

密级: (公开)



**中国科学院大学**  
University of Chinese Academy of Sciences

## 硕士学位论文

暗物质粒子探测卫星 BGO 量能器在轨能量标定

作者姓名	文思成
指导教师:	伍 健 研究员 中国科学院紫金山天文台 郭建华 研究员 中国科学院紫金山天文台
学位类别:	工程硕士
学科专业:	电子与通信工程
研究所:	中国科学院紫金山天文台

2018 年 6 月

**Energy Calibration of BGO Calorimeter**

---

**of DAMPE on orbit**

---

**By**

**Wen Sicheng**

**A Dissertation Submitted to**

**The University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of**

**Master of Electronic and Communication Engineering**

**Purple Mountain Observatory**

**Month, Year: May 2018**

## 中国科学院大学学位论文原创性声明

本人声明所提交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: \_\_\_\_\_

签字日期: \_\_\_\_\_

## 中国科学院大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一,学位论文著作权拥有者授权中国科学院大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

公开 保密(\_\_\_\_年)

作者签名: \_\_\_\_\_

导师签名: \_\_\_\_\_

签字日期: \_\_\_\_\_

签字日期: \_\_\_\_\_

## 目 录

摘要.....	6
Abstract .....	8
第一章 绪论 .....	10
1.1 引言 .....	10
1.2 宇宙线的发现与天体粒子物理.....	10
1.3 宇宙线的成分及能谱.....	12
1.4 宇宙线的探测与最新进展.....	13
1.5 论文选题背景.....	17
第二章 暗物质粒子探测卫星 .....	18
2.1 DAMPE 的科学目标.....	19
2.2 DAMPE 探测器及卫星平台的设计指标.....	19
2.3 DAMPE 探测器设计与结构.....	21
2.31 塑料闪烁体探测器 (PSD) .....	21
2.32 硅微条径迹探测器 (STK) .....	22
2.35 BGO 量能器 (BGO ECAL) .....	23
2.34 中子探测器 (NUD) .....	24
2.4 DAMPE 探测器的触发方案.....	25
2.5 DAMPE 探测器的坐标系.....	25
第三章 BGO 量能器的能量标定以及在轨 MIPs 事件筛选方法.....	27
3.1 地面实验能量标定方法以及 BGO 量能器地面能量标定 .....	27
3.2 BGO 量能器在轨能量标定方法.....	29

3.3 BGO 量能器在轨 MIPs 事件筛选方法 .....	30
第四章 绝对能量标定 .....	35
4.1 ATMNC3 简介 .....	35
4.2 在轨绝对能量标定 .....	37
第五章 不同磁纬的 MIPs 能量标定.....	43
5.1 不同磁纬 MIPs 在轨模拟.....	43
5.2 不同磁纬在轨数据分析以及与在轨模拟的对比.....	46
第六章 核素 MIPs 的稳定性分析 .....	48
6.1 核素 MIPs 筛选方法.....	48
6.2 核素 MIPs 随时间的变化.....	49
第七章 总结与展望.....	51
参考文献.....	53
致谢.....	55
在读期间发表的主要学术论文.....	57

## 摘要

暗物质粒子探测卫星 (DARk Matter Particle Explorer, DAMPE) 是中国科学院空间科学先导专项首颗空间天文实验卫星, 于 2015 年 12 月 17 日在我国酒泉卫星发射中心成功发射, 目前已在轨运行 27 个月, 采集超过 40 亿宇宙线粒子数据。暗物质粒子探测卫星的成功发射, 标志着我国在空间高能宇宙线探测领域迈出了坚实的一步, 为我国后续的空间高能宇宙线研究积累了经验, 并奠定了良好基础。

本文的主要工作是用最小电离粒子 (Minimum-Ionization Particle, MIP) 对暗物质粒子探测卫星 BGO 量能器进行在轨能量标定。本文主要包括四个部分, 第一部分是宇宙线探测的发展历史以及物理背景作简要介绍; 第二部分是对 DAMPE 探测谱仪的各个子探测器结构以及设计指标进行较系统的描述; 第三部分是本文的重点, 包括第三章、第四章和第五章内容, 详细介绍用最小电离粒子对 BGO 量能器进行在轨能量标定的方法以及标定结果; 最后一部分, 介绍跟踪宇宙线中核素 MIPs 随时间的稳定性工作。

从宇宙线发现至今已经历百年时光, 本文的第一章将简要介绍这百年来宇宙线探测的重大事件, 以及现代宇宙线探测的最新进展。而中国的暗物质粒子探测卫星正是在现代宇宙线探测蓬勃发展的背景下诞生的, 它是由四个子探测器构成的高能宇宙线探测谱仪, 其具体结构与设计指标在第二章中介绍。

BGO 量能器作为 DAMPE 探测谱仪的核心探测器, 其在轨能量标定至关重要, 本文从第三章开始, 将详细介绍用最小电离粒子对 BGO 量能器进行在轨能量标定的方法。DAMPE 探测谱仪选择在  $\pm 20^\circ$  纬度之间, 用质子在 BGO 量能器中的 MIPs 事件来进行能量标定, 而一套高效合理的在轨质子的 MIPs 事件筛选方法是能量标定的前提。在 BGO 量能器中的 MIPs 事件要求, 入射粒子从上到下完全穿透探测器, 并且与探测器不发生簇射。在本文第三章中将详细介绍以此为准则建立的 BGO 量能器在轨 MIPs 事件筛选算法。

为了完成 BGO 量能器在轨绝对能量标定, 将在第四章引入 Atmospheric Muon Neutrino Calculation 3-dimensional version (ATMNC3) 软件, ATMNC3 是一款用来模拟计算宇宙线通量的软件, 通过它可以准确地模拟在轨宇宙线环境。通过对

$\pm 20^\circ$  纬度之间在轨质子能谱的模拟,并联合 DAMPE 探测谱仪的探测器模拟软件,实现 BGO 量能器在轨质子 MIPs 模拟,用 Landau 卷积 Gauss 函数拟合 BGO 量能器每一个灵敏探测单元的 MIPs 能谱,以其峰位作为该灵敏单元的绝对能标。BGO 量能器 308 个灵敏探测单元的 MIPs 能量平均值为 23.55MeV。

绝对能标的准确性取决于在轨宇宙线环境模拟与实际宇宙线环境的一致性,以及探测器模拟的准确性。为了验证绝对能标以及用 MIPs 进行能量标定的可行性,将在第五章考察在轨实验数据与在轨模拟的 MIPs 峰位随地磁纬度的变化趋势。将地磁纬度分割成 10 个区间,对每一个区间进行在轨质子 MIPs 模拟,通过比较质子在轨试验数据与在轨模拟 MIPs 峰位随地磁纬度变化趋势的一致性来验证绝对能标的准确性。

为了考察 DAMPE 卫星发射两年以来 BGO 量能器工作状态,将在第六章介绍跟踪核素 MIPs 能量随时间的稳定性的分析工作。在两年的在轨数据样本中筛选出各种核素的 MIPs 事件,然后分析各种核素 MIPs 能量随时间的变化。分析结果表明,各种核素的 MIPs 能量在轨两年中的浮动都 $<1\%$ ,此结果说明,两年来 BGO 量能器在轨运行稳定。

**关键词:** DAMPE、BGO 量能器、MIPs、能量标定、在轨模拟

## ABSTRACT

Dark Matter Particle Explore(DAMPE),which is the first space astronomy experiment satellite of the Strategic Priority Research Program on Space Science of the Chinese Academy of Science, was launched successfully in Dec.17<sup>th</sup>, 2015 in Jiuquan Satellite Launch Center. It has operated well 27 months on orbit and collected more than 4 billion cosmic ray particle events until now. The successfully launching of DAMPE marks a firm step has been taken in the field of the space high energy cosmic ray explore, and it also collects the experience and establishes the foundation of space high energy cosmic ray research of China.

The main work of this thesis is utilizing Minimum-Ionization Particle (MIP) to calibrate the BGO calorimeter`s energy on orbit. It will be comprised of 4 parts of this article: First part, it will have a brief introduction of physical background and development history of cosmic ray explore; second part, it will have a systematic description of the framework and design index of sub-detectors of DAMPE; the third part of thesis which includes chapter 3, chapter 4 and chapter 5, is important, it will introduce the detail of method and result of the orbit energy calibration of BGO calorimeter with Minimum-Ionization Particle; last, it will investigate the stability of the MIPs of nuclear along with time.

It has been one century since the discovery of the cosmic ray, the first chapter of the thesis will brief introduce the milestone of cosmic ray exploration in the past one century, and the latest progress of modern cosmic ray exploration. The Chinese dark matter particle explore satellite was born under the flourish of modern cosmic ray exploration. The DAMPE spectrometer is consist of 4 sub-detectors and it will introduce the structure and design index in the chapter 2.

As the key detector of DAMPE spectrometer, the orbit energy calibration of BGO calorimeter is very important. After chapter three of the thesis, it will begin to detailed introduce the method of orbit energy calibration of BGO calorimeter with Minimum-Ionization Particle. DAMPE spectrometer will use proton MIPs to calibrate the BGO



calorimeter between the latitude of  $\pm 20$  degree, a suitable and efficient MIP events selection method for detector calibration is prerequisite. The MIP event in BGO calorimeter is that the incident particles penetrate the detector from top to bottom, and do not interact with detector. The chapter 3 of the thesis will detailed introduce the orbit MIP events selection algorithm of BGO calorimeter according to the character of MIP events.

In order to accurately calibrate the absolute energy of BGO calorimeter, we introduce the ATMNC3 software in chapter 4. ATMNC3 is a software that calculating the flux of cosmic rays, we use this software for accurately simulate the orbit cosmic ray environment. By means of simulating the proton spectrum on orbit between the latitude of  $\pm 20$  degree, and combining the software of detector simulation of DAMPE spectrometer, can realize the orbit proton MIPs simulation of BGO calorimeter. We can use Landau convolution Gauss function to fit the MIPs spectrum of every sensitive detection unit of BGO calorimeter, and the peak of this function is the unit's absolutely energy standard. The average of MIPs energy of 308 sensitive detection units of BGO calorimeter is 23.55 MeV.

In order to verify the standard energy and the method of using MIPs to calibrate energy are accurate, we will analysis the flight data and orbit MC simulation's MIPs peak along with the geomagnetic latitude. The geomagnetic latitude will be divided into 10 areas, in each area, the MIPs spectrum will be analysed, and finally, compare the orbit MC simulation to flight data, and verify the standard energy.

It will track the stability of nuclear MIPs energy along with time in chapter 6 in order to investigate the status of BGO calorimeter on orbit since DAMPE satellite launched 2 years ago. Select nuclear MIP events in the 2 year flight data sample and then analysis the nuclear MIPs energy along with the time. The results show that the fluctuation of energy of nuclear MIPs energy litter than 1%, so the status of BGO calorimeter on orbit is stable in this 2 years.

**Key words:** DAMPE, BGO calorimeter, MIPs, energy calibration, orbit simulation

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

浩瀚的宇宙蕴藏了无穷奥秘,人类文明的发展也是伴随着对宇宙的认知与探索前进。然而在过去,人们对宇宙的探索仅仅限制在可见光范围内的简单观测,同时也不理解宇宙的结构与运行规律。直到近代,随着探测技术的发展以及物理知识的积累,人类对宇宙的探索方式也得到了极大的拓展,从可见光波段拓展到全波段,从地面发展到空间观测,从光子拓展到宇宙线,直至最近探测到的引力波。而宇宙线的测量则是其中非常重要的部分。

从1912年Hess发现宇宙线开始,人类打开了一扇探索宇宙与物质世界的新窗口。经过长达百年不间断的探索研究,人们在宇宙线研究中取得了巨大成果,发现了众多的基本粒子及其相互作用规律,最早的中微子振荡的发现,以及迄今为止我们所知道的最能量的粒子也来自于宇宙线的观测。现在,宇宙线的研究已经不再局限于某一领域,作为联系微观粒子与宏观宇宙的桥梁,它不仅对粒子物理也对天体物理作出了重要贡献[1][2]。

宇宙线的起源、加速、传播一直是宇宙线研究中的三个根本问题,至今尚无确凿答案,而对这三个问题的研究,更是诞生了众多天文学分支,比如高能中微子天文学、高能伽玛天文学、以及高能宇宙线天文学等等。宇宙线所具有的高能量以及在宇宙大尺度上进行传播的特点又为研究新的物理规律提供了非常独特的实验室。间接暗物质粒子探测,磁单极子,以及轴子等超出标准模型粒子的探测,都可以通过宇宙线来研究。

宇宙线研究是一个庞大而综合的领域,我们没有办法面面俱到,本论文将要涉及的问题也仅仅是宇宙线研究中一个小小的分支,通过对空间高能电子和伽玛射线的研究,间接寻找暗物质粒子存在的证据。而宇宙线的更多领域的研究工作仍有待人们坚持不懈的挖掘与探索。

## 1.2 宇宙线的发现与天体粒子物理

1911年到1912年之间,奥地利物理学家Victor Franz Hess做了一系列高