

文章编号: 1001-4322(2012)12-3028-05

空间辐射环境及人体剂量蒙特卡罗模拟^{*}

耿长冉¹, 汤晓斌¹, 谢 芹², 陈 达¹

(1. 南京航空航天大学 核科学与工程系, 南京 210016; 2. 兰州大学 核科学与技术学院, 兰州 730000)

摘 要: 针对空间辐射环境进行了理论分析, 并使用蒙特卡罗方法, 对银河宇宙射线及典型太阳质子事件进行了模拟。通过分析常规屏蔽对空间辐射场及人体剂量的影响、屏蔽下的次级粒子产额等, 验证了蒙特卡罗工具包 Geant4 应用于空间辐射防护研究的准确性。模拟发现: 在常规屏蔽厚度的情况下, 对于太阳质子事件, 由于其能量主要分布在低能量段(100 MeV 以下), 屏蔽效果随屏蔽厚度的增加明显增大, 1 g/cm² Al 等效厚度屏蔽皮肤剂量可降低至其初始剂量值的 8% 左右, 10 g/cm² Al 等效厚度的屏蔽可降低至初始剂量值的 0.48% 左右; 而对于银河宇宙射线, 由于其平均能量较高, 屏蔽层的屏蔽作用并不明显, 在浅层组织剂量甚至有所增加。

关键词: 空间辐射; 能谱分布; 蒙特卡罗方法; 次级粒子; 人体剂量

中图分类号: V524.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20122412.3028

空间探索伴随着很多的问题亟需解决, 其中空间辐射作为空间探索安全保障最重要的问题一直备受关注。空间辐射场主要由两部分组成: 行星磁场俘获粒子(TPS)和宇宙射线。其中宇宙射线主要由太阳质子事件(SPE)和银河系宇宙射线(GCR)组成^[1]。对于地球磁场, 行星俘获粒子即为地磁场俘获带电粒子。空间辐射环境屏蔽即为采取有效的技术和方法来减少进入航天器及受保护物的辐射剂量。在深空探测中, GCR 中的重离子和 SPE 中的质子是主要考虑的屏蔽对象。宇航员每天遭受 GCR 辐射当量剂量率约为 1 mSv, 在 SPE 发生时, 高通量的高能质子持续数小时或数天, 通量约为 10¹⁰ cm⁻²。因此, 在长时间的空间探索及科学研究过程中, 保障宇航员的辐射安全显得非常有必要^[2-3]。在屏蔽的同时应保证航天员的剂量学及生物学效应安全, 美国 NASA 通常采用其自主研发的 HZETRN 和 BRYNTRN 等确定性粒子输运程序模拟辐射屏蔽评估及航天员辐射安全水平计算, 其中 BRYNTRN 用于输运地球俘获质子和 SPE, HZETRN 用于输运银河宇宙射线。本文通过分析初始 GCR 能谱和 SPE 能谱, 使用确定性粒子输运更加精确的蒙特卡罗高能粒子输运工具包 Geant4, 模拟了银河宇宙射线和太阳质子事件在不同等效铝厚度下的空间辐射环境的变化及人体剂量的影响^[4]。

1 材料和方法

1.1 空间辐射环境分析

深空空间辐射场模型主要提供银河宇宙辐射、太阳质子事件粒子的能量分布和空间分布。这是计算带电粒子轨道积分注量和能谱的基础, 然后根据粒子的轨道积分能谱再计算有关的剂量学参数。目前, 空间辐射场模型都是在大量测量数据的基础上, 通过理论模型或半经验公式等其他合理的建模方法而得到。

1.1.1 太阳宇宙射线

随着太阳爆发现象的发生, 太阳也间歇地产生高能带电粒子流。这些与太阳爆发相关粒子叫做太阳高能粒子或者太阳宇宙射线(SCR)。太阳宇宙射线是太阳爆发期间从太阳活动区喷射出来的高能粒子流, 因其主要成分是高能质子, 故称为太阳质子事件(SPE)。太阳宇宙射线的发生是随机的, 并有几天的持续时间, 在太阳活动高年出现更频繁。以 1972 年太阳质子事件为例, 单次事件通量达到 1.8×10^{10} cm⁻²。根据经验, 太阳活动具有周期性, 一般以 11 年为一个周期, 其中 7 年为活动频繁年, 4 年为活动不频繁年。如图 1 所示, NASA/TP-2005-213941 报告中给出了近几年太阳质子事件质子能谱拟合函数, 可用于辐射防护、半导体器件损伤模拟等科学研究^[5-6]。

^{*} 收稿日期: 2012-07-01; 修订日期: 2012-08-28
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(kfjj20110231); 江苏省博士后科研项目(10020120)
作者简介: 耿长冉(1989—), 男, 硕士, 从事辐射防护蒙特卡罗计算研究; gengchr@nuaa.edu.cn.

1.1.2 银河宇宙射线

银河宇宙射线指来自太阳系以外的银河系的高能粒子,是由能量极高、而通量很低的带电粒子组成,在整个行星际空间只具有小的各向异性。对于能量大于 5 GeV 的质子,各向异性为 0.4%,对于 10 MeV 的质子则小于 0.1%。GCR 中粒子种类囊括了质子到铀核的所有离子,其中主要由 98% 的质子和重离子与 2% 的电子和正电子组成^[7]。重离子成分中 87% 是质子,12% 是氦离子(α 粒子),其余 1% 是锂到铀之间的各种带电重离子,如图 2 所示为太阳极小时各种离子的微分能谱,图中横坐标表示单位核子的动能,纵坐标表示单位时间、单位立体角、单位面积、单位能量的粒子数。

GCR 在行星际空间中传播时,受到行星际磁场的影响,其时间特性明显受到太阳活动的影响。特别是银河宇宙射线中的低能粒子,受太阳活动的影响最大,当射线进入日层则会受到随太阳风向外活动的行星际磁场的排斥作用,GCR 的强度在低能区将明显减弱,如图 3 所示。

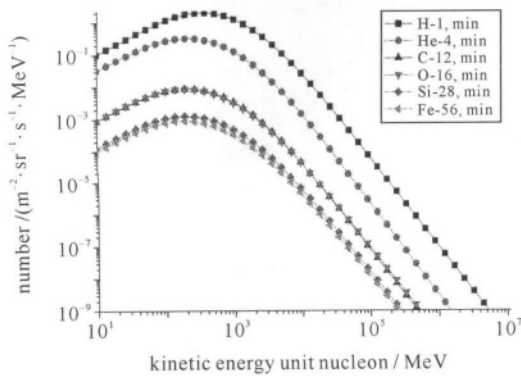


Fig. 2 Galactic cosmic radiation (GCR) differential spectrum of proton and heavy particle of solar minimum and maximum
图 2 银河宇宙射线太阳极小时质子和部分重离子核的微分能谱

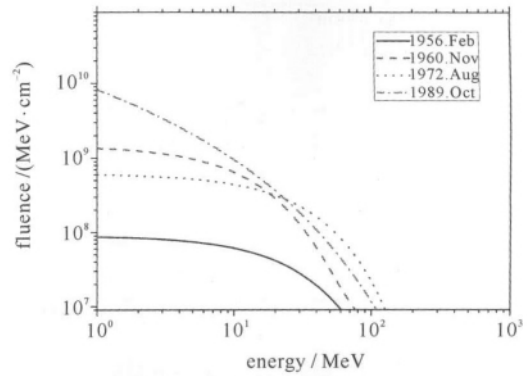


Fig. 1 Solar particle event (SPE) differential proton spectra of four large historic solar particle events
图 1 典型太阳质子事件 SPE 质子微分能谱

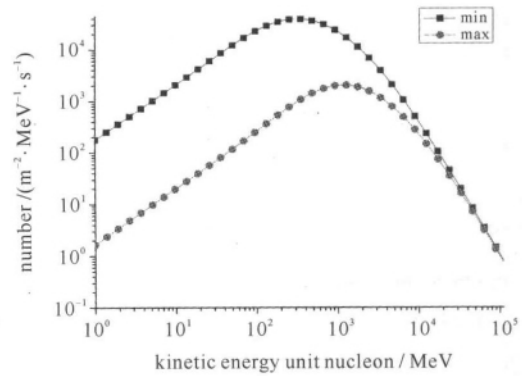


Fig. 3 GCR proton differential spectra of solar minimum and maximum
图 3 银河宇宙射线太阳极大、极小时质子能谱

1.2 粒子运输的蒙特卡罗方法

蒙特卡罗工具包基于面向对象的 C++ 语言编写,具有良好的灵活性、精确性及专业性^[8]。在 Geant4 中,物理过程作为核心包含了电磁相互作用、粒子衰变、强相互作用、光子相互作用。针对空间辐射环境中的高能粒子,我们主要关注电磁相互作用和强子相互作用。电磁相互作用包括电离、激发等。在 Geant4 程序中,强相互作用与电磁相互作用的一个重要的区别在于,电磁相互作用往往是一个过程对应一个模型,而强相互作用往往是一个过程对应了多个模型。针对不同的应用途径,选择合适的物理模型非常重要,本文使用适合于空间辐射场模拟的标准电磁模型和 QBBC 强子物理模型。

2 结果与讨论

2.1 不同能量质子水模体中剂量分布

为验证蒙特卡罗工具包 Geant4 的正确性,本文模拟了质子能量分别为 100, 200, 300 MeV 时水模体中的轴向剂量分布,如图 4 所示。图 4 很好地展示了质子及 α 粒子的布拉格峰,可以看出,随着能量的增大,布拉格峰前段的坪区拉长、峰值减小。布拉格峰之后的末端通常被认为是次级粒子所造成的剂量,但相对于初始粒子所造成的剂量沉积微乎其微。相比质子, α 粒子能量沉积较快,能量增大,坪区拉长,但峰值也有一定的增加。100, 200, 300 MeV 的质子在水中的射程约分别为 7.72, 25.50, 51.45 cm。

2.2 屏蔽后辐射场的深度剂量的分布特征

水作为人体的主要组成成分,约占人体总质量的 73%^[9],研究射线在水中的剂量分布特征可以为射线对人体辐射危险度的评估和辐射屏蔽方法的实施提供有效的指导。本文分别以极大极小时银河宇宙射线质子、 α

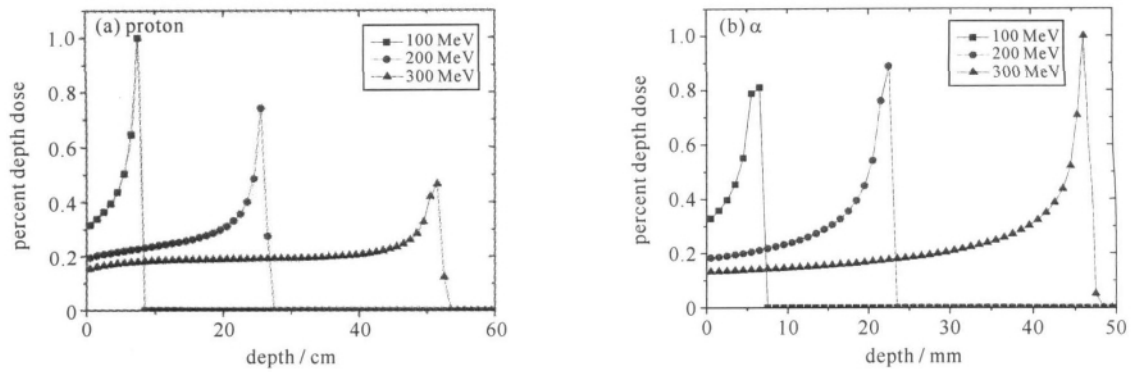


Fig. 4 Percent depth dose of proton and α with different energy

图 4 不同能量质子 α 粒子时百分深度剂量分布

粒子以及 1972 年典型太阳质子事件为初始射线,模拟计算了在经过不同厚度 Al 屏蔽层后的轴向剂量分布以及归一后的深度剂量分布曲线,如图 5,6 所示。

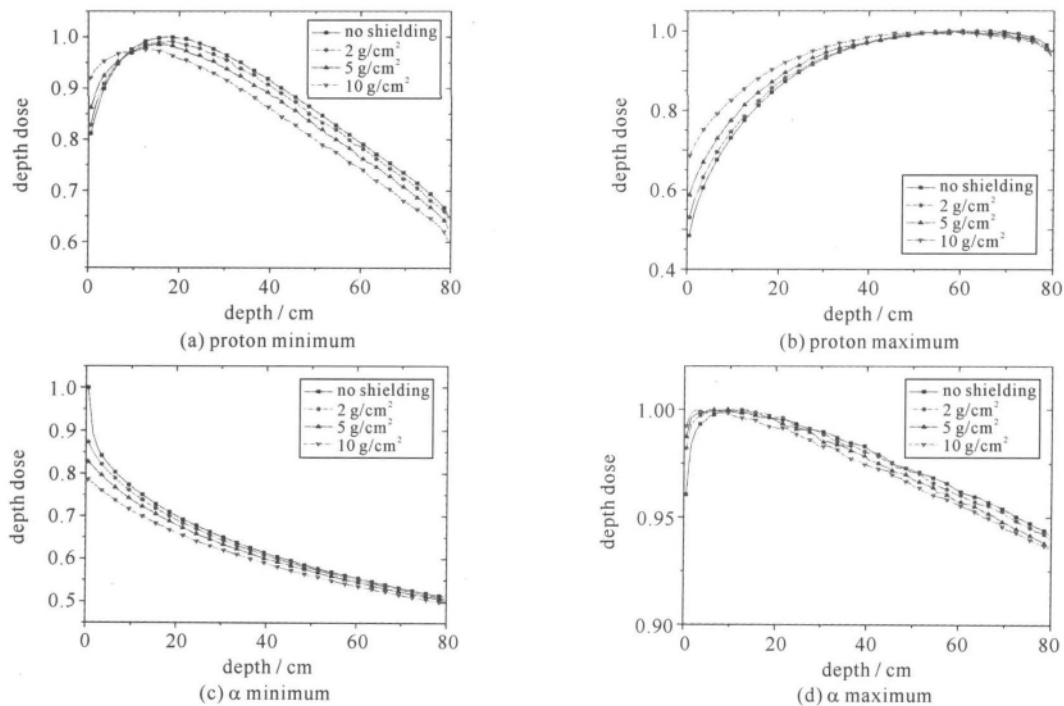


Fig. 5 Axial dose distribution with different Al thickness of proton and α in galactic cosmic radiation(GCR)

at solar minimum and maximum individually

图 5 太阳极大、极小时银河系宇宙射线(GCR)质子和 α 粒子质子穿过不同厚度 Al 屏蔽后的轴向深度剂量分布曲线

从图 5~6 中可以看出,在太阳极小、质子为初始射线时,随屏蔽厚度的增加,浅层处剂量有增加的趋势,并且最大剂量点也有向前平移的趋势,但总体的平均剂量还是有一定的减少。在极大时,整体趋势与极小大致相同,但由于能量的分布使得布拉格峰得到更好的展平,即在 0~51 cm 的探测区域内,随屏蔽厚度的增加,剂量呈增大的趋势,在 51 cm 之后相对减少。这主要是由极大和极小时质子能谱的不同,相对极小时,极大时平均能量较高所造成。考虑人体胸厚参考值为 22 cm,因此在极大时屏蔽会造成银河宇宙射线中质子对人体剂量的增加,而在极小时同样可造成浅层组织的损伤加大,较深部位组织剂量减小。 α 粒子具有和质子类似的性质,但射

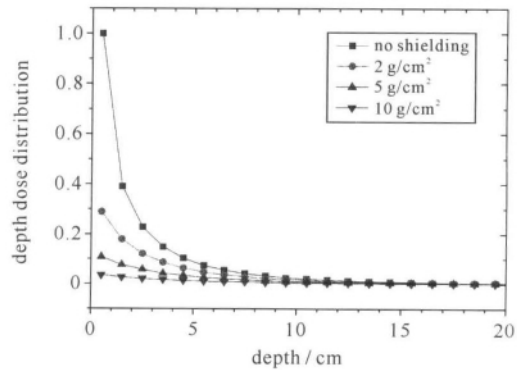


Fig. 6 Axial dose distribution with different Al thickness of proton in SPE
图 6 1972 年太阳质子事件穿过不同厚度 Al 屏蔽后的轴向剂量分布曲线

程相对质子较小,因而在极小时,剂量随屏蔽厚度的增加呈递减趋势,在极大时先呈递增并在最大点之后递减的趋势。不同于银河宇宙射线,太阳质子事件中的质子虽然通量较大,但能量分布大多集中在 100 MeV 以内,因此随着 Al 相对屏蔽厚度的增加,剂量很明显地呈递减的趋势,通过适当的防护即可有效地屏蔽辐射。

2.3 不同 Al 屏蔽厚度下次级粒子产额

使用蒙特卡罗工具包编写了具有 GCR 极大、极小能谱分布的粒子输运程序,分别分析在不同屏蔽厚度下的次级粒子产量。由图 7,8 可看出,在质子及 α 粒子与 Al 发生作用产生的次级粒子中,电子所占粒子分数最大, γ 光子其次,其余是中子及其他核反应产生的次级重粒子。随屏蔽厚度的增加,次级粒子不断增加,尤其是对于中子等高传能线密度射线对人体的剂量贡献将会更加突出,因此在进行航天员辐射危险评估过程中应特别考虑次级粒子的作用。

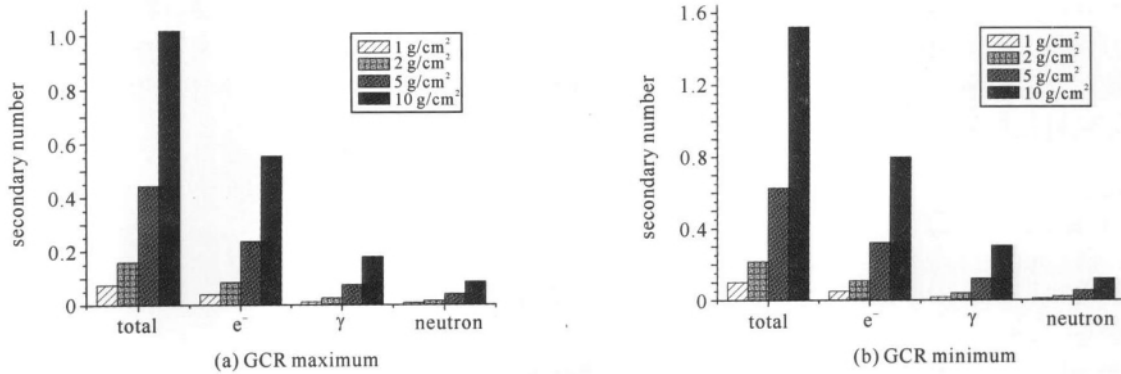


Fig. 7 Number of particle with different Al shielding by GCR proton during solar maximum and minimum

图 7 GCR 太阳事件极大、极小时质子能谱分布下的次级粒子产额

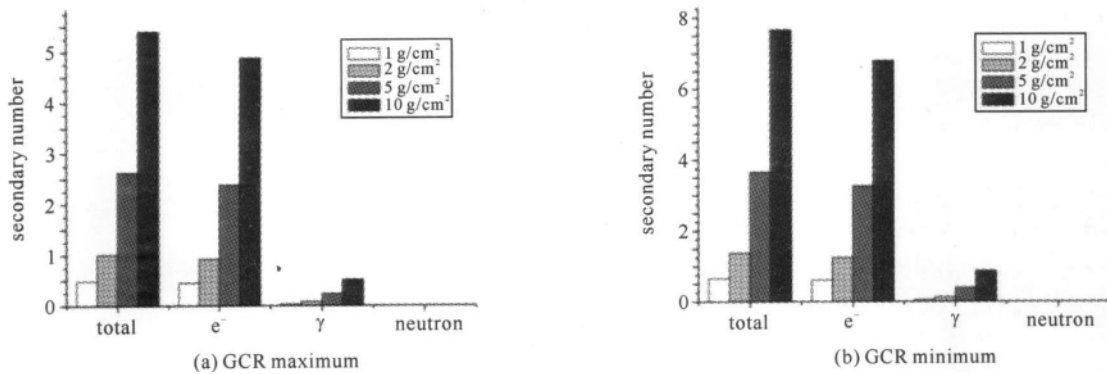


Fig. 8 Number of secondary particle with different Al shielding by GCR α during solar maximum and minimum

图 8 GCR 太阳事件极大、极小时 α 能谱分布下的次级粒子产额

2.4 1972 典型太阳质子事件时不同 Al 屏蔽厚度下的皮肤剂量

针对 1972 年典型太阳质子事件的能谱,本文分别计算了在 1,2,5,10 g/cm² 等效 Al 屏蔽厚度的情况下人体皮肤剂量,计算结果如图 9 所示。可以看出:随着屏蔽厚度的增加,皮肤剂量急剧下降,1 g/cm² Al 屏蔽降低

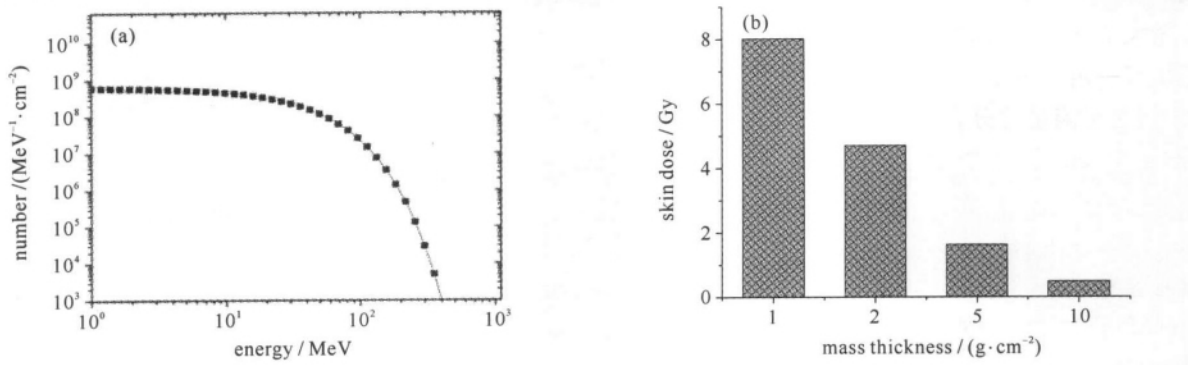


Fig. 9 Skin dose with different Al shielding from proton during 1972-SPE

图 9 1972-SPE 质子能谱及其在不同等效 Al 厚度的皮肤剂量

至初始的 8% 左右, 10 g/cm² 厚度的 Al 可降低至其初始剂量的 0.48% 左右。这说明航天器的紧急屏蔽措施可有效减小太阳质子事件对人体的伤害作用。这主要是因为 SPE 过程中的质子通量虽然较大, 但是能量普遍过低(97% 在 100 MeV 以内), 因此 10 g/cm² 的屏蔽厚度足以屏蔽大部分的质子。因此在空间任务执行时, SPE 临时屏蔽可有效防止航天员免于短时间内承受大剂量的辐射危险。

3 结 论

本文对空间辐射环境进行了分析, 利用蒙特卡罗方法, 针对银河宇宙射线及典型太阳质子事件进行了模拟, 同时分析了常规屏蔽对辐射场及对人体剂量的影响。通过模拟验证了应用于高能物理的蒙特卡罗工具包 Geant4 用于空间辐射防护研究的准确性, 结果发现在常规屏蔽厚度的情况下, 对于太阳质子事件, 屏蔽层对其屏蔽作用较为明显, 这是因为虽然太阳质子事件的通量较大, 但是其能量分布相对较低; 而银河宇宙射线的质子、 α 粒子等能量分布范围过大, 高能粒子较多, 屏蔽层对其屏蔽作用并不显著, 相反对有些组织损伤加大。同时随屏蔽厚度的增加, 次级粒子产额增多, 因此在不同的屏蔽效果下客观地评估在整个航空任务中航天员的辐射剂量及辐射危险度显得更加重要。

参考文献:

- [1] 祁章年. 载人航天的辐射防护与监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. (Qi Zhangnian. Radiation protection and monitoring for manned spaceflight. Beijing: National Defense Industry Press, 2003)
- [2] Cucinotta F A, Durante M. Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings[J]. *The Lancet Oncology*, 2006, 7(5):431-435.
- [3] Schimmerling W, Cucinotta F, Wilson J. Radiation risk and human space exploration[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(1):27-34.
- [4] Ballarini F, Battistoni G, Cerutti F, et al. GCR and SPE organ doses in deep space with different shielding: Monte Carlo simulations based on the FLUKA code coupled to anthropomorphic phantoms[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(9):1791-1797.
- [5] Badavi F F, Wilson J W, Hunter A. Numerical study of the generation of linear energy transfer spectra for space radiation applications[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 47(9):1608-1615.
- [6] 路伟, 王同权, 王尚武, 等. GEANT4 SPE 质子屏蔽和半导体材料辐射效应模拟[J]. 计算物理, 2009, 26(4):591-596. (Lu Wei, Wang Tongquan, Wang Shangwu, et al. Geant4-based simulation on shielding and radiation effects of SPE protons in semiconductors. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2009, 26(4):591-596)
- [7] O'Neill P M. Badhwar-O'Neill galactic cosmic ray model update based on advanced composition explorer(ACE) energy spectra from 1997 to present[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(9):1727-1733.
- [8] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. GEANT4—a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2003, 506(3):250-303.
- [9] Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection reference values[J]. *Annals of the ICRP*, 2002, 32(3/4):1-277.

Space radiation environment and human dose calculation based on Monte Carlo method

Geng Changran¹, Tang Xiaobin¹, Xie Qin², Chen Da¹

(1. Nuclear Science and Engineering Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nuclear Science and Technology Division, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Proton and alpha differential spectrum from galactic cosmic radiation(GCR) and solar particle event (SPE) were analyzed, also calculations about inside shielding environment and skin dose were performed. Through simulation we confirmed the precise of Geant4 again. The depth dose distribution of the inside radiation was calculated to get more information about the space environment inside shielding. As a conclusion, both with GCR proton and alpha particle there is no obvious decrease of dose with Al shielding, however, SPE spectrum does weaken as it has different energy distribution. We calculated the skin dose under different shielding thickness of 1972 SPE, obvious dose decrease was attained with increase shielding thickness.

Key words: space radiation; spectrum distribution; Monte Carlo method; secondary particle; human dosimetry