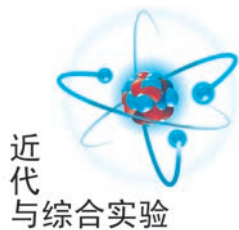


文章编号:1005-4642(2020)12-0009-06



使用 betaSim 模拟 β 粒子检验 相对论的动量-动能关系实验

王思广, 罗棱尹, 张戈辉, 章立诚, 刘晓楠, 贾春燕
(北京大学 物理学院 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要:基于 Geant4 开发了 betaSim 软件, 模拟 β 粒子在磁场中偏转并被探测的全过程. 该软件可以模拟经过不同长度的空气及不同厚度的铝片衰减后的 β 粒子能谱, 也可以模拟用 ^{137}Cs 及 ^{60}Co 放射源进行能量刻度的 γ 射线能谱, 重现利用 β 粒子验证相对论动量-动能关系实验. 通过可视化的粒子径迹图及分析模拟数据, 学生加深了对实验的理解, 通过学习模拟代码探索粒子与物质相互作用的细节.

关键词: β 粒子; Geant4 模拟; 能谱; 动量-动能关系

中图分类号: O571.1; O4-39

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.12.002

β 粒子的能量损失主要有电离、辐射以及多次散射 3 种方式^[1], β 粒子穿过一定厚度的材料后强度及能量都会减弱. 在近代物理中, 研究 β 粒子在材料中的衰减能够帮助学生深入探究 β 粒子与物质的相互作用. 笔者基于 Geant4 软件包开发了软件 betaSim, 其可用于模拟北京大学物理学院近代物理实验课程中开设的“ β 粒子检验相对论的动量-动能关系”^[2]和“准单能 β 射线在空气及铝膜中的衰减”^[3]实验. 该软件可模拟 β 粒子在磁场中的偏转及在空气、铝片中的衰减, 学生可以不受时间、地点以及实验条件的限制自行开展模拟实验, 具有安全、高效且经济的特点. 通过模拟实验, 学生能更好地理解实验过程并对粒子物理与原子核物理学科中用途广泛的 Geant4^[4-6] 模拟软件有所了解. 国内很多大学都开设了对应的课程^[7-9], 部分学校也进行了仿真模拟. 例如实验空间 <http://www.ilab-x.com/> 上由徐志君老师开发的“核辐射防护及快速电子动能与动量相对论关系的验证”(浙江工业大学)、徐音老师开发的“核衰变及高速带电粒子动能动量测量”(南开大学). 这些教学基于网页运行, 且注重于实验过程, 相比之下本模拟为学生提供所有的代码, 更有利于学生深入研究模拟技术的细节.

1 实验原理及装置

1.1 实验原理

放射性核素发生普通的 β 衰变会产生 1 个原子序数相差 1 但质量数相同的核素, 放出 1 个电子的同时放出 1 个反中微子. 在这一衰变过程中携带出的衰变能 Q 将由电子、反中微子和反冲核所分配, 由于 3 种粒子的发射角度任意, 因此每种粒子所释放的能量不确定, 其中 β 粒子的能谱从 $0 \sim Q$ 连续分布. 为了确保重现真实实验, 开发 betaSim 软件选取的放射源与课程实验中选取的相同, 均为 $^{90}_{38}\text{Sr} - ^{90}_{39}\text{Y}$ 源, 所用能谱 $0 \sim 2.27 \text{ MeV}$ 连续分布, 如图 1 所示^[2].

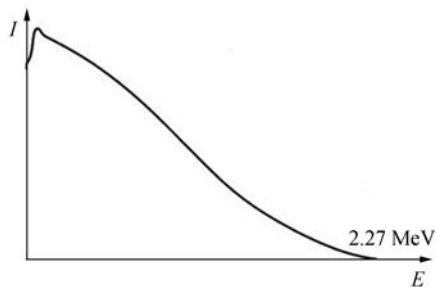


图 1 $^{90}_{38}\text{Sr} - ^{90}_{39}\text{Y}$ 放射源能谱图

收稿日期: 2020-07-31; **修改日期:** 2020-09-26

基金项目: 2020 年北京大学本科教学改革项目 (No. 7100901172)

作者简介: 王思广 (1971—), 男, 江苏丰县人, 北京大学物理学院副教授, 博士, 研究方向为高能物理与核物理. E-mail: siguang@pku.edu.cn



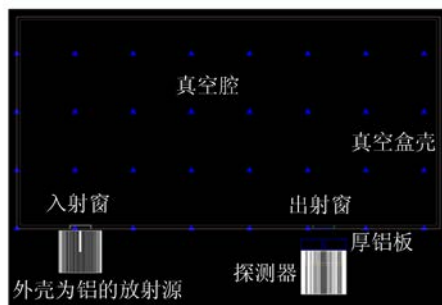
实验中利用 β 粒子在已知磁感应强度的均匀磁场内的偏转半径测量动量,用 NaI 闪烁体探测器测量放射源产生的 β 粒子的动能。当 β 粒子垂直入射到抽真空后的均匀磁场中,带电粒子在磁场中受到洛伦兹力的作用而做圆周运动。对于电荷为 e ,在磁感应强度为 B 的磁场中运动的粒子,其动量 $p=eBR$ 。通过改变探测器与放射源的距离 d 实现对出射的 β 粒子的动量选择。当具有特定动量的 β 粒子从磁场出射后,进入 NaI 闪烁体探测器,将能量部分或全部沉积在晶体内,产生多个光学光子。betaSim 模拟全过程并记录光子数,得到能谱。

1.2 实验装置

实验装置结构如图 2 所示,各部分材料如表 1 所示。



(a) 外形图



(b) 细节部分

图 2 实验装置示意图

表 1 实验装置各部分的材料

结构	材质
真空盒内部	真空/空气
出射窗	有机膜
真空盒	Al
探测器外壳	Al
放射源外壳	Al
上下平行板磁铁	Fe
探测器	NaI

实验装置的主体结构为真空盒,真空盒上下放置 2 块磁铁(提供恒定、均匀磁场),在真空盒一

侧开有多个窗口,窗口覆盖有机膜,以确保在抽真空的过程中阻止空气进入真空盒。其中最左侧窗口处放置 $^{90}_{38}\text{Sr}-^{90}_{39}\text{Y}$ 放射源,探测器前加 10 mm 厚的铝板屏蔽,中间有 3 mm 宽的狭缝,用于筛选特定偏转半径的粒子。探测器可以移动到不同的出射窗口接收 β 粒子,也可以在探测器与出射窗之间加不同厚度的铝片,测量铝对 β 粒子的衰减。

2 模拟软件

Geant4 软件是由欧洲核子中心基于 C++ 面向对象开发的蒙特卡罗应用软件包,可以精确建立模型,模拟粒子在物质中的运输过程。该工具包提供了探测器模拟的完整工具,包括几何、探测器响应、粒子运输、事例以及径迹管理、图像显示、用户接口等。Geant4 软件代码开源。自 1999 年建立 Geant4 合作组以来,Geant4 的功能不断被发展完善,已经被广泛应用在高能物理、核技术、核物理、医学物理等研究领域。

betaSim 软件包描述实验装置,模拟跟踪 β 粒子与磁场、各材料物质的相互作用,最后给出 NaI 探测器产生的光子数。设计主要步骤如下:

1)几何构建。在 Geant4 中用户可以通过继承 G4VUserDetectorConstruction 类进行几何的构建,实现对几何体的形状、尺寸、放置位置、材料、旋转等的定义,模拟实验对 β 谱仪的探测器系统进行等尺寸构建,建立整体及探测器部分细节模型,如图 2 所示。

2)实验条件参量设置。实验中对真空盒内磁场设置为 6.555×10^{-2} T 的永恒匀强磁场(该值可自由设置),真空盒可以设置为 1.01×10^5 Pa 的空气或 0.1 Pa 的真空(用机械泵抽真空达到的真空度)。

3)物理过程设置。物理列表是 Geant4 软件中最重要的用户类之一。betaSim 软件注册参与相互作用的粒子包括:电子、正电子、光子、中子和放射性核素等。根据相互作用点的粒子注册物理过程,包括弹性散射、非弹性散射、电离、运输、光电效应、康普顿散射、衰变等。

4)用户设置。用户可以将探测器移动到不同的粒子出射窗口,对不同动量的粒子进行能量测量,并在模拟前对探测器窗口位置、放射源种类(β 放射源、 ^{137}Cs 或 ^{60}Co 刻度源)及出射粒子的数目、匀强磁场的磁感应强度大小、真空盒是否充入空

气进行设置. 考虑到经过磁场偏转及有限的出射窗宽度, 只有在特定能量范围内的 β 粒子才能偏转后直接到达特定窗口, 故模拟软件提供“快速模拟”模式: β 粒子垂直入射到真空盒内, β 粒子源的出射动量范围随着窗口与放位置距离的变化而预设在小范围内, 以提高模拟的效率. 具体做法为: 先计算放射源到探测器前 3 mm 的狭缝左侧的距离, 进而算出能够击中狭缝左侧边缘所需要的 β 射线的动量 p_1 , 然后用同样的方法计算出击中该狭缝右侧所需要的 β 射线的动量 p_2 , 从而计算出两动量差 Δp_{21} , 确定出抽样动量范围 $p_1 - \Delta p_{21}$ 至 $p_2 + \Delta p_{21}$ 所对应的左右能量范围 E_L 及 E_R , 然后利用图 1 所示的能谱分布在 $E_L \sim E_R$ 范围内进行抽样. 这里假定能量低于 E_L 或大于 E_R 的 β 粒子通过散射进入 3 mm 的狭缝并且沉积的能量在信号峰下的概率可以忽略. β 粒子在磁场中的径迹如图 3 所示.

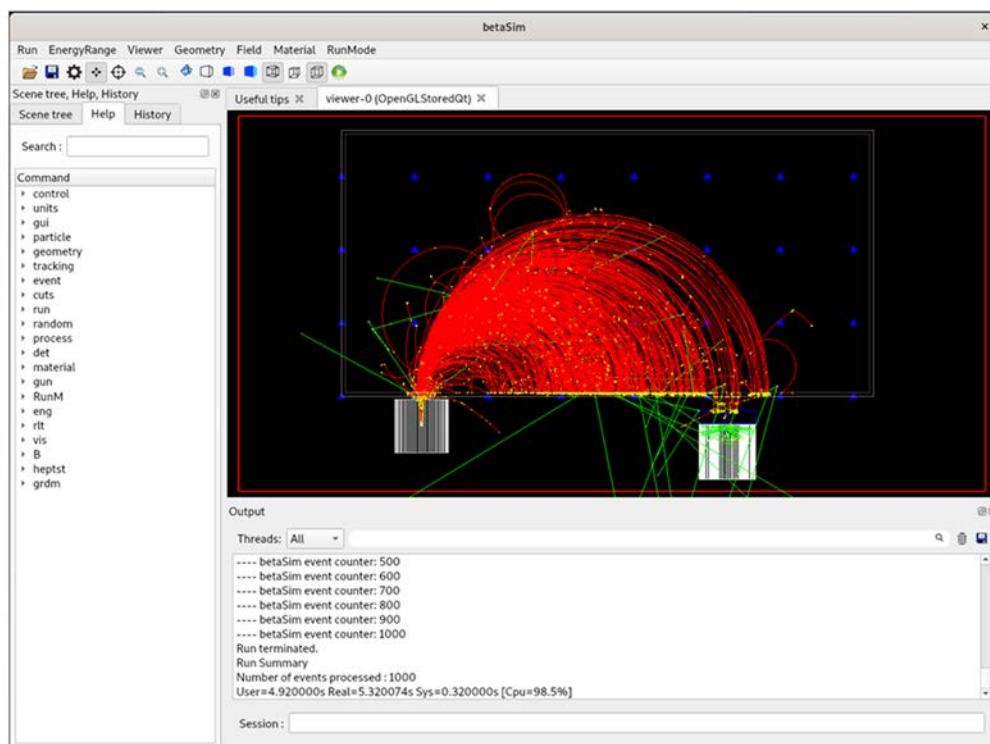
如果模拟工作的计算机资源允许, 用户也可以选择“全能谱模拟”模式: 按照图 1 的能谱产生不同能量的 β 粒子进行模拟. “全能谱模拟”模式的缺点是大部分 β 粒子被偏转到其他位置而不能

进入出射窗, 优点是散射的电子或产生的次级粒子有一定的概率进入探测器, 贡献本底计数, 在该模式下模拟的能谱更接近真实实验的情况. 所产生的 β 粒子在磁场中的径迹如图 3(a) 所示.

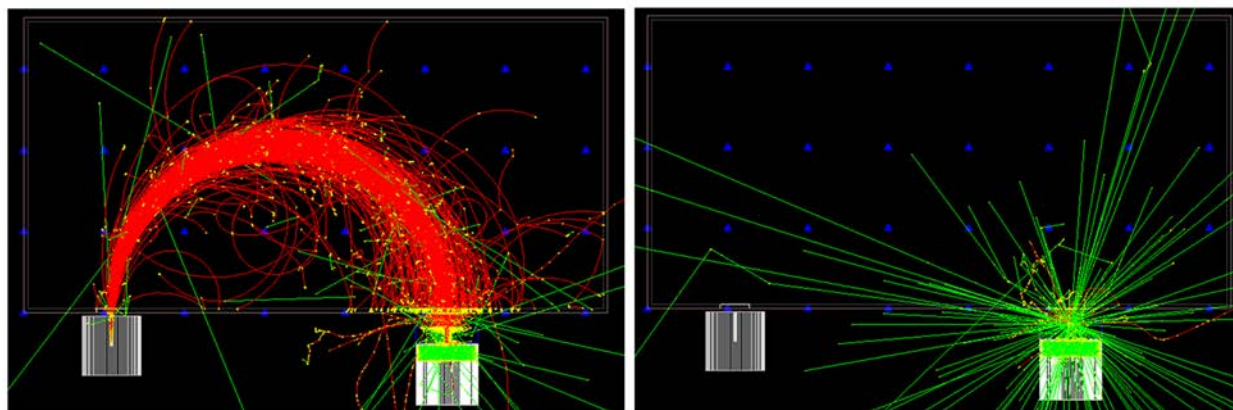
软件提供 2 种运行方式:

1) 在交互界面下运行[图 3(a)], 各参量有缺省值, 但用户可以通过下拉菜单选择运行粒子源、真空盒内材料、磁场大小、探测器位于窗口的位置、探测器窗口前 Al 片的厚度、可视化模式、模拟模式、发射粒子的数目, 软件根据所选组合模式进行模拟. 该运行方式的优点是能够看到 β 粒子在磁场中的偏转情况及在探测器中的粒子径迹[图 3(a)或(b)], 缺点是运行速度慢, 无法进行大数据量模拟.

2) 命令脚本控制运行模式. 通过脚本命令修改各参量的缺省值来控制模拟种类, 模拟结果将直接存为 ROOT^[10]和文本文件 2 种格式: 文本文件的格式与实际实验获取的格式相同, 方便用户进行分析; ROOT 格式的文件方便使用 ROOT 的浏览器打开画图观察, 也方便会 ROOT 的学生进行数据分析.



(a) 软件界面及“全能谱模式”模拟的粒子径迹示意图

(b)“快速模拟”模式下一定动量范围内的 β 粒子的径迹图

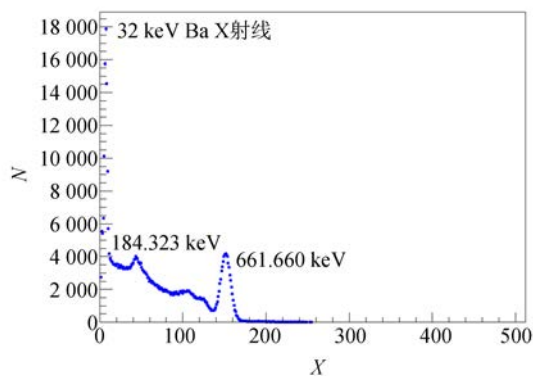
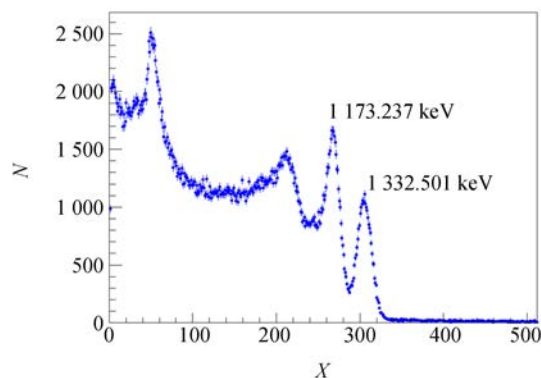
(c)将刻度源放置在 NaI 探测器前进行刻度演示图

图 3 径迹示意图(红线代表电子,绿线表示不带电的光子)

3 模拟结果

首先模拟实验装置刻度能谱. 刻度源为 ^{60}Co 及 ^{137}Cs . 刻度源放置在探测器前的狭缝中间,如图 3(c)所示,其中 ^{137}Cs 的特征 γ 射线能量为 661.660 keV^[11],在能谱上得到清晰的反散射峰,峰位对应的能量为 184.323 keV,系 661.660 keV 的 γ 射线打在 NaI 晶体后光电倍增管玻璃窗或其他周围物质上发生最大 180° 康普顿背散射,散射的 γ 射线返回到晶体后能量沉积所产生的能峰. 模拟能谱还显示 ^{137}Cs 的子体 ^{137}Ba 通过内转换过程导致的 K 系 X 射线 32 keV 能峰. ^{60}Co 的特征峰为 1 173.237 keV 和 1 332.501 keV^[11].

模拟获得的 ^{137}Cs 以及 ^{60}Co 放射源经 NaI 探测器测量的能谱图如图 4 所示,其中横坐标 X 表示道数,纵坐标 N 表示每道计数. 图 4 中共标识的 5 个射线能峰中的后 4 个可以用于系统的能量刻度.

(a) ^{137}Cs (b) ^{60}Co 图 4 模拟获得的 ^{137}Cs 以及 ^{60}Co 的能谱图

其次模拟不同窗口所探测到的 β 粒子能谱. 模拟分为真空盒内充满 1.01×10^5 Pa 的空气及用机械泵抽真空度达到 0.1 Pa 的 2 种状况. 入射窗的位置在 60 mm 处固定不变,出射窗可以设置在不同位置,以模拟得到不同偏转半径(即不同能量)的 β 粒子的能谱.

“全能谱模式”模拟得到空气及真空(0.1 Pa)情况的能谱如图 5 所示, R 为粒子的偏转半径,每个能谱所模拟的粒子数均为 1×10^8 ,磁感应强度 $B = 6.555 \times 10^{-2}$ T.

作为演示,最后给出固定出射窗口位置并在探测器前加不同厚度的铝吸收片的模拟能谱. 模拟时将真空盒内的残余空气气压设置为 0.1 Pa,以减少空气分子对 β 射线能量的影响. 模拟结果如图 6 所示. 探测器窗口固定在 230 mm 处(入射窗在 60 mm 处),每个能谱所模拟的粒子数均为 1×10^8 , T 为铝片的厚度,磁感应强度 $B =$

5.797×10⁻² T.

学生可以分析模拟数据,例如分析图 5 所示的不同窗口真空与空气 2 种情况峰下计数的变化,根据 β 粒子径迹的长度,给出空气对 β 粒子的衰减长度.分析图 6 所示的不同铝片的厚度与峰下信号的计数关系,给出铝对 β 粒子的衰减长度.分析随着铝片厚度的变化对应的峰位、峰的宽度的变化.能谱分析方法见文献[3].将以上分析的结果与对应的真实实验进行比较,仔细研究异同及原因.也可仔细研究模拟的代码,通过实际例子学习 Geant4 的使用方法.

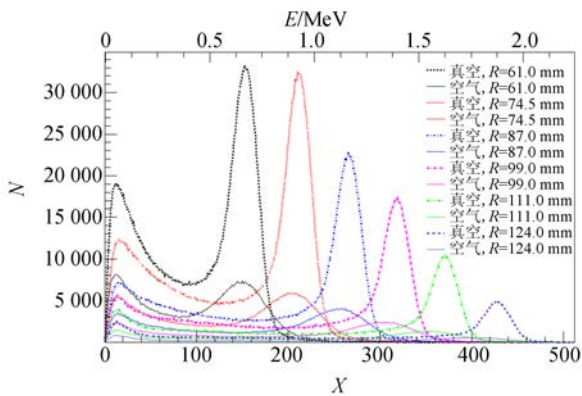


图 5 “全能谱模式”下模拟空气及真空(0.1 Pa)情况不同窗口所对应的 β 射线能谱

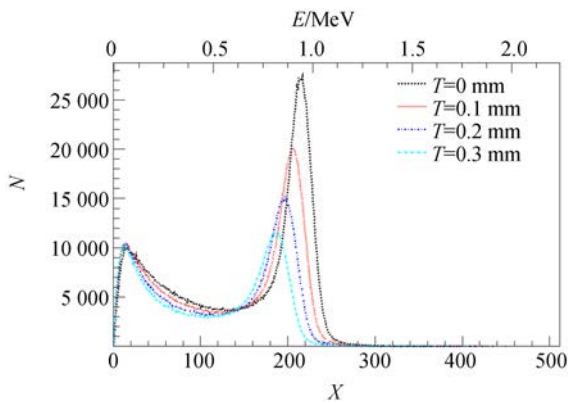


图 6 “全能谱模式”下模拟出射窗与探测器之间加不同厚度的铝片时所得的 β 射线能谱

在模拟过程中,β 粒子的动量 p 与动能 E_k 的关系按照相对论关系 $E_k = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2$ 直接放入,其中 m_0 为电子的静止质量,故最终的模拟结果应满足该关系.为验证 p 与 E_k 之间的关系,数据分析步骤为:首先利用模拟的 ¹³⁷Cs 及 ⁶⁰Co 能谱中的峰位以及对应的能量进行系统能量刻度,然后利用文献[3]所描述的能谱分

析方法给出模拟不同出射窗下 β 能谱中的信号峰的峰位(以道数表示),根据刻度函数计算出峰位对应的能量,进一步利用文献[2]中 β 粒子穿过 0.2 mm 厚的铝膜及有机膜的动能修正表,计算出修正后的真空盒中 β 粒子的动能.最后得到 E_k-p 关系,如图 7 所示.图 7 中红色实心点是真空盒中气压为 0.1 Pa 时的模拟结果,黑色圆圈是充满 1.01×10^5 Pa 空气的模拟结果.所模拟的 β 放射源位于 60 mm 处,探测器狭缝中心位置分别为 182,209,234,258,282,308 mm.磁场的磁感应强度为 6.555×10^{-2} T.蓝色虚线为经典理论给出的关系 $E_k = \frac{p^2}{2m_0}$,红色实线为相对论给出的理论曲线.

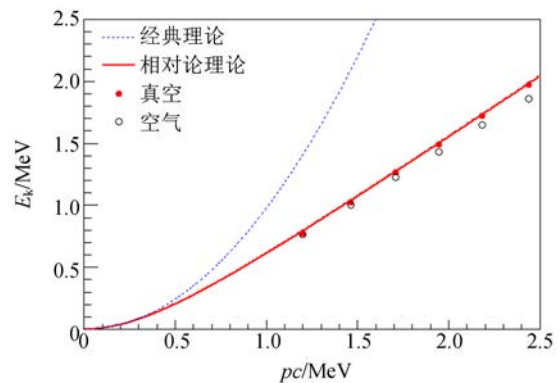


图 7 用蒙特卡罗模拟 β 粒子的动量与动能的关系

图 7 显示模拟结果中真空下模拟数据(红色实心点)与相对论给出的理论曲线(红色实线)相符,但也有细微差异,可能源于 2 方面:真空盒中的气压为 0.1 Pa,这部分没有被修正;本底扣除模型及峰形描述(用高斯函数)模型与实际分布之间的差异也可能引入系统偏差.

4 结束语

betaSim 软件实现了从 β 粒子源的产生到 β 粒子在磁场中偏转,以及 β 粒子在材料中的能量损失,最后在探测器中 β 粒子的能量损失转化为闪烁光子的全过程模拟,并可模拟给出用 ¹³⁷Cs 及 ⁶⁰Co γ 源对探测器进行刻度的能谱及探测器前加不同厚度的吸收片后的能谱.对实验装置、物理过程、实验操作、数据处理进行模拟, betaSim 软件是实验操作以外有力的补充工具,它将平时实验看不见的粒子可视化,帮助学生更好地理解

核物理实验的全过程. 教师为学生提供全部代码, 最大程度帮助学生掌握粒子与物质相互作用的细节.

参考文献:

- [1] 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 3版. 北京: 原子能出版社, 1997: 53-54.
- [2] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 107-114.
- [3] 王思广, 付孟婷. β 射线在铝膜及空气中的衰减[J]. 物理实验, 2020, 40(7): 1-6.
- [4] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4: a simulation toolkit [J]. Nucl. Instr. & Meth. A, 2003, 506(3): 250-303.
- [5] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Geant4 developments and applications [J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 2006, 53(1): 270-278.
- [6] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Recent developments in Geant4 [J]. Nucl. Instr. & Meth. A, 2016, 835(1): 186-225.
- [7] 陈玲燕, 蔡卫国, 谢筱羽, 等. 相对论效应实验及装置[J]. 物理实验, 1987, 7(4): 145-147, 149.
- [8] 陈玲燕, 顾牧, 秦树基, 等. 相对论效应实验谱仪的系列教学实验[J]. 物理实验, 2000, 20(3): 3-5.
- [9] 徐音. 用 Geant4 对相对论电子的动能与动量关系测量实验的模拟与拓展[J]. 物理实验, 2011, 31(8): 39-42.
- [10] Antcheva I, Ballintijn M, Bellenot B, et al. ROOT-AC++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization [J]. Comp. Phys. Comm., 2009, 182(6): 1384-1385.
- [11] Firestone R B, Shirley V S, Frank S Y, et al. Table of isotopes [CD]. Version 1. 0. New York: Wiley InterScience, 1996.

Designing software betaSim to simulate the relativistic momentum-kinetic energy relations tested by β -particles

WANG Si-guang, LUO Ling-yin, ZHANG Ge-hui,
ZHANG Li-cheng, LIU Xiao-nan, JIA Chun-yan
(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,
School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: With Geant4 package, a software named betaSim was developed to simulate the processes of β -particle deflection and detection in magnetic field. The software could simulate the energy spectra of β -particles after partly absorbed by different lengths of air and different thickness of aluminum layers, the relativistic momentum-kinetic energy relations tested by β -particles experiment was reproduced. It could also simulate the γ energy spectra of ^{137}Cs and ^{60}Co for energy calibration. Students could understand more clearly of the experiment by visualizing the simulated particle tracks and analyzing the simulated data, and explore the interaction details between particles and matter by reading the simulation code.

Key words: β -particles; Geant4 simulation; energy spectrum; momentum-kinetic energy relations

[责任编辑:任德香]