

文章编号: 1007-4627(2005)04-0373-03

核碎裂在离子与生物分子相互作用中的效应*

张丰收

(北京师范大学射线技术与材料改性教育部重点实验室,

北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875)

(北京市辐射中心, 北京 100875)

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 讨论了重离子辐照生物中核碎裂效应, 给出与此相关的核碎裂研究现状和进展。

关键词: 重离子; 生物分子; 核碎裂

中图分类号: O571.6; Q7 **文献标识码:** A

射线对生物组织的辐照研究已有很长的历史, 近年来重离子对生物组织的辐射研究取得了长足进展^[1-7]。目前对宇航中太空辐射的影响、医疗和环境中的辐射、辐射导致生物新品种的产生等受到广泛关注, 但由于人们的认识和探测设备的局限性, 国际上对离子与生物组织作用的基础研究十分缺乏, 某些方面仍属空白。这方面的研究对系统研究重离子与生物分子相互作用的物理机制, 正确指导重离子辐照培育新品种、深入研究宇宙航行中太空辐照对生物体的影响有重要的意义, 也为进一步研究重离子治疗癌症、开展重离子束治疗癌症的临床试验、减少临床治疗中的盲目性有十分重要的意义。

重离子与生物分子相互作用可分为物理过程、化学过程和生物过程。物理过程主要由不同层次物质相互作用、激发并导致生物分子结构的变化所组成。包括核相互作用(弹核碎裂, 10^{-22} s)^[8]、库仑相互作用(相互作用分子的电离和电子激发, 10^{-15} s)^[9]、生物分子与周围环境相互作用(生物分子振动能量和相位的弛豫, 10^{-12} s)^[10], 最终导致生物分子新结构的形成。离子与生物分子相互作用中物理过程所形成的生物分子新结构, 是化学过程、生物过程的基础。本文主要讨论物理过程中核相互作用阶段原子核碎裂的贡献。

重离子与生物组织相互作用的主要特点是在离

子入射通道中有一个低剂量的坪区, 而在接近离子射程末端时出现一个高剂量的 Bragg 峰区^[11]。图 1 所示为 200, 300 和 400 MeV/u 的 ^{18}O 核在水中的射程, 分别为 7.2, 14.2 和 23.0 cm, 而弹核碎裂碎片是 Bragg 后的区域剂量的主要贡献者。另外, 从图中看出, 随着轰击能量的增加, 核碎裂的相对影响增强, 因此要准确给出中能重离子剂量, 就需要精确给出核碎裂截面。

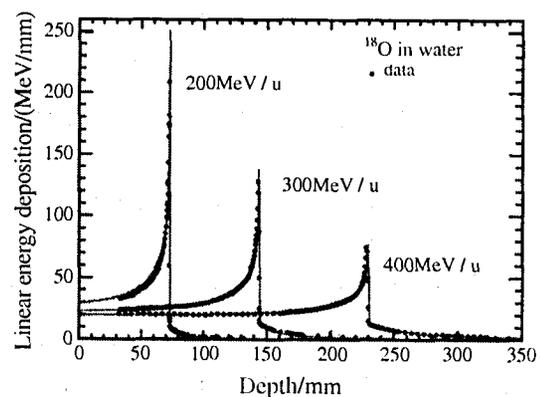


图 1 200, 300 和 400 MeV/u 的 ^{18}O 重离子在水中的剂量随深度变化的比较(此图取自文献[11])

描述原子核反应中原子核碎裂的理论模型有两类, 即动力学模型和静态模型(如热力学模型、统计模型等)。由于静态模型是动力学模型在原子核反

收稿日期: 2005 - 08 - 16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10575012, 10435020); 北京市教育委员会共建项目建设计划资助项目; 北京师范大学科研基金资助项目

作者简介: 张丰收(1966-), 男(汉族), 陕西渭南人, 教授, 博士生导师, 从事原子核理论、团簇理论、生物物理理论研究;
E-mail: fszhang@bnu.edu.cn

应中长时间反应后期时的截断, 因此研究原子核多重碎裂的关键是建立一个恰当与合理描述重离子碰撞动力学演化的微观输运理论, 并用于研究重离子碰撞机制, 特别是原子核多重碎裂的研究。

在以前的计算中, 采用同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程 (IBL) 模型计算的核碎裂截面结果能够与实验结果较好地符合, 这为研究入射弹核碎裂提供了基础。图 2 给出了利用 IBL 研究入射能量为 28.7 MeV/u 的不同弹核 ^{14}O , ^{16}O 和 ^{18}O 轰击同一靶核 ^7Be 生成核素的截面。

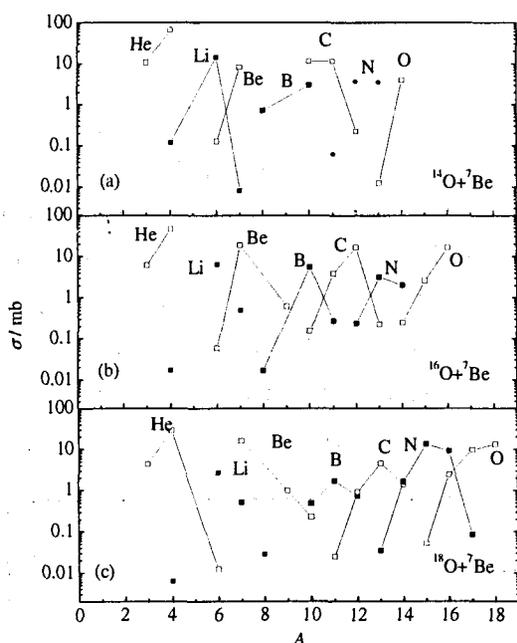


图 2 28.7 MeV/u $^{14, 16, 18}\text{O} + ^7\text{Be}$ 生成核素的产生截面随同位素质量的变化关系

□表示偶数核同位素链的结果; ■表示奇数核同位素链的结果。

从图 2(b)可以看出, 在 He ($Z=2$) 到 O ($Z=8$) 区间中产生的核素有 $^3, ^4\text{He}$, $^4, ^6, ^7\text{Li}$, $^6, ^7, ^9\text{Be}$, $^8, ^{10}, ^{11}\text{B}$, $^{10-13}\text{C}$, $^{12-14}\text{N}$ 和 $^{14-16}\text{O}$, 若不包括弹核和靶核的贡献, 共 19 个核素。而缺中子核 ^{14}O 轰击 ^7Be 生成的核素 (图 2(a)) 与稳定核 ^{16}O 引起反应产生的核 (图 2(b)) 相比, 它有 ^{11}N 和 ^{13}O 两个新的缺中子核素产生, 而缺少了丰中子核或稳定核 ^9Be , ^{11}B , ^{13}C , ^{14}N 和 $^{15, 16}\text{O}$ 共 6 个核素。同时可以看出, 丰中子核素的产生截面下降, 而丰质子核素的产生截面升高, 例如 $^4, ^7\text{Li}$, ^6Be , ^8B , $^{10-12}\text{C}$, ^{12}N 和 ^{14}O ,

这似乎表明缺中子弹核会导致缺中子核素的产生。图 2(c) 是丰中子炮弹 ^{18}O 轰击靶核 ^7Be 反应生成核素的产生截面, 与图 2(b) 稳定核 ^{16}O 轰击靶核 ^7Be 相比, 有 ^6He , ^8Li , ^{10}Be , ^{12}B , ^{14}C , $^{15-17}\text{N}$ 和 $^{17, 18}\text{O}$ 共 10 个丰中子核素生成, 而缺中子核素产生截面减小, ^6Be , ^8B , ^{10}C , ^{12}N 和 ^{14}O 等 6 个缺中子核素没有生成。

从上面稳定核 ^{16}O 轰击 ^7Be 的反应结果分别与缺中子弹核 ^{14}O 和丰中子弹核 ^{18}O 轰击 ^7Be 的反应结果比较来看, 发现缺中子核素引起的反应 (图 2(a)) 更容易产生缺中子核素; 丰中子核素引起的反应 (图 2(c)), 则更容易产生丰中子核素。比较图 2 中不同情况下各核素产生截面的数值大小, 不难发现, 对于越是缺中子的反应系统, 生成缺中子核素的产生截面数值越大, 如图 2(a) 中的 ^4Li , ^8B , ^{10}C 和 ^{12}N 等; 越是丰中子的反应系统, 生成的丰中子核的产生截面数值越大, 如图 2(c) 中 ^{12}B 和 ^{13}C 等所示。

因此, 在实际的辐照实验中, 除了要考虑初级入射弹核的贡献, 也需要考虑核碎片的贡献。如果从简单的 Bethe-Bloch 公式出发, 可以近似得到入射弹核碎片 F (其中质量数和电荷数分别为 A_F 和 Z_F) 的射程 R_F 与入射初级弹核 P (其中质量数和电荷数分别为 A_P 和 Z_P) 的射程 R_P 的关系为

$$R_F = R_P \frac{Z_P^2 A_F}{Z_F^2 A_P}$$

从此式看出, 弹核碎裂碎片有更大射程, 这也正是 Bragg 峰后区域剂量分布的主要贡献来源。由于篇幅限制, 有关核碎裂碎片对辐射剂量的影响将在以后的工作中给出。

从上面分析中看出, 中高能重离子束贯穿靶物质期间会以一定的几率与靶原子核碰撞发生核反应, 核反应导致弹核碎片的产生。同时, 由于弹核碎片基本上比主束在靶体中有较长的射程, 而这些放射同位素衰变中会发射正电子, 因而可以应用 PET 成相技术, 通过对正电子湮灭辐射的监测, 来进行实时在线监控束流照射的位置, 这是放射性核束用于放射治疗的另一个特点。

参 考 文 献:

- [1] 夏寿萱主编, 放射生物学, 北京: 军事医学科学出版社, 1998.
- [2] Kraft G. Prog Part Nucl Phys, 2000, **45**: S473.
- [3] 卫增泉, 袁世斌, 颀红梅等. 原子核物理评论, 2003, **20**: 126.
- [4] 罗红兵, 赵 葵, 郭继红等. 原子核物理评论, 2004, **21**: 238.
- [5] Li W J, Wei Z Q, Li Q, *et al.* Nucl Sci Tech, 2000, **11**: 22.
- [6] Li Q, Wei Z Q, Li W J. Chin Sci Bull, 2002, **47**: 1 708.
- [7] 曹天光, 马云志, 卓益忠. 高能物理与核物理, 2004, **20**: 489.
- [8] 张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] Zhang F S, Surraud E, Calvo F, *et al.* Chem Phys Lett, 1999, **300**: 595.
- [10] Zhang F S, Lynden-Bell R M. Phys Rev Lett, 2003, **90**: 185050.
- [11] Sihver L, Schardt D, Kanai D T. Jpn J Med Phys, 1996, **18**: 1.

Effect of Nuclear Fragmentation in Interactions of Heavy Ions with Biomolecules *

ZHANG Feng-shou

(The Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education,
Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of
Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The effect of nuclear fragmentation in the interactions of heavy ions with biological molecules is discussed. The status and perspectives of this topic are presented based on calculations and experimental data.

Key words: heavy ion; biomolecule; nuclear fragmentation

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10575012, 10435020); Joint Science Foundation of Education Department of Beijing City; Science Foundation of Beijing Normal University.