



基于正电子射程校正的PET空间分辨率改进方法

报告人：李崇

导师：魏龙

30.06.2022
核技术应用中心

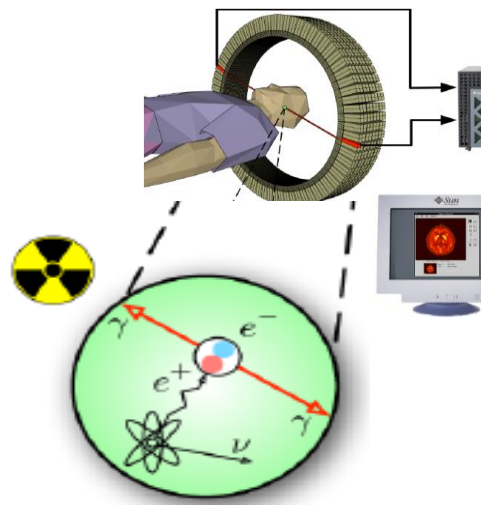


中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

报告提纲

- 一 研究背景、现状及目标
- 二 研究进展
- 三 下一步计划和工作成果
- 四 总结

研究背景



Isotopes	^{18}F	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{68}Ga	^{82}Rb
Decay mode (Branching ratio)	β^+ (96.7%)	β^+ (99.8%)	β^+ (99.8%)	β^+ (99.9%)	β^+ (89.1%)	β^+ (95.4%)
Parent nucleus	^{18}F	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{68}Ga (Generator: ^{68}Ge)	^{82}Rb (Generator: ^{82}Sr)
Parent J^π	1^+	$3/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	1^+	1^+
Daughter J^π	0^+	$3/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$0^+, 2^+$	$0^+, 2^+$
Type of transition	Allowed	Allowed	Allowed	Allowed	Allowed	Allowed
Parent $T_{1/2}$ (min)	109.8	20.4	10.0	2.0	67.7	1.3
Daughter nucleus	^{18}O	^{11}B	^{13}C	^{15}N	^{68}Zn	^{82}Kr
E_{max} (keV)	633.5	960.2	1198.5	1732.0	821.8, 1899.1	2601, 3378
Intensity	97%	99.8%	99.8%	99.9%	1.2%, 87.9%	13%, 82%
E_{mean} (keV)	249.8	385.6	491.8	735.3	352.6, 836.0	1168, 1535
Intensity	97%	99.8%	99.8%	99.9%	1.2%, 87.9%	13%, 82%
Intensity of annihilation photons	193.5%	199.5%	199.6%	199.8%	178.3%	190.9%



- Shah, N Jon et al. *PloS one*, 9(4), 2014

Design of the NeuroEXPLORER, a next-generation ultra-high performance human brain PET imager

Richard Carson, Eric Berg, Ramsey Badawi, Simon Cherry, Junwei Du, Tao Feng, Kathryn Fontaine, Paul Gravel, Ansel Hillmer, Praveen Honhar, Jocelyn Hoye, Lingzhi Hu, Terry Jones, Edwin Leung, Tiantian Li, Chi Liu, Heather Liu, Yihuan Lu, Stan Majewski, Tim Mulnix, Jeffrey Schmall, Aaron Selfridge, Takuya Toyonaga, Jinyi Qi and Hongdi Li
Journal of Nuclear Medicine May 2021, 62 (supplement 1) 1120;

Article

Info & Metrics

Abstract

1120

accommodate shoulders, to place the brain in the center of the aFOV. The 18-mm deep LYSO crystals have an in-plane dimension of 1.5 mm, leading to a simulated resolution of 1.6-1.8 mm. These are organized in micro-

In this issue

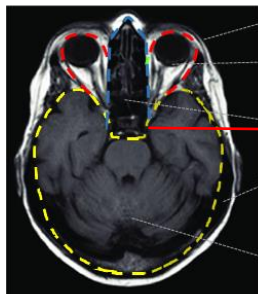
Journal of Nuclear Medicine
Vol. 62, Issue supplement 1
May 1, 2021
Table of Contents
Index by author



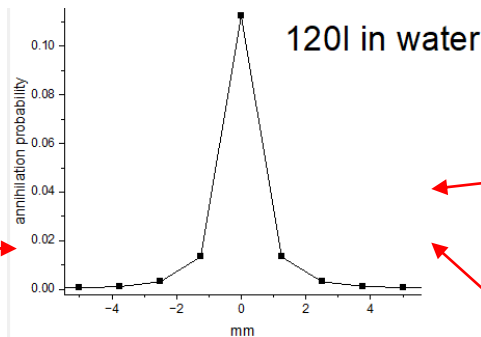
Biograph Vision Quadra
全身PET/CT: 2.4 mm

研究现状

头部解剖学结构



头骨
眼部
鼻腔
组织液及血液
大脑区域



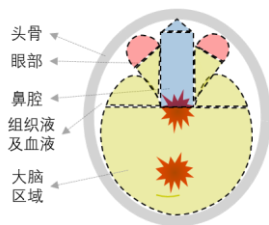
$$x_j^{(k+1)} = x_j^{(k)} \frac{1}{\sum_{i'=1}^I a_{i'j}} \sum_{i=1}^I \frac{a_{ij} y_i}{\sum_{j'=1}^J a_{ij'} \tilde{x}_j^{(k)}}$$

卷积射程内核: $\tilde{x}_{j'}^{(k)} = x_{j'}^{(k)} \otimes PSF$

➤ 1. 蒙特卡洛模拟:

优势: 准确

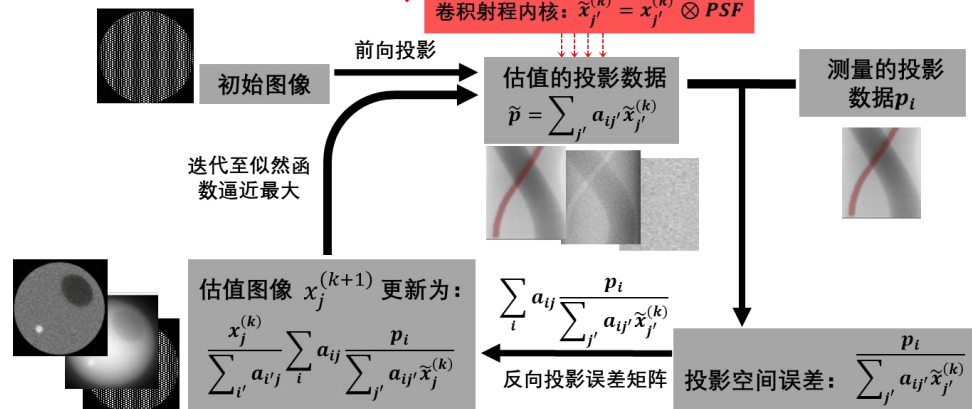
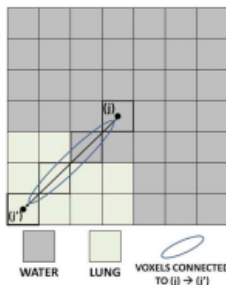
问题: 耗时, 无法应用于临床成像



➤ 2. 边界近似计算:

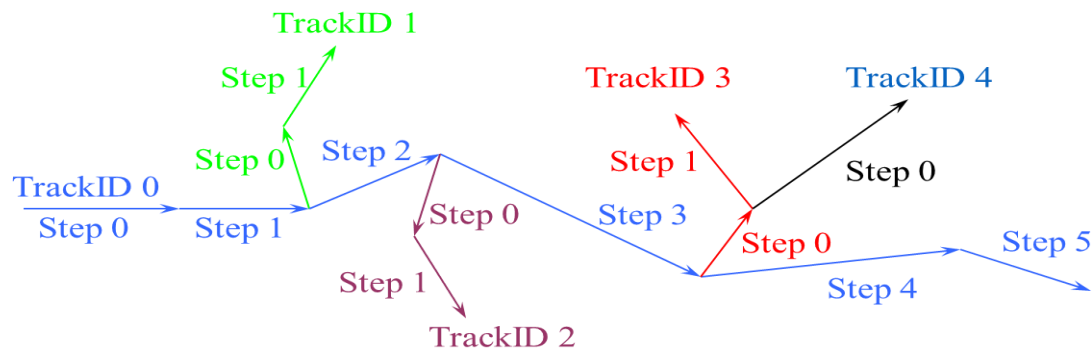
优势: 省时, 适用于组织边界修正

问题: 复杂组织边界时伪影; 系统误差



✓ 衰减校正 ✓ 射程校正 ✓ 光子散射校正

目标及原理



- ✓ 准确计算正电子传输历史，进而获得准确的径迹长度和射程分布。不显著增加图像重建时间，保证临床应用。

1. 正电子质量碰撞阻止本领：

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{ds} \right)_{col} = 0.1535 \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left\{ \ln \left[\frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_e c^2)} \right] + \frac{\tau^2/8 - (2\tau+1)\ln 2}{(\tau+1)^2} + 1 - \beta^2 - \delta \right\}$$

$$\left(\frac{dE}{ds} \right)_{water} \times \text{传输距离(L)} = \text{单个像素中的能量损失 } E_v$$

目标及原理

2. 组织依赖的能量损失计算:

511keV γ 线性衰减系数 μ :

$$\mu / \rho = \sigma_{tot} / uA$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_{ph} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair}$$

$$\sigma_{incoh} = Z\sigma_{e-incoh} \quad (200 \text{ to } 1000\text{keV})$$

衰减校正

μ -Map 组织种类和位置信息

$$\mu/\rho = \frac{Z}{A} \cdot \frac{\sigma_{e-incoh}}{u}$$

正电子质量碰撞阻止本领:

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{ds} \right)_{col} = 0.1535 \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{Z}{A} \right) \left\{ \ln \left[\frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_e c^2)^2} \right] + F^+(\tau) - \delta \right\}$$

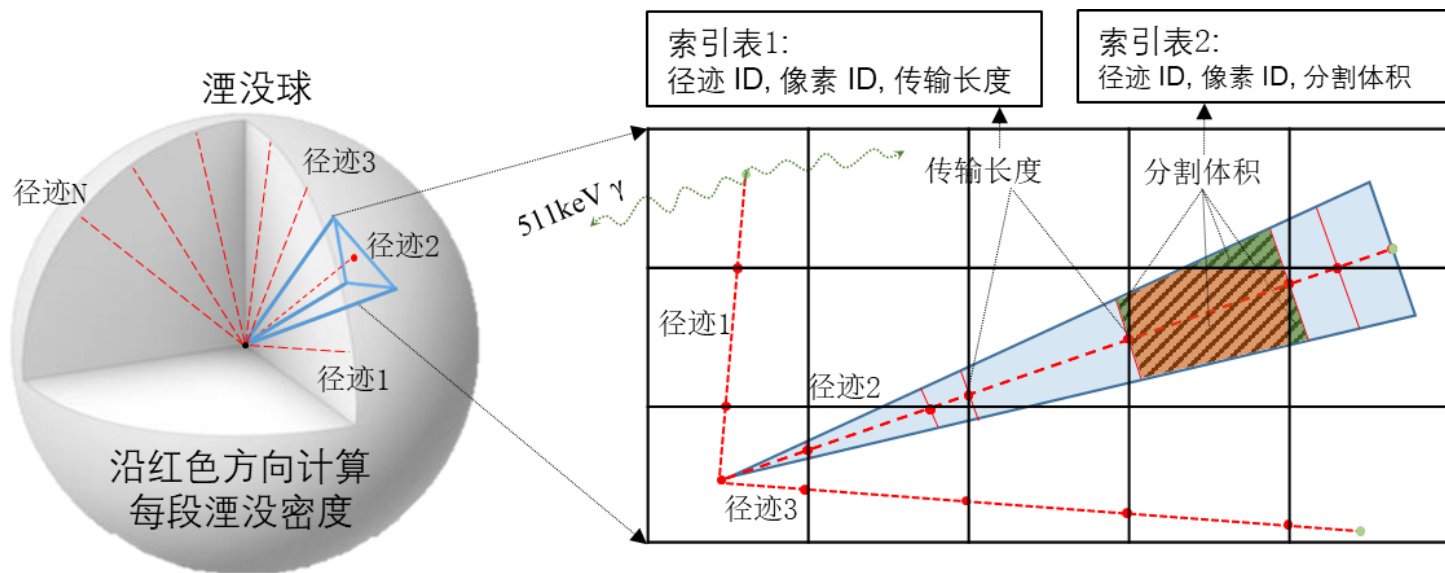
正电子质量碰撞阻止本领包含视场中组织的种类和位置信息:

$$\left(\frac{dE}{ds} \right)_{col} = \mu \times 0.1535 \frac{1}{\beta^2} \frac{u}{\sigma_{incoh}} \left\{ \ln \left[\frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_e c^2)^2} \right] + F^+(\tau) - \delta \right\}$$

3. 实现像素依赖的能量沉积计算: $\mu_{rel} \times \left(\frac{dE}{ds} \right)_{water} \times \text{传输距离}(L) = \text{单个像素中的能量损失} E_v$

目标及原理

$$\mu_{rel} \times \left(\frac{dE}{ds} \right)_{water} \times \text{传输距离(L)} = \text{单个像素中的能量损失 } E_v$$

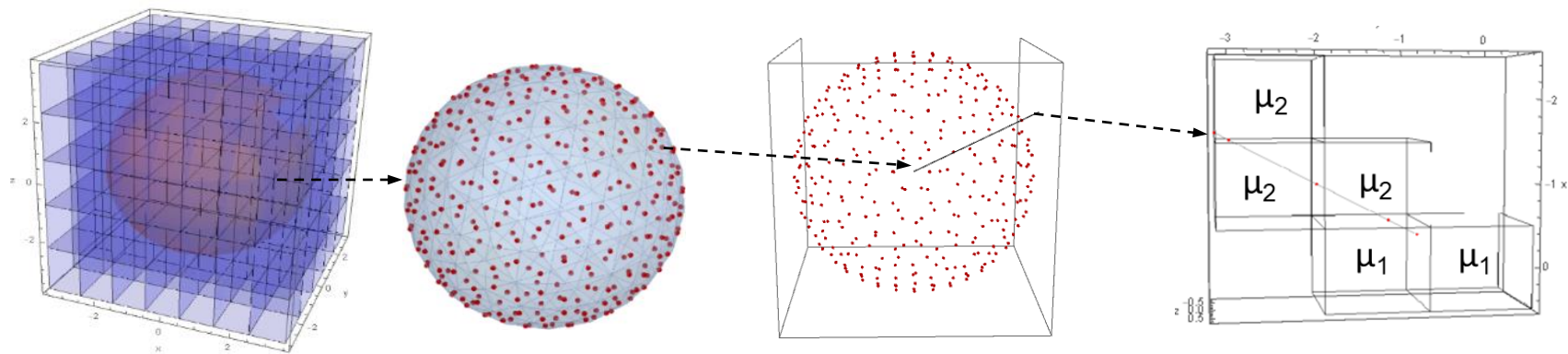


像素的活度计算:

$$A = P \times \frac{V_I}{V_L}$$

- a) 单个像素中的传输距离L计算
- b) 每个四面体单元在各像素中的分割体积 V_I

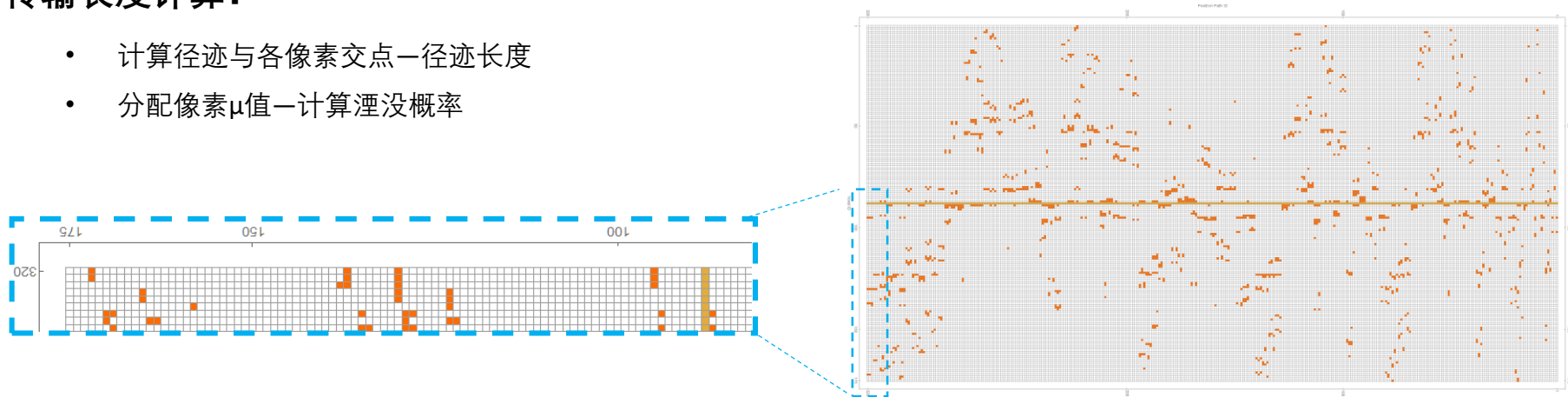
研究进展



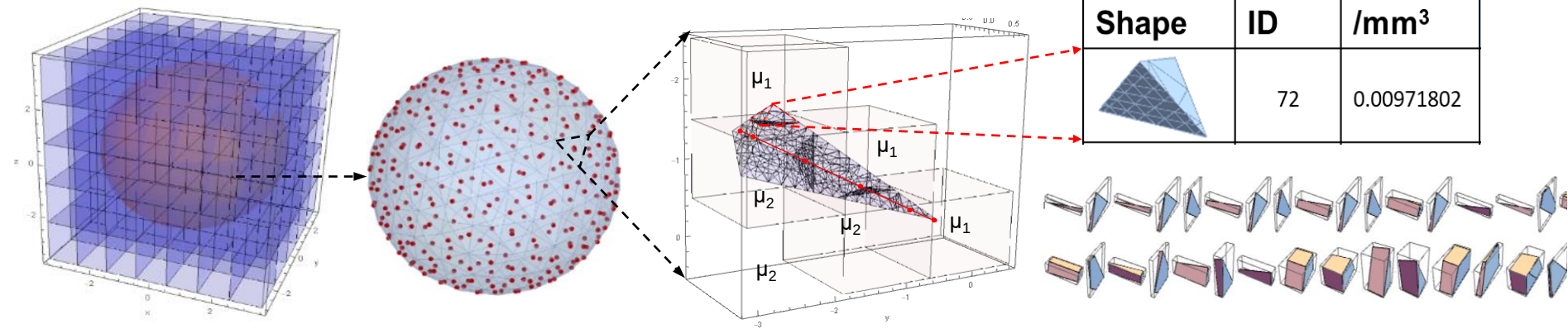
传输长度计算:

- 计算径迹与各像素交点—径迹长度
- 分配像素 μ 值—计算湮没概率

各径迹传输长度表



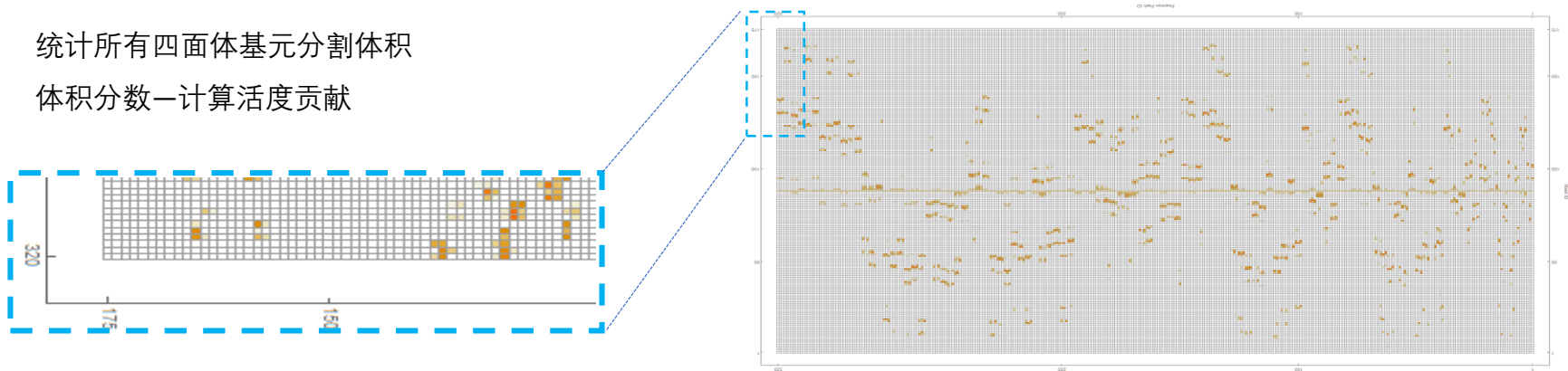
研究进展



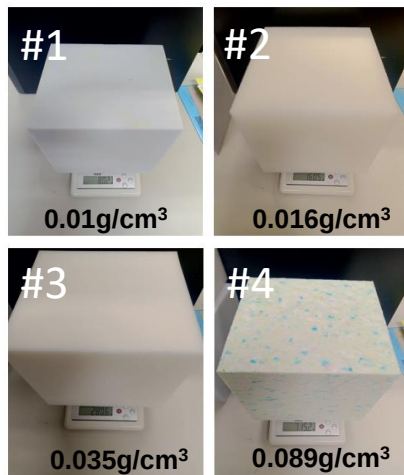
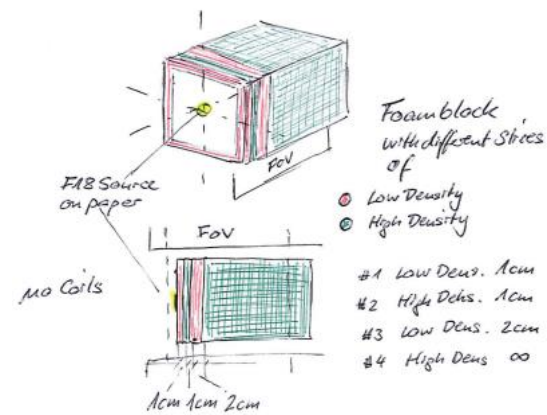
活度贡献计算模型：

- 统计所有四面体基元分割体积
- 体积分数—计算活度贡献

各四面体基元分割体积分数表

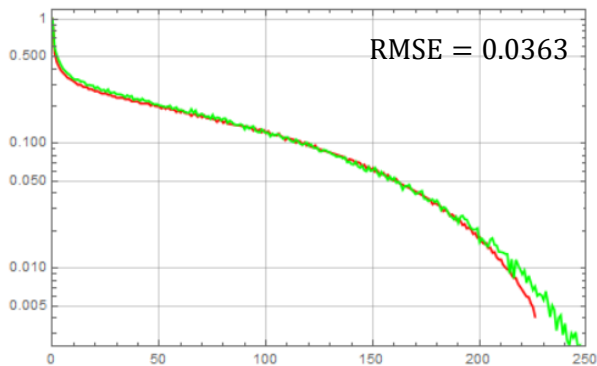


研究进展

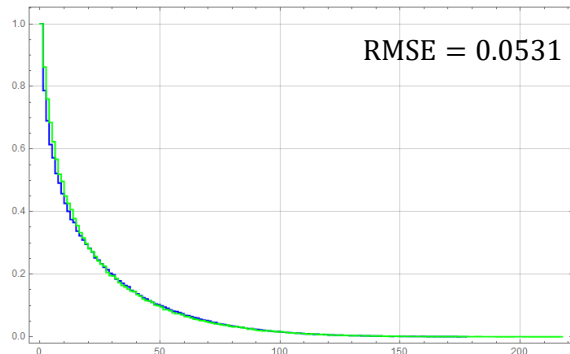


18F 在硬质泡沫中:

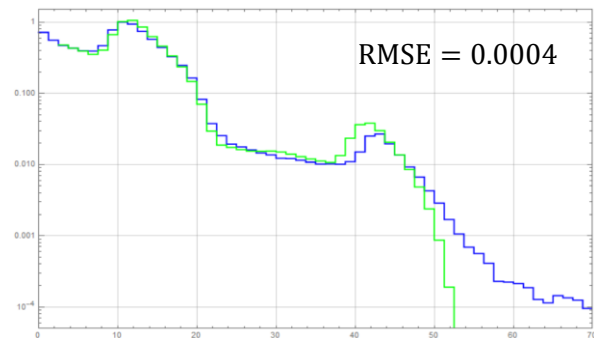
Geant4和模型: 径迹长度



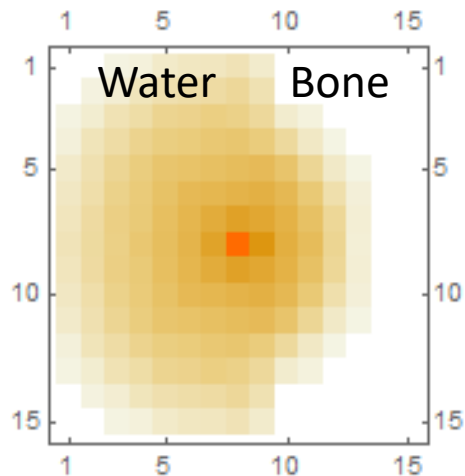
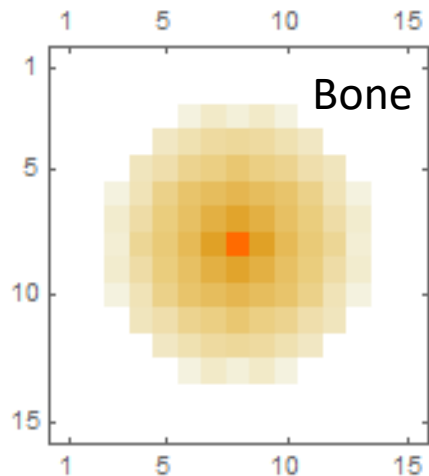
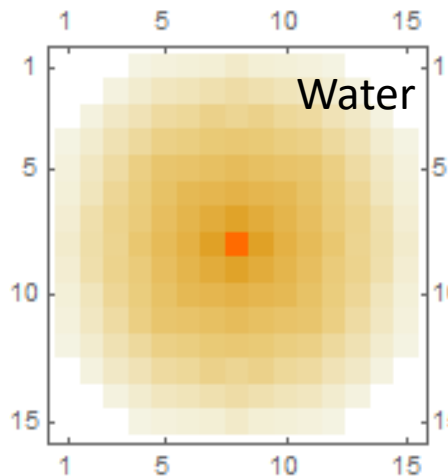
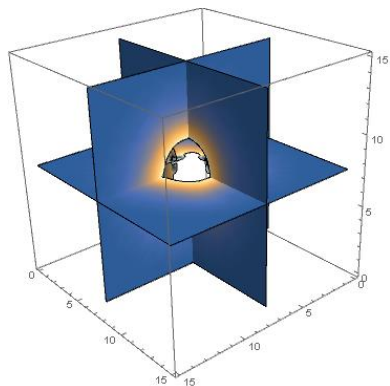
Geant4和模体实验: 注入深度



Geant4和模体实验: 分层模体注入深度

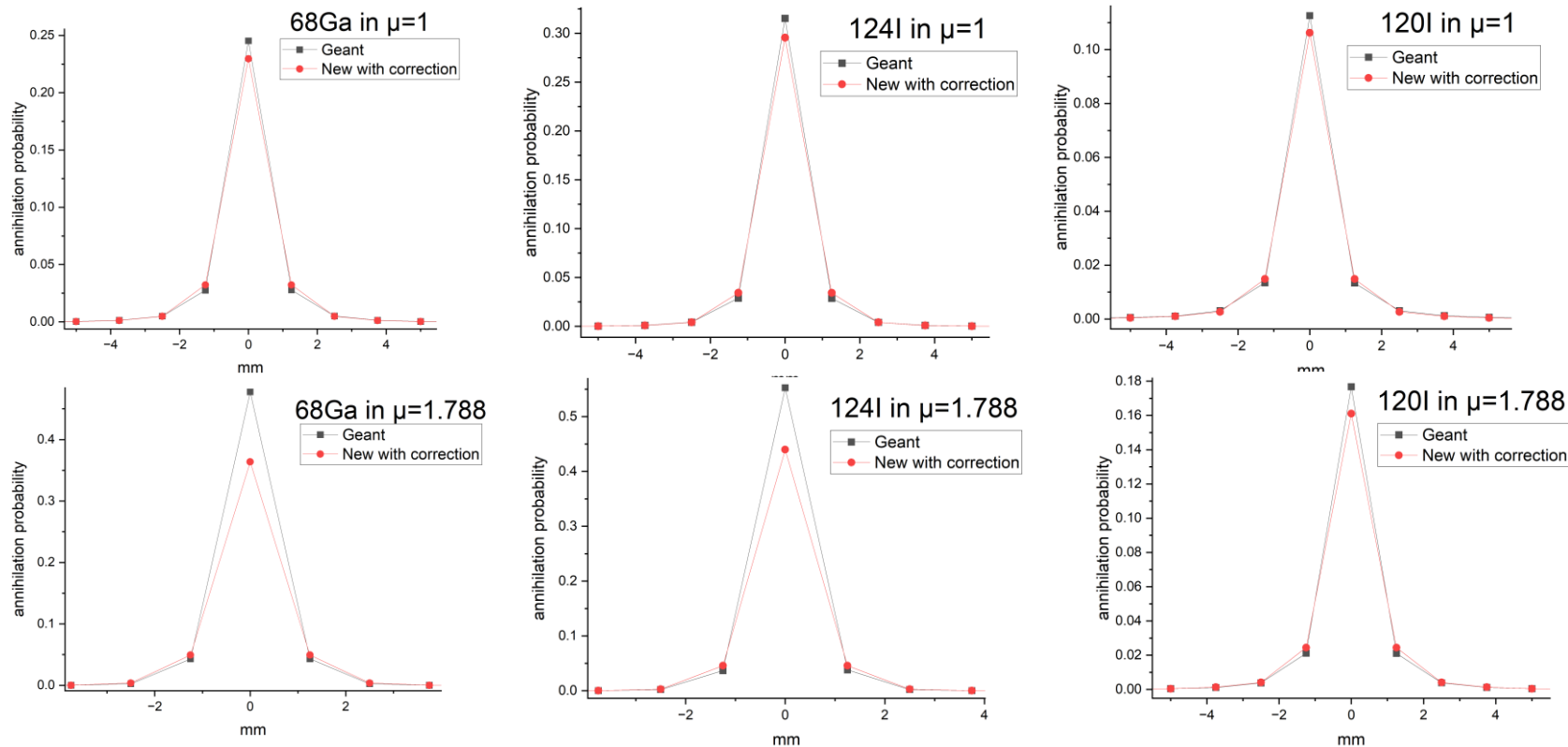


研究进展——⁶⁸Ga: 三维空间各像素活度计算



无伪影；准确计算组织边界处像素活度

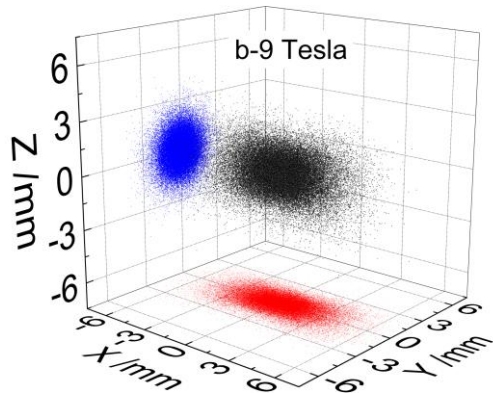
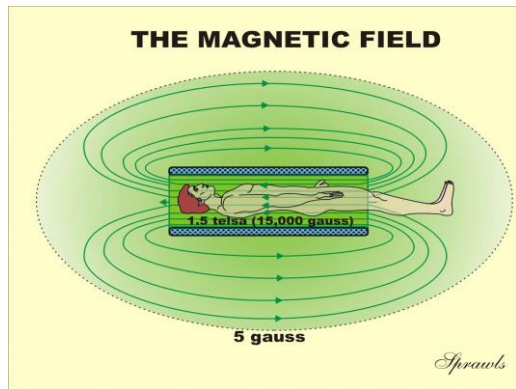
研究进展一点扩展函数PSF修正内核



- 对于比较大的正电子射程，该方法将产生更准确的射程校正结果
- 基于目前模型精度，像素活度误差在10%以内

下一步计划:

- ✓ 引入磁场修正，拓展其在PET/MRI混合成像系统的应用。



- ✓ 在现有MLEM算法框架中，射程内核优化。
- ✓ 进行PET/CT模体实验，拟基于 ^{68}Ga 的前列腺和神经内分泌肿瘤临床数据进行验证；基于 ^{15}O 脑成像数据检验模型在PET/MRI中的表现

总结:

- 提出了一种基于正电子传输过程能量损失原理的射程计算方法，能够对组织边界处射程模糊进行准确快速校正，有效提高PET系统空间分辨率
- 针对PET/MRI成像系统，首次开发了一种可兼容磁场环境的射程校正方法，新模型期待可广泛应用于各PET/CT 和PET/MRI探测系统。

博士后期间工作成果 (2020-2022)

论文及学术活动：

1. **Chong Li**, et al. Attenuation-Map-Based Positron Range Correction Model for Improving PET Spatial Resolution, INM & IBI Retreat 2021 Juelich, Germany.
2. **Chong Li**, et al. Implantation profiles of muon and secondary positron simulated by Geant4. *Physica Scripta*, 2021, 96(12): 125305.
3. **Chong Li**, et al Effect of tissue density on PET spatial resolution in magnetic environment. *Eur. Phys. J. Plus* 2020; 135(1): 1-12
4. Chao Zhang, Xingzhong Cao, **Chong Li**, et al. Energy loss correction on multiple Coulomb scattering of muons simulated by Geant4. *Phys. Scripta* (接收)
5. **Chong Li**, C. Lerche, N. Jon Shah, Long Wei. et al An innovative energy loss-based positron range correction method to improve PET spatial resolution, *Physics in Medicine & Biology* (撰写中)

资助情况：

1. 中德博士后国际交流计划 (2020.07 - 2022.07) , 正电子射程对超强场PET/MRI脑成像的影响, 申请人
2. 德国科学基金会 (DFG) , 一种创新的基于正电子射程修正的PET空间分辨率改进方法, 申请人 (申请中)

研究课题：

1. 国家自然科学基金青年项目 (2023.01 - 2025. 12) , 组织结构中高能正电子运动分布规律及射程校正方法研究, 申请人 (申请中)
2. 国家自然科学基金大装置联合基金培育项目 (2020.01-2022.12) , Muon与物质相互作用机理及次级正电子分布规律研究, 主要参与人
3. 国家自然科学基金重点项目 (2021.01 - 2024.12) , 宇宙线 μ 子探测技术与多信息射线成像方法研究, 参与



谢谢敬请指正！

李崇
核技术应用中心



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