

快中子治癌

◆ 常宏钧

原子核物理学和放射医学历来有着密切的关系。X射线的发现，奠定了放射治疗学的基础。随着中子的发现，又开辟了中子放射生物学和中子放疗学的研究和应用。

早在伦琴发现X射线不久，1869年美国芝加哥Hahneman医学院的物理学家E. H. Grubbe首次声称治疗一例乳腺癌病人。不久经过另一些实验治疗，直到1922年放射治疗才被确认为一种控制恶性肿瘤有效的临床学科。

1932年Chadwich发现了中子，人们便开始研究中子与X射线相比较的相对生物效应。Stone等人于1938—1943年间，在美国加利福尼亚大学世界上最早的迴旋加速器上，第一次把加速器产生的中子用于治癌。由于当时还不了解相对生物效应与剂量之间的复杂现象，病人接受了过高的剂量，导致早期反应严重。他们的努力受到了挫折。从此这一方面的研究，在近20年内几乎没有人作进一步的探索。

从1966年起，在英国哈默史密斯医院的16MeV(d)迴旋加速器上，在进行了大量的快中子放射生物学实验后，认为快中子的相对生物效应随分次剂量的减少而有很大提高，这是早期快中子放疗研究者所没有认识到的复杂现象。1970年快中子正式用于临床治疗。研究表明，快中子对某些肿瘤有明显的疗效。

为什么快中子治癌对人们有如此大的吸引力？原因是快中子的生物作用，较之X射线(或 γ 射线)、剂量受氧效应的影响小得多。

目前世界上有近30台快中子治癌装置，治疗了近1万病人，对某些恶性肿瘤的疗效是肯定的。临床治疗还表明，利用混合射线，即先用光子再用中子，或交

替使用中子和光子照射，疗效尤为明显。表1为1987年日本国家放射医学研究所发表的治疗结果。1989年美国华盛顿大学报导了它们分别用光子和混合射线治疗早期前列腺癌的存活率结果，在单纯用光子治疗的情况下，8年的存活率为14%；而用混合射线治疗，8年的存活率为64%。

中国科学院高能物理研究所已利用35MeV质子直线加速器建立一台快中子治癌装置。中国科学院上海原子核研究所正设想利用现有的30MeV(p)迴旋加速器建立快中子治癌装置。

射线与物质的作用

X射线和 γ 射线是低LET线，是放疗中常用的电磁辐射，两者在物理特性上没有什么差别，只表明它们产生的方式不同。X射线是由核外产生的，当高能电子的能级跃迁或电子的能级跃迁(钨或金)时，便产生X射线，其能量取决于电子的能量和靶金属的原子序数。 γ 射线是由核内产生的，当不稳定的核分裂或衰变，变成稳定的核时，多余的能量以 γ 射线方式放出。在放射治疗中把X射线和 γ 射线当作完全同等的射线，统称为光子流。X射线与物质作用的过程，决定于X射线本身的能量和物质的化学组成，当X射线光子能量小于0.5MeV时，光子完全被物质原子吸收，释放一个电子，并产生特征X射线(能量一般为0.5MeV)，这种相互作用的方式称光电效应。光电效应对放疗没有什么意义。当X射线光子能量大于0.5MeV时，光子与物质相互作用的形式主要是康普顿效应。光子与物质原子轨道上的一个电子碰撞，产生一个高速反冲电子，入射光子能量降低，形成散射光子而离去，散射光子按其能量大小继续与物质原子碰撞，发生康普顿散射或光电效应。康普顿散射如图1所示。

X射线(或 γ 射线)不能直接引起生物和化学的变化，但通过物质时产生大量的快速运动电子，一些电子能使物质的其它原子电离，破坏不可缺少的化学键，最

表1 用快中子及光子治疗肿瘤的局部控制率比较

肿瘤种类	局部控制率	
	中子	光子
喉癌	48.3%(15/31)	39.0%(84/214)
肺癌	46.9%(38/81)	
食道癌	44.1%(15/34)	29.6%(24/81)
子宫癌	72.2%(39/54)	64.8%(35/54)
前列腺癌	94.0%(17/18)	
软组织	70.6%(48/68)	
骨肉癌	59.3%(19/32)	35.3%(6/17)

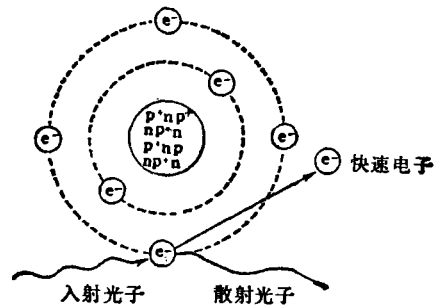


图1 康普顿散射

终造成生物损伤。

中子是高 LET 线,不带电荷,当通过物质时不受正负电荷的影响.它有较强的穿透力,但不能直接引起电离,只能与物质的原子核直接碰撞而发生相互作用.在放疗中涉及到的是有足够能量的快中子.当快中子与物质中的氢原子核碰撞时,由于中子与质子具有近似的能量,相互作用最大,全部中子能量转移给质子,产生高速反冲质子,从而在物质内产生带正电的重粒子,以类似 α 粒子的方式,引起很高密度的电离.图 2 说明快中子与氢原子核相互作用的过程.当快中子与物质中的重原子核(如碳原子核)作用时,可放出 α 粒子. α 粒子是致密电离粒子,具有重要的生物学作用.图 3 说明快中子与碳原子核作用的过程.

从前面的介绍可以看出,高 LET 射线的快中子、要比低 LET 线的 X 射线(或 γ 射线)更有效地产生生物损伤。

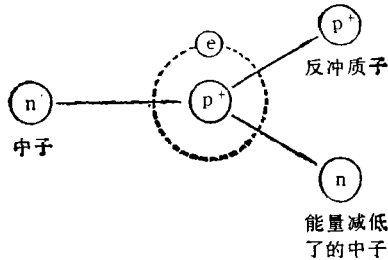


图 2 快中子与吸收介质中的氢原子核的相互作用

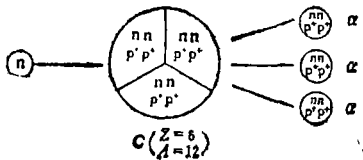


图 3 快中子与碳原子核作用产生三个 α 粒子

快中子的生物学特点

在放射疗法中,快中子优于常用的 X 射线,主要依它的生物学特点.其主要特点是:

一、快中子的氧增比(OER)低于 X 射线,其生物效应大于 X 射线。

二、快中子照射后,几乎没有细胞亚致死损伤的修复能力,也没有潜在致死损伤的修复。

氧增比指产生同一水平的细胞杀伤时,在乏氧条件下和有氧条件下的剂量比.从图 4 可以看出, X 射线对取得 0.1 的存活率,其氧增比为 $12 \times 100 / 5 \times 100 = 2.4$.同一图中可以看出,快中子对取得 0.1 存活率,其氧增比为 $3.5 \times 100 / 2 \times 100 = 1.7$

氧增比越大,说明这种射线受氧效应的影响越大,对乏氧细胞的杀伤力越小。

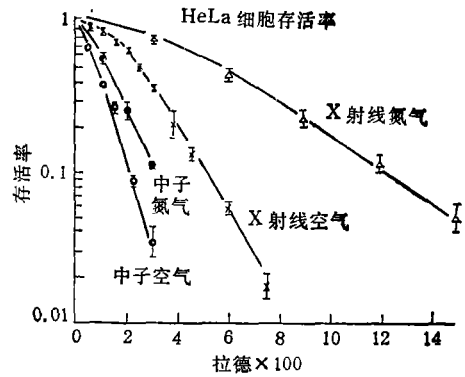
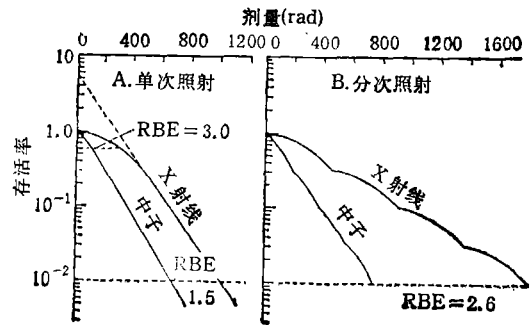


图 4 HeLa 细胞在空气和氮中受 14 兆伏中子及 250 千伏 x 线照射后的存活曲线

快中子和 X 射线的氧增比之比称为治疗增益因素.在上例的情况下,治疗增益因素为 $2.4 / 1.7 = 1.4$,它是衡量快中子对乏氧肿瘤细胞生物效应的一个尺度.这种增强效应用于临床治疗,说明快中子治愈肿瘤的机会就会大于 X 射线。

再来看快中子的相对生物效应(RBE 指产生相等生物效应所需 X 射线剂量与快中子剂量之比).图 5 是快中子和 X 射线照射哺乳动物的存活曲线.可以看出,在存活率为 0.01 情况下,快中子的 RBE 为 $1000 / 660 = 1.5$.若取存活率为 0.6 比较,这时快中子的 RBE 为 $300 / 100 = 3$.从同一图中可以看到,中子分



次治疗,其 RBE 比单次治疗的 RBE 大.这是因为分次治疗由多次小剂量组成,而小剂量的 RBE 大.这样随每次剂量的减少及增加分次数,中子逐渐变得比 X 射线更有效。

放疗快中子源

按中子物理区分,中子能量在 0.1 MeV 以上称为快中子.放疗中所需的中子能量只有在 5 MeV 以上时,才具有治疗恶性肿瘤所需的最低组织穿透深度.目前临床放疗使用的快中子治疗装置,其平均中子能量大多在 7 MeV 以上,有高达 ~ 30 MeV 的.放疗所需

的中子剂量率至少为 10—20 拉德/分，不然病人接受治疗时间过长，是不适宜的。作为一个合适的放疗快中子源，需要尽可能大的组织穿透深度(或深度剂量)和足够的剂量率。常见的快中子源有三种：一、裂变中子源。在反应堆中， ^{235}U 裂变可产生宽能谱的中子，其平均能量为 1MeV 左右。可以将裂变中子通过一个适当的窗口引出使用。但由于其能量低，组织穿透深度不够，实际应用是有限的，事实上排除了反应堆快中子源用作放疗的可能性。 ^{252}Cf 能发生自发裂变，并放出中子和 γ 射线。密封的 ^{252}Cf 可制成便携的中子源。这种中子源放在腔体内或组织内，尚有某些放疗价值。

二、14MeV 氘-氘中子源。利用几百 KeV (如 300 KeV 左右)的氘束轰击氘靶，能产生 14MeV 左右的单能快中子(一般称 14MeV)。氘-氘反应过程如图 6 所示。氘-氘反应产生的快中子是各相同性的，其中子产额大于 10^{12} 中子/秒才有实用意义(相当于距靶 1 米处的中子剂量率为 3 拉德/分)。

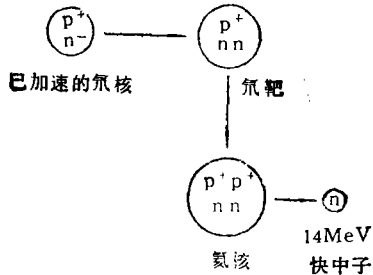


图 6 氘-氘($d^+ - T$)反应产生 14MeV 中子

利用氘-氘反应产生 14 MeV 快中子的优点是氘-氘中子发生器体积小；造价和安装费用较低。但它的缺点是：要经常换氘靶，维持运行费用较高；给出的剂量率较小。要达到较高的剂量率(中子产额达到 $\sim 10^{15}$ 中子/秒)，在制造长寿命和含有足够量的氘靶，还有一些技术上的困难。

三、回旋加速器(或质子直线加速器)产生的中子源。现今回旋加速器是产生放疗用中子源的主要手段，它可以提供比中子发生器大得多的中子剂量率。随着回旋加速器的能量提高，还可以提供比中子发生器高得多的平均中子能量。但它的体积大，建造和运行费用较高。利用回旋加速器的氘束或质子束轰击铍靶产生的中子是宽能谱的中子，其平均能量与粒子能量的关系可以近似地表达为： $\bar{E}_n = 0.5E_p - 1.5\text{MeV}$ ($\pm 1\text{MeV}$)； $\bar{E}_n = 0.42E_d$ 。利用氘-铍反应产生中子的过程如图 7 所示。

世界上第一台用于快中子治癌的小型超导回旋加速器($k=100$)，于 1989 年 4 月在美国密执安大学调试出束，现已安装在底特律 Harper 医院。此外，也可用质子直线加速器的质子束轰击铍产生放疗用的快中

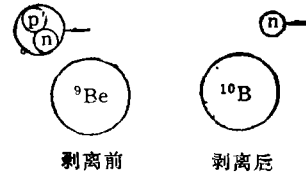


图 7 氘-铍反应产生中子的“剥离”过程

子。这类加速器大多原设计用作质子同步加速器的注入器，为充分发挥其作用、兼用作快中子治癌应用研究。

图 8 为三种常见的快中子能谱。

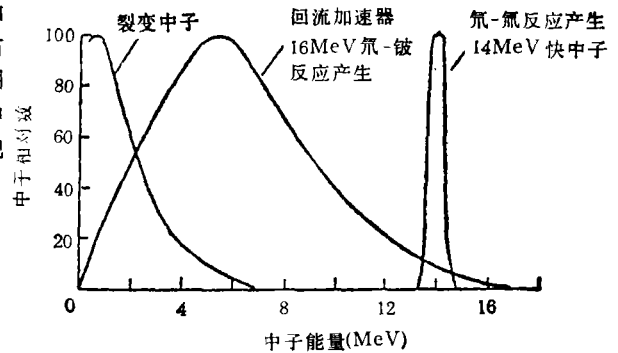


图 8 三种常见的快中子能谱

快中子治癌装置

由加速器(或中子发生器)构成的快中子治癌装置，其基本结构都由一个产生中子的中子源，和把中子束限制在所需截面内并屏蔽掉周围中子束和感生放射线的屏蔽准直器所组成。

利用氘束(或质子束)轰击铍靶产生的中子源，在人射束的出射方向产生的中子通量最大。中子剂量随粒子流强和能量增加而增加。在厚靶情况下(入射粒子能量全部被靶吸收)，获得的剂量最大。深度剂量受靶厚影响较少，而基本上取决于最大平均中子能量。

中子束有较强的穿透力，而且中子的散射比 X 射线强得多。此外，中子活化可使材料产生感生放射线，它不像 X 射线那样容易屏蔽准直。

用于放疗的中子屏蔽准直器有三个主要要求：1. 照射野外圈的透射剂量低到一个可接收的水平。2. 准直器上感生放射线水平低到可允许的范围。3. 准直器的长度合适。

为达到上述要求，对中子的屏蔽准直，通常在距中子源的第一层，采用纯铁以减速初级快中子。第二层选用富氢材料，如石蜡、聚乙烯等，以进一步减速并俘获中子，并填入硼，有助于吸收慢中子。最后用高密度材料(铅)来衰减中子与含氢材料产生的 γ 射线。

图 9 为回旋加速器等中心快中子治癌装置简图。

现代物理百家短文

◇ 洁 清 (选编)

样巨大成就。”1894年9月8日在夏洛滕堡去世。这里发表的短文，深刻地阐明了物理学的研究如同登山一样不仅要勤奋刻苦，还要讲究科学方法。

主张用简洁语言、生动比喻向“外行人”说明物理学真谛，本刊志此久矣。虽四度春秋，但成效甚微。近读钱三强论爱因斯坦成功之道，颇受启发。许多大孚众望的物理学家，除了具有卓越的科学成就和可贵的思想品质外，还有一种深入浅出、简明清晰的科学普及才能。鉴于此，本刊汇集一些物理学大师短文、书信、演讲，摘取精华，略加评点，扣以标题发表。《现代物理百家短文》这一新栏目，如蒙读者喜爱，则是编者由衷的愿望。

标题为编者所加。

我欣然把自己比作山间的漫游者，他不谙山路，缓慢而吃力地攀登着，不时要止步回首，因为面前已临绝境。突然，或许因念头一闪，或许出于幸运，他发现一条崭新前方的蹊径。待他最后登上顶峰之时，他才羞愧地发现：如果当初具有寻找正确道路的智慧，本来就有一条阳光大道直通山之顶巅！ (待续)

一 登山 (德) H. Von. 亥姆霍兹

编者按

亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz)，德国物理学家，1821年10月31日生于柏林，1847年发表“关于力的守恒”讲演而赢得声望，并第一次以数学方式提出能量守恒定律。人们熟知的吉布斯-亥姆霍兹方程就是他最早提出的。L. 玻耳兹曼评价他：“在四个领域中——哲学、数学、物理学和生物学——获得同

· 语丝 · 量子场论的主要信条

史蒂文·温伯格

本质上，这种观点一直遗留至今，并且成为量子场论的主要信条：根本的实在乃是一组服从特殊相对论和量子力学的场；其它一切都可作为那些场的量子动力学的结果推演出来。

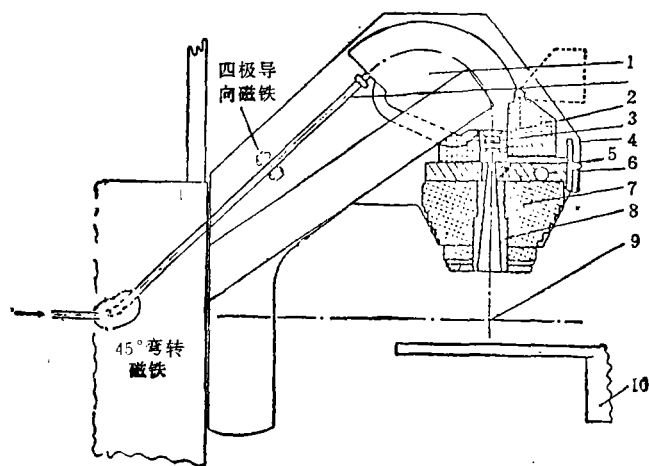


图9 等中心快中子治癌装置

束流传输系统、中子铍靶、屏蔽准直器等组装在一个等中心旋转车架上。车架可以绕垂直中心轴作 $\pm 120^\circ$ 旋转。在等中心位置设置治疗床。可在源皮距125厘米处实现等中心治疗。

从加速器引出的束流，经过 45° 弯转磁铁进入等

中心快中子治癌装置，再经过4极导向磁铁和 135° 弯转磁铁，最后打到靶上。在靶前设有四象限束流位置监测缝。

中子由厚铍靶产生。紧接其后设有传输电离室、用作治疗剂量监测。电离室有2个搜集电极，将信号分别接到2个独立的剂量监测仪。

围绕靶和可调准直器的屏蔽体，采用高密度含硼压缩木材($\rho=1.39$ 克/厘米³)，可调准直器长64厘米，也由高密度含硼压缩木材做成。更换不同内径的准直器，可适应所需照射野($6 \times 6-21 \times 21$ 厘米²)。

在电离室和可调准直器间，设有减速初级快中子的纯铁准直器，和屏蔽靶上 γ 射线的铅档块。此外，还有照射野指示光源。

在源皮源125厘米处中心轴上的剂量率(空气中)为0.445拉德/分/微安， γ 射线分量为 $\sim 3\%$ (照射野 11×11 厘米)。准直器孔径外距中子束边缘5.5厘米处的中子剂量透射率为1%。加速器能量 $E_p=28$ MeV， $E_d=15$ MeV；流强 ~ 70 微安。