



## 微剂量学研究的进展

张纯祥

(中山大学物理系 广州 510275)

**摘要** 微剂量学是交叉学科的新兴领域,研究粒子在物质中能量沉积的微区分布和放射生物学效应.本文主要对微剂量学研究的进展,包括粒子的径迹结构,能量沉积和微剂量学实验技术等方面作一概述.

**关键词** 径迹结构, 能量沉积.

微剂量学是应用核物理学的一个新兴领域,又是与化学和生物学交叉的科学,二十多年来得到了迅速的发展.它主要研究辐射在吸收介质中能量沉积的微观分布,以及这些分布在微观体中(0.01~1 $\mu\text{m}$ )引起的物理、化学和生物学效应以及它们之间的关系.微剂量学是依据放射生物学的需要而产生的,但其应用绝不限于辐射的生物学效应,也可用于分析固体的辐射效应.近年来,随着重离子束和中子束应用的发展,微剂量学在辐射防护和放射治疗中得到越来越多的应用<sup>[1]</sup>.

欧洲共同体的科学研究与发展委员会、美国能源部和美国橡树岭国家实验室共同主办的第十一届微剂量学会议,于1992年9月13~18日在美国田纳西州的格特林堡市举行.14个国家的150多人参加了会议,提交会议的论文共123篇.下面简要介绍会议交流的论文以及我们所做的一些工作.

### 1 粒子的径迹结构模型

在气态和凝聚态物质中,电离辐射产生的瞬时或永久变化,都与辐射作用事件在靶中发生时和发生后的能量转移、迁移、吸收等过程的空间和时间分布有密切的关系.在这些情况下,宏观剂量学的量,如吸收剂量、阻止本领和平均授予能等,均不能作为好的物理量来预言辐射的物理、化学和生物学效应,必需进一步对受照射物质中的粒子复杂的径迹结构进行研究和分析.因此,人们对带电粒子的径迹结

构和与径迹有关的物理量,如截面、慢化长度和裂变碎片图像等的研究,包括理论和实验都相当重视.通过这些研究,最终建立必要的物理和化学基础,以解释各种辐射效应和建立相应的模型与机制.

#### 1.1 粒子径迹结构和电离事件空间分布的 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo 粒子径迹结构的计算机模拟程序一般由两部分组成.第一部分是“径迹生成程序”,主要模拟带电粒子在介质中走过的路程,记录所有相互作用点的坐标和表征所有电离事件的各种参数.第二部分是处理与“放射生物学相关的量”,如微剂量学的线能和比能的分布、径向剂量分布和阻止本领以及三维空间的径迹图形等.这些量可以和实验值或其它计算结果相比较.

原则上, Monte Carlo 模拟是描述粒子径迹结构较好的一种方法,但是, Monte Carlo 模拟所必需的实验数据,如重离子与介质原子相互作用的弹性和非弹性散射的微分截面,目前只有质子和  $\alpha$  粒子有测量数据.因此, Monte Carlo 方法对粒子径迹结构的模拟也只限于质子和  $\alpha$  粒子.此外,靶被激发和电离后,电子跃迁到特别的分子轨道后所形成的新的化学种群,它们的分布与最终的辐射效应有直接的关系.但目前还缺少处理这些化学种群的必要的理论和计算手段.

这次会议的123篇论文中有19篇是采用 Monte Carlo 方法进行模拟,其中有几篇不但

模拟粒子在吸收物质中的径迹,同时还计算出 DNA 直接和间接损伤的几率。

### 1.1.1 DNA 周围和毫微米区域的能量沉积

美国太平洋西北实验室的 Wilson 和德国 GSI 的 Paretzke<sup>[2]</sup> 在广泛使用 Monte Carlo 质子径迹计算方法的基础上,发展了一种用于计算 0.3~20.0MeV/u 的高能质子在 2~100nm 的吸收物质的位点附近穿过时,所产生的随机能量沉积和电离事件的几率密度分布的随机模型。他们发现可用一与位点大小有关而与离子径向距离无关的指数函数表示该分布。该模型还可给出微剂量学所需的参数。然而,英国 MRC 放射生物研究所的 Nikjoo 和美国 Oak Ridge 国家实验室的 Hamm 等人<sup>[2]</sup>认为,亚细胞结构内能量沉积的空间分布对了解电离辐射对生物靶的损伤机制是十分重要的。他们选用了四种电子径迹模拟程序,对近似 DNA 片段大小的圆柱在周围能量沉积的绝对频率分布进行比较,并讨论了这些计算结果的差异。美国 Oak Ridge 国家实验室的 Stabin 和 Turner 等人<sup>[2]</sup>认为,辐照含有不同溶质的水溶液所产生的各种与时间和浓度有关的自由基,对微剂量学和辐射生物效应模型的建立都十分重要。他们采用 OREC Monte Carlo 程序逐个处理在水中的原电离和所有的次级电子的能量损失,从而产生全部的径迹结构,且由其迁移计算出径迹周围的自由基的初始空间分布。程序成功地模拟了在纯水中辐射射解的  $e_{aq}^-$  和  $OH\cdot$  随时间的有关产额,并和实验数据进行比较。

### 1.1.2 Monte Carlo 方法用于辐射对 DNA 间接损伤的模拟

美国 Columbia 大学 Zaider 等人<sup>[2]</sup>认为,电离辐射对 DNA 的直接损伤或间接损伤对总的生物损伤效应究竟有多大的贡献,仍然是一个有争议的问题。然而,多数的 DNA 辐照是在水溶液中进行的,也就是说主要是非直接损伤效应。因此,研究辐射引起的自由基的扩散以及和 DNA 的相互作用所引起的效应,是十分值得研究的问题。因此,他们用随机化学过程

的计算机程序,研究生物分子的非直接损伤效应,其要点如下:

(1)粒子的径迹结构完全由 Monte Carlo 方法模拟而成。

(2)两组的电离事件相互作用和自由基-DNA 相互作用都同时进行处理。

(3)Smoluchowski-Debye 理论用于获得作为时间函数的自由基相互作用几率。

(4)溶液中电子热化过程的描述方法有较大的改进。

计算结果可给出 DNA 损伤的产额以及和辐射后的时间关系。最终将给出 DNA 双链断裂产额与辐射品质的关系。此外,Zaider 还报告了电子在凝聚态物质中的 Monte Carlo 迁移程序,给出了微剂量分布、邻近函数和自由基产额等结果。带电粒子和电子在凝聚态中的迁移问题,无论从概念上还是数值计算方法上都是带挑战性的,目前尚无较好的解决方法。

英国 MRC 放射生物所的 Goodhead 等人<sup>[2]</sup>,采用四种径迹结构模型解释了 DNA 的辐射效应和估算 DNA 的辐射损伤。(1)模型考虑在相似 DNA 大小体积的能量沉积簇的频率分布,给出 DNA 断裂数和其它计算相比较;(2)径迹段模型用于产生 nm 水平的能量沉积,在靶内(DNA)的电离事件与 DNA 断裂有关;(3)用 Monte Carlo 径迹结构模型可区分 DNA 的单链和双链断裂与直接和间接作用的贡献;(4)用 Monte Carlo 方法模拟在 DNA 周围水自由基的化学变化过程,计算出直接损伤和间接损伤的比值。

### 1.2 粒子径迹结构的 $\delta$ 射线理论与径向剂量分布

电离辐射剂量学中基于平均效应的宏观吸收剂量,已不再能充分地反映高 LET 粒子在吸收物质中的辐射效应。1967 年,Katz 等人<sup>[3]</sup>提出了径迹结构的  $\delta$  射线理论,其出发点在于不考虑粒子和吸收物质的相互作用所产生的电离和激发事件的原因,以及所产生的物理、化学和生物学的最终效应的过程,而把粒子和被照射样品的相互作用看成是辐射和由

一簇对辐射敏感的靶组成的探测器的相互作用,在低 LET 辐射照射时,二次电子在吸收物质中可看成是均匀分布的。

Katz 模型<sup>[4]</sup>认为,重离子的径迹结构主要是由重离子和吸收物质中的原子相互作用产生的  $\delta$  射线在物质中的分布和能量沉积所决定的.他在计算径向剂量时作了如下的简化假设:(1)重离子与被照射物质中原子相互作用所产生的二次电子均垂直于径迹方向发射;(2)二次电子的能量分布以 Bethe 分布函数表示;(3)二次电子在介质中所走过的路程是直线的,射程-能量关系可用线性或幂函数<sup>[5]</sup>的经验公式表示. Katz 模型所给出的径向剂量分布在径向半径小于 10nm 和最大径向距离处与实验符合得不很好。

为了进一步改进模型的计算,我们在收集和分析了 20eV 至 20MeV 的电子射程-能量关系的基础上<sup>[6]</sup>,得出了一个对数多项式表示的电子射程能量经验公式.这一公式的拟合精度在二次电子的低能区和高能区都比幂函数高.为此,Zhang 等人<sup>[2]</sup>在考虑到电离电位和对数多项式的射程-能量关系,以及二次电子发射角分布的情况下,用数值积分计算了径向剂量分布和最大径向距离(penumbra).此外,基于两体碰撞的经典模型和 Monte Carlo 随机取样方法模拟二次电子在水中连续慢化过程,而不需要借助二次电子的垂直发射、直线路程和射程-能量经验关系等假设,计算了粒子径迹周围的径向剂量分布和最大径向距离,导出了对数多项式所表示的电子射程-能量关系所得到的径向剂量分布的表达式,并采用高斯数值积分方法计算粒子径迹周围的径向剂量分布,对 Katz 模型作了较大的改进.目前已有相当一批实验数据给出了多种离子的径向剂量分布,与我们所做的 Monte Carlo 模拟结果符合较好。

径迹结构的  $\delta$  射线理论的最大优点是给出了径向剂量分布的解析表达式,因此易于计算各种重离子的径向剂量分布.特别是对能量高于 1 MeV/u 的粒子,其结果与实验符合的很好.就目前 Monte Carlo 无法给出原子序数

大于氦离子的径迹结构的模拟来看,这是一个很大的优点。

## 2 微剂量学的实验技术和应用

虽然基于微剂量学原理用组织等效正比计数器(TEPC)为探测器的仪表,在实验室应用已有 30 年的历史,但在保健物理,特别是在辐射治疗中没有物理学家所广泛应用.这可能是与仪器结构较为复杂、灵敏度较低、电子学附属设备昂贵和稳定性较差等问题有关.美国 Pacific Northwest Lab. 的 Brackenbush<sup>[2]</sup>就微剂量学测量仪表在保健物理中的应用作了综述.他强调指出,用组织等效正比计数器为探测器的微剂量学仪表的特点为:(1)在多种粒子的辐射场中能测定和区分辐射的类型;(2)它给出了组织等效的介质中吸收剂量的绝对测量;(3)由线能的分布可测定辐射的品质因子;(4)微剂量学仪表可自行校准。

目前,TEPC 类的仪表用于测量裂变中子源的剂量当量的误差在 10% 以内.此外,还可用于测量中子和  $\gamma$  辐射场的总剂量,并已用于宇宙飞船中测量太空中高能粒子和宇宙射线照射宇宙员的剂量当量。

作为微剂量学仪表的改进,美国哥伦比亚大学的 Kliuga 等人<sup>[2]</sup>建成了 0.5mm × 0.5mm 小型圆柱形有壁的正比计数器,用于测定强流脉冲射线束的微剂量谱,可模拟 5~10nm 线度的单个事件脉冲谱.对这种计数器的放大倍数和线性测定表明,常规的正比计数器完全可以模拟至线度为 10nm.他们还研制成功无壁超小型正比计数器,用于测量重离子微剂量谱.离子收集体积由  $\phi 3.18\text{mm} \times 3.18\text{mm}$  的螺线管所定,最小测量距离为 20nm.美国 Oak Ridge 国家实验室的 Gibson 等人用光学方法测量水蒸气中的带电粒子径迹.当带电粒子穿过气体介质时,一高频高压电场(脉宽为 1~3 $\mu\text{s}$ )加在一对电极上,使离子径迹周围处在亚激发态的电子电离发光,数字照相机在 3~10 $\mu\text{s}$  内拍下该径迹,并储存在计算机中,通过分析径迹的总发光数和径迹长度,可计算出带电

粒子的总能量沉积和 LET. 意大利 Padova 大学的发展前景.  
 的 Colautti 等人<sup>[2]</sup>用一圆柱体组织等效正比计数器测量带电粒子的径向剂量分布,其空间分辨率可达 nm 水平. 探测器由两部分组成,一漂移区和一放大区,粒子在漂移区电离和在放大区放大. 两部分通过一狭缝连接,改变狭缝的大小可测量径向电离产额.

总的来说,虽然 TEPC 为探测元件的微剂量仪器的成本比其它剂量仪成本要高一些,但也存在上述的许多优点,目前正在研制带小型多道分析器数据处理系统的微剂量学仪表,它将更适用于保健物理和放射治疗,有着优良好

## 参 考 文 献

- 1 ICRU Report 36 Microdosimetry, 1983
- 2 11th Symposium on Microdosimetry 13 ~ 18 Sept. 1992, Gatlinburg, Tennessee(USA), Book of Abstract
- 3 Butts J. J., Katz R. Radiat. Res. , 1967, 30 : 855
- 4 Katz R. Nucl. Track. Det. , 1978, 2 : 1
- 5 Zhang Chunxiang, Dunn D E, Katz R. Radiat. Prot. Dosi. , 1985, 13 : 215
- 6 陈燕, 李冕丰, 张纯祥. 中山大学学报(自然科学版), 1990, 29 : 115

## Recent Progresses in Microdosimetry

Zhang Chunxiang

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

**Abstract** Microdosimetry is a rapidly developing field in the multi-disciplines. It studies energy deposition processes in media with particular interesting to living system. This paper gives short review on the recent progress in the study of microdosimetry including the track structure of ionizing particles energy deposition and new microdosimetric experimental techniques.

**Key Words** track structure, energy deposition.