



## 快速获取碳离子束Bragg峰位的荧光探测器设计与验证

康宇杰 李亚洲 杨静芬 刘新国 戴中颖 贺鹏博 李强

### Design and Verification of Fluorescence Detector for Rapidly Acquiring the Bragg Peak Position of Carbon Ion Beam

KANG Yujie, LI Yazhou, YANG Jingfen, LIU Xinguo, DAI Zhongying, HE Pengbo, LI Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022128>

#### 引用格式:

康宇杰, 李亚洲, 杨静芬, 刘新国, 戴中颖, 贺鹏博, 李强. 快速获取碳离子束Bragg峰位的荧光探测器设计与验证[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(4):566–571. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022128

KANG Yujie, LI Yazhou, YANG Jingfen, LIU Xinguo, DAI Zhongying, HE Pengbo, LI Qiang. Design and Verification of Fluorescence Detector for Rapidly Acquiring the Bragg Peak Position of Carbon Ion Beam[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(4):566–571. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022128

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 碳离子束射程快速验证方法的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Study on the Method of Rapid Range Verification of Carbon Ion Beam

原子核物理评论. 2020, 37(4): 901–907 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019064>

#### 碳离子在不同材料叶片的多叶光栅上产生的次级粒子研究

Study on the Secondary Particles Produced in Different Material Leaves of Multi-leaf Collimator under Carbon Ion Irradiation

原子核物理评论. 2020, 37(2): 217–224 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019050>

#### 基于LNDM模型的碳离子束混合辐射场相同剂量平均LET下关键纳剂量学指标及RBE分析

Analysis on the Key Nanodosimetric Indexes and RBE in Mixed Carbon Ion-beam Irradiation Fields with the Same Dose-averaged LET Value on LNDM Model

原子核物理评论. 2021, 38(3): 332–338 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021013>

#### 新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Simulation on the Novel M-THGEM Detector

原子核物理评论. 2019, 36(1): 85–90 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.085>

#### 均匀磁场下碳离子笔形束的剂量变化分析及位置修正方法

Dose Variation Analysis and Position Correction Method for Carbon-ion Pencil Beams under Uniform Magnetic Fields

原子核物理评论. 2020, 37(1): 88–96 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019038>

#### 重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector

原子核物理评论. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

文章编号: 1007-4627(2023)04-0566-06

## 快速获取碳离子束 Bragg 峰位的荧光探测器设计与验证

康宇杰<sup>1,2</sup>, 李亚洲<sup>2,3,4,5</sup>, 杨静芬<sup>2,3,4,5</sup>, 刘新国<sup>2,3,4,5</sup>, 戴中颖<sup>2,3,4,5</sup>, 贺鹏博<sup>2,3,4,5</sup>, 李强<sup>2,3,4,5,†</sup>

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 中国科学院重离子束辐射生物学重点实验室, 兰州 730000;

4. 甘肃省重离子束辐射医学应用基础重点实验室, 兰州 730000;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 提出了一种用于快速获取碳离子束在闪烁体材料中 Bragg 峰位置的荧光探测器方案。该方案基于闪烁体在碳离子束流照射下发出荧光的特性, 使用 CMOS 相机在薄层闪烁体侧方获得荧光强度分布图像, 通过对图像的分析快速得到碳离子束 Bragg 峰位在闪烁体材料中的位置。依据该方案研发了荧光探测器, 在均匀照射野和笔形束两种照射条件下, 利用该探测器对不同能量的碳离子束进行了实验测量。实验结果表明, 可清晰地从探测器获得的荧光图像上观察到碳离子 Bragg 峰。同时, 采用蒙特卡罗模拟方法对上述相同的实验条件设置进行了模拟计算。结果发现, 荧光探测器测量的碳离子束在闪烁体材料中的 Bragg 峰位与蒙特卡罗模拟计算的结果由于模拟的条件和测量时探测器的实际设置不完全一致而出现一定的差异, 但不同照射条件下的差异是基本一致的。因此, 通过实验测量及蒙特卡罗模拟验证了本文方案的荧光探测器可用于快速获取碳离子束在闪烁体材料中的 Bragg 峰位, 为建立一种基于荧光探测器进行碳离子放疗束流性能快速质量测量的测量方法打下了坚实的基础。

**关键词:** 荧光探测器; Bragg 峰; 蒙特卡罗模拟; 碳离子放射治疗; 质量保证

中图分类号: O571.6

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022128

### 0 引言

目前, 临床上肿瘤治疗的方法主要包括手术、化学药物治疗、放射治疗(简称放疗)等治疗技术。随着技术的发展, 放疗朝着更加精准化的方向迈进, 并且在临床上的应用越来越广泛。碳离子放疗凭借其倒转的深度剂量分布和较高的相对生物学效应(RBE)等优势成为一种先进的肿瘤治疗方法<sup>[1]</sup>。

肿瘤放疗的根本目标在于给肿瘤区域足够且精确的治疗剂量, 同时保证周围正常组织和器官受到的照射量最少<sup>[2]</sup>。放疗的目标能否实现, 其关键在于治疗计划的精心设计和准确执行。放疗质量保证(QA)是指经过周密计划而采取的一系列必要措施, 保证放疗的整个过程中的各个环节按照国际标准准确安全地执行。

根据国家颁布的《质子和重离子加速器放射治疗

技术临床应用质量控制指标》, 在放疗质控工作中, 输出能量精度是重要的测量参数, 判断能量精度就是通过评估碳离子束在模体内 Bragg 峰深度是否正确。在碳离子放疗束流性能 QA 工作中, 通常使用电离室配合三维水箱探测碳离子束在水模体中的深度剂量分布。电离室配合三维水箱方法的优点在于测量用途广、测量精度高, 缺点在于使用繁琐、操作耗时。因此, 建立一种可以快速进行碳离子放疗束流 QA 的探测器是非常必要的。

本文提出一种利用闪烁体和 CMOS 相机耦合的荧光探测方案, 用于快速测量碳离子束在闪烁体材料中的 Bragg 峰位。完成探测器设计及研发后, 通过束流实验测量和蒙特卡罗模拟计算, 对比荧光探测器在碳离子均匀照射野和笔形束两种照射条件下的结果, 验证荧光探测器的性能。

收稿日期: 2022-12-12; 修改日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11875299); 中国科学院西部之光交叉团队-重点实验室合作研究专项(E023222Y); 甘肃省省级重点人才项目(E239223S)

作者简介: 康宇杰(1994-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 从事重离子束治疗技术基础研究; E-mail: kangyj20@lzu.edu.cn

† 通信作者: 李强, E-mail: liqiang@impcas.ac.cn

## 1 荧光探测器方案与材料选型

### 1.1 荧光探测器方案

闪烁体在碳离子束流照射下会发出荧光，荧光的强度与碳离子束在闪烁体材料中沉积的能量成一定的比例。使用 CMOS 相机记录闪烁体的荧光得到灰度图像，灰度图像上各像素点的灰度值与碳离子束在闪烁体材料上对应位置沉积的剂量成正比。据此，将薄层闪烁体与束流入射方向一致竖立放置，碳离子束流从闪烁体上方窄面入射，用 CMOS 相机在闪烁体侧面获取闪烁体发出的荧光，通过对灰度图像进行图像处理即可得到闪烁体材料在碳离子束流照射下的荧光强度分布。荧光探测器的设计方案如图 1 所示。

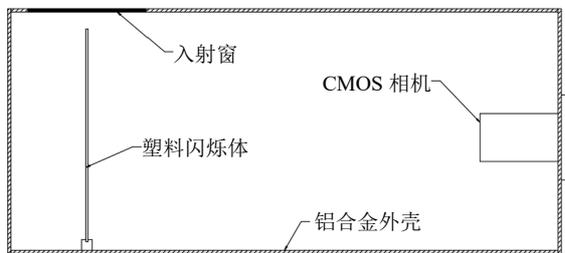


图 1 荧光探测器的设计方案

### 1.2 材料选型

对于本文提出的荧光探测器方案，材料选型的关键在于闪烁体和相机。

闪烁体种类繁多，依据材料类型可以分为无机闪烁体和有机闪烁体两种。无机闪烁体一般是指含有激活剂的无机盐晶体，特点是发光效率高、密度大、闪烁体衰减时间长。有机闪烁体通常是具有苯环结构的芳香族碳氢化合物，可以分为有机晶体闪烁体、有机液体闪烁体和塑料闪烁体三类。其发光机制主要由于分子本身从激发态回到基态的跃迁。有机闪烁体的特点是荧光效率相对较低，密度较小，闪烁衰减时间短。

依据荧光探测器的原理，在碳离子束照射期间要持续用 CMOS 相机记录闪烁体的荧光，所以荧光衰减时间短的塑料闪烁体更符合探测器方案的要求，因其短余晖的特性可以减少各次荧光之间的相互干扰。同时，塑料闪烁体具有更好的加工特性和水等效特性，一方面相比无机闪烁体有更好的强度，可以在竖立放置时保持平整；另一方面可以使用电离室配合三维水箱的测量方法进行对比验证。因此，本文选用型号为 EJ-212 的塑料闪烁体。

相机选型主要考虑合适的分辨率和较低的噪声。本文采用的是 Basler 公司的工业相机，型号是 acA1920-

40 gm，分辨率为  $1\ 920 \times 1\ 200$ 。这款相机可以保证获得的实验结果有良好的空间分辨率，并且噪声比较低，能够保证实验获取的图像质量较少地受到噪声的干扰。

依据上述材料选型和尺寸计算，搭建了荧光探测器。探测器主体是一个不透光的黑箱，内部放置 CMOS 相机以及闪烁体。黑箱内部喷涂超黑涂层材料，这种材料对可见光具有优良的吸收率，可以减少黑箱内部的杂散光，从而保证相机获取到的光信号仅来源于塑料闪烁体发出的荧光，不受到外界环境的影响。

## 2 束流实验

荧光探测器的实验测量在武威重离子中心的医用重离子加速器装置 (HIMM) 上进行。在 HIMM 装置 2 号治疗室经均匀扫描束流配送提供的均匀照射野和 1 号治疗室经点扫描束流配送系统提供的笔形束两种照射条件下<sup>[3]</sup>，对荧光探测器进行了测试。

### 2.1 均匀照射野实验

均匀照射野条件下可使用的碳离子束能量包括 190、260 和 330 MeV/u。实验中设置照射野的大小为  $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ ，束流入射位置处的照射剂量均为 1 Gy。相机的曝光时间设置为 1 s，增益设置为 100。荧光探测器在治疗床上摆好位置后，控制相机在束流照射期间按照预设好的条件持续获取图像。

在相机获取图像时，荧光图像的质量主要会受到两种类型噪声的影响。一类是暗噪声，这是因为相机本身由于电子的离散特性会导致统计涨落，会造成实验时成像芯片上各像素点的灰度值有一定的偏差；另一类是读出噪声，这是由于电路放大或数模转换导致的统计涨落，需要在图像处理时进行滤波处理减少这种类型噪声的影响。

荧光探测器获取的荧光图像使用 Matla 软件处理。实验时，首先在相同的相机设置下获取一张束流照射前的本底图像，然后在图像处理时先用探测器获取的一系列图像减去本底图像，再分别对每张图像做中值滤波处理。最后，将处理后的单张图像做灰度值的叠加就可以得到对应整个束流照射期间的闪烁体荧光图像。

### 2.2 笔形束照射实验

笔形束照射实验在 127.51 和 181.75 MeV/u 两个能量下进行，笔形束束斑的半高宽 (FWHM) 约为 1.25 cm，实验时通过设置电离室的计数 (MU) 来控制照射，MU 设置为 100 000，相机曝光时间设置为 1 s，增益设置为 100。图像获取、处理的流程和方法同均匀扫描照射野实验下的方法一致。

### 3 蒙特卡罗模拟

本文蒙特卡罗模拟采用基于 Geant4<sup>[4]</sup> 内核的 Gate (GEANT4 Application for Tomographic Emission) 软件<sup>[5]</sup>。模拟中的物理过程选择 QGSP\_BERT\_HP\_EMY 强子物理模拟包，研究对象是根据实际搭建的荧光探测器所建立的模型，如图 2 所示。

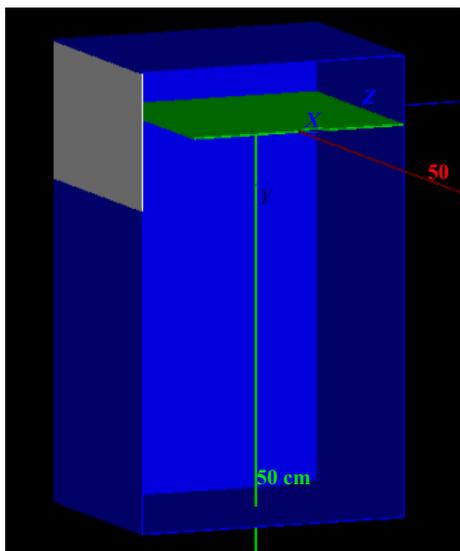


图 2 蒙特卡罗模拟荧光探测器模型 (在线彩图)

模拟均匀照射野条件下的实验时，分别设置射线源为 190, 260 和 330 MeV/u 的碳离子面源；模拟笔形束照射实验时，设置射线源为 127.51 和 181.75 MeV/u 的碳离子笔形束，由于蒙特卡罗模拟计算的统计误差与模拟粒子数的平方根成反比，为减小蒙特卡罗模拟的统计误差，粒子数设为  $1 \times 10^7$ 。闪烁体的材料设置与 EJ212 塑料闪烁体一致，设置为 97% 的聚苯乙烯 (polyvinyltoluene) 与 3% 的有机荧光物 (organic fluors) 的混合物，尺寸为  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$ ；探测器使用 DoseActor，将闪烁体分割为  $20 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm} \times 0.01 \text{ cm}$  的体素，统计碳离子束在闪烁体材料中不同深度位置的能量沉积。在塑料闪烁体模拟范围内粒子的“cuts”值设置为 0.1 mm，范围之外粒子的“cuts”值设置为 1 mm。使用服务器工作站上的 CPU (Intel® Xeon® CPU E5-2690 V3 @2.60 GHz×48, OS: Scientific Linux release 7.6) 进行模拟计算。

### 4 结果与讨论

#### 4.1 荧光探测器实验结果

均匀照射野条件下，在 190, 260 和 330 MeV/u 三个能量下使用荧光探测器获取的灰度图像如图 3 所示。从图中可以明显看到，图像中灰度值沿着束流照射方向呈

现变大的趋势，在某一位置达到最大，并在之后骤然变小，这与碳离子束的 Bragg 峰特性相吻合。并且随着能量的增大，可以看到 Bragg 峰位的深度位置也随之增加。但是，由于碳离子束照射野比较大，闪烁体在安装时也不可避免地会有一些的不平整，导致在 Bragg 峰之后的部分也有一定的荧光。

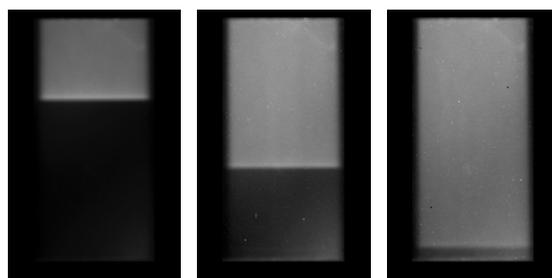


图 3 均匀照射野荧光探测器获取的图像，从左往右依次对应能量 190, 260 和 330 MeV/u

笔形束照射条件下，在 127.51 和 181.75 MeV/u 两个能量下使用荧光探测器获取的图像如图 4 所示。从图中可以看到，在笔形束照射条件下同样能够看到明显的 Bragg 峰，并且 Bragg 峰位的深度随着能量增大而增加。同时，在笔形束照射条件下 Bragg 峰之后的荧光现象也随着能量的增加而增强，这同样是由于闪烁体安装不平整的问题所导致。需要在后续的工作中对荧光探测器的设置加以改进。

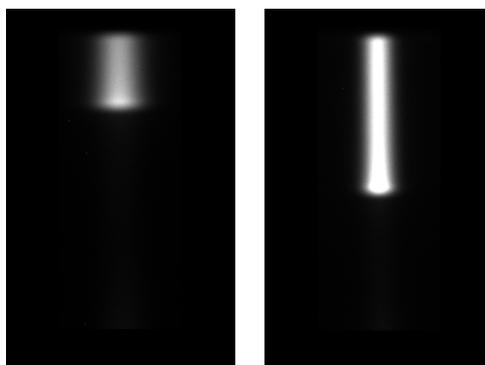


图 4 笔形束照射荧光探测器获取的图像，从左往右依次对应能量 127.51 和 181.75 MeV/u

综合均匀照射野和笔形束照射两种照射条件下的实验结果来看，荧光探测器获取的荧光图像可以在两种照射条件下均能观察到明显的 Bragg 峰位置，而且能够观察到 Bragg 峰位随着束流能量的增大而深度增加。尽管由于闪烁体的平整问题使得图像存在 Bragg 峰之后的荧光现象，但这并不会影响对 Bragg 峰位置的判断。

#### 4.2 蒙特卡罗模拟结果

使用 Gate 软件对探测器束流实验情形进行了蒙特卡罗模拟，得到了在均匀照射野和笔形束照射两种照射

条件下，不同能量的碳离子束在闪烁体材料中的深度剂量分布。均匀照射野条件下不同能量的碳离子束在闪烁体材料中的深度剂量分布如图 5 所示。通过计算，荧光探测器测量和蒙特卡罗模拟计算得到的碳离子束 Bragg 峰位深度的结果对比如表 1 所列。在均匀照射野条件下，随着碳离子束能量的增加，Bragg 峰在闪烁体材料中的位置不断增加。但是，对于不同能量的碳离子束，使用荧光探测器测量的结果和蒙特卡罗模拟的结果有 1.25 cm 左右的偏差。

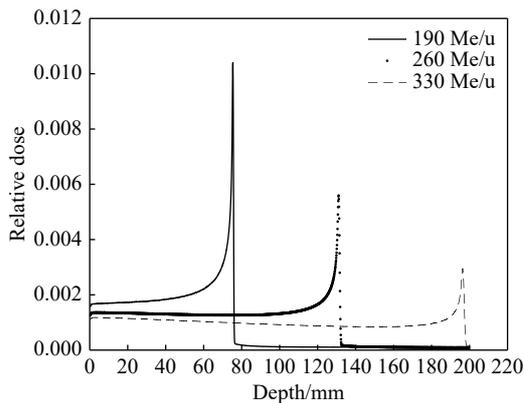


图 5 蒙特卡罗模拟均匀照射野条件下碳离子束在闪烁体材料中的深度剂量分布

表 1 均匀照射野条件下荧光探测器测量与蒙特卡罗模拟计算的碳离子束 Bragg 峰位深度对比

能量/(MeV·u <sup>-1</sup> )	荧光探测器测量/cm	蒙特卡罗模拟计算/cm	差值/cm
190	6.28	7.53	1.25
260	11.86	13.12	1.26
330	18.39	19.68	1.25

笔形束照射条件下不同能量碳离子束在闪烁体材料中的深度剂量分布如图 6 所示。通过计算，荧光探测器测量和蒙特卡罗模拟计算得到的碳离子束 Bragg 峰位深度的结果对比如表 2 所列。在笔形束照射条件下，随着

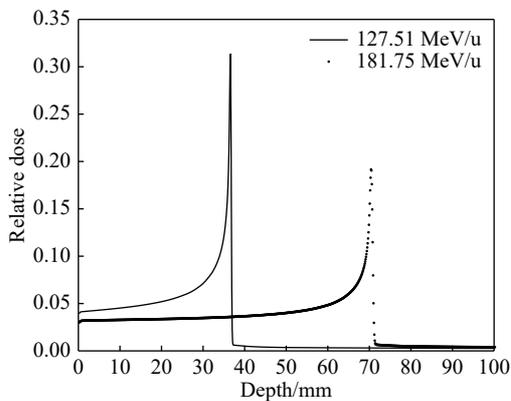


图 6 蒙特卡罗模拟笔形束照射条件下碳离子束在闪烁体材料中的深度剂量分布

碳离子束能量的增加，Bragg 峰在闪烁体材料中的位置也是增加。但是，对于不同能量的碳离子束，使用荧光探测器测量的结果和蒙特卡罗模拟的结果同样有 1.25 cm 左右的偏差。

表 2 笔形束照射下荧光探测器测量与蒙特卡罗模拟计算的碳离子束 Bragg 峰位深度对比

能量/(MeV·u <sup>-1</sup> )	荧光探测器测量/cm	蒙特卡罗模拟计算/cm	差值/cm
127.51	2.40	3.65	1.25
181.75	5.79	7.03	1.24

### 4.3 讨论

荧光探测器在在均匀照射野和笔形束两种照射条件下的实验结果表明，利用本文提出的方案可以从荧光图像上明显观察到碳离子束在闪烁体材料中的 Bragg 峰位位置，并且可以观察到 Bragg 峰位位置随着入射能量的变化而变化，这是符合理论预期的。在实验过程中也发现，由于闪烁体安装的不平整导致 Bragg 峰之后还有明显的荧光现象，这是需要在后续工作中加以改进的。为了评价荧光探测器测量结果的准确性，使用蒙特卡罗模拟方法计算了相同照射条件下碳离子束在塑料闪烁体材料中的深度剂量分布。通过对比荧光探测器测量和蒙特卡罗模拟的结果发现，在均匀照射野和笔形束两种照射条件下，使用荧光探测器测量的碳离子束在闪烁体材料中的 Bragg 峰位与蒙特卡罗模拟计算得到的结果均相差约 1.25 cm，可能的原因包括以下三种：

1) 在实际的碳离子束配送过程中，束流在到达探测器前会经过一些其他的设备，在此过程中会有一些的能损，这就导致实验时的束流能量相比蒙特卡罗模拟中设置的束流能量偏小，使得荧光探测器测量的碳离子束在闪烁体材料中的 Bragg 峰位小于蒙特卡罗模拟计算的结果。经过实际测量，使用三维水箱配合电离室测量的碳离子束在水中的射程比蒙特卡罗模拟的结果要小 0.9 cm 左右；2) 碳离子束是高 LET 射线，塑料闪烁体在碳离子束照射下的荧光会受到荧光淬灭效应<sup>[6]</sup>的影响，这会导致荧光探测器的测量结果有一定的失真，使得 Bragg 峰位计算时出现一定的偏差；3) 塑料闪烁体成像时，单个点发出的荧光不会只集中在该点的位置。事实上，它发出的荧光在中央部位亮度最高，周围亮度随着距离递减。这样的话，单个点发出的荧光实际上会影响到周围其他点的荧光。这种扩散效应会使得最终获得的荧光图像的空间分辨率变差。这种现象会导致对荧光探测器测量结果的图像做处理时存在一定的误差。但这一恒定的差异说明，利用本文荧光探测器方案快速获得碳离子束流 Bragg 峰位位置进行碳离子放疗束流性能的

QA 是可行的,因为在每日 QA 当中只需获得束流 Bragg 峰位的相对位置,确定该位置的重复性。

## 5 结论

本文提出了一种利用射线作用下闪烁体产生的荧光快速测量碳离子束在闪烁材料中 Bragg 峰位的方法,并按照此方法完成闪烁体选型、尺寸计算以及荧光探测器搭建等工作。并使用该荧光探测器在均匀照射野和笔形束两种照射条件下完成了实验测量,在不同的束流条件下都观测到了明显的 Bragg 峰位置。同时,使用蒙特卡罗模拟软件 Gate 模拟计算了同样的条件下碳离子束在闪烁体材料中的深度剂量分布。对比实验测量和蒙特卡罗模拟计算结果发现,在均匀照射野和笔形束两种照射条件、不同束流能量下,实验测量与模拟计算得到的碳离子束 Bragg 峰位在闪烁体中深度位置的差值在 1.25 cm 左右。考虑到实验测量时的束流条件与蒙特卡罗模拟时的束流条件设置存在一定的差别,可以认为利用荧光探测器测量碳离子束在闪烁体材料中的 Bragg 峰位位置具

有准确性和稳定性。再结合荧光探测器能够快速获取图像,同时图像处理软件可快速进行图像分析的特点,将本文基于荧光探测器的方法发展成为一种碳离子放疗中束流性能 QA 的工具具有很好的前景。

### 参考文献:

- [1] XIAO Guoqing, LI Qiang, ZHANG Xiaoqi, et al. *Science & Technology for Development*, 2020, 16(1): 9. (in Chinese)  
(肖国青, 李强, 张小奇, 等. 科技促进发展, 2020, 16(1): 9.)
- [2] DENG Xiaowu. *China Cancer*, 2008(8): 660. (in Chinese)  
(邓小武. 中国肿瘤, 2008(8): 660.)
- [3] DAI Zhongying, LI Qiang, XIAO Guoqing, et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2007(7): 655.  
(戴中颖, 李强, 肖国青, 等. 高能物理与核物理, 2007(7): 655.)
- [4] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 835: 186.
- [5] VISVIKIS D, BARDIES M, CHIAVASSA S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2006, 569: 335.
- [6] WANG L L, PERLES L A, ARCHAMBAULT L, et al. *Phys Med Biol*, 2012, 57(23): 7767.

## Design and Verification of Fluorescence Detector for Rapidly Acquiring the Bragg Peak Position of Carbon Ion Beam

KANG Yujie<sup>1,2</sup>, LI Yazhou<sup>2,3,4,5</sup>, YANG Jingfen<sup>2,3,4,5</sup>, LIU Xinguo<sup>2,3,4,5</sup>, DAI Zhongying<sup>2,3,4,5</sup>, HE Pengbo<sup>2,3,4,5</sup>, LI Qiang<sup>2,3,4,5,†</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Key Laboratory of Heavy Ion Radiation Biology and Medicine of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. Key Laboratory of Basic Research on Heavy Ion Radiation Application in Medicine, Gansu Province, Lanzhou 730000, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A design scheme of fluorescence detector was proposed for rapidly acquiring the Bragg peak position of carbon ion beam in scintillator material. Based on the characteristic of scintillator emitting fluorescence under the irradiation of carbon ion beam, CMOS camera is applied to acquire the image of fluorescent intensity distribution on the side of a thin scintillator, and then the Bragg peak position of carbon ion beam in the scintillator material is quickly obtained by analyzing the fluorescent image. According to the scheme, a fluorescence detector was developed and then used for experimental measurement under the irradiation of carbon-ion uniform fields and pencil beams with different energies. The experimental results showed that the Bragg peak position of the carbon ion beams could be clearly observed from the fluorescent image obtained by the detector. Moreover, the method of Monte Carlo simulation was used to calculate the depth dose distribution of carbon ion beams under the experimental conditions mentioned above. It was found that there was a penetration depth difference between the measured and calculated Bragg peak positions of carbon ion beam in the scintillator material by the fluorescence detector and the Monte Carlo simulation due to the difference between their settings, but the differences under the various irradiation conditions were nearly the same. Therefore, the experimental measurements and Monte Carlo simulations verified that the fluorescence detector scheme could be used for quickly acquiring the Bragg peak position of carbon ion beam in the scintillator material definitely, which provides a substantial basis for establishing a fast fluorescence detector-based quality assurance measurement method in carbon ion radiotherapy.

**Key words:** fluorescent detector; Bragg peak; Monte Carlo simulation; carbon ion therapy; quality assurance

---

**Received date:** 12 Dec. 2022; **Revised date:** 28 Feb. 2023

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11875299); Western Talents Program of Chinese Academy of Sciences (E023222Y); Gansu Provincial Key Talents Project(E239223S)

† **Corresponding author:** LI Qiang, E-mail: [liqiang@impcas.ac.cn](mailto:liqiang@impcas.ac.cn)