

重离子 Bragg 峰的研究及其应用*

李 强 卫增泉 党秉荣 李文健

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1996-04-19 收稿

摘 要

实验测定了由 HIRFL 引出的 25、30MeV/u⁴⁰Ar 离子经不同厚度降能片后的相对电离(Bragg 曲线),并将实验结果同 TRIM88 程序的计算结果进行了比较,发现⁴⁰Ar 离子贯穿深度较浅时,实验结果与程序计算符合很好.并对中能重离子在水中贯穿深度与相对电离关系的计算,提出了一种对浅层且体积不大肿瘤的重离子治疗方案.

关键词 重离子, Bragg 峰, 相对电离.

1 引 言

与传统放射治疗相比,重离子($Z > 4$)放射治疗的优势之一体现在它的能量沉积上,即深度剂量分布上^[1],重离子束沿其径迹的能量沉积出现了 Bragg 峰,坪区与峰区的传能线密度(LET)显著不同,因此可利用 Bragg 峰区高的 LET 值来施于肿瘤所在的病灶,局部高效地杀死癌细胞,而在此区域之外的健康组织受损较小.为了进行放射治疗和确定治疗剂量,需要对重离子 Bragg 峰的位置以及峰区与坪区生物效应的比较等做详尽的研究.本文利用中国科学院近代物理研究所兰州重离子研究装置(HIRFL)提供的 25、30MeV / u⁴⁰Ar 离子和自行设计的无壁正比计数器系统,测定了它们经不同厚度的 Mylar 膜降能片后的相对电离(即 Bragg 曲线),确定了对应于这两种能量离子的 Bragg 峰位.由于人体内水分约占体重的 70% 以上,为模拟重离子在人体组织内的能量沉积,将实验结果转化为以等效组织——水作介质的离子贯穿深度与相对电离之间的关系,并同 TRIM88 程序的计算结果进行了比较,讨论了 Bragg 峰特性在放射治疗中的应用.

2 实验原理与装置简介

实验装置如图 1 所示.由 HIRFL 引出的 25、30MeV / u⁴⁰Ar 离子经过 20 μ m 厚的 Ni

* 国家科委攀登计划(B)项目.

窗、空气隙以及用于剂量监测的自由空气电离室 D_1 后, 能量降为 20.72、26.6 MeV / u. 电离室 D_1 与 Ni 窗之间有 7mm 的空气隙, 电离室 D_1 的每个电极面均为 10 μ m 厚的 Mylar 膜, 其上蒸有 100 μ g / cm² 左右的金, 极间距离为 3mm. F 为可添加不同厚度 Mylar 膜的吸收体, 作降能使用, 圆柱形无壁正比计数器 D_2 充有稀薄的 P10 气体 (CH₄ 10% +

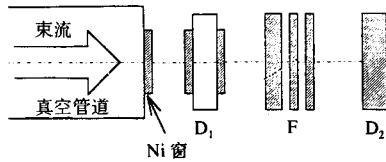


图 1 实验装置简图

D_1 为自由空气电离室, D_2 为无壁正比计数器, F 为降能片.

Ar90%), 气压为 5mbar, 计数器灵敏体积为直径 ϕ 5cm、高 5cm 的圆柱形, 阳极为 ϕ 10 μ m 不锈钢丝, ϕ 0.3mm 的 12 根不锈钢丝均匀分布在圆柱形计数器两底面的圆周上作为阴极, 该计数器阳极输出的能量沉积脉冲信号经前置放大器、主放大器后输入到多道分析器, 得到能量沉积谱. 由于离子的能量沉积正比于离子的能量损失, 即由离子及次级电子引起的电离, 若选定某一入射能量为

参考点, 那么其它能量入射离子的能损或引起的电离数与该能量下离子的能损之比(称相对能量损失)或引起的电离数之比(相对电离)就等于相应入射能量下的能量沉积之比.

本实验中离子贯穿的无壁计数器灵敏体积保持不变, 因而离子的能量沉积就正比于能量损失率, 同样地, 选定某一入射能量为参考点, 其它能量入射离子的能损率与该能量下离子的能损率之比(称相对能损率)就等于相应入射能量下的能量沉积之比. 实际上, 本实验就是通过测定能量沉积来确定能损与能损率的. 通过调节图 1F 中的 Mylar 膜的厚度来改变入射到计数器 D_2 中的离子能量.

3 实验结果、程序计算和讨论

实验中分别取由计数器 D_2 探测到的 20.72、24.08 MeV / u⁴⁰Ar 离子的能量沉积作为参考值, 调节降能片(图 1F 中的 Mylar 膜)厚度来模拟入射离子在吸收体内贯穿一定深度后的能量, 这时测得的能量沉积与参考值之比即为本实验结果——相对电离. 表 1、2 分别为 20.72、24.08 MeV / u⁴⁰Ar 离子的实验结果, 其相对误差为 11%. 本文将表中 Mylar 膜降能片的厚度等效到了离子在水中的贯穿深度(结果分别如图 2 所示). 需指出的是, 计数器 D_2 在测 26.6 MeV / u⁴⁰Ar 离子时, 其灵敏体积偏离了束流线, 因而次级电子并未

表 1 20.72 MeV / u⁴⁰ Ar 离子相对电离随吸收体厚度的变化

| 降能片厚度 (μ m) | 相对电离 I/I_0 | 水中的等效贯穿深度 d (μ m) |
|------------------|--------------|--------------------------|
| 0 | 1.00 | 0 |
| 100 | 1.11 | 126.0 |
| 200 | 1.25 | 260.0 |
| 300 | 1.52 | 388.0 |
| 400 | 1.92 | 507.0 |
| 500 | 3.89 | 647.5 |
| 510 | 1.03 | 648.3 |

表 2 24.08MeV/u⁴⁰Ar 离子相对电离随吸收体厚度的变化

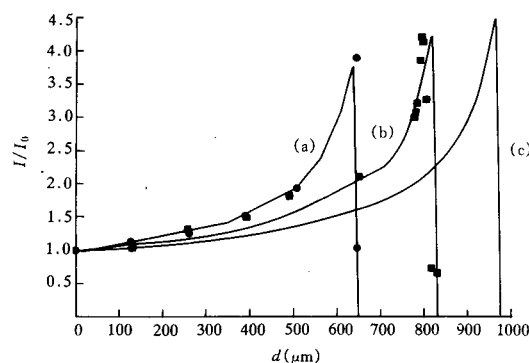
| 降能片厚度(μm) | 相对电离 I/I ₀ | 水中的等效贯穿深度 d(μm) |
|-----------|-----------------------|-----------------|
| 0 | 1.00 | 0 |
| 100 | 1.04 | 130 |
| 200 | 1.29 | 257 |
| 300 | 1.50 | 390 |
| 400 | 1.81 | 491 |
| 500 | 2.10 | 652 |
| 600 | 3.00 | 779 |
| 603 | 3.07 | 783 |
| 606 | 3.20 | 787 |
| 609 | 3.85 | 794 |
| 612 | 4.19 | 795 |
| 615 | 4.13 | 799 |
| 620 | 3.25 | 805 |
| 630 | 0.72 | 818 |
| 640 | 0.65 | 831 |

完全收集, 通过反推修正, 实测得到的相对电离为能量 24.08MeV / u 的⁴⁰Ar 离子所致.

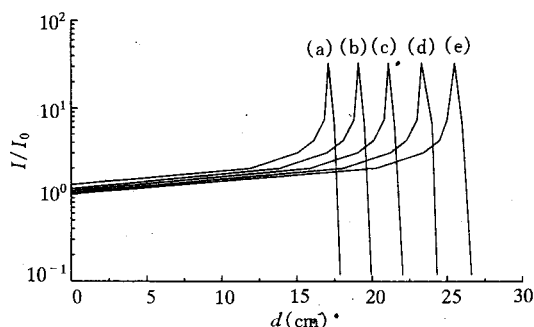
为了与实验结果进行比较, 本文用 TRIM88 程序分别计算了 20.72、24.08、26.6MeV / u⁴⁰Ar 离子在水中不同贯穿深度上的能量损失率 (TRIM88 程序不考虑离子核反应的损失), 将 20.72、24.08MeV / u⁴⁰Ar 离子的能量损失率作参考值, 由其它贯穿深度上的能量损失率与参考值之比, 得到了由程序计算的相对电离曲线 (Bragg 曲线), 分别如图 2 中的实线所示. 可以看到⁴⁰Ar 离子能量较高时,

实验测量结果与程序计算结果符合很好, 而在 Bragg 峰区, 实验值与计算值发生了较明显的偏离. 本文认为, 这可能是由于随着降能片厚度的增加离子经降能片后的能量歧离增大以及离子在降能片中的多重散射而偏离原入射方向等因素造成.

目前限于 HIRFL 所加速离子的能量, 本文用 TRIM88 程序计算了中能 100、95、90、85、80MeV / u¹²C 离子在水中贯穿深度与相对电离之间的关系, 如图 3 所示. 可以看到对于每一种能量的离子, 其 Bragg 峰都是很窄的, 这也可以从上面的实验结果得知. 假如混合上述 5 种能量的离子束照射靶体积, 这时离子的贯

图 2 3 种能量⁴⁰Ar 离子在水中的 Bragg 曲线

(a) 20.72MeV / u, (b) 24.08MeV / u, (c) 26.6MeV / u.
实线为 TRIM88 程序的结果, ●和 ■分别为 20.72、24.08MeV / u⁴⁰Ar 离子的实验结果.

图3 5种能量 ^{12}C 离子的 Bragg 曲线

(a) 80MeV/u, (b) 85MeV/u, (c) 90MeV/u,
(d) 95MeV/u, (e) 100MeV/u.

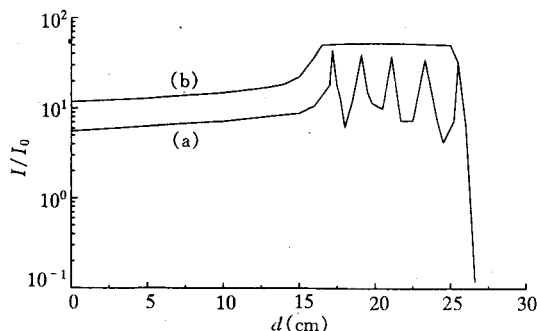


图4

(a) 5种能量 ^{12}C 离子叠加的 Bragg 曲线;
(b) 能量从100MeV/u到80MeV/u连续
变化的 ^{12}C 离子照射靶时的 Bragg 曲线.

穿深度与相对电离之间的关系如图4(a)所示. 为了加宽 Bragg 峰区, 使得峰区内的剂量分布达到均匀, 就需能量连续变化的离子束照射靶体积, 这可用波浪形能量调制器来实现. 波浪形能量调制器垂直于束流方向均匀移动, 这时 100MeV/u ^{12}C 离子照射靶体积, 各贯穿深度上的相对电离情况如图4(b)所示, Bragg 峰的宽度加大到约 10mm 左右. 波浪形能量调制器如图6所示. 实际上, 位于展宽的 Bragg 峰区内的癌组织不仅受到重离子的电离辐射损伤, 而且还受到离子质量沉积效应的作用, 并且离子质量沉积损伤是不易修复的, 故加剧了对肿瘤部位癌细胞的致死作用, 更加有利于重离子放射治疗. 根据浅层肿瘤本体的厚度, 可设计不同高度波峰的波浪形能量调制器来达到对某种能量入射离子 Bragg 峰不同程度的展宽, 使得受照肿瘤体积完全处于展宽的 Bragg 峰区域, 这样可使照射时间缩短, 对健康组织的危害减小, 达到既有效杀死癌细胞, 又充分保护周围健康组织的目的. 需指出的是, 人体结构多层、多相, 极为复杂, 不同组织器官的成份及密度均不相同, 因而本文 TRIM88 程序对水中 Bragg 曲线的计算也仅供参考, 针对实际治疗时所需照射的组织, 需要对重离子的 Bragg 曲线加以修正.

4 结 束 语

目前由于 HIRFL 加速离子的能量有限, 暂且只能提出对浅层且体积不大的肿瘤进行重离子放射治疗的方案, 拟采取的实验装置简图如图5所示. 电离室 D_1 用于束流监测和

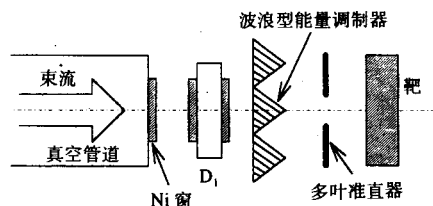


图5 一个为将来重离子治癌研究而设计的实验装置简图

剂量控制, 为充分利用重离子 Bragg 峰的特性, 波浪形能量调制器配合以多叶准直器对浅层肿瘤进行重离子放射治疗不失为一种较佳方案. 进一步的研究正在进行之中.

参 考 文 献

[1] 卫增泉, 核物理动态, 11(1994)44.

Investigation and Application of Heavy Ion Bragg Peak

Li Qiang Wei Zengquan Dang Bingrong Li Wenjian

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Received 19 April 1996

Abstract

Relative ionizations (Bragg curves) of 30MeV/u and 25MeV/u ^{40}Ar ion beams supplied by HIRFL through degraders of Mylar films with different thicknesses were measured respectively. The experimental results were compared with calculations by TRIM88 code. It is found that the experimental results are in good agreement with the calculated ones when the ^{40}Ar ions penetrate a smaller distance from target surface. Furthermore, a heavy ion radiotherapy planning for shallow-seated and small tumor is put forward according to the calculated relationship between intermediate energy heavy ion penetration depth in water and relative ionization.

Key words heavy ion, Bragg peak, relative ionization.