第57卷 第1期 天 文 学 报 Vol.57 No.1
2016年1月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jan., 2016

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2016.01.001

暗物质粒子探测卫星中子探测器的GEANT4模拟*

何 明[1,2,3†] 马 涛[1,2] 常 进[1,2] 张 岩[1,2] 黄永益[1,2]
藏京京[1,2] 伍 健[1,2] 董铁矿[1,2]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)
(2 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)
(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 近几十年暗物质研究已逐渐成为天文学研究的重要领域之一, 相关理论研究和试验项目日新月异, 中国的暗物质粒子探测卫星正是在此背景下提出的. 由于暗物质粒子探测卫星的探测对象涉及高能电子, 为了减少其他带电粒子(主要是质子)被误认为是电子的事件率, 必须采用适当的方法区分质子和电子. 实验表明高能质子在BGO(锗酸铋)量能器内发生的强子簇射与电子在BGO量能器内发生的电磁簇射有明显的区别, 且强子簇射通常伴随着大量的次级中子产生, 通过测量BGO量能器底部出射的次级中子信号和入射粒子在BGO量能器中簇射的形状可以有效区分入射到BGO量能器的粒子是质子还是电子. 介绍了暗物质粒子探测卫星中子探测器的构成以及探测原理, 利用GEANT4软件, 模拟了特征能量的质子和电子在中子探测器中产生的信号, 并且总结出了中子探测器在不同电子接收效率情况下的电子、质子区分能力.

关键词 宇宙学: 暗物质, 仪器: 探测器, 技术: 光测量
中图分类号: P171; **文献标识码**: A

1 引言

近几十年暗物质研究已逐渐成为天文学研究的重要领域之一, 相关理论研究和试验项目日新月异, 我国的暗物质粒子探测卫星正是在此背景下提出的. 暗物质粒子探测卫星的科学目标是: (1) 通过在空间高分辨、宽波段观测高能电子和伽玛射线来寻找和研究暗物质粒子, 间接测定其质量、湮灭截面或者是衰变寿命等重要的物理参量, 并限定暗物质粒子的空间分布; (2) 通过观测TeV以上的高能电子及原子核, 力争在宇宙射线起源方面取得突破; (3) 通过观测高能伽玛射线, 从而在伽玛天文方面取得重要成果, 并高精度检验或发现量子引力效应[1−2].

2015-04-30收到原稿, 2015-07-13收到修改稿
*国家自然科学基金项目(11303105、11303107、11203090)资助
†heming@pmo.ac.cn

如图1所示, 暗物质粒子探测卫星载荷自上而下依次为: 塑闪阵列探测器、硅微条阵列探测器、BGO量能器、中子探测器. 整个探测系统实际构成了一个望远镜系统. 顶部的塑料闪烁体探测器测量入射粒子是否带电; 硅微条探测器阵列测量入射粒子的径迹; BGO闪烁体探测器是用来测量粒子簇射的形状和沉积的总能量; 最底部是中子探测器, 则是用来测量粒子在量能器底部出射的低能中子信号, 辅助BGO量能器进一步区分入射是质子还是电子.

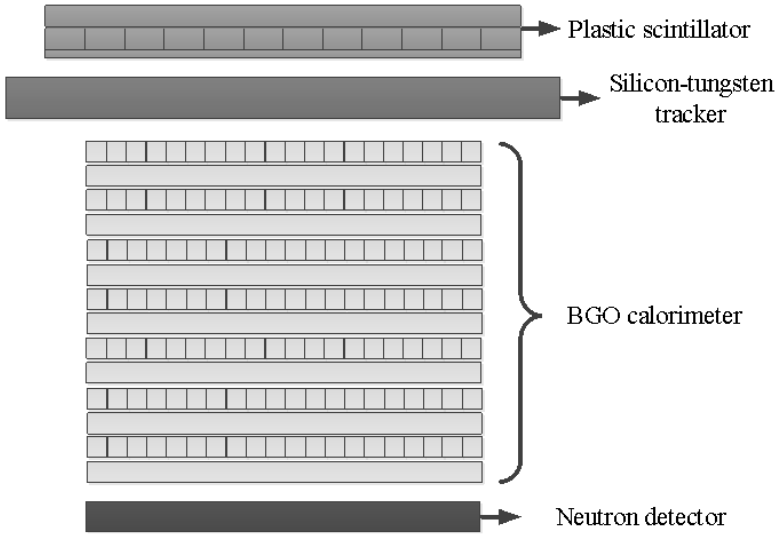

图 1 暗物质探测器结构

Fig. 1 Structure of dark matter detector

2 探测方法与模拟

2.1 中子探测器探测原理

在原初宇宙线中, 并没有中子成分. 因此这里的中子探测器的设计并不是为了探测原初宇宙线的中子, 而是测量宇宙线中的强子(主要为质子)与探测器物质发生作用后产生的次级中子, 从而进一步区分入射粒子是质子还是电子.

中子探测器由4块独立的塑闪烁体组成, 闪烁体内掺杂1%的^{10}B, 塑料是良好的中子慢化材料[3]. 低能中子与塑料中的氢原子发生弹性碰撞后, 快速衰减能量, 称为慢化过程. 在中子探测器中长时间慢化后, 低能中子被慢化为热中子, 而后热中子被中子探测器中的^{10}B 俘获[4]. 由于热中子与^{10}B的中子俘获反应有很大的作用截面, 发生核反应, 见(1)式:

$$n + {}^{10}\mathrm{B} \rightarrow \alpha + {}^{7}\mathrm{Li} + \gamma\,. \tag{1}$$

核反应产生的α粒子会在中子探测器内沉积较高的能量, 并在塑闪烁体内转化成荧光光子, 这些荧光被光电倍增管收集, 经过线性放大, 形成电子学信号, 其信号强度与沉积的能量有良好的线性关系, 因此通过测量电子学信号可以分析在中子探测器内沉积的

能量, 从而分析入射到中子探测器内的低能中子数.

试验证明质子的强子簇射中将产生大量的次级强子(其包含中子), 而电磁簇射的次级粒子主要为电子和光子, 少有中子, 通常比质子产生的中子数目低一个数量级. 同时电子学为了屏蔽掉由高能电子产生的带电粒子和伽玛射线对中子探测的干扰, 设置了延迟门控开关. 带电粒子入射到量能器产生击中信号几微秒之后测量到的信号主要来自中子的俘获反应, 通过获取中子探测器中的能量沉积, 可以分析出中子的个数[5], 从而进一步利用模拟结果, 分析入射到量能器的带电粒子种类, 再结合BGO量能器获取的簇射形状[6−7], 可以将质子与电子更为有效地区分开来.

中子探测器的性能指标满足设计要求, 中子探测器的寿命由探测器的元器件、材料以及工艺决定, 探测器的寿命经过可靠性设计和相关工程试验验证, 满足大于3 yr的实验要求.

2.2　GEANT4模拟与分析

2.2.1　GEANT4软件简介

GEANT4是由欧洲粒子研究组织(CERN)主导开发的基于C++面向对象技术的蒙特卡罗应用软件包, 主要计算粒子在探测器介质中的输运过程[8]. 许多大型物理实验都已采用GEANT4作为主要的物理模型模拟软件之一, 其结果与真实结果比对, 表现出良好的一致性, 从而得到了广泛的认可.

2.2.2　模拟中子探测器的方法分析

目前GEANT4的最新版本(10.0)已经融合了大部分的中子反应截面实验数据和高能粒子物理模型包[9], 其模拟的入射粒子能量上限可以达到100 TeV, 而中子截面数据包也涵盖了^{10}B原子的热中子俘获反应截面数据[10], 可以正确地模拟暗物质粒子探测卫星的BGO量能器和中子探测器.

2.3　中子探测器物理模型

2.3.1　模拟μ子在探测器内的沉积能量

宇宙线穿过大气时产生大量的次级粒子, 其中μ子可以在实验室被探测到, 因此通过模拟μ子在探测器内能量沉积谱可以验证我们建立的探测器模型[11]. 图2为模拟中子探测器被μ子击中后产生的荧光光子在探测器内的径迹, 探测器几何模型和真实尺寸一致.

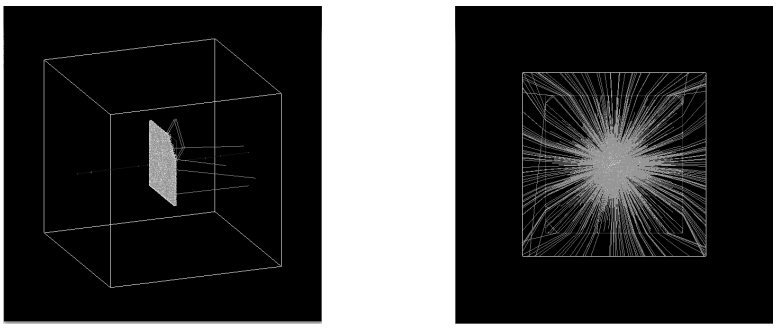

图 2　μ子入射中子探测器模拟

Fig. 2　Simulation of muon in neutron detector

GEANT4模拟所得的μ子能量沉积谱和荧光光子分布分别如图3和图4所示.

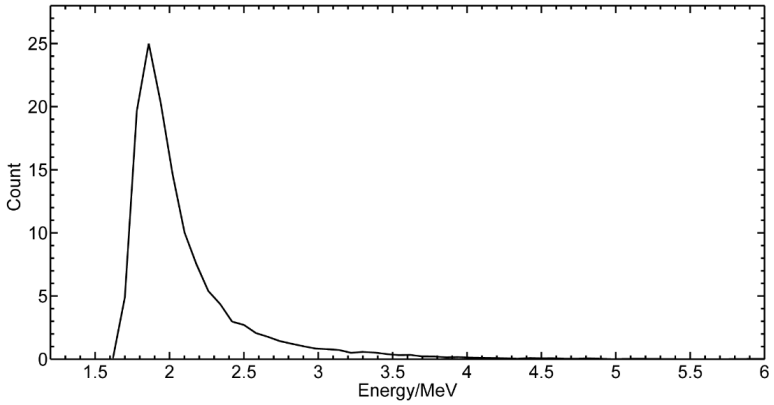

图 3 GEANT4模拟μ子在中子探测器中的能量沉积

Fig. 3 GEANT4 simulation of energy deposition of muon in neutron detector

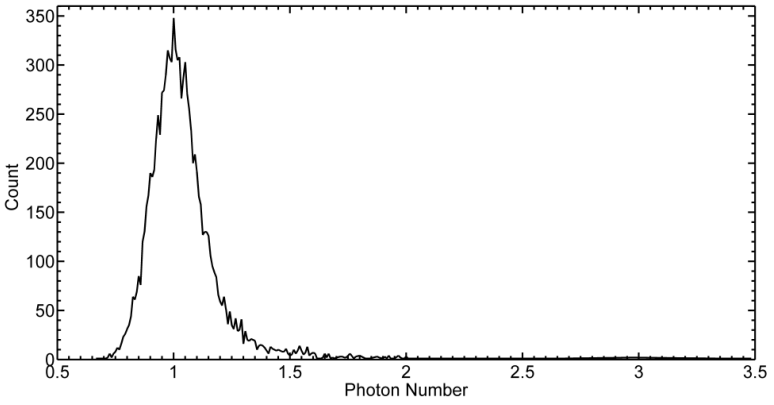

图 4 GEANT4模拟荧光光子分布

Fig. 4 GEANT4 simulation of scintillation photon distribution

2.3.2 构建电子学模型

通常认为探测器中的光子信号经过光电倍增管和放大器线性放大是理想条件下的, 实际过程中, 由于探测器内产生的光子频率有一定范围的波动, 光电倍增管对不同频率的光子强度放大并不一致, 且放大器的频响也不是完美的, 会有一定的涨落. 通常单一能量事件经过探测器电子学传输路径后, 得到的信号分布呈现高斯分布[12], 因此电子学模型主要是通过模拟结果和实际测量结果对比建立. 假设其模拟结果经过一个高斯函数模型的卷积运算能够完美逼近实测信号输出谱, 实际标定所得到的μ子信号输出谱如图5所示.

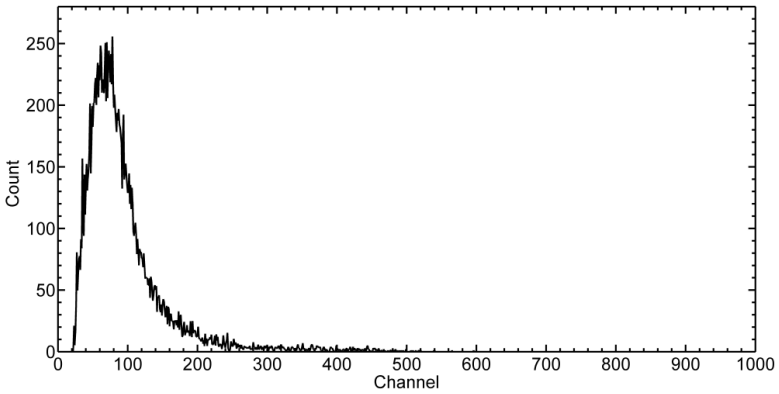

图 5　实测μ子谱

Fig. 5　The measured muon spectrum

通过设定不同参量的高斯函数, 将模拟结果经过高斯函数卷积运算与实测结果逼近, 得到基于最小偏差的高斯函数的参量[13−14]. 最优对比结果如图6所示.

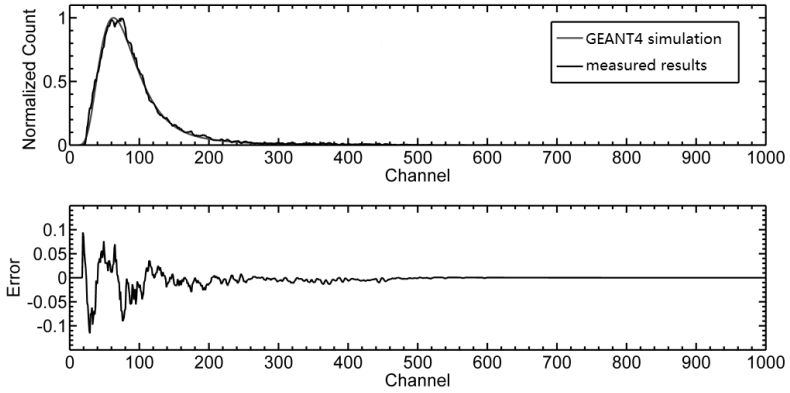

图 6　模拟结果经高斯函数卷积运算的结果与实测结果对比

Fig. 6　The simulation results with Gaussian function convolution compared with the measured results

图6的下图为最优解情况下, 模拟的μ子谱经过高斯函数卷积运算与实测的结果的绝对误差, 误差最大处的值0.12, 足够说明两曲线吻合得很好, 同时证明了构建的探测器模型可以用来进一步模拟其他不同粒子.

2.3.3　模拟电子和质子

由于平均而言, 质子在量能器中只沉积40%左右的总能量, 并且, 在实际实验中, 我们只对沉积能量相同的事例进行比较, 因此, 我们选取了500 GeV的电子和1.5 TeV的质子事件分别进行了模拟, 并选取在BGO量能器中沉积能量相同的事例. 这些事例在中子探测器中产生的光子数可以得到光子分布, 再利用2.3.2节所得电子学模型得到信号输出谱, 结果如图7∼8所示.

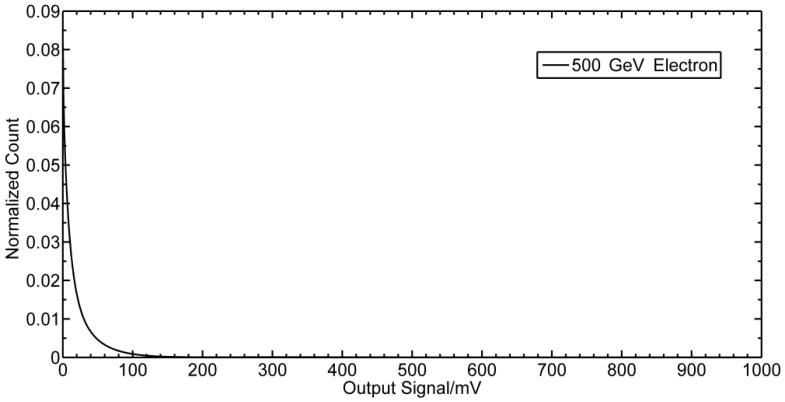

图 7 电子在中子探测器输出谱

Fig. 7 Electron output signal from neutron detector

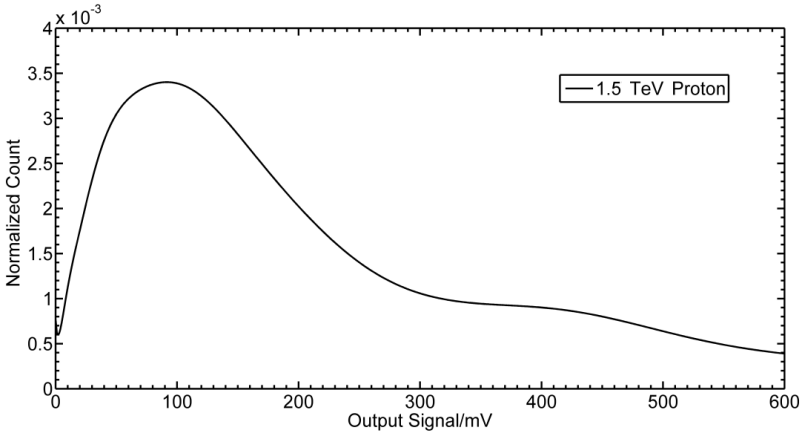

图 8 质子在中子探测器输出谱

Fig. 8 Proton output signal from neutron detector

3 数据分析

电子和质子模拟的目的在于得出中子探测器对电子和质子的区分能力, 能够有效区分电子和质子是中子探测器的设计要求和初衷. 由图7和图8对比可以看出, 在BGO中沉积同样能量的电子和质子在中子探测器系统中得到的输出谱明显不同, 现定义电子接收效率(Electron Acception)为:

$$\text{电子接收效率} = \frac{\text{选取的电子事件数}}{\text{全部的电子事件数}}. \tag{2}$$

同时定义中子探测器的质子拒绝能力[15](Rejection Power)为:

$$\text{拒绝能力} = \frac{\text{接收的电子}}{\text{误认为电子的质子}}. \tag{3}$$

由2.3.3节中模拟结果可以得出质子拒绝能力和电子接收效率的关系, 如图9所示.

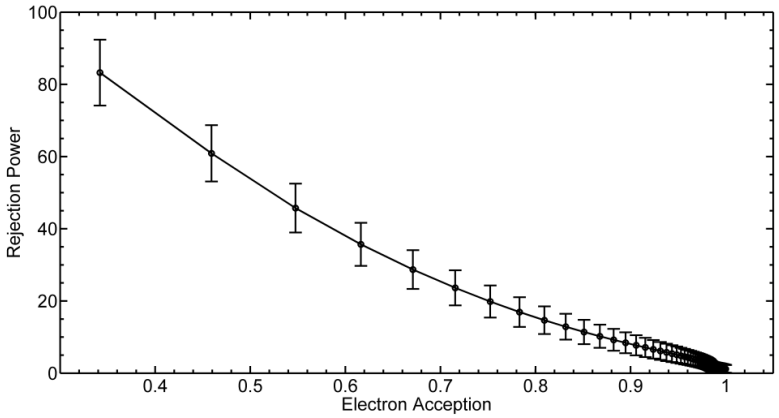

图 9　中子探测器质子拒绝能力

Fig. 9　Rejection power of neutron detector

由得到的中子探测器质子拒绝能力图可以看出, 中子探测器在电子接收效率为50%时, 质子拒绝能力为56. 因此可以说明中子探测器在满足一定电子接收效率的前提下, 可以有效地区分质子和电子.

4　结论

探测宇宙高能电子是一件很困难的事情, 区分电子和宇宙线本底(主要是质子和氦核)需要特殊的探测器技术[16]. 中子探测器就是为了区分高能质子和电子而设计的. 本文利用GEANT4模拟中子探测器μ子的沉积能谱和荧光光子分布, 并结合实测结果验证了物理模型和电子学模型. 而后利用模拟验证的物理模型和电子学模型进一步模拟高能电子和质子. 由电子和质子的模拟结果表明中子探测器在电子接收效率为50%时, 质子拒绝能力为56. 足可说明中子探测器在满足一定电子接收效率的前提下利用中子探测器的信号可以良好地区分高能质子和电子.

参 考 文 献

[1] 蔡明生, 郭建华, 谢明刚, 等. 天文学报, 2013, 54: 467
[2] Cai M S, Guo J H, Xie M G, et al. ChA&A, 2014, 38: 200
[3] 常乐, 刘龙祥, 王宏伟, 等. 核技术, 2015, 38: 50403
[4] Reiter A J H. Differential Photoneutron Cross Sections of Light Nuclei for Neutron Dosimetry. Glasgow: University of Glasgow, 2004
[5] 张国庆, 李鹏波, 李长园, 等. 核技术, 2015, 38: 10501
[6] 郭建华, 蔡明生, 胡一鸣, 等. 天文学报, 2012, 53: 72
[7] Guo J H, Cai M S, Hu Y M, et al. ChA&A, 2012, 36: 318
[8] 杜龙. 基于^{6}Li中子探测器的蒙特卡洛模拟及实验测量. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2014
[9] 岳珂, 徐瑚珊, 梁晋洁, 等. 原子核物理评论, 2010, 27: 445
[10] 吴冲, 张强, 孙志嘉, 等. 原子核物理评论, 2012, 29: 173

[11] Wolverton M. SciAm, 2007, 297: 26
[12] 谢一冈, 陈昌, 王曼, 等. 粒子探测器与数据获取. 北京: 科学出版社, 2003
[13] 张磊, 郭建华, 张永强. 天文学报, 2014, 55: 522
[14] Zhang L, Guo J H, Zhang Y Q. ChA&A, 2015, 39: 380
[15] Drake D M, Feldman W C, Hurlbut C. NIMPR, 1986, 247: 576
[16] 常进. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2010, 2: 95

GEANT4 Simulation of Neutron Detector for DAMPE

HE Ming[1,2,3] MA Tao[1,2] CHANG Jin[1,2] ZHANG Yan[1,2] HUANG Yong-yi[1,2]
ZANG Jing-jing[1,2] WU Jian[1,2] DONG Tie-kuang[1,2]

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)
(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)
(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract During recent tens of years dark matter has gradually become a hot topic in astronomical research field, and related theory researches and experiment projects change with each passing day. The Dark Matter Particle Explorer (DAMPE) of our country is proposed under this background. As the probing object involves high energy electrons, appropriate methods must be taken to distinguish them from protons in order to reduce the event probability of other charged particles (e.g. a proton) being mistaken as electrons. The experiments show that, the hadronic shower of high energy proton in BGO electromagnetic calorimeter, which is usually accompanied by the emitting of large number of secondary neutrons, is significantly different from the electromagnetic shower of high energy electron. Through the detection of secondary neutron signal emitting from the bottom of BGO electromagnetic calorimeter and the shower shape of incident particles in BGO electromagnetic calorimeter, we can effectively distinguish whether the incident particles are high energy protons or electrons. This paper introduces the structure and detecting principle of DAMPE neutron detector. We use Monte-Carlo method with GEANT4 software to simulate the signal emitting from protons and electrons at characteristic energy in the neutron detector, and finally summarize the neutron detector's ability to distinguish protons and electrons under different electron acception efficiencies.

Key words cosmology: dark matter, instrumentation: detector, techniques: photometric