

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

摘要	I
ABSTRACT	II
目录	IV
第 1 章 引言	1
1.1 MeV 伽马天文物理背景	1
1.1.1 511keV 正负电子湮灭线	1
1.1.2 π 介子鼓包	2
1.1.3 暗物质与原初黑洞	3
1.2 装置指标需求	3
1.2.1 科学目标	3
1.2.2 对探测装置的核心指标需求	4
1.3 MeV 伽马射线望远镜的国内外研究现状	5
1.3.1 HARPO: 伽马射线偏振测量与角度测量	5
1.3.2 e-ASTROGAM: 伽马射线天文学的新视野	8
1.3.3 MeGaT 望远镜的研究前景	11
1.4 MeGaT 实验方案与指标预期	11
1.4.1 MeGaT 实验指标预期	11
第 2 章 实验配置	12
2.1 MeGaT 实验方案	12
2.1.1 TPC+Micromegas 电子径迹重建模块	12
2.1.2 像素化半导体/闪烁体量能器	12
2.2 MeGaT 实验原理	12
2.3 MeGaT 实验方案性能模拟优化	13
2.4 TPC 探测器构建与性能研究	14
2.5 数据与模拟对比分析	14
2.5.1 电子学噪声测试	14
2.5.2 探测器 X-RAY 准直测试	14
2.5.3 探测器 X-RAY 能谱测试	14
2.5.4	14

2.6 讨论与总结	14
2.7 本章小结	14
致谢	15

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}Al 的 1.809 MeV 线）、超新星或中子星合并中核合成产生的放射性同位素的辐射线，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，开发低能量分辨率、大视场、低角分辨率的 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 511keV 正负电子湮灭线

在 MeV 伽马射线天文学中，511 keV 正负电子湮灭线是一个重要的研究对象。511 keV 的正电子湮灭线是在太阳系外探测到的第一条伽马射线线。它在 20 世纪 70 年代首次被低能量分辨率的气球载仪器探测到 [16]，后来又被 INTEGRAL[17]、COMPTEL[18, 19] 和 EGRET[20] 所证实。测量到的湮灭通量是一种强烈的稳态发射，湮灭率量级约为 $10^{43}e^+/s$ 。尽管经过几十年的研究，观测能力也取得了技术进步，但强湮灭线的起源仍然是高能天体物理学中最重要的谜团之一。早期的研究提出了各种潜在的来源，包括与黑洞相关的现象、超新星的类型以及涉及宇宙射线的相互作用。然而，正电子在星际介质中传播的复杂性使得准确确定来源位置变得更加复杂。此外，产生这些正电子的天体物理环境多种多样—从超新星和经典新星中的恒星核合成环境，到微类星体和银河系中心超大质量黑洞附近的环境—都为正电子的研究增加了复杂性。每一种环境都提供了独特的条件，可以影响正电子的产生、传播和最终湮灭，从而形成观测到的 511 keV 伽马射线频谱。由于 MeGAT 的角度分辨率更高，在 MeV

能段的灵敏度也更高，因此它还可以探测到飞行中的湮灭辐射或对其进行更严格的限制，进而可以确定产生湮灭线的不同机制，并揭示银河系中 511keV 线的起源。通过分辨银河系凸起和盘内更精细的结构，MeGAT 可以区分各种理论模型，例如那些来自典型天体源（如黑洞、中子星）和更奇特源（如暗物质湮灭或衰变）的模型。这种详细的绘图和更高的灵敏度可能会在确定正电子来源方面带来重大突破，从而解决高能天体物理学中一个长期存在的问题，并为宇宙中观测到的物质-反物质不对称现象提供新的见解。

1.1.2 π 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 π^0 介子衰变（ $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ），会在 γ 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 π^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。

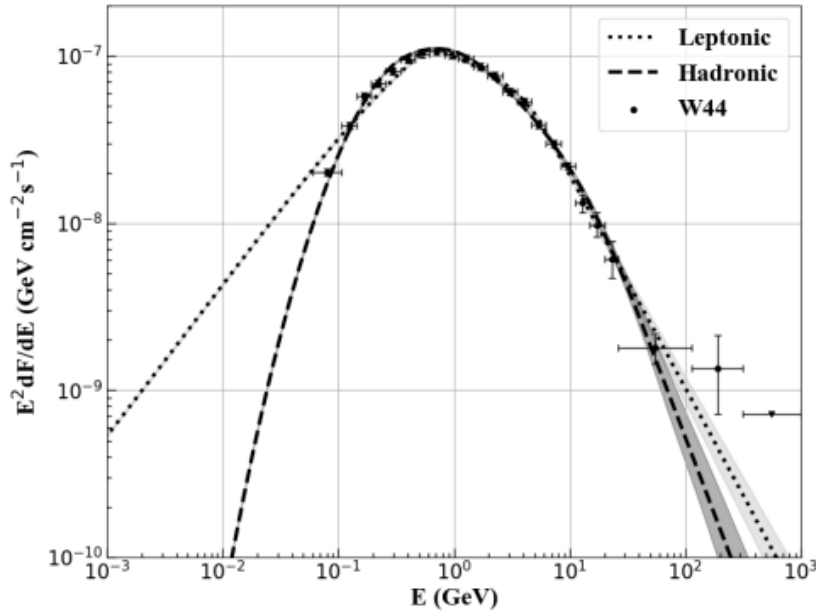


图 1.1 π 介子鼓包

1.1.3 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 $10^{-7} MeV/(cm^2 \cdot s)$ 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 π^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 $10^{-5} MeV/(cm^2 \cdot s)$ ，难以探测 PBH 蒸发预期的微弱各向异性信号。

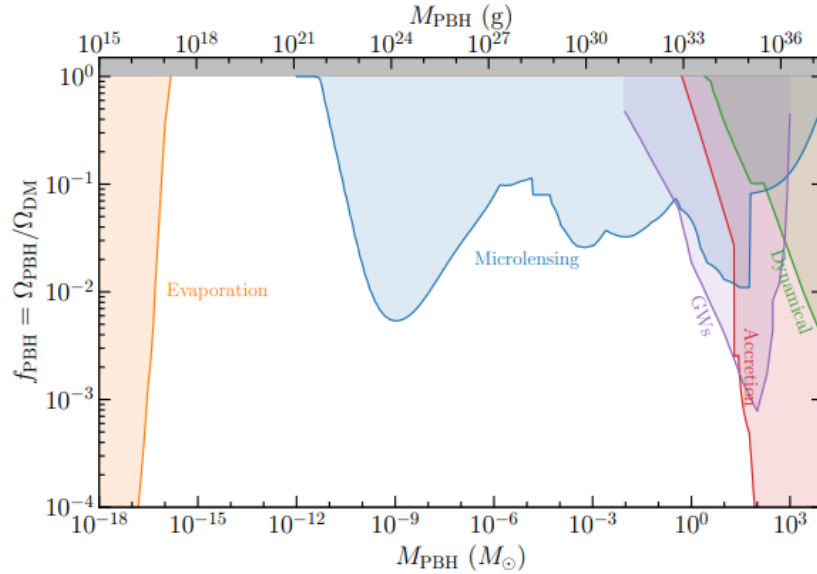


图 1.2 暗物质与原初黑洞

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 π^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 π^0 衰变）需角分辨率优于 1° 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 $10^{-8} \text{ MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 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）中心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 π^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 $10^{-8} \text{ MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 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 π^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° ，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 π^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

宇宙中的天体具有极端的特性，可以通过测量它们附近被加速的粒子的发射来进行研究。当宇宙还很年轻，许多星系仍在形成时，这种辐射非常强烈，可以在非常远的距离或红移下进行测量。在许多情况下，辐射功率的很大一部分出现在 MeV 波段，因此 e-ASTROGAM 可以提供理想的视角，观察超大质量 BH 附近的伽马射线暴（GRB）的强大爆炸内部以及双中子星（NS）合并期间的剧烈过程。

(2) HARPO 的工作原理

HARPO 主要设计工作于对产生能级范围内，如图1.4，即工作在 MeV-GeV 能区。HARPO 的工作原理是通过测量反冲电核子的角度和能量来确定伽马射线的偏振和角度。HARPO 的工作原理如下：

通过理论分析可得,伽马射线偏振的差分相互作用率公式为 $\frac{d\Gamma}{d\phi} \propto 1 + AP \cos[2(\phi - \phi_0)]$, 由于轨道多重散射的存在我们的差分相互作用率公式中会出现调制阻尼项, 公式中的不对称度 A 由有效值 $A_{eff} = A \times D (D = e^{-2\sigma_\phi^2})$ 确定。MeV 的能量尺度下, 反冲电核子的动量过小导致对 ϕ 的测量极为困难, 这就限制了能量小于 100 MeV 时的分辨率。不过, 即使存在这些限制, 使用 TPC 也可以将角分辨率提高到 Fermi-LAT 的一个数量级 (如图1.3)。

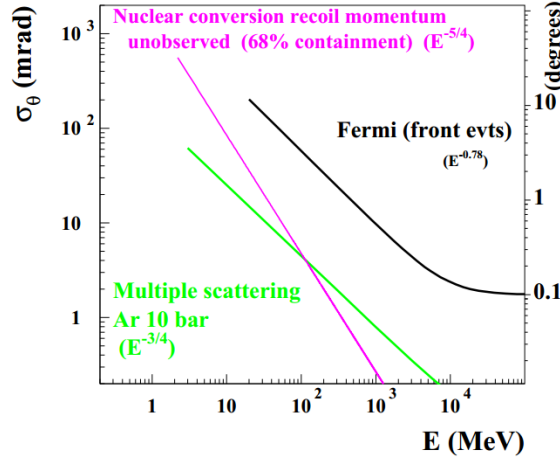


图 1.3 角度分辨率与光子能量的函数关系

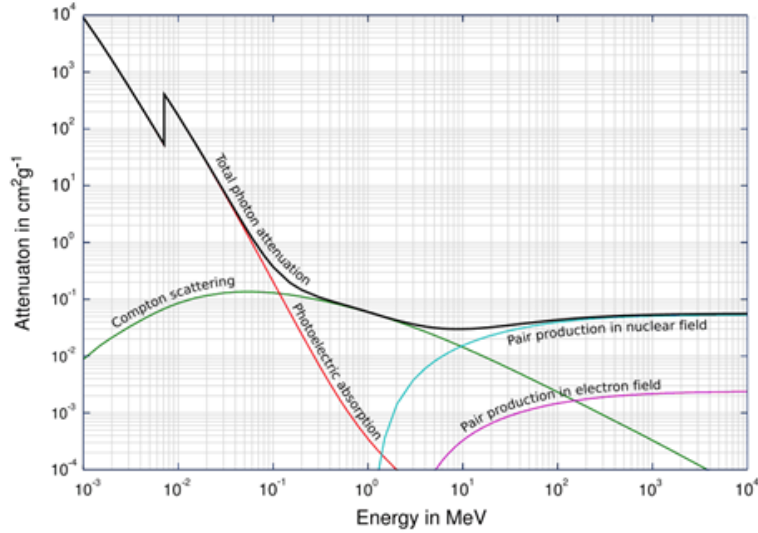
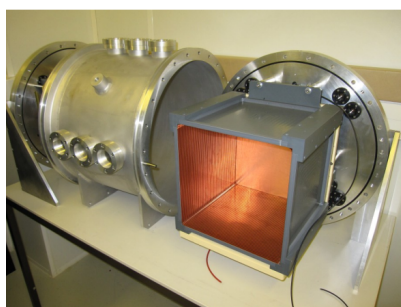


图 1.4 光子和物质的几种相互作用截面随能量的变化

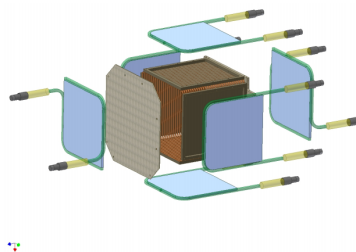
(3) HARPO 的实验配置

HARPO 探测器是一个 30 立方厘米的 TPC, 在 2.1bar 的压力下充满氩气: 异丁烷比为 95:5 混合气体。它配备了一个漂移笼, 提供 220V/cm 的漂移场。气体电离产生的电子以恒定的速度 $v_{drift} \approx 3.3\text{cm/s}$ 沿电场漂向读出平面。读出平面配有两个气体电子倍增器 (GEM) 和一个微网状气体结构 (Micromegas), 用于放大电子。放大后的电

子信号由两组垂直的条带（X 方向上的规则条带和 Y 方向上由底层条带连接在一起的垫片）收集。通过一组 AFTER 芯片和相关的前端卡 (FEC) 读出这些条带的信号并将其数字化。(如图1.5a1.5b)。



a HA 演示装置



b HA 设计草图

图 1.5 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。

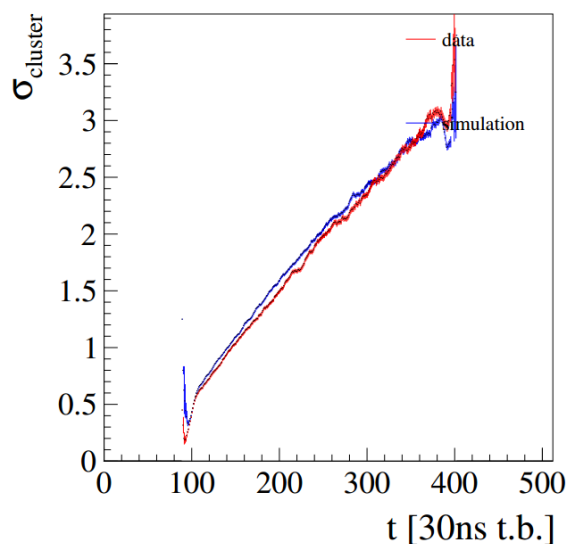


图 1.6 数据 (红色) 和模拟 (蓝色) 中宇宙射线样本的信号大小 (有效值) 与漂移距离的函数关系, 可见数据和模拟结果非常吻合

(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 ϕ_{+-} 。 ϕ_{+-} 的分布预期将遵循一个包含偏振不对称性 A 和偏振方向 ϕ_0 的分布。通过将极化和非极化光子的 ϕ_{+-} 分布相除，可以消除系统误差。结果如图：

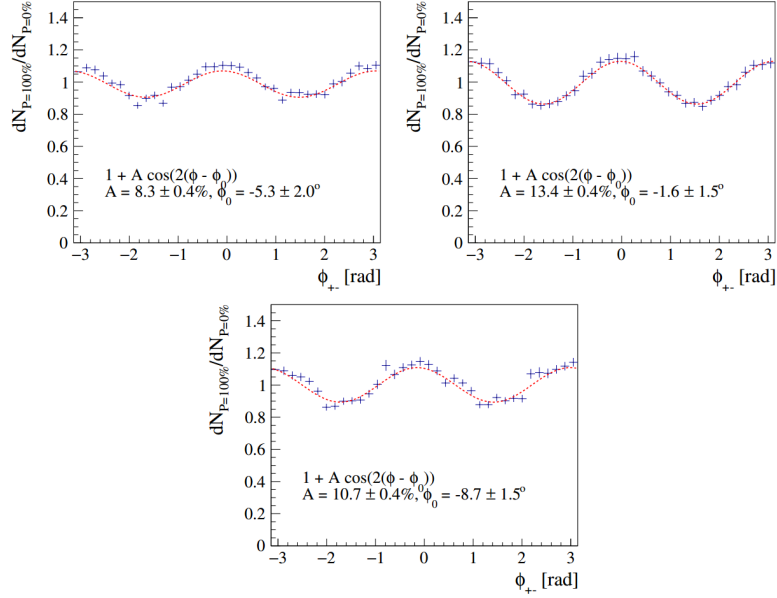


图 1.7 11.8 MeV 光子束的极化调制 (左上角两个分布均为真实数据。右上角两种分布都是模拟的。下图中偏振光分布来自真实光束数据，非偏振光分布来自模拟数据)

2. 角度测量结果

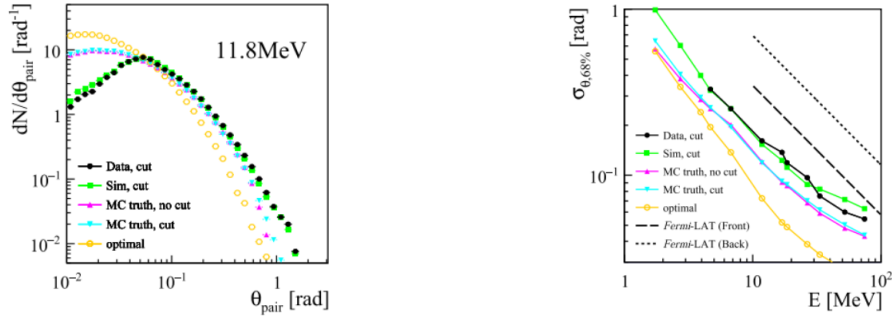
- 未能直接测量反冲核的动量大小，其贡献记作 σ_{recoil} ；
- 未能直接测量两个粒子的动量大小，其贡献记为 σ_p ；
- 对单个带电粒子探测器视域 (场) 有限。将 $\sigma_{\theta,68\%}$ 记作粒子数 68% 的包含角 (即距 σ_θ 平均值一个标准差内)，模拟部分结果如图1.8：

1.3.2 e-ASTROGAM: 伽马射线天文学的新视野

e-ASTROGAM (增强型 ASTROGAM) 是一个国际合作的科学项目，它将提供一个前所未有的观测平台，用于研究从 0.3MeV 到 3GeV 能量范围内的非热宇宙。这个项目将通过其高灵敏度、角分辨率和能量分辨率，以及偏振测量能力，来开启对非热宇宙研究的新窗口。

(1) e-ASTROGAM 的科学动机

- **极限宇宙:** 研究相对论性喷流和流出源的物理过程，包括粒子加速机制和磁场的作用。
- **高能粒子的起源和影响:** 研究低能宇宙射线的起源和传播，测量宇宙射线在星际云中的扩散及其对气体动力学的影响。



a 11.8 MeV 光子光束的残角 θ 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 1.8 HARPO 的实验模拟结果与测量结果对比

• **核合成和化学演化:** 通过探测关键的伽马射线谱线, 研究银河系中不同同位素的产生和分布, 揭示超新星爆炸的历史。

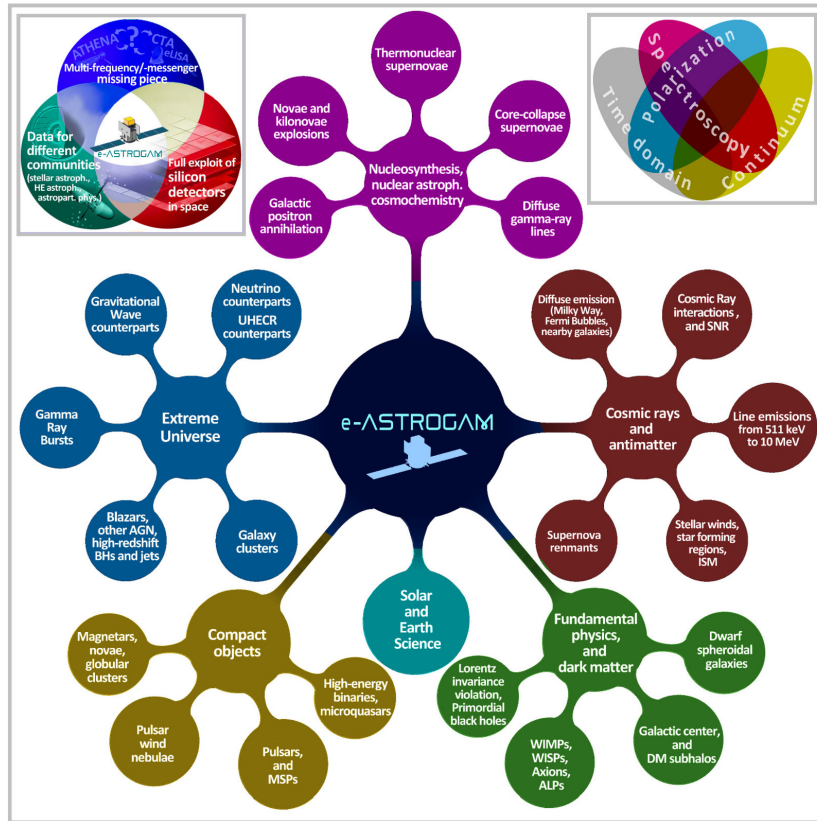


图 1.9 e-ASTROGAM 项目科学目标

(2) e-ASTROGAM 的设计目标

• 能量覆盖范围广 (0.3 MeV 至 3 GeV)，与以前的仪器相比，0.3-100 MeV 范围内的连续谱灵敏度提高了两个数量级 (跟踪器的能量下限可低至 150 keV，尽管角度分辨率会迅速降低，热量探测的能量下限可低至 30 keV)；

• 灵敏度：对伽马射线灵敏度更高，提供比现有仪器高 1-2 个数量级的灵敏度 (如对 Type Ia SNe 的 847 keV 伽马射线的线灵敏度比 INTEGRAL/SPI 高 70 倍)；

• 大视场角 (>2.5 sr)，能探测瞬变源和数百个 GRB；

• 角分辨率：(1 GeV 时约为 0.15°) 在特定能量范围内其极佳的角分辨率将为探测器提供卓越的辨识能力；

• 对 GRB 以及其他宇宙和地球瞬变现象有亚毫秒级触发和警报能力；

• 康普顿和对产生探测技术相结合，可对探测器的系统不确定性进行与模型无关的控制。

(3) e-ASTROGAM 的仪器设计

e-ASTROGAM 的主要组成部分是：一个用于探测康普顿散射和对产生能区的伽马射线的硅跟踪器，一个由高 Z 值闪烁材料 CsI 组成的、能有效吸收康普顿散射伽马射和正负电子对的、用于探测高能量伽马射线的量热计，一个由塑料闪烁体组成的、用于排除带电粒子的背景的反符合系统。

实验项目所用探测器主要部分的设计如图1.10：

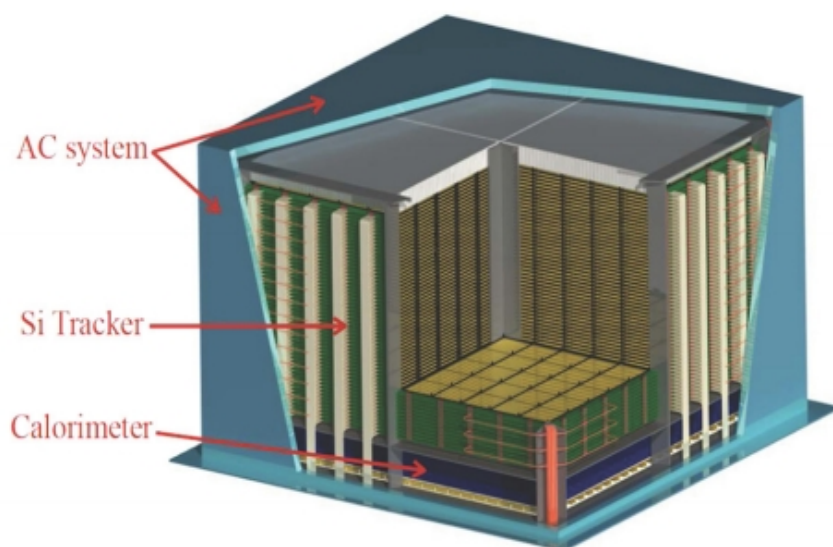


图 1.10 e-ASTROGAM 的仪器设计

(4) e-ASTROGAM 的仪器优势

e-ASTROGAM 将在 MeV 域和几百 MeV 以上以大幅提高的角度分辨率对宇宙成像,即在 1MeV 和 1GeV 的角度分辨率上分别比 CGRO/CMPTEL 望远镜和 Fermi-LAT 仪器提高 4 倍。其主要原因有二:

在对产生能区 (对比 Fermi-LAT):e-ASTROGAM 的角分辨率比 Fermi-LAT 高,这是由于 e-ASTROGAM 的跟踪器中没有重型转换器,同时探测器的轻型机械结构最大限度地减少了探测体积内的被动材料数量,从而能够更好地跟踪次级电子和正电子的径迹。

在康普顿散射占主导的能区,由于跟踪器和量热计的空间和光谱分辨率都很高,e-ASTROGAM 的角度分辨率将接近由目标原子电子速度引起的多普勒展宽所导致的物理极限。

(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 实验指标预期

第 2 章 实验配置

2.1 MeGaT 实验方案

MeGaT (MeV Gamma-ray Telescope) 探测系统作为新一代高压时间投影室 (TPC) 技术的创新性应用, 其特殊的架构旨在突破 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, 从而实现对康普顿散射过程的全事件重建:

2.1.1 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, 其主要功能是实现低能量分辨率、大视场、低角度分辨率的 MeV 伽马射线探测。该模块采用高压 TPC 技术, 结合 Micromegas 电子径迹成像技术, 实现对 MeV 伽马射线的低能量分辨率探测。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。

2.1.2 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%。

2.2 MeGaT 实验原理

MeGaT (MeV 伽马射线望远镜) 项目的核心原理基于康普顿散射成像技术, 通过高压时间投影室 (TPC) 与像素化碲锌镉 (CZT) 探测器的协同工作, 实现对 MeV 能段伽马射线的高精度探测与重建。其工作原理可分为以下几个关键步骤: 首先, 入射伽马光子在 TPC 内与原子发生康普顿散射, 产生高能电子和散射光子; TPC 模块利用 10 bar 高压环境延长电子径迹, 并通过 Micromegas 探测器对电子的三维径迹进行高分辨率重建 (空间分辨率 0.3 mm), 精确确定散射顶点坐标 (误差 ± 0.5 mm) 和电子出射方向 (角度误差 $< 1^\circ$)。随后, 散射光子进入 CZT 探测器, 通过光电效应或多次康普顿作用沉积能量, CZT 凭借其高原子序数 ($Z=48$) 和像素化设计 (像素间距 0.5 mm), 在 1-10 MeV 能段实现优于 1% 的能量分辨率和亚毫米级位置精度。通过 TPC

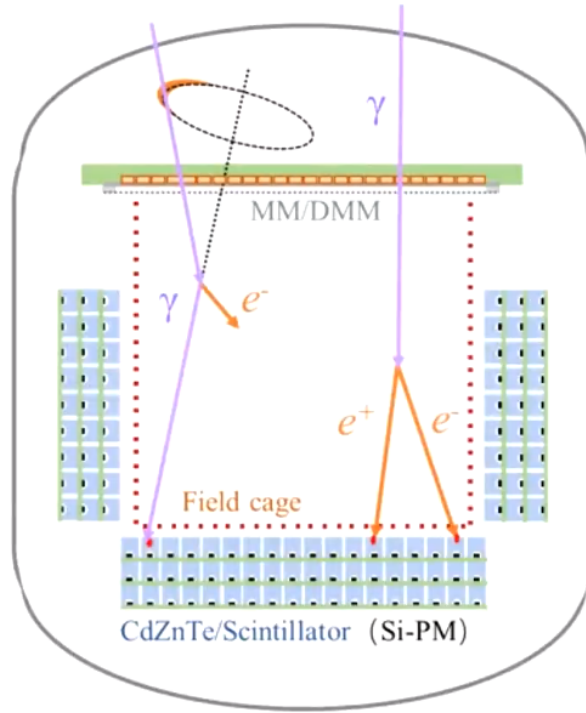


图 2.1 MeGaT 探测系统概念图

记录的散射角 (θ) 与 CZT 测量的剩余光子能量 ($E_{\gamma'}$), 结合康普顿公式 $E_{\gamma} = \frac{E_{\theta}}{1-\cos(\theta)}$, MeGaT 系统可精确反推入射伽马光子的初始能量 (E_{γ}) 和方向 (θ)。此外, TPC 与 CZT 的时间符合测量 (时间窗 <10 ns) 可有效剔除宇宙线等非关联事件, 将本底噪声抑制至 10^4 量级, 显著提升信噪比。MeGaT 还采用贝叶斯反演算法 (BIO-COM) 优化康普顿锥重建, 将开角不确定性从传统方法的 $\pm 20^\circ$ 压缩至 $\pm 4^\circ$, 进一步提高了角度分辨率

2.3 MeGaT 样机搭建

2.4 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;

.....

.....

2.5 TPC 探测器构建与性能研究

2.6 数据与模拟对比分析

2.6.1 电子学噪声测试

由于读出芯片在制造工艺上的固有缺陷，读出电荷的噪声是不可避免的。在实际测量中，噪声会对信号的测量精度产生影响，因此需要对读出电荷的噪声进行测试。

2.6.2 探测器 X-RAY 准直测试

2.6.3 探测器 X-RAY 能谱测试

2.6.4

2.7 讨论与总结

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2.1。

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

.....

.....

2.8 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

本文是在导师张志永老师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