
基于 Geant4 的肿瘤放射治疗研究

202318000907033 符晨曦

202318000907034 龚家宝

202318000907042 袁源

202318008107024 唐宇轩

June 5, 2024

Contents

1	引言	2
2	利用 Geant4 对患者身体建模	3
3	伽马和质子射线放疗的能量优化与效果对比	4
3.1	利用伽马射线进行放疗	4
3.2	利用质子射线进行放疗	4
3.3	两种疗法对比	5
4	模拟 BNCT 疗法	6
4.1	^{10}B 原子浓度对治疗效果的影响	6
4.2	束流截面大小对治疗效果的影响	6
4.3	与伽马、质子射线放疗的对比	7
5	结论	8

第1章 引言

放射治疗（简称放疗）是肿瘤治疗的一种常用手段。在临床医学实践中，根据肿瘤细胞的种类不同，医生将利用不同的放射线如伽马，质子，中子，离子等对患者病患部位进行辐射，从而杀死癌细胞。

硼中子俘获疗法（BNCT）是一种新的疗法，2020 年全球首台 BNCT 设备在日本获批上市。硼中子俘获疗法主要通过将具有选择性的含硼药物注射入人体血液，然后富集于肿瘤细胞中，受中子照射后，经过 $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反应放出的高能量、短射程的 α 粒子和 ^7Li 粒子，来杀死肿瘤细胞，而不伤害正常组织 [1][2]。

本报告将利用 Geant4 进行建模和模拟，从能量沉积的大小、尺度和位置几方面，对伽马和质子射线能量进行优化，对比使用这两种射线进行放疗的优劣。此外，还将使用 0.5eV 的热中子束流，研究肿瘤区 ^{10}B 原子浓度与治疗效果之间的关系，以及束流截面大小的影响，最后与其他的射线的治疗效果进行对比。

本报告第 2 章将介绍我们如何基于 Geant4 对肿瘤患者身体进行简单建模，包括人体和肿瘤部分；第 3 章将利用伽马和质子射线进行放疗过程模拟，对伽马和质子束流能量进行扫描，给出治疗效果最优的能量，并对这两种疗法进行对比；第 4 章将对 BNCT 疗法进行模拟，利用 0.5eV 中子束流进行辐射，并给出模拟得到的治疗结果与 ^{10}B 原子浓度的关系。

第2章 利用 Geant4 对患者身体建模

本次研究将对患者身体进行最简单的建模，其示意图如 2.1 所示：

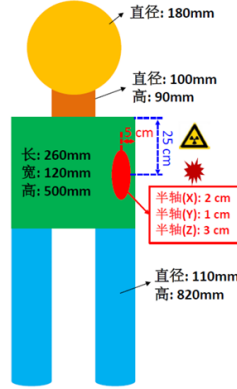


Figure 2.1: 人体几何简单建模示意图

其中头部利用直径为 180mm 的球体模拟，脖子部分利用高 90mm，直径 100mm 的圆柱模拟。躯干部分不考虑双手，利用长 260mm，宽 120mm，高 500mm 的六面体模拟，双腿利用直径同样为 110mm，高同样为 820mm 的圆柱模拟。而患者肿瘤部分了利用 xyz 半轴分别为 2cm，1cm，3cm 的椭球模拟，其在患者体内的相对位置如图 2.1 中红色区域所示。

实机建模如图 2.2:

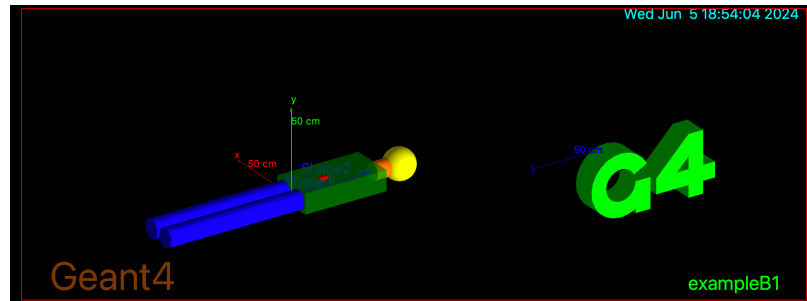


Figure 2.2: Geant4 人体建模实机

除肿瘤外身体正常部分材料使用的是 NIST 列表中定义好的“G4_A-150_TISSUE”；肿瘤部分在利用伽马和质子射线进行治疗的研究中设定为与身体正常部分一致，为“G4_A-150_TISSUE”，在 BNCT 疗法研究中设定为正常组织“G4_A-150_TISSUE”与 ^{10}B 原子的混合物， ^{10}B 原子的浓度作为变量，从而研究 ^{10}B 原子浓度与该疗法效果的关系。

此外，由于 ^{10}B 原子并不是 NIST 列表中预先定义好的材料，因此需要自定义密度。

第3章 伽马和质子射线放疗的能量优化与效果对比

Beth-Bloch 公式描述了带电粒子在介质中产生电离能损的形式：

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{4\pi r_e^2 m_e c^2 N_0 Z z^2}{A \beta^2} \right) \left\{ \ln \left[\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right] - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right\} \quad (3.1)$$

其中 N_0 是阿伏伽德罗常数， Z 和 A 是介质的原子序数和原子量， z 和 β 是电离粒子的带电量 and 速度， m_e 是电子质量， δ 为表示密度效应的项， $r_e = 2.8fm$ 是电子的经典半径， I 是电离常数， x 为约化介质层厚度。

由上式可知不同种类射线在人体内能量沉积曲线是不同的，因此根据肿瘤位置不同，不同种类疗法效果可能会有区别。但是质子和中子在空气中的能量损失很大，所有疗法都要求射线源紧贴患者体表。

3.1 利用伽马射线进行放疗

选取 5 个伽马束流能量进行放疗模拟，对病患部位进行照射，分别计算不同束流能量下沉积在肿瘤区域内的辐照剂量与沉积在正常组织内剂量的比值。这个比值越大，说明射线能更有效地杀死癌细胞的同时对人体正常组织的伤害更小。得到的结果如下表所示：

序号	粒子数/个	粒子能量/MeV	肿瘤剂量/pGy	正常组织剂量/pGy	肿瘤区/正常区
1	30000	0.5	1.000	75.7	0.0132
2	30000	0.6	3.659	91.5	0.0400
3	30000	0.7	2.895	107.0	0.0270
4	30000	0.8	2.301	121.7	0.0190
5	30000	0.9	0.599	136.2	4.39*10 ⁻³

Table 3.1: 不同能量的伽马束流在患者体内的沉积能量数据

由表可知，当伽马射线束流能量为 0.6MeV 时治疗效果最好。

3.2 利用质子射线进行放疗

与伽马射线类似，在不改变束流朝向和展宽的情况下，选取 5 个质子束流能量进行放疗模拟，对病患部位进行照射，分别计算不同束流能量下沉积在肿瘤区域内能量与沉积在正常组织内能量的比值。所得结果如下表所示：

序号	粒子数/个	粒子能量/MeV	肿瘤剂量/pGy	正常组织剂量/pGy	肿瘤区/正常区
1	1000	65	0.052	624.8	8.32×10^{-5}
2	1000	70	0.269	673.0	4.00×10^{-4}
3	1000	75	1.427	721.6	1.98×10^{-3}
4	1000	80	0.700	767.7	9.12×10^{-4}
5	1000	85	0.428	815.9	5.24×10^{-4}

Table 3.2: 不同能量的质子束流在患者体内的沉积能量数据

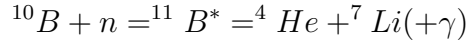
由表可知，当质子射线束流能量为 75MeV 时治疗效果最好。

3.3 两种疗法对比

根据肿瘤区域内能量与沉积在正常组织内能量的比值结果可知，在此次模拟中设定的肿瘤位置下，利用质子射线进行放疗时能量沉积效率比伽马射线更好。但如果考虑辐射对人体正常组织的损伤，光子主要以热量的形式沉积，而质子有可能与人体组织发生核反应，会对人体正常组织造成更大的伤害。因此在实际的临床应用中，需要综合考虑肿瘤位置、正常组织损伤情况来决定使用哪种放射线进行治疗。

第4章 模拟 BNCT 疗法

临床上通过靶向药物，可以将 ^{10}B 导入癌症组织，通过下列反应辐照杀伤癌细胞：



我们将利用能量为 0.5eV 的热中子束流对含 ^{10}B 的病患部位进行辐射，并得到不同 ^{10}B 浓度对治疗效果的影响。通过这一步找到最佳 ^{10}B 浓度后，固定该浓度，改变束流截面大小，研究该因素对治疗效果的影响。其中治疗效果与之前一样，用沉积在肿瘤区域内能量与沉积在正常组织内能量的比值来衡量。以下束流中中子数量均为一万个。

4.1 ^{10}B 原子浓度对治疗效果的影响

分别将肿瘤部分 ^{10}B 原子浓度设置为，在保持中子束流能量为 0.5eV 的情况下进行模拟，得到的结果如下表所示：

序号	^{10}B 原子浓度	肿瘤剂量/pGy	正常组织剂量/pGy	肿瘤区/正常区
1	0%	2.75×10^{-5}	7.08×10^{-2}	3.88×10^{-4}
2	5%	40.04	0.132	303
3	10%	52.97	0.143	370
4	15%	74.54	0.163	457
5	20%	88.10	0.164	537

Table 4.1: 不同 ^{10}B 原子浓度下患者体内的沉积能量数据

可知硼 10 浓度越高治疗效果越好。上述建模属于玩具模型，偏离现实，治疗方案需要综合射线的其他潜在危害和残余物的毒性等综合决定。

4.2 束流截面大小对治疗效果的影响

保持 ^{10}B 原子浓度为 5%，以及 0.5eV 的束流能量不变，改变截面大小，模拟得到沉积在肿瘤区域内能量与沉积在正常组织内能量的比值，结果如下表所示，其中相对大小是相对肿瘤垂直束流方向的截面定义的：

序号	截面相对大小	肿瘤剂量/pGy	正常组织剂量/pGy	肿瘤区/正常区
1	0.4	12.31	0.105	117.2
2	0.6	16.94	0.097	174.6
3	0.8	23.09	0.062	372.4
4	1.0	40.04	0.115	348.2
5	1.2	16.94	0.099	171.1
6	1.4	12.30	0.107	115.0

Table 4.2: 不同束流截面下患者体内的沉积能量数据

由表可知，当束流截面恰与肿瘤截面大小相等时，绝对治疗效果最好；为 0.8 倍肿瘤截面大小时，对正常组织的相对损害更低。两种指标都显示束流大小与肿瘤截面大小接近时治疗效果最好。

4.3 与伽马、质子射线放疗的对比

由模拟结果可知在 BNCT 疗法在杀伤癌细胞效率上明显高于光子和质子，此外这种疗法还将辐射束流能量控制在一个较小的值，使得该疗法对患者正常组织的伤害降到了最小。目前来看，这种治疗方法是最优的。

第5章 结论

本次研究对肿瘤放射治疗中常见的伽马、质子射线这两种放疗方式进行了模拟，根据得到的数据可知，对于此次模拟中的肿瘤位置与大小而言，质子疗法的最佳能量在 75MeV，光子疗法的最佳能量则是 0.6MeV。质子射线疗法对比光子射线疗法，其对癌细胞的杀伤效率更高，但在实际临床医学中，还要考虑到质子束流与人体正常组织发生核反应的反应截面比光子大得多，因此具体使用哪种放射线进行治疗还需进一步平衡。

而对于 BNCT 这种新型疗法，它在患者的肿瘤细胞内富集一定浓度的 ^{10}B 原子，俘获中子释放次级射线，具有很高的肿瘤细胞杀灭效率。此外，这种疗法还使得放射线能量能控制在一个比较小的范围内，从而降低对患者正常细胞的损伤。因此，综合来看 BNCT 这种疗法先进性很高，发展前景是最好的。

Bibliography

- [1] 周永茂. 迈入新世纪的硼中子俘获疗法 (bnct). 中国工程科学, 14(8):4–13, 2012.
- [2] 童永彭王淼. 硼中子俘获治疗的进展及前景. 同位素, 33(1):14–26, 2020.