

研究简报

# 在磁场中的高能电子束用于放射治疗

谭 伦 昌\*

## 摘 要

当在辐照部位附加一适宜磁场时,粗略估计表明能量约为50兆电子伏的电子束能在组织中产生类似 $\pi^-$ 介子的物理剂量分布,因而有助于深部肿瘤的治疗.

通常,在放射治疗中并不推荐使用能量高于30兆电子伏的电子束<sup>[1]</sup>,这是因为在更高能量下增加的韧致辐射产生将导致电子束的剂量-深度曲线下降平缓,从而减低了临床价值.能否利用外加磁场的约束作用来改变组织中电子束的剂量分布,使得更高能量的电子束能用于更深部肿瘤的治疗呢?对此我们将据已知的实验资料作如下的粗略估计.

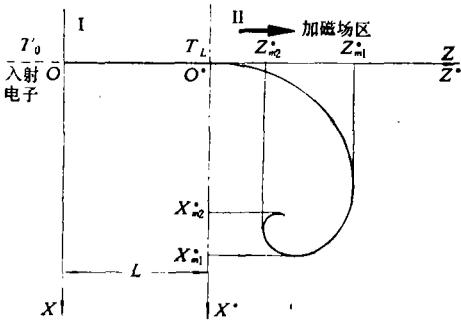


图 1

图1是我们所讨论的一种简化情况,假定从水模的L深处开始加垂直于图面的磁场,坐标系I、II的原点分别在O及O\*,在II中计算量以\*号标明.无场区的电子可认为沿Z向运动(事实上,如电子运动方向与Z向

间夹角为 $\theta$ ,对初始动能 $T_0$ 为20兆电子伏的电子来说,在 $L = 0.4R_0$ ( $R_0$ 是 $T_0$ 电子的外推射程)处 $\langle 1 - \cos\theta \rangle_{平均}$ 已小于0.1<sup>[2]</sup>),进入有场区时电子的动能为 $T_L$ ,我们将先不计散射影响而估计有场区的电子轨迹如下:

1. 电子的外推射程 $R$ (克/厘米<sup>2</sup>)和动能 $T$ (兆电子伏)间满足<sup>[3]</sup>

$$\alpha R = \beta T - \delta \tag{1}$$

关系,对水来说 $\alpha = 0.577, \beta = 0.285, \delta = 0.137$ . (1)式给出的 $dT/dR = 2.0$ 兆电子伏·厘米<sup>2</sup>/克,合于兆电子伏能区电子的碰撞电离损失,故随后我们将认为 $R$ 也表示低能(例如 $T \leq 20$ 兆电子伏)电子的实际轨迹长度.

2. 动量为 $P$ (兆电子伏/ $c, c$ 为光速)的电子在场强为 $H$ (千高斯)的磁场中,运动轨迹的曲率半径 $\rho$ (厘米) =  $Pc/(0.3H)$ . 由于在 $T \gg m_0c^2$ ( $m_0$ 为电子的静质量)时 $Pc = T +$

本文1978年12月7日收到.

\* 作者原在中国科学院高能物理研究所工作.

$m_0c^2$ , 如取 II 中计算的轨迹长度  $S^* = R_L - R$  为变量时有

$$\frac{1}{\rho} = \frac{0.3H}{\frac{\alpha}{\beta}(R_L - S^*) + \frac{\delta}{\beta} + m_0c^2}, \quad (2)$$

而电子的轨迹方程为<sup>[4]</sup>

$$Z^* = \int_0^{S^*} \cos[F(S)]dS, \quad X^* = \int_0^{S^*} \sin[F(S)]dS, \quad (3)$$

$$\text{式中 } F(S) = \int_0^S \frac{dS^*}{\rho} = 0.3 \frac{\beta}{\alpha} H \ln \left( 1 + \frac{S}{R_L + \frac{\delta}{\alpha} + \frac{\beta}{\alpha} m_0c^2 - S} \right).$$

3. 据 (3) 式可得电子在  $Z$ 、 $X$  向上的极值  $Z_{m1}^*$ 、 $Z_{m2}^*$ ...、 $X_{m1}^*$ 、 $X_{m2}^*$ ...。其中  $Z_{m1}^*$  及  $X_{m1}^*$  分别表示电子在相应方向上的极大穿透深度, 它们所对应的  $S^*$  是

$$S_{Z_{m1}^*}^* = \left( R_L + \frac{\delta}{\alpha} + \frac{\beta}{\alpha} m_0c^2 \right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi\alpha}{0.6\beta H}\right) \right], \quad (4)$$

$$S_{X_{m1}^*}^* = \left( R_L + \frac{\delta}{\alpha} + \frac{\beta}{\alpha} m_0c^2 \right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi\alpha}{0.3\beta H}\right) \right], \quad (5)$$

$Z_{m1}^*$ 、 $X_{m1}^*$  随  $T_L$ 、 $H$  的变化见图 2。

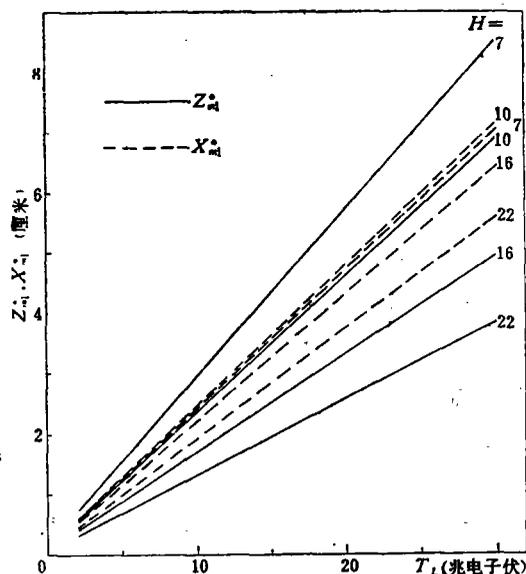


图 2 电子在  $Z^*$  和  $X^*$  向上的极大穿透深度  $Z_{m1}^*$  和  $X_{m1}^*$ , 图中  $H$  单位为千高斯

## 二、

一般用电磁铁所能获得的最大合理场强  $H=16$  千高斯, 进一步我们将以此  $H$  为例来估计在有场区中电子束的剂量分布。

1. 在  $L$  深处电子束的理论能谱形式为<sup>[2]</sup>

$$I(L, T_L) = I_0(x, t) \left( \frac{dT_L}{dt} \right)^{-1},$$

式中  $x = L/R_0, t = R/R_0$ ,  $I_0(x, t)$  还和参数  $d, A$  有关但  $d, A$  随  $T_L$  的变化不大<sup>[2]</sup>, 如果忽略这种变化而认为  $I_0$  仅为无量纲变量  $x, t$  的函数, 根据比例关系就易从  $T_{01}$  的实验能谱  $I(L_1, T_{L1})$ <sup>[5]</sup> 外推  $T_{02}$  的能谱  $I(L_2, T_{L2})$ ,

$$\left. \begin{aligned} I(L_2, T_{L2}) &= I(L_1, T_{L1}) \frac{R_{01}}{R_{02}}, \quad L_1 = L_2 \frac{R_{01}}{R_{02}}, \\ T_{L1} &= T_{L2} \frac{T_{01}}{T_{02}} + \left(1 - \frac{T_{01}}{T_{02}}\right) \frac{\delta}{\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中  $R_0$  的足标与  $T_0$  的对应, 图3是外推能谱一例。

2. 自然电子还经受强烈的散射, 真实运动情况远较上述估计复杂, 不过上述轨迹分析毕竟给出了有关电子电离区域的若干提示, 使得我们对进入有场区时动能为  $T_L$  的电子 (参考图1) 可粗略假定其  $Z$  向电离分布为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dD_{T_L}}{dZ^*} &= C, & (Z^* < Z_{m2}^*) \\ \frac{dD_{T_L}}{dZ^*} &= C \frac{R_L - Z_{m2}^*}{Z_{m1}^* - Z_{m2}^*}, & (Z_{m2}^* < Z^* < Z_{m1}^*) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

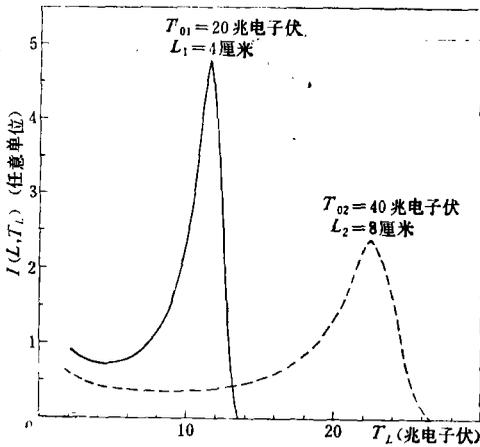


图3 由  $T_{01} = 20$  兆电子伏的实验能谱<sup>[5]</sup> 外推  $T_{02} = 40$  兆电子伏的电子能谱

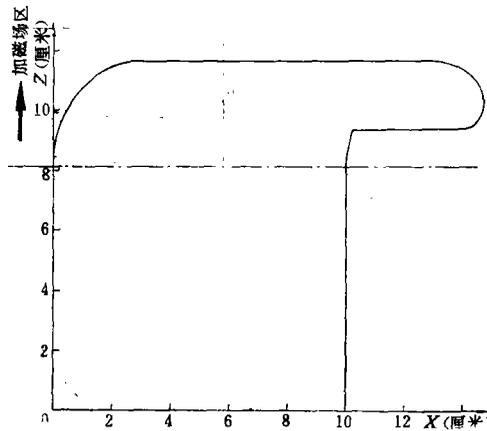


图4 当  $T_0 = 40$  兆电子伏,  $L = 8$  厘米时  $I(L, T_L)$  能谱峰值能量的电子轨迹包络线

式中  $C$  为常数。

3. 而有场区电子束的  $Z$  向电离分布最终为

$$\frac{dD}{dZ^*} = \int_0^\infty I(L, T_L) \frac{dD_{T_L}}{dZ^*} dT_L, \quad (8)$$

如未加磁场时束的  $Z$  向剂量为  $dD_0/dZ$ , 横向扩展系数(下详)为  $K$ , 由归一化要求

$$\int_0^\infty \frac{dD}{dZ^*} dZ^* = \frac{1}{K} \int_L^\infty \frac{dD_0}{dZ} dZ$$

确定  $C$  后,  $dD/dZ^*$  即表示在有场区中电子束的  $Z$  向剂量。

4. 但是, 以上所述仅一维情况, 而实际束的  $X$  向宽度总是有限的, 此时由于在磁场中电子  $X$  向运动分量的出现将引起此向束宽的增加, 我们将以横向扩展系数  $K$  来描述这种

增加, 并取具有  $I(L, T_L)$  能谱峰值能量的电子轨迹包络线(图 4)来粗略地估计它们。

最终, 对  $T_0 = 40$  兆电子伏、宽度为 10 厘米的电子束, 从  $L = 8$  厘米起加  $H = 16$  千高斯磁场后估计所得  $Z$  向剂量分布见图 5, 它具有  $\pi^-$  介子剂量分布的基本特点, 改变  $T_0$ 、 $L$  及  $H$  易于调节剂量峰的位置及宽度。

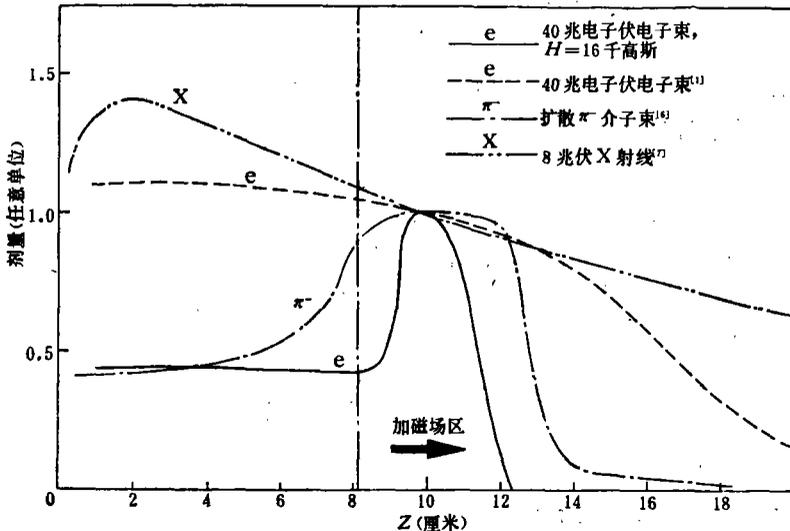


图 5 不同粒子束在体模中的剂量—深度关系, 为比较计归— $Z = 10$  厘米的剂量值, 照射野  $10 \times 10$  厘米<sup>2</sup>

### 三、

需要说明的是:

1. 在组织中停止电子的能量转变为韧致辐射 X 射线的份额约为电子动能(兆电子伏)的数值除以 200<sup>[12]</sup>, 因此对低能(例如  $T_0 \leq 20$  兆电子伏)电子来说我们仅考虑了其碰撞电离损失。

2. 更高能量电子所产生的韧致辐射 X 射线在组织中穿透能力很强, 它们大部分(约为 3/4<sup>[12]</sup>)会逸出人体, 余下小部分则在体内形成弥散分布的剂量, 实际影响并不严重。

3. 在磁场中电子束的 X 向运动分量会导致“钩状”剂量分布的出现(图 4), 这或者是有益的(如辐照敏感器官背后的肿瘤), 或者是易于修正的(如将电子束分为两个子束, 分别取相反磁场方向辐照, 两者叠加即得矩形剂量分布)。

4. 为计算简化计, 本文仅讨论了一种从无场区向有场区尖锐过渡的磁场轮廓。不过由于入射初始阶段电子动量高, 在磁场中偏转难, 因此即便实际磁场有另外的轮廓(如具有一定宽度的过渡区域), 本文的基本物理结论仍可能保持。

人体是能够透过恒磁场的(顺便说一句, 作者和他的同事们曾长期在云南宇宙线观测站的大磁场中工作过而无不适之感), 如果也能无畸变地透过低频交变磁场的话, 考虑到通常电子加速器总是在脉冲状态下工作的, 自然也可采用低频交变或脉冲磁场以有助于

磁场轮廓的改善和功率耗损的降低。

#### 四、

应该指出,即便在进入了所谓“高 LET 粒子治疗时代”的今天,单纯改善物理剂量分布仍不失其意义,原因是

1. 单纯改善物理剂量分布已经带来了若干种类癌症(如前列腺癌)治疗率的提高<sup>[8]</sup>。
2. 正常组织的辐射损伤依赖于辐照体积的大小<sup>[8]</sup>,不同器官又有相当大的耐受剂量差别<sup>[9]</sup>。
3. 最近的实验结果表明<sup>[10]</sup>, $\pi^-$ 介子束 10 厘米扩散峰的生物效应是令人失望的,它所持有的主要也是物理剂量分布的优点了。

本文是作者在上海市肿瘤医院工作期间完成的,作者对潘醒华同志的热情帮助表示衷心的感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] J. S. Laughlin, in *Radiation Dosimetry*, 2nd ed., v. III, Academic Press, New York (1969), 91.
- [2] N. D. Kassarlis, *Phys. Rev.*, **145** (1966), 164.
- [3] B. Markus, *Strahlentherapie*, **116** (1961), 280.
- [4] В. И. Смирнов, Курс Высшей Математики, ТП, Физматгиз, Москва (1958), 358.
- [5] E. R. Epp et al., in *Proc. 11th Inter. Congr. Radiol.*, Rome (1965), 324.
- [6] R. S. Hemsinkveld, et al., *IEEE Trans. on Nucl. Science*, **NS-22** (1975), 1211.
- [7] H. E. Johns, in *Radiation Dosimetry*, 2nd ed., v. III, Academic Press, New York (1969), 1.
- [8] High-Energy Phys. Lab. and Hasen Lab. of Phys., “Research Proposal to NSF RANN to Develop a Pion Facility for Cancer Therapy” Stanford Univ., (1972).
- [9] K. Z. Morgen, in *Proc. Inter. Summer School on Radiation Protection*, Cavtat (1970), 7.
- [10] E. J. Hall, «癌的临床», **23** (1977), 428.

## THE USE OF HIGH-ENERGY ELECTRON BEAMS IN A MAGNETIC FIELD FOR RADIATION THERAPY

TAN LUN-CHANG\*

#### ABSTRACT

A rough estimation shows that the physical dose distribution by electron beams of about 50 MeV could be analogous to that by  $\pi^-$ -mesons, if an adequate magnetic field is applied to the radiated region. Therefore it would be helpful to the therapy of the deeply situated tumors.

\* On leave of the Institute of High Energy Physics, Academia Sinica.