



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

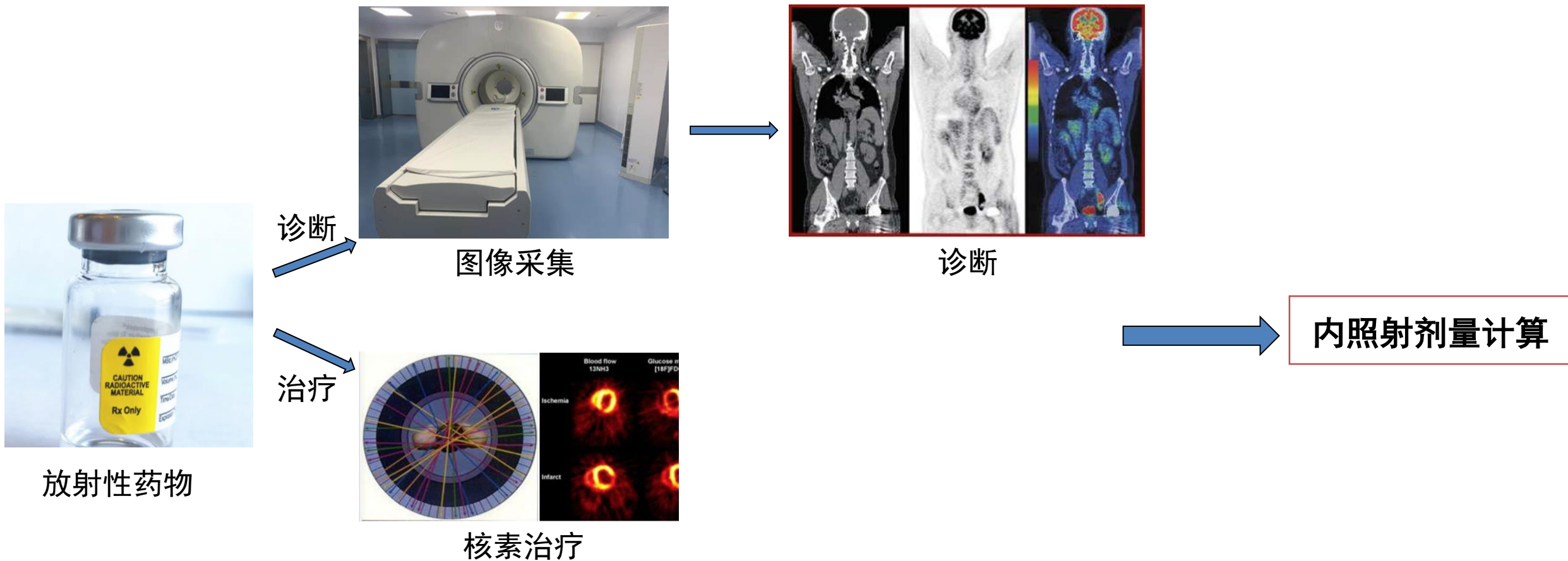
中国科学技术大学 核科学技术学院 核医学物理研究所

时间：2021年5月20日



# 第一章 绪论

## 1.1 放射性药物



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。



# 第一章 绪论

## 1.2 内照射剂量计算方法

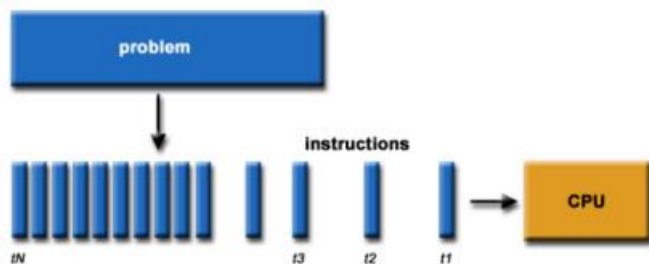
	优点	缺点
MIRD方法 <sup>[1]</sup>	方法简单	人体模型和放射源模型过于简单
蒙特卡洛方法	计算结果准确	计算所需时间长，动辄数小时至十几天
深度学习方法	速度快	依赖大量训练数据、适用性差

需要一个**快速、准确**计算核医学内照射吸收剂量的软件

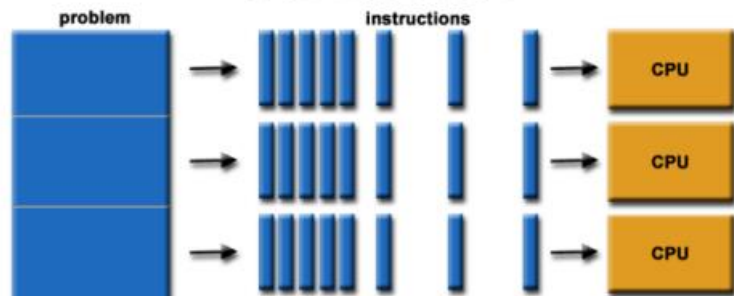
[1]Bolch W E , Bouchet L G , Robertson J S , et al. 1999. MIRD pamphlet No. 17: the dosimetry of nonuniform activity distributions--radionuclide S values at the voxel level. Medical Internal Radiation Dose Committee.[J]. Journal of Nuclear Medicine Official Publication Society of Nuclear Medicine, 40(1):11S.



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<sup>[1]</sup>、  
GPUMCD<sup>[2]</sup>、  
**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：

开发和使用基于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

		<sup>18</sup> F-FDG病例	<sup>18</sup> 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: $^{18}\text{F}$ -FDG	临床病例2: $^{18}\text{F}$ -AV45
体模	尺寸	$512 \times 512 \times 174$	$512 \times 512 \times 370$	$512 \times 512 \times 174$
	分辨率	$0.488\text{mm} \times 0.488\text{mm} \times 1\text{mm}$	$1.367\text{mm} \times 1.367\text{mm} \times 3\text{mm}$	$0.488\text{mm} \times 0.488\text{mm} \times 1\text{mm}$
	密度	$1\text{g/cm}^3$	HU值转密度值 <sup>[1-2]</sup>	
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<sup>[3]</sup>

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：

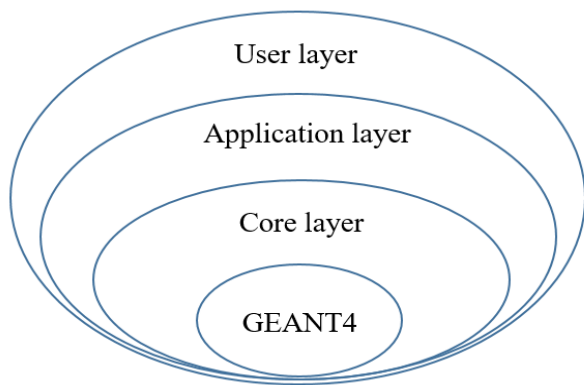


图2.2 GATE的结构<sup>[1]</sup>

2、ARCHER：

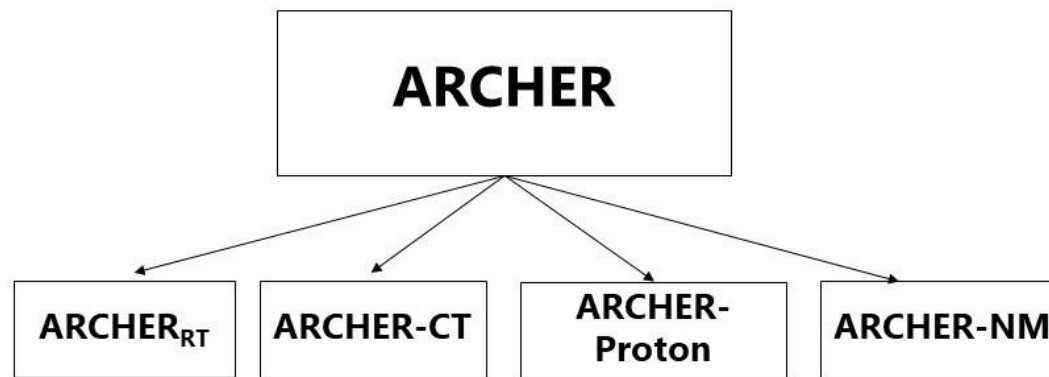


图2.3 ARCHER平台

[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

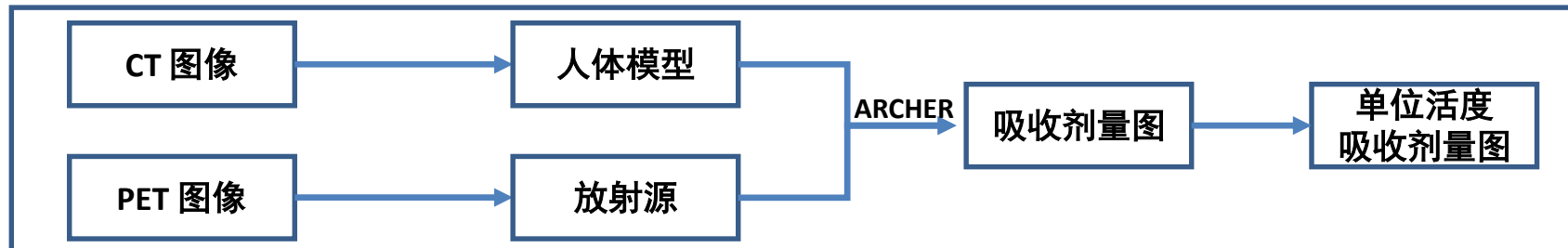


图2.4 ARCHER-NM计算流程

### 参数设置

	ARCHER-NM	GATE
物理软件包	ARCHER内置物理包 <sup>[1-3]</sup>	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	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^9$

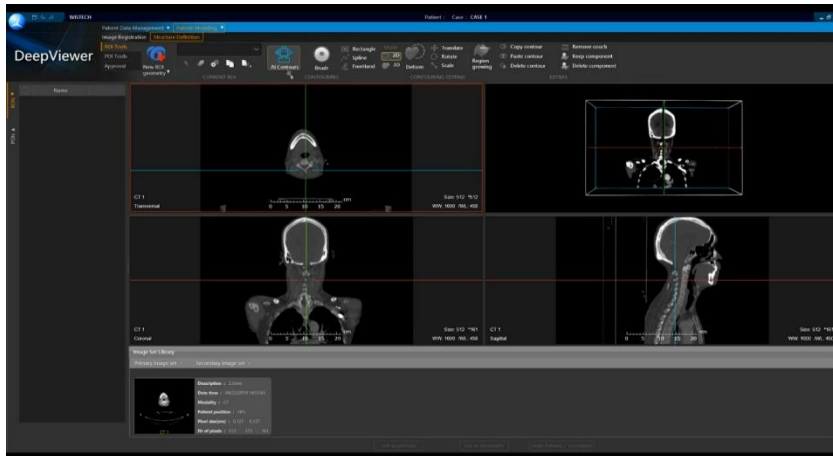
[1] Liu T. "Development of ARCHER—a parallel Monte Carlo radiation transport code—for x-ray CT dose calculations using GPU and coprocessor technologies". 2014.

[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.



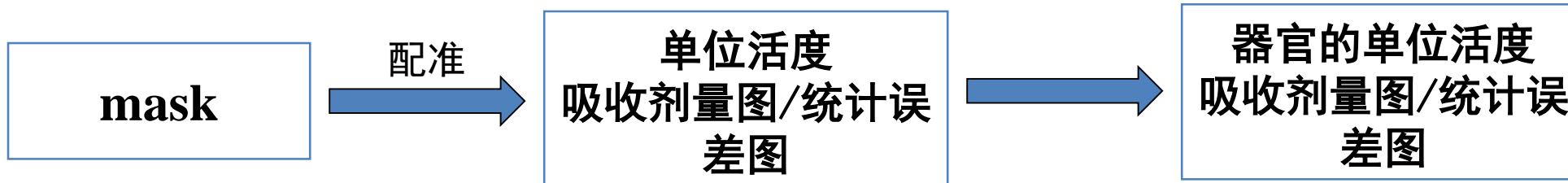
### 器官分割



智能自动勾画软件DeepViewer<sup>[1]</sup>

- 对 $^{18}\text{F}$ -FDG病例的CT图像中的30多个器官进行分割
- 对 $^{18}\text{F}$ -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： $D = \frac{\sum_i^n d_i}{n}$  (2.5)

统计误差： $U_s = \sqrt{\frac{\sum_i^p u_i^2}{p}}$  (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
$^{18}\text{F-FDG}$	$A = \int_0^\infty A_0 \cdot e^{-\lambda t}$	d	$D = A \cdot d$ (2.12)	$D_s = \frac{\sum_i^n D_i \cdot m_i}{\sum_i^n m_i}$ (2.7)	$U_s = \sqrt{\frac{\sum_i^p u_i^2}{p}}$ (2.8)
$^{18}\text{F-AV45}$	$A_s(t) = A_0 F_s \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{i,eff}} t\right)$ (2.10) $A = \int_0^\infty A_s(t) dt$ (2.11)				

### 3.1.1、水箱

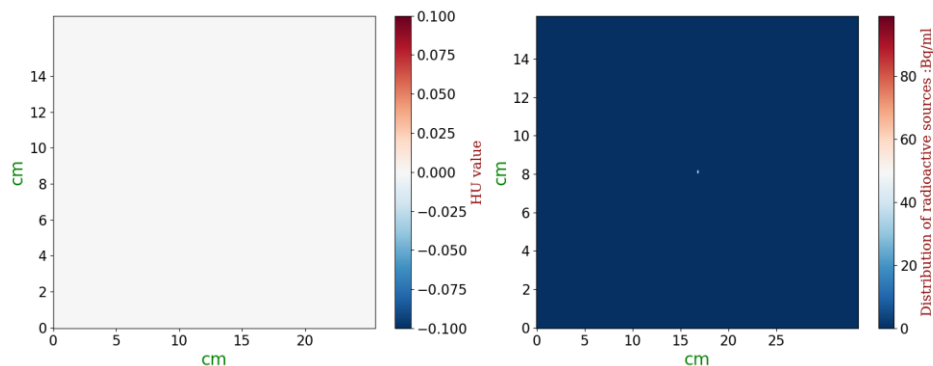
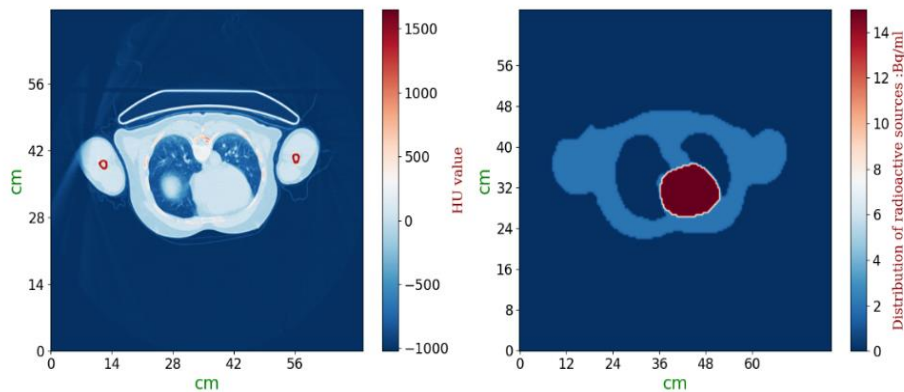


图3.1 水箱的相空间文件。（左）水箱模型，（右）水箱内放射源分布

### 3.1.2、临床病例1： $^{18}\text{F}$ -FDG



### 3.1.3、临床病例2： $^{18}\text{F}$ -AV45

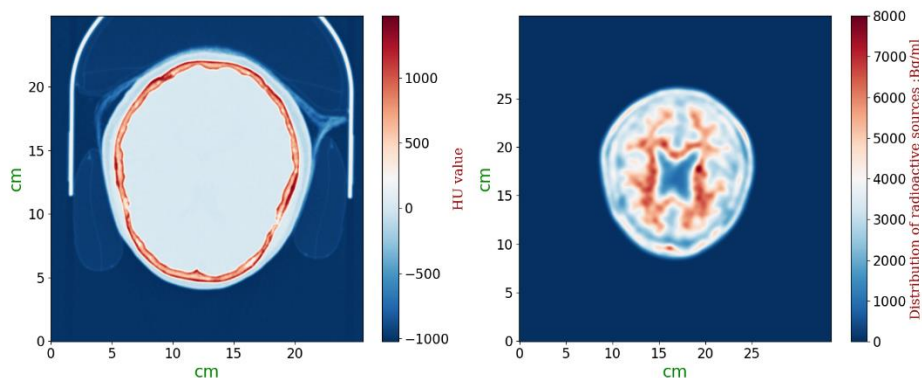


图3.5  $^{18}\text{F}$ -AV45的相空间文件。（左）人体模型，（右）放射源分布

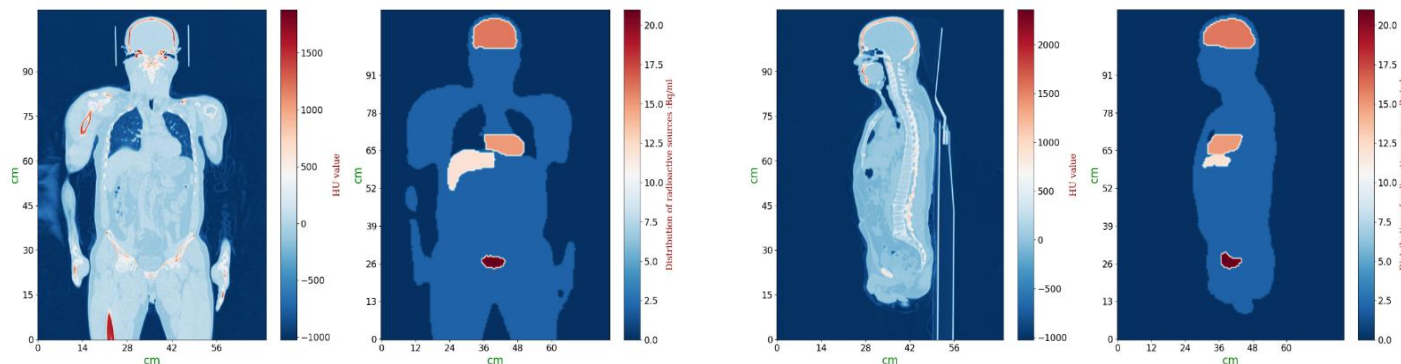


图3.2-3.4  $^{18}\text{F}$ -FDG的相空间文件。（左）人体模型，（右）放射源分布



### 3.2.1 水箱

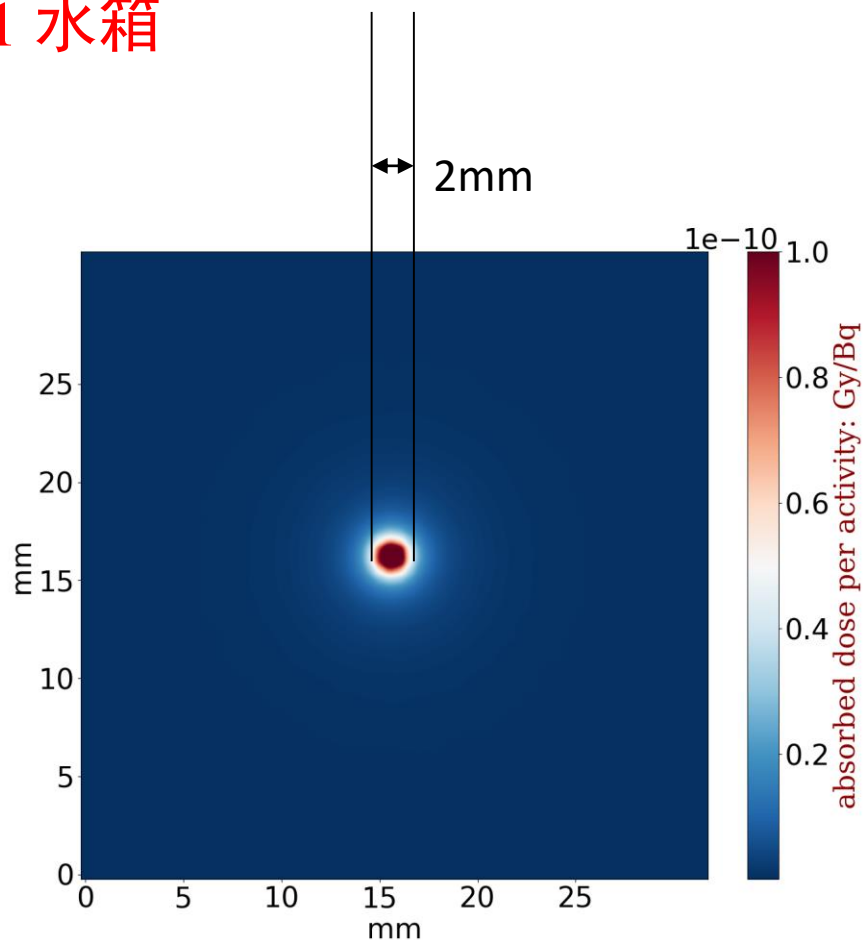


图3.8 GATE计算水箱的单位活度吸收剂量

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

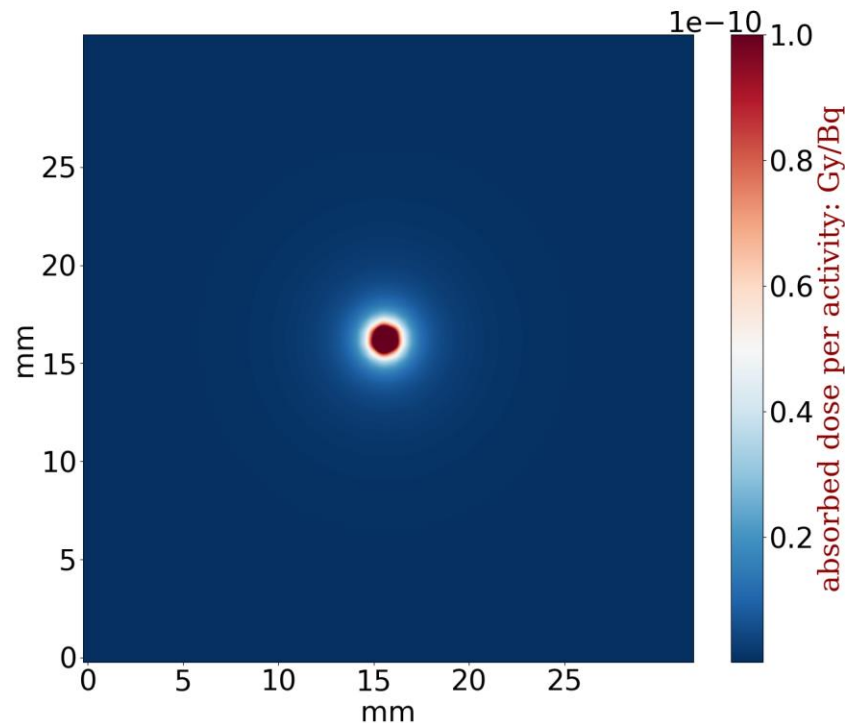


图3.9 ARCHER-NM计算水箱的单位活度吸收剂量

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



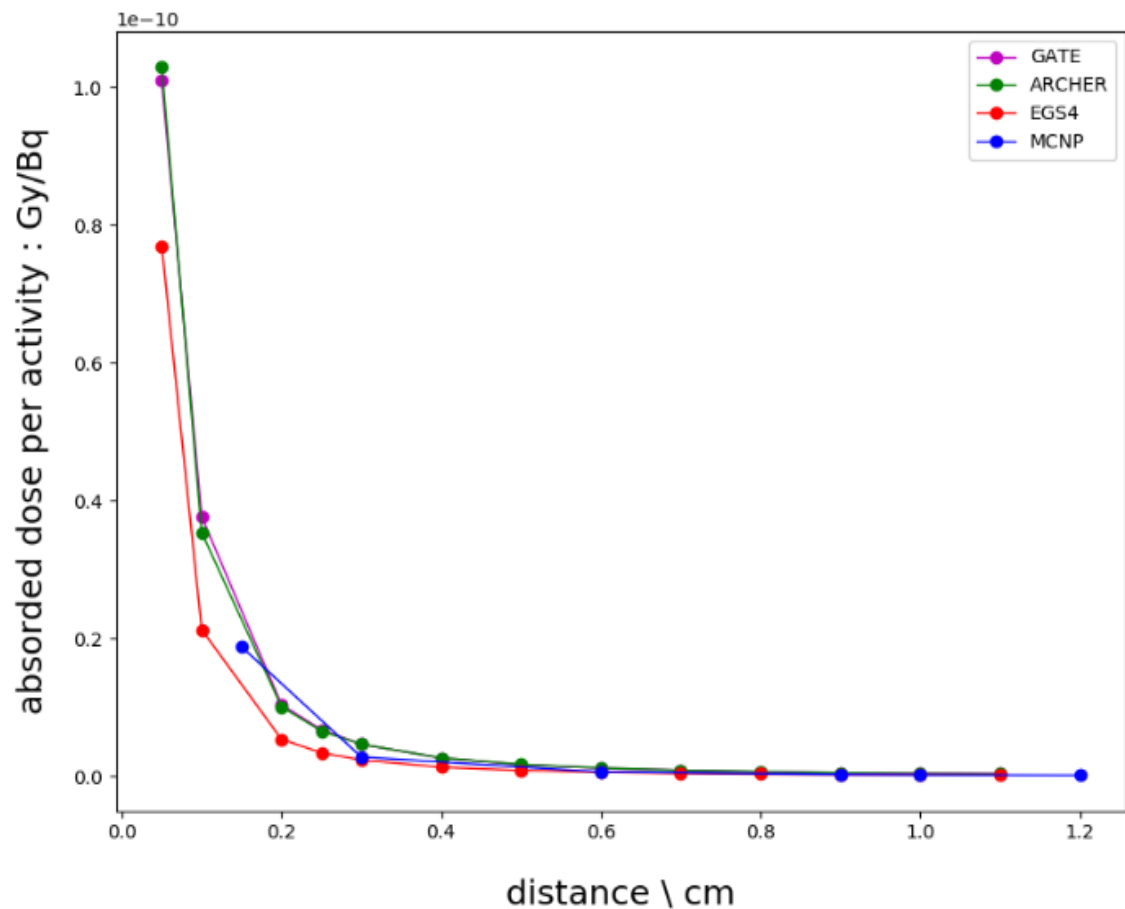


图3.11 剂量深度曲线<sup>[1]</sup>

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

[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.





### 3.2.2 临床病例1： $^{18}\text{F}$ -FDG

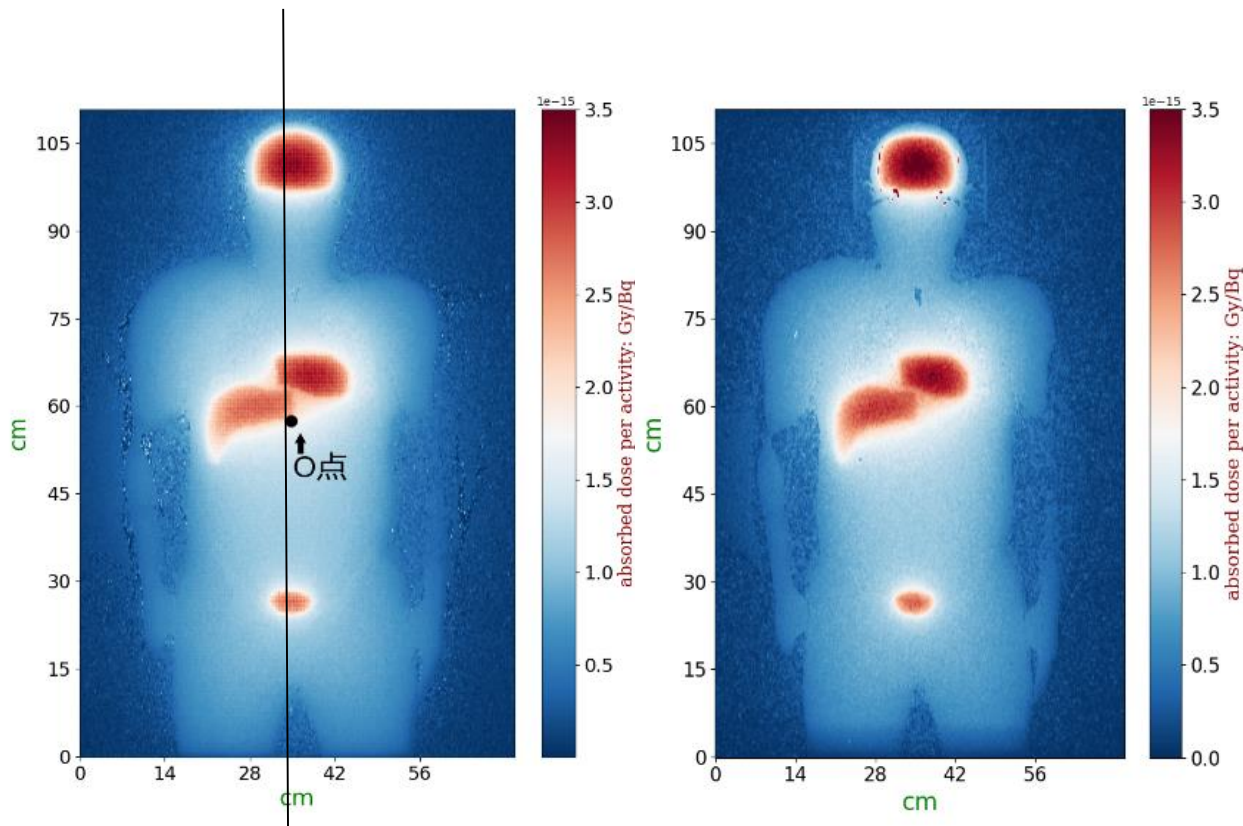


图3.14-3.15 蒙特卡洛模拟 $^{18}\text{F}$ -FDG病例结果，（左）ARCHER-NM，（右）GATE

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	$(\text{GATE} - \text{ARCHER}) / \text{GATE}$	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%

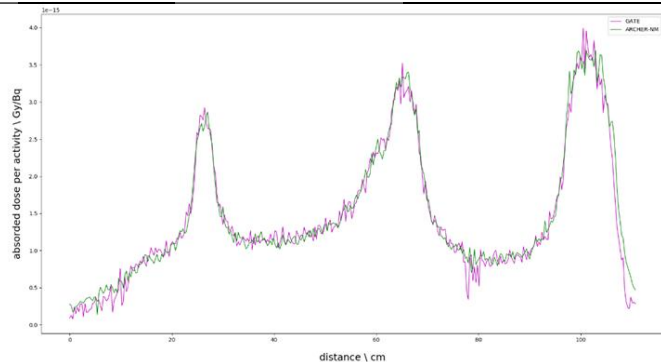


图3.19 单位活度吸收剂量的深度曲线

### 3.2.3、临床病例2： $^{18}\text{F}$ -AV45

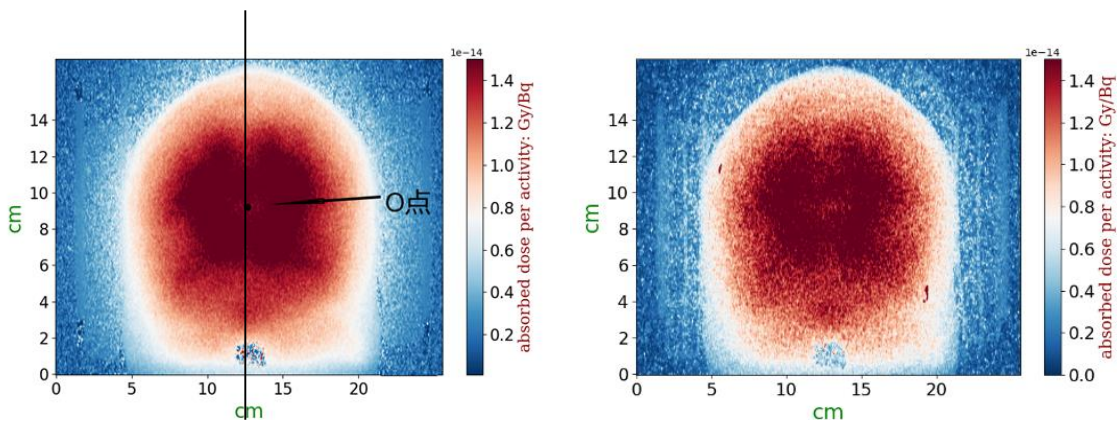


图3.22-3.23 蒙特卡洛模拟 $^{18}\text{F}$ -AV45病例结果（左）ARCHER-NM，（右）GATE

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%

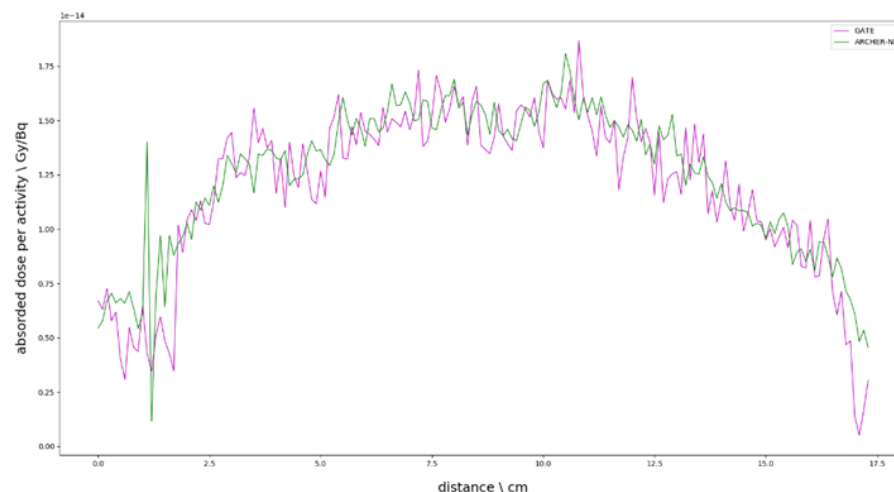


图3.27 纵向剂量深度曲线



时间比较:

软件	水箱
GATE ( $1 \times 10^9$ )	约540分钟
ARCHER-NM ( $1 \times 10^9$ )	约1分钟

软件	$^{18}\text{F}$ -FDG	$^{18}\text{F}$ -AV45
GATE ( $1 \times 10^9$ )	约2640分钟	约1260分钟
ARCHER-NM ( $1 \times 10^{11}$ )	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: $^{18}\text{F}$ -FDG

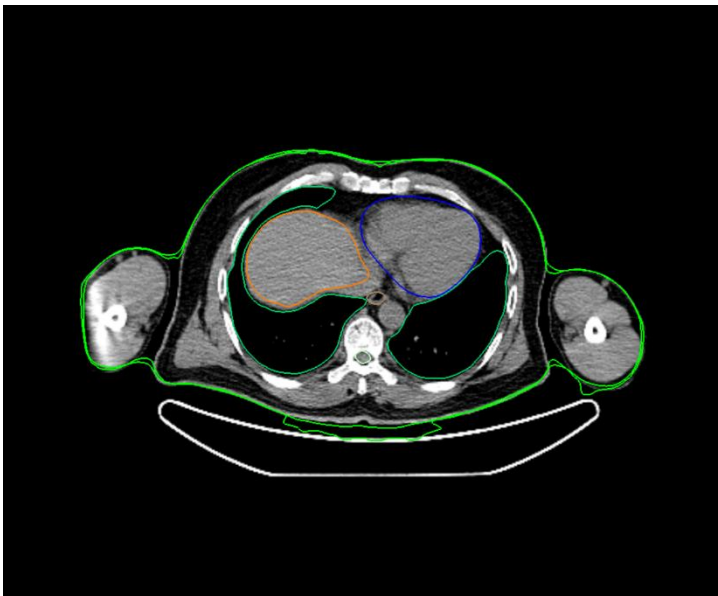
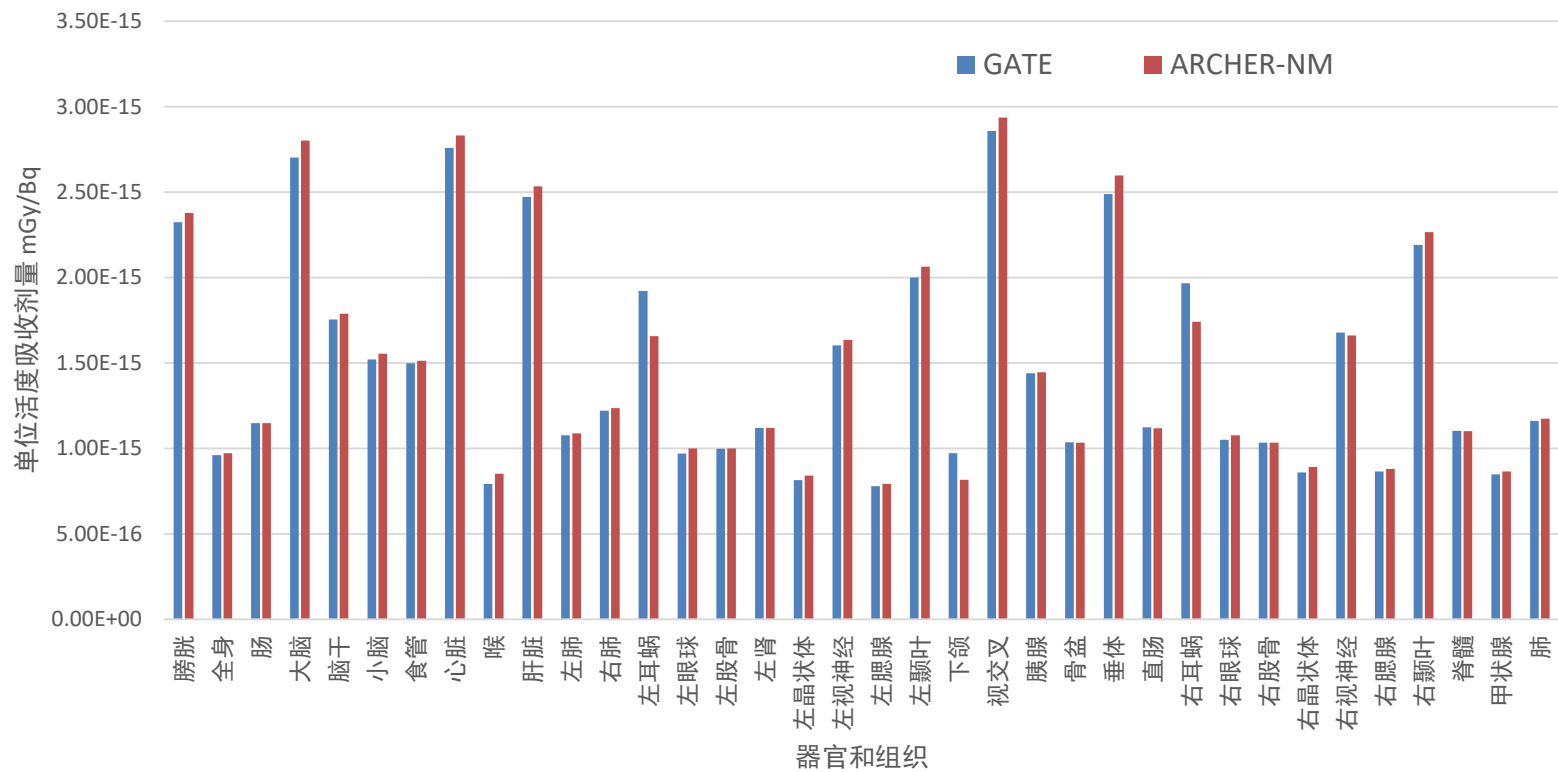


图3.29  $^{18}\text{F}$ -FDG病例CT图像分割结果横断面



器官和组织的单位活度吸收剂量





### 临床病例1： $^{18}\text{F}$ -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： $^{18}\text{F}$ -AV45



图3.30  $^{18}\text{F}$ -AV45病例CT图像分割结果横断面

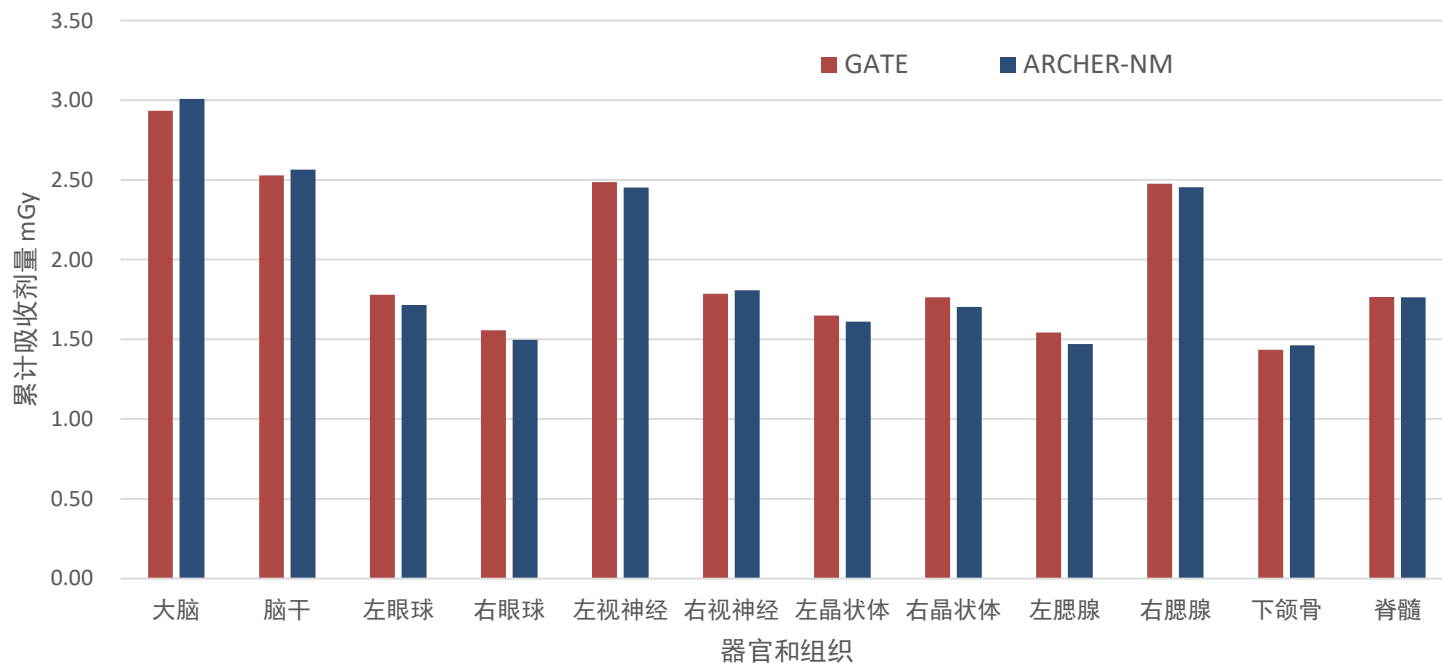


表3.7 器官吸收剂量的统计误差

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 $^{18}\text{F}$ -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