

GEANT 程序在空间粒子探测器优化设计中的应用

张珅毅^{1,2} 王世金¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(中国科学院研究生院)

摘 要 在众多的蒙特卡罗模拟程序中, 介绍了其中的一种程序——GEANT 程序. 首先对蒙特卡罗方法的产生和基本思想作了解释, 对 GEANT 程序的主要模块和基本结构以及粒子在程序中的传输过程作了描述. 在程序中, GEANT 程序应用了先进的 ZEBRA 存储管理器, 使各个模块之间的联系更为方便. 在空间粒子探测中, 利用 GEANT 程序, 可以计算空间粒子在探测器中的能量损失, 在不同材料中的射程以及产生的次级粒子的数量, 最后利用 GEANT 程序可以模拟出各种粒子在不同材料中的 LET 值, 本文还进一步表明了蒙特卡罗方法对空间粒子探测的重要意义.

关键词 蒙特卡罗; 线性能量转移; 单粒子翻转

中图法分类号 P 412

Application of GEANT Program to Design Space Particle Detector and Optimize

ZHANG Shenyi^{1,2} WANG Shijin¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract GEANT is an important Monte Carlo program and this program is in principal applied in high energetic physics. As the scale and complexity of high energy physics experiments increase, simulation studies require more and more care and become essential to the design and optimizing of the detectors, development and test of the reconstruction and analysis of programs, also to interpreting the experimental data. It has been found today applications also outside this domain in areas such as medical and biological sciences, radio-protection. With the development of space technique, design of the particle detector is helped by the Monte Carlo simulation too. The principal applications of GEANT in space particle detection are: the transport of particles through a detector for the simulation of detector response; the graphical representation of the setup and of the particle trajectories. GEANT uses the memory manager ZEBRA, it can help us to manage and store the data easily. In this paper, the primary structure and the process of particle transferring in detector is introduced. With GEANT program, many problems in particle detections can be solved, such as the particle's energy deposition in detector, the linear energy transfer in matter.

Key words Monte Carlo, Linear energy transfer, Single particle upset

1 引言

GEANT 程序是一种基于蒙特卡罗方法的模拟程序^[1]。蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法又称随机抽样技巧或统计实验方法^[2], 它是以概率统计理论为基础的一种方法^[3]。由于蒙特卡罗方法能够比较逼真地描述事物的特点及物理实验过程, 解决一些数值方法难以解决的问题, 因而该方法的应用领域日趋广泛。

GEANT 是一个用于描述探测器系统和进行物理分析的模拟工具。它主要有 3 个功能: 一是设计和最优化探测器; 二是对分析过程进行事例重建, 三是对实验数据进行验证和解释。

GEANT 最初主要用于理论高能物理的研究, 现在在空间粒子探测中, 运用 GEANT 程序对探测器进行描述, 然后对粒子与探测器相互作用情况进行模拟也得到了很好的效果。

本文对 GEANT 程序在空间粒子探测中的应用进行了研究。

2 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法, 是属于计算数学的一个分支, 它是在 20 世纪 40 年代中期为了适应当时原子能事业的发展而发展起来的。传统的经验方法不能逼近真实的物理过程, 很难得到满意的结果, 而蒙特卡罗方法能真实地模拟实际物理过程, 可以得到很圆满的结果, 这也就是我们采用该方法的原因。

当所求问题的解是某个事件的概率, 或是某个随机变量的数学期望, 或是与概率、数学期望有关的量时, 通过某种试验的方法, 得出该事件发生的概率, 或者该随机变量若干个具体观察值的算术平均值, 通过它得到问题的解。这就是蒙特卡罗方法的基本思想。

Monte Carlo 方法的基本思想很早以前就被人们发现和利用。但是为了得到一定精确度的近似解, 所需试验的次数是很多的。随着近年来高速电子计算机的出现, 使得蒙特卡罗方法得以广泛地应用, 在现代化的科学技术中发挥应有的作用。

蒙特卡罗方法的优点: ①能够比较逼真地描述具有随机性质的事物的特点及物理实验过程; ②受几何条件限制小; ③收敛速度与问题的维数无关;

④具有同时计算多个方案和多个未知量的能力; ⑤误差容易确定; ⑥程序结构简单, 易于实现。

在粒子物理中, 蒙特卡罗方法也得到了广泛的应用。根据蒙特卡罗方法设计的程序也很多, 如 GEANT 程序, TRIM 程序, MCNP 程序和 EGS 4^[5] 程序。

3 GEANT 程序介绍

3.1 基本结构

在空间粒子探测中, 研究的也主要是粒子与探测器以及各种材料之间的相互作用, 因此针对粒子物理设计的蒙特卡罗程序当然也能在空间粒子探测中得到应用。GEANT 程序在探测器的结构描述, 粒子的状态物理量计算方面具有更高的准确性。其方便简洁的程序结构也使其成为在空间粒子探测模拟中应用的主要蒙特卡罗程序。GEANT 程序现在为一个公开的软件, 在欧洲原子能研究组织 (CERN) 的网站上即可下载得到。

在 GEANT 程序中我们可以画出粒子探测器的形状及探测器的物质属性, 对粒子进入探测器中的物理过程、反应机制进行模拟, 得到我们感兴趣的物理量, 如能量损失, 穿透距离等^{[6],[7]}。GEANT 的基本结构主要有三部分组成, 即初始化, 事件过程, 结束程序。

(1) 初始化

初始化程序由用户控制。包括初始化 GEANT 的公共数据块和数据结构, 初始化存储管理器和绘图数据包, 提供粒子属性数据结构和物质属性数据结构等。初始化事件过程后, 需要在几何子程序段中描述探测器的形状和物质组成等特性, 并描述入射粒子的状态: 粒子种类, 粒子的入射点和粒子各个方向的动量。

(2) 事件模拟

这个过程为整个程序的核心部分, 它对粒子在探测器中的模拟传输进行总体控制。包括: 针对粒子和探测物质的类型对可能发生的物理反应进行抽样, 从而确定粒子每一步发生的物理反应, 确定粒子的作用点和粒子单个步长的长度, 确定是否跟踪次级粒子, 并随时将粒子的物理状态如坐标、动量等放入固定的存储器以便随时读取。用户可根据需要随时将所需变量输出。

(3) 结束程序

结束程序由用户定义和控制, 用户可以控制和输出需要的物理量以及一些统计信息. 如每一个事件的平均时间, 粒子的射程等. 整个程序的流程如图 1 所示.

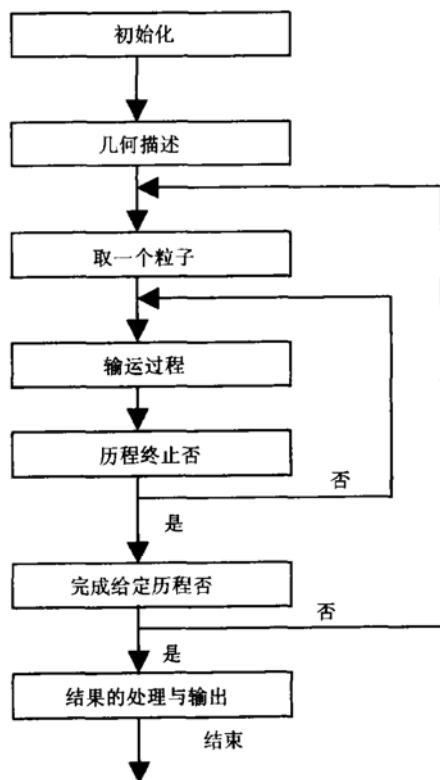


图 1 GEANT 程序流程

Fig.1 The flow chart of GEANT program

3.2 公共块和数据结构

GEANT 程序运用 ZEBRA^[8] 存储管理器, 充分利用公共块之间的数据结构是 GEANT 程序的一大特点. 各个程序段间的数据联系依靠数据之间的结构和公共块之间的大范围变量来完成, 子程序间的关联也主要通过公共块中的变量来完成. 使用大量的公共块和公共变量, 使整个程序结构简洁, 可读性更好. 每一个程序段都会有一个或者几个公共模块, 包含着几个甚至几十个系统自己定义的变量. 通过这些变量就可以随时在程序中得到所需要的物理量.

GEANT 程序数据结构图如图 2 所示.

3.3 基本原理和过程

蒙特卡罗方法解决粒子作用问题包括三个过程, 即源分布抽样过程, 空间、能量和运动方向的

随机游动过程及记录分析结果过程.

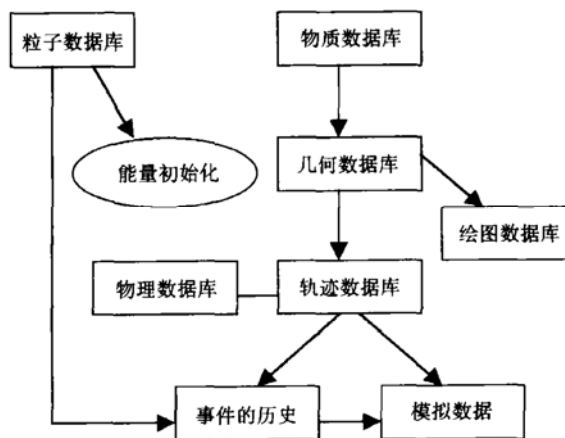


图 2 GEANT 程序数据结构

Fig.2 The data structure of GEANT program

源粒子的位置常见分布的随机抽样有: 圆内均匀分布, 电源分布, 平面源分布等. 源粒子的能量常见分布的随机抽样有: 单能源分布, 裂变中子谱分布. 源粒子的运动方向常见分布的随机抽样有: 各向同性分布, 球外平行束源分布. 根据不同的源分布, 确定源分布的抽样方法.

源确定以后, 下一步需要计算粒子的穿越过程. 在 GEANT 程序中, 模拟粒子在探测器物质中的穿越过程 (如韧致辐射, 产生射线, 康普顿散射等) 的步骤如下.

(1) 从数据段中取出一个新粒子. 这是在每一个新粒子路径开始前必须做的. 对于每一种粒子可能发生的反应分别进行抽样, 得到在发生该反应前粒子的平均自由程的数目.

(2) 计算到作用点的距离. 这由控制粒子轨迹的专门的程序段来完成. 在上一步抽样得到的粒子可能的平均自由程的数量都要保存下来, 分别与各自的物理反应的微分散射截面相乘, 这样就求出在当前物质中每一个物理机制发生之前, 粒子可能将要走过的路径长度, 这些值中的最小值将成为粒子下一步的步长, 从而确定粒子该步发生的物理机制. 除了物理机制外, 在计算中还要考虑以下 4 个因素.

①边界穿越. 穿越一种物质的边界被当成离散的过程. 一个例子不可能在一个步长中穿过边界, 而是停在边界处.

②最大步长限制. 在每个传输介质中粒子的最大步长都可以由用户自己定义.

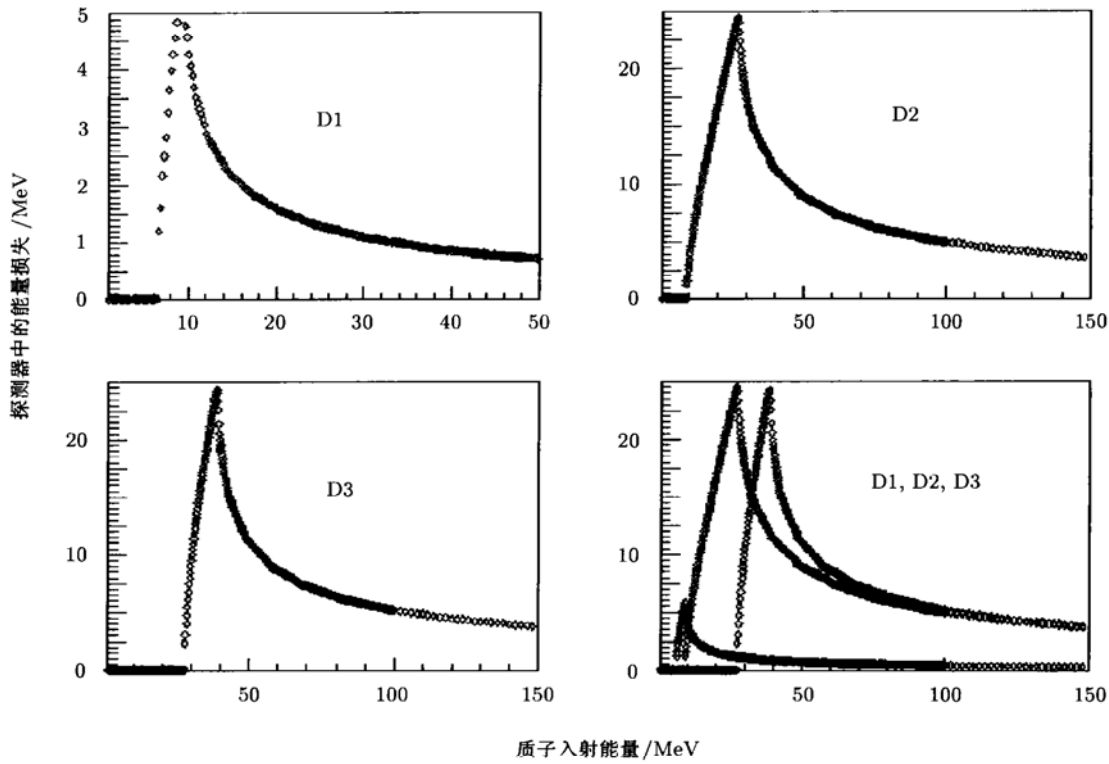


图 3 质子分别在三个硅探测器中的能量损失

Fig.3 The energy deposition that protons lost in three silicon detectors

③最大的连续能量损失. 在磁场中粒子的最大偏离角度, 这些连续性的过程在每个步长中都有限制.

④能量和时间阈值. 当带电粒子的能量低于给定的阈值或者粒子的飞行时间超过了给定的值, 我们都会认为粒子已经停止运动了.

(3) 粒子沿着一条直线 (没有磁场或中性粒子) 或一条螺旋线 (有磁场的带电粒子) 进行传输.

(4) 更新粒子的能量.

(5) 如果选择了离散的物理过程, 产生作用后的末态.

(6) 如果入射粒子在作用过程中没有湮灭, 再一次对可能的作用路径进行抽样.

(7) 更新所有过程的作用路径并返回第二步, 直到下面的几种情况之一发生: 粒子离开探测器, 粒子湮没或消失, 粒子的能量降到阈值以下, 飞行时间超过阈值.

GEANT 程序中作用长度的计算. 作用长度又称平均自由程, 入射粒子与探测物质的其他分子或原子每连续两次碰撞走过的平均路程. 用 $\sigma(E, Z, A)$ 表示一个给定反应过程的总反应截面, 一个粒子在

某个过程中的自由程就为 $\lambda = 1/M$. M 为积分散射截面, 单位为 cm^{-1} .

$$M = \frac{N_A \rho \sigma(E, Z, A)}{A}$$

对于一个混合型物质,

$$M = \frac{N_A \rho \sum_i n_i \sigma(E, Z_i, A_i)}{\sum_i n_i A_i} \\ = N_A \rho \sum_i \frac{p_i}{A_i} \sigma(E, Z_i, A_i).$$

其中, N_A 为阿佛加得罗常数, Z 为原子序数, A 为原子量, ρ 为密度, σ 为总反应截面, n_i 为第 i 种元素在物质中的数量比, $p_i = n_i A_i / \sum_j n_j A_j$.

GEANT 程序中能量损失的计算. 基本原理为由初始能量 E_0 计算出粒子的路径长 R_0 , 然后可以算出粒子在经过了一个步长 step 后的剩余路径 $R'_0 = R_0 - \text{step}$, 由 R'_0 计算出粒子的剩余能量 E'_0 , 这时粒子在该步长中的能量损失为

$$\Delta E = E_0 - E'_0.$$

目前使用的 GEANT 版本号为 3.15, 但是 GEANT4 已经开始使用.

4 空间粒子探测中的应用

尽管 GEANT 程序主要是为高能物理和粒子物理的应用而设计, 但是在空间粒子探测中运用 GEANT 程序同样可以解决许多问题.

4.1 粒子在探测器中的能量损失

在空间粒子探测中, 我们的仪器要对粒子的能量范围进行能道划分, 这就需要在各个探测器上加上不同的鉴别阈. 因此为了精确确定鉴别阈, 我们必须事先知道不同能量的各种粒子在各个探测器中的能量损失. 在知道了入射粒子情况和探测物质的成分后, 运用 GEANT 程序可以轻易地得到粒子的能量损失. GEANT 程序在实际运行中, 还可以对可能发生的物理机制进行控制, 例如有没有韧致辐射, 会不会产生电子对效应等等. 为了准确地模拟我们所需的物理量, 必须对相应的物理机制做出准确的调整.

一个典型的由三片探测器组成的半导体望远镜, 铝挡光层 $300\ \mu\text{m}$, D1, D2, D3 为三片硅探测器, 其厚度分别为 $300\ \mu\text{m}$, $3.5\ \text{mm}$, $3.5\ \text{mm}$. 图 3 为质子分别在三个硅探测中的能量损失曲线. 通过程序模拟不同能量的质子在探测器中的能量沉积, 是仪器电子学设计的必要手段.

4.2 粒子在探测器中的射程

空间中存在着大量的高能粒子, 为了保护卫星, 延长各种仪器使用寿命, 必须提高仪器的抗辐射性能. 卫星表面或仪器的四周一般要选取一定厚度的屏蔽层, 阻止空间中各种粒子的穿越. 这样就需要知道要屏蔽一定能量粒子的屏蔽层需要多厚, 或是一定厚度的挡光层能够屏蔽多少能量的粒子. 这时要知道粒子的穿透能力, 即各种粒子在物质中的射程, 在设计探测器时也需要知道粒子在探测器中的射程.

图 4 为利用 GEANT 程序模拟出能量为 $1\ \text{MeV}$ 的电子在铝中的射程涨落. 由于电子射程涨落现象明显, 因此其峰形状展宽现象也明显. 可以由图中看出, 模拟 1000 个粒子事件, $1\ \text{MeV}$ 的电子在铝中的平均射程为 $0.2049\ \text{cm}$, 峰形半高宽为 0.03378 .

GEANT 程序既可以给出单能粒子统计涨落情况, 也可以给出不同种类和不同能量的粒子在各种

探测物质中的平均射程. 图 5 和图 6 为质子和电子分别在硅和铝中的射程. 能量对应的射程为该能量在物质中的平均射程.

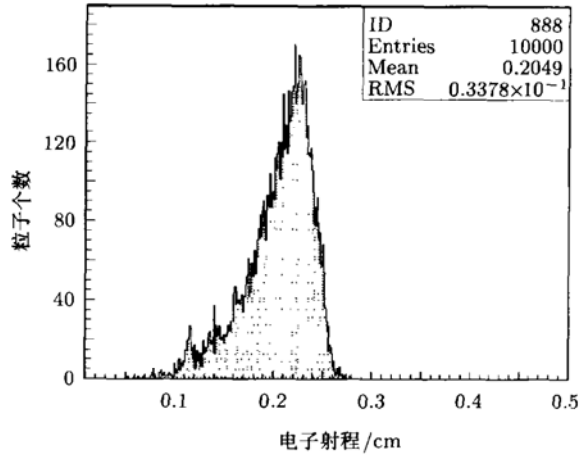


图 4 $1\ \text{MeV}$ 的电子在铝中的射程的统计涨落图

Fig.4 The statistical fluctuating figure that of electron's range in aluminum

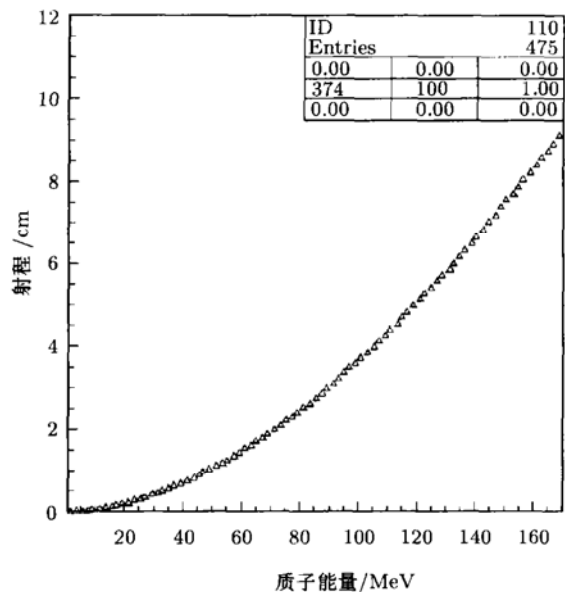


图 5 质子在硅中的平均射程

Fig.5 The range of proton in silicon

4.3 粒子在探测器中产生的次级粒子

在粒子探测中, 为了降低次级粒子的干扰, 选取适当的材料或为了在后处理中从数值上排除次级粒子的干扰信号, 需要知道粒子在探测介质中产生的次级粒子的种类和数量. 在 GEANT 程序中, 只要知道了相互作用的粒子和物质, 程序自动完成次

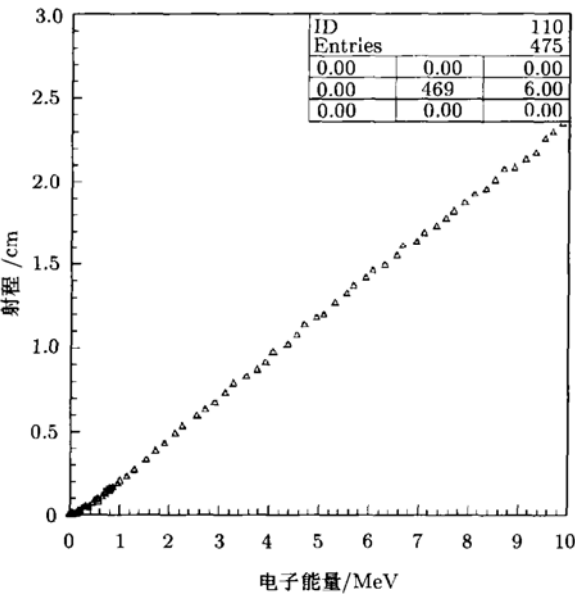


图 6 电子在铝中的平均射程

Fig.6 The range of electron in aluminum

级粒子的产生, 在程序中对变量进行控制就可以得到次级粒子的种类和数量.

图 7 是能量为 10 MeV 的 γ 光子在硅探测器中产生的次级粒子数量. 进行了 4000 个粒子事件的模拟, 产生的次级粒子分别为 γ 光子、正电子和电子, 其数目如图 7 所示. 在 GEANT 程序中系统默认的设置是不跟踪次级粒子, 当用户需要知道次级

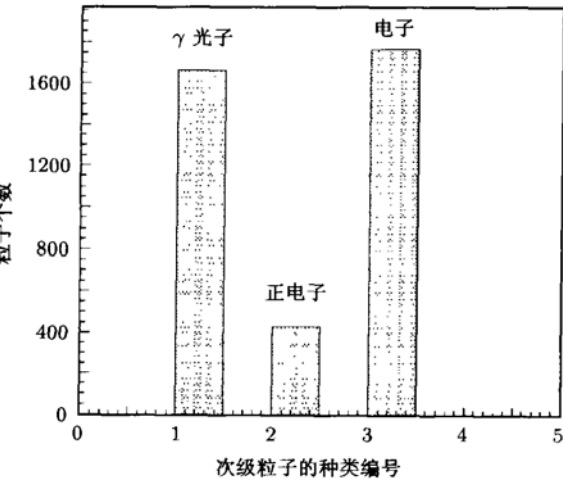


图 7 γ 光子在硅探测器中的次级粒子

Fig.7 The second particles that γ -ray produce in silicon detector

粒子的产生情况时, 将系统默认的情况改为跟踪次级粒子即可.

4.4 粒子在物质中的 LET 值

线性能量转移 (linear energy transfer) 是指一运动中的高能带电粒子 (如一电子或质子) 每单位长度传给行程中原子或分子的能量. 一个很重要的方面是粒子对人体组织的能量转移, 虽然不同能量, 不同种类的粒子对人体的影响不同, 但其机制是一样的, 即能量损失. 在工作中我们引入了剂量的概念来估算粒子路径上单位质量的物质所接受的粒子的能量 [9], 其单位是 rad (100 Gy).

而在空间粒子探测中, 这也是一个非常重要的物理量, 通过计算高能粒子在各探测物质中的 LET 值, 是我们研究粒子对探测器的辐射损伤, 以及研究单粒子翻转概率的重要物理量 [10],[11]. 单粒子效应是指单个高能带电粒子使微电子器件状态改变, 导致其逻辑状态非正常改变或功能受到干扰的事件. 一般分为单粒子翻转事件和单粒子锁定事件 [12]. 单粒子效应虽然是单个粒子入射引起的小概率事件, 但是其引起的后果可能是灾难性的. 在研究单粒子效应, 单粒子的翻转概率时, 必须知道入射粒子在物质中的 LET 值. 除了用实验得到, 用程序进行模拟也是方便快捷的一种方法, 并且能够提供不同类型和能量的粒子在物质中更宽范围内的 LET 值.

图 8 和图 9 分别为通过 GEANT 程序模拟出的

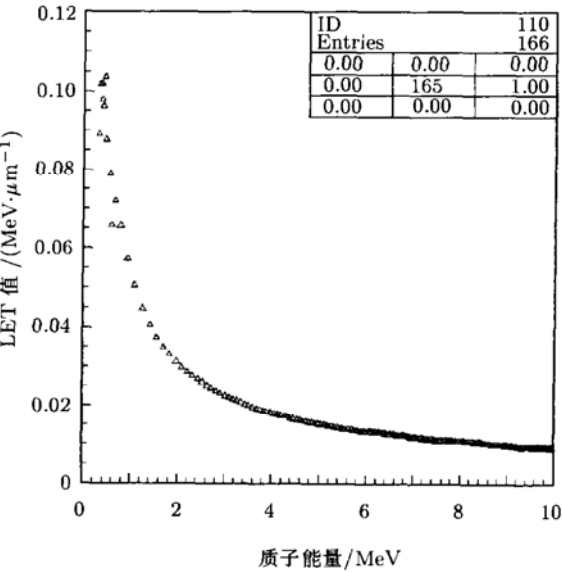


图 8 质子在铝中的线性能量转移

Fig.8 The LET that proton produce in Al

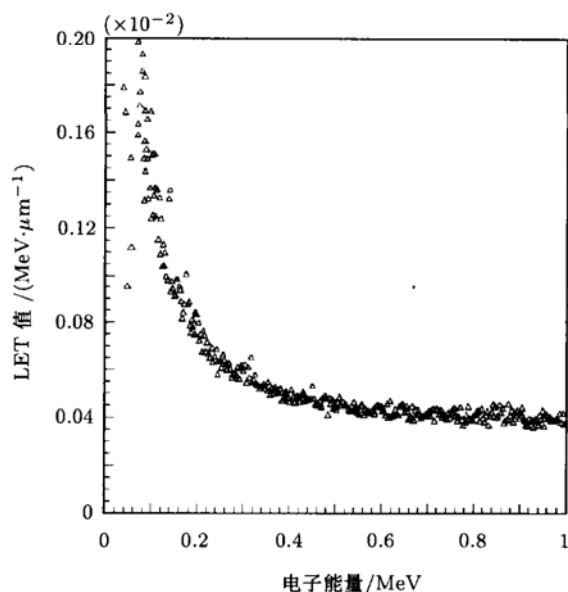


图9 电子在铝中的线性能量转移
Fig.9 The LET that electron produce in Al

质子和电子在铝中的线性能量损失. 通过模拟所得数据, 可以进行更多的单粒子翻转方面的研究, 研究单粒子翻转的概率, 为卫星的安全和稳定工作提供必要的技术支持.

5 小结

介绍了一种蒙特卡罗模拟程序——GEANT 的基本结构和原理. 并阐述了如何利用 GEANT 程序解决在空间粒子探测中遇到的一些问题. 利用程序进行模拟计算是我们进行探测器设计的重要手段. 利用模拟得到的数据, 可以更方便地设计和优化探测器, 并对探测器整体性能作出理论评估.

除了本文列举的一些应用外, GEANT 还有很多其他应用, 例如, 画出粒子在物质中的运动轨迹, 利用蒙特卡罗方法研究卫星内部带电问题^[13], 值得一提的是仪器设计中一个很重要的物理量: 几何因子. 通过 GEANT 程序可以模拟出仪器的几何因子, 但这是研究的重点和难点, 目前能利用 GEANT 程序计算仪器的几何因子的人很少. GEANT 程序的功能是十分强大的, 将 GEANT 程序应用在空间

粒子探测方面也还只是开始, 还有更多的功能需要深入研究.

参考文献

- [1] Brun R, Hansroul M, Lassalle J C. GEANT user's guide, DD/EE/82 edition, 1982
- [2] XU Zhongji. The Method of Monte Carlo. Shanghai: Science Technology Press, 1985. in Chinese (徐钟济. 蒙特卡罗方法. 上海: 上海科学技术出版社, 1985)
- [3] Wang Zikun. The Foundation and Application of Probability Theory. Beijing: Science Press, 1976. in Chinese (王梓坤. 概率论基础及其应用. 北京: 科学出版社, 1976)
- [4] Pei Lucheng. Random Simulation of Computer. Changsha: Hunan Science Technology Press, 1989. in Chinese (裴鹿成. 计算机随机模拟. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1989)
- [5] Nelson W R *et al.* The EGS4 code system. Technical Report 265, SLAC, 1985
- [6] Cashwell E D, Everitt C J. A Practical Manual on the Monte Carlo Method for Random Walk Problems. Pergamon Press, 1959
- [7] Pe Lucheng, Zhang Xiaozhe. The Method of Monte Carlo and Application in Transport Particles. Beijing: Science Press, 1980. in Chinese (裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用. 北京: 科学出版社, 1980)
- [8] Brun R, Goossens M, Zoll J. ZEBRA User's Guide, Program Library Q100. CERN, 1991
- [9] Xue Bingseng, Ye Zonghai. Calculate the dose that high energy proton produce in body. *Manned Spaceflight*, 1998, 4:12—16. in Chinese (薛丙森, 叶宗海. 空间高能质子在人体组织中剂量的计算. 载人航天, 1998, 4:12—16)
- [10] Han Jianwei, Ye Zonghai. Prediction of proton-induced single event upset. *Chin. J. Space Sci.*, 1999, 19(3):24—30. in Chinese (韩建伟, 叶宗海. 质子引发的单粒子翻转率的影响. 空间科学学报, 1999, 19(3):24—30)
- [11] Han Jianwei. The effect of high energy heavy ions do to single event upset. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, 20(4):32—36. in Chinese (韩建伟. 高能重粒子径迹对单粒子翻转的影响. 空间科学学报, 2000, 20(4):32—36)
- [12] Ye Zonghai. The effect that space environment do to aviation. *Manned Spaceflight*, 1997, 1:52—60. in Chinese (叶宗海. 空间环境对航天活动的影响. 载人航天, 1997, 1:52—60)
- [13] Gao Bingrong *et al.* A study on spacecraft internal charging with Monte Carlo method. *Chin. J. Space Sci.*, 2004 24(4):289—294. in Chinese (高炳荣等. 用蒙特卡罗方法研究卫星内部带电问题. 空间科学学报, 2004, 24(4):289—294)