

高能铁离子在水介质中核反应过程 所导致的能量沉积

方美华¹⁾ 魏志勇^{1)†} 杨 浩¹⁾ 程金星²⁾

1) 南京航空航天大学, 南京 210016)

2) 防化研究院第二研究所, 北京 101105)

(2007 年 9 月 26 日收到, 2008 年 2 月 28 日收到修改稿)

在银河宇宙射线中, 400 MeV/nucleon 的铁离子通量相对来讲是较高的, 400 MeV/nucleon 的铁离子对空间辐射引起的损伤和辐射剂量有重要的贡献. 本文以 Geant4 为基础, 对 400 MeV/nucleon Fe 离子与物质相互作用后通过核反应过程产生的次级碎片进行模拟分析. 对铁离子在水中产生的能量沉积和铁离子与水介质发生核反应后产生的次级碎片的能量沉积进行了模拟研究, 得到了通过核反应过程产生次级粒子所导致的剂量贡献.

关键词: 能量沉积, 剂量, 碎片

PACC: 0660W, 8760M, 8765

1. 引 言

重离子在物质中的输运是研究辐射防护、放射生物学等的基础. 随着计算机和计算技术的发展, 开发了很多计算粒子在物质中输运的程序, 如表 1 所示将它们作了个比较, 从表中可看出 Geant4 在模拟重离子输运中的优势. Geant4 是欧洲核子中心开发的一套基于蒙特卡罗方法的模拟开源程序包, 可从

cern 官方网站下载^[1], 蒙特卡罗方法是一种模拟计算方法, 在粒子输运问题上应用广泛, 如实验核物理、反应堆物理、高能物理、医学、生物、探矿等^[2]. Geant4 工具包在描述粒子在材料中输运具有物理模型丰富全面、几何形状灵活, 同时入射粒子能量范围宽, 种类多, 靶材描述无限制(如表 1 所示)等特点, 主要应用范围包括高能物理、辐射防护、放射医学等方面^[3, 4].

近年来, 深空探测成为航天领域的热点, 在空间

表 1 各模拟计算程序的比较 (Z_1 为入射粒子原子序数, Z_2 为靶材原子序数)

程序名称	能量范围	入射粒子类型	靶材类型
BEST	≥ 0.5 MeV/nucleon	无限制(裸离子)	278 种材料
Geant4	大范围	所有粒子	无限制
CasP	0.001—200 MeV/nucleon	$Z_1 \geq 1$	$1 \leq Z_2 \leq 92$ (修改)
PSTAR	0.001—1000 MeV/nucleon(p)	$1 \leq Z_1 \leq 2$	25 种元素, 48 种混合
MSTAR	0.001—1000 MeV/nucleon	$3 \leq Z_1 \leq 18$	25 种元素, 48 种混合
BT	大范围	所有粒子	无限制
ECS	几十 keV—几千 GeV(e)	电子、光子	无限制
MCNP	10^{-11} —20 MeV(n), 0.001—1000 MeV(e, γ)	中子、光子、电子	无限制
TRIM	0.000011—2000 MeV	$1 \leq Z_1 \leq 92$	所有元素及其他靶

辐射环境中, 研究航天器舱内外的辐射环境, 以及射

线穿过航天器对航天员的危险性进行评价是在深空

† 通讯联系人, E-mail: wzzy_msc@nuaa.edu.cn

探测的前沿研究工作,而空间辐射环境中,重离子是重要的组成部分,所以研究重离子在物质中的输运被提上了重要研究地位.银河系宇宙射线是空间辐射环境的重要组成部分,它聚集了从质子到U核的所有元素,其主要组成部分为由83%左右的质子,13%左右的 α 粒子.其中虽然 Fe ($Z=26$)离子丰度仅为0.02%,但是其对生物效应的贡献却达到了20%^[5].重离子与靶材相互作用,不仅会产生原初粒子效应,次级碎片产生的效应也不能忽略.这类的实验和理论已经开展较多^[6-8],但通过Geant4模拟的手段来研究重离子特别是铁离子的与靶材作用后的碎片效应还比较少.在银河系宇宙射线中,400 MeV/nucleon的铁离子通量是相对最高的,本文以Geant4为基础,对400 MeV/nucleon Fe离子与物质相互作用后产生的次级碎片的产生过程,各种次级粒子的产生截面,次级粒子的产额及次级粒子的能量沉积进行模拟研究,并对模拟结果进行分析.

2. 物理模型和计算方法

在本文采用的程序中,通过射线与物质相互作用跟踪各种次级粒子,涉及的物理过程复杂,包含多种相互作用过程,主要有三大类^[9]:电磁相互作用,放射性衰变和强相互作用.涉及的物理过程包含多个层次:入射粒子与靶核核外电子的相互作用,入射粒子与靶原子核的相互作用及入射粒子与靶原子的相互作用.借助以上物理过程,我们可对光子、电子、质子以及重离子进行跟踪计算.

宇航员的人体辐射剂量效应分析是一个十分复杂的问题,将一个真正的人作为对象来研究辐射粒子的能量沉积,目前并不是一个可行的方法.为了将一个复杂的问题有办法获得解决,按照国际上通常采用的方法,将人体模型化,同时采用生物等效介质来代替人体中复杂的肌肉、脂肪及骨骼等生物组织和器官.

本文主要研究空间辐射中高能铁离子的能量沉积过程,侧重于研究其中的物理问题.选取最简单的几何模型,即立方体,选用水介质为等效介质材料,水是生物体的重要组成部分,在人体中约70%是水,血液里约83%是水,研究表明,水在物理密度、电子密度和有效原子序数等方面与肌肉组织都非常接近,可以说是肌肉组织最好的等效材料^[10],所以用水所作为靶物质得到的计算结果用于人体剂量分析可

靠性很好.在上诉模型条件下,本程序模拟的实验为离子束垂直于入射到三维水箱,水箱厚度设为10 cm.

入射粒子及产生的次级粒子通过一系列级联相互作用,逐渐损失能量而慢化,最终停止在靶材中(如果靶材足够厚).射线进入介质后的阻止过程包含许多种相互作用过程,大致有三类贡献:核阻止,电子阻止及核反应次级粒子产生引起的阻止.

2.1. 电子能量损失

粒子与靶材核外电子的非弹性碰撞损失占总能量损失的99%以上.带电粒子与靶材发生电磁相互作用我们选用Geant4中的标准电磁相互作用(standard electromagnetic physics)来计算初级粒子和次级粒子由于电磁相互作用而损失的能量.对于电离能量损失,我们用Bethe-Bloch公式计算分析.

Bethe-Bloch理论在量子扰动理论的基础上,在一阶Bohr近似下得到.其表达式为

$$S = \frac{\kappa Z_2}{\beta^2} Z_1^2 [L_0(\beta) + Z_1 L_1(\beta) + Z_2 L_2(\beta) + \dots], \quad (1)$$

其中 $\beta = \frac{v}{c}$, v 为入射粒子速度, $\kappa = 0.3071/M_2$ (在阻止本领单位为keV/(mg/cm²)时).其中 L_1 项为Barkas修正也称为 Z_1^3 修正. L_2 为Bloch修正也称为 Z_1^4 修正.式中 L_0 可表示为

$$L_0 = \ln\left(\frac{2mc^2\beta^2}{1-\beta^2}\right) - \beta^2 - \ln I - \frac{c}{Z} - \frac{\delta}{2}, \quad (2)$$

其中 $\frac{c}{Z}$ 为壳层修正, $\frac{\delta}{2}$ 为密度修正, I 为平均激发能.

Bethe-Bloch公式仅适用于高速入射粒子的情况,一般要求入射粒子的速度 v_0 要大于电子在原子中运动的Bohr速度 $v_B = \frac{e^2}{\hbar} = 21.8 \times 10^8$ cm/s.

在本程序中考虑Barkas修正、密度修正和壳层修正.

2.2. 核反应能量损失

在使用Geant4软件包处理入射粒子与靶核发生核反应方面,Geant4所包含的有Binary, Bertini核内级联、复合核过程、核粒子蒸发及衰变等^[9]基本的核反应过程.除此之外还有原子核碎裂反应过程.高能重离子核反应碎裂过程的描述有许多模型,本文在计算中选择的模型是Abrasion-Ablation核反应模型.

Abrasion-Ablation模型将反应分为Abrasion过程

和 Ablation 过程. Abrasion 过程是指弹核与靶核相切, 形成高度激发的参加者交叠区及激发能较低的种类旁观者和类靶旁观者; Ablation 过程是指系统的重组阶段. 假定处于激发态的种类旁观者经过弛

豫过程达到平衡状态, 它将通过蒸发轻粒子、裂变等过程退激发形成类弹碎片, 在整个退激阶段存在这些过程之间的竞争. 这个模型在文献 [11—13] 中已经详细描述.

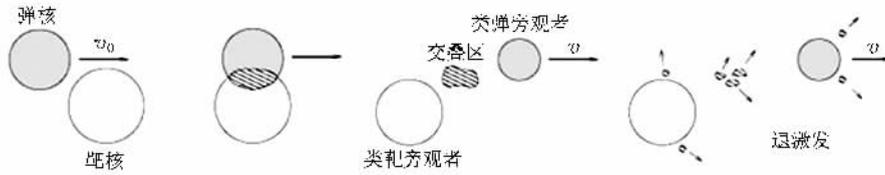


图 1 Abrasion-Ablation 模型示意图

根据 Abrasion-Ablation 模型, 可得到 400 MeV/nucleon 铁离子碎片的截面图, 如图 2 所示. 离入射铁离子的原子序数 Z 越远, 碎裂过程的截面也越小.

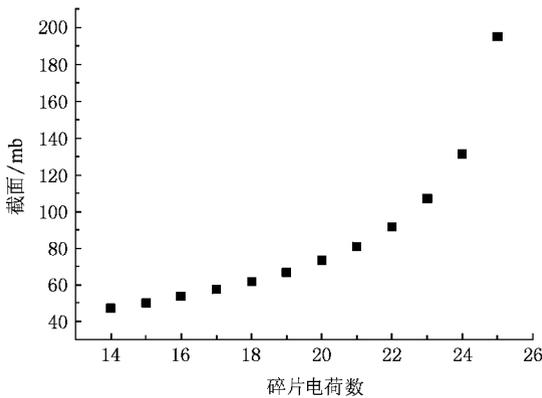


图 2 400 MeV/nucleon 铁离子碎片截面

3. 模拟结果及讨论

高能重粒子进入物质后, 首先通过电离激发等过程在物质中沉积能量, 高能重粒子与介质中原子层次的相互作用导致其能量沉积, 能量沉积的空间分布具有在入射束方向布拉格曲线的分布形式, 末端出现布拉格峰 (Bragg peak), 其次, 入射粒子还会与物质发生核反应而产生次级粒子, 如质子、 α 粒子、中子及其它带电粒子. 在入射高能重离子的径迹周围, 核反应产生大部分的次级碎片, 这些次级粒子也会引起能量沉积, 次级粒子的能量沉积会改变介质中高能重离子能量沉积的分布.

基于上述模型分析, 我们计算 Fe 离子入射到三维水箱中的能量沉积分布曲线, 图 3 为 400 MeV/nucleon Fe 离子入射到三维水箱中在入射方向得到的总线性能量沉积, 图 4 为 400 MeV/nucleon Fe 离子入射到三维

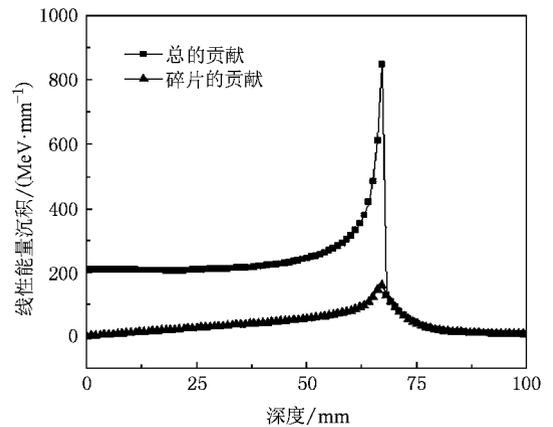


图 3 400 MeV/nucleon Fe 离子入射到水中的总线性能量沉积和次级碎片的线性能量沉积

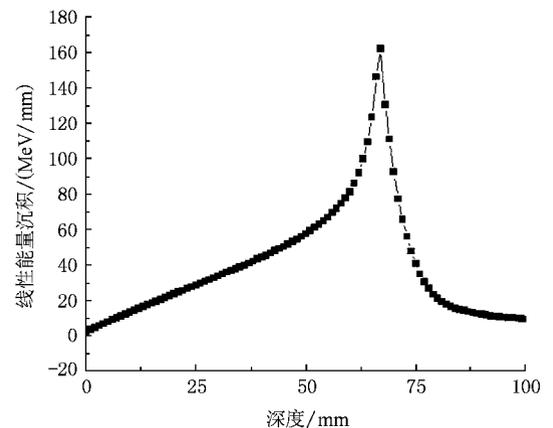


图 4 400 MeV/nucleon Fe 离子入射到水中的次级碎片线性能量沉积

水箱中在由于核反应过程产生大量次级粒子, 这些次级粒子在介质中产生的线性能量沉积的分布. 图 5 为 400 MeV/nucleon Fe 离子入射到水介质中在由于核反应过程产生的不同原子序数 Z 的次级粒子的产额. 入射重离子进入介质后通过核反应过程产生

的次级碎片的原子序数 Z 主要分布在入射重离子的原子序数附近,次级碎片的原子序数小于入射重离子的原子序数.入射重离子在介质中发生的各种核反应过程中碎裂过程具有重要的贡献.

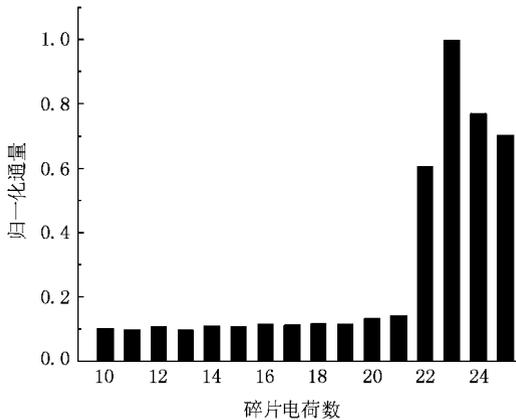


图 5 经过 5 g/cm^2 水屏蔽后的不同原子序数的归一化通量

重离子具有高的生物效应与其在靶物质中的径迹结构有关^[14].而径迹结构与粒子种类、所带电荷、能量等有关.由带电粒子的电子阻止本领可以看出入射粒子的原子序数越高,电子阻止本领就越大,即受到激发和电离的电子数越多.所以与 α 粒子相比较,Fe 粒子沿其径迹方向产生更多的 δ 电子,并且入射粒子通过核反应而产生很多碎片,通过这些电子和碎片在径迹以外沉积能量,产生簇损伤而导致高的生物效应.

从本文模拟结果可看出以下特点:

1. 入射离子通过电离激发过程的能量沉积占有较大的份额,入射离子通过核反应过程产生次级粒子的能量沉积贡献相对比较小,总的线性能量沉积中,通过产生次级粒子而来的线性能量沉积是不可忽略的.

2. 碎片能量沉积在 Fe 离子的入射方向上也有

一个尖锐的峰并且碎片能量沉积的峰与拉格峰差不多重合.对这一点我们可初步解释如下:碎裂反应后次级碎片的单核子能量和初级射线的单核子能量很接近,其电子阻止过程行为很相近,在布拉格峰附近有较多的能量沉积.

3. 布拉格峰右侧的总的能量沉积缓慢下降趋势和次级碎片能量沉积的下降曲线符合很好,说明布拉格峰右侧的剂量基本上由核反应产生的碎片所造成,Fe 粒子不断在其径迹周围产生次级碎片,这也是导致布拉格峰尾部能量沉积缓慢下降的主要原因.

4. 由于核反应过程产生的次级粒子,会影响高能重离子的能量沉积行为,导致布拉格峰尾部剂量值缓慢下降,高能重离子产生的次级粒子其能量沉积在离子径迹末端有较大的贡献,次级粒子的能量沉积曲线在布拉格峰处产生峰值.

5. 低能带电粒子进入介质中后会通过核阻止和电子阻止过程来消耗其能量,而对高能重离子除了核阻止和电子阻止过程参与外,还会有高能重离子引起的核反应过程参加.高能重离子引起的核反应产生的次级碎片的原子序数主要分布在和入射重离子的原子序数很接近范围内.

从以上讨论分析中得出结论,重离子在介质中的能量沉积主要来自三类贡献:核阻止、电子阻止及核反应阻止.核反应阻止就是入射离子在介质中发生核反应过程产生的次级粒子引起的阻止过程.核阻止和电子阻止仍然是高能重离子能量沉积中的主要贡献,高能重离子在介质中的能量沉积除了原子层次的相互作用外,还会有核反应阻止过程的贡献.对高能重离子由于原子核反应而来的能量沉积占有相当的份额,在空间辐射效应分析及防护方面应该考虑空间辐射重离子通过核反应过程产生次级粒子场的能量沉积贡献.

[1] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/download.shtml>.
 [2] Xu S Y, Liu P J, Li Q in 2007 *Nuclear Techniques* **30** 597 (in Chinese) [许淑艳、刘保杰、Li Q in 2007 核技术 **30** 597]
 [3] Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce P, Asai M, Axen D, Banerjee S, Barrand G, Behner F, Bellagamba L, Boudreau J, Brunengo A, Burkhardt H,

Chauvie S, Chuma J, Chytracsek R, Cooperman G, Cosmo G, Degtyarenko P, Dell'Acqua A, Depaola G, Dietrich D, Enami R, Feliciello A, Ferguson C, Fesefeldt H, Folger G, Foppiano F, Forti A, Garelli S, Giani S, Giannitrapani R, Gibin D, Gómez Cadenas J J, González I, Gracia Abril G, Greeniaus G, Greiner W, Grichine V, Grossheim A, Guatelli S, Gumplinger P, Hamatsu R, Hashimoto

- K, Hasui H, Heikkinen A, Howard A, Ivanchenko V, Johnson A, Jones F W, Kallenbach J, Kanaya N, Kawabata M, Kawabata Y, Kawaguti M, Kelner S, Kent P, Kimura A, Kodama T, Kokoulin R, Kossov M, Kurashige H, Lamanna E, Lampén T, Lara V, Lefebure V, Lei F, Liendl M, Lockman W, Longo F, Magni S, Maire M, Medernach E, Minamimoto K, Mora de Freitas P, Morita Y, Murakami K, Nagamatu M, Nartallo R, Nieminen P, Nishimura T, Ohtsubo K, Okamura M, O'Neale S, Oohata Y, Paech K, Perl J, Pfeiffer A, Pia M G, Ranjard F, Rybin A, Sadilov S, Di Salvo E, Santin G, Sasaki T, Savvas N, Sawada Y, Scherer S, Sei S, Sirotenko V, Smith D, Starkov N, Stoecker H, Sulkimo J, Takahata M, Tanaka S, Tcherniaev E, Safai Tehrani E, Tropeano M, Truscott P, Uno H, Urban L, Urban P, Verderi M, Walkden A, Wander W, Weber H, Wellisch J P, Wenaus T, Williams D C, Wright D, Yamada T, Yoshida H, Zschiesche D 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **506** 250
- [4] Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce Dubois P, Asai M, Barrand G, Capra R, Chauvie S, Chytracsek R, Cirrone G A P, Cooperman G, Cosmo G, Cuttone G, Daquino G G, Donszelmann M, Dressel M, Folger G, Foppiano F, Generowicz J, Grichine V, Guatelli S, Gumplinger P, Heikkinen A, Hrivnacova I, Howard A, Incerti S, Ivanchenko V, Johnson T, Jones F, Koi T, Kokoulin R, Kossov M, Kurashige H, Lara V, Larsson S, Lei F, Link O, Longo F, Maire M, Mantero A, Mascialino B, McLaren I, Mendez Lorenzo P, Minamimoto K, Murakami K, Nieminen P, Pandola L, Parlati S, Peralta L, Perl J, Pfeiffer A, Pia M G, Ribon A, Rodrigues P, Russo G, Sadilov S, Santin G, Sasaki T, Smith D, Starkov N, Tanaka S, Tcherniaev E, Tome B, Trindade A, Truscott P, Urban L, Verderi M, Walkden A, Wellisch J P, Williams D C, Wright D, Yoshida H 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 270
- [5] Cucinotta F A, Wu H L, Shavers M R, George K 2003 *Gravit. Space Biol. Bull.* **16** 11
- [6] Westfall GD, Wilson L W, Lindstrom P J, Lindstrom P J, Crawford H J, Greiner D E, Heckman H H 1979 *Phys. Rev. C* **9** 1312
- [7] Fiesch F, Hirzebruch S E, Hüntrup G, Röcher H, Streibel T, Winkel E, Heinrich W 1999 *Radiation Measurement* **31** 533
- [8] Townsend L W, Wilson J W, Norbury J W, Bidasaria H B 1984 *An Abrasion-Ablation Model Description of Galactic Heavy Ion Fragmentation*. NASA Technical Paper 2305 p1
- [9] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/C4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/PhysicsReferenceManual.html>
- [10] Zhang W Z 2003 *Microdosimetry Study of Radiation Energy Deposition in Human Tissue* (Beijing: Institute of Radiation Medicine) p27 (in Chinese) [张文仲 2003 电离辐射粒子在人体组织中能量沉积的微剂量学研究(北京:放射医学研究所) 第 27 页]
- [11] Wilson J W, Tripathi R K, Cucinotta F A, Shinn J L, Badavi F F, Chun S Y, Norbury J W, Zeitlin C J, Heilbronn L, Miller J 1995 *NUCFRG2: An Evaluation of the Semiempirical Nuclear Fragmentation Database* NASA Technical Paper 3533 p1
- [12] Townsend L W, Wilson J W, Tripathi R K, Norbury J W, Badavi F F, Khan F 1993 *HZEFRG1, An Energy-Dependent Semiempirical Nuclear Fragmentation Model* NASA Technical Paper 3310 p1
- [13] Cucinotta F A 1994 *Multiple-Scattering Model for Inclusive Proton Production in Heavy Ion Collision* NASA Technical Paper 3470 p1
- [14] Yang T C, Craise L M, Mei M, Tobias C A 1989 *Adv. Space Res.* **9** 131

Nuclear reaction stopping of 400 MeV/nucleon ^{56}Fe in water

Fang Mei-Hua¹⁾ Wei Zhi-Yong^{1)†} Yang Hao¹⁾ Cheng Jin-Xing²⁾

1) *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

2) *Research Institute of Chemical Defence, PLA, Beijing 102205, China*

(Received 26 September 2007 ; revised manuscript received 28 February 2008)

Abstract

Geant4 toolkit for Monte Carlo simulation is used in high energy heavy ion energy deposition simulation. The energy deposit of relativistic 400 MeV/nucleon ^{56}Fe has contributions from three sources, namely electronic stopping, nuclear stopping and nuclear reaction stopping. The electronic stopping and nuclear stopping are well known ionization, excitation and elastic collision of particles, the nuclear reaction stopping comes from the contribution of secondary particles emitted from nuclei during nuclear reaction. Yields of secondary particles induced by relativistic ^{56}Fe in water and the energy deposited near the track are calculated.

Keywords : energy deposit, dose, fragmentation

PACC : 0660W, 8760M, 8765

† Corresponding author. E-mail : wzy_msc@nuaa.edu.cn