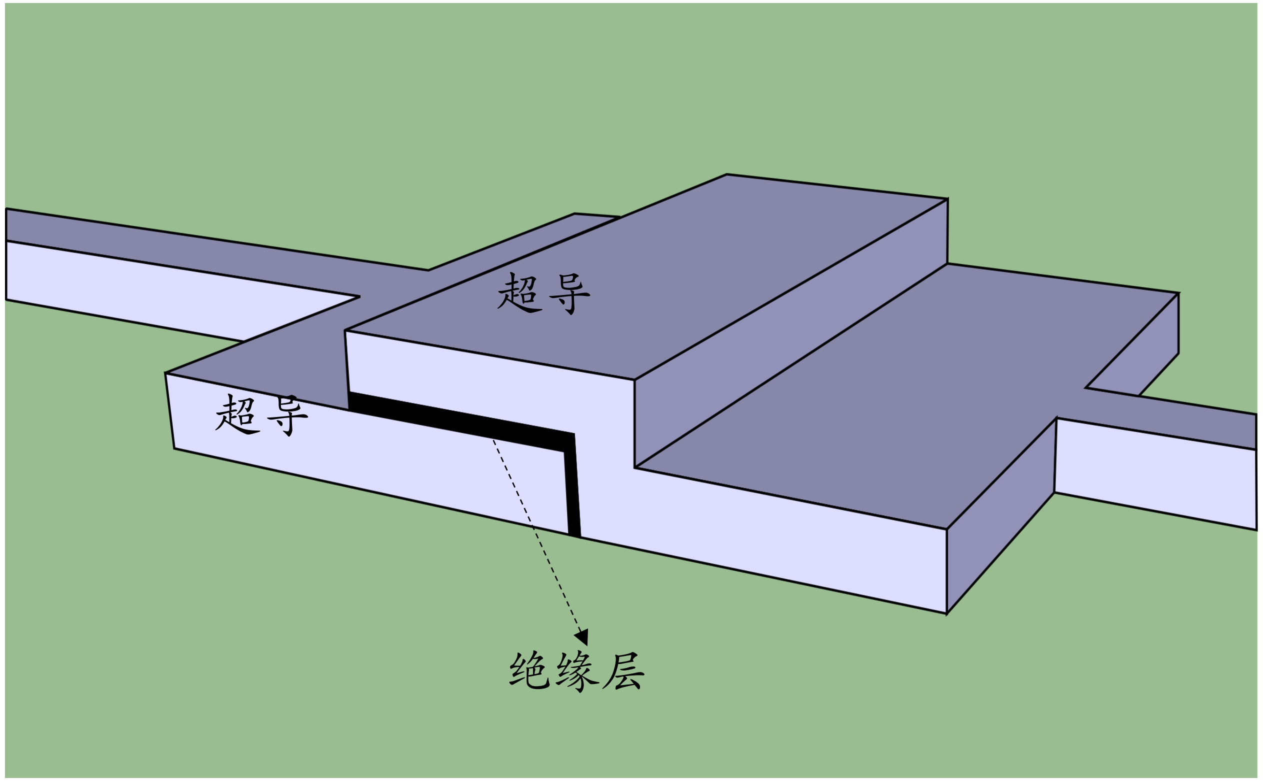
# 超导探测器概览



| | superconducting tunnel junction (STJ) 超导隧穿结 | kinetic inductance detectors (KID) 动态电感探测器 | metallic magnetic calorimater (MMC) 金属磁性量能器 | transition-edge sensor (TES) 超导转变边沿探测器 |
|---|---|---|---|---|
| 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 | 40 eV @ 60 keV | 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 |

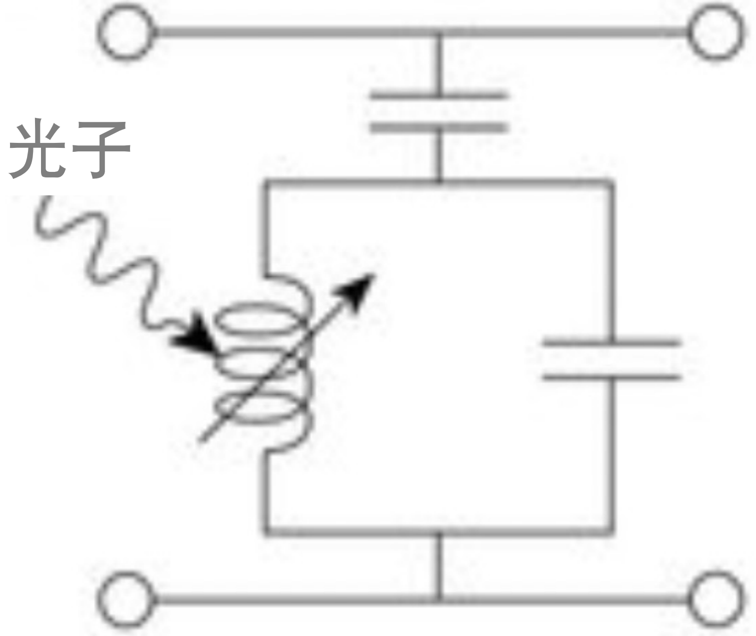
# 超导探测器概览

| | superconducting tunnel junction (STJ) 超导隧穿结 |
|---|---|
| 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） | ~ 10 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：$10^4$/秒 |
| 主要短板 | 能量分辨率略差；能量上限低 |



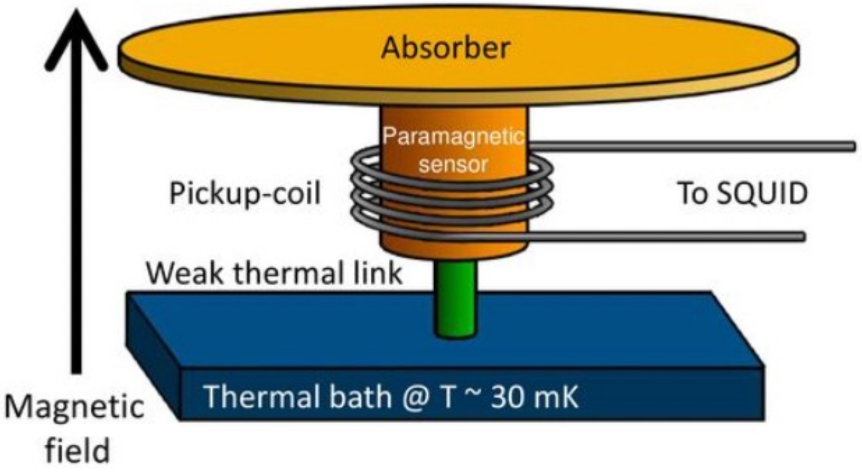
# 超导探测器概览

| | kinetic inductance detectors (KID) 动态电感探测器 |
|---|---|
| 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 |



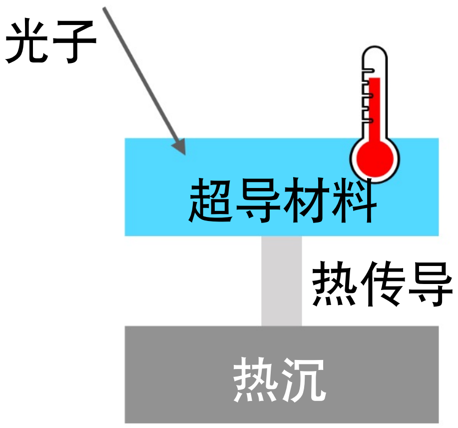
# 超导探测器概览

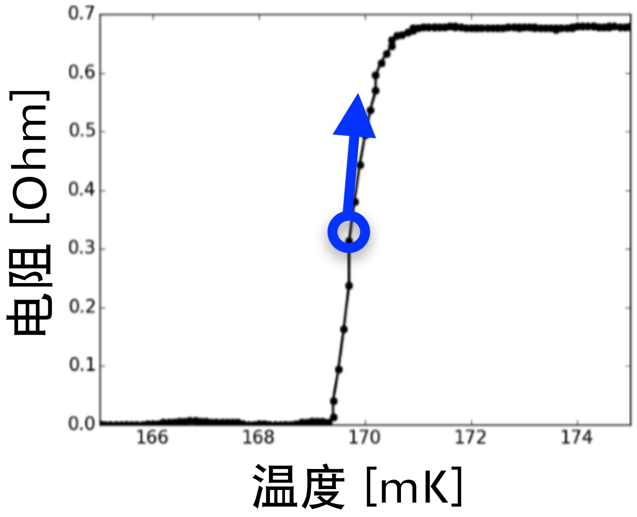
| | metallic magnetic calorimater (MMC) 金属磁性量能器 |
|---|---|
| 原理 | 顺磁材料中磁通量的变化 |
| 能量分辨率（软X射线） | ~ 1eV |
| 能量分辨率（硬X射线） | 40 eV @ 60 keV |
| 最大优势 | 能量分辨率高；能量覆盖范围大 |
| 主要短板 | 复用发展不成熟 |

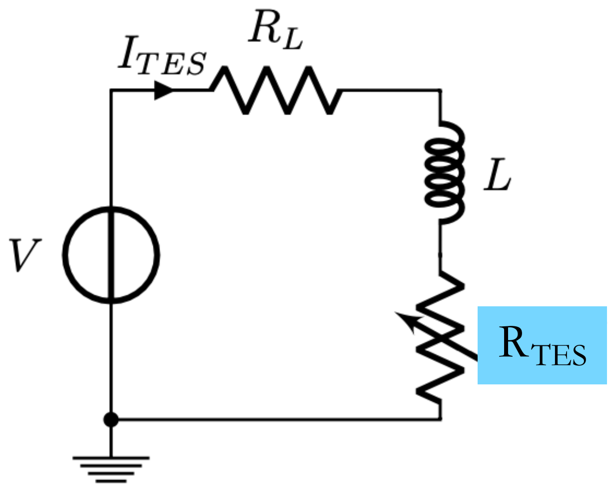


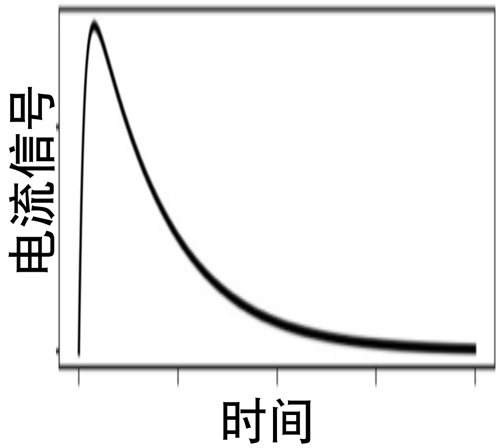
# 超导探测器概览

| | transition-edge sensor (TES) 超导转变边沿探测器 |
| --- | --- |
| 原理 | 光子热效应引发电阻变化 |
| 能量分辨率（软X射线） | ~1eV |
| 能量分辨率（硬X射线） | 5 eV @ 17 keV |
| 最大优势 | 能量分辨率高；复用技术较为成熟 |
| 主要短板 | 能量覆盖范围小于MMC |



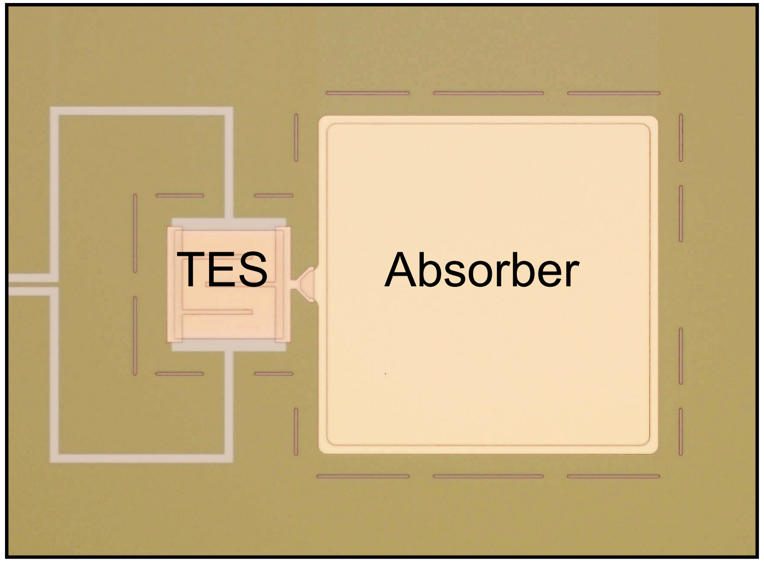



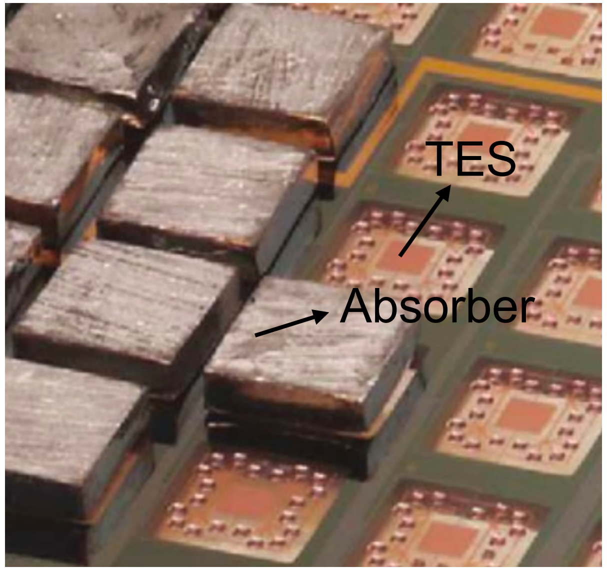



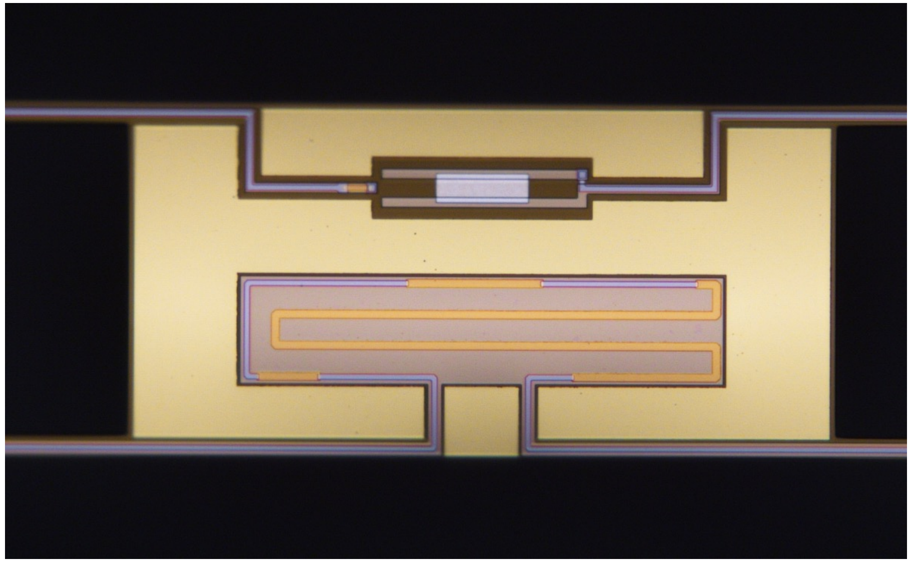



# TES: Transition-Edge Sensor





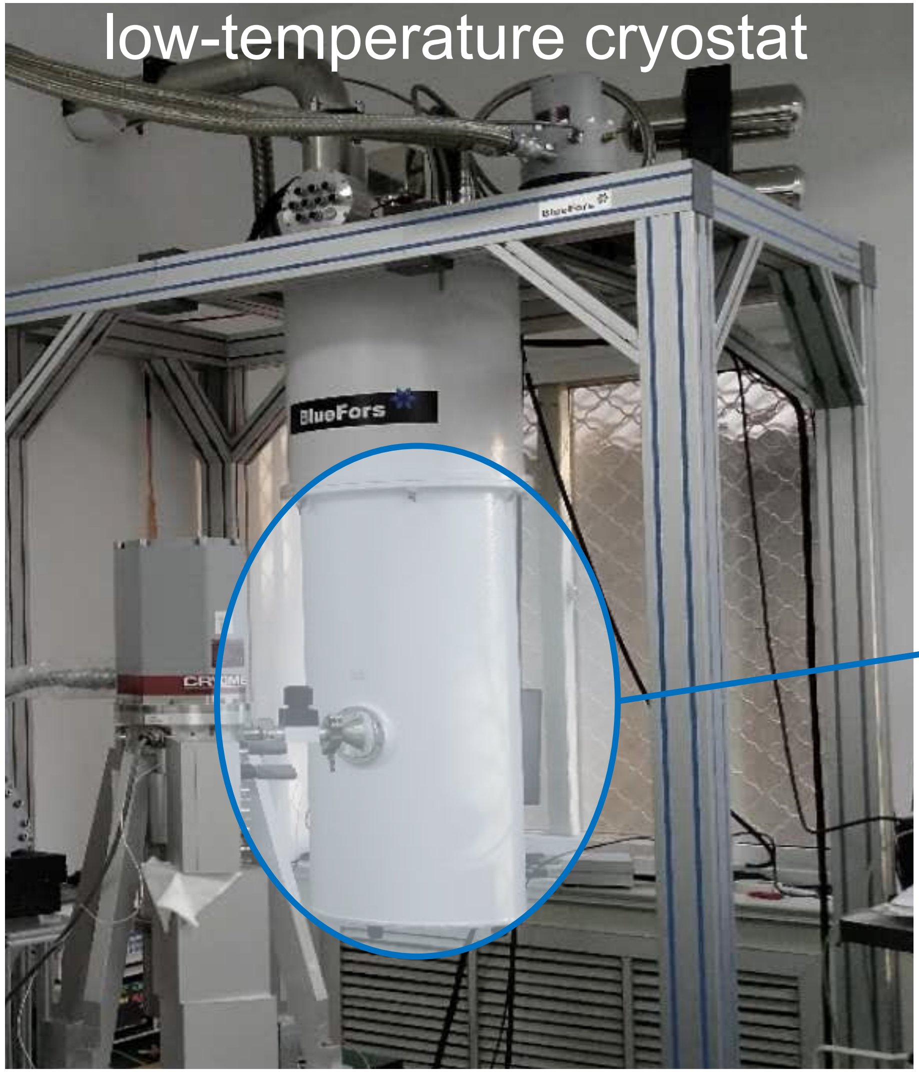
Bennett *et al.* Rev. Sci. Instrum. **83**, 093113 (2012)

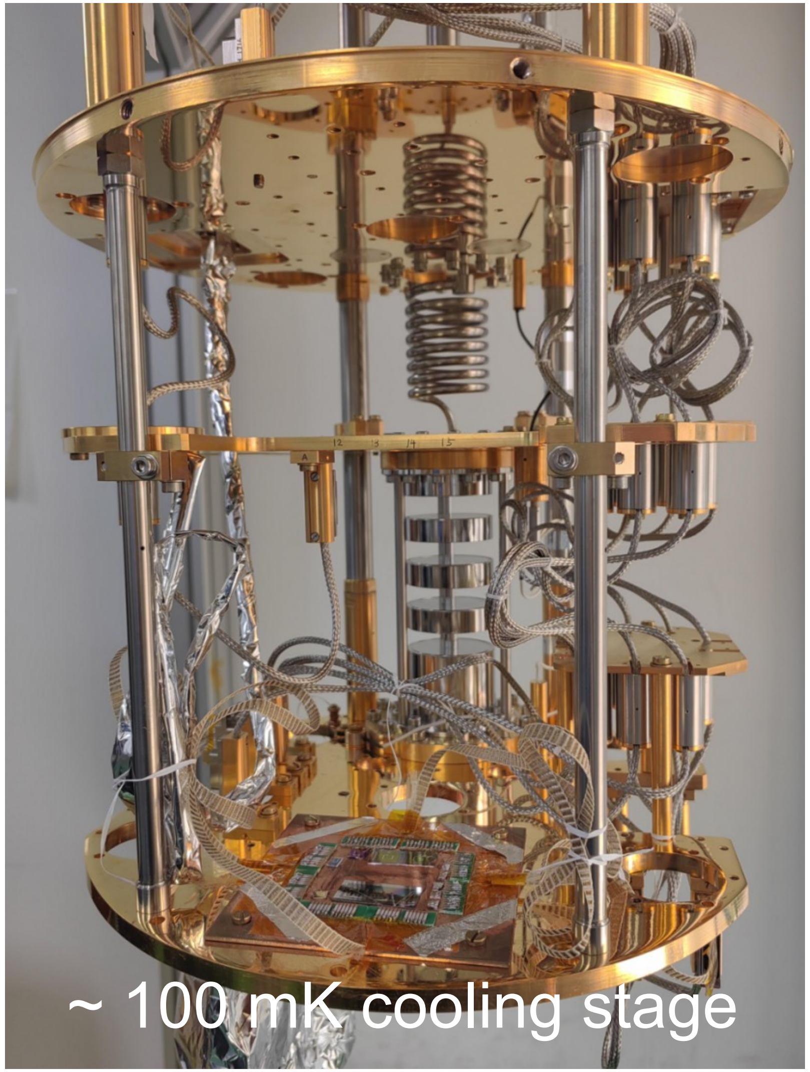
# TES: Transition-Edge Sensor



# TES: Transition-Edge Sensor

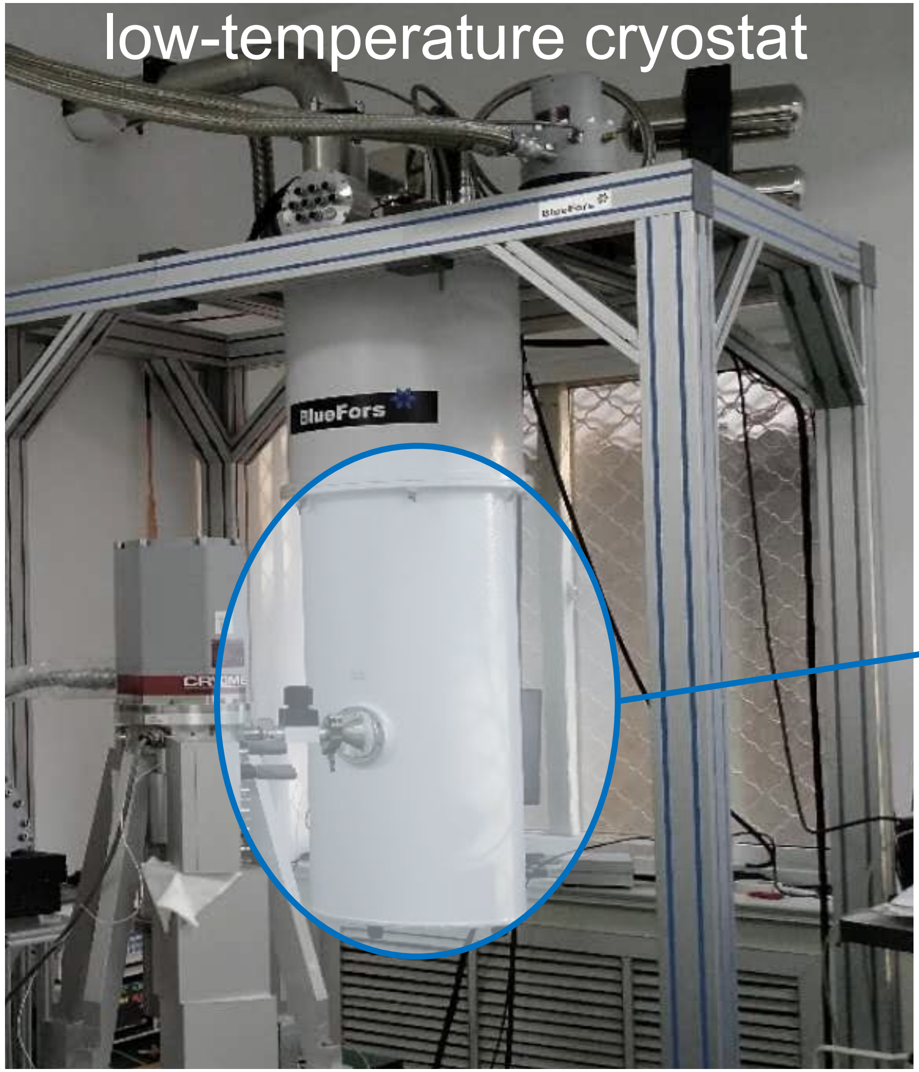


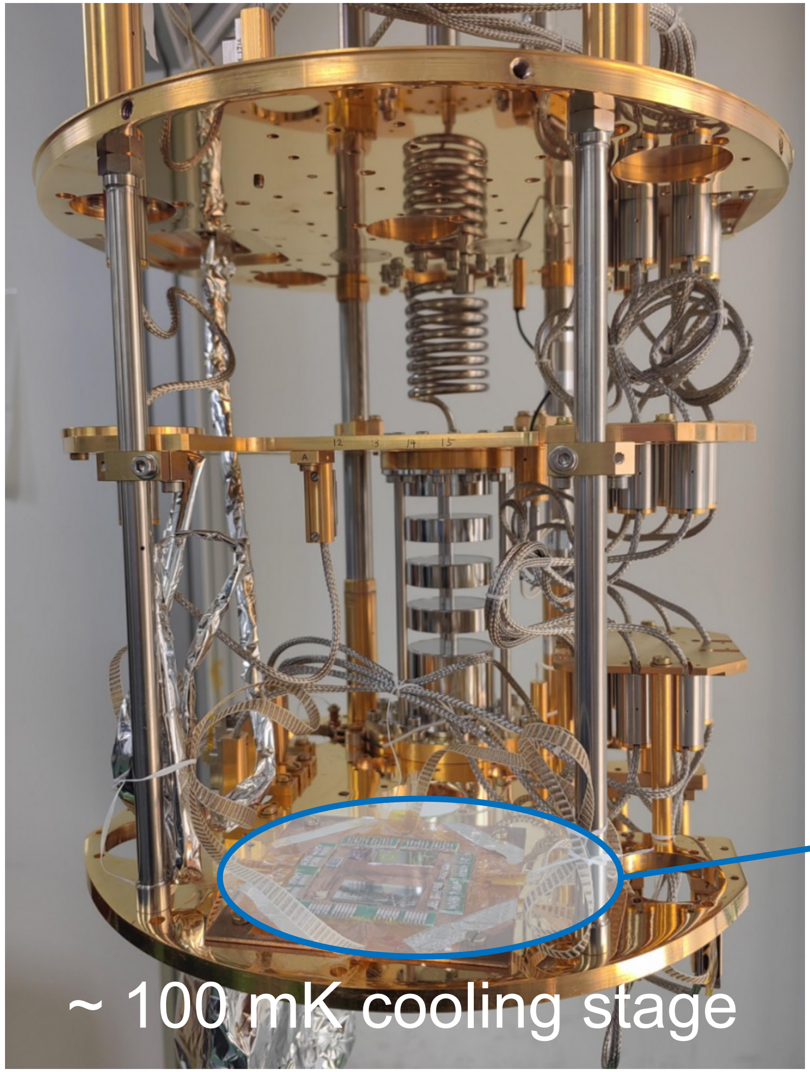


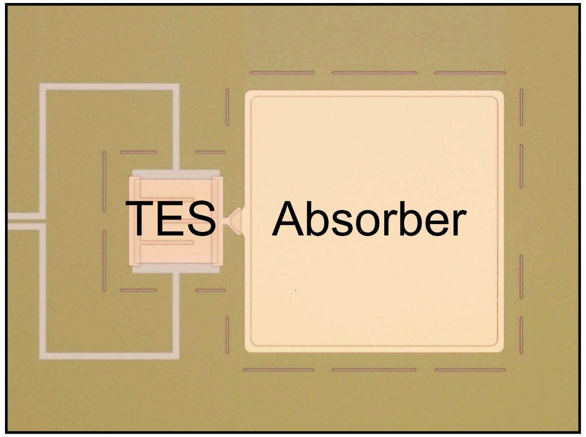



# TES: Transition-Edge Sensor

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

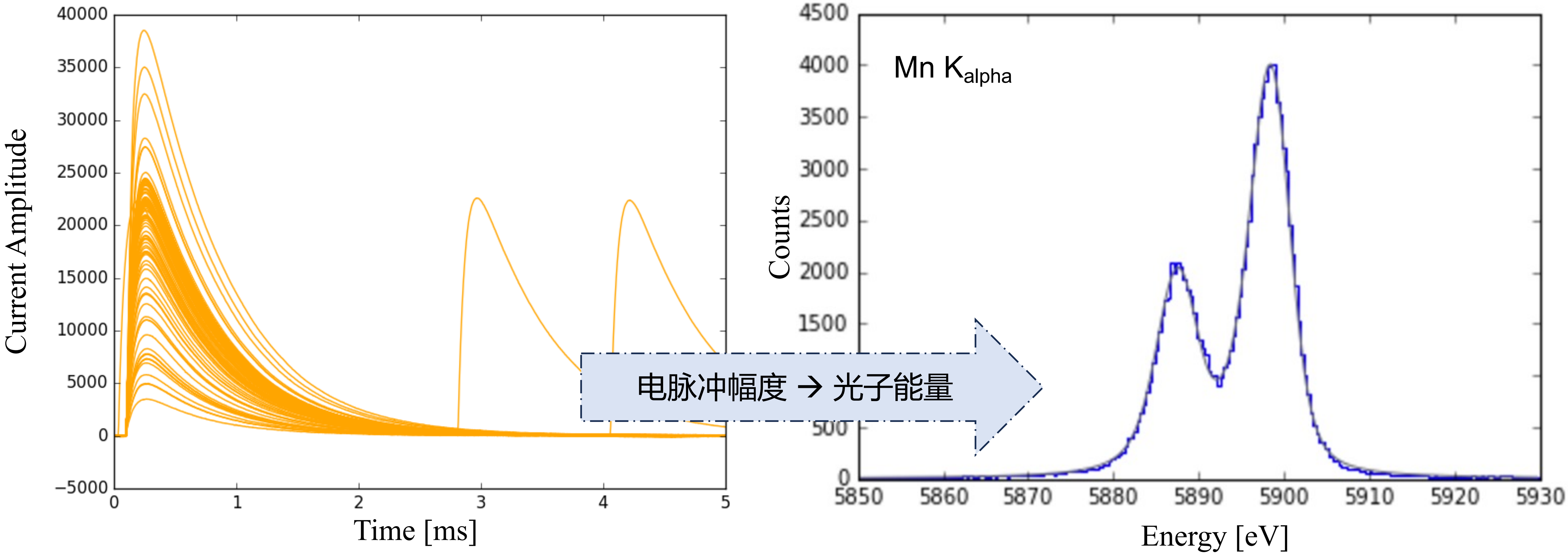


# TES测量光子能量




Current Amplitude
Time [ms]
Counts
Energy [eV]
Mn $K_{alpha}$
电脉冲幅度 → 光子能量

# 应用一：X射线谱学

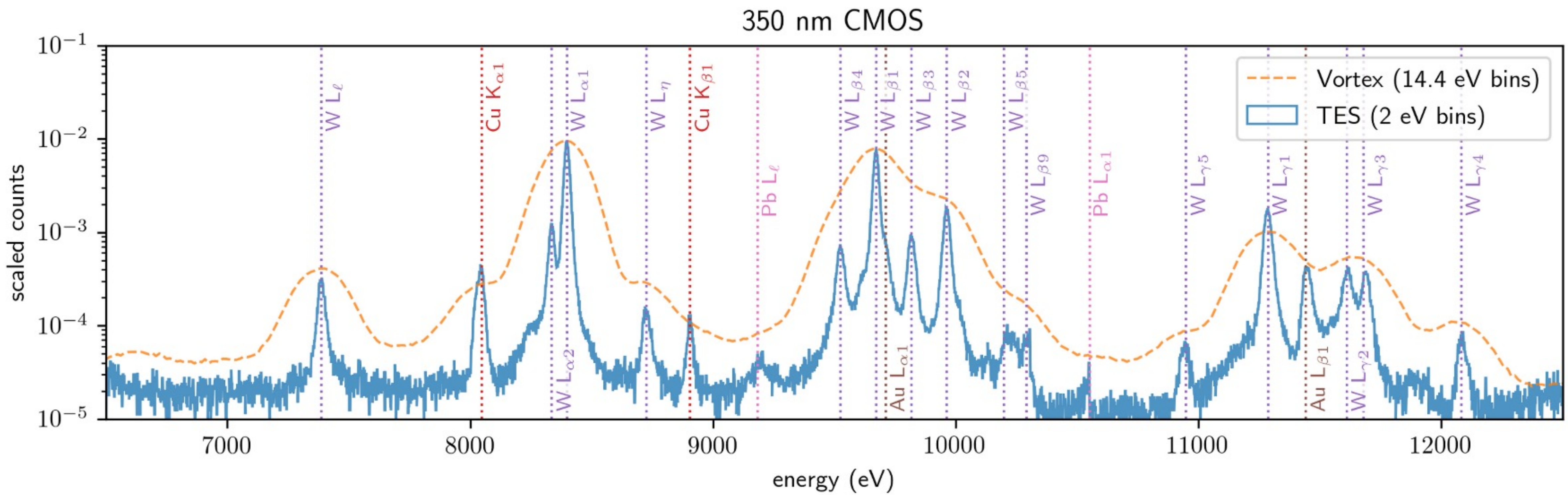



Fig. 3. Fluorescence spectra of a 350 nm CMOS integrated circuit chip, measured with a TES sensor (blue solid line) and a Vortex silicon-drift detector (orange dashed line). Prominent peaks are labeled with their corresponding element and line name.

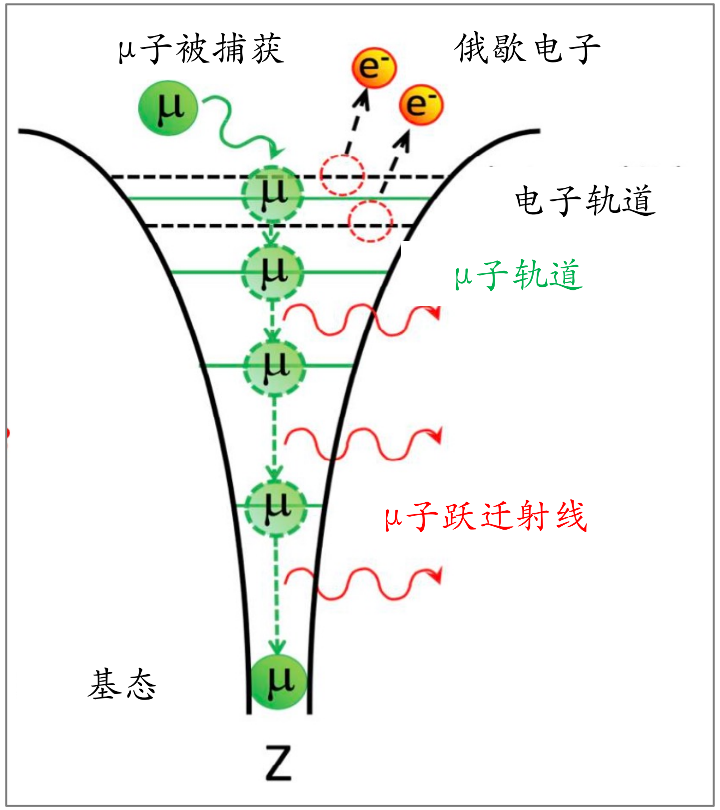
Tejas Guruswamy et al. (2021)

✓ 临近谱线

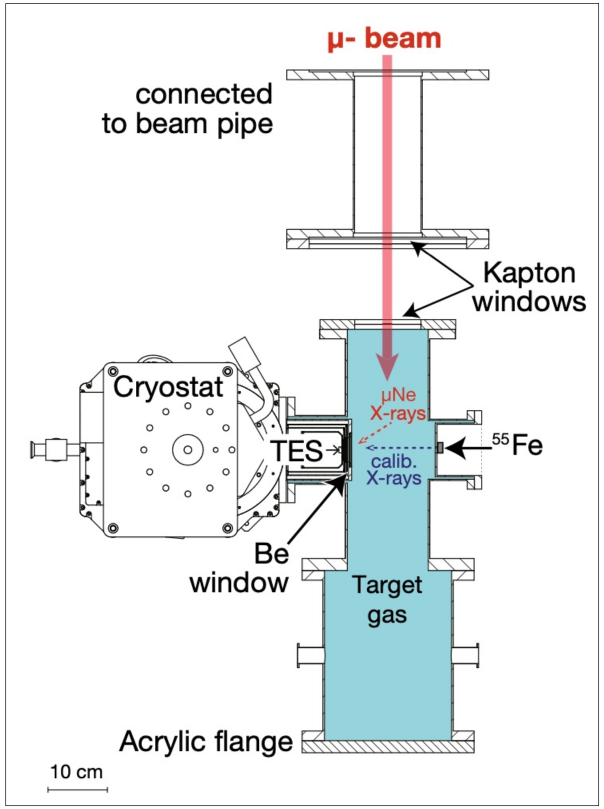
✓ 微含量元素

# 应用二：QED






Picture credit: T. Okumura, RIKEN




实验要求：

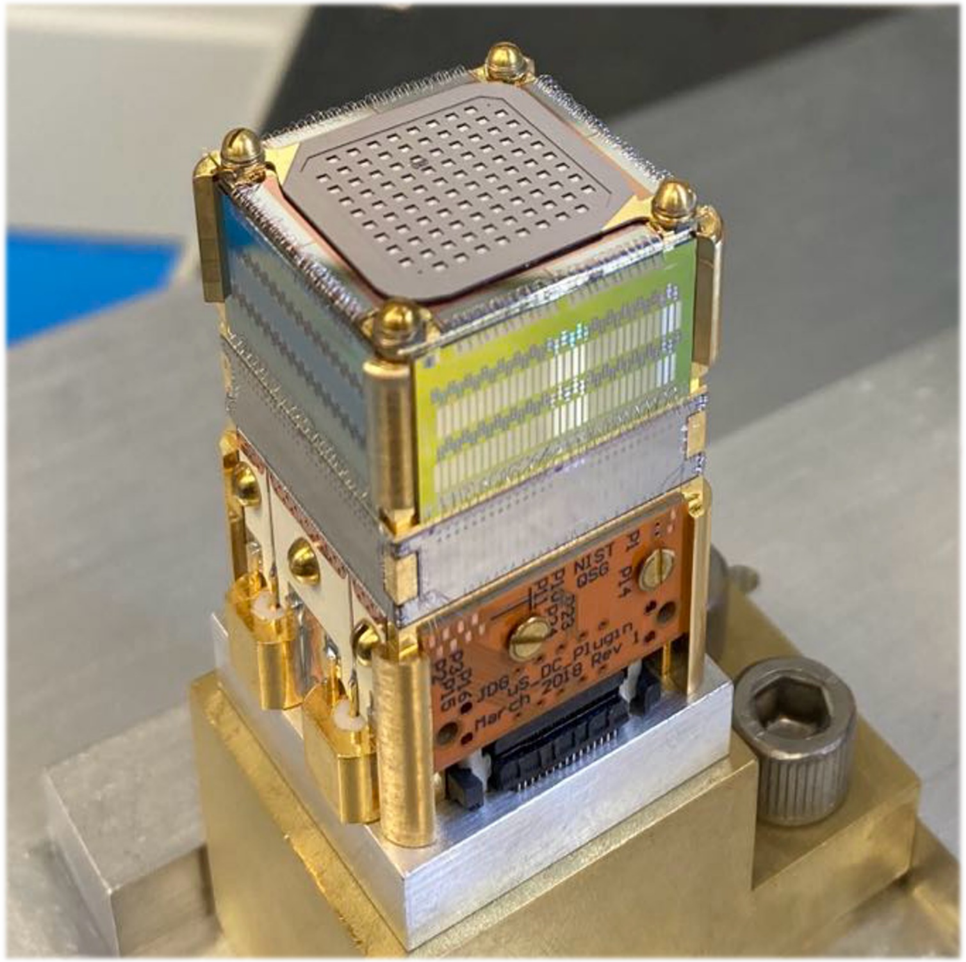
1. 为避免μ原子被周围的电子重新填充，靶气体非常稀薄，最终的出光量非常少

   → 晶体能谱仪太慢

2. 能量分辨率最好能<100eV

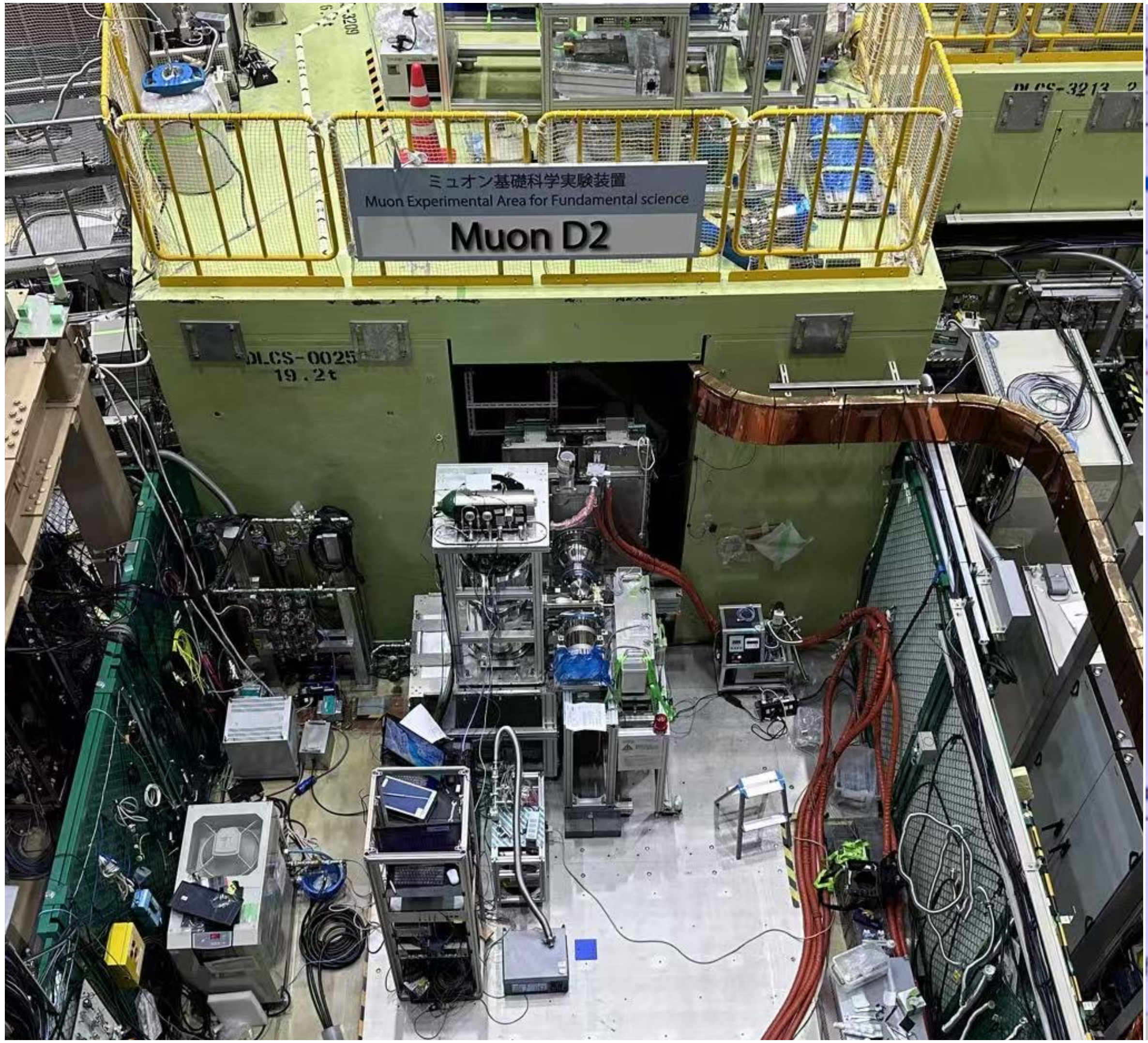
   → 半导体能谱仪不能满足要求

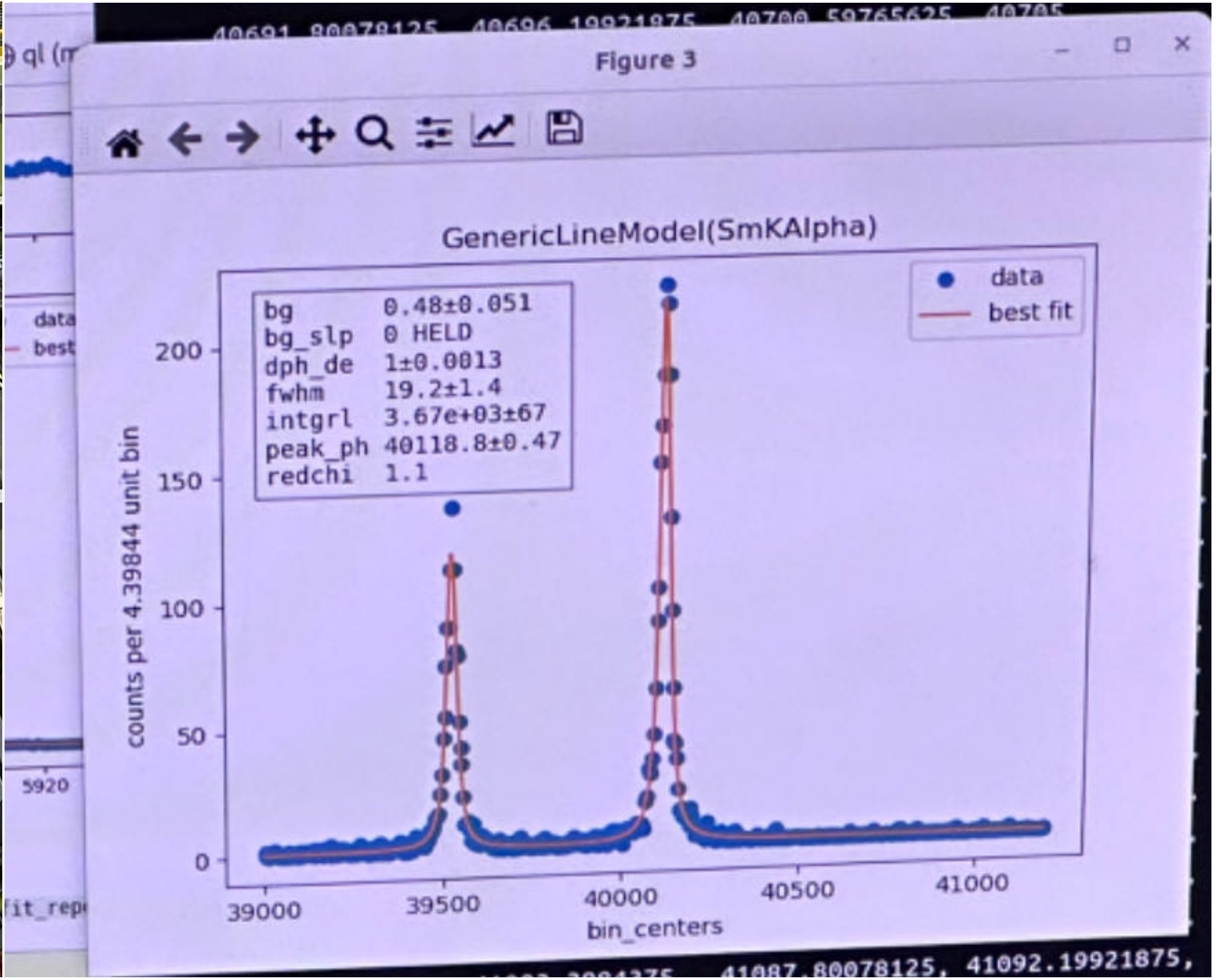
# 应用二：QED




2022 at NIST

# 应用二：QED

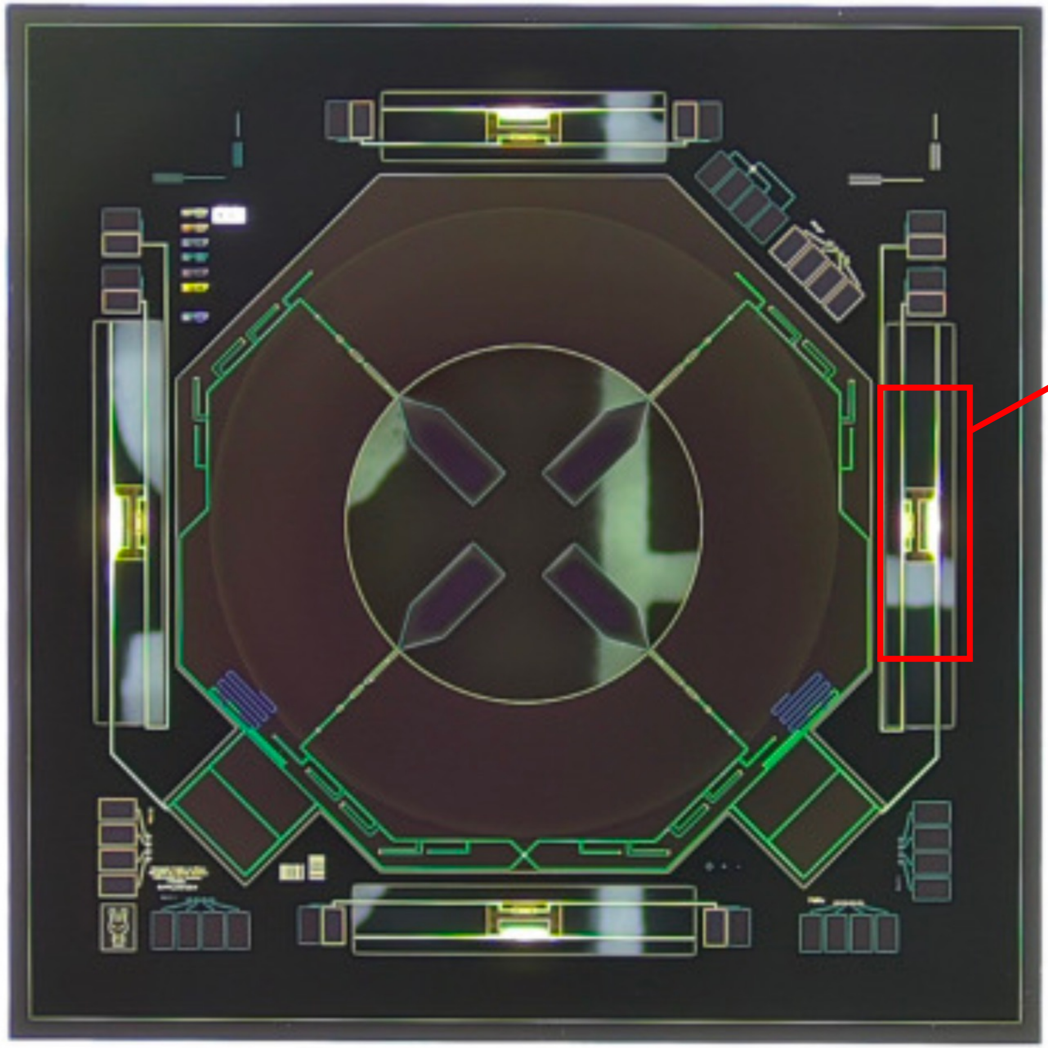


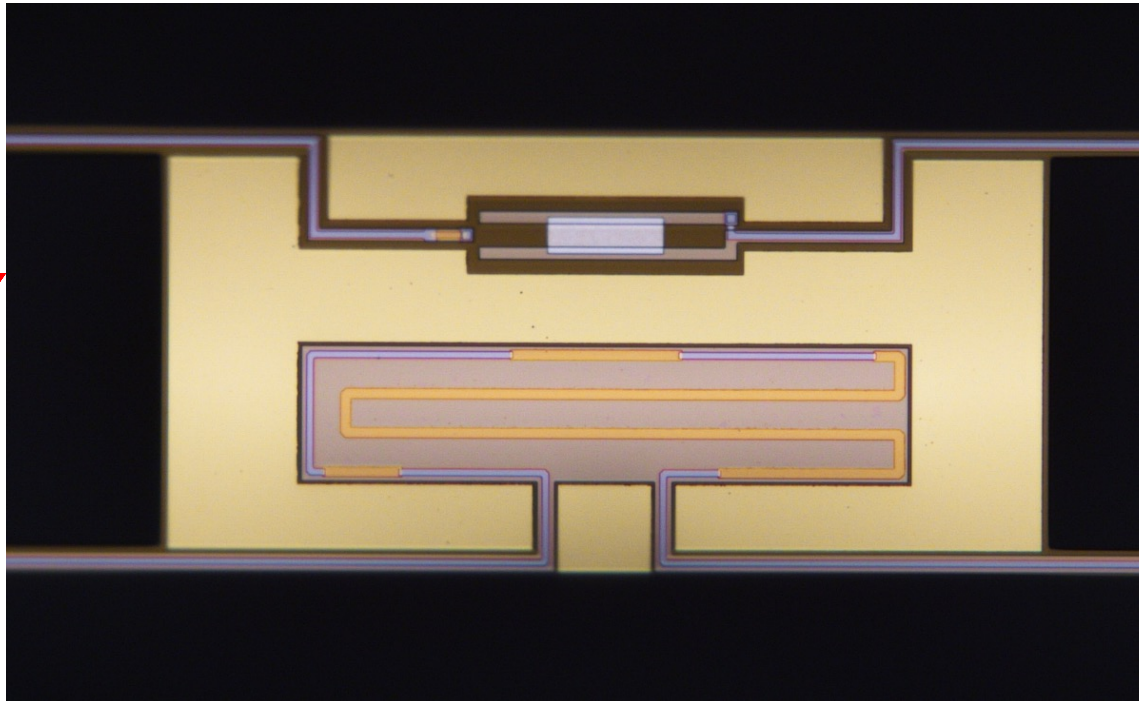



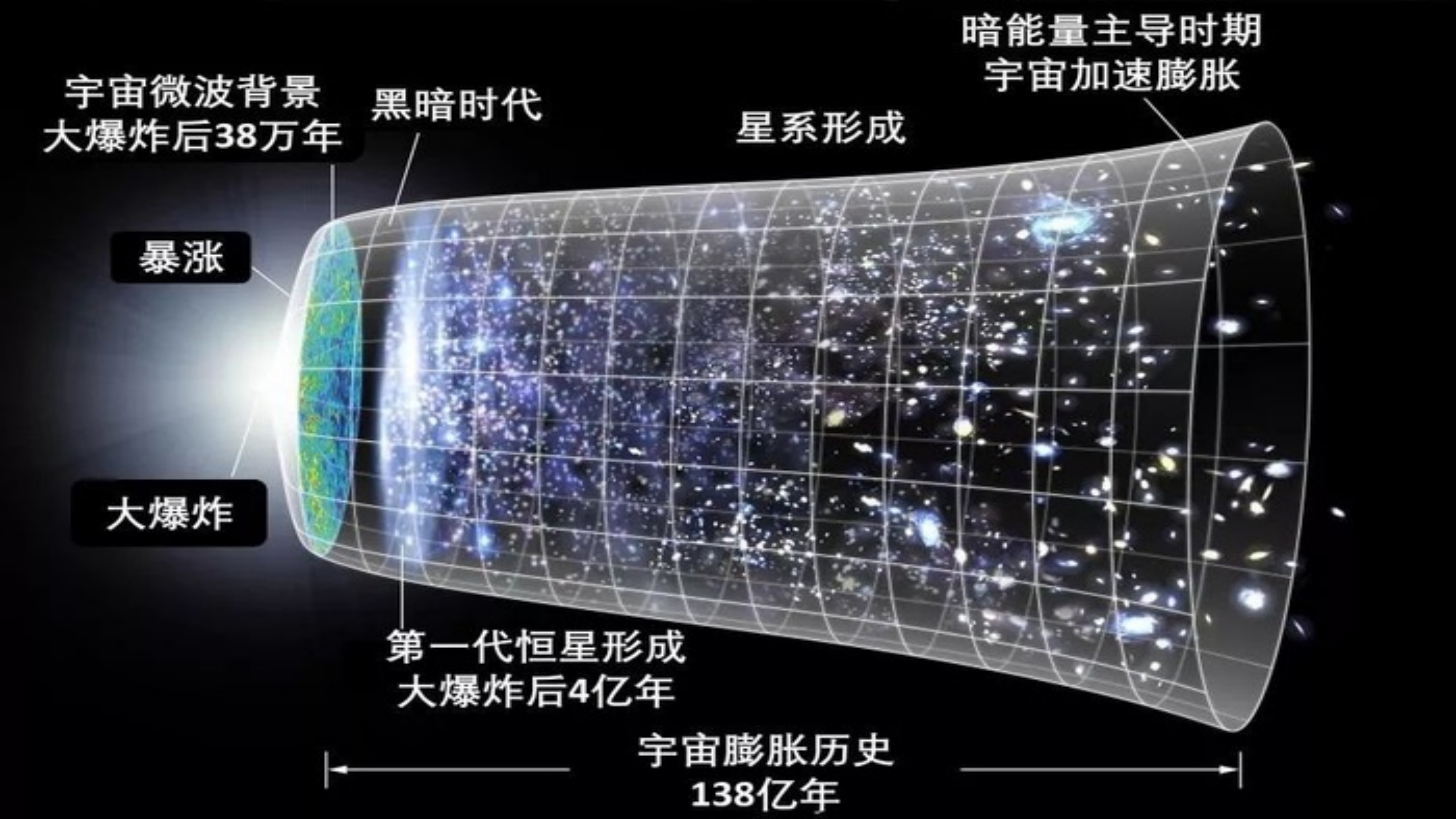

RIKEN, JPARC

# 应用三：宇宙学-原初引力波

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

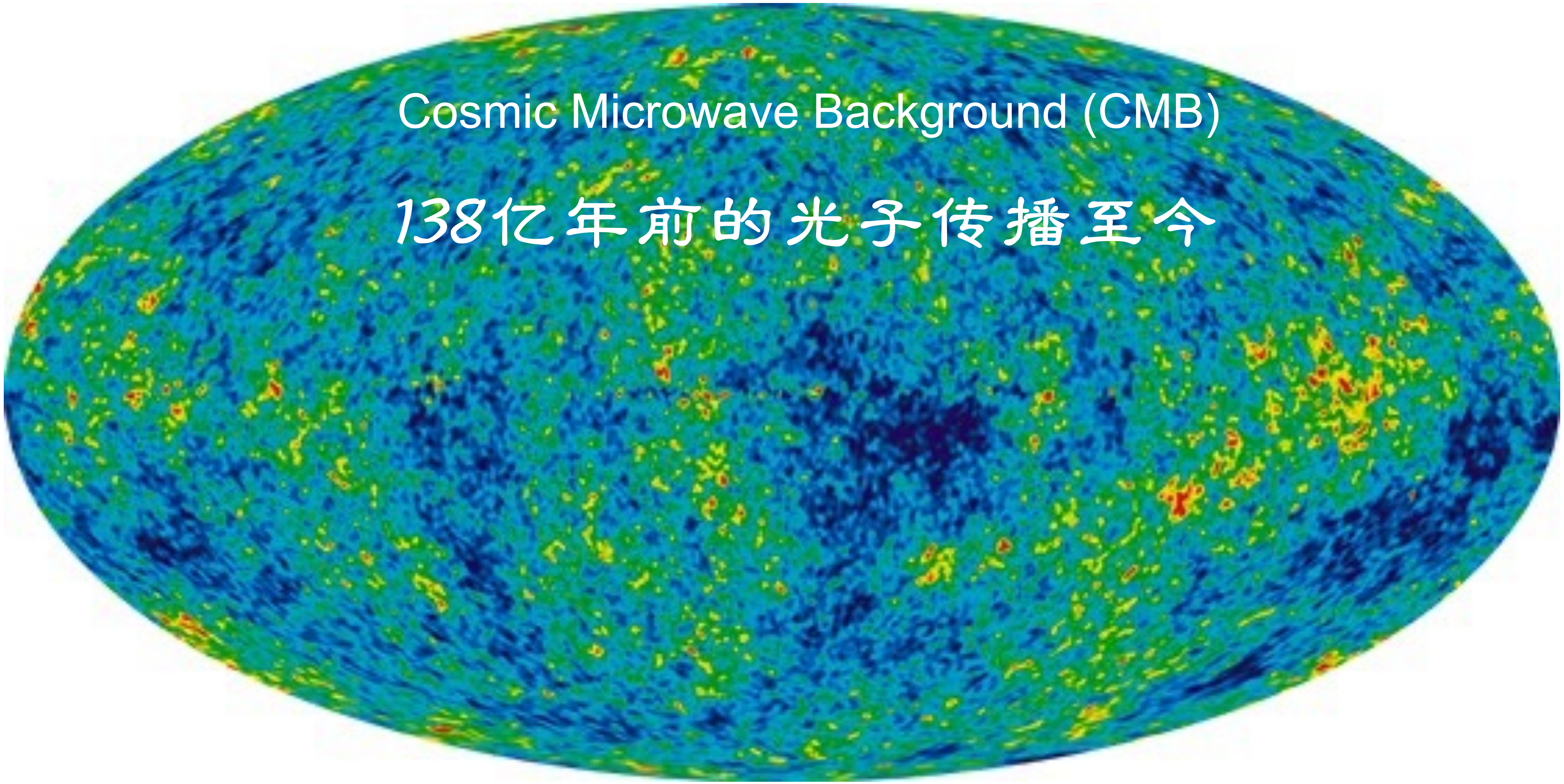





暗能量主导时期
宇宙加速膨胀
宇宙微波背景
大爆炸后38万年
黑暗时代
星系形成
暴涨
大爆炸
第一代恒星形成
大爆炸后4亿年
宇宙膨胀历史
138亿年

# 应用三：宇宙学-原初引力波





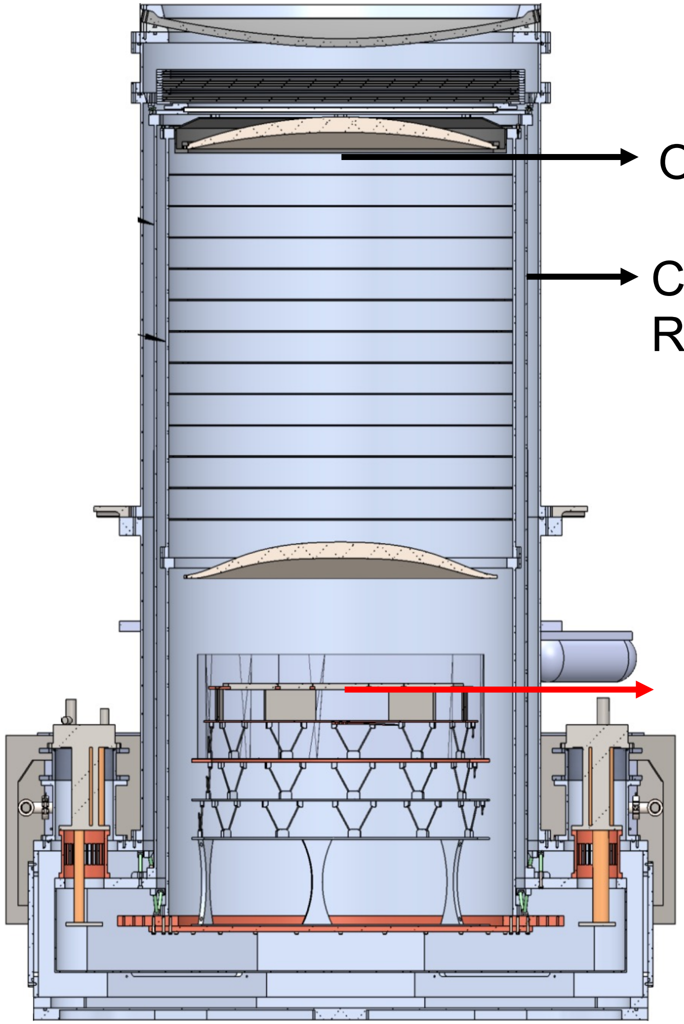

Picture credit: Herbert Huffner, “The Beginning of the World We Know”


AliCPT
阿里原初引力波项目(AliCPT)，阿里地区，西藏，中国

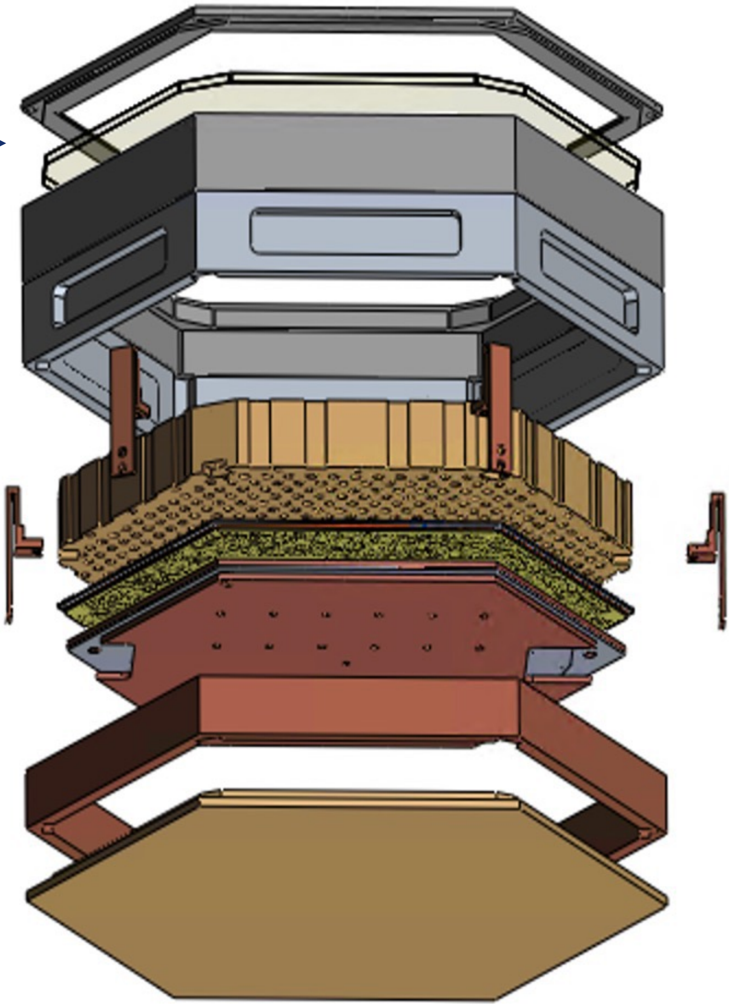
海拔5250m
阿斯塔纳
哈萨克斯坦
巴尔喀什湖
比什凯克
吉尔吉斯斯坦
俄罗斯
蒙古
乌兰巴托
新疆维吾尔自治区
乌鲁木齐
克拉玛依
吐鲁番
喀什
和田
塔里木河
西藏自治区
日喀则
拉萨
雅鲁藏布江
青海省
格尔木
青海湖
西宁
玉树
甘肃省
玉门
金昌
兰州
宁夏回族自治区
银川
内蒙古自治区
呼和浩特
包头
锡林浩特
呼伦贝尔
黑龙江省
哈尔滨
黑河
漠河
牡丹江
吉林省
长春
延吉
通化
通辽
辽宁省
沈阳
大连
北京市
北京
天津市
天津
河北省
石家庄
承德
邯郸
山西省
太原
大同
陕西省
西安
延安
汉中
山东省
济南
青岛
河南省
郑州
洛阳
南阳
江苏省
南京
连云港
上海市
上海
安徽省
合肥
安庆
湖北省
武汉
宜昌
四川省
成都
绵阳
乐山
西昌
重庆市
重庆
湖南省
长沙
常德
衡阳
江西省
南昌
吉安
浙江省
杭州
宁波
温州
福建省
福州
贵州省
贵阳
遵义
台北
钓鱼岛
赤尾屿
琉球群岛
朝鲜
平壤
韩国
首尔
日本海
黄海
东海
渤海
尼泊尔
加德满都
不丹
廷布
印度
新德里
伊斯兰堡
克什米尔
北回归线
黄河
长江
汉水
淮河
京杭运河
怒江
澜沧江
金沙江
雅砻江
岷江
嘉陵江
乌江
额尔齐斯河
额尔古纳河
黑龙江
松花江
乌苏里江
贝加尔湖
印度河
恒河
布拉马普特拉河

# 应用三：宇宙学-原初引力波



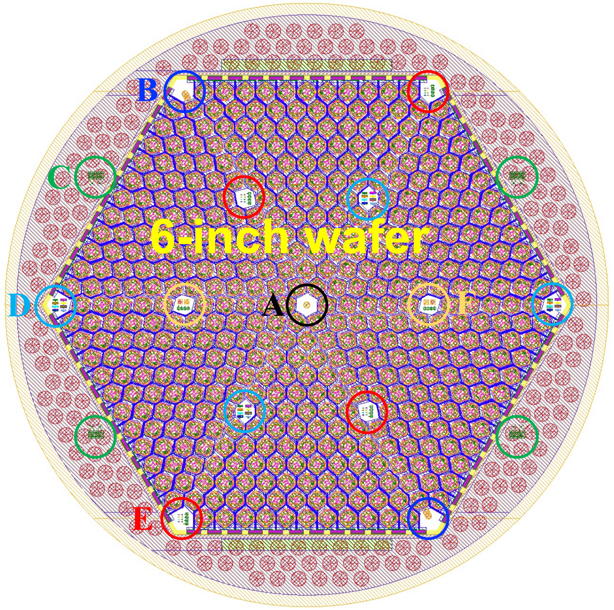


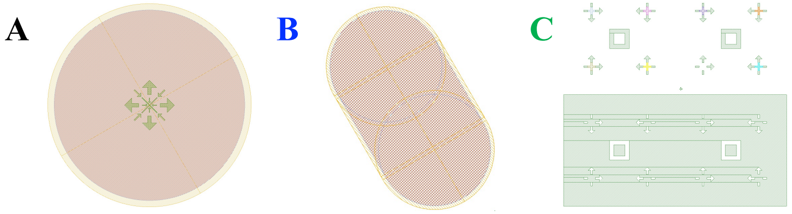

picture credit: Maria Salatino




picture credit: 李雅琼

# 应用三：宇宙学-原初引力波

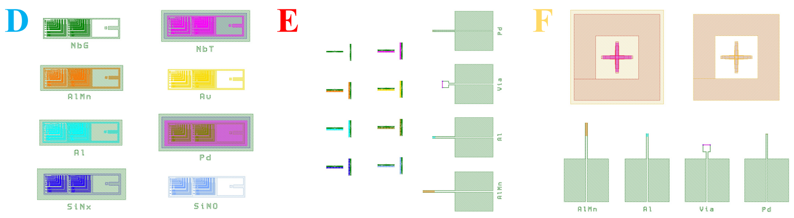



中心对准标记及销钉孔：1组

边缘销钉孔：2组

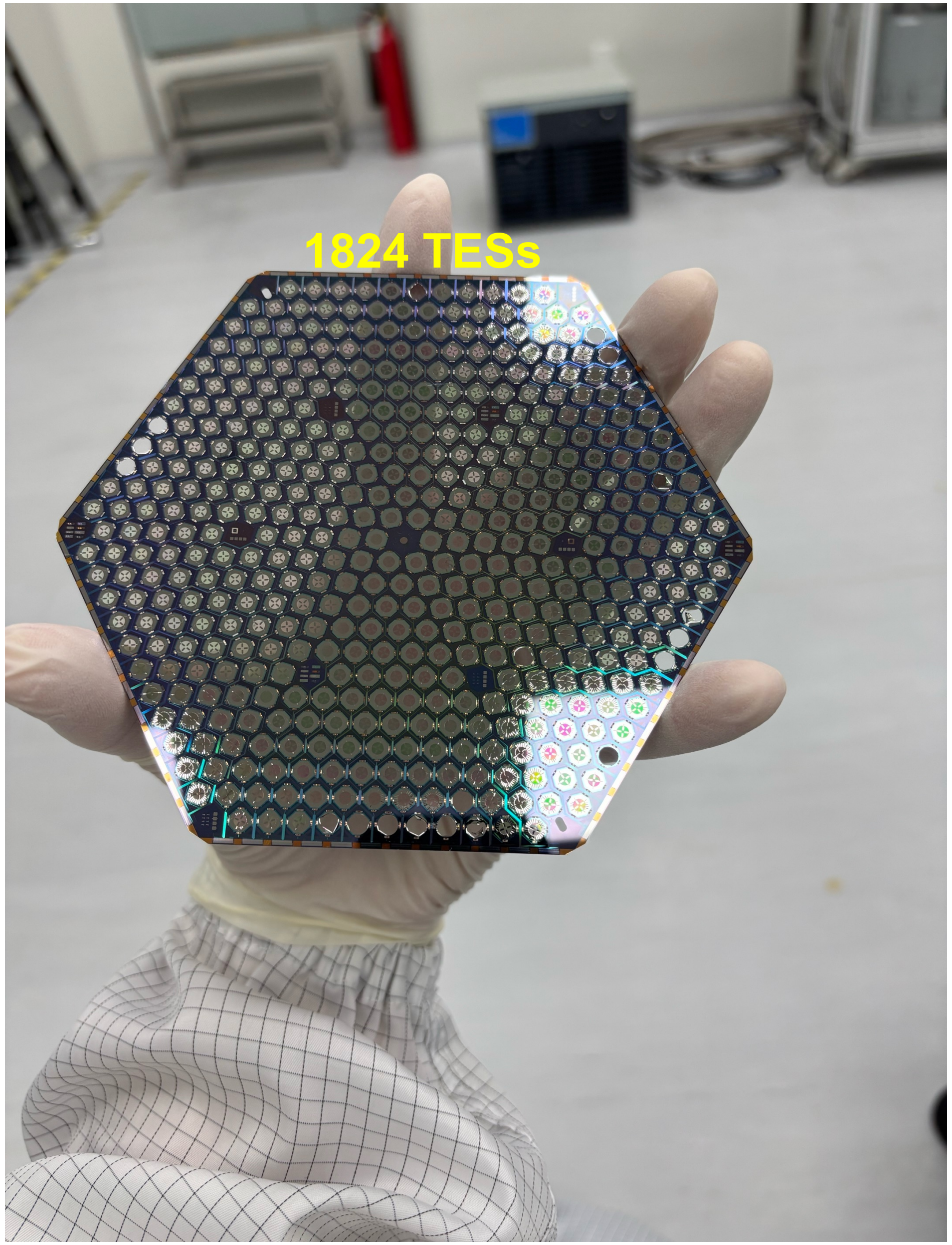
激光直写套刻点：4组

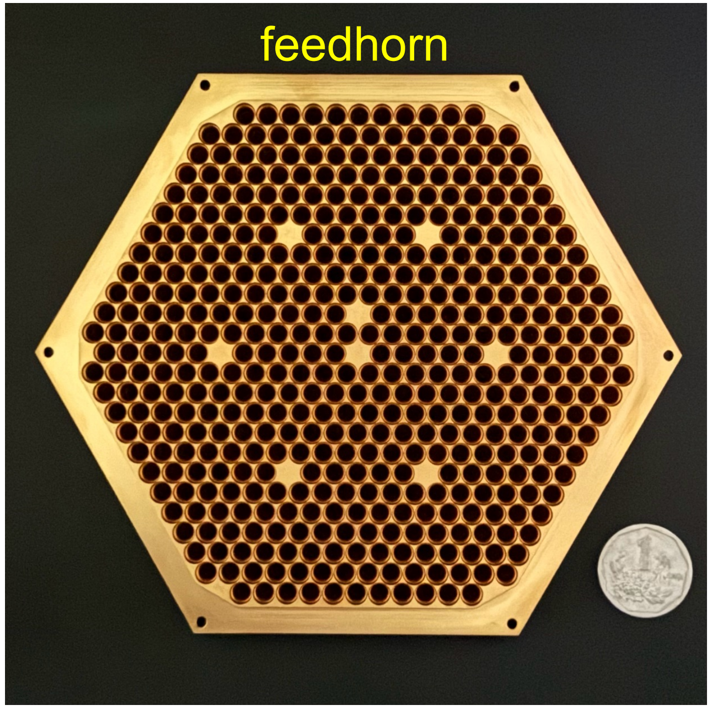



光刻剂量判定标记：4组

光刻对准判定标记及测试结构：4组

接触式曝光套刻标记及测试结构：2组




2026年安装第一个

全国产

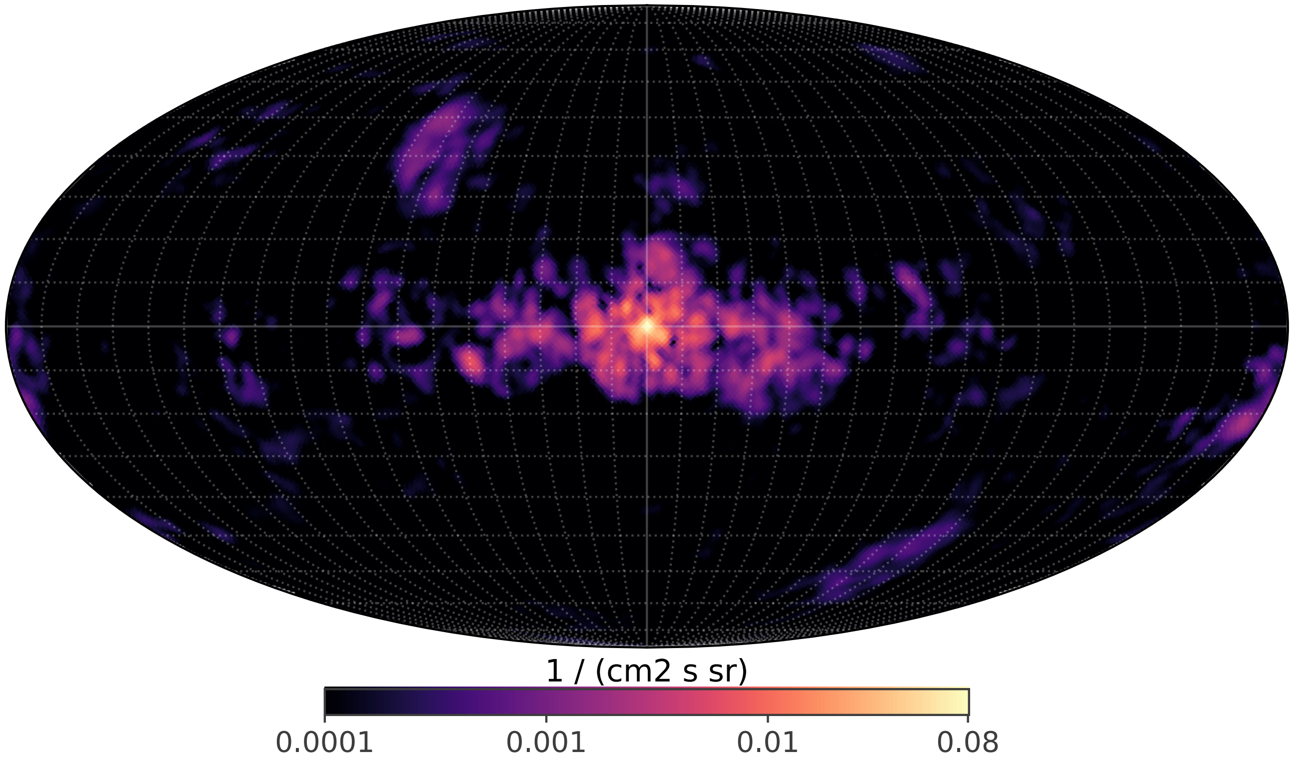
探测器模块

# 应用四：高能天文

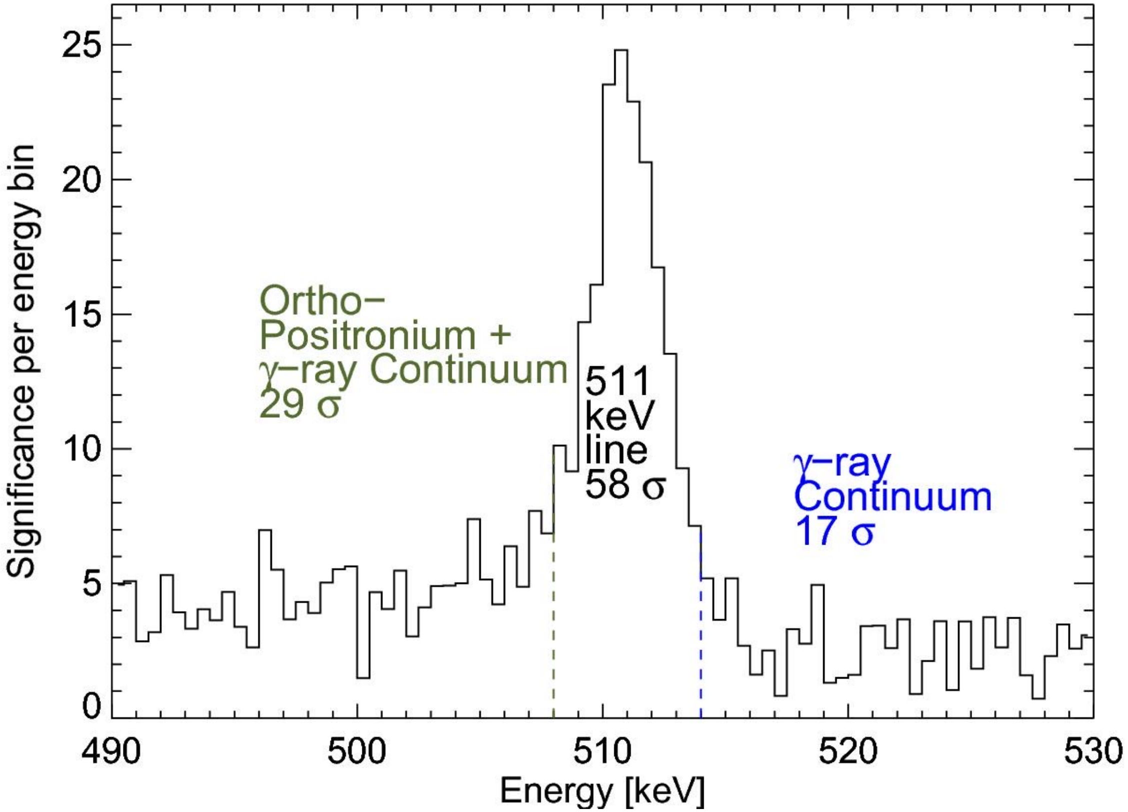


银河系中心正电子起源

1. 大质量黑洞; 2. 暗物质; 3. 原初黑洞

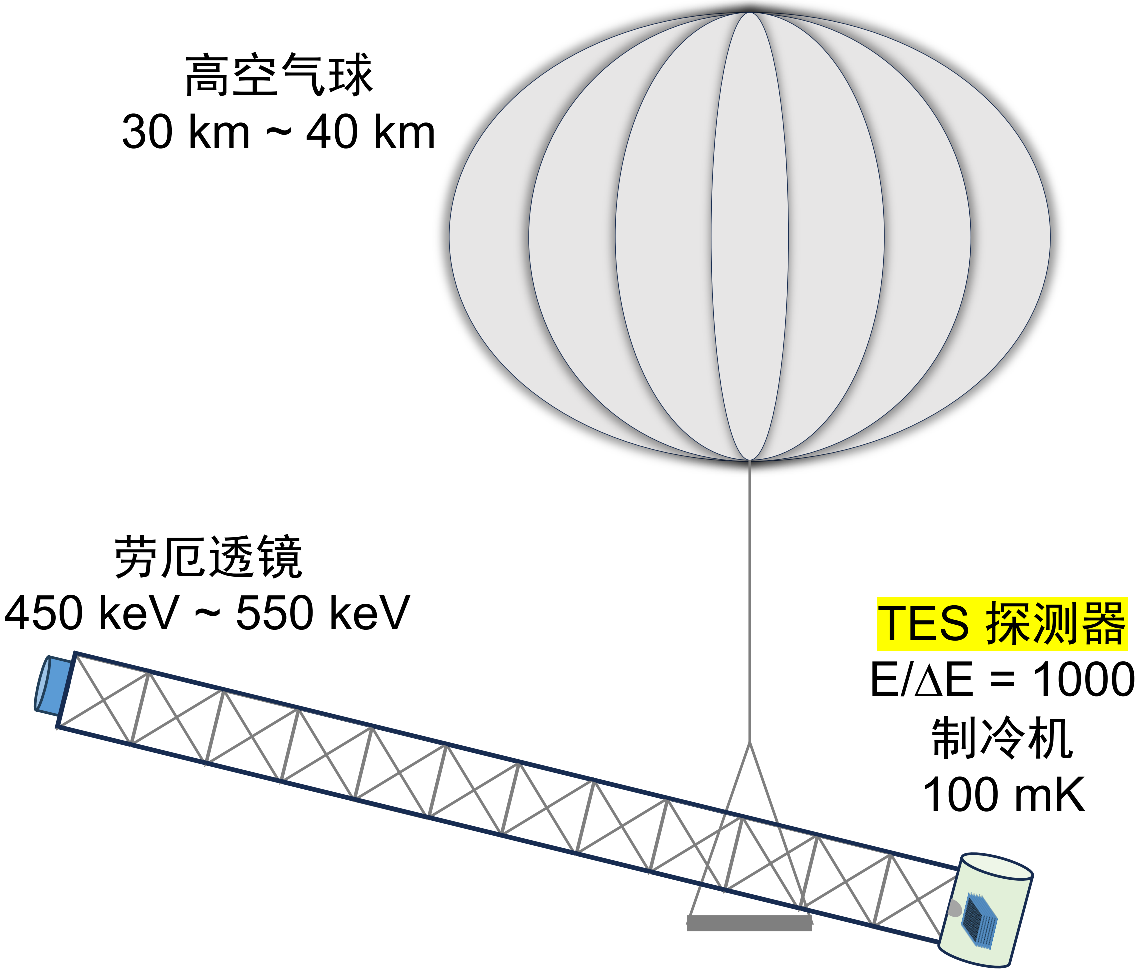


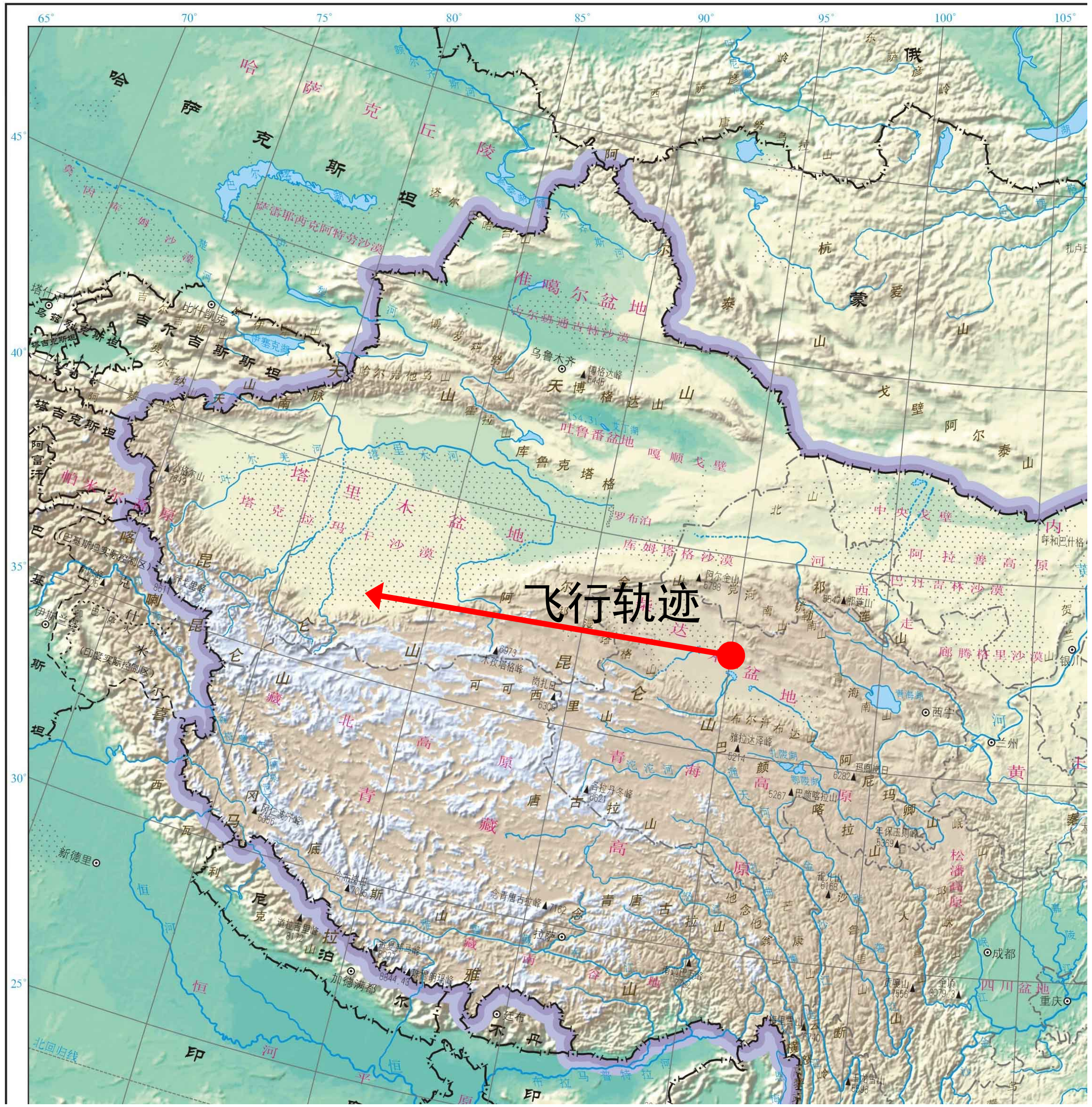

Latest result from INTEGRAL/SPI



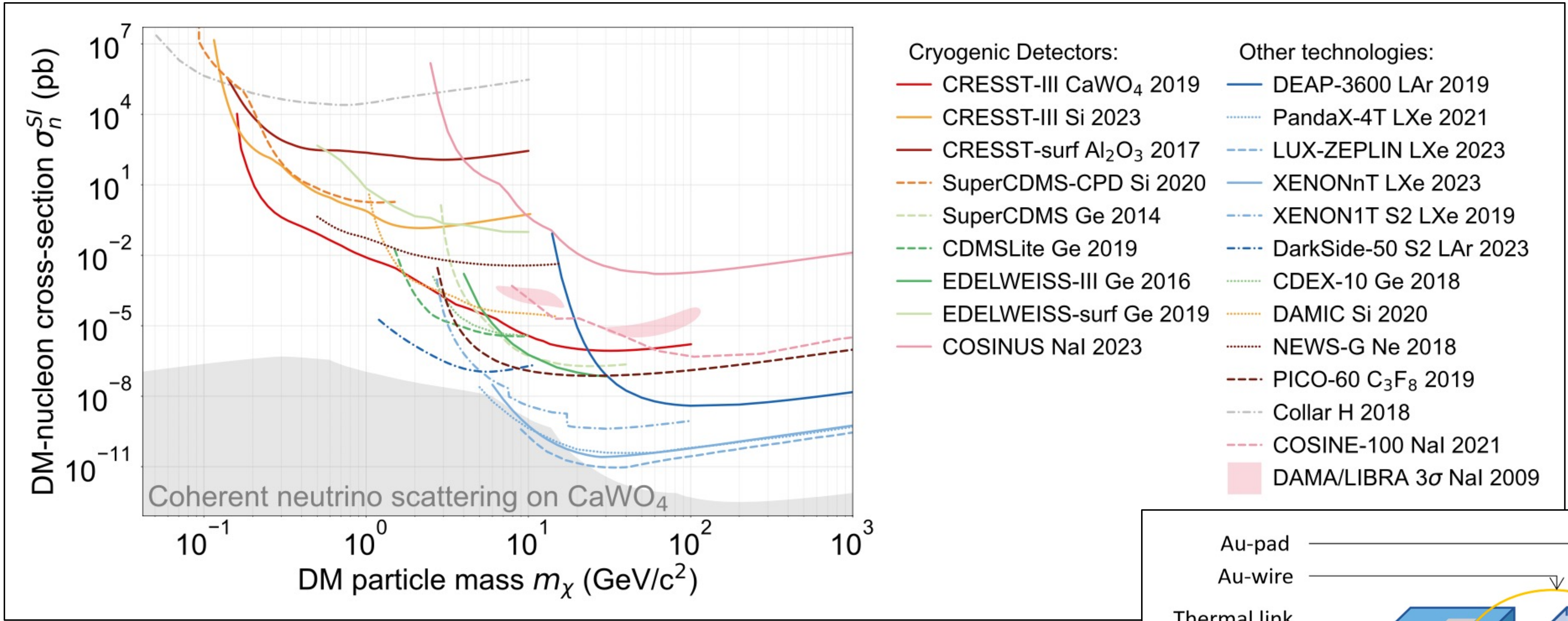

Siegert, 2016

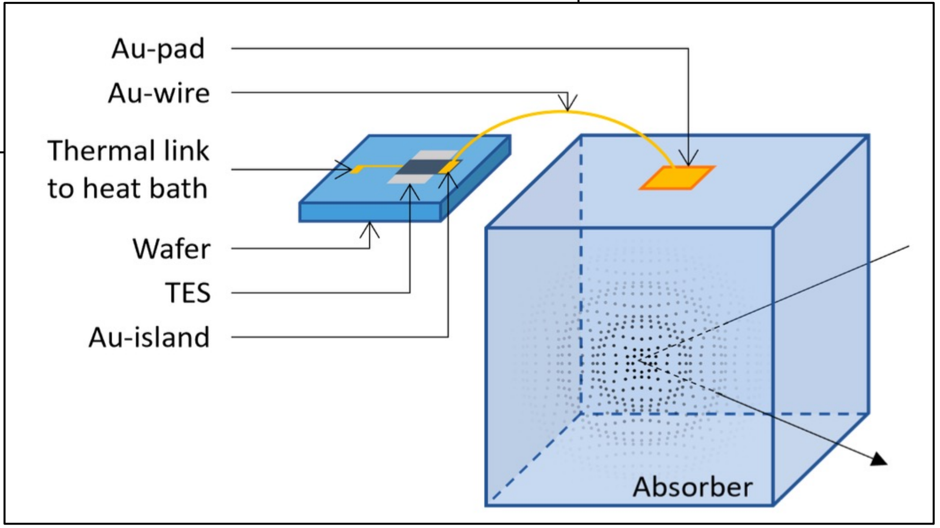
# 应用四：高能天文


高空气球
30 km ~ 40 km
劳厄透镜
450 keV ~ 550 keV
TES 探测器
E/ΔE = 1000
制冷机
100 mK


飞行轨迹

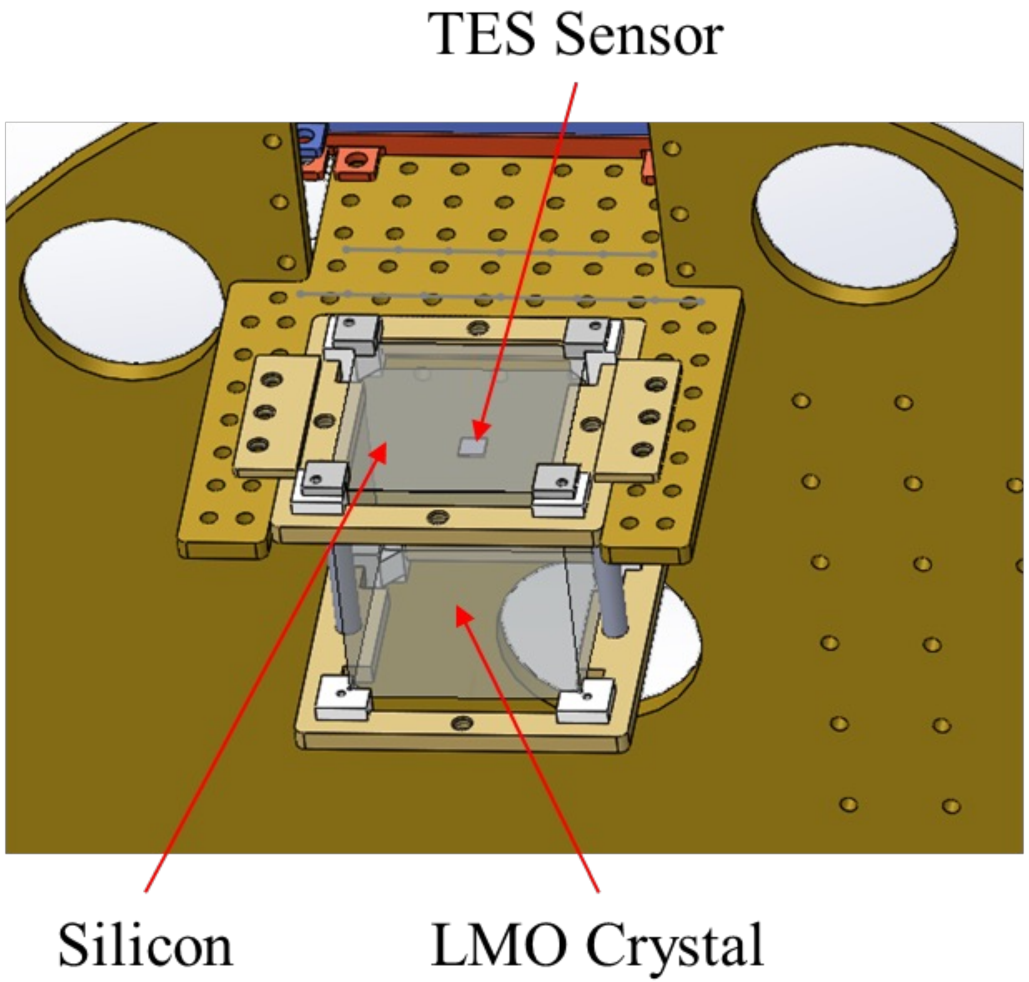
# 应用五：暗物质

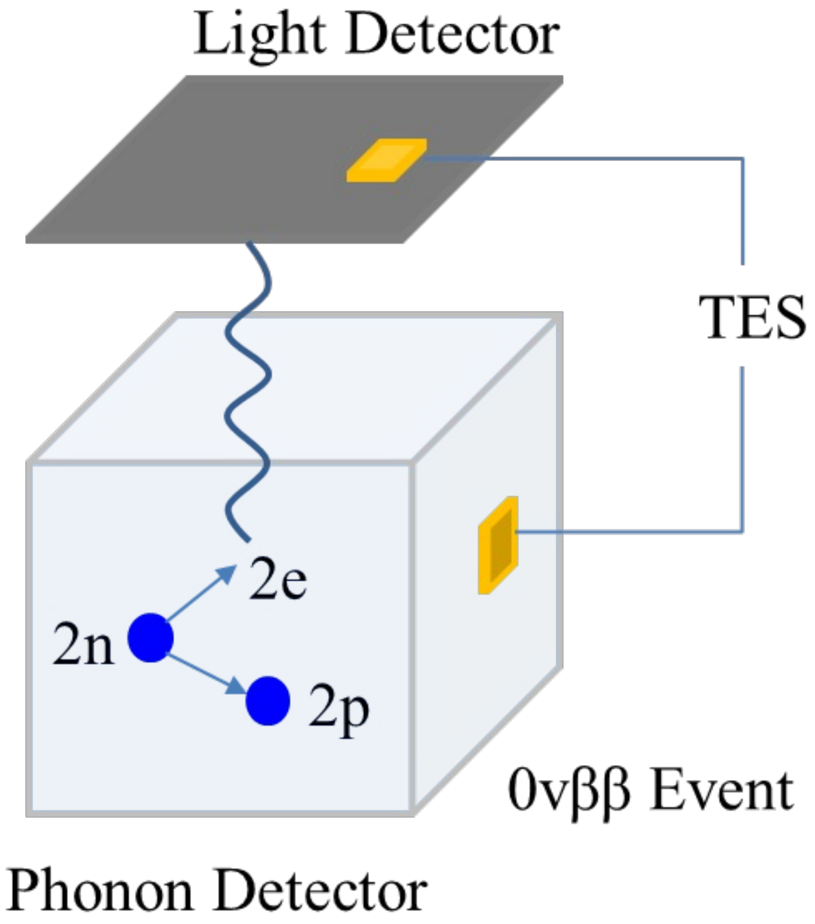



M. Kaznacheeva and K. Schaffner, arXiv:2406.12887v1

# 应用六：0νββ 衰变




Picture credit: 张翼飞, IHEP

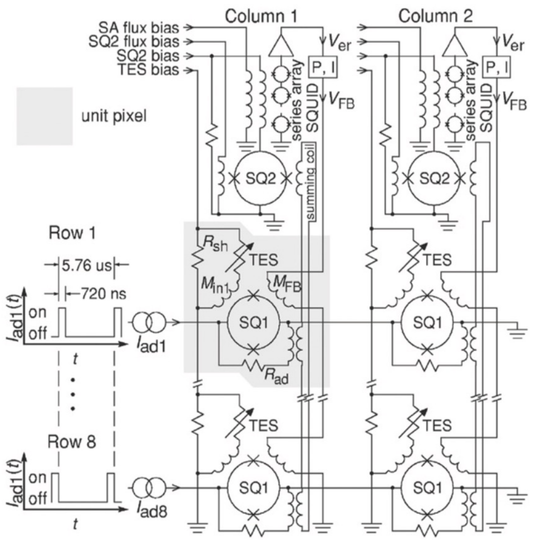
# 欢迎探讨

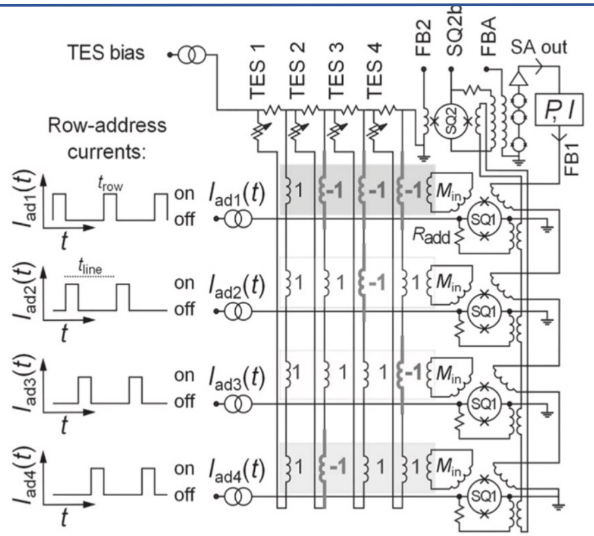
# 欢迎探讨

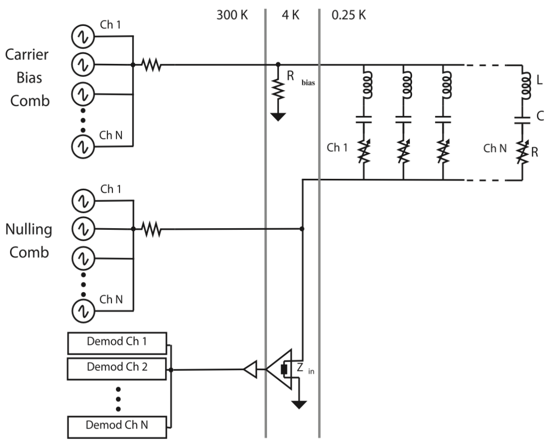
# 和报考

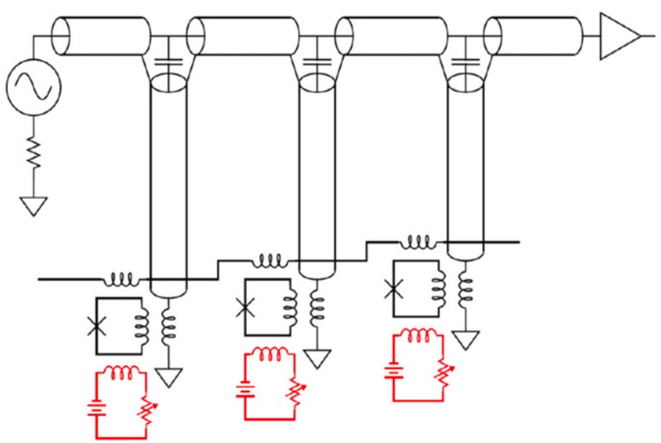
# 低温复用读出





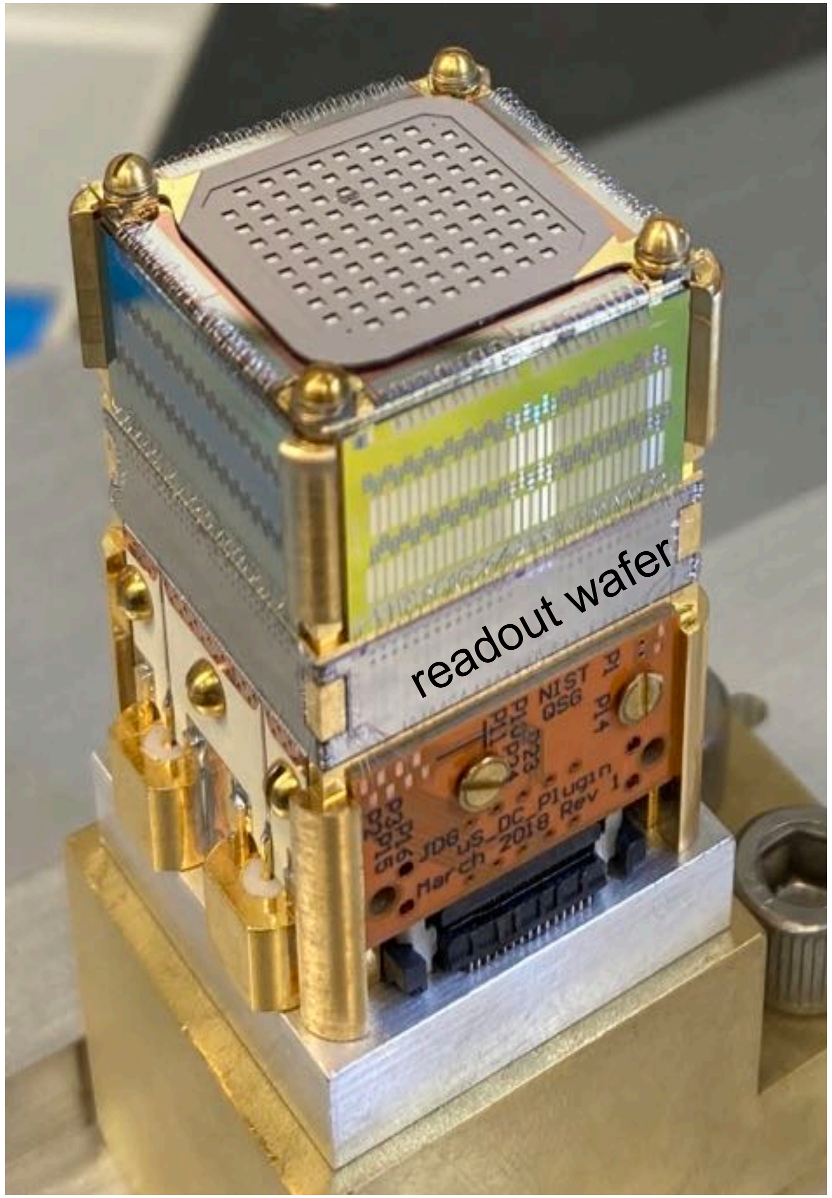



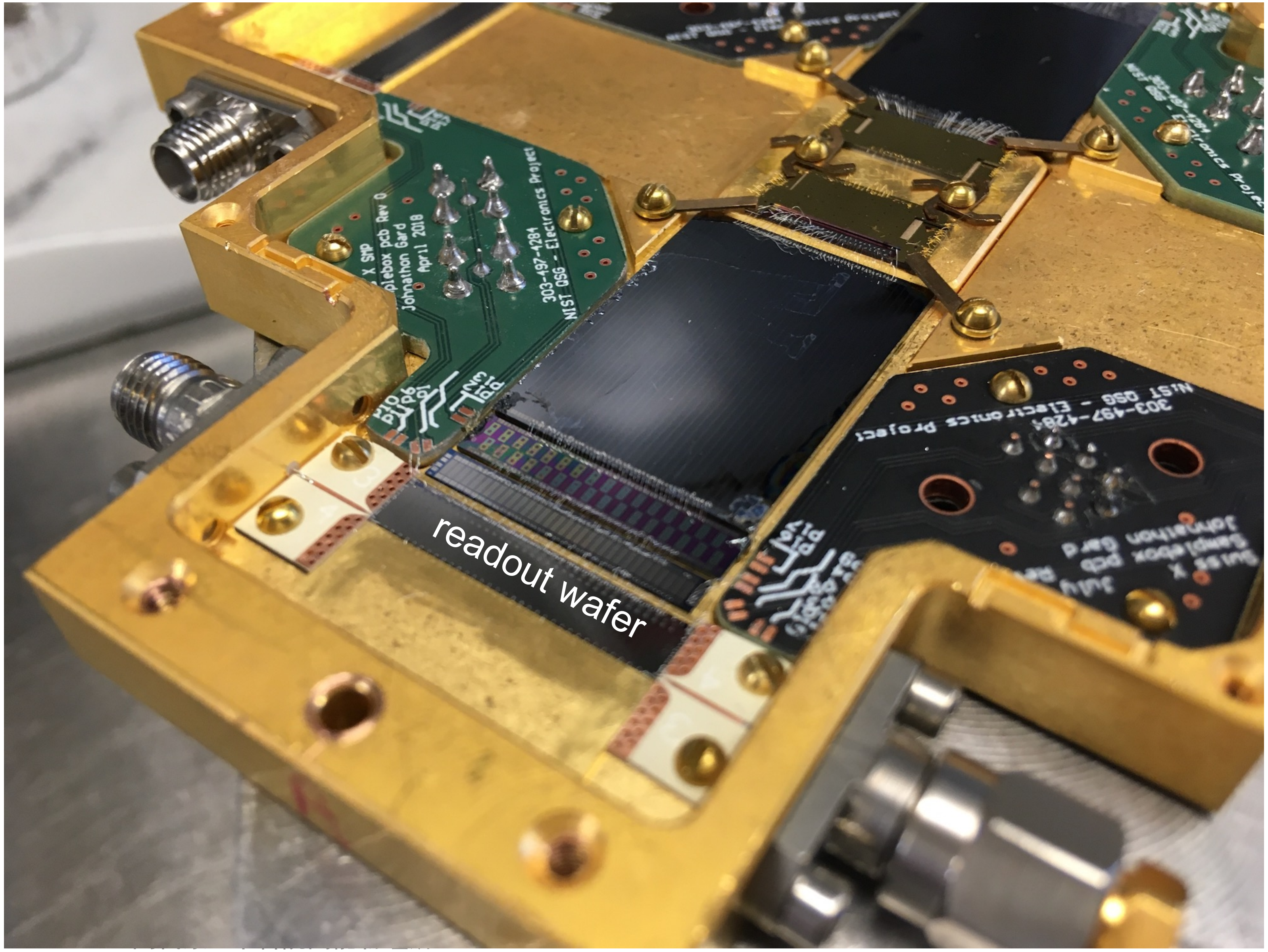
Joel N Ullom and Douglas A Bennett 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 084003

| | time-division multiplexing | code-division multiplexing | frequency-division multiplexing | microwave-squid multiplexing |
|---|---|---|---|---|
| Machanism | pixels in the same column are read out in time series | signals from each pixel are encoded and read out | each pixel is biased in a unique LCR circuit, and detected in a unique frequency channel | TES signal coupled to rf-SQUID, then readout by microwave resonators |
| Advantage | well-developed technology | each pixel can be biased individually | each pixel can be biased individually | large readout bandwidth, only uses 3 pairs of cables for the whole detector module |
| Disadvantage | $\sqrt{N}$ sampling noise | one bad pixel kills a whole column | complicated matching between TESs and the readout electronics | pixels are not individually biased, subject to nonuniformity across large arrays |

# 整体封装

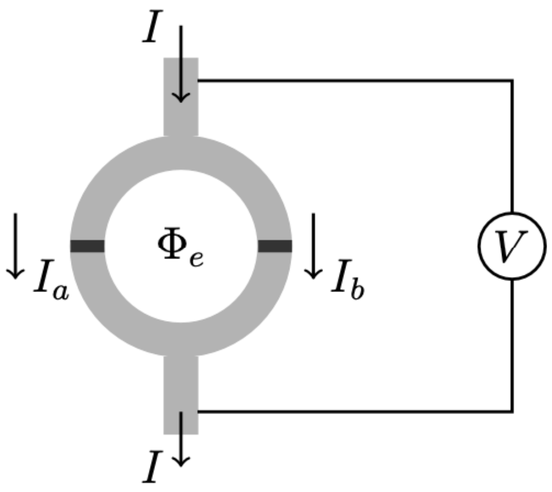
中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences



# SQUID

DC-SQUID




RF-SQUID