

学号 2113010127

年级 2021

河海大学

本科毕业论文

新一代 MeV 伽马天文望远镜的高气压 TPC 探测器研究

专 业 应用物理学

姓 名 唐颂蕤

指导教师 柏栋

评 阅 人 毛明禾, 李雷, 韩梅梅

2025 年 5 月  
中国 南京

# **BACHELOR'S DEGREE THESIS OF HOHAI UNIVERSITY**

## **Research on the high-pressure TPC detector of the new generation MeV Gamma Astronomical Telescope**

College : Mechanics and Engineering Science

Subject : Applied Physics

Name : Songrui Tang

Directed by : Dr. Dong Bai

NANJING CHINA

# 郑重声明

本人呈交的毕业论文，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，所有数据、图片资料真实可靠。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本设计（论文）的研究成果不包含他人享有著作权的内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确的方式标明。本设计（论文）的知识产权归属于培养单位。

本人签名：\_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_

## 摘要

作为电磁波谱中能量最高的辐射形式，伽马射线承载着极端天体物理过程的关键信息，是揭示宇宙物质组成、恒星演化机制及宇宙线起源的核心观测窗口。然而在伽马射线天文观测实验中，长期存在着所谓的“MeV 能量间隙”，即约在 0.1 到 100 MeV 区间内，其间现有实验设备观测灵敏度比其相邻能区相差 1 - 2 个数量级，导致正负电子湮灭线 (511 keV)、放射性核素衰变等关键物理过程的探测长期受限。然而针对 MeV 能段的高精度测量受限于技术发展而停滞不前。其中伽马射线的高能量和角度分辨率、康普顿散射电子的径迹测量对抑制背景干扰和提高灵敏度起到非常关键的作用，是其中的难点，也是新一代 MeV 伽马射线望远镜研究的重点。

为突破这一技术瓶颈，MeV 伽马射线望远镜 (MeGaT) 创新性地融合了两种尖端探测技术：采用高压时间投影室 (TPC) 与像素化碲锌镉 (CZT) 探测器的复合结构。TPC 模块通过微网气体探测器 (Micromegas) 实现康普顿散射电子的高分辨三维径迹重建和损耗能量的测量，可精确反推入射伽马射线的初始方向；像素化 CZT 探测器则凭借优异的高能光子吸收效率与位置灵敏特性，在 1-10 MeV 能段实现优于 1% 的能量分辨率。二者协同工作形成级联探测：TPC 捕获康普顿散射电子并完成初次作用点定位，CZT 探测器记录再沉积光子的精确能量与空间信息，通过双重测量约束大幅降低本底噪声干扰，提高观测的灵敏度。

- (1) MeV 伽马天文物理背景及对装置指标需求；
- (2) MeGaT 实验方案与指标预期；
- (3) MeGaT TPC 方案性能模拟优化；
- (4) TPC 探测器构建与性能研究；
- (5) 数据与模拟对比分析。

**关键词：** 伽马天文；粒子探测；高能物理；探测技术；MeV 伽马射线望远镜

## ABSTRACT

As the highest energy band in the electromagnetic spectrum, gamma rays carry a wealth of information, which is an important way to understand the composition of the universe, the evolution of stars and the origin of cosmic rays. In gamma-ray astronomical observation, there has been a ‘MeV energy gap’, which ranges from 0.1 to 100 MeV, and its sensitivity is 1-2 orders of magnitude lower than that of its neighbouring energy regions. However, high-precision measurements in the MeV energy band have been stagnant due to technological development, and the high energy and angular resolution of gamma rays and Compton scattering electrons are crucial for suppressing background interference and improving the sensitivity. Improve the sensitivity play a very crucial role, which is one of the difficulties and the focus of the research on the new generation of MeV gamma-ray telescopes. Against this background, we propose an innovative MeV Gamma-ray Telescope (MeGaT) experiment. The experiment combines the advantages of Micromegas’ high-pressure TPC (Time Projection Chamber) and the pixel-readout CZT detector, which enables high-resolution 3D traces of Compton scattered electrons. The TPC enables high-resolution 3D trajectory and energy measurements of Compton scattered electrons, which are essential for accurately tracing and analysing the path and energy distribution of gamma rays. Pixel CZT detectors, on the other hand, excel in measuring the energy and position of high-energy gamma rays. Its high sensitivity and fast response characteristics make it ideal for high-energy gamma-ray measurements. By combining these two detection techniques, the MeGaT experiment is able to achieve excellent angular resolution and background suppression. The improved angular resolution means that we are able to locate the source of the gamma rays more accurately, while the enhanced background suppression helps to reduce the interfering signals, thus improving the sensitivity of the observations.

The main research contents of this paper are as follows:

- (1) MeV gamma astrophysical background and device index requirements;
- (2) MeGaT experimental scheme and index expectations;
- (3) MeGaT TPC scheme performance simulation optimization;
- (4) TPC detector construction and performance research;
- (5) data and simulation comparative analysis.

**Keywords:** Gamma-ray astronomy; particle detection; high-energy physics; detection

technology; MeV Gamma-ray telescopes

# 目录

# 第 1 章 引言

## 1.1 MeV 伽马天文物理背景

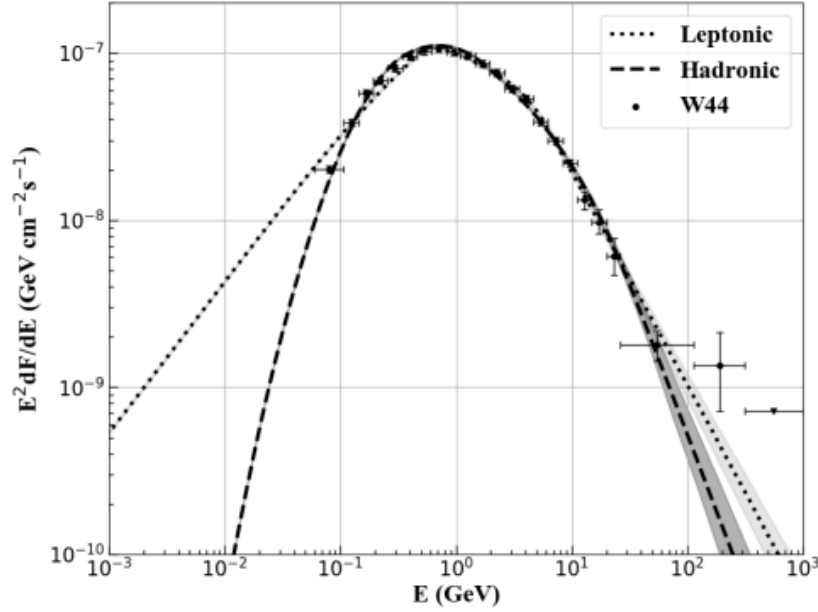
作为高能天体物理研究的重要窗口，MeV 伽马射线天文学正成为探索极端宇宙的新前沿。在伽马射线能谱中，0.1–100 MeV 能段承载着独特的物理信息：该能域覆盖了正负电子湮灭线（511 keV），放射性元素衰变线（如  $^{26}\text{Al}$  的 1.809 MeV 线）、脉冲星曲率辐射峰值等特征辐射，同时也是研究暗物质粒子湮灭/衰变信号、原初黑洞蒸发效应的关键探测窗口。然而受制于康普顿望远镜的空间分辨限制和探测效率瓶颈，该能段的系统观测长期处于“MeV 能量间隙”的状态，这也使得 MeV 伽马天空仍存在大量未解之谜。因此，开发高能分辨率、大视场、高探测效率的 MeV 伽马望远镜成为高能天文学界的共同迫切需求。

当前学界内围绕该能段已形成若干突破方向：在观测技术层面，康普顿成像与电子追踪技术的结合正在实现 MeV 偏振测量，这将为揭示伽马暴中心引擎结构、耀变体喷流磁流体特性提供新维度；在理论建模方面，MeV 耀变体的特殊光变特征挑战着传统轻子模型，推动着强子主导辐射机制和粒子加速过程的研究；而通过 MeV 谱线巡天发现的银河系暗物质晕湮灭信号，正与 Sub-GeV 能段的原初黑洞蒸发伽马射线形成交叉验证，为解开暗物质本质之谜开辟新路径。这些研究方向共同构成了连接微观粒子物理与宏观宇宙演化的关键纽带，正在重塑我们对极端天体环境、早期宇宙遗迹和基本物理规律的理解框架。

### 1.1.1 $\pi$ 介子鼓包

在 MeV 伽马射线天文学的研究框架下，超新星遗迹作为银河系宇宙线加速源的核心地位正经历革命性观测验证。理论模型指出，这类遗迹的激波波前通过扩散激波加速（DSA）机制，可将质子加速至 PeV 能级（即“膝区”能量），其过程中高能质子与星际介质碰撞产生的中性  $\pi^0$  介子衰变（ $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ），会在  $\gamma$  射线能谱的 50–200 MeV 区间形成特征性鼓包结构——这被视为宇宙线强子加速过程的“指纹证据”。然而，现有伽马望远镜在 MeV 能段的灵敏度缺失，导致该关键谱形长期无法被完整解析：Fermi-LAT 在 GeV 以上能区虽已观测到多个遗迹的强子辐射成分（如 IC 443 和 W44 中 2.2 MeV 中子俘获线的关联信号），但无法区分 10–300 MeV 能段内轻子同步辐射与强子  $\pi^0$  衰变的混合贡献；而 COMPTEL 等早期 MeV 探测器受限于  $> 3^\circ$  的角分辨率，难以实现致密遗迹的空间分辨谱诊断。



图 1.1  $\pi$  介子鼓包

### 1.1.2 暗物质与原初黑洞

在暗物质本质的百年探寻中，原初黑洞（Primordial Black Holes, PBHs）因其诞生于宇宙早期相变的独特属性，始终占据着候选者名单的核心位置。根据霍金辐射理论，质量在  $10^{16} - 10^{17}g$  范围内的 PBHs 正处于蒸发末期，其事件视界量子隧穿效应会释放以光子为主导的粒子流，形成特征性的 keV-MeV 能段热辐射谱——这一能域恰与 MeV 伽马天文观测的核心敏感区间高度契合。理论计算表明，单个蒸发 PBH 的瞬时伽马辐射流量在 1 MeV 处可达  $10^{-7} MeV/(cm^2s)$  量级。其全天空累积辐射更可能构成弥漫性 MeV 背景辐射的未解析成分。这使得 MeV 能段成为检验 PBH 暗物质假说的“战略频段”：通过精确测量宇宙伽马背景能谱的软 X 射线至 MeV 能段 (0.1-10 MeV) 的谱形畸变，可直接约束 PBH 质量分布函数  $f_{PBH}(M)$  在关键参数空间 ( $M \sim 10^{16}g$ ) 的分布，进而验证或排除 PBH 作为暗物质的可能性。然而，这一科学目标的实现长期受困于两大技术壁垒：其一，蒸发 PBH 的辐射信号在 MeV 能段呈现宽谱特性 ( $dN/dE \propto E_{-3}$ )，易与活动星系核 (AGN) 的幂律辐射、超新星遗迹的  $\pi^0$  衰变连续谱等天体物理背景混淆；其二，现有康普顿望远镜 (如 COMPTEL) 在 1 MeV 附近的灵敏度仅达  $10^{-5} MeV/(cm^2s)$ ，难以探测 PBH 蒸发预期的微弱各向异性信号。

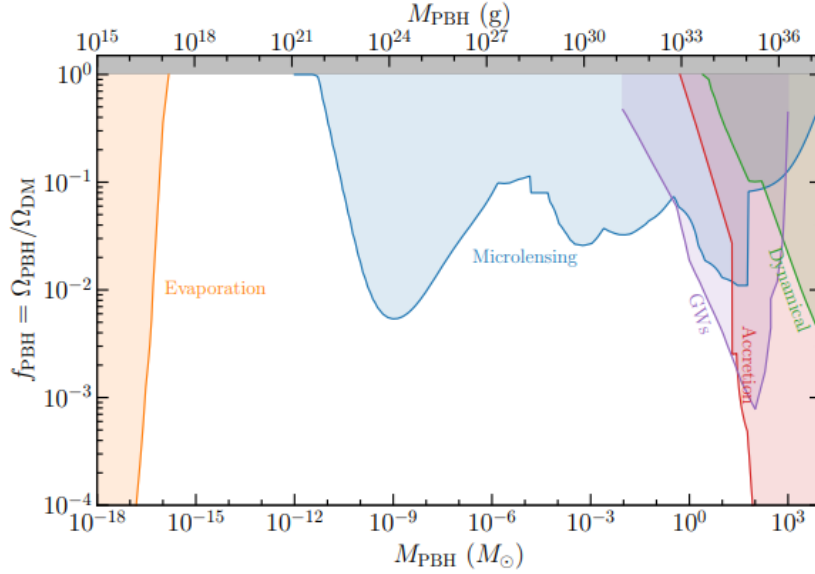


图 1.2 暗物质与原初黑洞

## 1.2 装置指标需求

### 1.2.1 科学目标

在 MeV 伽马射线天文学领域，该能段（0.1-100 MeV）因其独特的物理信息承载能力，成为探索极端宇宙现象的战略窗口。其科学目标涵盖多个前沿方向：

#### (1) 宇宙线起源与超新星遗迹研究

超新星遗迹激波加速的高能质子与星际介质碰撞产生中性  $\pi^0$  介子衰变，其辐射在 50-200 MeV 能段形成特征鼓包谱。现有设备如 Fermi-LAT 在 GeV 以上能区观测到强子成分，但 MeV 能段的混合辐射（轻子同步与强子  $\pi^0$  衰变）需角分辨率优于  $1^\circ$  以实现空间分辨谱诊断，例如 MeGaT 望远镜通过三维径迹重建将角分辨率提升至  $0.8^\circ@100 \text{ MeV}$ ，显著提高了谱形畸变检测能力。

#### (2) 暗物质与原初黑洞探测

质量在  $10^{16} - 10^{17} g$  范围内的原初黑洞 PBHs, 通过霍金辐射释放 keV-MeV 能段的光子，其累积辐射可能构成未解析的弥漫性背景。通过 MeV 能谱畸变分析，可约束 PBH 质量分布函数  $f_{PBH}(M)$ ，但需灵敏度达  $10^{-8} \text{ MeV}/(\text{cm}^2 \text{ s})$  的高能分辨率望远镜量级以区分天体物理背景（如活动星系核的幂律辐射）。此外，暗物质粒子湮灭（如 WIMP 模型）可能产生 511 keV 正负电子湮灭线或宽谱信号，需亚度级角分辨率以定位银河系暗物质晕的空间分布。

#### (3) 高能天体物理过程与多信使天文学

高能天体物理过程（如脉冲星曲率辐射、伽马暴中心引擎结构）的研究，对 MeV 能段的高能分辨率、大视场、高探测效率望远镜提出了挑战。伽玛射线暴（GRB）中

引擎的黑洞超吸积系统（NDAF）释放的 MeV 中微子与伽马射线存在关联，需时间投影室（TPC）与像素化碲锌镉（CZT）探测器的复合结构实现符合测量，以抑制本底并捕捉亚毫秒级爆发信号。此外，耀变体喷流的磁流体特性研究依赖 MeV 偏振测量，要求偏振度探测精度达 5% 以内。

### 1.2.2 对探测装置的核心指标需求

#### (1) 灵敏度突破

MeGaT 望远镜的核心指标需求之一是在 MeV 能段实现灵敏度突破，以探测超新星遗迹的  $\pi^0$  介子鼓包、暗物质原初黑洞的蒸发辐射等关键信号。在 MeV 能段，MeGaT 望远镜的灵敏度需达到  $10^{-8} \text{ MeV}/(\text{cm}^2 \text{ s})$  量级，较传统康普顿望远镜（如 COMPTEL）优化 2-3 个量级，以捕捉 PBH 蒸发和暗物质湮灭的微弱信号。

#### (2) 角分辨率提升

MeGaT 望远镜的核心指标需求之二是在 MeV 能段实现角分辨率提升，以区分超新星遗迹的强子  $\pi^0$  衰变与轻子同步辐射的混合贡献。在 100 MeV 处，MeGaT 望远镜的角分辨率需达到  $0.8^\circ$ ，通过 TPC 的三维径迹重建与 CZT 的高位置分辨率，实现亚度级定位（如  $0.8^\circ @ 100 \text{ MeV}$ ），从而区分密集天体源并解析  $\pi^0$  鼓包谱形。

#### (3) 偏振度探测

MeGaT 望远镜的核心指标需求之三是在 MeV 能段实现偏振度探测，以研究耀变体喷流的磁流体特性。MeGaT 望远镜的偏振度探测精度需达到 5% 以内，以实现高精度的偏振测量。

#### (4) 本底抑制技术

MeGaT 望远镜的核心指标需求之四是在 MeV 能段实现偏本底抑制。采用双探测模态（如 TPC+CZT）的符合测量，结合时间-能量-空间多维筛选，使本底抑制效率达  $10^4$  量级，例如通过抗辐照 SiPM 技术降低噪声干扰。

#### (5) 空间分辨率

MeGaT 望远镜的核心指标需求之五是在 MeV 能段实现空间分辨率，以定位银河系暗物质晕的空间分布。MeGaT 望远镜的空间分辨率需达到亚度级，以实现高精度的空间分布测量。

## 1.3 MeV 伽马射线望远镜的国内外研究现状

MeV 伽马射线天文学是高能天体物理研究的重要分支，其研究对象包括超新星遗迹、暗物质、原初黑洞等。MeV 伽马射线天文学的研究方法主要包括观测、理论模

拟和数据分析等。目前，国际上已经有多个 MeV 伽马射线望远镜项目，如 Fermi-LAT、COMPTEL 等，这些望远镜在 MeV 能段的观测数据为 MeV 伽马射线天文学的研究提供了重要的信息。

此外，国际上还有一些关于 MeV 伽马射线天文学的理论模拟和数据分析的研究工作，这些工作为 MeV 伽马射线天文学的研究提供了理论基础和数据支持。

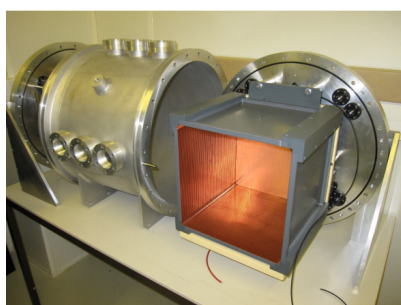
### 1.3.1 HARPO：伽马射线偏振测量与角度测量

#### (1) HARPO 的科学目标

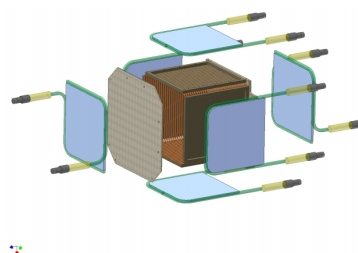
#### (2) HARPO 的工作原理

#### (3) HARPO 的实验配置

HARPO 原型是一个 30 厘米立方体的 TPC，可以在低压力至 5 巴的压力下操作。它被 6 个闪烁体板包围，提供外部触发信号。放大过程由两个 GEM(气体电子倍增器)和一个 micromegas 组成。读出系统包括两个系列(x, y, 垂直于彼此)的 288 个铜条，间距为 1 毫米。



a HA 演示装置



b HA 设计草图

图 1.3 HARPO 的实验配置

#### (4) HARPO 的实验模拟

HARPO 探测器的立方设计使得其解析解不可得，文章中采用数值模拟的方法去模拟探测器的响应。它包括：

- 提供正负电子对能量动量的光子转换事件发生器；
- 基于 Geant4，模拟正负电子对与气体的相互作用；
- 对 TPC 工作过程和几何形状的描述的模块，它提供了与真实数据类似的信号图。

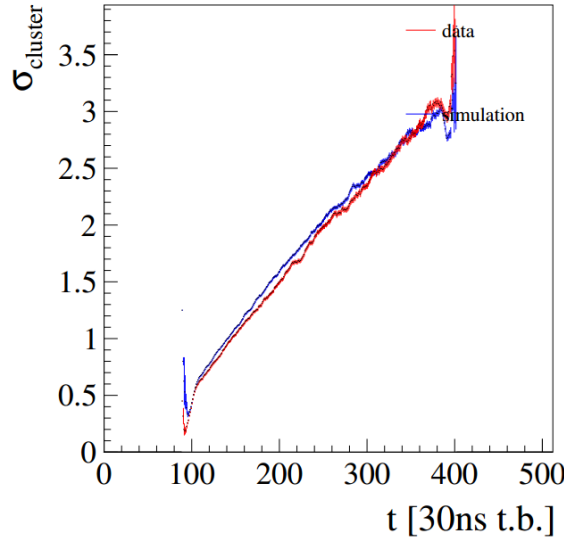


图 1.4 数据 (红色) 和模拟 (蓝色) 中宇宙射线样本的信号大小 (有效值) 与漂移距离的函数关系, 可见数据和模拟结果非常吻合

## (5) HARPO 的数据分析

### 1. 偏振测量结果

使用 HARPO 开发的一个特定的重建算法来重建 TPC 中的顶点, 从而提取电子和正电子的方位角  $\phi_{+-}$ 。 $\phi_{+-}$  的分布预期将遵循一个包含偏振不对称性  $A$  和偏振方向  $\phi_0$  的分布。通过将极化和非极化光子的  $\phi_{+-}$  分布相除, 可以消除系统误差。结果如图:

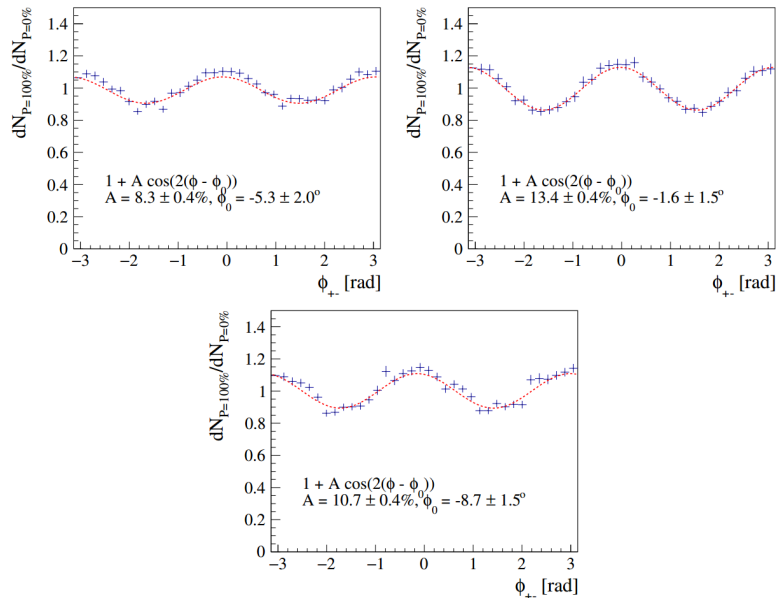
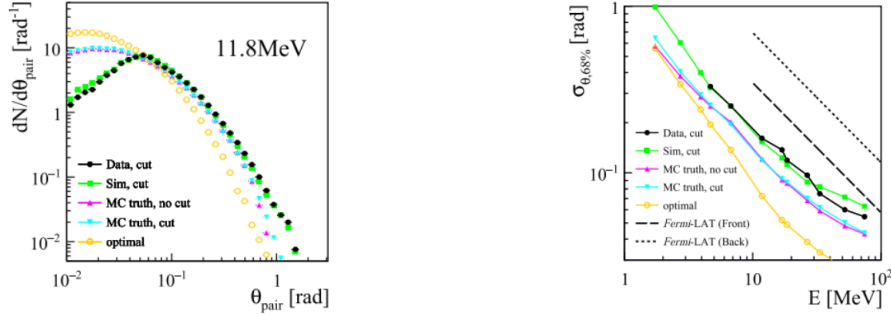


图 1.5 11.8 MeV 光子束的极化调制 (左上角两个分布均为真实数据。右上角两种分布都是模拟的。下图中偏振光分布来自真实光束数据, 非偏振光分布来自模拟数据)

### 2. 角度测量结果

- 未能直接测量反冲核的动量大小，其贡献记作  $\sigma_{recoil}$ ；
- 未能直接测量两个粒子的动量大小，其贡献记为  $\sigma_p$ ；
- 对单个带电粒子探测器视域 (场) 有限。将  $\sigma_{\theta,68\%}$  记作粒子数 68% 的包含角 (即距  $\sigma_\theta$  平均值一个标准差内)，模拟部分结果如图：



a 11.8 MeV 光子光束的残角  $\theta$  对分布。黑点为光束测量值。黄色圆圈显示的是使用了蒙特卡洛的全部 4 向量信息的 QED 极限。洋红色三角形显示的是仅使用蒙特卡洛中的轨道方向 (动量大小未知) 得出的残差，青色三角形显示的是开角剪切对该分布的影响。绿色正方形显示的是考虑了整个探测器模拟的分布，包括康普顿和三重事件的污染。数据与全探测器模拟一致。

b 68% 包容角与光束能量的函数关系。黑点表示在光束中的测量结果。绿色正方形显示的是模拟的结果，包括康普顿和三重事件的污染。洋红色三角形只考虑在没有动量大小测量的情况下的 QED 极限。青色三角形只考虑事件选择对分辨率的影响。黄色圆圈表示在不测量反冲核的情况下的 QED 极限。虚线和点线表示费米-LAT 对前转换和后转换事件的角度分辨率。

图 1.6 HARPO 的实验模拟结果

### 1.3.2 e-ASTROGAM: 伽马射线天文学的新视野

- (1) e-ASTROGAM 的科学动机
- (2) e-ASTROGAM 的设计目标
- (3) e-ASTROGAM 的仪器设计
- (4) e-ASTROGAM 的仪器优势
- (5) e-ASTROGAM 的数据分析

### 1.3.3 MeGaT 望远镜的研究前景

MeGaT 望远镜是一种新型的 MeV 伽马射线望远镜，具有高能分辨率、大视场、高探测效率等优点。MeGaT 望远镜的研究前景非常广阔，可以应用于超新星遗迹、暗物质、原初黑洞等领域的研究。未来，MeGaT 望远镜有望成为 MeV 伽马射线天文学研究的重要工具，为我们揭示宇宙的奥秘提供重要的信息。

## 1.4 MeGaT 实验方案与指标预期

### 1.4.1 MeGaT 实验方案

MeGaT (MeV Gamma-ray Telescope) 探测系统作为新一代高气压时间投影室 (TPC) 技术的里程碑式应用, 其创新性架构旨在突破 MeV 伽马天文长期面临的空间分辨与灵敏度瓶颈。该系统采用双模态复合探测器设计, 通过高气压 TPC+Micromegas 电子径迹成像模块与像素化半导体/闪烁体量能器的协同工作, 实现了对康普顿散射过程的全事件重建:

#### (1) TPC+Micromegas 电子径迹重建模块

TPC+Micromegas 电子径迹重建模块是 MeGaT 探测系统的核心部件, 其主要功能是实现高能分辨率、大视场、高探测效率的 MeV 伽马射线探测。该模块采用高气压 TPC 技术, 结合 Micromegas 电子径迹成像技术, 实现了对 MeV 伽马射线的高能分辨率探测。该模块的设计和制造工艺对 MeGaT 探测系统的性能有重要影响, 是 MeGaT 探测系统的关键技术之一。基于 10 bar 氙基气体环境, 康普顿散射电子在 TPC 内产生电离径迹, 通过 Micromegas 微网探测器实现三维径迹重建, 空间分辨率达 0.3 mm(RMS), 角分辨率达  $0.8^\circ@100 \text{ MeV}$ 。

#### (2) 像素化半导体/闪烁体量能器

像素化半导体/闪烁体量能器是 MeGaT 探测系统的辅助部件, 其主要功能是实现 MeV 伽马射线的高能量分辨率探测。该模块采用像素化半导体/闪烁体量能器技术, 结合 TPC+Micromegas 电子径迹重建模块, 实现了对 MeV 伽马射线的高能量分辨率探测。该模块的设计和制造工艺对 MeGaT 探测系统的性能有重要影响, 是 MeGaT 探测系统的关键技术之一。基于像素化半导体/闪烁体量能器技术, 实现对 MeV 伽马射线的高能量分辨率探测, 能量分辨率达到 1% (FWHM), 探测效率达到 10%。

### 1.4.2 MeGaT 实验原理

### 1.4.3 MeGaT 实验指标预期

本文的主要研究内容见图??。

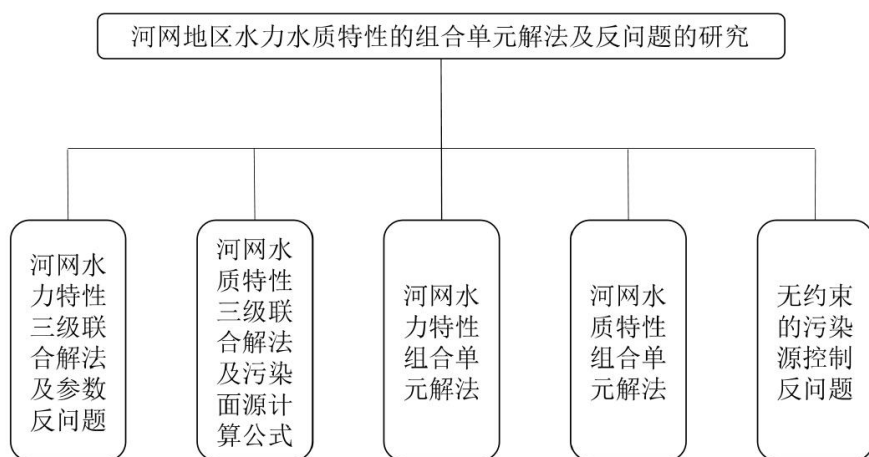


图 1.7 论文的主要研究内容



## 第 2 章 实验配置

### 2.1 MeGaT 实验方案概述

河网的非恒定流计算通常采用三级联合解法，此方法可归结为一维圣维南方程组的求解问题，即对组成河网的每条河道采用有限差分的隐式格式离散圣维南方程组，得到线性差分方程组。……

……

### 2.2 MeGaT 实验方案性能模拟优化

描述明渠一维非恒定流的基本方程为一维 Saint-Venant 方程组：

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial Z}{\partial x} - u^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{4/3}} = 0 \quad (2.2)$$

式中， $t$  为时间坐标； $x$  为空间坐标；……

……

……

### 2.3 TPC 探测器构建与性能研究

……

……

### 2.4 数据与模拟对比分析

……

……

### 2.5 算例分析

为了验证上述计算方法的可靠性，通常借用正问题的解来构造反问题。即先进行正问题计算，用其结果验证反问题的解。

……

……

计算结果见表??。

表 2.1 参数理论值与最优解

	b1	b2	b3
理论解	22	18	16
最优解 1	21.986	18.048	15.997
最优解 2	21.997	18.011	15.999

.....

.....

## 2.6 本章小结

本章采用平原河网三级联合解法水量模型模拟河网的水力要素，建立了平原河网水量模型，对位于长江下游的南通河网进行了模拟运算。

.....

.....

## 致谢

本文是在导师张长江教授的精心指导下完成的。值此论文完稿之际，谨向导师及所有帮助过我的各位表示诚挚的谢意。

.....

.....

还要特别感谢 hhu-thesis-bachelor 节省了论文排版的时间。

作者：韩中国

2016 年 12 月于南京