



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

基于高分辨率探测器的康普顿成像研究

张又驰, Samuel Mungai, 卞忠华, 任宁, 杨永峰, **柳正**

2023年8月11日



报告内容

◆ 研究背景

◆ 高分辨率探测器研究

◆ 康普顿成像仿真及重建方法

◆ 图像重建初步结果



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

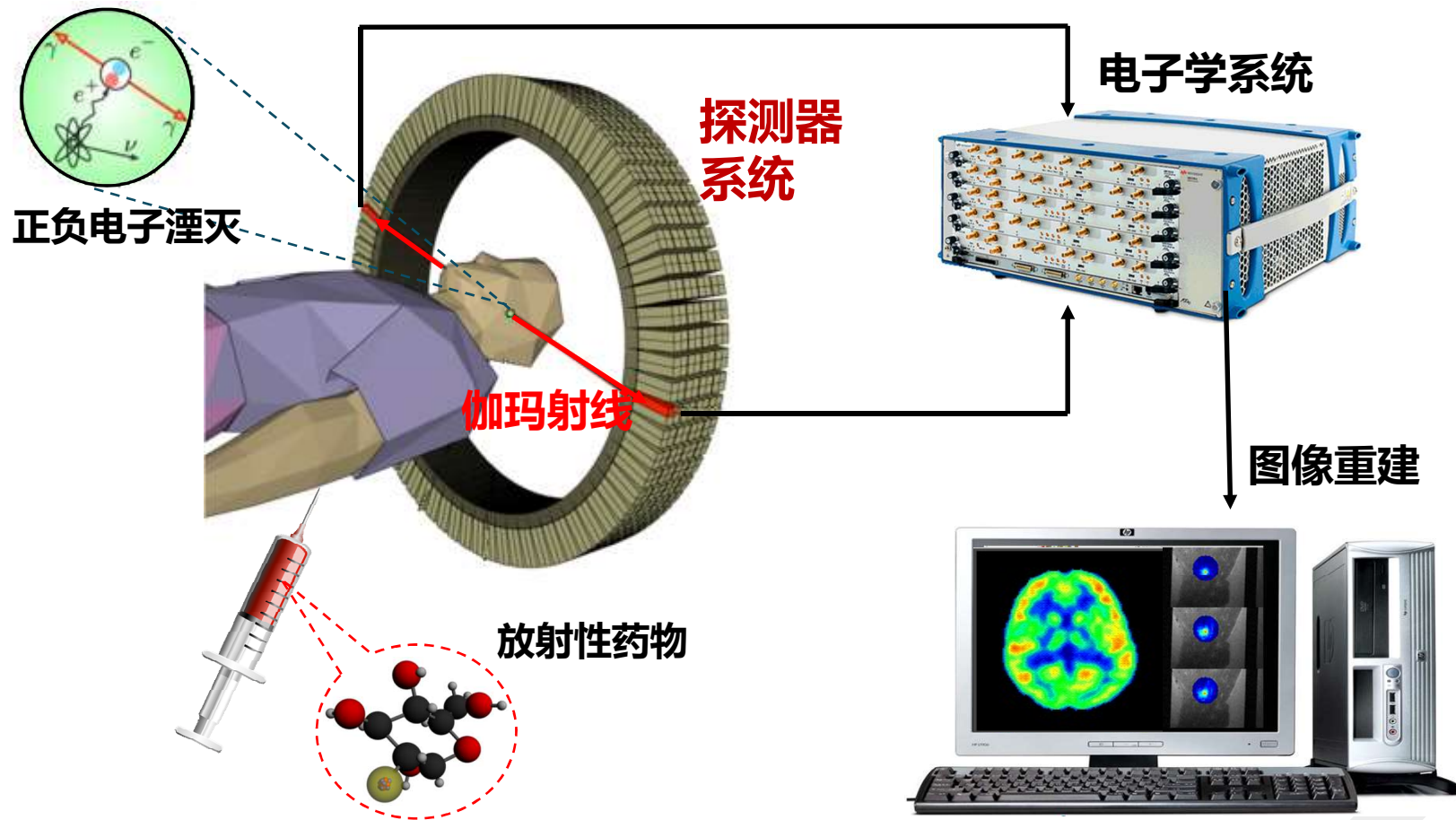


中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

PET成像：技术流程

PET: 正电子发射计算机断层成像



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

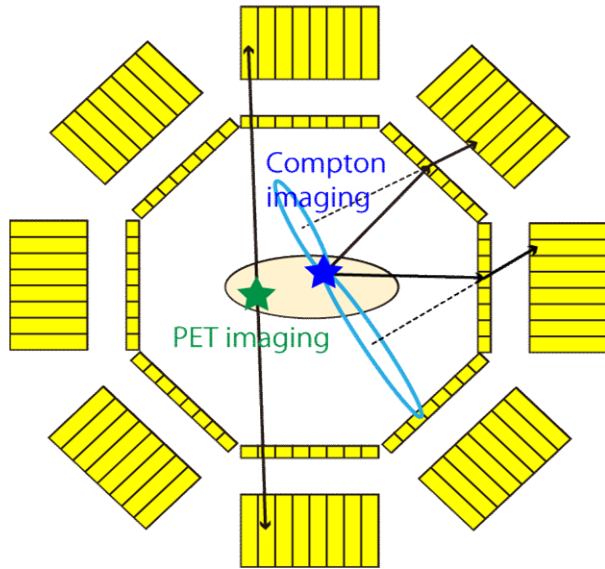


中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

康普顿-PET联合成像

Compton-PET hybrid camera



质子重离子治疗是与传统放疗有所不同，质子等带电粒子在射程末端沉积更多能量，产生布拉格峰，使更多剂量的辐射释放在肿瘤区域，从而减少对正常组织的伤害，影响质子治疗疗效的核心问题就是吸收剂量的精准测量，由于粒子在生物体中通过时产生大量高能 γ 光子，这恰好契合了康普顿相机系统的优势来进行质子治疗射程验证，同时我们可以通过PET图像引导放射治疗来实现精准治疗。

- [1]FU J, FENG F, QUAN H, et al. PWLS-PR: low-dose computed tomography image reconstruction using a patch-based regularization method based on the penalized weighted least squares total variation approach[J]. 2021,
[2] K.Shimazoe et al., "Development of PET and Compton imaging using GAGG-SiPM based pixel detectors" , NIMA. 954, (2020) 161499



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院

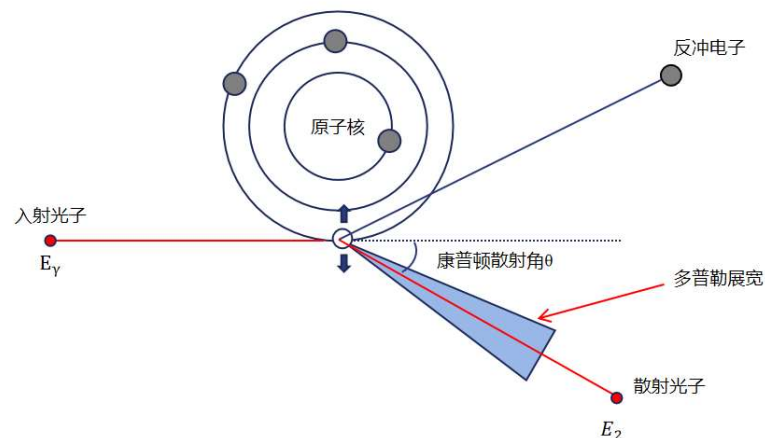
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

康普顿-PET联合成像

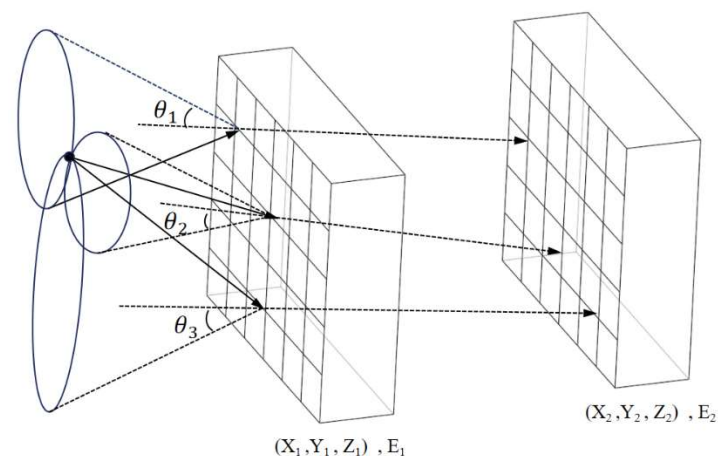
康普顿散射是射线同物质相互作用的重要方式之一， γ 光子同原子的核外电子发生相互作用时，若假设电子处于静止状态且不受原子核的束缚，由于能量守恒和动量守恒，散射角 θ 可以被唯一确定：

$$\cos\theta = 1 + m_e c^2 \left(\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma - E_2} \right)$$

康普顿相机系统可以通过探测器所测量的两个作用点的位置信息和能量信息，使用图像重建方法重建出康普顿反投影圆锥，通过反投影圆锥的叠加确定出放射源的方向。



γ 光子同核外电子相互作用产生康普顿散射



康普顿相机原理示意图



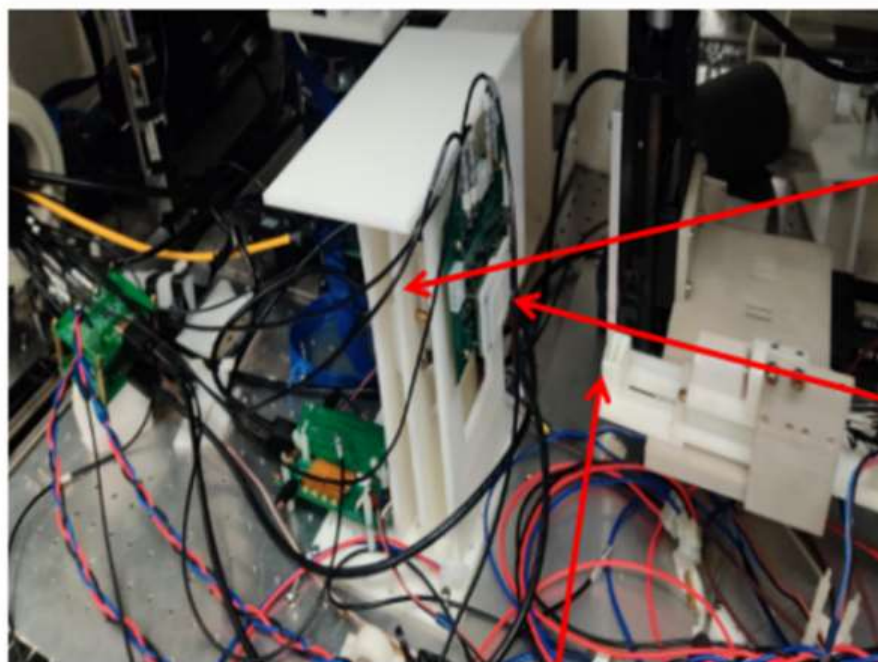
深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

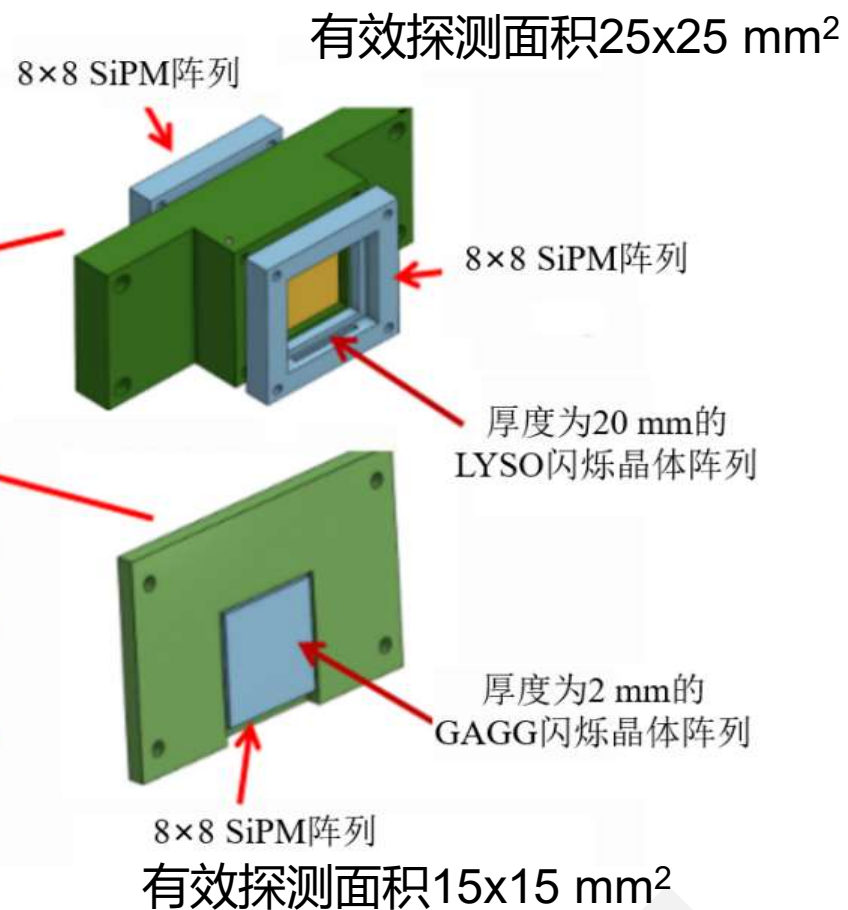


中国科学院深圳先进技术研究院
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

高分辨率探测器研究



Na^{22}



深圳理工大学

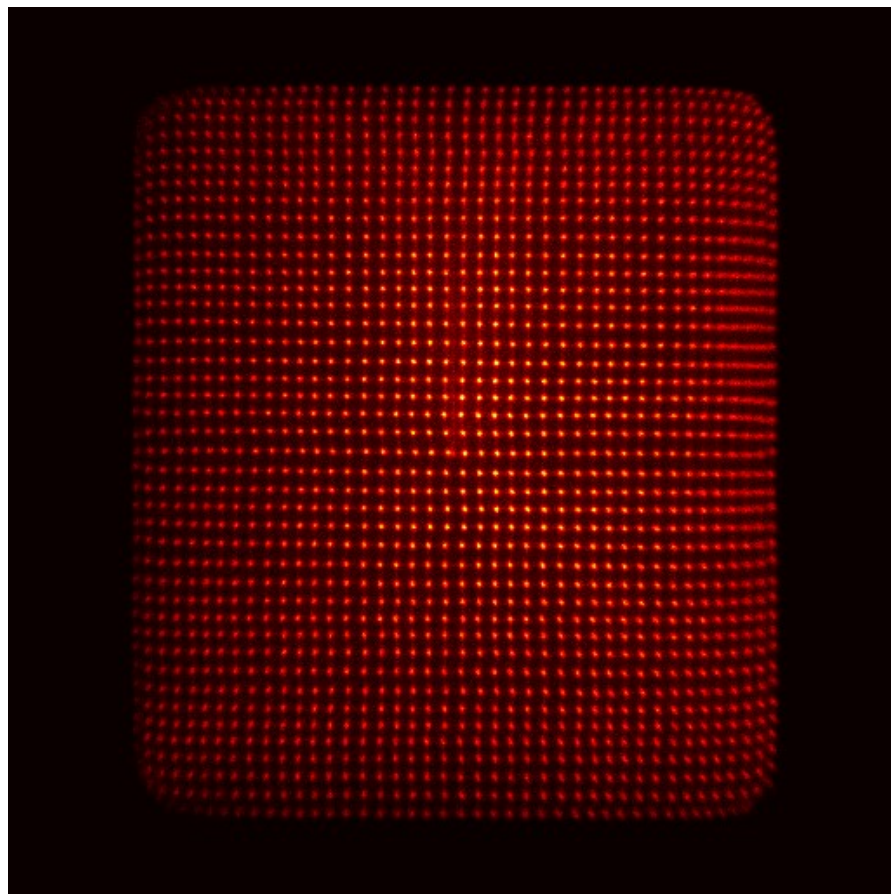
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

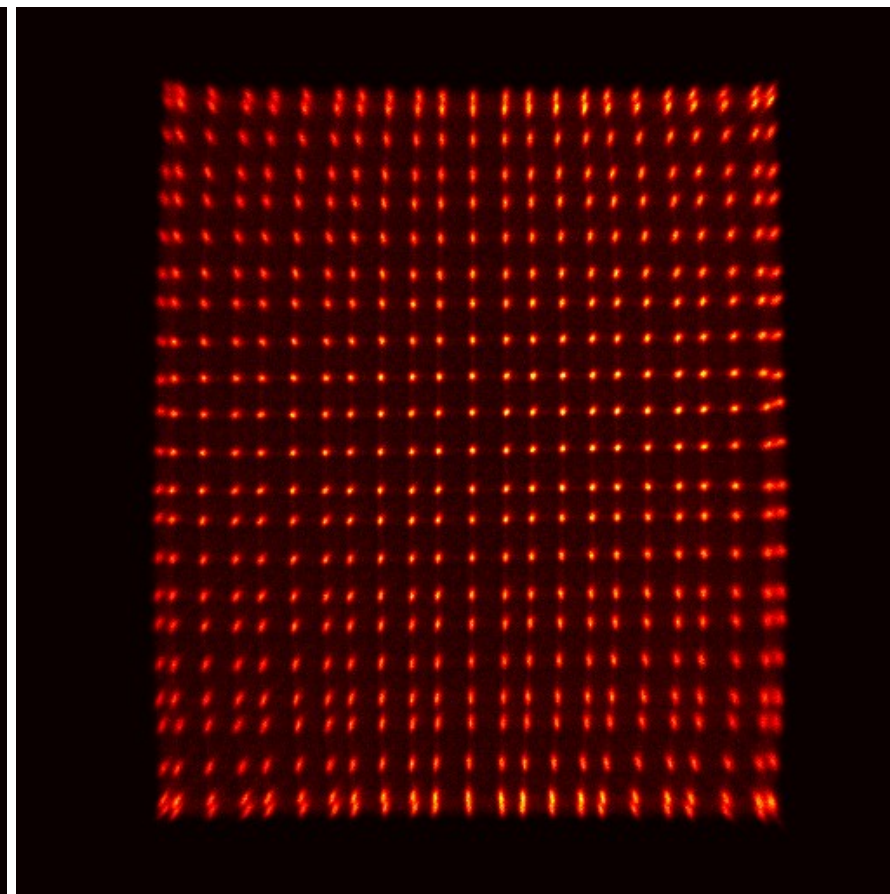
高分辨率探测器研究

晶体尺寸: 0.35×0.35 mm



散射探测器的晶体分辨图

晶体尺寸: 1.0×1.0 mm



吸收探测器晶体分辨图



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

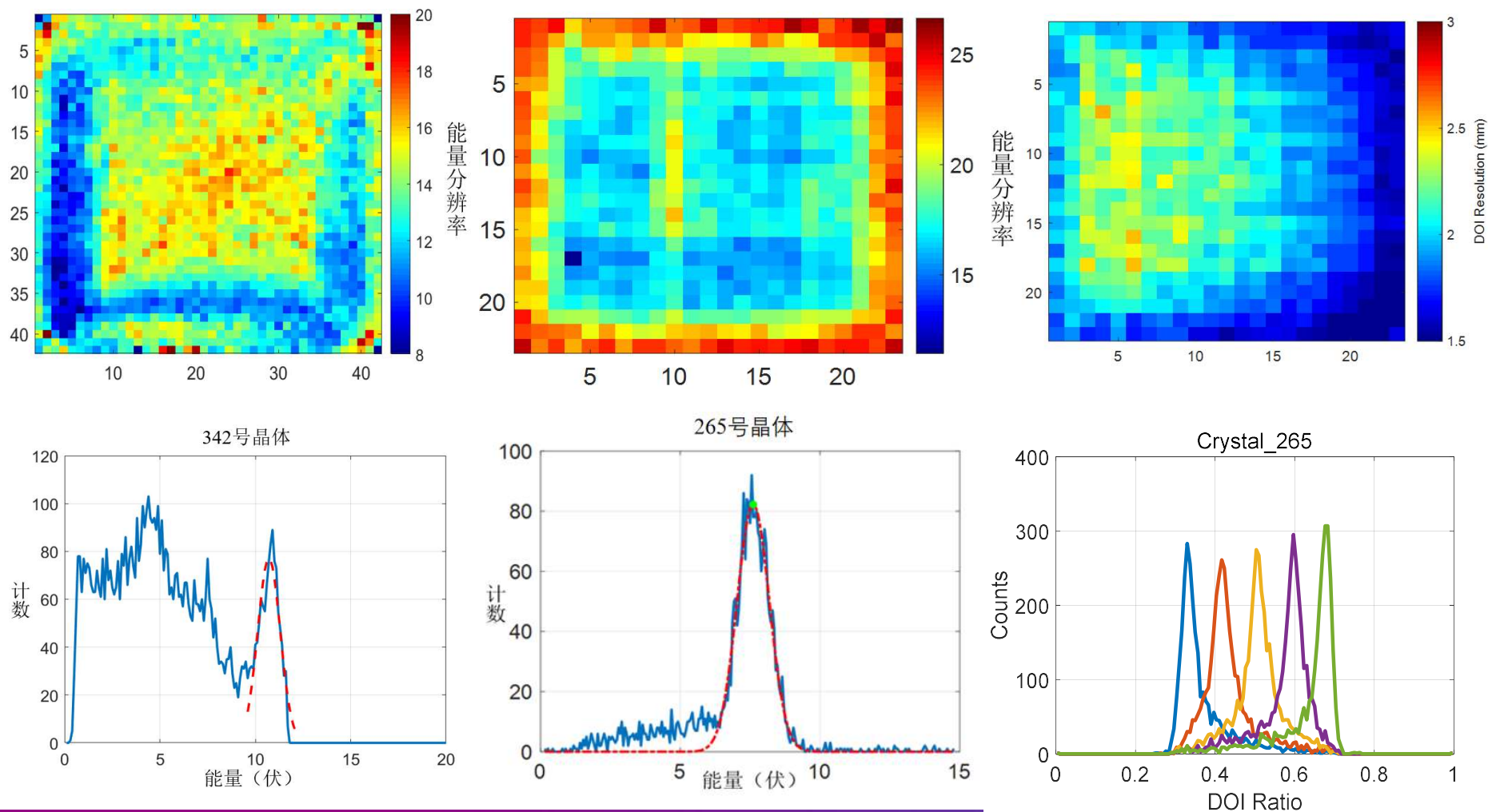


中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

康普顿成像仿真及重建方法

散射探测器的平均能量分辨率为13.5% 吸收探测器的平均能量分辨率为19.1%， DOI分辨率为1.96mm。



深圳理工大学

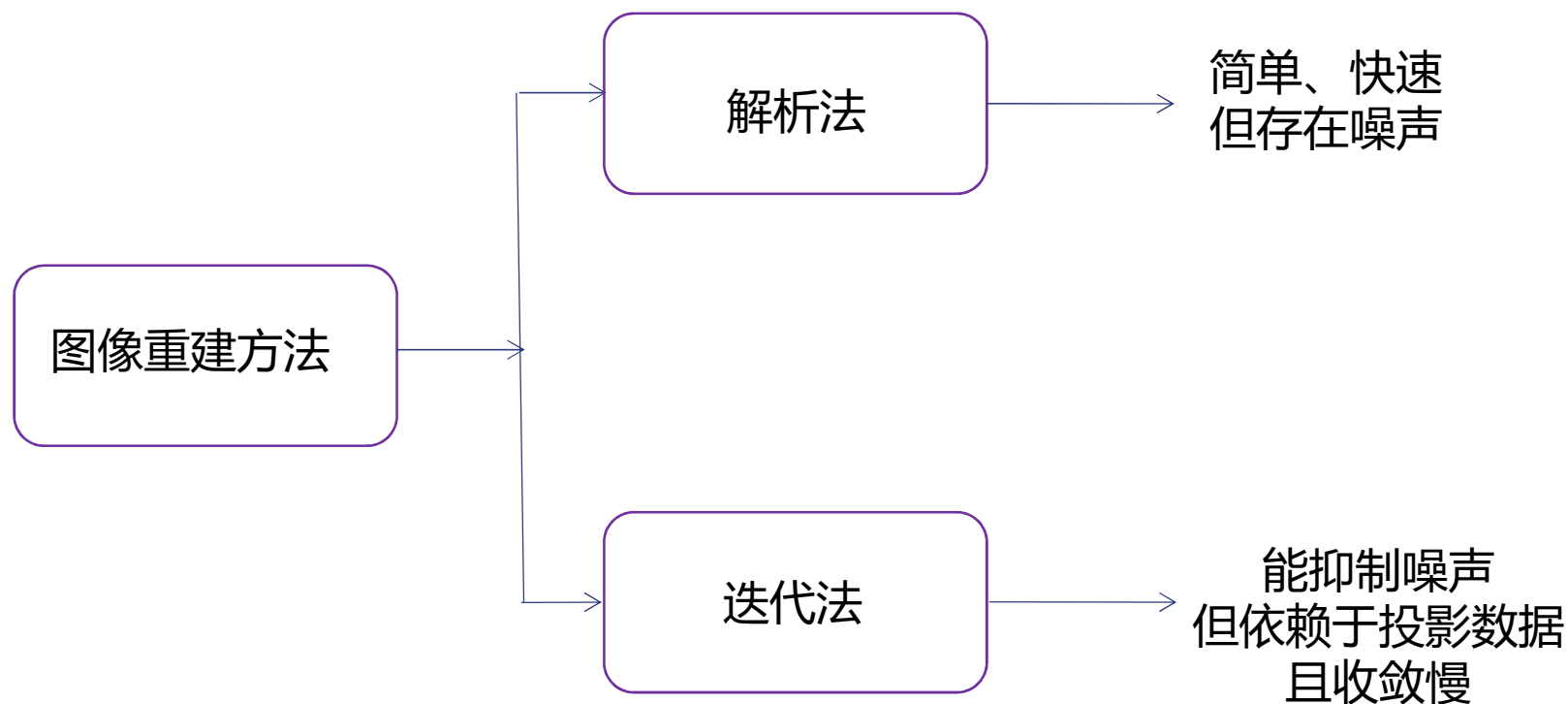
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

康普顿成像仿真及重建方法



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

康普顿成像仿真及重建方法

直接反投影法(BP)

对n向量:

$$n_x = (X_1 - X_2)/d$$

$$n_y = (Y_1 - Y_2)/d$$

$$n_z = (Z_1 - Z_2)/d$$

其中:

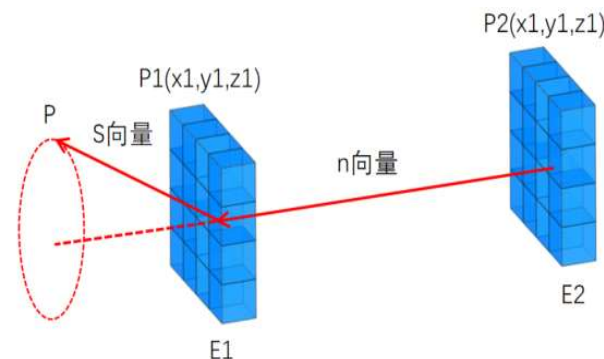
$$d = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$$

则与n向量呈 θ 角的S向量:

$$S_x = \frac{(-bcn_x n_z - bdn_y)}{\sqrt{1 - n_z^2}} + an_x$$

$$S_y = \frac{(-bcn_y n_z + bdn_x)}{\sqrt{1 - n_z^2}} + an_y$$

$$S_z = bc\sqrt{1 - n_z^2} + an_z$$



简单反投影法重建康普顿反投影圆锥示意图

其中:

$$a = \cos \theta, b = \sin \theta, c = \cos \varphi, d = \sin \varphi$$

θ 为康普顿散射角

φ 为康普顿反投影圆锥的

方位角, 范围是 $0-2\pi$



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

康普顿成像仿真及重建方法

极大似然期望最大化算法(MLEM)

对于康普顿成像:

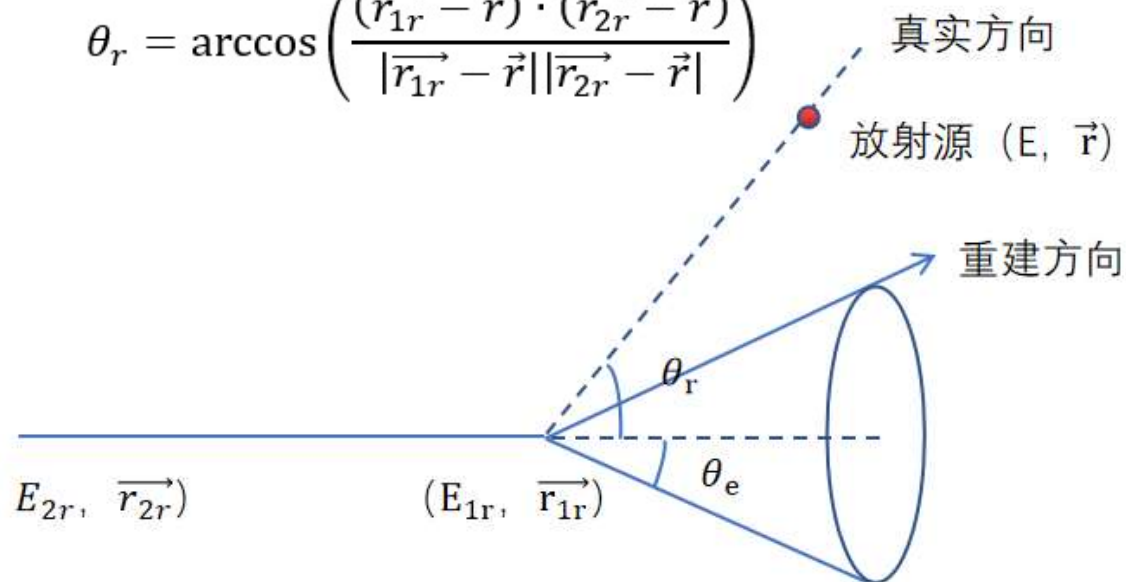
$$f_m(\vec{r}, \vec{E}) = \frac{1}{\sigma_\theta} e^{-\frac{(\theta_r - \theta_e)^2}{2\sigma_\theta^2}}$$

$$\theta_e = \arccos\left(1 + m_e c^2 \left(\frac{1}{E_{1r} + E_{2r}} - \frac{1}{E_{2r}}\right)\right)$$

$$\theta_r = \arccos\left(\frac{(\vec{r}_{1r} - \vec{r}) \cdot (\vec{r}_{2r} - \vec{r})}{|\vec{r}_{1r} - \vec{r}| |\vec{r}_{2r} - \vec{r}|}\right)$$

$$\lambda_j^1 = \frac{\lambda_j^0}{s_j} \sum_{m=1}^{N_m} \frac{f_{jm}}{\sum_{j'=1}^N \lambda_{j'}^0 f_{j'm}}$$

$$s_j = \sum_{m=1}^{N_m} \frac{f_{jm}}{\sum_{j'=1}^N f_{j'm}}$$



深圳理工大学

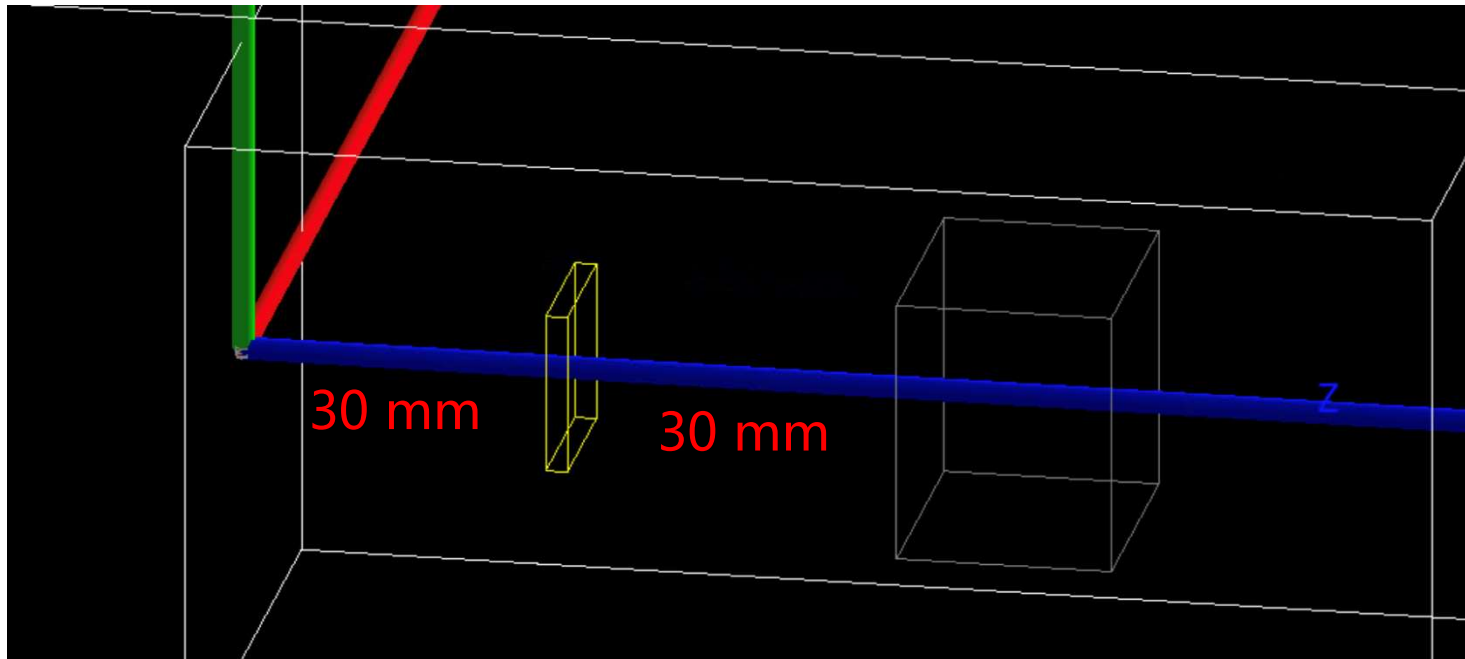
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

康普顿成像仿真及重建方法

使用GATE平台进行蒙特卡洛仿真，点源（511 keV）在两个探测器的中心，点源离第一个散射探测器距离为30mm，两个探测器的距离为30mm。



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



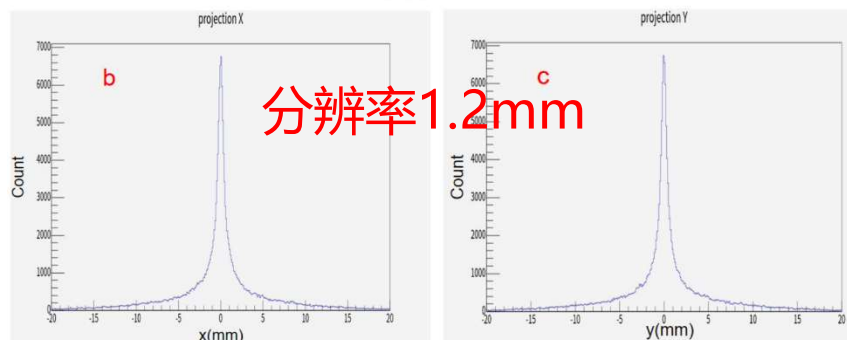
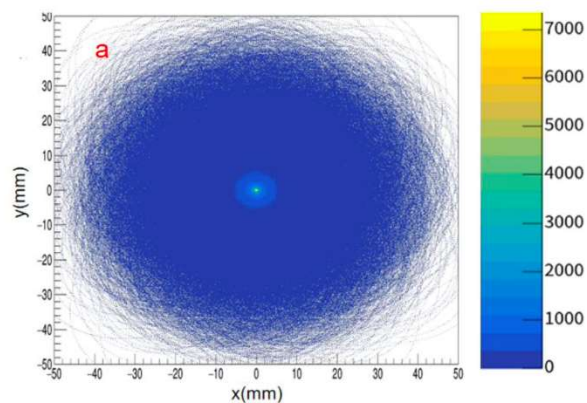
中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

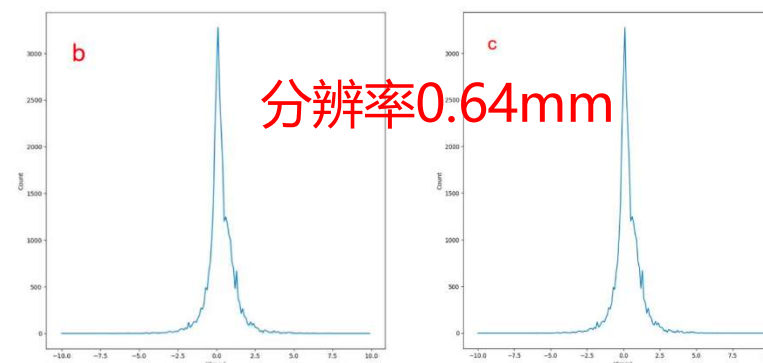
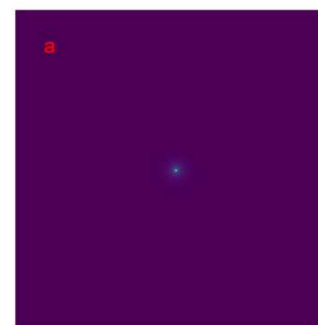
图像重建初步结果

511 keV 点源进行仿真成像，能量分辨率可忽略。

直接反投影法



MLEM, 迭代3次



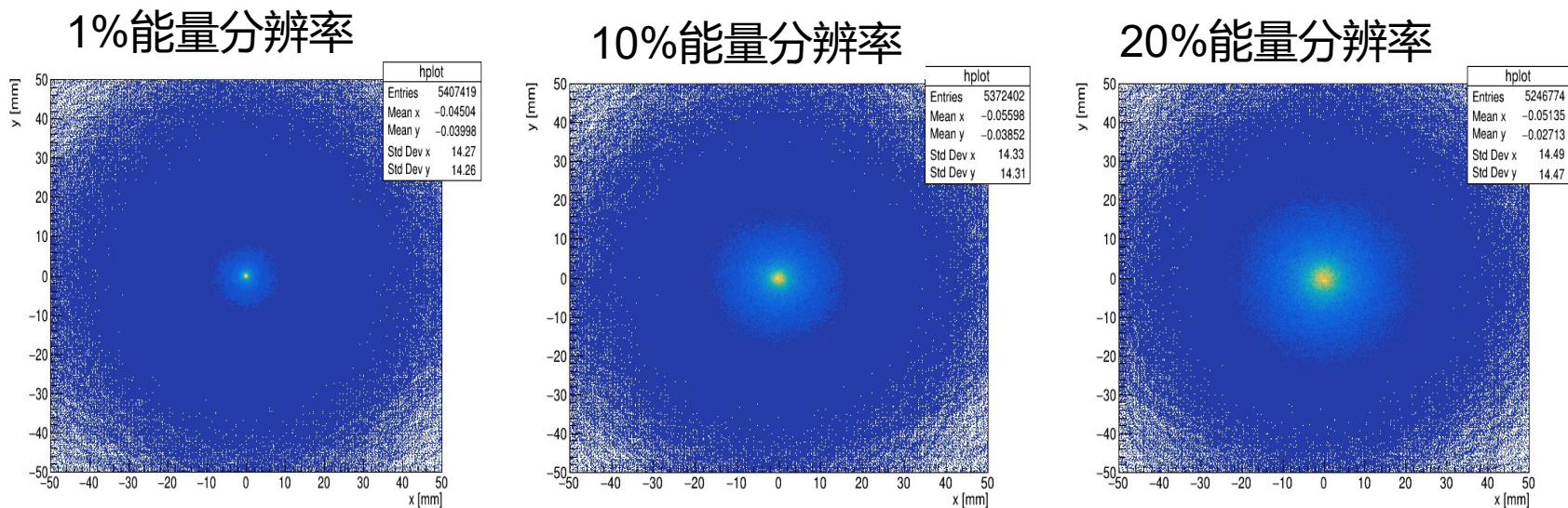
深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

图像重建初步结果



点源距散射探测器为30mm,
不同能量分辨率下的投影半高宽 (FWHM)

能量分辨率	X方向	Y方向
1%	1.54 mm	1.52 mm
5%	2.77 mm	2.77 mm
10%	4.63 mm	4.81 mm
15%	7.67mm	7.38 mm
20%	9.52 mm	8.48 mm



深圳理工大学

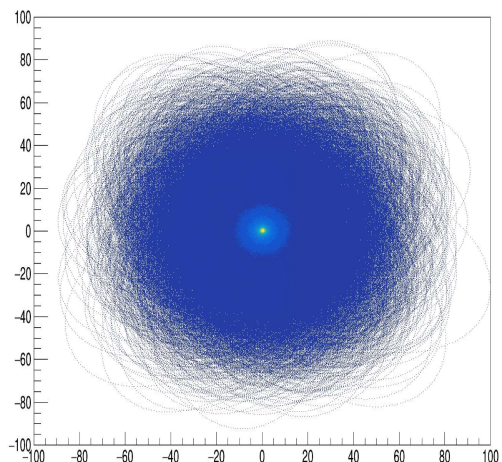
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



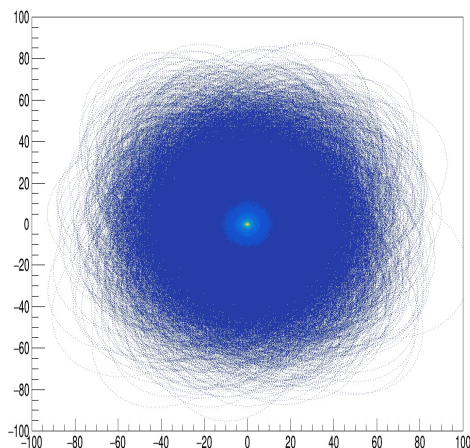
中国科学院深圳先进技术研究院
SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

图像重建初步结果

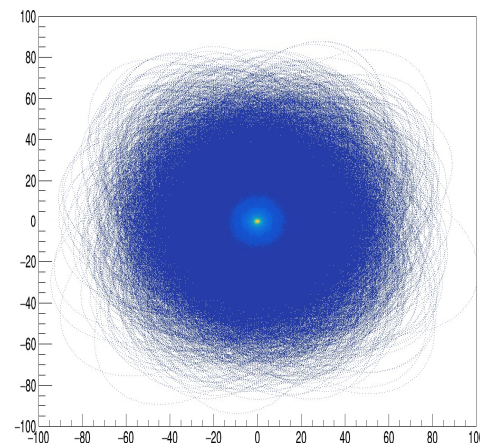
0.35mm 分辨率



0.6mm 分辨率



1.0mm 分辨率



点源距散射探测器为30mm，吸收探测器分辨率为1mm，散射探测器不同分辨率下的投影半高宽 (FWHM)

位置分辨率	X方向	Y方向
0.35 mm	2.69 mm	2.73 mm
0.6 mm	2.90 mm	2.92 mm
1 mm	3.64 mm	3.66 mm



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

衷心感谢各位聆听!
敬请批评指正!



深圳理工大学

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院深圳先进技术研究院

SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES