



International Workshop on Muon Physics at the Intensity and Precision Frontiers (MIP2025)

基于缪子诱发X射线与球编码成像的 ICF靶丸元素分布检测新方法 深圳技术大学工程物理学院

李迪开¹, 俞健¹, 李子鸣¹, 陈前¹, 张春晖³, 何智兵⁴, 曹磊峰¹,
沈思涵², 龙文婕², 陈翔², 李亮²

1.深圳技术大学, 2.上海交通大学, 3.兰州大学 4.中物院激光聚变研究中心

汇报提纲

01 | 应用需求与研究现状

02 | MIXE简介

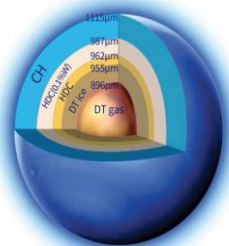
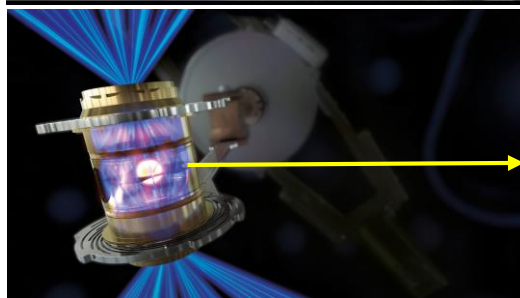
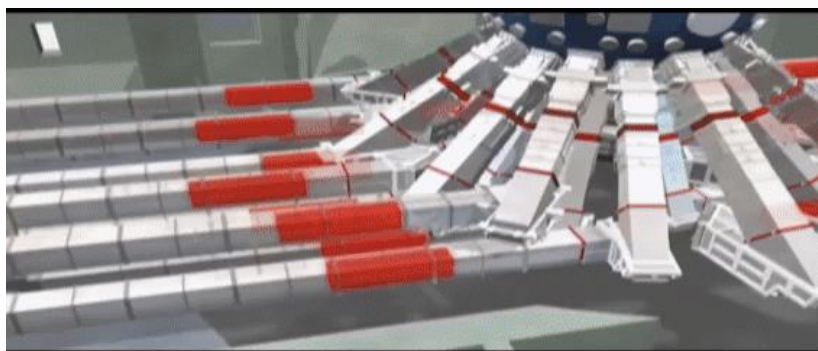
03 | MIXE球编码成像

04 | 总结与展望

1.1 应用需求与研究现状

应用需求

惯性约束聚变 (ICF) 靶丸元素分布检测需求



ICF通过高能激光照射黑腔内壁产生X光，辐照靶丸，通过烧蚀压缩靶丸并加热氘氚燃料至聚变条件



靶丸元素分布的均匀性直接影响内爆过程的对称性与能量耦合效率



如：GDP靶丸壳层制备中易吸附氧元素，氧含量非均匀分布，可能诱发烧蚀界面不稳定并降低聚变性能



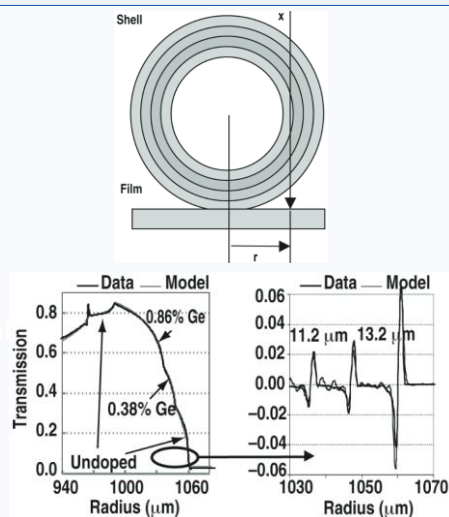
需：靶丸元素分布-整体-无损-高分辨/微米级的检测技术

1.2 应用需求与研究现状

研究现状

针对ICF靶丸元素分布检测需求，国内外一些主要技术途径和尝试：

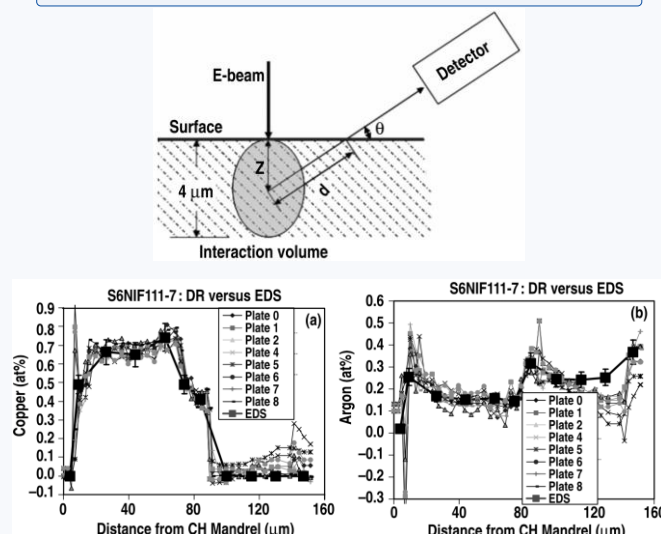
接触式照相CR



Fusion Sci. Technol., 2006, 49, 650

微米级、0.1 at. %
辐射方向无空间分辨、
均匀假设

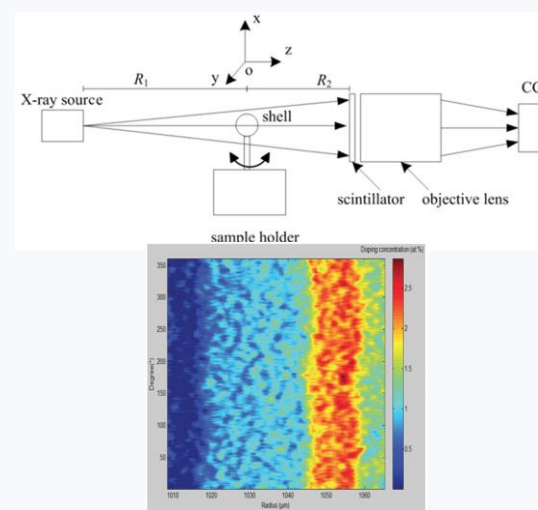
能散光谱EDS



Fusion Sci. Technol., 2009, 55, 356

微米级、0.1 at.%
深度浅(需破坏样品)

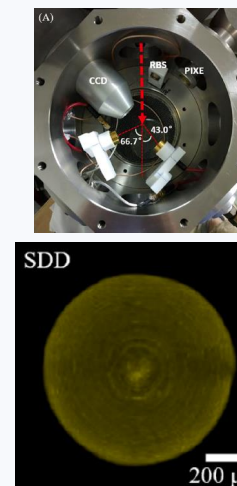
X射线荧光CT



Fusion Sci. Technol., 2021, 77, 188

微米级、0.1 at.%、三维
低Z敏感度弱

卢瑟福背散射RBS 质子诱发X射线PIXE



NIMB, 2022, 512, 108

RBS分辨率低
PIXE微米级、0.1 at.%、三维
质子损坏样品、低Z敏感度弱

汇报提纲

01 | 应用需求与研究现状

02 | MIXE简介

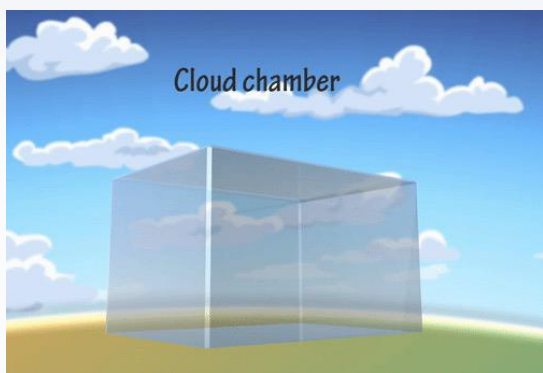
03 | MIXE球编码成像

04 | 总结与展望

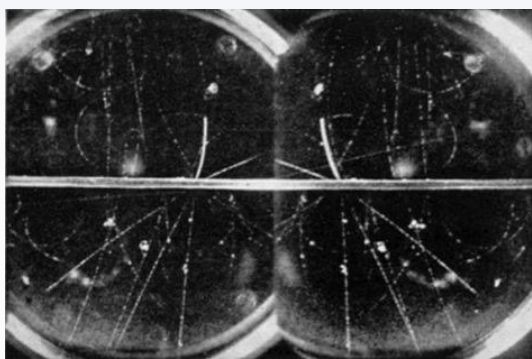
2.1 缪子诱发X射线MIXE简介

缪子

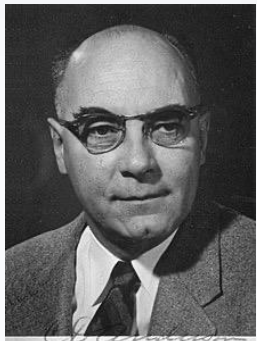
类似于电子，质量是电子的207倍：诱发的X射线能量高 很快衰变为电子



1936



Carl David Anderson
(1905-1991)

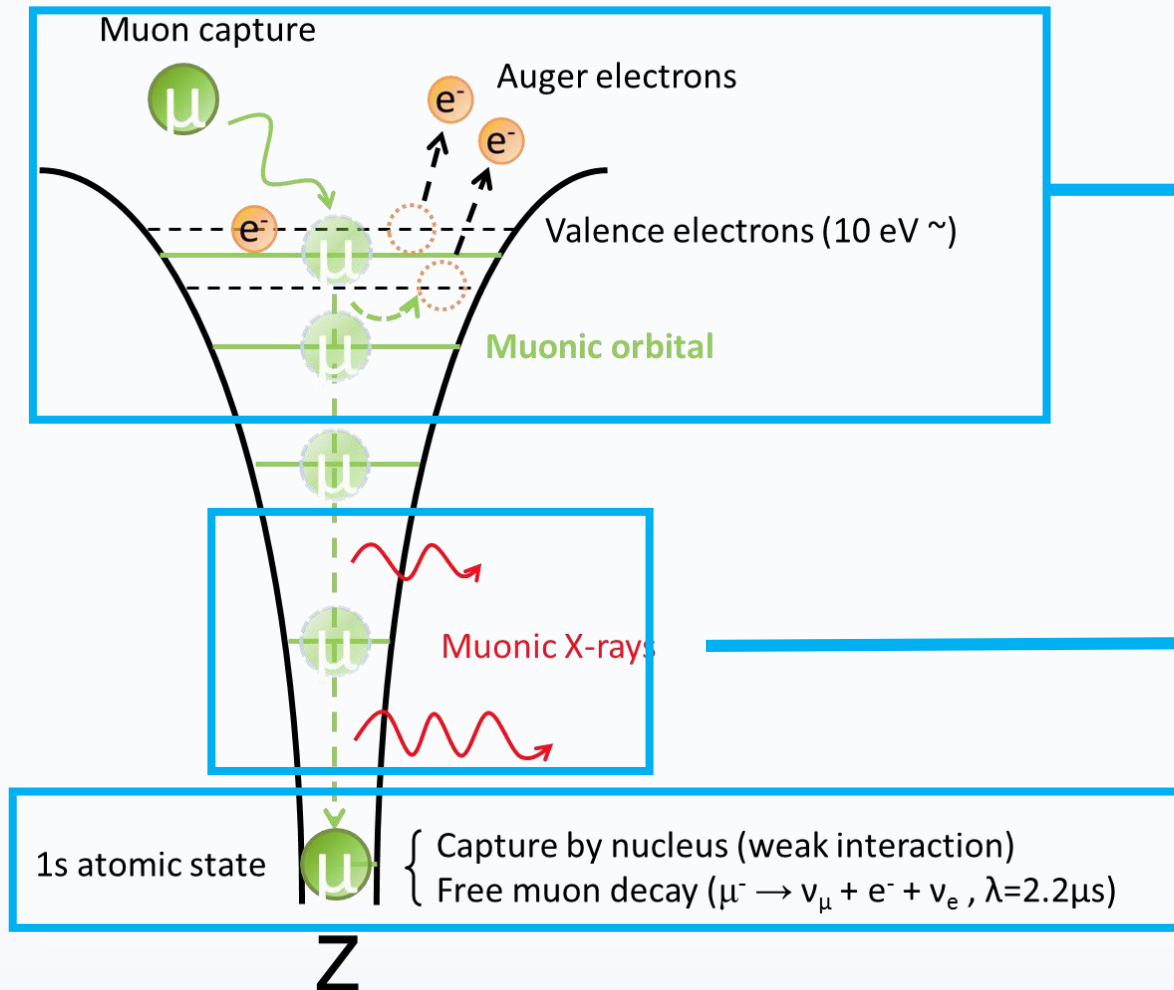


Leptons			
	Electric Charge		Electric Charge
Tau	 -1	Tau Neutrino	 0
Muon	 -1	Muon Neutrino	 0
Electron	 -1	Electron Neutrino	 0

	charge	spin	mass	moment	$\gamma / 2\pi$ (kHz G ⁻¹)	lifetime (μ s)
e	$\pm e$	1/2	m_e = 0.51 MeV	657 μ_p	2800	∞
μ	$\pm e$	1/2	207 m_e = 105.7 MeV	3.18 μ_p	13.5	2.19
p	$\pm e$	1/2	1836 m_e = 938 MeV	μ_p	4.26	∞

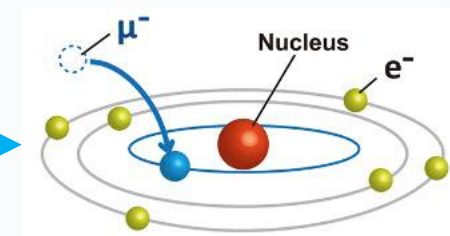
2.2 缪子诱发X射线MIXE简介

缪子诱发X射线MIXE



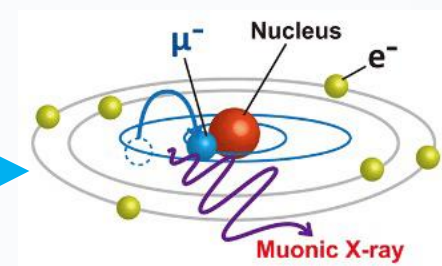
缪子被俘获

形成缪-原子

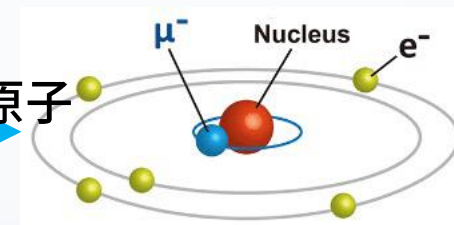


级联退激发

发出X射线

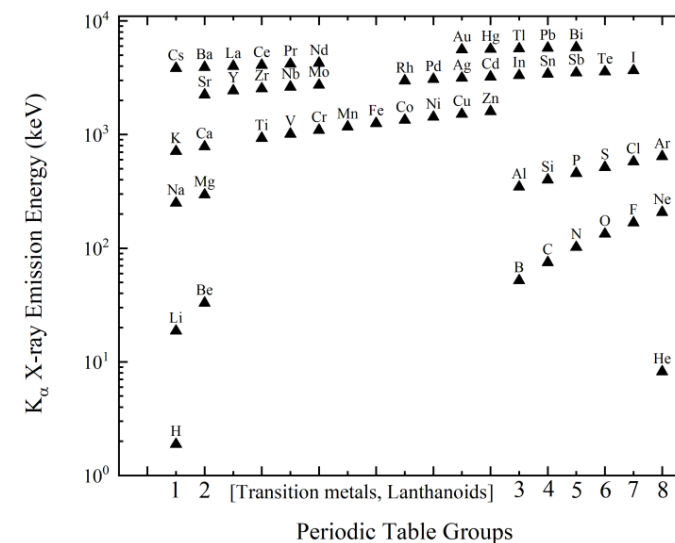
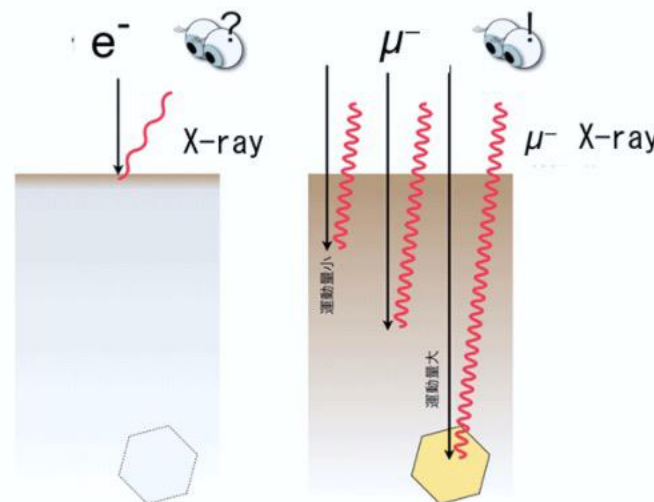
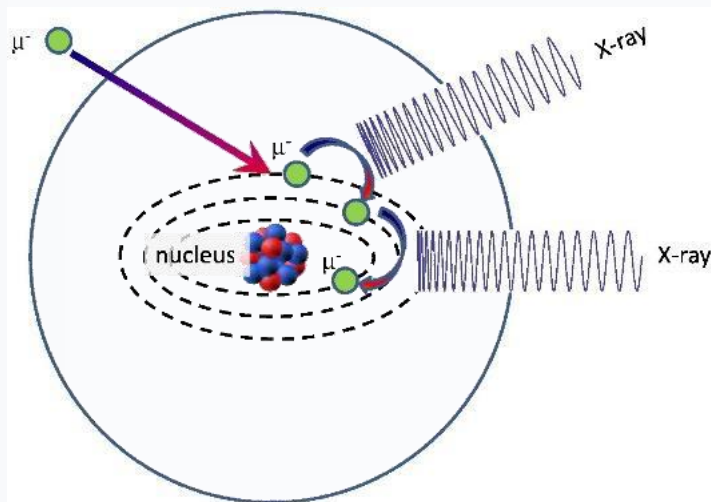


缪子衰变 变为普通原子
释放电子 (无损)



2.3 缪子诱发X射线MIXE简介

MIXE特点



- 高能量，高穿透性（约为电子的200倍，诱发的x射线能量范围在10keV-10MeV）
- 元素特征x射线（多种元素同时分辨）
- 对低Z材料敏感（相比电子x射线，能量更高，更易被探测器感知）（C: 72.55keV, O: 150keV）
- 缪子束动量可调（元素分布的深度分析）
- 无损检测（对样本材料低辐射风险）

M. Cataldo et al., Appl. Sci. 2022, 12, 4237.

2.4 缪子诱发X射线MIXE简介

MIXE已获广泛应用

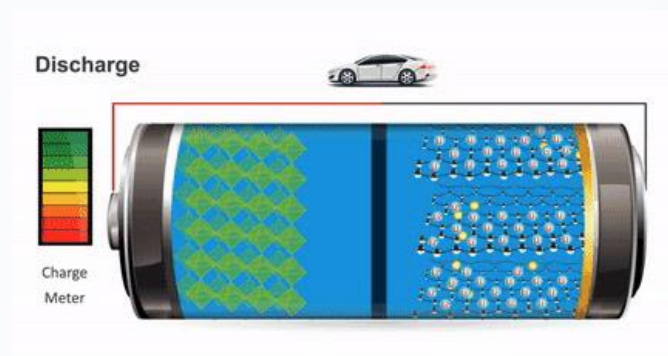
陨石



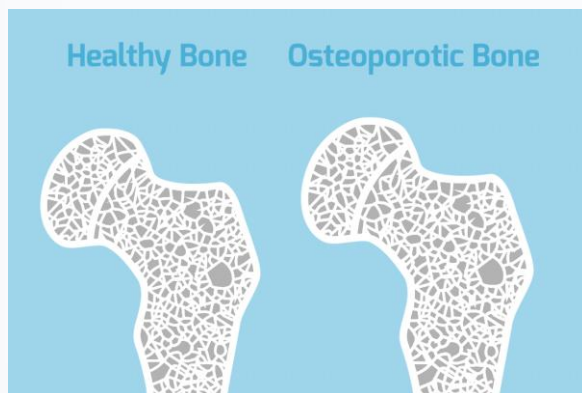
文物



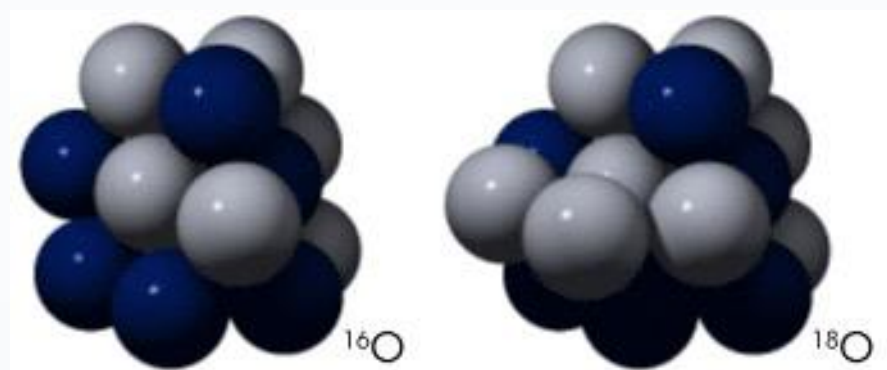
锂电池



生物医学

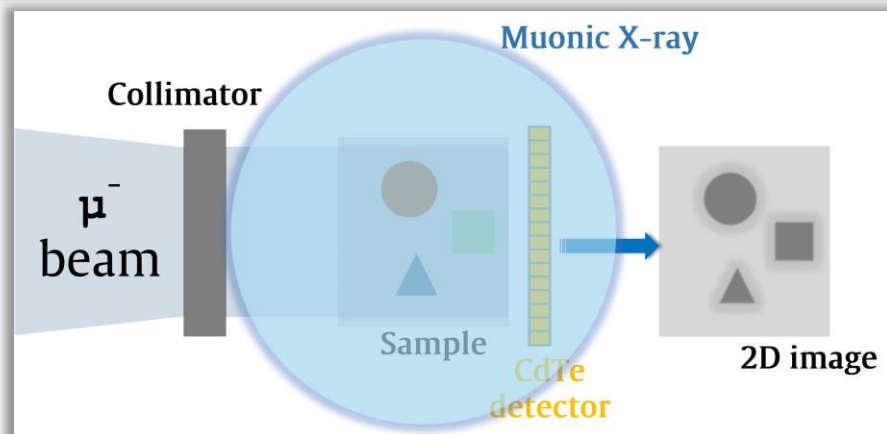


同位素

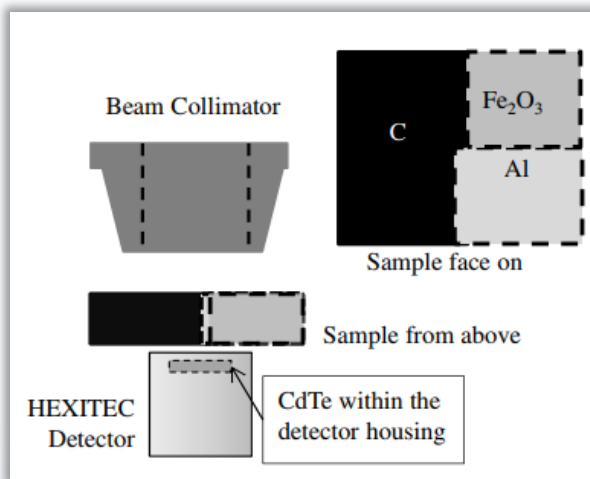


2.5 缪子诱发X射线MIXE简介

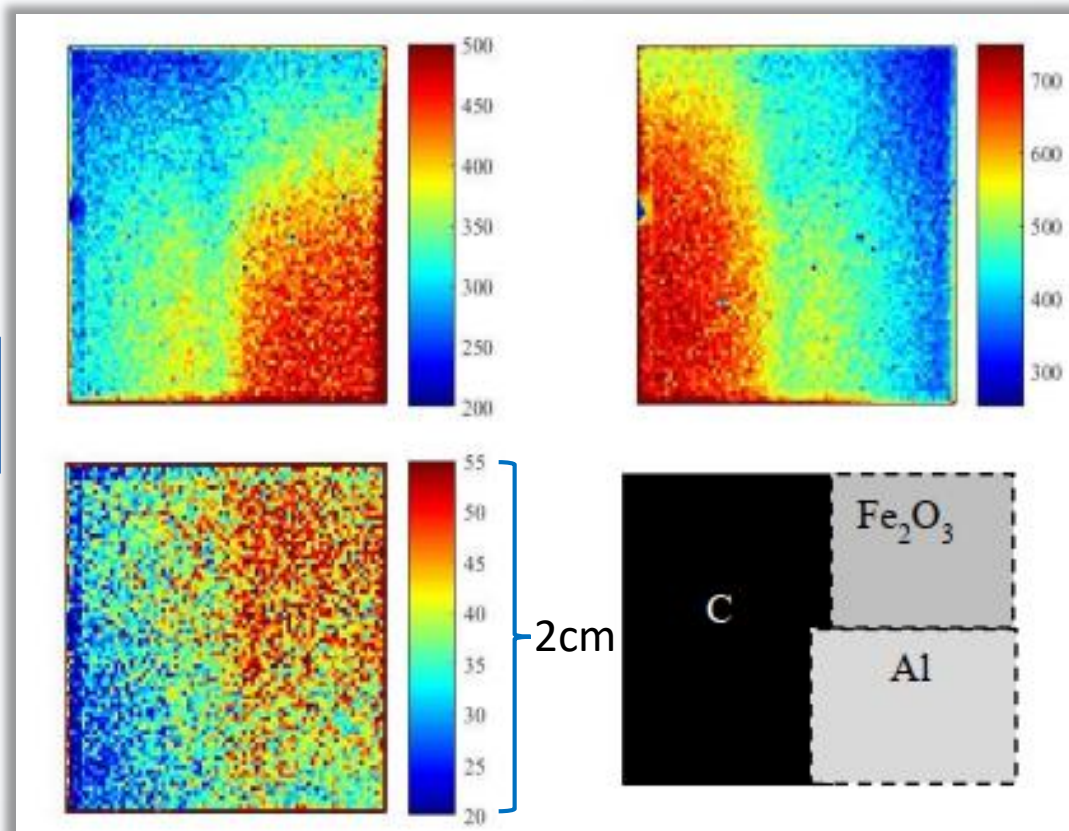
MIXE已有的成像研究1——透视成像



CdTe像素探测器：
同时获得X射线能量和位置



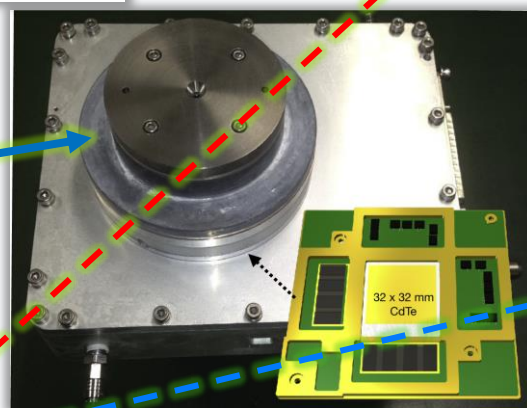
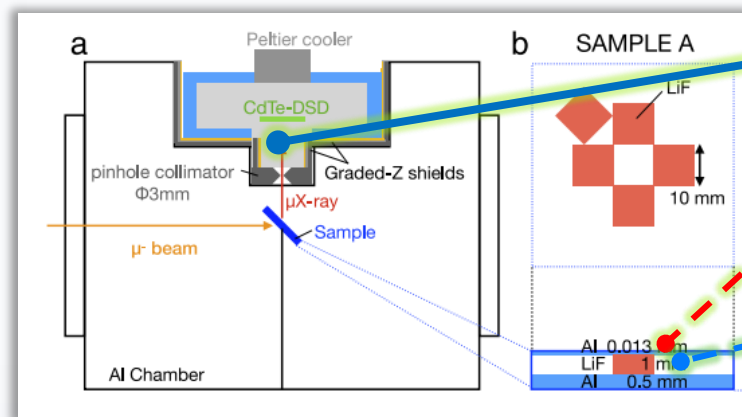
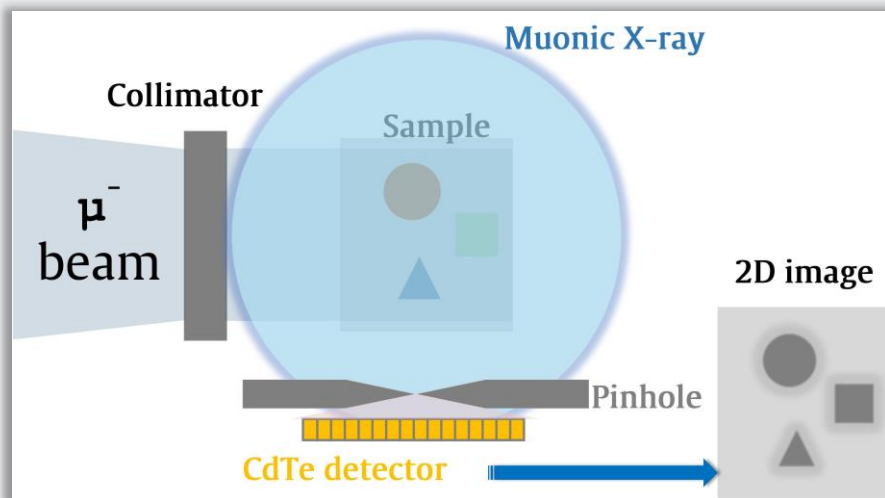
Science and
Technology
Facilities Council
ISIS Neutron and
Muon Source



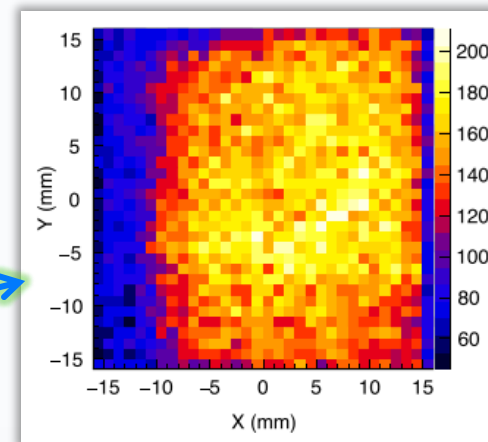
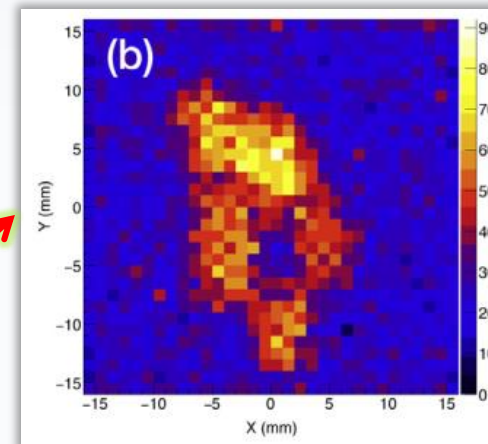
A. Hillier, et al., JPS Conf. Proc. 21, 011042 (2018)

2.6 缪子诱发X射线MIXE简介

MIXE已有的成像研究2——针孔成像



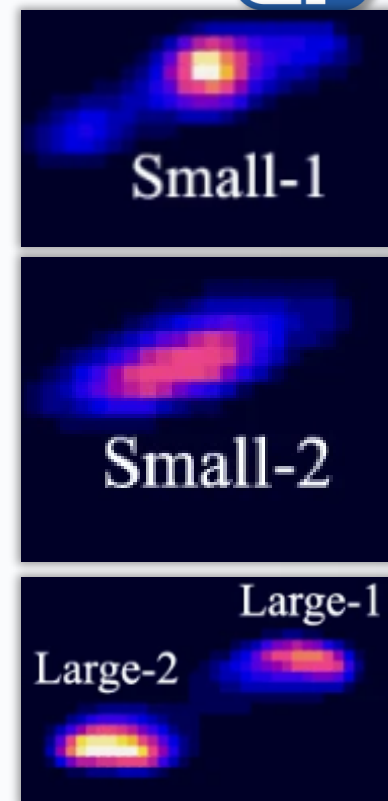
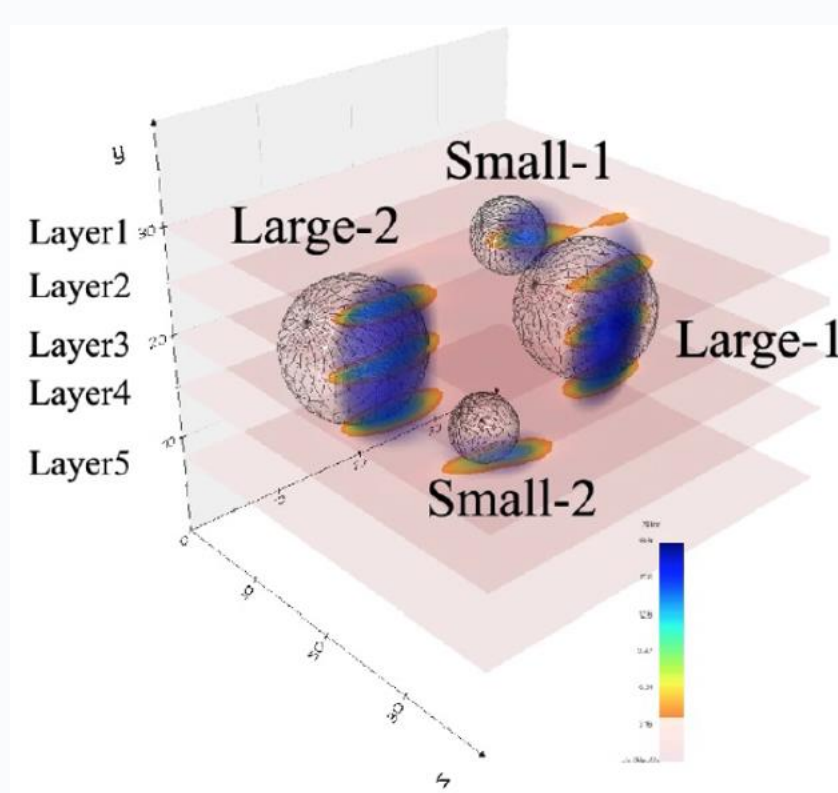
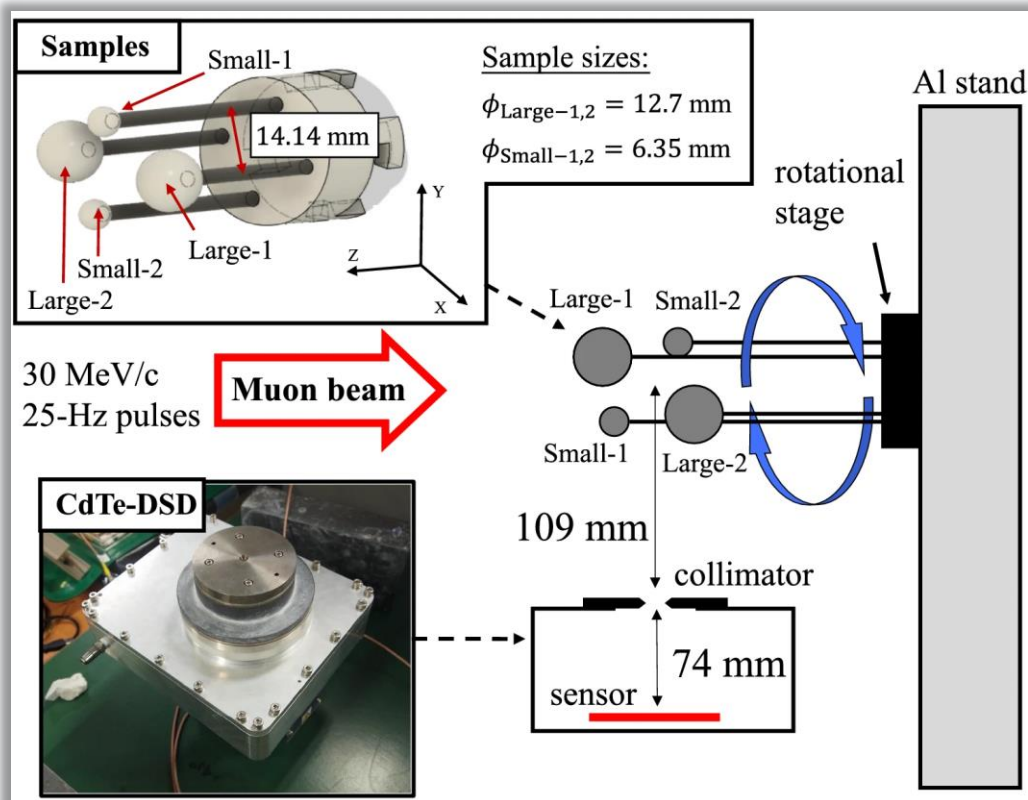
CdTe 探测器



M. Katsuragawa et al., NIMA 912 (2018) 140

2.7 缪子诱发X射线MIXE简介

MIXE已有的成像研究3——针孔+CT



I. Chiu et al., Sci. Rep. 12 (2022) 5261

2.8 缪子诱发X射线MIXE简介

MIXE已有的成像研究4——编码成像

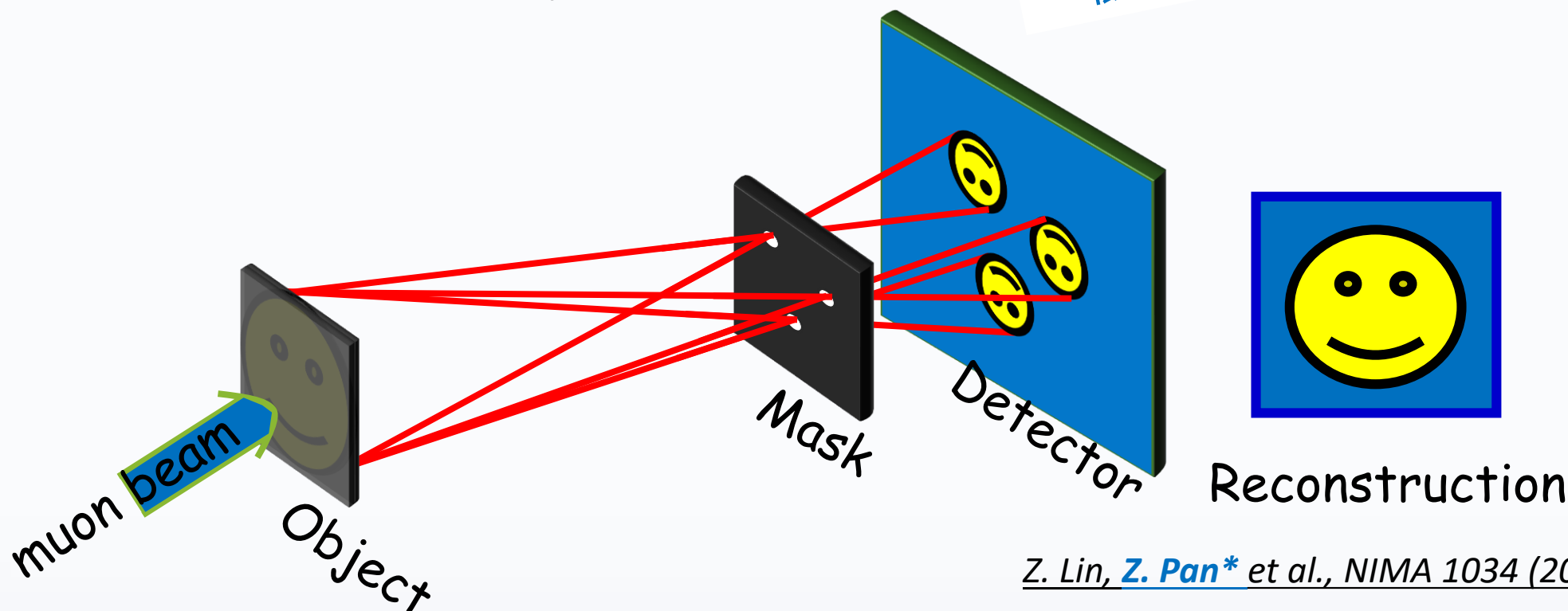
透视成像： 高噪声 / 高采样效率

针孔成像： 低噪声 / 低采样效率

高效率

低噪声

编码孔径成像

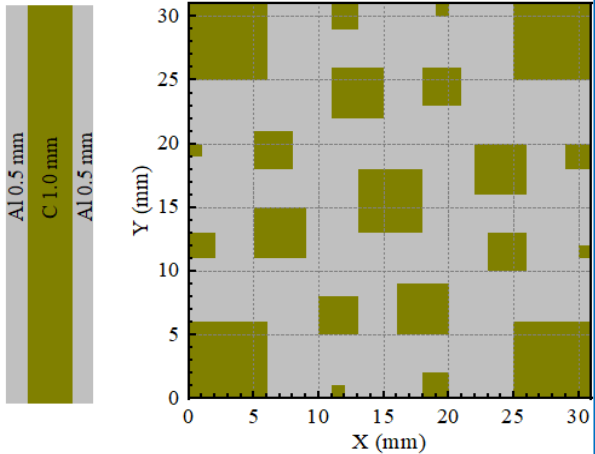


Z. Lin, [Z. Pan*](#) et al., NIMA 1034 (2022) 166783

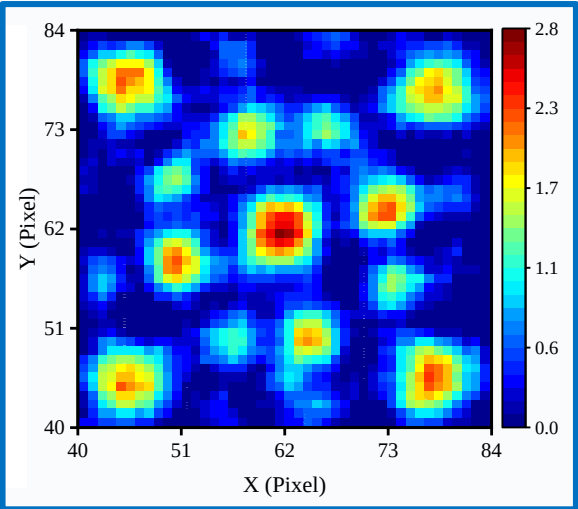
2.9 缪子诱发X射线MIXE简介

MIXE已有的成像研究4——编码成像

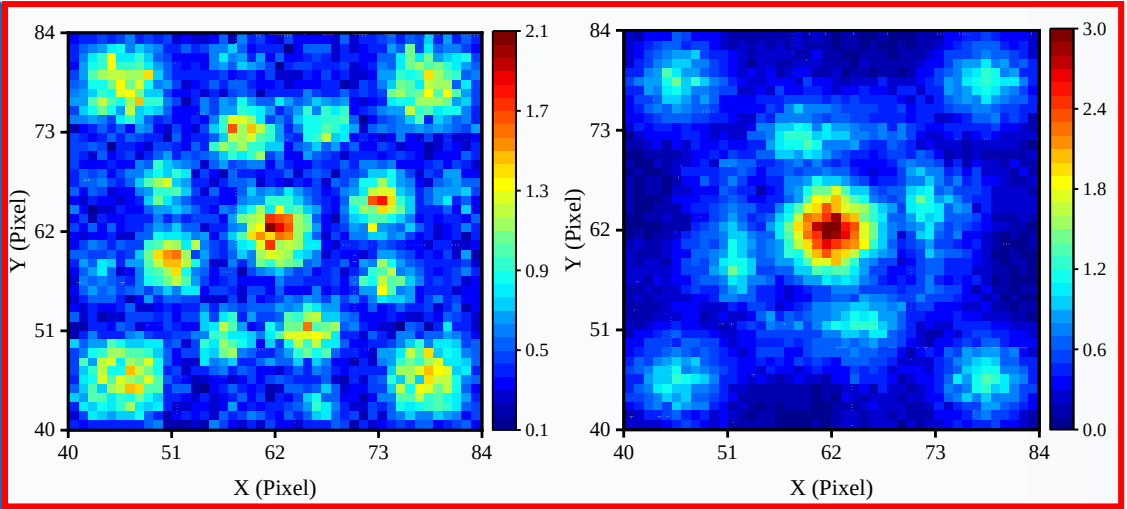
样品



编码孔径成像



单个小孔成像



Imaging technique	Distance[Sample, Det]	Aperture size	Thickness	Q	ϵ	FoM
编码孔成像	80 mm	0.75 mm	1.0	0.670	1.25×10^{-3}	0.100
单个针孔	80 mm	0.75 mm	20.0	0.649	2.06×10^{-5}	0.060
	80 mm	1.50 mm	20.0	0.381	2.67×10^{-5}	0.036

Z. Lin, Z. Pan* et al., NIMA 1034 (2022) 166783

汇报提纲

01 | 应用需求与研究现状

02 | MIXE简介

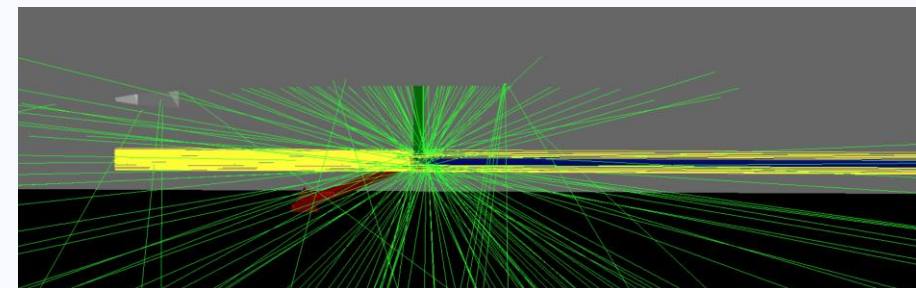
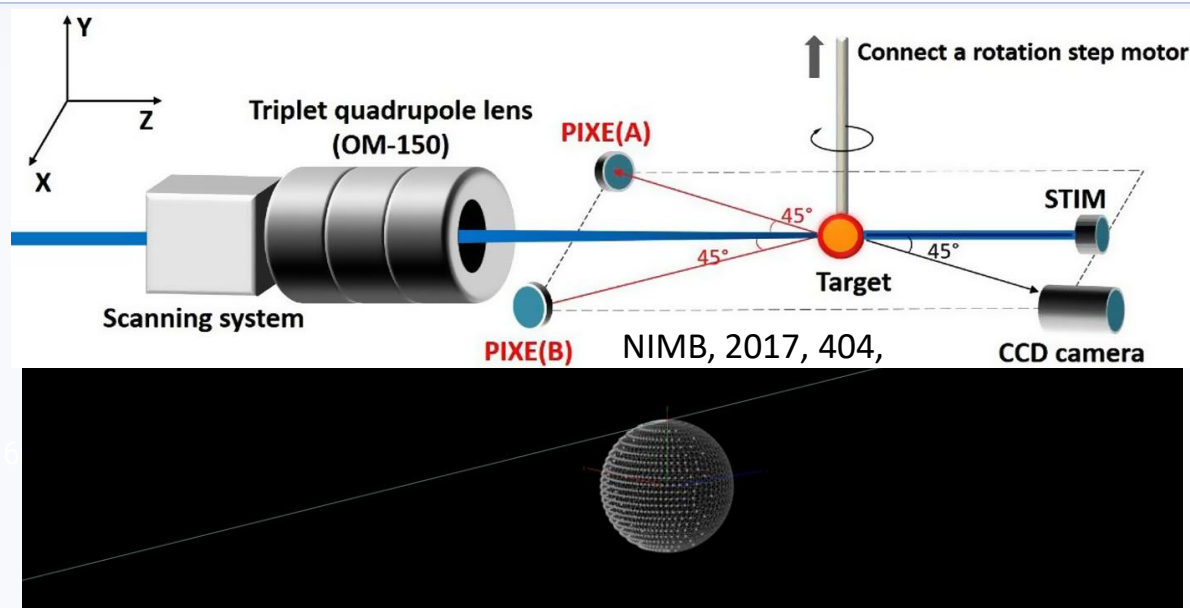
03 | MIXE球编码成像

04 | 总结与展望

3.1 MIXE球编码成像

两类束流成像对比

粒子诱发X射线 (PIXE) 技术：质子PIXE高分辨、缪子MIXE束流更优-分辨率低



优势：

微米级束流扫描+CT
PIXE微米级、0.1 at.%、三维

劣势：

辐射损坏样品、电荷损坏样品
穿透浅、低Z不敏感

缪子束流优势：

无损、穿透深/可调、低Z敏感

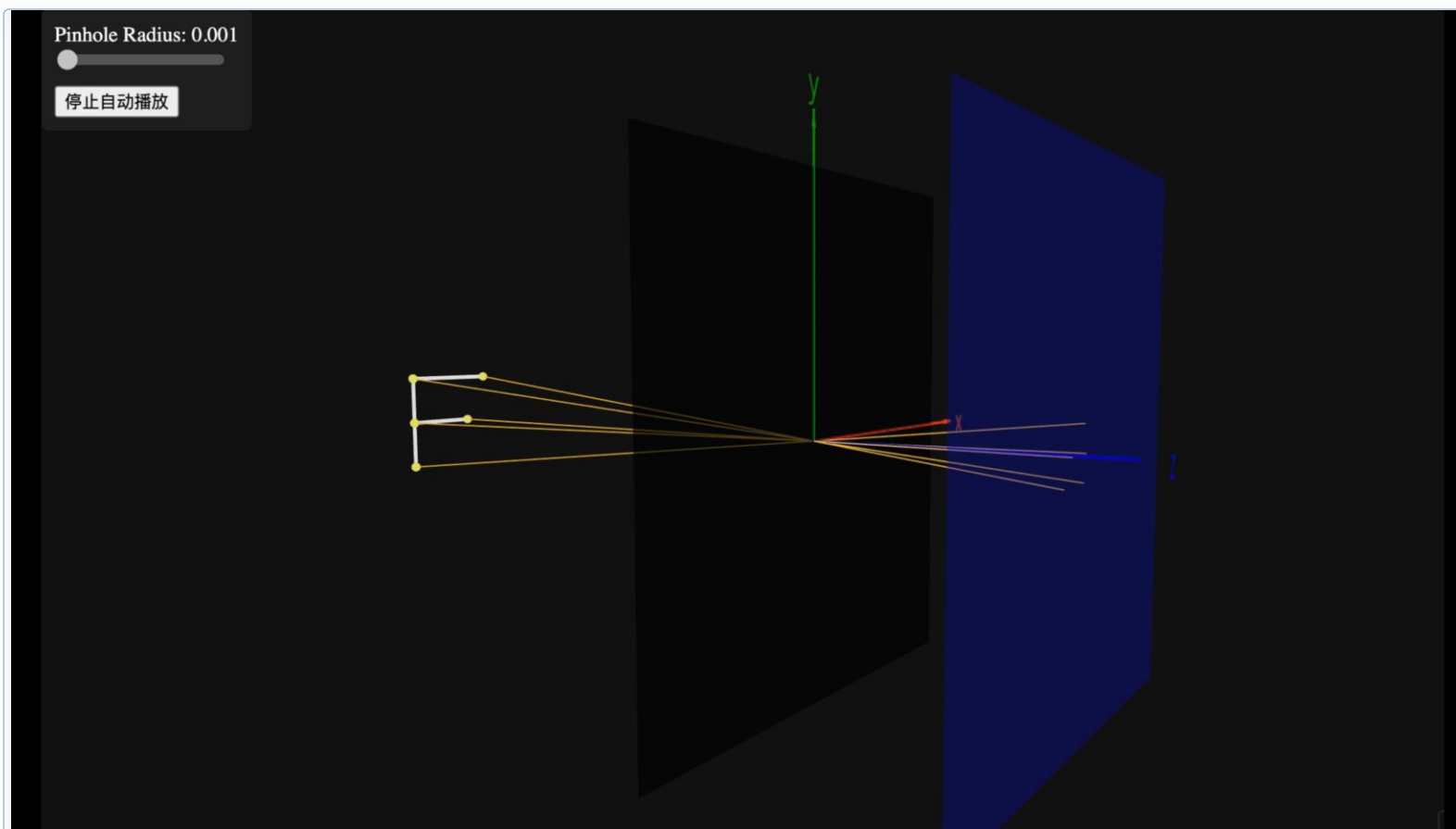
难点：

束斑大无法扫描

3.2 MIXE球编码成像

MIXE成像

MIXE高分辨成像难点——缪子束流不够小(无法扫描)、针孔不够小(非针孔成像)



样品各点发出的x射线可经过针孔成像：

针孔太小-通光量小、

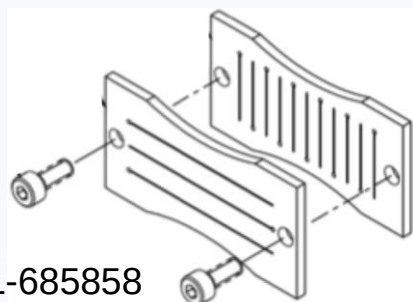
针孔太大-模糊

多针孔编码-孔不够小&&倾斜

孔阑成像

孔阑成像：针孔成像、半影成像（圆孔编码成像、球编码成像）

NIF(eHXI/PHXI)
采用小孔成像

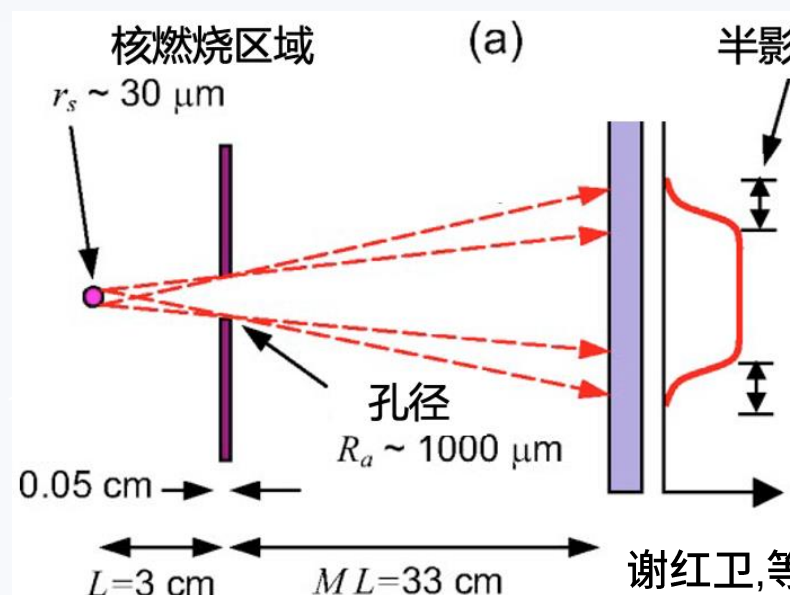


LLNL-JRNL-685858

2.58mm厚的钨板上刻250um宽的狭缝，垂直交叠构成针孔成像元件。

针孔太大——分辨率低

为视场大——采用缩小成像
——分辨率差



NIF
圆孔(大孔)半影成像

$$h = \sqrt{\left(\frac{e}{M}\right)^2 + p\lambda + L^2 + (\Delta d)^2},$$

分辨率可达微米级

谢红卫,等,原子能科学技术,2010,44(9):636

余波,等,光学学报,2011,31(11):1111001

余波,等,强激光与粒子束,2015,27(7):072005

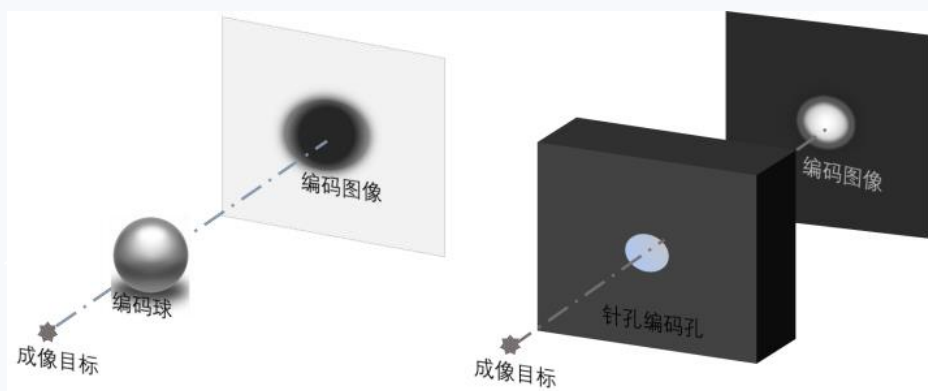
F. H. Séguin, et al, Rev. Sci. Instrum. 2004, 75:3520.

B. Kozioziemski, Rev. Sci. Instrum., 2023, 94:041102.

半影成像

圆孔编码成像、球编码成像

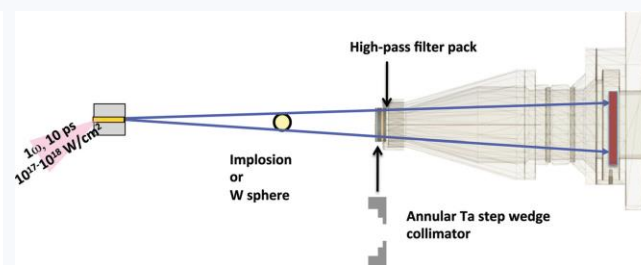
球编码 v.s. 圆孔编码



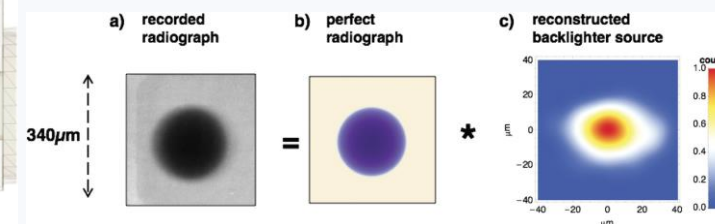
球对称——容易对准

通光量大、但易倾斜

球编码半影成像



R. Tommasini, et al., Phys. Plasmas, 2011, 18, 056309



R. Tommasini, et al., Phys. Plasmas, 2017, 24, 053104

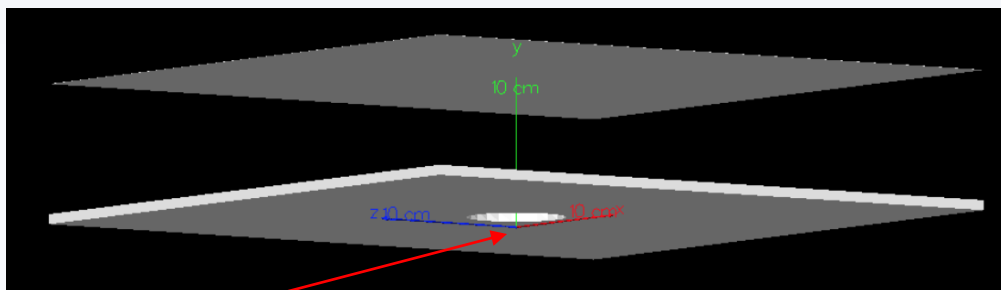
编码——卷积

解码——退卷积

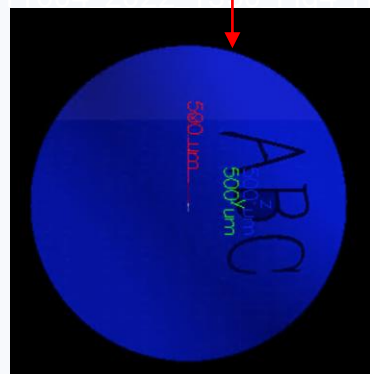
3.5 MIXE球编码

MIXE+半影成像

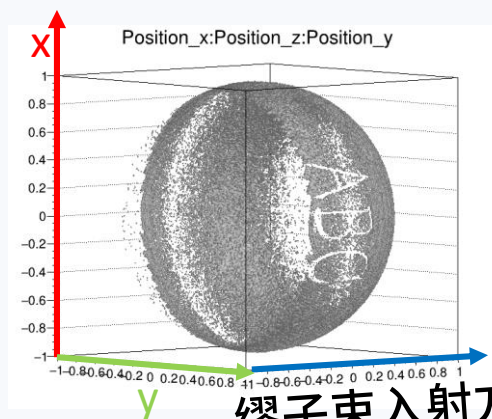
Geant4模拟缪子照射ICF靶球诱发X射线，并经圆孔/球编码后，探测器得到编码图



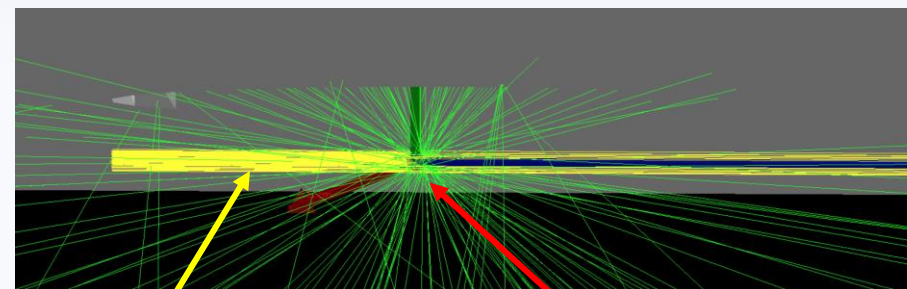
构建HDC壳层模型



x射线产生的空间位置

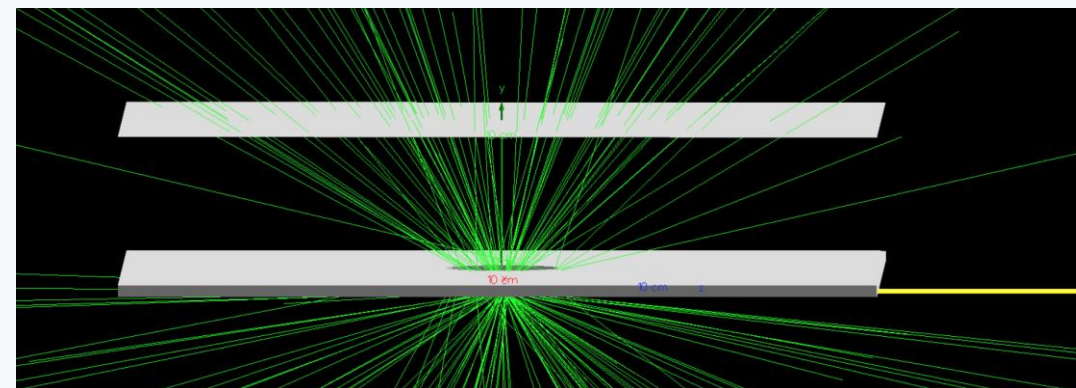


缪子束入射方向z



缪子束

靶球HDC壳层

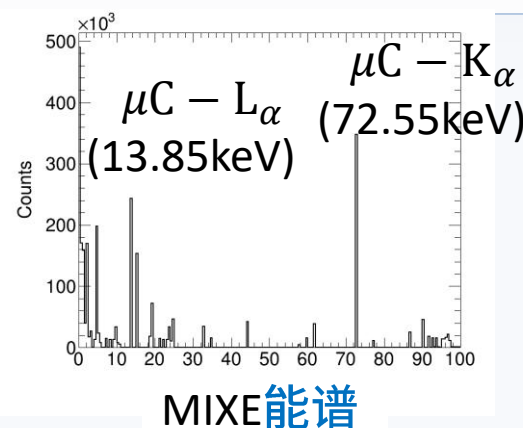
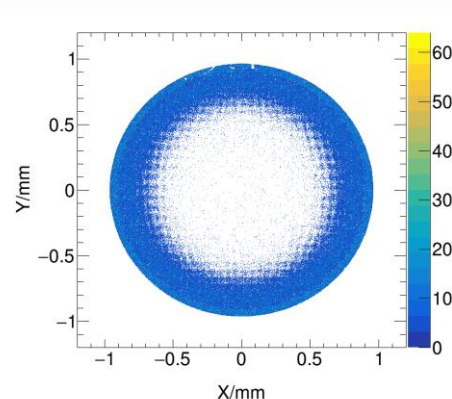


3.6 MIXE球编码

MIXE+半影成像

Geant4模拟：缪子诱发X射线（MIXE）描述靶丸元素分布

x射线产生位置
(HDC球壳投影)
(在x_y平面上)



MIXE能谱

x射线产生位置
(HDC球壳投影)
(在x_z平面上)

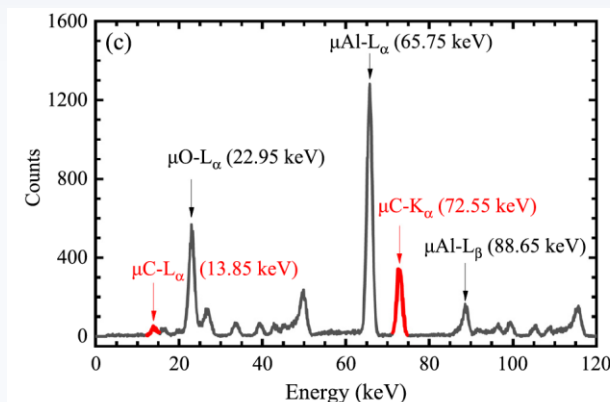
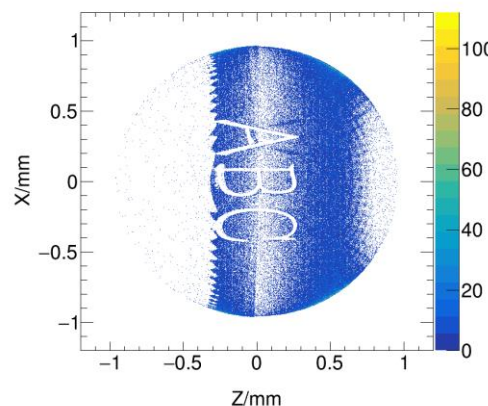
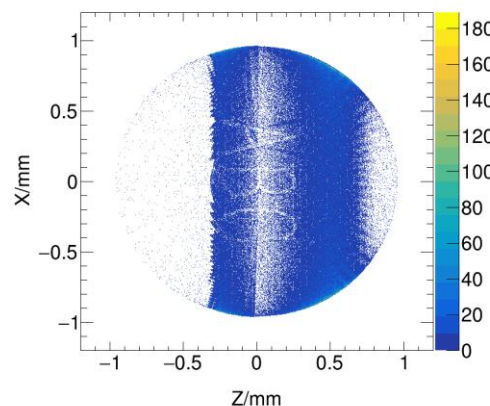


Fig. 3. (a) Depth distribution of muons with different kinetic energies in the sandwiched sample, (b) fraction of negative muons that stop in the second layer (C layer consists of carbon blocks and aluminum blocks) (red) and carbon blocks (black), and (c) energy spectrum recorded by a CdTe detector.

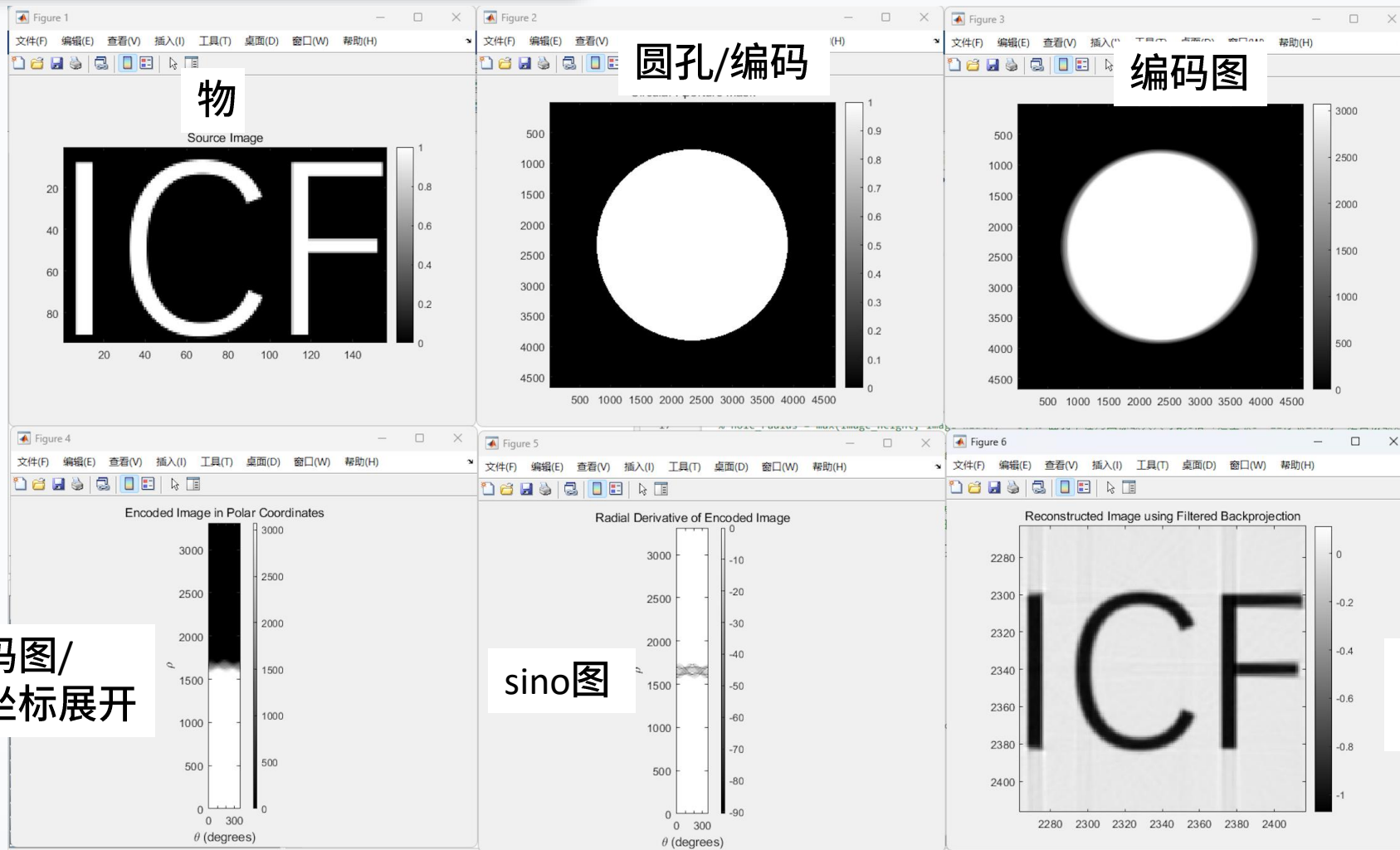
Z.lin, Z. Pan* et al., NIMA 1034(2022) 166783
潘子文, 林泽斌, 叶邦角

半个HDC球壳(y>0)投影

3.7 MIXE球编码

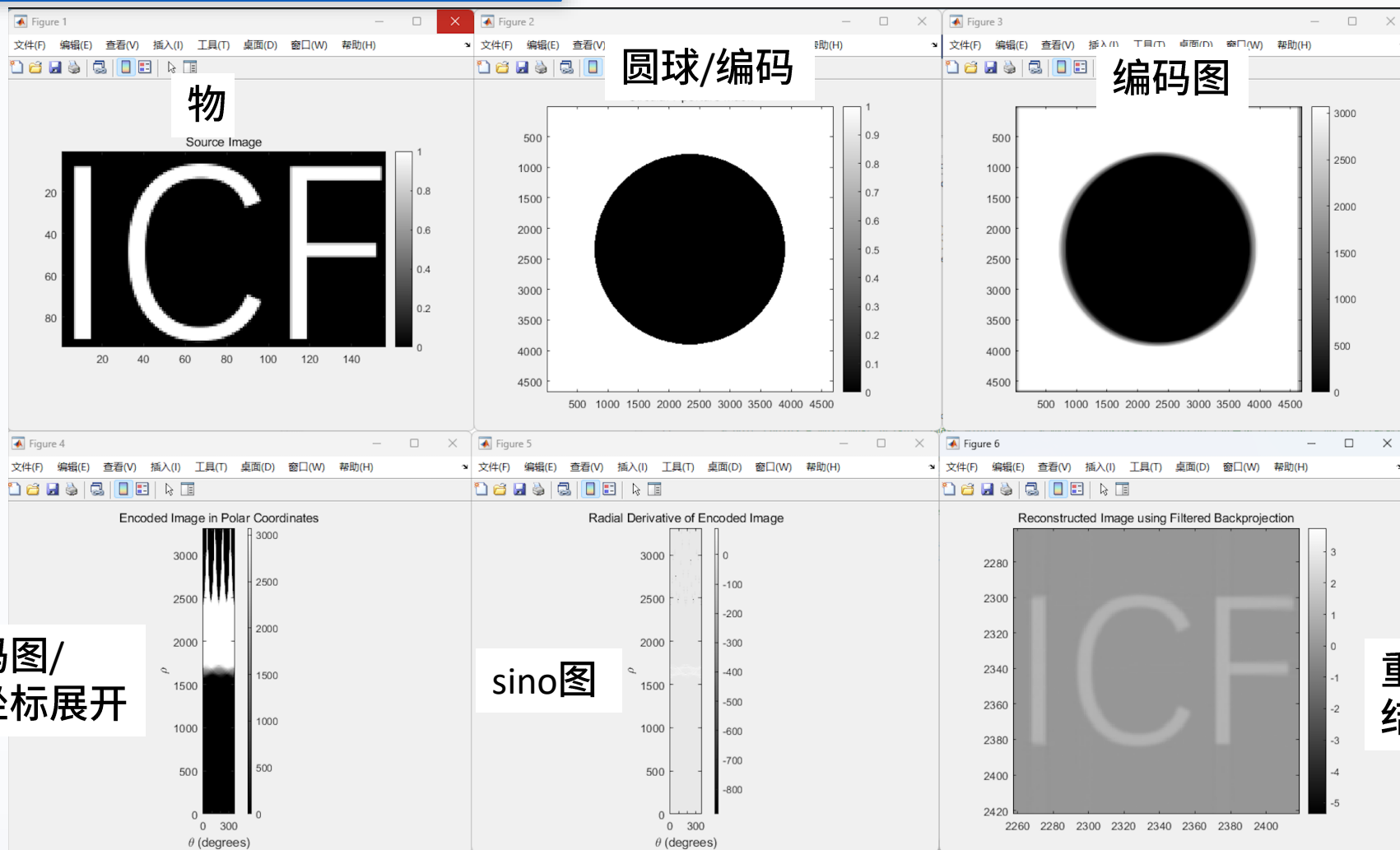


半影成像编码解码重建1.圆孔仿真



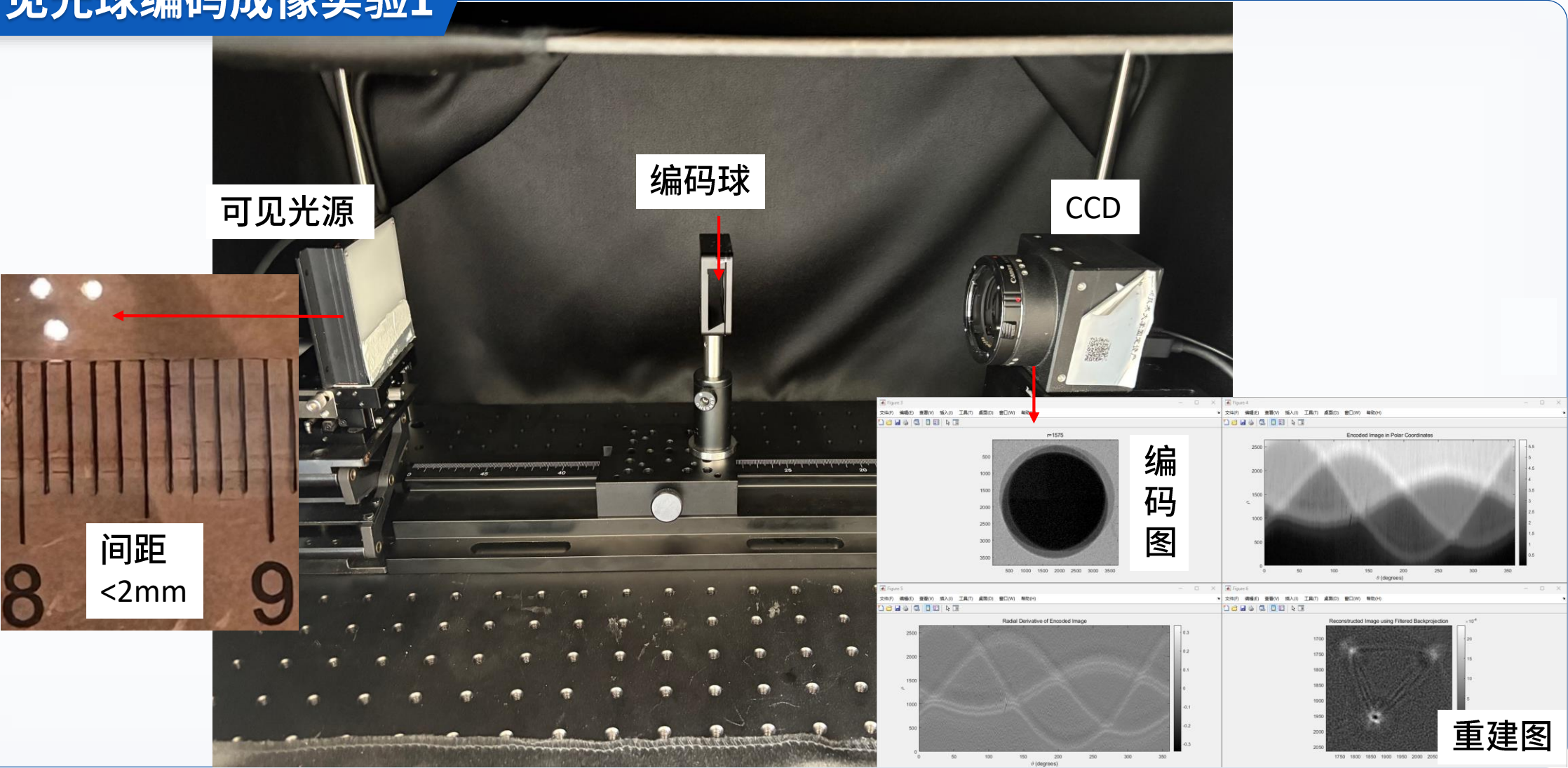
3.8 MIXE球编码

半影成像编码解码重建2.圆球仿真



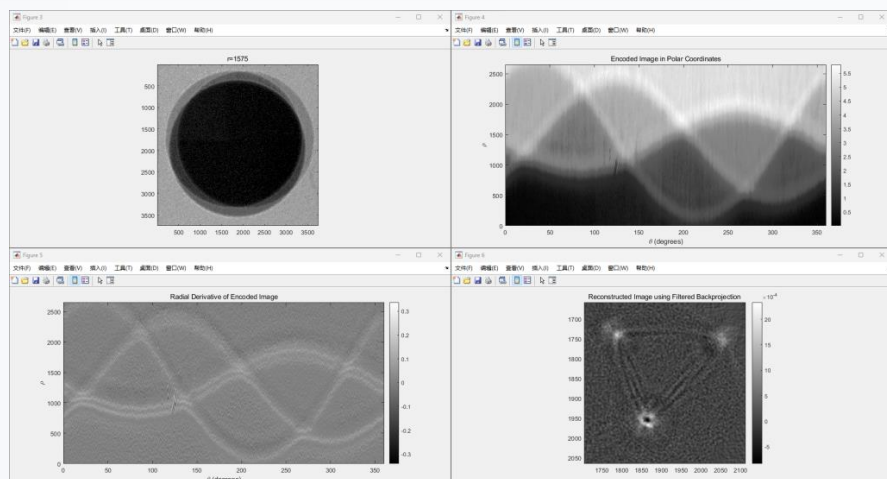
3.9 MIXE球编码

可见光球编码成像实验1



3.9 MIXE球编码

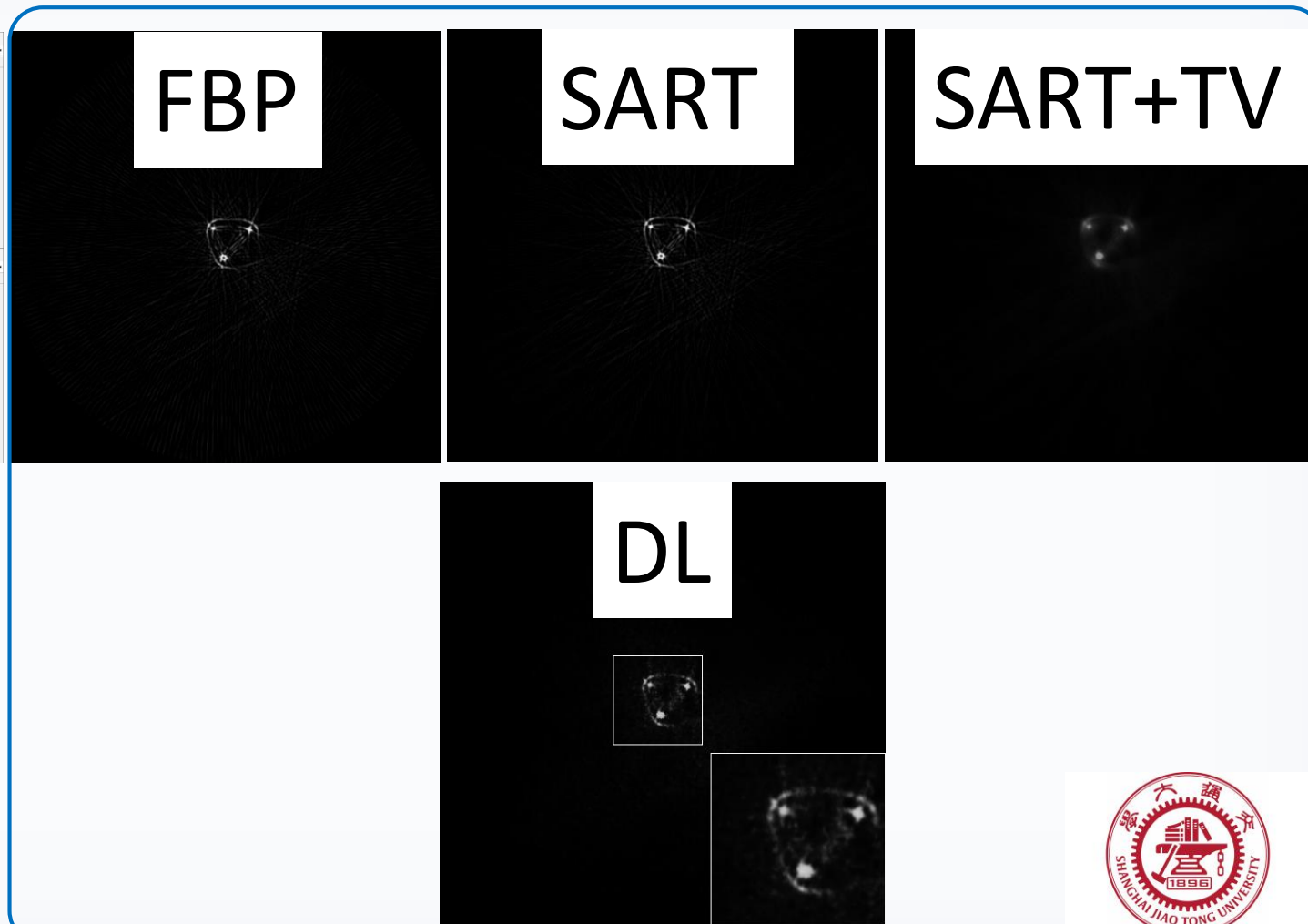
可见光球编码成像实验2



在此基础上利用迭代重建IR以及深度学习算法消除伪影研究^{[1][2]}

[1]上海交通大学团队

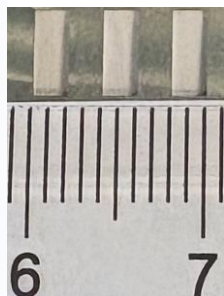
[2] M.O.Unal, Biomed. Signal Process. Control, 2022, 75, 103598.



3.10 MIXE球编码

可见光球编码成像实验3

可见光源

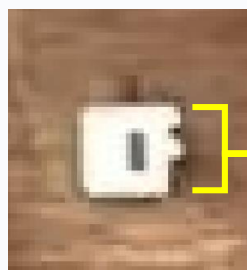
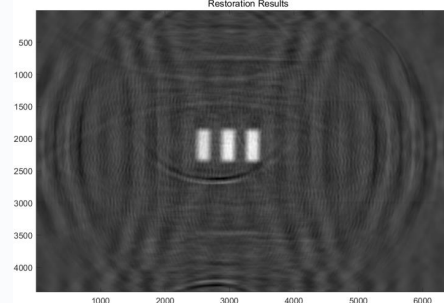


2mm
光源

重建算法

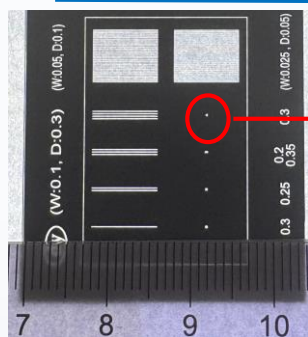
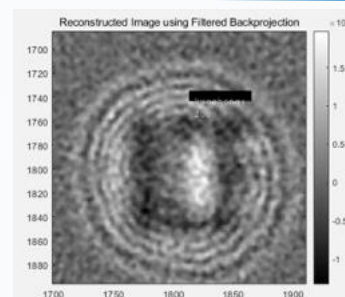
Matlab:deconv-RL/deconv-wnr

重建结果



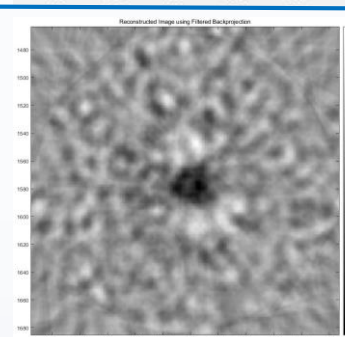
0.5mm
光源

iradon



0.3mm
光源

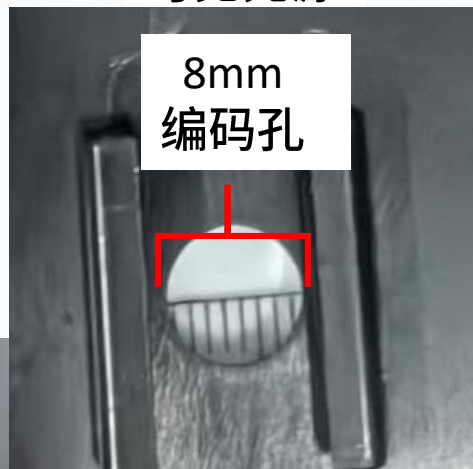
iradon



3.10 MIXE球编码

可见光孔编码成像实验:上海交大团队

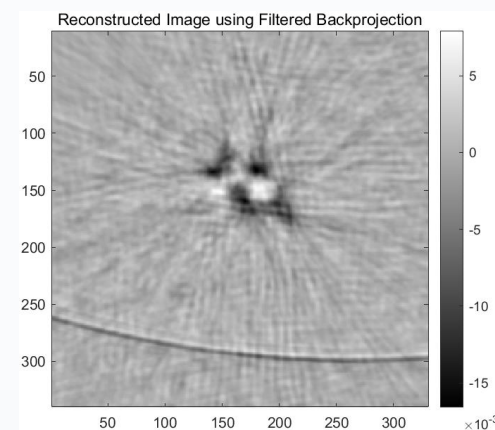
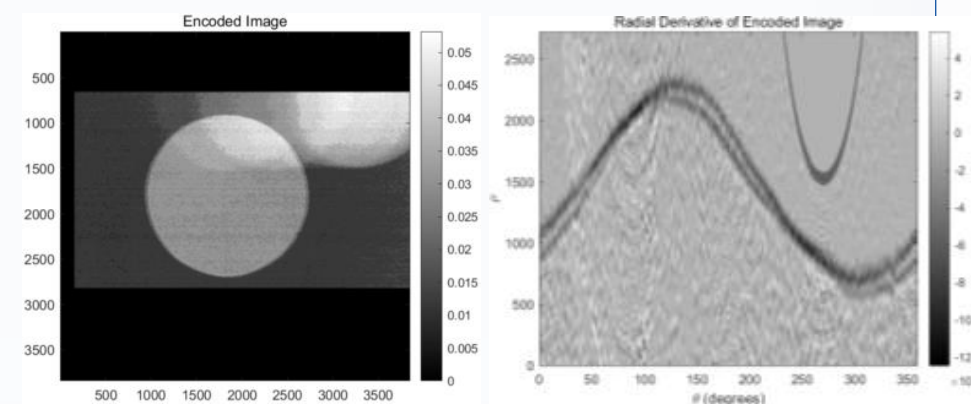
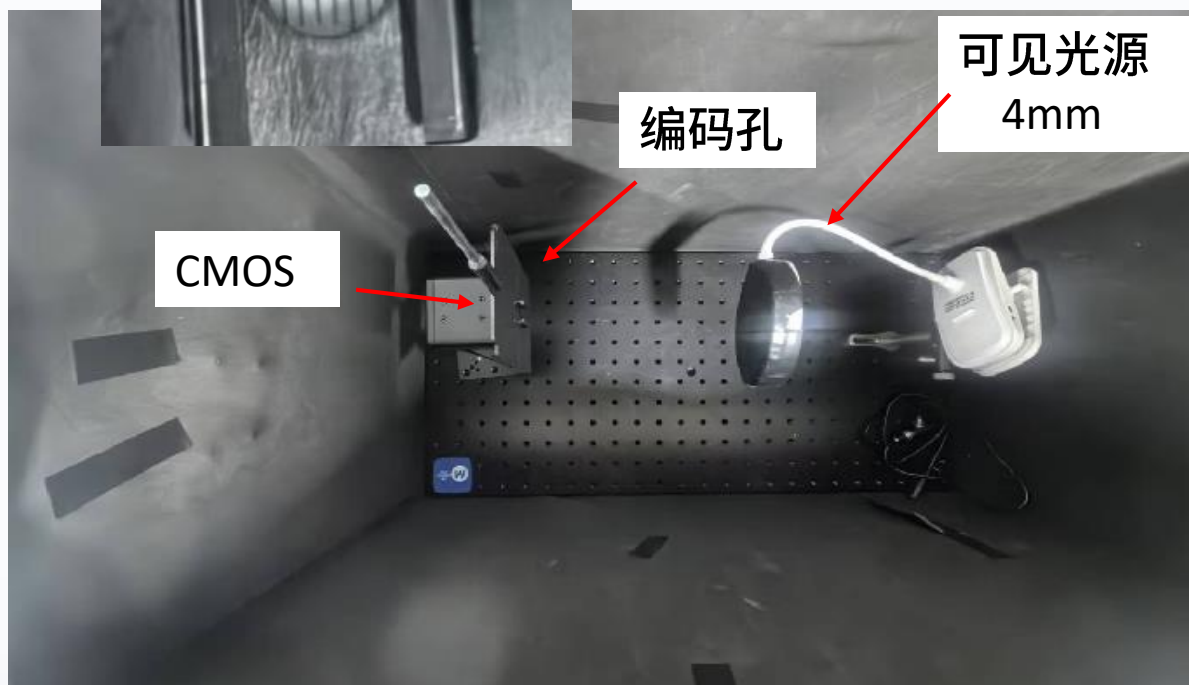
可见光源



重建算法

Matlab:deconv-RL/deconv-wnr

重建结果



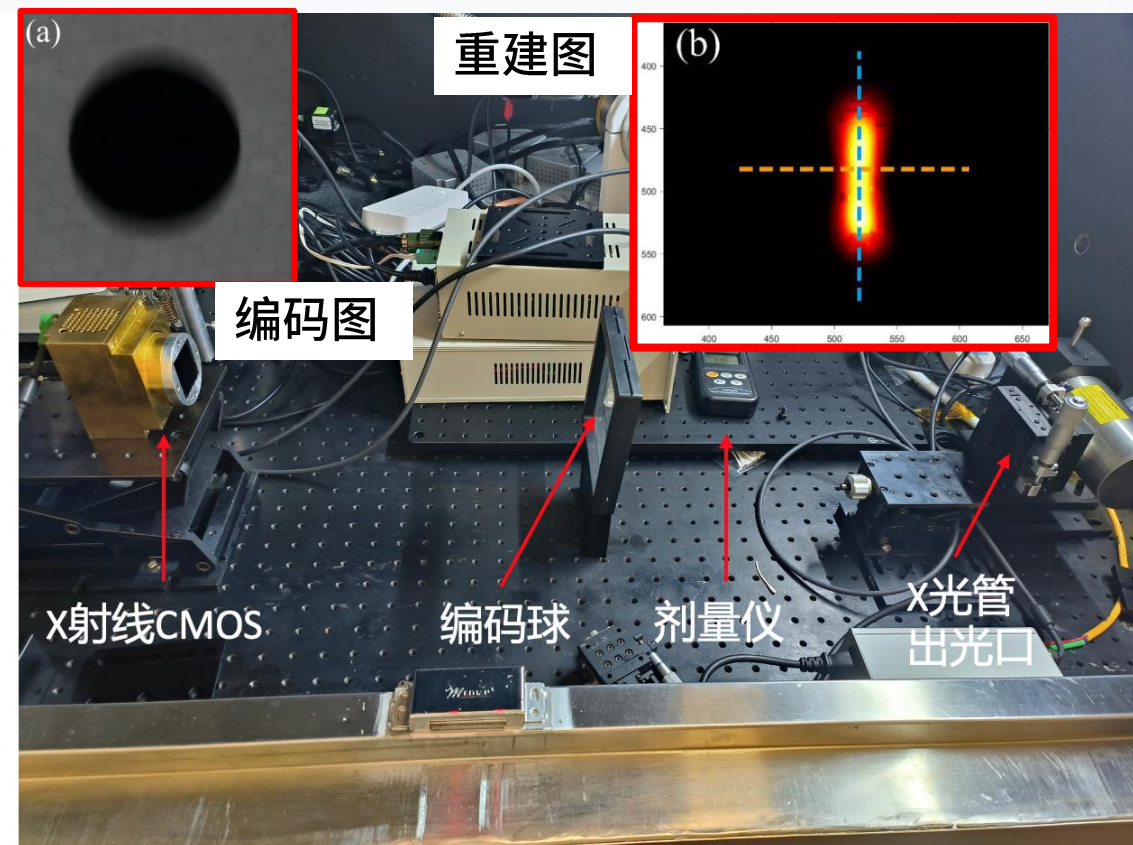
将使用深度学习算法提高重建质量

3.11 MIXE球编码

X射线球编码成像实验



J. Yu, D.Li, L. Cao., et al., Rev. Sci. Instrum. 2024, 95, 013102



已对数十微米x射线源成像，
空间分辨率可达 $\leq 10\mu\text{m}$

汇报提纲

01 | 应用需求与研究现状

02 | MIXE简介

03 | MIXE球编码成像

04 | 总结与展望

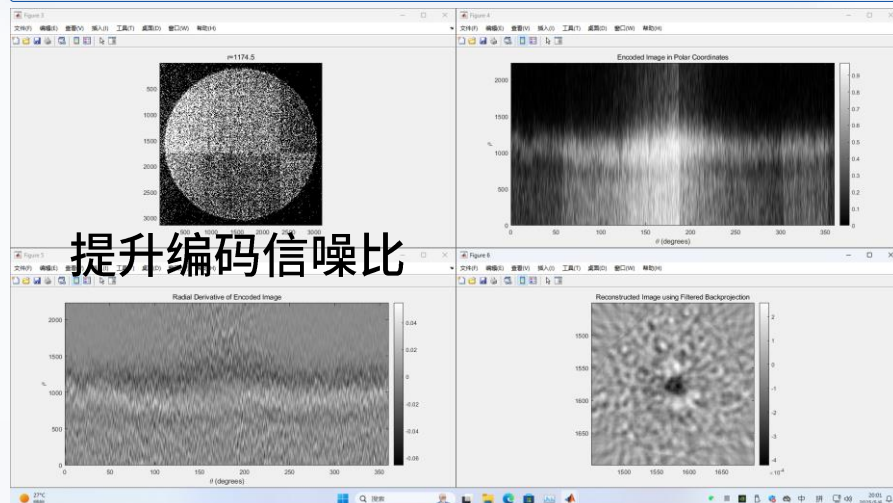
4.1 近期将开展工作

可见光实验

提升SNR、物像距优化、分辨率探究

解码技术优化、消除伪影赝像

利用滤片初步探究谱分辨



X光实验

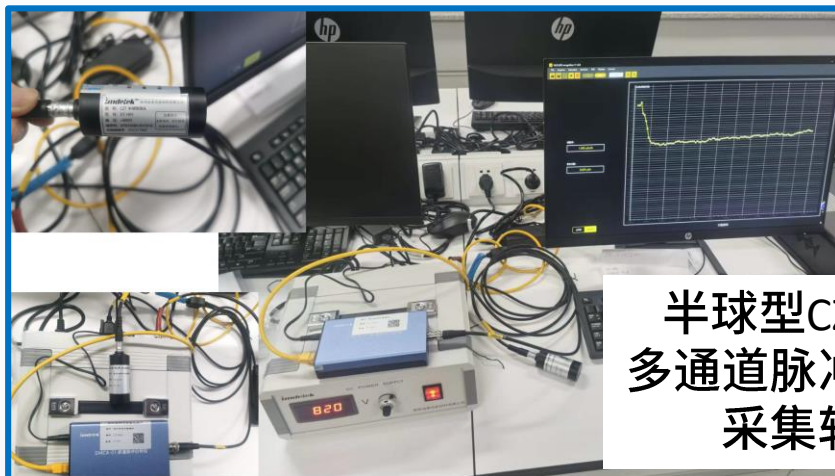
X光管+球编码成像系统、优化分辨率

对已知特征X光源进行成像

不同能量特征X光源+CZT探测器



4.2近期将开展工作：探测器预研



1. 缪子诱发X射线(MIXE)优势

高能量高穿透、元素分析、低Z材料敏感、动量可调、无损检测

2. 半影成像(圆孔/圆球编码)+MIXE技术可望将元素分布空间分辨率提升至微米级

3. 用Geant4对缪子轰击ICF靶丸HDC壳层产生X射线进行了蒙卡模拟

4. 圆孔/圆盘编码、解码Matlab仿真

5. 可见光实验进行了圆孔/球编码有效性验证实验

6. 需：优化物像距、解码除伪影、提升空间分辨率、X射线实验、能谱/CZT探测器

7. 缪子源：

- 激光-电子-缪子源研究（绵阳-上海SULF-2024年测得、上海SHINE）
- 惠州HIAF/CiADS上的缪子源预计2025年底出束
- 东莞CSNS上的MELODY已开工建设，预计2029年建成

第五届全国强激光与粒子束前沿学术研讨会

感谢各位领导专家 敬请批评指正！

汇报人：李迪开

深圳市超强激光与先进
材料技术重点实验室

深圳技术大学

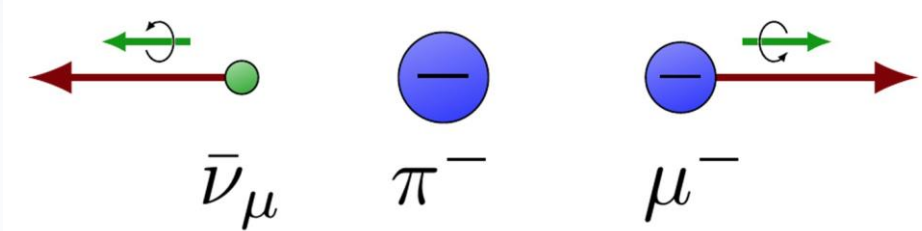
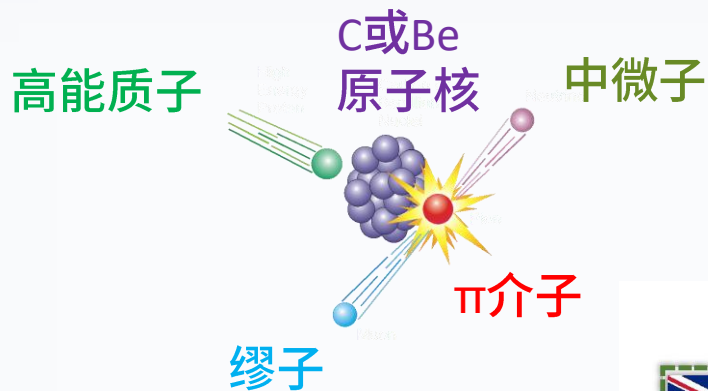
工程物理学院

超强激光应用技术研究中心

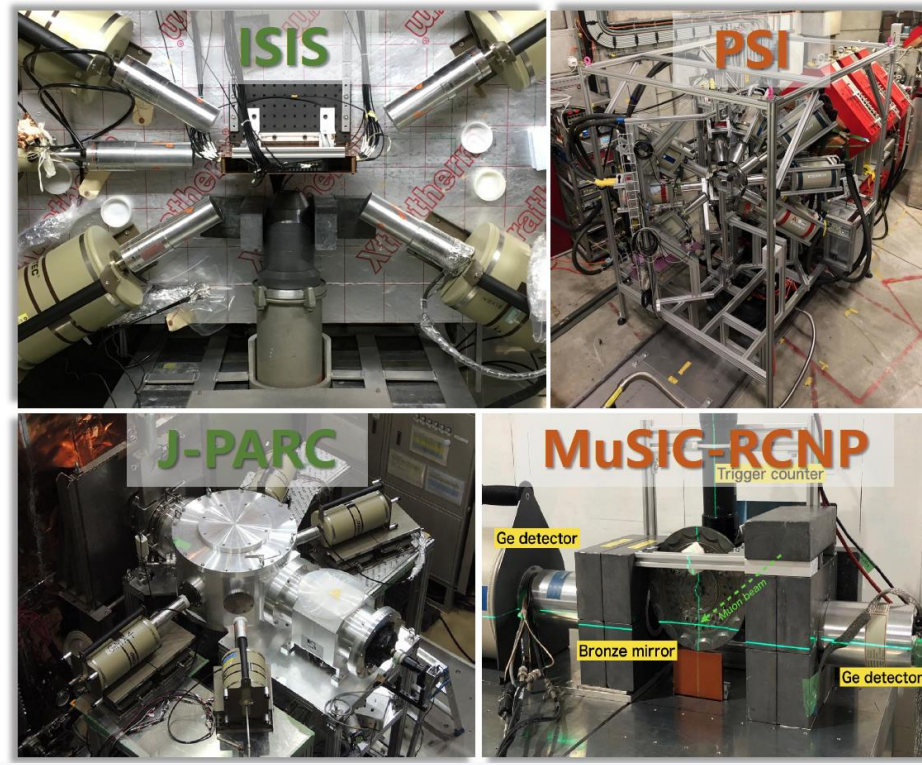
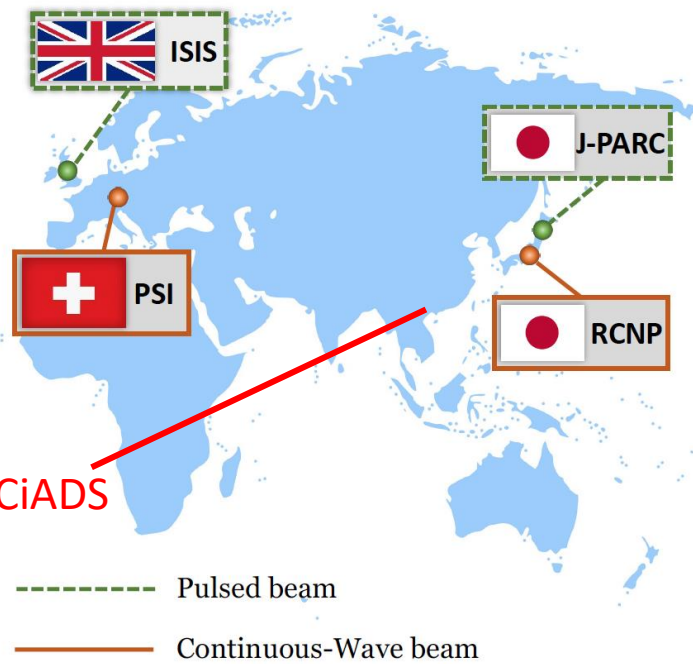
广东省高功率超快激光
及X射线装备工程技术
研究中心

 工程物理学院
COLLEGE OF ENGINEERING PHYSICS

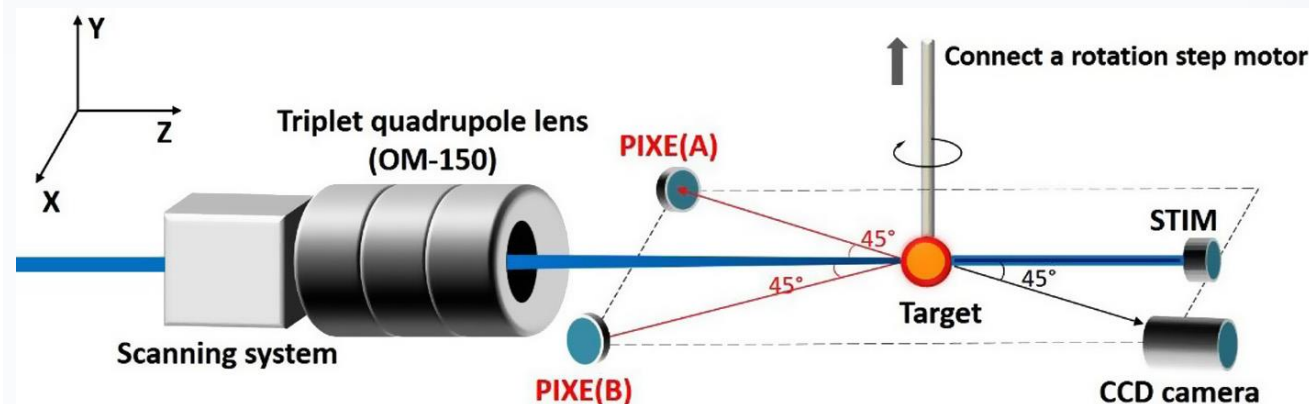
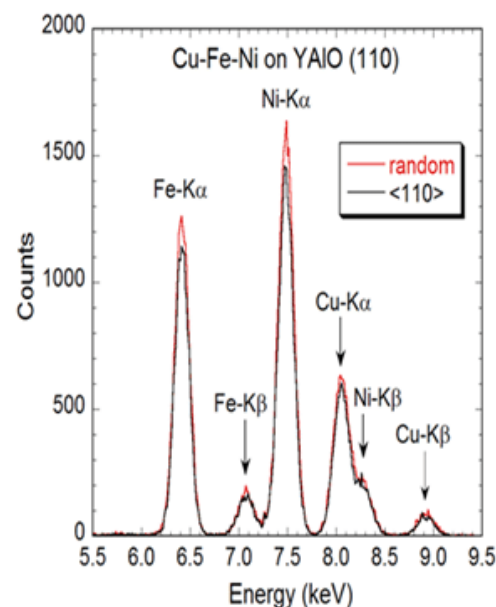
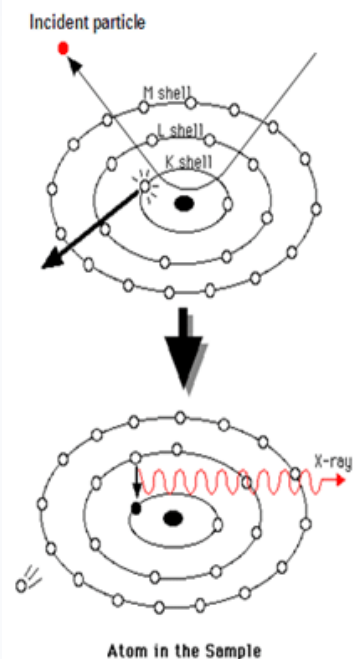
Appendix2: 缪子源



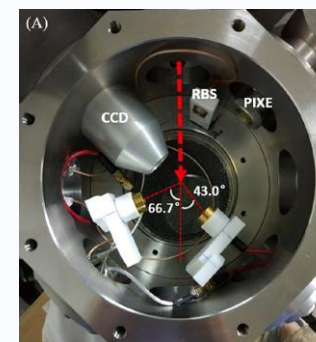
中国散裂中子源CSNS
加速器嬗变驱动加速器CiADS
(2029)



Appendix3: 质子诱发X射线PIXE



NIMB, 2017, 404, 162



NIMB, 2022, 512, 108

PIXE:

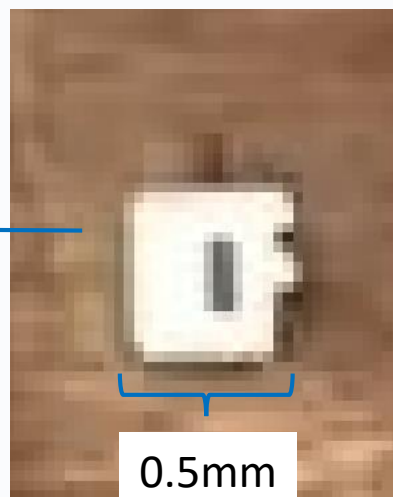
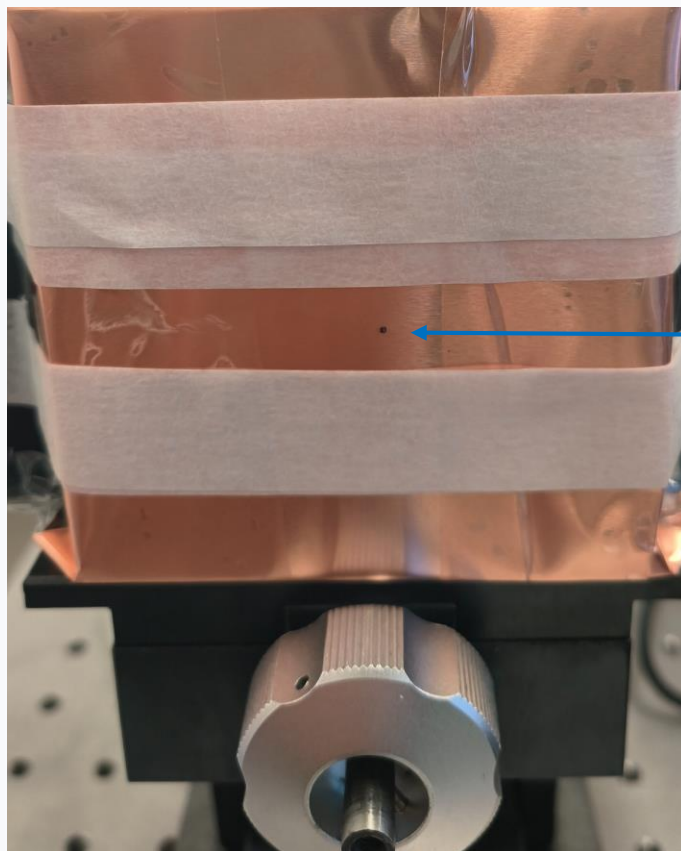
仍是电子退激
能量与传统X射线一致
束流常见、计数率高
穿透力弱、损害大
质子束微调控:可微扫描

MIXE:

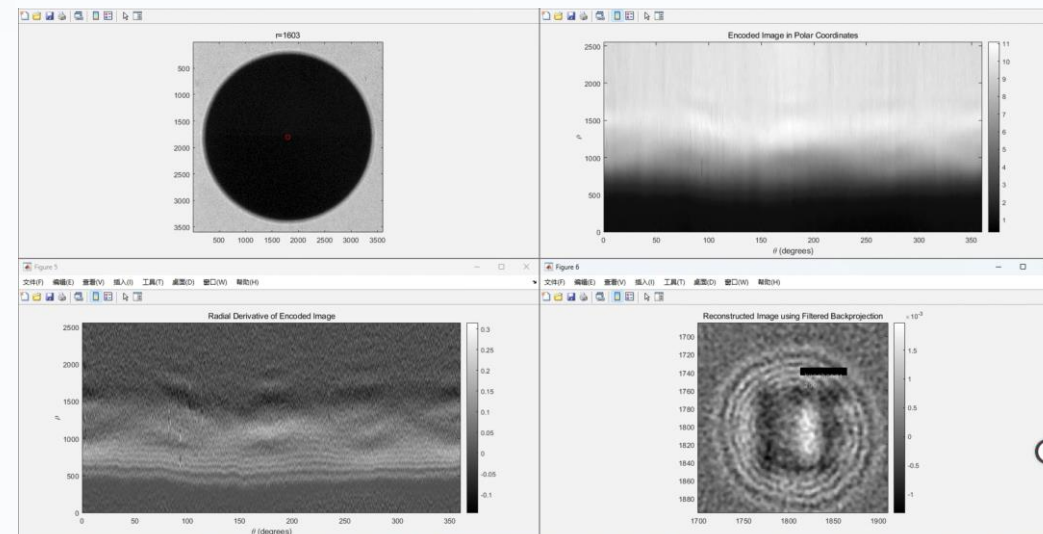
缪子替换电子/退激发
能量高
束流少见、计数率低
穿透力强、损害小
缪子束难调控:需结合编码成像

3.8 MIXE球编码

可见光球编码成像实验2



0.5mm
光源

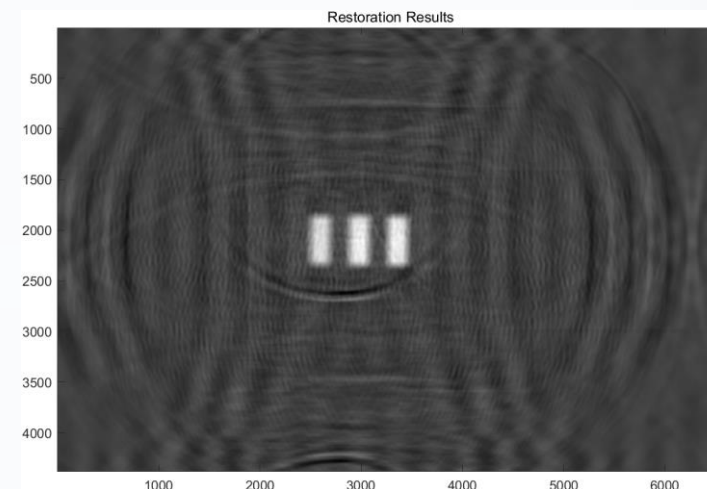
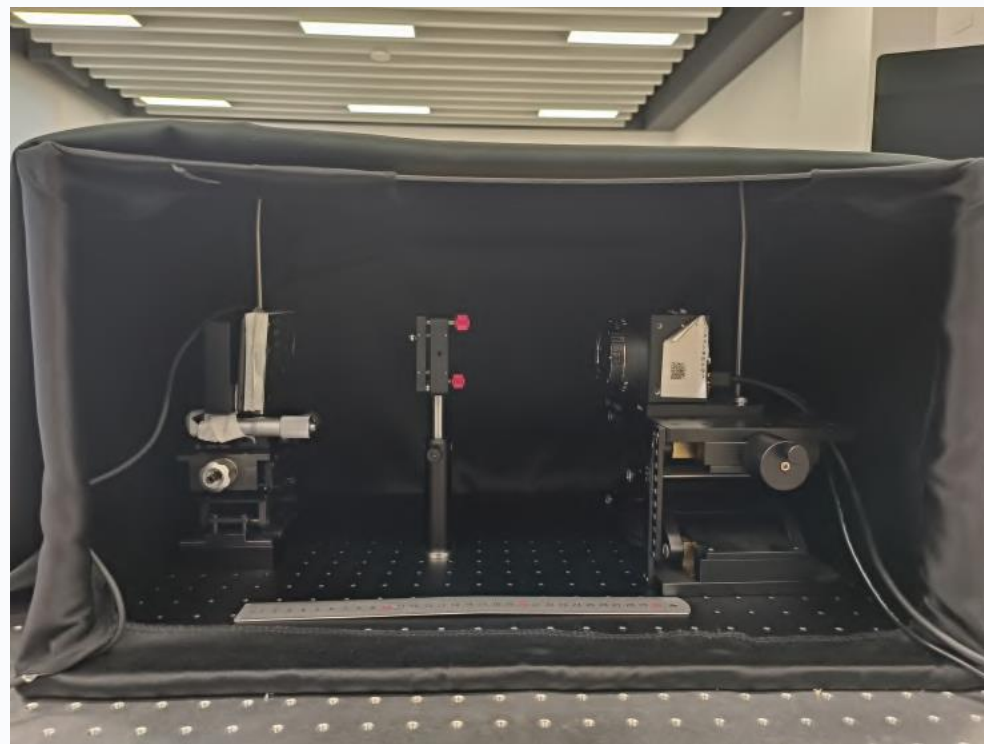
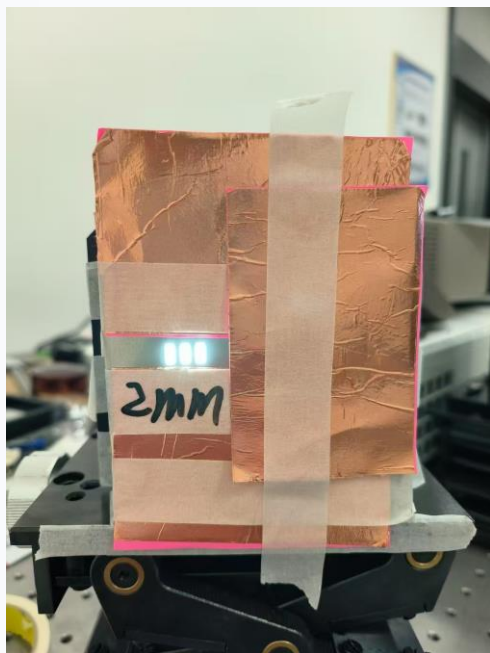


重建结果

3.9 MIXE球编码



可见光球编码成像实验3



维纳滤波反卷积重建结果

