

# 辐射在医学中的应用

音振龙

(中国科学院兰州分院)

**摘要:** 辐射在现代医学发展史上做出了巨大贡献。辐射已成了现代医学不可缺少的重要工具之一。本文讨论了辐射与医学的结合、放射性治疗学和核医学的简况。

## 一、辐射与医学

W. C. Roentgen在1895年发现了一种具有高穿透本领的新射线。这个惊人发现实质上揭开了辐射与医学关系史的序幕。他在Würzburg大学用Hittorf—Crookes管进行了大量研究。他把氰亚铂酸钡晶体放在离管很远的地方,系统研究了这种X射线在不同物质中的穿透本领,记录了照相底板上的吸收暗影,并测定了其强度随与管的距离平方成反比。他的发现立刻引起了科学界的广泛注意。

国际上的对Roentgen射线的深入研究,直接导致了一系列重要发现。H. Becquerel在1896年发现天然放射性, M. Curie又进行了深入研究。J. Thomson在1897年揭示了X射线的物理实质。E. Rutherford在1911年发现了原子核,从而促进了核医学的诞生。

其后Rutherford预言了中性核粒子的存在, J. Chadwick在1932年证实了上述预言,发现了中子,至此才初步揭示了原子核的真实构造。Joliot和I. Curie在1934年发现人工放射性,使辐射在医学中的广泛应用成为可能,并揭示了辐射用于医学成象的前景。

在第二次世界大战期间,人工生产放射

性核素的方法已经很好的掌握了,并且把它们广泛用于生物学研究和临床诊断研究。深入研究了X射线的吸收过程分为康普顿散射、相干散射、光电效应和电子对产生,并把这些过程作为能量、原子序数和密度的函数给出定量描述。X射线的诊断应用得到迅速发展,而为诊断应用建造的设备也日趋完善。因为X射线产生器限制在几十万伏,用X射线进行治疗表面病变就大受限制。但是医生已经把镭置入人体内部,以便达到特殊的治疗目的。

随着医用加速器和反应堆的迅速发展,今天可以提供医用的人工放射性核素的数目早已远非昔日可比。对于把中子和介子用于治疗目的的研究,更是让人眼界大开。另一方面,随着核技术,图象重建理论和现代计算机及信息处理技术的突飞猛进,今日医学成象技术已让人瞠目结舌,辐射应用已把医学诊断水平推进到崭新的阶段。辐射与医学早已结下良缘,随着辐射医学的迅速时髦,两个学科的关系就更加水乳交融和不能分离了。

## 二、放射性治疗学

### 1. 放射性治疗的分类

放射性治疗方法分为两大类。一类是用来自源的辐射从外部辐照人体,另一类是把

密封的放射性源置入人体内部。后者称为短距离放射治疗，把源成型密封后安置在浅表病变部位上，填隙式插入病变附近或置入人体的天然内腔中。

还在Roentgen发现X射线后的几个月内，就开始把X射线用于外部治疗的目的。可能是H. Grubbe进行了第一次这类尝试应用。

尽管在进一步改进冷阴极高真空X射线管的同时，还研制出热阴极X射线管和几百千伏功率源，但是局部的体外辐射处理仍然限止在非常浅表的病变部位。当时还不能把电子加速到几百万电子伏，人们还只能用电离辐射处理人体的任何部位。

## 2. 短距离放射性治疗

医生首次使用内部放射性治疗，是把镭密封成针状或管状，把氦气密封在金制毛细管中、或把放射性玻璃“籽晶”密封在金制管中。

在1913—1917年这段时间内，哈佛的W. Duane研制出包含氦气的“籽晶”。他还研制出氦“部件”和使用氦针的一套技术。纽约的G. Failla研制出经过改进的氦籽晶，并可把氦制成玻璃部件或装入金制毛细管中。在三十年代的辐射学家，包括R. Paterson和H. Parker研制出控制镭针定位的系统。对于各种不同尺寸和形状的部位，用专门的非均匀分布的源，用上述控制系统能够实现剂量的均匀分布。E. H. Quimby研制出另一种系统，它用均匀源分布可得到剂量的非均匀分布。这两种系统基本上满足了对内部放射源和剂量分布的各种要求。

尽管镭和氦至今仍然用于短距离放射治疗，对于针状源情况多用 $^{60}\text{Co}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 代替，对于部件源多用 $^{192}\text{Ir}$ 和 $^{125}\text{I}$ 代替。

## 3. 百万伏外部源与医用加速器

自从放射性治疗诞生以来，放射学家就已知用外部X射线进行合适的放射性治疗，就必须把电子能量加速到几百万电子伏以上。最初整个电势差都用静电方法或高压

升压变换器来达到。系统的绝缘用于维持整个电势差，也就是维持希望达到的能量。

显然需要另一种加速方式，在加速过程中装置绝缘防止短路和电压增压器都无足轻重甚至不再需要。G. Ising在1924年提出用共振方法加速。对带电粒子反复施加有限电势就能累积加速到甚高能量。这种加速方式要求速度随能量增加且并不适用于加速电子。R. Wideröe在1928年报导实现了Na和K离子的加速。1930年E. Lawrence提出环形磁共振的原理，两年后据此得到了800eV的质子，但所用工作电压不超过1千伏。质子加速轨道的稳定依靠磁场径向分量的聚焦作用实现。随着离子达到相对论速度和质量的增加，与射频加速场的相位关系丧失，粒子不再加速。回旋加速器的常规上限在加速质子时为2.5MeV。当然以后的同步加速器和相应磁场措施提高了这个加速能量上限。

W. Kerst在1940年研制出电子加速器，把电子能量加速到MeV并且能量可调。1948年研制出经过许多改进的电子加速器并用于医学目的。1949年伊利诺斯大学医学院第一台装置建成，电子束能量为6—22MeV，进行大量放射物理学研究，把高能电子和X射线系统用于治疗学应用研究。第二次世界大战期间高频rf功率振荡器在斯坦福大学和英国进展迅速，1948年已设计出微波医用直线加速器，1952年8 MeV装置在伦敦附近的Hamner-Smith Hospital建成，紧接着4MeV装置1953年在Newcastle-upon-Tyne和1MeV诊断装置1953年在斯坦福先后建成。到1982年仅美国全国的医院里就有700台直线加速器和35台电子加速器用于肿瘤的放射性治疗研究。

## 4. 治疗方法改进研究

随着电子加速器特别是电子回旋加速器和直线加速器的突飞猛进，治疗方法的改进就全面展开了。用高能X射线和高能电子进行辐射治疗，在何种条件下才能达到最佳效

果? 必须全面考虑放射治疗的方式(是体内安放源还是体外直接辐照)、被辐照部位的位置和形状性质、辐射的种类通量与时间、相对生物效应与能量沉积情况……。

另外, 除去历史悠久的X射线, 电子和质子之外, 近年来介子、中子和重离子的放射治疗应用也发展很快。尽管尚处走向成熟的实验阶段, 但从有限的历史中已可看出它们在治疗机理和治疗效果中的巨大优越性。

### 5. 剂量确定

放射治疗效果的主要影响因素有两个: 受治疗部位的沉积能量和相对生物效应。对于任何放射治疗特别重要而又最难处理的问题是剂量确定。确定准则是在辐射时间内, 使辐照部位能够受到治疗目的所需要的能量沉积或剂量, 又使周围的健康组织尽可能免遭辐射损伤。常规要求被辐照部位(多为肿瘤)受到的总剂量的误差, 必须控制在预定剂量数值的5%以内。

剂量的准确确定问题十分复杂。即要实验模拟人体的骨骼和各类组织, 研究其对各类辐照条件下的沉积能量和生物效应与剂量, 又要结合束流的形状、能量、通量、流强、时间、角度等各种因素。可想而知, 这是个在理论和实践上都很难的问题。这个问题只有靠已经掌握的理论知识和放射治疗学家的丰富临床辐照经验来解决。

### 6. 中子、介子和重离子治癌

人们已经把中子、介子和其它重离子直接辐射肿瘤, 发展成治疗癌症的有力武器。第一次中子放射性治疗是1936年在加利福尼亚大学进行的。方法为用那里的加速器把氘核加速到16MeV然后直接轰击Be靶就得到了中子束。Lawrence兄弟和其它诊断学家利用上述中子束, 进行了最初的生物学研究。其后Gray发现“氧效应”, 即细胞的充氧水平影响它对X射线的灵敏程度。据此, 中子的辐照效果是特别均匀的。J. Fowler进行研究后指出, 在放射性治疗方面中子束和X射

线束的生物效应的比较结果, 使人们对中子束放射治疗的前景更趋乐观。现在一些国家的几个医学中心, 正用回旋加速器中子束流继续进行临床研究。

通常把每单位质量所吸收的辐射能量的空间分布, 称为宏观剂量分布。中子的这种分布与用高能X射线或高能电子所达到的相比, 是不可同日而语的。中子束应用的不足之处似乎是由于它们与细胞充氧水平无关致使辐照效果有时重复性不够。质子、负 $\pi$ 介子和重离子的应用都在研究之中。加利福尼亚大学和马萨诸塞州中心医院的医生们已使用了质子束, 用于垂体辐照和头与颈的表面部位的辐照。这些研究都充分利用了质子的优秀宏观剂量分布特性, 并采用了大加改进的辐照处理方案。瑞士核研究所的一个小组正在进行负 $\pi$ 介子辐照的临床研究。斯坦福大学的物理学家已设计了专门的装置。电子或质子轰击靶产生负 $\pi$ 介子, 后接低温磁铁聚焦装置。瑞士实验室也建成了类似装置“ $\pi$ 介子加速器”。1979年与Villigen的同步回旋加速器联合使用, 其质子能量已可加速到600MeV。1980年11月它已用于首次辐照实验。

回旋加速器中子和其它重离子的实验目前仍处于实验阶段。在可以预见的将来, 兆伏X射线和电子将继续是比较理想的放射治疗方式, 因为它们有很好的宏观剂量分布, 并且临床治疗效果很好。

## 三、核医学与辐射

### 1. 放射性核素用于诊断

Joliot和I. Curie在1934年发现人工放射性, 这实质上标志着核医学的诞生。因为那时Hevesy已经正式提出用天然放射性核素作为体内元素分布的指示剂。J. Lawrence在1936年把 $^{32}\text{P}$ 放射性同位素注入慢性淋巴性白血病患者体内, 这是人类历史上为了诊断治疗目的的注射放射性核素。不久他又把

$^{32}\text{P}$ 用于诊断真性红细胞增多症。几乎与此同时, J. Hamilton用放射性Na核素对病人和正常人体进行了一系列开创性诊断研究。在四十年代初期, 医生们已开始把浓缩后的 $^{130}\text{I}$ 和 $^{131}\text{I}$ 放射性核素, 用于诊断甲状腺疾病和甲状腺肿瘤。

## 2. 放射性免疫测定

在五十年代中期, R. Yalow和S. Berson研究出放射性免疫学测定方法。这个方法成了诊断研究和生理研究的重要工具, 越来越多的分析化验都是以这种方法为基本依据进行的。到七十年代末期, 世界上许多国家都已在医院里用于临床诊断和医学研究。身为核物理学家的Yalow已经因为这项贡献而荣获1977年诺贝尔医学奖, 就可以想象它在核医学发展史上的重要意义了。

## 3. 辐射与医学成像

从五十年代至今, 辐射对核医学的主要贡献就是现代医学成像技术的迅速发展, 使核医学的诊断水平让人叹为观止。

医学家们长期追求的理想之一, 就是获取人体内部骨骼和脏器的清晰图象。利用辐射研制出的医学成像技术种类繁多, 主要包括数字减法血管造影术, X射线断层扫描、干涉射线照相、核磁共振成像和正电子发射断层扫描等。由于七十年代具备了图象重建理论和现代化的计算机及信息处理技术, 使医学成像技术在近十几年获得了实质突破, 实现了三大飞跃。即脏器清晰图象的获得、把生化病理研究推向分子结构水平和直接提供有关成象组织的化学成分信息。这些技术为癌症和其它致命性疾病的早期诊断和治疗提供了比较理想的新式武器。本刊第三卷第四期已有《医学成像技术概论》一文, 我们不再赘言了。

## 4. 放射性核素用于标记化合物

几乎从第一台回旋加速器投入运行的那个时候起, 回旋加速器生产的放射性核素就开始用于生物学和医学研究。E. Lawrence甚至把它的60英寸装置叫做医用回旋加速

器。尽管如此, 那时的应用范围有限。不列颠医学研究理事会授权在Hammersmith Hospital建造回旋加速器, 设计方案是Gray提出的。这台加速器生产了大量的放射性同位素用于医学研究。它还生产放射性气体用于肺的研究。它广泛地满足了辐射用于医学的开创期工作的需要。

下一个专用于医学应用目的的回旋加速器, 在1965年建于华盛顿大学的一所医院里。它能把氘核加速到8MeV, 并且广泛用于短寿命放射性核素研究。它还特别侧重于把 $^{16}\text{O}$ 和 $^{11}\text{C}$ 用作生物学上意义重大的化合物的标记物。另一台回旋加速器于1967年建立于马萨诸塞州中心医院, 物理学家G. Brownell用它生产正电子发射体进行新陈代谢研究。同年J. S. Laughlin在Memorial Sloan-Kettering Cancer Center安装了一台回旋加速器。它是等时性的, 因为方位角可变场, 就能把 $^3\text{H}$ 离子和 $\text{P}$ 、 $^3\text{H}$ 和 $^4\text{He}$ 离子一样加速。这台等时回旋加速器在生产放射性核素方面是多功能多用途的。因为它能把 $^3\text{He}$ 加速到23MeV, 这种束流打在多种靶上必然会提供多种核反应和会有很高的反应截面。

用回旋加速器生产的放射性核素(象氧、碳、氮), 标记各种各样生物学上意义重大的化合物是十分重要的。因为这些元素都与人体新陈代谢过程关系密切, 在对器官和肿瘤进行非侵害的功能研究中已变得越来越有吸引力了。在目测人体肿瘤数目时, 用 $^{13}\text{N}$ 标记L谷氨酸是非常有用的。对于骨肿瘤病人而言, 在化学治疗期间 $^{13}\text{N}$ 和L谷氨酸扫描的变化, 可以直接用来估计坚硬肿瘤对化学治疗的敏感程度和响应特性。用 $^{13}\text{N}$ 标记缬氨酸和亮氨酸等其它的氨基酸, 对病人和正常人进行扫描比较研究表明: 这些化合物在心肌层, 肝和胰的新陈代谢过程的研究中还是有广泛用途的。用吸入放射性气体的方法, 就可以用 $^{11}\text{C}$ 的一氧化物标记血红细胞, 从而确定放射性治疗之后肿瘤血管的性质的

改变。 $\alpha$ -氨基异丁酸是一种不参加新陈代谢的氨基酸。用 $^{11}\text{C}$ 可以成功地标记它。它在病人体内的分布表明它或许有助于新陈代谢研究。氟脱氧葡萄糖已开始用于大脑功能和心肌功能的研究。用 $^{15}\text{O}$ 标记水、一氧化碳和 $^{15}\text{O}$ 的分子,也已开始着手进行和展开大脑研究。用 $^{11}\text{C}$ 的棕榈酸盐、 $^{15}\text{O}$ 的水和 $^{15}\text{O}$ 的一氧化碳,正在开展大脑研究。

#### 四、结语

在辐射与医学的关系回顾中,我们强调指出一个奇妙而有趣的现象。辐射几乎从发现之日起,就引起科学界的巨大关注并被迅速广泛地应用于医学。时至今日,几乎所有大中型医院里都离不开辐射诊断与治疗了。与此同时,在几乎所有重要的生物医学研究中,辐射更是不可缺少的重要工具了。到了八十年代的今天,越来越多的人已经认识到,辐射与医学的分离已是不可思议的了。

随着医学成像技术的突飞猛进,放射医学的诊断水平令人耳目一新,在人类面前真正提供了癌症等致命性疾病的早期诊断和治疗,展现了攻克医学难关的曙光。各种各样医用加速器在建成和运行,形形色色放射性核素在生产和使用,日新月异的辐射诊断治疗手段在问世和更新。放射性核素在生物医学研究中用作标记化合物,放射性免疫测定

极大地推动了分析化验技术的更新换代。然而还有许多困难需要克服,尚有不少问题有待解决。象中子束,介子束和重离子束,这类辐射医学中的新角色,还急需深入研究和实践。象辐射与人体的相互作用这个古老而复杂的问题,至今理解得还不能说是深透。尽管如此,辐射在医学中的应用是条成功之路,成绩是巨大的,前途是光明的。

#### 参考文献

1. W. G. Monahan et al., J. Nucl. Med. 13 (1972) 274
2. R. Paterson et al., J. Radiol. 7 (1934) 592
3. D. W. Kerst, Phys. Rev. 60 (1941) 47
4. M. E. Phelps et al., Neurology 6 (1979) 371
5. A. M. Cormack, Med. Phys. 7 (1980) 273
6. R. S. Heilman et al., J. Med. 306 (1982) 477
7. B. Lentle et al., Radiat. Phys. Chem. 24 (1984) 267
8. 鲁振龙,《核物理动态》第3卷第4期(1986) 21
9. T. Maruyama et al., J. Radiat. Res. 27 (1986) 315
10. D. C. Joy, Rev. Sci. Instrum. 56 (1985) 1772