



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

基于GPU快速蒙特卡洛方法的内照射辐射吸收剂量计算

答辩人：李永哲

指导老师：徐榭 教授 陈志 副教授 於国兵 高级工程师

中国科学技术大学 核科学技术学院 核医学物理研究所

时间：2021年5月20日



第一章 绪论 1.1 放射性药物



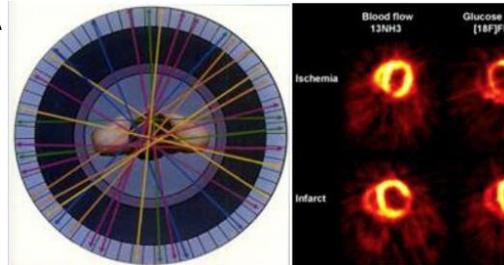
放射性药物

诊断

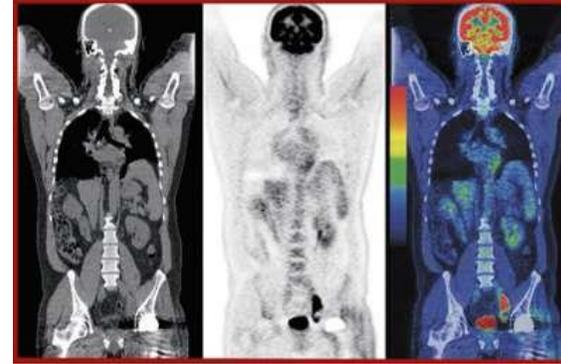
治疗



图像采集



核素治疗



诊断

内照射剂量计算

计算内照射辐射剂量对评估放射性药物人体的辐射影响有重要意义。



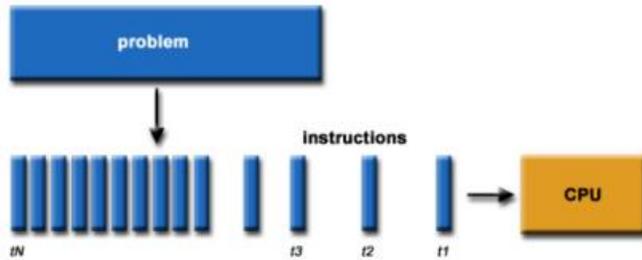
	优点	缺点
MIRD方法 ^[1]	方法简单	人体模型和放射源模型过于简单
蒙特卡洛方法	计算结果准确	计算所需时间长，动辄数小时至十几天
深度学习方法	速度快	依赖大量训练数据、适用性差

需要一个**快速、准确**计算核医学内照射吸收剂量的软件

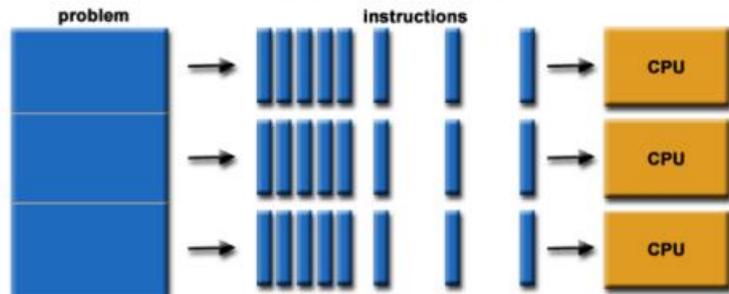
[1]Bolch W E , Bouchet L G , Robertson J S , et al. 1999. MIRd pamphlet No. 17: the dosimetry of nonuniform activity distributions--radionuclide S values at the voxel level. Medical Internal Radiation Dose Committee.[J]. Journal of Nuclear Medicine Official Publication Society of Nuclear Medicine, 40(1):11S.



串行运算示意图



并行运算示意图



(图片来源: 必应)

电子、光子、质子等

CT成像剂量计算、
放射治疗剂量计算等

gDPM^[1]、
GPUMCD^[2]、
ARCHER

[1]Xun, J, X. Gu, J. Sempau, et al.2010. Development of a GPU-based Monte Carlo dose calculation code for coupled electron-photon transport. Medical Physics, 37, 3468-3468.

[2]Hissoiny S , Ozell B , Bouchard H , et al. 2011. GPUMCD: a new GPU-oriented Monte Carlo dose calculation platform[J]. Medical Physics, 38(2):754-64.



- 研究目的：

开发和基于GPU加速的快速蒙特卡洛方法用来计算人体内照射吸收剂量。

- 研究任务：

- 1、建立包含体模、放射源信息的相空间文件。

- 2、开发ARCHER核医学计算功能——ARCHER Nuclear Medicine (ARCHER-NM)，并计算单位活度吸收剂量和统计误差。

- 3、分析ARCHER-NM计算器官和组织的吸收剂量及统计误差，并与GATE比较。



2.1.1 数据

		¹⁸ F-FDG病例	¹⁸ F-AV45病例
性别		男	女
年龄 (岁)		52	66
身高 (cm)		172	150
体重 (kg)		150	57
注射活度 (mCi)		8.0	10.4
图像采集部位		全身	头部
采集开始时间		注射后75分钟	注射后50分钟
采集所耗时间		10-20分钟	动态扫描20分钟
CT图像	尺寸	512×512×370	512×512×174
	分辨率	1.367mm×1.367mm×3mm	0.488mm×0.488mm×1mm
	层厚	3mm	1mm
	像素值	HU值	
PET图像	尺寸	168×168×219	336×336×163
	分辨率	4.063 mm×4.063mm×5mm	1.016 mm×1.016mm×1mm
	层厚	5mm	1mm
	像素值	单位体积的活度 (Bq/ml)	



2.1.2 体模和放射源分布

		水箱	临床病例1: ¹⁸ F-FDG	临床病例2: ¹⁸ F-AV45
体模	尺寸	512×512×174	512×512×370	512×512×174
	分辨率	0.488mm×0.488mm×1mm	1.367mm×1.367mm×3mm	0.488mm×0.488mm×1mm
	密度	1g/cm ³	HU值转密度值 ^[1-2]	
放射源		长方体中心, 点源	体素化放射源 根据ICRP128生物动力学参数, 重建PET图像	体素化放射源 原始PET图像

表2.2 ICRP建议的源器官初始摄取比和累积活度与注射活度之比^[3]

源器官	初始摄取比	累积活度与注射活度之比 (h)
大脑	0.08	0.21
心脏壁	0.04	0.11
肺	0.03	0.079
肝脏	0.05	0.13
其他部位	0.8	1.7
膀胱内容物(成人、15岁、10岁/5岁/1岁)	0.24	0.26/0.23/0.16

[1]Schneider W , Bortfeld T , Schlegel W . 2015. Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions[J]. Physics in Medicine & Biology, 45(2):459.

[2]ICRP. 2015. Addendum 1 to ICRP Publication 128 : Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: a compendium of current information related to frequently used substances [Ann. ICRP 44(2S), 2015].[J]. Annals of the ICRP,2020.

[3]Xu, X. G, T. Liu, L. Su, et al. 2015. ARCHER, a new Monte Carlo software tool for emerging heterogeneous computing environments. Annals of Nuclear Energy, 82, 2-9.



2.1.3 定义源粒子

- 位置：在每一个体素的中心点
- 权重：PET图像中对应点的像素值
- 速度方向：球面均匀抽样
- 能量：0.511MeV
- 其他：背对背成对发射

2.1.4 球面均匀分布

球面均匀抽样

$$\begin{cases} x = 2u\sqrt{(1 - (u^2 + v^2))} \\ y = 2v\sqrt{(1 - (u^2 + v^2))} \\ z = 1 - 2(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (2.2)$$



2.2.1 蒙特卡洛软件：

1、GATE：

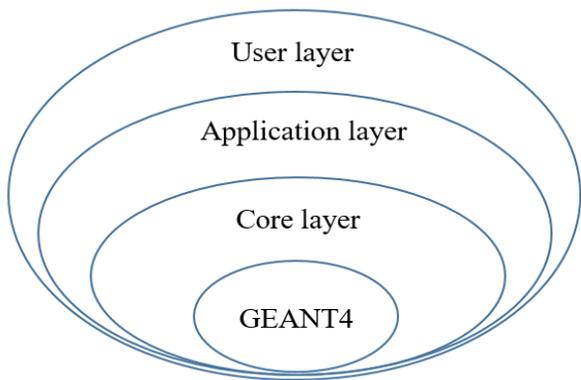


图2.2 GATE的结构^[1]

2、ARCHER：

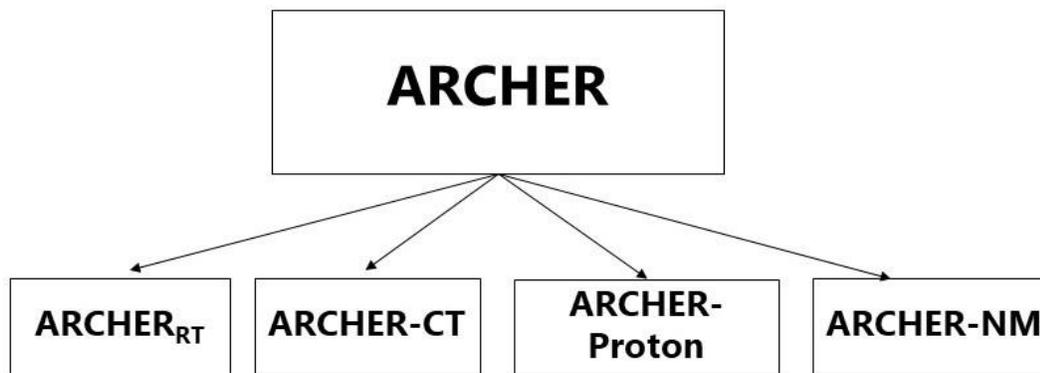


图2.3 ARCHER平台

[1]Jan S , Santin G , Strul D , et al. 2004. GATE : a simulation toolkit for PET and SPECT[J]. Physics in Medicine & Biology, 49(19):4543.



ARCHER-NM

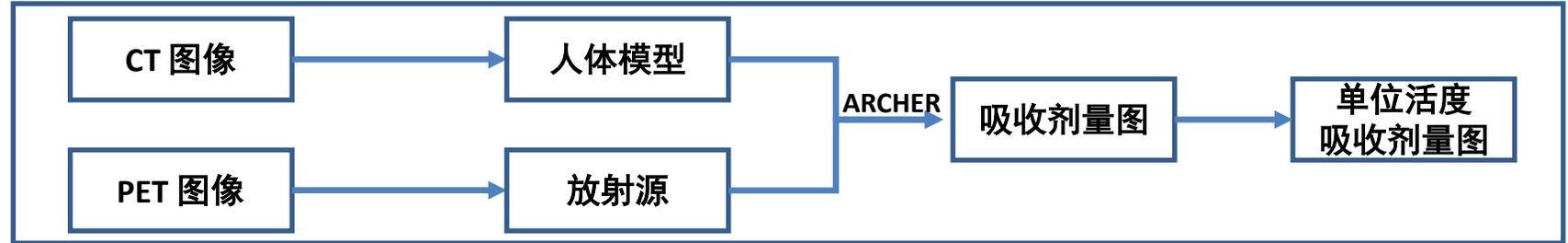


图2.4 ARCHER-NM计算流程

参数设置

	ARCHER-NM	GATE
物理软件包	ARCHER内置物理包 ^[1-3]	emstandard_opt3
截止能量	光子为10keV, 电子为200keV	与ARCHER-NM一致
输出尺寸	与CT图像一致	
计算机配置	显卡: NVIDIA Titan V	Intel (R) Xeon (R) Gold 5120T CPU (56个逻辑核心, 64G内存)
模拟粒子数	1×10^{11}	1×10^9

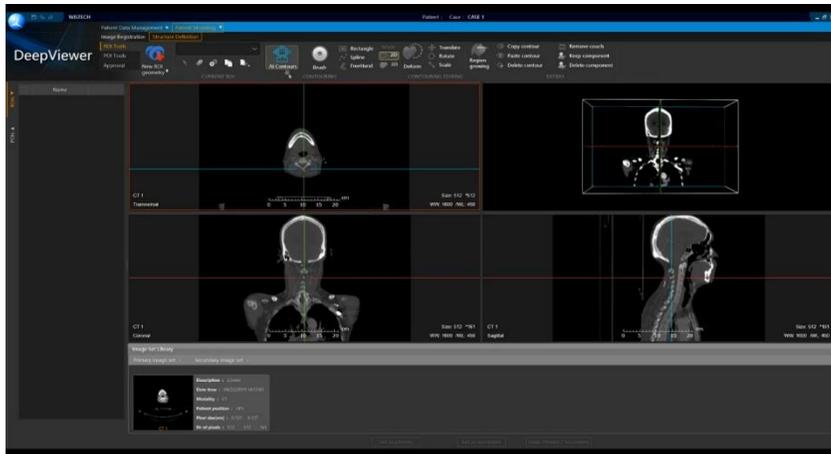
[1] Liu T. "Development of ARCHER—a parallel Monte Carlo radiation transport code—for x-ray CT dose calculations using GPU and coprocessor technologies". 2014.

[2] Su L. "Development and Application of a GPU-Based Fast Electron-Photon Coupled Monte Carlo Code for Radiation Therapy". 2014.

[3] Lin H. "GPU-Based Monte Carlo Source Modeling and Simulation for Radiation Therapy Involving Varian TrueBeam LINAC". 2018.



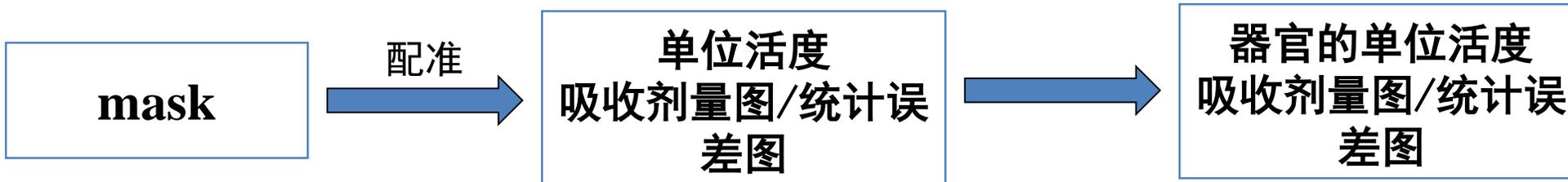
器官分割



智能自动勾画软件DeepViewer^[1]

- 对¹⁸F-FDG病例的CT图像中的30多个器官进行分割
- 对¹⁸F-AV45病例的CT图像中的12个器官进行分割

器官的单位活度吸收剂量



[1] Wang Z, Chang Y, Peng Z, et al. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2020, 21(12): 272-279.



剂量计算和统计误差分析

1、水箱：

吸收剂量：
$$D = \frac{\sum_i^n d_i}{n} \quad (2.5)$$

统计误差：
$$U_s = \sqrt{\frac{\sum_i^p u_i^2}{p}} \quad (2.6)$$

其中， u_i 为第*i*个大于 $k \cdot d_{max}$ 的体素的吸收剂量的统计误差， p 为所含大于 $k \cdot d_{max}$ 的体素的总数， k 为阈值。

2、临床病例

临床病例	累积活度	单位活度吸收剂量	累积吸收剂量	器官吸收剂量	器官统计误差
$^{18}\text{F-FDG}$	$A = \int_0^\infty A_0 \cdot e^{-\lambda t}$				
$^{18}\text{F-AV45}$	$A_s(t) = A_0 F_s \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{i,eff}} t\right) \quad (2.10)$ $A = \int_0^\infty A_s(t) dt \quad (2.11)$	d	$D = A \cdot d \quad (2.12)$	$D_s = \frac{\sum_i^n D_i \cdot m_i}{\sum_i^n m_i} \quad (2.7)$	$U_s = \sqrt{\frac{\sum_i^p u_i^2}{p}} \quad (2.8)$

3.1.1、水箱

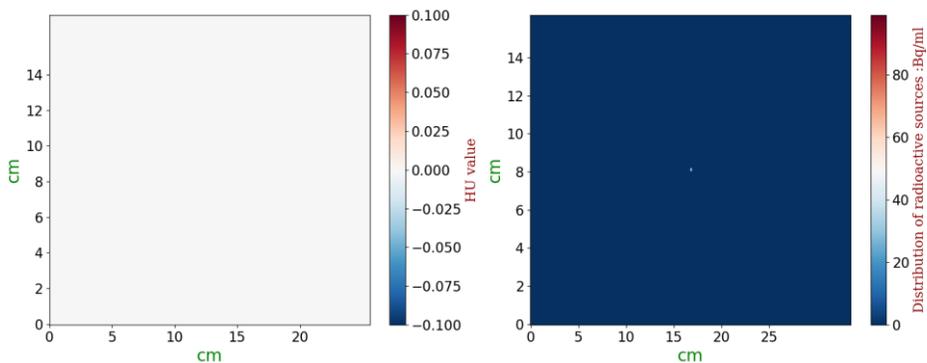
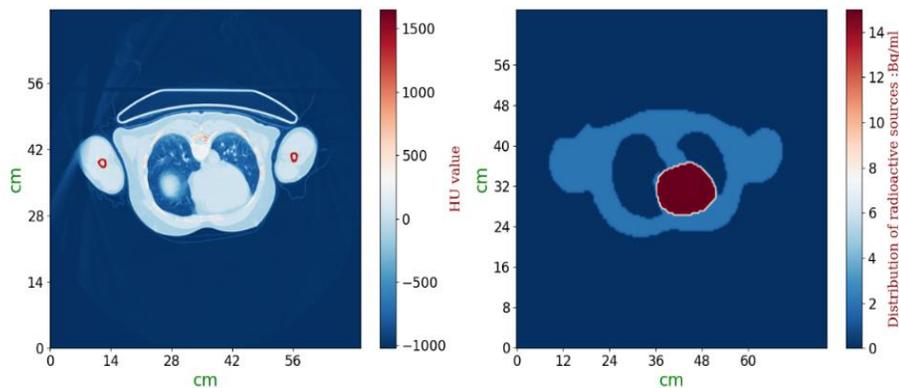


图3.1 水箱的相空间文件。（左）水箱模型，（右）水箱内放射源分布

3.1.2、临床病例1： ^{18}F -FDG



3.1.3、临床病例2： ^{18}F -AV45

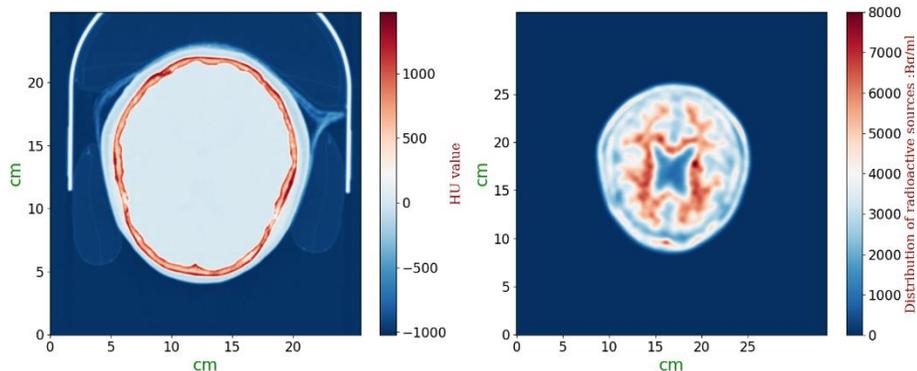


图3.5 ^{18}F -AV45的相空间文件。（左）人体模型，（右）放射源分布

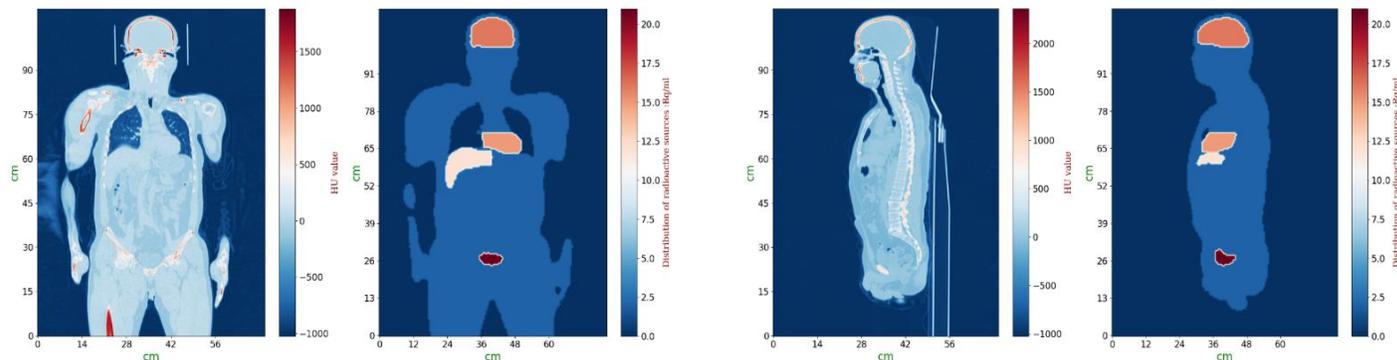


图3.2-3.4 ^{18}F -FDG的相空间文件。（左）人体模型，（右）放射源分布



3.2.1 水箱

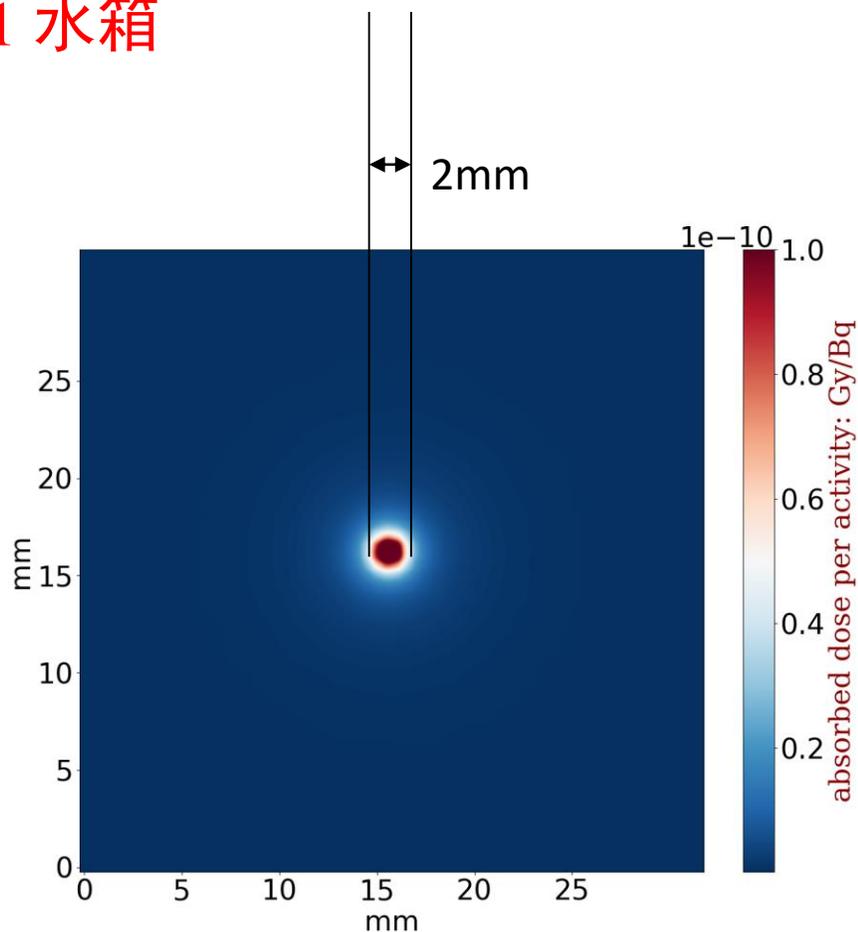


图3.8 GATE计算水箱的单位活度吸收剂量

GATE: $5.82 \times 10^{-15} \text{Gy/Bq}$

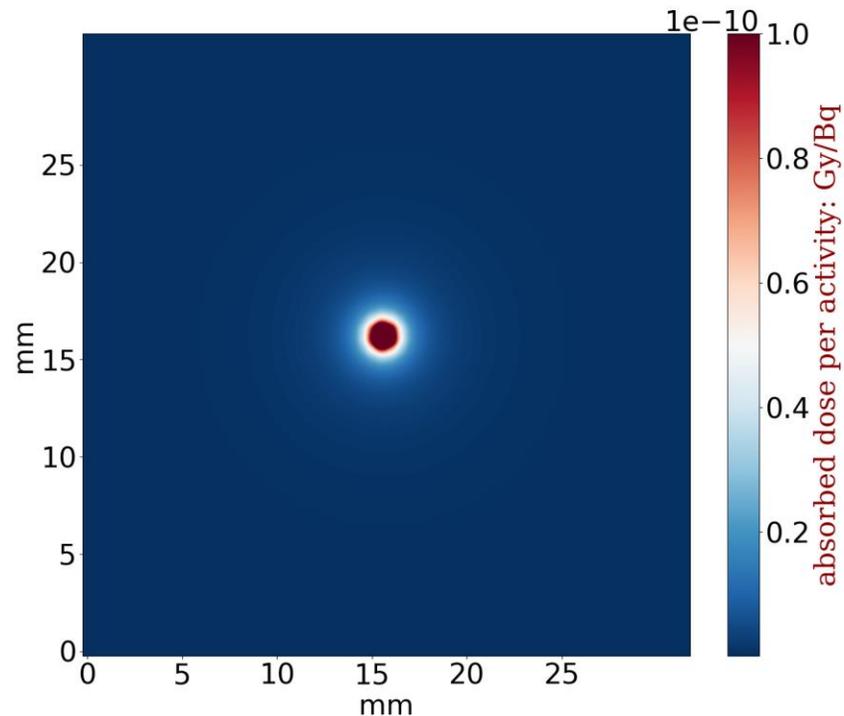


图3.9 ARCHER-NM计算水箱的单位活度吸收剂量

ARCHER-NM: $5.80 \times 10^{-15} \text{Gy/Bq}$

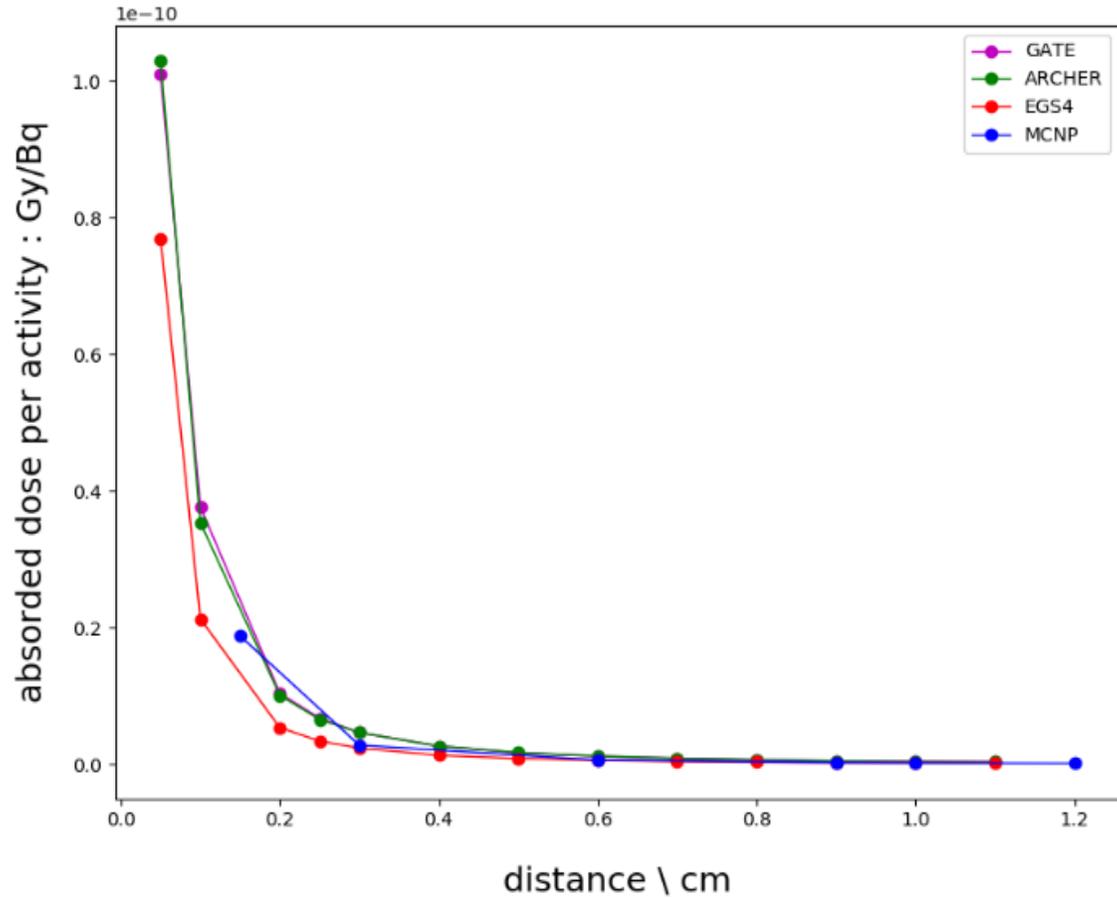


图3.11 剂量深度曲线^[1]

[1]Luxton G , Jozsef G. 1999. Radial dose distribution, dose to water and dose rate constant for monoenergetic photon point sources from 10 keV to 2 MeV: EGS4 Monte Carlo model calculation[J]. Medical Physics, 26(12):2531.

表3.1 径向距离上的剂量和统计误差

径向距离 (cm)	GATE (Gy/Bq)	GATE 统计误差	ARCHER-NM (Gy/Bq)	ARCEHR 统计误差	MCNP (Gy/Bq)	MCNP 统计误差	EGS4 (Gy/Bq)
0.05	1.01E-10	0.32%	1.03E-10	0.58%	\	\	7.70E-11
0.1	3.77E-11	0.52%	3.54E-11	0.58%	\	\	2.13E-11
0.2	1.04E-11	0.99%	1.01E-11	1.24%	\	\	5.37E-12
0.25	6.76E-12	1.23%	6.58E-12	1.50%	\	\	3.42E-12
0.3	4.65E-12	1.47%	4.65E-12	2.10%	2.80E-12	0.17%	2.37E-12
0.4	2.66E-12	1.96%	2.68E-12	1.77%	\	\	1.33E-12
0.5	1.69E-12	2.45%	1.72E-12	2.82%	\	\	8.50E-13
0.6	1.19E-12	2.95%	1.21E-12	4.26%	6.31E-13	0.33%	5.88E-13
0.7	8.72E-13	3.47%	8.82E-13	4.94%	\	\	4.32E-13
0.8	6.78E-13	3.88%	6.84E-13	6.57%	\	\	3.30E-13
0.9	4.80E-13	4.64%	4.89E-13	4.88%	2.74E-13	0.49%	2.60E-13
1	4.18E-13	5.02%	3.94E-13	6.26%	2.01E-13	0.58%	2.10E-13
1.1	3.80E-13	5.23%	3.30E-13	7.25%	\	\	1.73E-13
1.2	2.84E-13	6.04%	2.84E-13	10.97%	1.53E-13	0.66%	1.46E-13
1.5	1.90E-13	7.28%	1.85E-13	7.85%	9.73E-14	0.82%	9.25E-14
2	9.92E-14	10.45%	1.06E-13	12.79%	4.92E-14	1.14%	5.15E-14
3	4.83E-14	13.85%	4.73E-14	16.96%	2.40E-14	1.61%	2.29E-14
4	1.81E-14	17.62%	2.58E-14	18.76%	1.28E-14	2.16%	1.25E-14
5	1.40E-14	18.91%	1.60E-14	37.56%	7.92E-15	2.69%	7.63E-15
7	5.32E-15	19.73%	8.00E-15	86.09%	3.82E-15	3.78%	3.73E-15
10	3.58E-15	20.00%	3.60E-15	100.00%	1.73E-15	5.45%	1.67E-15
12	1.39E-15	19.97%	1.90E-15	72.27%	1.03E-15	7.01%	9.81E-16

3.2.2 临床病例1: ^{18}F -FDG

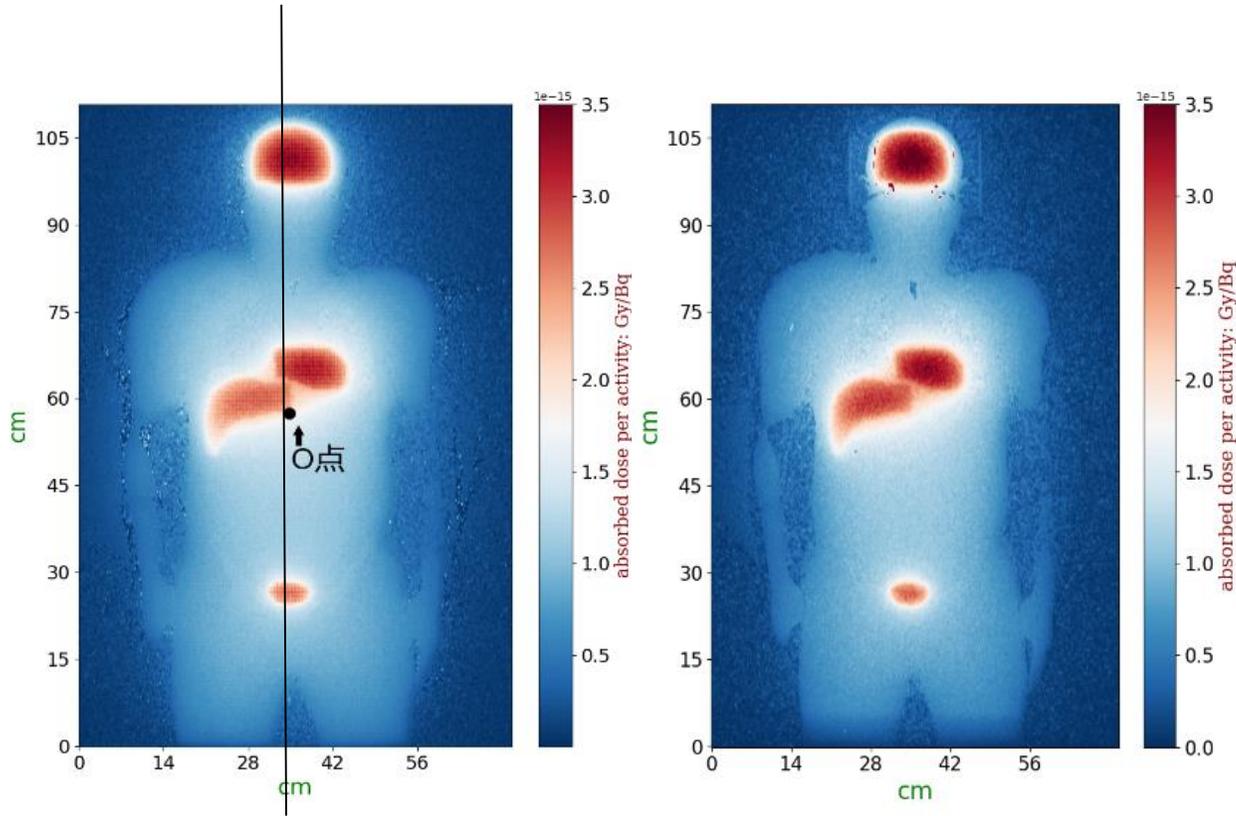


图3.14-3.15 蒙特卡洛模拟 ^{18}F -FDG病例结果, (左) ARCHER-NM, (右) GATE

表3.2 O点附近8个体素点的单位活度吸收剂量与统计误差

坐标	单位活度吸收剂量 (Gy/Bq)		差别	ARCHER-NM
	GATE	ARCHER-NM	(GATE-ARCHER) / GATE	统计误差
[185, 256, 256]	1.52E-15	1.57E-15	-3.77%	0.90%
[184, 256, 256]	1.43E-15	1.57E-15	-9.81%	0.72%
[184, 255, 256]	1.70E-15	1.53E-15	10.01%	0.97%
[185, 255, 256]	1.65E-15	1.55E-15	5.78%	0.97%
[185, 255, 255]	1.56E-15	1.56E-15	0.01%	0.77%
[184, 255, 255]	1.57E-15	1.57E-15	-0.03%	0.74%
[184, 256, 255]	1.55E-15	1.48E-15	4.70%	0.73%
[185, 256, 255]	1.62E-15	1.53E-15	5.30%	1.00%

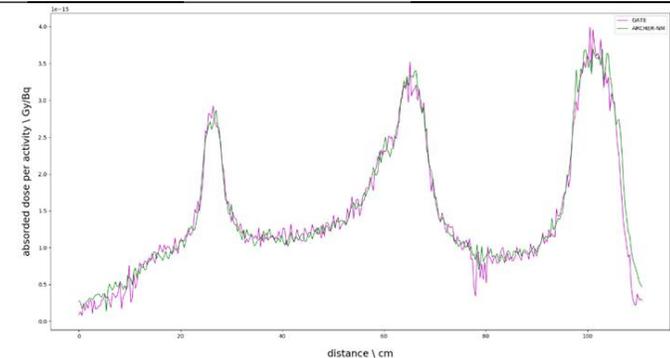


图3.19 单位活度吸收剂量的深度曲线

3.2.3、临床病例2：¹⁸F-AV45

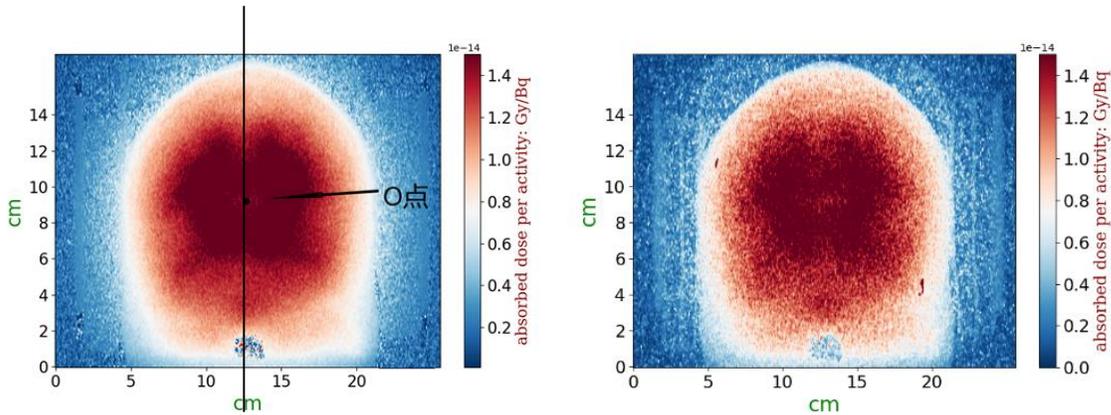


图3.22-3.23 蒙特卡洛模拟¹⁸F-AV45病例结果（左）ARCHER-NM，（右）GATE

表3.3 O点附近8个体素点的单位活度吸收剂量与统计误差

位置坐标	单位活度吸收剂量 (Gy/Bq)		误差	ARCHER-NM
	GATE	ARCHER-NM		统计误差
[87, 256, 256]	1.37E-14	1.53E-14	-11.82%	0.81%
[86, 256, 256]	1.39E-14	1.57E-14	-13.25%	1.07%
[86, 255, 256]	1.34E-14	1.50E-14	-11.60%	1.65%
[87, 255, 256]	1.44E-14	1.45E-14	-0.60%	1.43%
[87, 255, 255]	1.42E-14	1.52E-14	-7.15%	1.01%
[86, 255, 255]	1.55E-14	1.50E-14	-0.10%	1.65%
[86, 256, 255]	1.53E-14	1.47E-14	4.01%	1.36%
[87, 256, 255]	1.51E-14	1.54E-14	-1.61%	1.25%

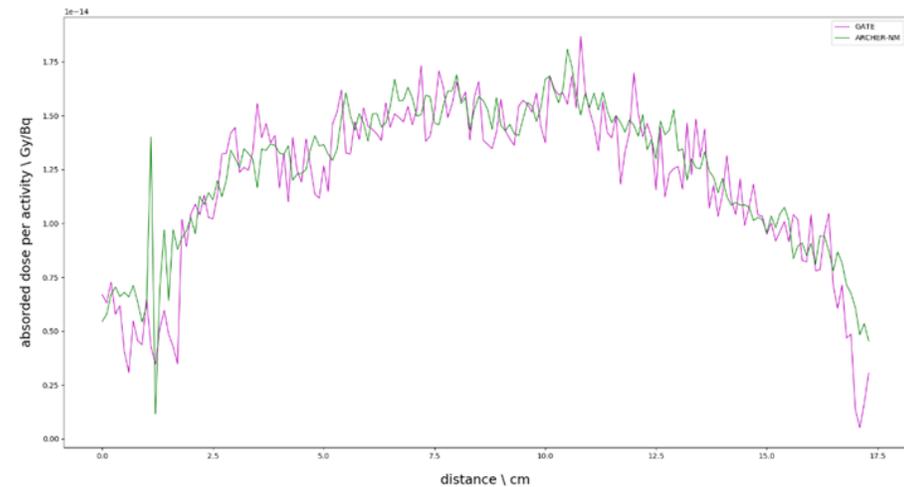


图3.27 纵向剂量深度曲线



时间比较:

软件	水箱
GATE (1×10^9)	约540分钟
ARCHER-NM (1×10^9)	约1分钟

软件	^{18}F -FDG	^{18}F -AV45
GATE (1×10^9)	约2640分钟	约1260分钟
ARCHER-NM (1×10^{11})	约20分钟	约12分钟



表3.4 统计误差与剂量阈值的关系

水箱:

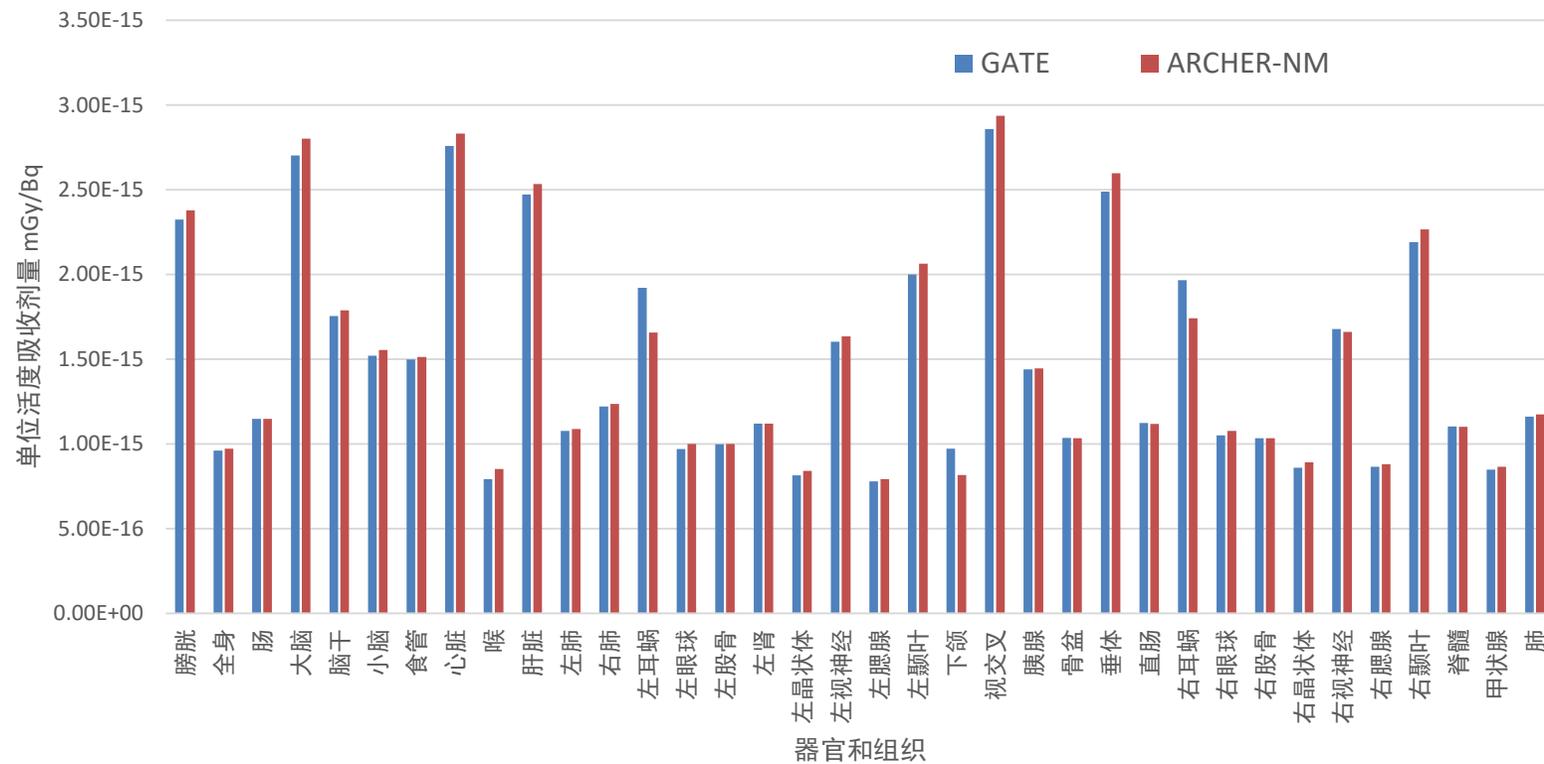
阈值k	GATE	ARCHER-NM
0	19.60%	73.10%
0.01	1.91%	2.06%
0.02	1.35%	1.45%
0.03	1.09%	1.18%
0.04	0.96%	1.01%
0.05	0.86%	0.85%
0.06	0.78%	0.83%
0.07	0.70%	0.77%
0.08	0.65%	0.73%
0.09	0.63%	0.70%
0.1	0.60%	0.71%
0.2	0.45%	0.51%
0.3	0.35%	0.35%
0.4	0.31%	0.30%
0.5	0.28%	0.29%
0.6	0.26%	0.29%
0.7	0.26%	0.25%
0.8	0.25%	0.25%
0.9	0.25%	0.25%

当阈值为0.5，即体素的吸收剂量为最大剂量的50%时，两款软件计算的上述体素点的统计误差降到了0.3%以下

临床病例1: ^{18}F -FDG



图3.29 ^{18}F -FDG病例CT图像分割结果横断面



器官和组织的单位活度吸收剂量



临床病例1: ^{18}F -FDG

表3.5 器官吸收剂量的统计误差

器官和组织	膀胱	大脑	心脏	肝脏	左肾	胰腺	脊髓	肺
统计误差	0.69%	0.63%	0.62%	0.64%	0.92%	0.81%	0.95%	1.75%

表3.6 主要器官的累计吸收剂量 (mGy)

器官和组织	膀胱	大脑	心脏	肝脏	左肾	胰腺	脊髓	肺
GATE	6.54	7.60	7.76	6.96	3.15	4.05	3.10	3.26
ARCHER-NM	6.69	7.88	7.96	7.13	3.15	4.07	3.10	3.30
相对误差	5.51%	-3.67%	-2.61%	-2.51%	0.09%	-0.38%	0.18%	-1.23%

临床病例2: ^{18}F -AV45

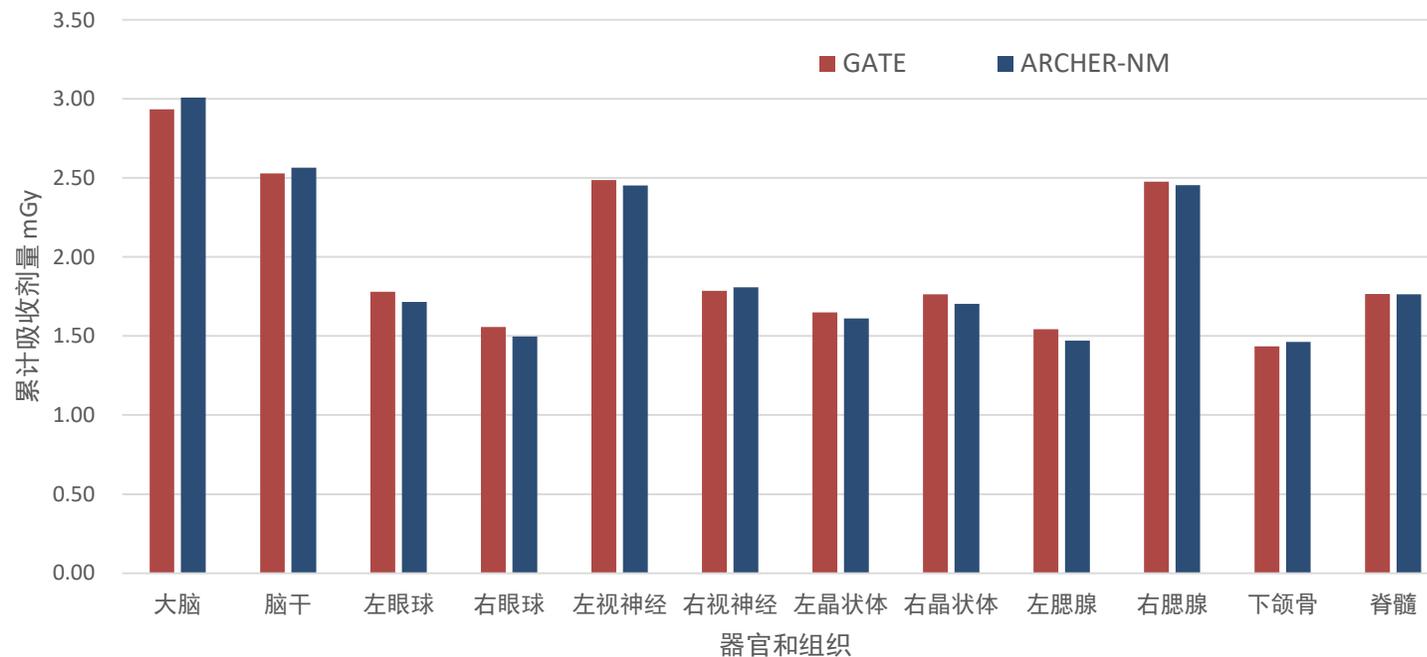


图3.30 ^{18}F -AV45病例CT图像分割结果横断面

表3.7 器官吸收剂量的统计误差

器官和组织	大脑	脑干	左眼球	右眼球	左视神经	右视神经	左晶状体	右晶状体	左腮腺	右腮腺	下颌骨	脊髓
统计误差	2.34%	1.34%	1.43%	1.77%	1.86%	1.49%	1.79%	1.62%	1.77%	1.88%	1.47%	1.96%



- PET图像用来提供放射源分布
- 放射源的分布与剂量图非常相似
- 一对0.511MeV的光子对人体的吸收剂量处于 10^{-16} - 10^{-14} Gy量级
- 器官累积吸收剂量小于10mGy
- 相对误差产生的原因：物理过程、HU值转密度值等细节的不同
- 统计误差较大的原因：分配到每个体素的光子数量少，散射方向球面均匀分布



结论：

- 开发了**首个**基于GPU加速的蒙特卡洛计算核医学内照射吸收剂量软件——**ARCHER-NM**
- 计算结果显示出了较好**的一致性**
- 两个临床病例在模拟粒子数为GATE的一百倍的情况下，**速度提升了一百多倍**

展望：

- 以蒙特卡罗方法计算的内照射吸收剂量为**标准**
- 为放射性药物**治疗癌症提供剂量学依据**

创新点：

- **GPU加速技术+蒙特卡洛方法**计算核医学成像内照射吸收剂量

已发表论文：

- 李永哲 等，2021，基于放射性药物 ^{18}F -AV45的PET-CT图像的脑组织内照射吸收剂量蒙特卡洛计算，《中国医学物理学杂志》，录用待选刊