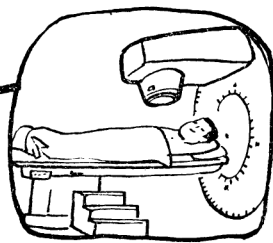


高能加速器治癌



杜文甫

高能加速器是高能物理研究的主要工具之一，它可以产生很多高能粒子，如 π^- 介子、质子、中子等。高能的 π^- 介子、质子、中子等不仅对研究高能物理很有用，而且它们在农业、工业、国防、物理、化学、生物、医学……等方面都有独特的应用。这里我们谈一谈高能加速器治癌。

癌就是恶性肿瘤，它是严重威胁人民健康和生命的常见病、多发病，而且有些癌的发病率有不断上升的趋势。我国在解放以后，由于人民生活条件和医药卫生条件的不断改善，过去发病率、死亡率很高的各种传染病，都已得到了有效的控制，这些病的发病率、死亡率都已大大下降。于是，在居民的死亡原因中，相对来说，癌症已经成为主要的原因之一，它每年都要夺去我们很多阶级弟兄和姐妹的宝贵生命。高能加速器治癌，就是利用高能的 π^- 介子、中子、质子去破坏和杀灭癌细胞，是放射治疗中杀灭癌细胞效果较大的、正在临床试验中的一种治疗方法。

五十年代通用的放射性治疗是用深度 x 射线或钴60的 γ 射线来照射。这种放射性治疗与外科手术、化疗抗癌、中草药相配合，一般能够延长寿命若干年，但彻底治愈率不高。六十年代发展了用电子加速器产生的高速电子治癌，复发率有所下降，但还是不够理想。特别是骨髓瘤、内脏癌、恶性黑色素瘤这些顽固肿瘤，电子射线的放射治疗是无效的。近来，随着高能加速器的新建和粒子流水水平的不断提高，提供了比 x 射线、 γ 射线、高速电子更为有效的治癌手段，有的已取得了可喜的临床效果。

x 射线、 γ 射线、高速电子、高能的 π^- 介子、中子、质子能够治癌，是因为它们都能够使受辐照的癌组织细胞的蛋白质分子产生电离作用（即产生阴离子和阳离子），从而使癌细胞遭到破坏，甚至死亡。但是，杀灭癌细胞的同时，它们也可以杀灭正常的细胞。所以理想的情况是尽可能多地杀灭癌细胞，尽可能少地杀灭好细胞。高能加速器治癌就在这方面显示出优越性来。

这里我们扼要地对比一下各种射线和粒子的特点：

第一个特点是相对生物效应（RBE）。不同的射线或粒子，杀伤细胞的能力不同。通常以200KV（千电子伏）的 x 射线或钴60的杀伤能力作为标准（即取作RBE=1）。任何一种射线，如果吸收剂量 11 和钴60相同，杀伤能力是钴60的十倍，RBE就是10。快中子的RBE是10，质子、慢中子的RBE是5，电子射线和 γ 射线的RBE是1。这说明在同等剂量的情况下，中子、质子杀伤细胞的能力要比电子射线、 γ 射线大得多。

第二个特点是线性能量转移值（LET）不同。就是说，射线中的一个粒子在每单位距离路径上转给周围介质的能量不一样。 π^- 介子、中子、质子、 α 粒子等都是高LET射线。 x 射线和 γ 射线是低LET射线。低LET射线对缺氧癌细胞的杀伤力比较差。以 x 射线为例，杀死缺氧细胞所需的最低剂量大约三倍于杀死有氧正常细胞所需的最低剂量。但 π^- 介子、中子、质子等就不是这样，它们是高LET射线，对缺氧细胞和有氧细胞的杀伤力差不多。从这个特点来看， π^- 介子、中子、质子可以比电子射线和 γ 射线更有效地杀伤缺氧的癌细胞。

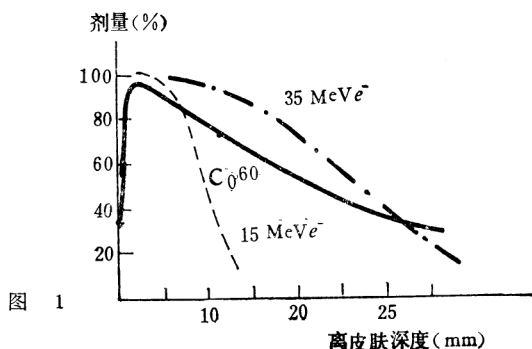


图 1

第三个特点是勃拉格（Bragg）曲线不同。射线或粒子通过物质时，由于作用机理不同，沿路径上的吸收剂量也很不相同，剂量随路径的分布叫勃拉格（Bragg）曲线。 π^- 介子的剂量分布可以比较集中在癌区。电子射线和 γ 射线的剂量分布一般不能做到集中在癌区。所以， π^- 介子治癌，可保证对健康组织的损害较少。

这些特点可以列表如下：

表 一

	LET	RBE	剂 量 分 布
X、 γ 射线	低	1	分布不能集中,对正常组织损害较严重。
电子射线	低	1	治疗皮肤表面癌时,剂量可比 X、 γ 射线集中。见图 1、2。
快中子射线	高	10	分布不能集中,但可以集中在恶性黑色素瘤中。见下面说明。
质子射线	高	5	分布区域比电子集中,见图 5、6,对正常组织伤害比 X、 γ 射线轻,见说明。
π^- 射线	高	10	分布可集中在癌区,对正常组织损害很少。

以下作几点补充说明:

1. X、 γ 射线的产生比较简便。通常采用钴炮(Co^{60})或电子加速器的韧致辐射(e, γ)反应产生的 γ 射线。钴炮和电子加速器都可成批生产,以满足人民的大量的需要。

2. 从图1、图2可以看出,电子的勃拉格曲线比X、 γ 的好。2.5兆电子伏(Mev)电子离皮肤表面10毫米处剂量下降到10%,而低能X射线剂量仍高达70%,所以电子用于浅部肿瘤的治疗,相对地减少了正常组织的伤害。

3. 快中子的相对生物效应(RBE)和治癌效果与中子能量有密切关系,可以调节变化。研究结果说明,快中子特别对恶性黑色素瘤治疗有效。这是因为这些肿瘤组织中硼(B^{10})量集中,正常组织每克有0.3微克硼,而肿瘤组织每克有20—45微克。硼吸收中子可产生高速 α 粒子,这些 α 粒子可以有效地破坏恶性黑色素瘤。

临床实验说明:快中子治疗可取得74%的治愈率,并没有再复发;而采用 γ 照射治疗,只获得32%的病人肿瘤萎缩,并有56%的复发几率。

4. 质子辐照对治癌有两方面的用途:

(1) 精确的早期肿瘤诊断

质子与围绕原子核的电子云产生库仑散射,平均散射角 θ 只取决于质子能量和被辐照材料性质,不取决于其绝对厚度(见图3上)。在照相胶片上不分散束(没有物体挡住)和散射束(经过物体)的叠加,使得沿边沿轮廓很清楚,好比是用笔专门在照片上把各种材料轮廓线重新勾出来似的(见图3下)。用这种独特辐照,只用很小的剂量(100毫拉德)就能检查胸部直径2毫米,脑部直径4毫米的肿瘤。

质子辐照可以分辨组织密度0.5%的改变。利用这个特性,配合多丝正比室、闪烁计数器,并利用电子计算机,可以得到病人承受检查的部位的立体质子辐照

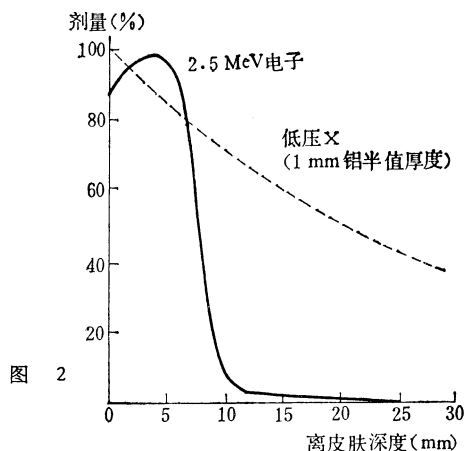


图 2

图。这种图形相当于把被检查部位一层一层剖开后所观察到的图像,所以称为层析照相(Tomograph)。图4是脑部层析照相示意图。探测肿瘤位置精度可到微米。

(2) 质子辐照治癌

从图5—6中可以看出质子的勃拉格曲线比较尖锐,大部份剂量是在射程最后几厘米处被组织吸收。精确控制质子能量,使勃拉格峰恰好落在肿瘤区,就可以增大分配到肿瘤区的剂量,减少对正常组织的伤害。

从质子直线加速器输出的束流很细,类似很强的平行光束,这对于获得均匀辐照有极大好处。

质子辐照肿瘤病例,迄至1974年大约有1000例,好转的占80%,完全成功的高达50%。所用质子束,

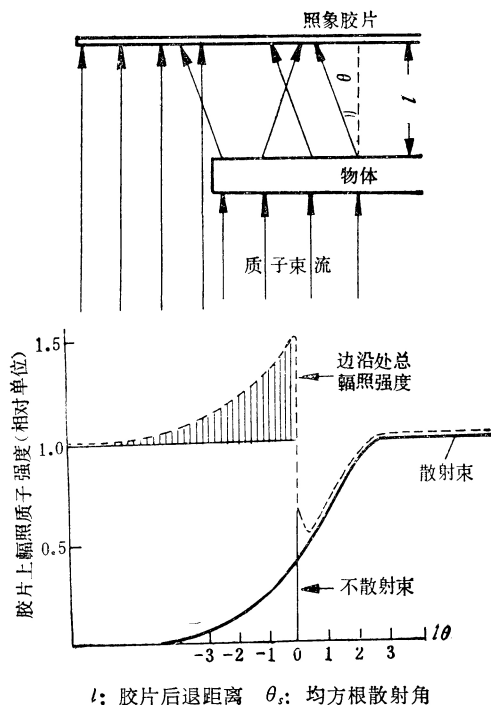


图 3 质子勾轮廓线幅照原理

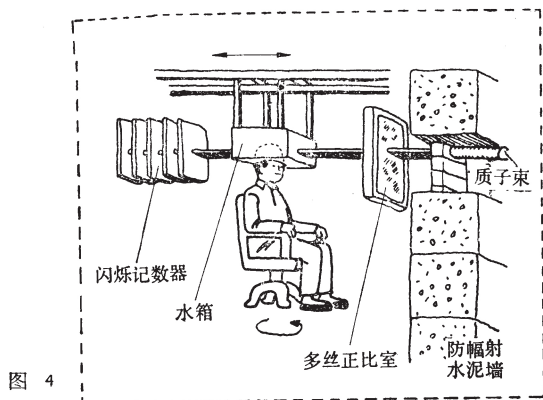


图 4

能量 160 Mev, 流强 10^9 — 10^{10} 质子/秒。

临床实验说明, 通常 γ 射线辐照, 对正常组织的伤害比质子重 2—5 倍。

5. 可能最理想的放射性治疗—— π^- 介子治癌。 π^- 介子和物质作用时, 先把原子的外层电子打掉(库仑斥力), 然后落到很靠近原子核的地方, 与原子核组成 π^- 介子原子^[2]。 π^- 介子原子是不稳定的, 在介子和核的强相互作用下, π^- 介子会被原子核俘获, 引起核的散裂。散裂碎片的能量全部消耗在 π^- 停留的附近组织中, 引起组织的伤害。因此, π^- 介子治癌的特点是:

(1) 进入皮肤到达肿瘤区之前, π^- 介子类似电子, LET 低, RBE 也小, 对正常组织伤害很轻。

(2) 在 π^- 介子进入癌区后, 它可使原子核散裂成碎片, 碎片(包括质子、 α 、重离子、中子等)是具有高 LET、高 RBE 的辐射, 所以可以说是把前面讲的高 LET 辐射都集中到了癌区。

(3) π^- 介子是带电粒子, π^- 介子的能量, 它的角度分布等均可以精确控制, 调节 π^- 介子能量, 可以使人

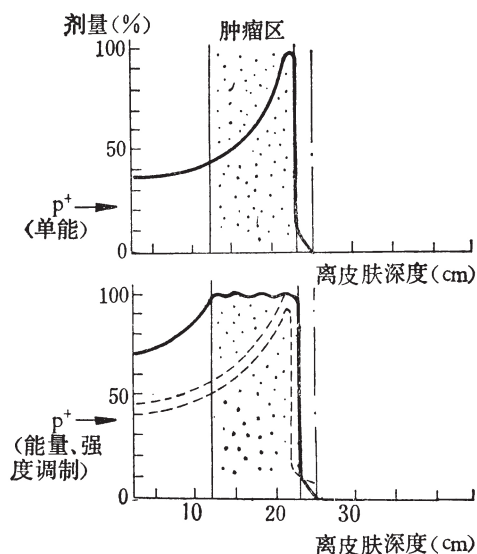


图 5 调制过的束流获得剂量均匀分布

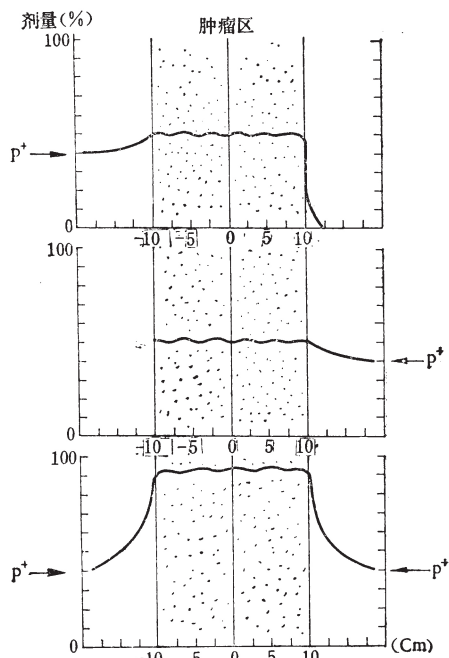


图 6 双野辐照

体任何选定的部位都能受到辐照。

(4) 改变 π^- 介子能谱, 可以使无论多大的恶性肿瘤均能受到均匀辐照。

π^- 介子、 Co^{60} 、中子的辐照剂量分布计算曲线如图 7。

目前 π^- 介子治癌正在开始做临床试验。在临床应用前首先要解决的问题主要建立 π^- 介子工厂, 产生较强的 π^- 介子流。

治癌对高能加速器的要求

1. 强流快中子源

按照 100 拉德/10 分钟辐照要求, 需要单位时间辐照到肿瘤上的快中子通量为 7.3×10^7 中子/厘米²-秒。如果肿瘤离快中子源有一米距离, 不考虑准直的话, 要求中子源强度不小于 9×10^{11} 中子/秒。

最好利用几十兆电子伏的质子束(从直线加速器产生), 通过打靶, 产生快中子, 这就需要质子束平均流强超过一微安。

2. 质子辐照对直线加速器、增强器的要求

通常选用 200 兆电子伏质子用于辐照, 它在组织中射程 25 厘米。假设辐照区域直径为 10 厘米, 为了获得 200 拉德/分钟的辐照率, 质子束强度需要 4×10^9 质子/秒。平均流强不高, 仅 1 毫微安就基本满足治癌要求。

3. π^- 介子治癌对高能质子加速器的要求

由于高能电子打靶产生 π^- 的产额只及高能质子打靶产生 π^- 的产额的 1/100, 所以通

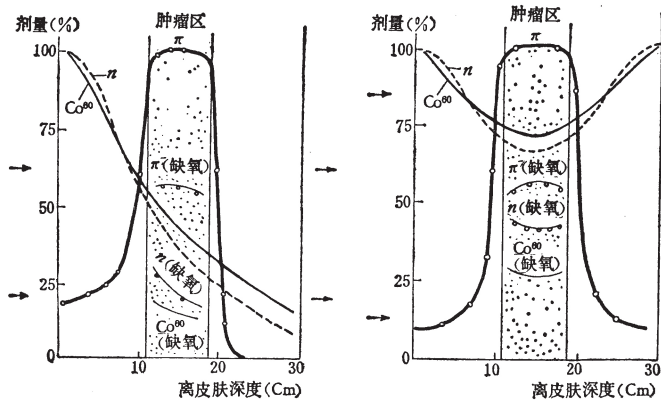


图 7
(a) 单野辐照 (b) 双野辐照

(上接 13 页) 常都用高能质子加速器的强流质子束轰击碳靶产生 π^- 介子。假定人体组织密度为 1 克/厘米³, 根据临床实验要求, 在 10 分钟内, 在病人 1000 厘米³体积中消耗 100 拉德的剂量, 则需要 π^- 介子强度为: $2.6 \times 10^8 \pi^-/\text{秒}$ 。为了得到好的治疗效果, 对 π^- 介子能量有一定要求, 按要求粗略地估计轰击碳靶的 500 兆电子伏质子束强度 I_p 应是: $70 \text{ 微安} = 4.2 \times 10^{14}$ 质子/秒。为了在 1000 立方厘米辐照体积里, 十分钟提

供 100 拉德的 π^- 介子 (能量相差 5% 以内), 所需高能质子加速器水平如下:

加速器能量 (Gev) [3]	<1	<10	<40
束流强度 (质子/秒)	6×10^{14}	6×10^{13}	6×10^{12}

总之, 从上面可以看到, 高能加速器的建立, 为肿瘤的放射性治疗提供了比常规 X、 γ 辐照更加有效、更为安全的辐照, 最理想的是 π^- 介子, 其次是快中子、质子。现在我国正在大力开展癌的防治工作, 试制医用电子直线加速器, 这是贯彻毛主席的“六·二六”指示的重要措施, 是令人鼓舞的喜讯。我们相信在党中央、毛主席的领导下, 我国科研部门、工业部门、卫生部门大力协同, 在不远的将来, 一定会生产出

我国自己设计制造的更有效的医用加速器, 满足广大人民群众的需要, 并在这个基础上, 把高能加速器治癌的工作逐步开展起来。

- [1] 吸收剂量的单位叫拉德, 每克物质从射线吸收 100 尔格的能量叫 1 拉德的剂量。
- [2] 原子一般都是由电子和原子核组成。 π^- 介子与原子核也能组成原子, 叫 π^- 介子原子。
- [3] Gev 是十亿电子伏。