arXiv:2602.21238v1 [physics.ins-det] 13 Feb 2026

用于核天体物理研究的基于 Micromegas 的主动靶时间投影室的研制

PralayKumarDas[1*]、Nayana Majumdar[1] 和 Supratik Mukhopadhyay[2]

[1*]萨哈核物理研究所应用核物理部，萨哈核物理研究所，印度霍米·巴巴国家研究所附属机构，西孟加拉邦加尔各答比丹纳加尔，1/AF 区块，邮编 700064。[2]奈哈蒂 Prolife 研究部，印度西孟加拉邦奈哈蒂。

*通讯作者。电子邮箱：pralay.das@saha.ac.in；贡献作者：nayana.majumdar@saha.ac.in；supratikmukhopadhyay.sinp@gmail.com；

摘要

萨哈核物理研究所设计并制造了一种基于 Micromegas 的主动靶探测器，名为 SAT-TPC（萨哈主动靶时间投影室）。在大气压下，使用 Ar–CO_2 (90:10) 和 Ar–iC_4H_{10} (95:5) 对 SAT-TPC 进行了测试。首先在一个小型测试腔室中对微网格气体探测器进行表征，以优化漂移电场与放大电场之比，从而最大限度地提高电子透过率。确定最佳运行参数后，将同一微网格气体探测器用作 SAT-TPC 原型的读出平面。估算了 ^{55}Fe 和 ^{241}Am 的能量分辨率。对 α粒子径迹进行了直接分析，展示了读出板平面准确重建轨迹方向和长度的能力。采用基于 Geant4、Garfield++和 COMSOL 的流体动力学模型，模拟有效气体体积中的重建 α 径迹。结果与模拟吻合良好，证实了所用模型对于 Ar–CO_2 (90:10) 和 Ar–iC_4H_{10}(95:5) 气体中 α粒子的准确性。

关键词： Micromegas、主动靶时间投影室、能量分辨率、 α 径迹重建、气体增益

1 引言

Micromegas（微型气体结构）是一种气体探测器，因其出色的空间分辨率、高计数率能力和稳健性，被广泛应用于实验粒子物理和核物理。近年来，基于Micromegas的主动靶时间投影室（AT-TPC）已成为开展核天体物理研究的关键工具，用以探究作为元素起源的恒星核合成，并为不同模型和预言提供关键数据。例如，估算天体物理能区的光核反应截面，或测定霍伊尔态衰变机制的分支比，对于阐明恒星介质中的碳氧合成至关重要；为获得高精度结果，这些研究已利用AT-TPC开展[1, 2]。

AT-TPC 是一种充气粒子探测装置，可提供近4π 覆盖范围，并实现高效的三维径迹跟踪，从而能够利用能量损失信息，通过运动学重建和粒子鉴别，精确测量核反应或衰变横截面。该装置中的气体既作为靶又作为有效区探测介质，这一独特的双重功能带来了多项优势，有助于规避采用固体靶和固态探测器阵列的传统技术所面临的若干问题，例如能量涨落、本底、粒子鉴别歧义、堆积效应、有限的能量分辨率等，更不必说在实验中搭建和运行一台独立紧凑装置的便利性。所有这些因素共同促使实验技术发生范式转变，从而能够探索核物理与核天体物理领域中广泛的研究问题，涵盖壳层演化、团簇结构、奇异衰变、巨共振、聚变裂变等。这种新型装置的若干应用实例包括 MAYA [3], MUSIC [4],MAIKo [5], ACTAR [6], AT-TPC [7],ELITPC [8], TexAT [9], MATE [10], GADGET [11],等。

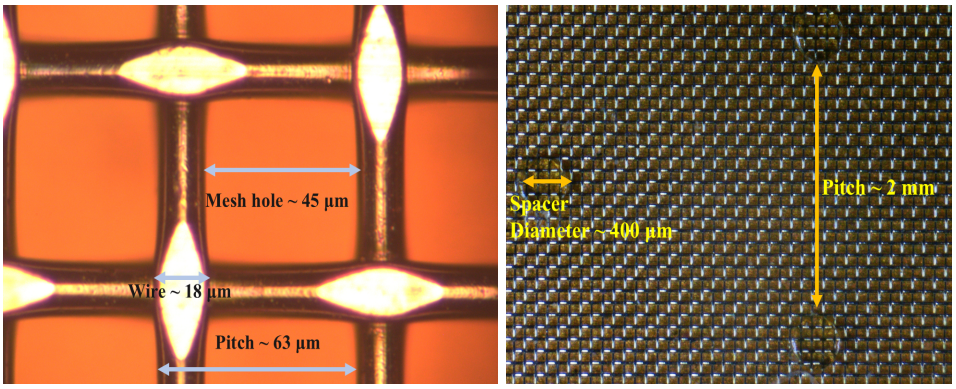
AT-TPC 具备高精度三维径迹跟踪能力，因此能够观测到 ^{12}C 中霍伊尔态极为罕见的直接衰变道，并通过直接（0.043%） [2] 和间接（0.00057%） [12]方法精确测量分支比；迄今为止，硅探测器取得的最佳上限为 0.019% [13]。为探索霍伊尔态的衰变机制，并高精度测量其直接衰变分支比，萨哈核物理研究所实验室开展了研发工作，研制 AT-TPC 装置，即 Saha AT-TPC（SAT-TPC）。为获得 SAT-TPC 最优设计和运行的指导依据，研究人员采用流体动力学模型，对该装置在所选设计参数和运行条件下的性能进行了模拟 [14]。考虑到未来的数据采集工作，还制定了数据分析流程，使用卷积神经网络（CNN） [15]对直接衰变进行分类。本文报告了体式 Micromegas 探测器 [16] 的表征与优化工作，以便将其作为 SAT-TPC 装置的端板读出。在此背景下，研究人员在类似 SAT-TPC 的小型原型装置中，使用不同的混合气体，对 Micromegas 的增益、能量分辨率以及 α-径迹重建性能开展了详细的实验研究。通过比较实验测量结果与数值模拟结果（由

使用 Geant4 [20], Garfield++ [17]和 COMSOL [19], 完成），以预测装置的动态特性，并优化相关设计和运行参数。

本文按以下顺序组织。第2 节介绍 Micromegas 原型及其表征。第3 节介绍原型 SAT-TPC 的设计、电场配置和测量结果。第 4 节详细说明初级电荷输运和径迹重建的数值模拟。最后，第5节给出总结与结论。

2 Micromegas 的表征

SAT-TPC 的二维位置读出平面选用了放大间隙为 128 μm 的体式 Micromegas。对有效区域为 10 ×10 cm^2 的原型进行了表征研究，以优化其运行参数。图1展示了该原型的俯视图及其特征。图像使用经校准的显微镜（Olympus MX51）拍摄，光学变焦倍率分别为 50 倍和 10 倍。网格由直径约为 18 μm、节距为 63 μm 的不锈钢丝编织而成。用于保持放大间隙和网格机械刚度的支柱直径为 400 μm，按约 2 mm 的间距固定。Micromegas 的读出平面上有 10 条宽度为 0.95 cm 的条带，条带之间的间隙为 0.05 cm。



(a) (b)

图1: (a) 间距为 ~63 μm的不锈钢丝网图像；(b) 网格表面，显示直径为 ~400 μm、间距为2 mm的支撑柱。

2.1 测试装置

电子透过率是需要研究的一项关键特性，可用于确定微网格气体探测器的工作区间。研究中使用了 ^{55}FeX射线源进行测试，测试装置示意图如图2所示。微网格气体探测器安装在一个密封的不锈钢测试腔中，腔体内部容积为

为 $6.5 \times 40 \times 40\ \mathrm{cm}^3$, , 如图2所示。测试腔室以预混气体冲洗，具体为 Ar+CO_2 (90:10) 和 Ar+iC_4H_{10} (95:5)，并维持在大气压下。通过 CAEN 电源向阴极板施加负高压，建立漂移电场；同时独立调节微网偏压以形成放大电场。信号处理方面，阳极条连接至一台低噪声、8 通道电荷灵敏前置放大器（型号：CAEN A1422）。随后将模拟信号输入 CAEN V1730S数字化仪进行数据记录。数据采集由 Compass软件控制。将一台 ^{55}Fe X射线源安装在阴极板上方，用于照射有效区域以进行表征。

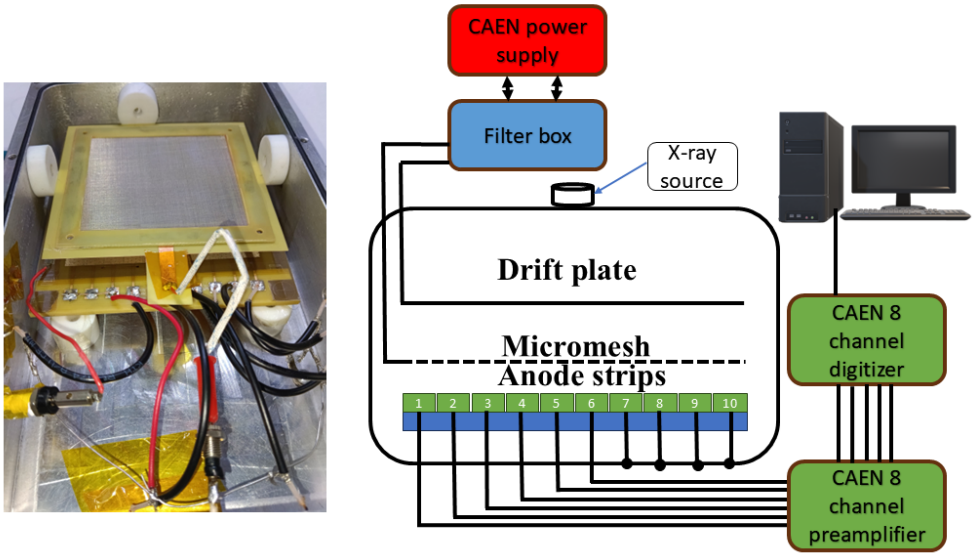


图2：采用 Micromegas 的实验装置

2.2 电子透过率

电子透过率（$\mathcal{T}$）是微网格气体探测器的一项基本参数，定义为从漂移区进入放大间隙并成功穿过微网孔的初级电子数与到达网格的电子总数之比。为优化这一参数，通过分别改变漂移场（E_{drift}）和放大电场（E_{amp}），系统地探究了电子传输情况。放大电场保持在优化值——对于 $Ar+CO_2$ (90:10)，为 40.8 kV/cm；对于 $Ar+iC_4H_{10}$ (95:5)，为 26.5 kV/cm——同时将漂移场在约 100 至 1000 V/cm 的范围内进行扫描。

阳极平面记录的典型 5.9 keV ^{55}铁 X射线源能谱如图3所示。

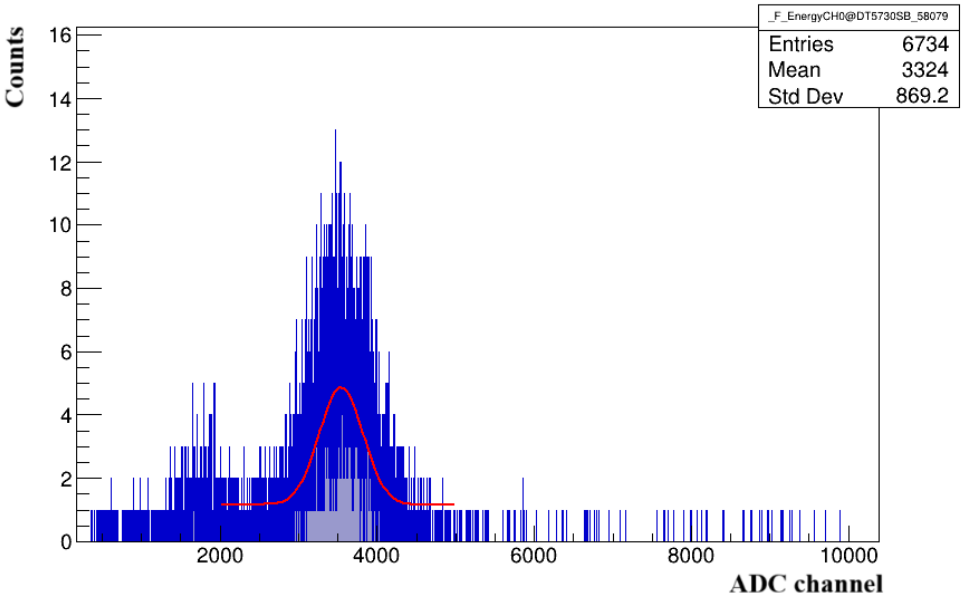


图 3：原型微网格气体探测器的阳极平面在大气压力下使用 Ar+CO_2 (90:10)混合气体运行时记录的典型 5.9 keV X射线能谱

使用两种混合气体运行的 128 μm 体式 Micromegas 的实测电子透过率绘于图 4 中，并以漂移场为横坐标；结果与先前的研究 [21]相当。观测发现，电子传输率随漂移场增强而提高，直至进入对应完全透过的平台区；超过该区域后，由于网格附近的过度聚焦效应，电子传输率在更高场强下有所下降 [21]。该平台界定了微网格气体探测器的最佳工作范围，在此范围内，通过最大限度地将电子从漂移区提取至放大区，增益和能量分辨率均保持稳定。

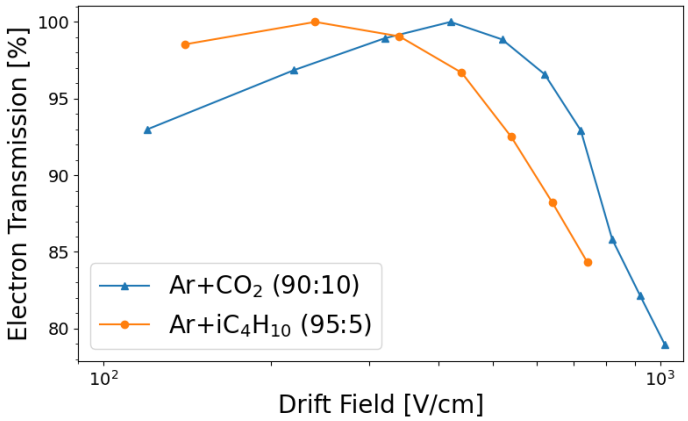


图 4：Micromegas 探测器的电子传输随漂移场的变化关系。测量在大气压下进行，Ar+CO_2 (90:10) 混合气体中的放大电场恒定为 40.8 kV，Ar+iC_4H_{10} (95:5) 混合气体中的放大电场恒定为 26.5 kV

3 SAT-TPC 原型

随后，Micromegas 被集成到 SAT-TPC 原型装置中，该装置具有相对较长的漂移区。此装置对于在实际条件下研究 Micromegas 的性能至关重要，同时还考虑了扩展漂移体积、场笼几何结构和气体循环系统的影响。

3.1 装置

已建成一座内部容积为 $6.5 \times 40 \times 40$ 立方厘米^3 的密封腔室，用于循环预混合的 Ar+CO_2 (90:10) 和 Ar+iC_4H_{10} (95:5)，压力为大气压。阴极板安装在 Micromegas 上方 4 cm 处，其后设置了两块场整形电极，间距为 1.34 cm，以确保有效区内电场均匀。阴极和两块场整形电极通过 10 MΩ 电阻器串联。阴极施加负偏压，因此场笼起到了分压器的作用。装置示意图见图 5，原型 SAT-TPC 和 Micromegas 读出平面的照片见图 6。腔室内还设置了合适的安装结构，以便安装 Fe^{55} X射线源和 Am^{241} α源，进行必要的测量。

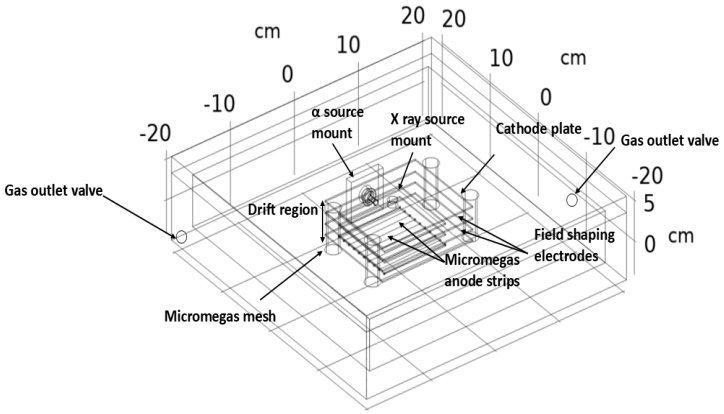
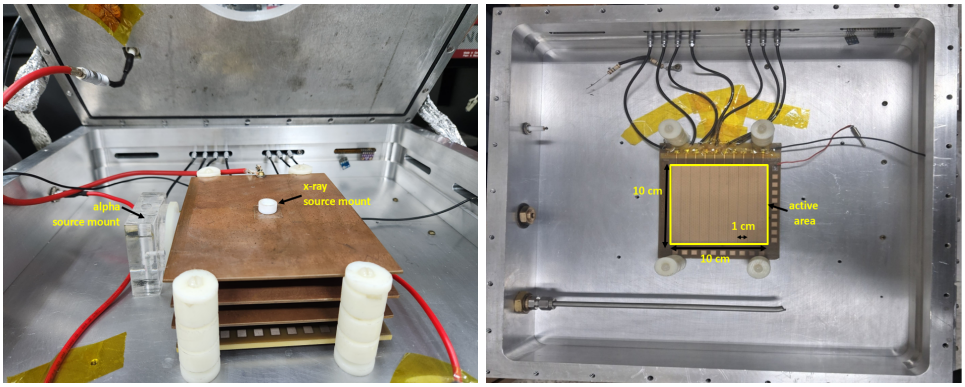


图 5：原型 SAT-TPC 装置示意图



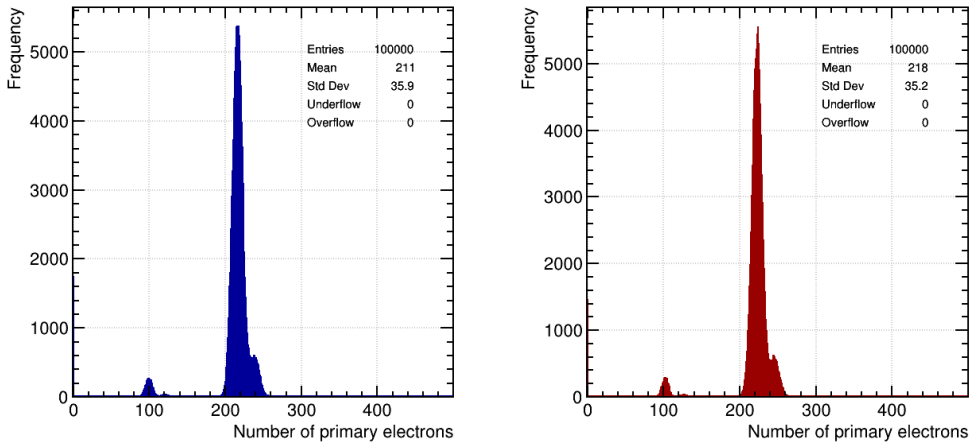
(a) (b)

图 6：(a) 配有 X射线和 α-源安装座的原型 SAT-TPC 装置；(b) 微网格气体探测器有效区域及间距为 1 cm 的读出条。

Micromegas 的阳极平面由 10 条读出条组成，每条宽 9.5 mm，相邻条带之间的间隙为 0.5 mm。由于读出电子设备数量有限，10 条读出条中使用了 7 条，其余 3 条接地。使用 ^{55}Fe X射线源进行测量时，从微网和读出条获取信号。

3.2 气体增益

此处初级电子的数量是根据 GARFIELD++代码，使用实现光吸收电离（PAI）模型的 HEED [22] 工具包估算的。对于每个X射线事例， HEED 都会计算能量损失，并沿光子相互作用径迹生成电离团簇。每个团簇对应于一次电离过程中产生的一组局域化电子-离子对，而初级电子总数则通过对一个事例中所有团簇产生的电子数求和得到。图7展示了5.9 keV X射线在Ar+CO_2 (90:10)和Ar+iC_4H_{10} (95:5)混合气体中产生的初级电离电子直方图。所得分布的平均值分别为211和218个初级电子。这些数值与集成于Garfield中的HEED工具包的预期一致，++ [22]反映了初级电离产额对气体成分的依赖性。为确定Micromegas的增益，阴极和网格电压均被



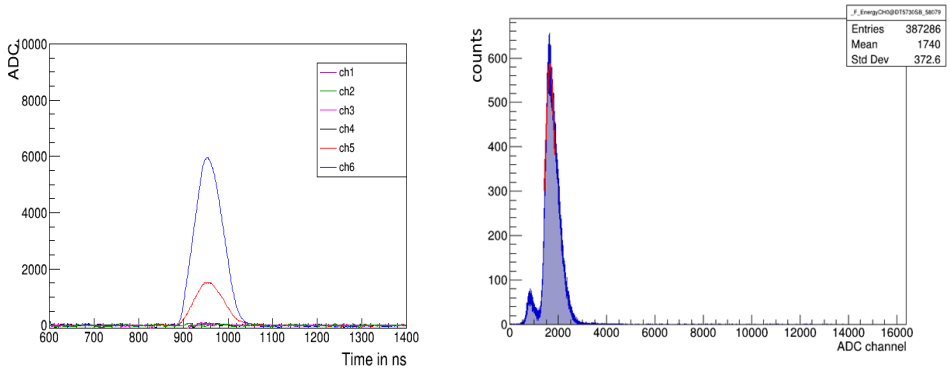
(a) Ar–CO_2 (90:10)　　(b) Ar–iC_4H_{10} (95:5)

图 7：通过 Garfield++模拟获得的，在大气压和室温下不同混合气体中由 5.9 keV X射线产生的初级电子数。

在系统地改变电压的同时，保持相邻电极与网格之间的电位差相等。通过将网格电压从 -225V 调至 -385V，并相应地将阴极电压从 -900V 调至 -1540V，测量增益随漂移场的变化。读出条上感应的电荷信号首先转换为电压，然后使用 8 通道前置放大器（型号：*CAEN A1422*）进行放大。所得模拟电压由数字化仪（型号：*CAEN V1730S*）数字化并记录，以便进行离线分析。所有测量均在大气压下，使用 Ar+CO_2 (90:10) 和 Ar+iC_4H_{10} (95:5) 混合气体进行。将活度为 8 mCi 的 ^{55}Fe 放射源放置在阴极板上方的支架上，用于

增益测量。数据采集期间，探测器腔室保持在温度 24 ± 1℃ 和压力 754 ± 4.5 Torr。

由于放射源放置在阴极板中心附近，第五和第六条带通常记录到最大的信号（图 8a ）。能谱取自数字化仪 *CAEN V1730S* 中记录的微网信号，该信号经过 *A1422* 前置放大，结果如图 8b所示。



(a) (b)

图 8: (a) 读出信号；(b) Fe^{55}-源的 X射线能谱。

气体增益 G 可定义为收集到的电子数与初级电子数 [21] 之比，可表示如下。

$$G = \frac{Q_{\mathrm{col}}/e}{N_p}, \tag{1}$$

其中， Q_{col} 为收集电荷， e 为元电荷， N_p 为初级电子数。

为了确定收集到的电子数，采用测得的电荷，该电荷由读出条记录的 ADC计数获得。为了将数字化仪获得的 ADC计数转换为收集电荷（Q_{col}），我们通过读出条的整个电子学链路进行了 RC注入校准。电荷与 ADC计数的校准图如图 9所示。

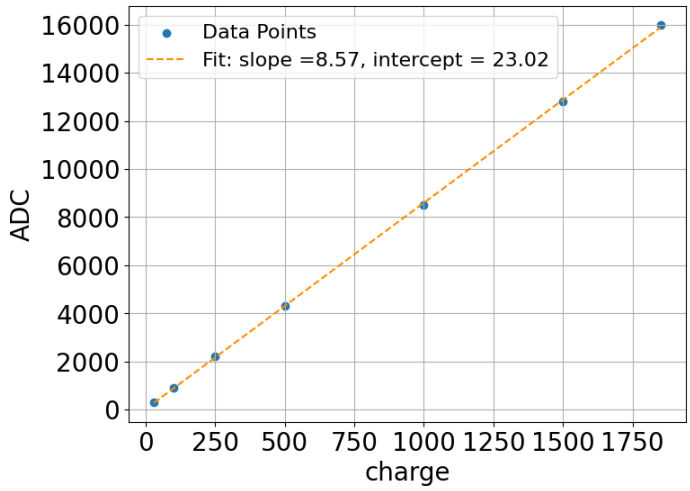


图 9：用于将 ADC计数 转换为收集电荷的校准图。

使用图 9 所示的校准拟合，根据以下表达式将 ADC计数转换为电荷（飞库仑）。

$$\text{charge [fC]} = \frac{\text{ADC [counts]} - 23.02}{8.57} . \tag{2}$$

图10展示了使用+CO_2 （90:10）和+iC_4H_{10} （95:5）测得的增益曲线，测量采用 ^{55}Fe 放射源，结果与先前的研究相当 [21]。两种混合气体均呈现出预期的增益随放大电场呈指数依赖关系。对于+CO_2, ，明显的放大约从 36 kV/cm 开始；而+iC_4H_{10} 在稍低的电场下就能测得增益。较高电场下+iC_4H_{10} 的增益较高，这可归因于其更显著的彭宁效应和较低的电离势 [24]。

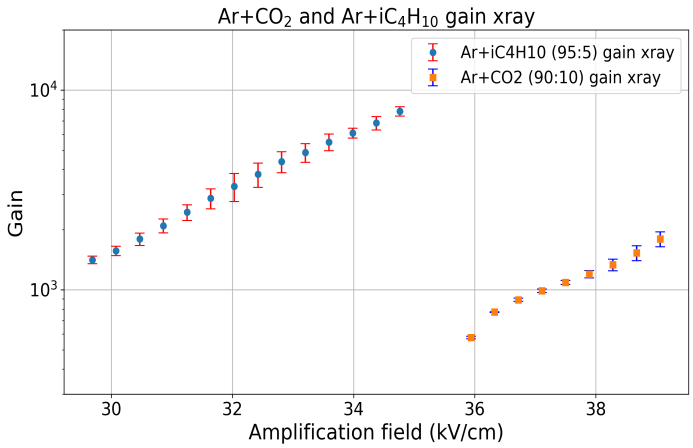


图 10：使用 ^{55}Fe X 射线源测得的 Ar+CO_2 (90:10) 和 Ar+iC_4H_{10} (95:5) 中的增益。

4 SAT-TPC 原型的模拟

我们开发了一个基于流体动力学方法的模拟框架，用于研究主动靶时间投影室的性能及空间电荷效应对其的影响 [18]。在本研究中，使用同一模型估算放大前到达 Micromegas 的初级电荷。该模型采用类似流体动力学的方程，描述气体中负电荷和正电荷的输运，并在 COMSOL Multiphysics 中实现 [19]。我们使用 GEANT4 [20] 模拟粒子引发的初始电离，并使用 MAGBOLTZ [27] 提供混合气体的输运参数（漂移速度和扩散系数）。电场则在 COMSOL 中计算。

4.1 电场模拟

已使用 COMSOL 对 SAT-TPC原型装置在给定几何结构下的电场分布进行了模拟。模拟结果如图 11 所示，其中电场强度以颜色编码表示，黑色曲线则表示电场线，展示了电场方向。可以看到，在中央漂移区，模拟得到的电场线笔直且相互平行，证实漂移场均匀，这是实现精确三维径迹重建的必要条件。相比之下，在边缘附近及场整形电极周围，电场线发生弯曲并聚集，表明存在局部电场畸变。当阴极电压为 -1200 V、Micromegas网格电压为 -300 V 时，中央有效区的电场约为 228 V/cm。漂移场与放大电场之比为

$$\frac{E_{\mathrm{drift}}}{E_{\mathrm{amp}}} \approx 9.6 \times 10^{-3},$$

该比例用于 SAT-TPC原型中，与通过 Micromegas 表征测量获得的最佳值十分接近。

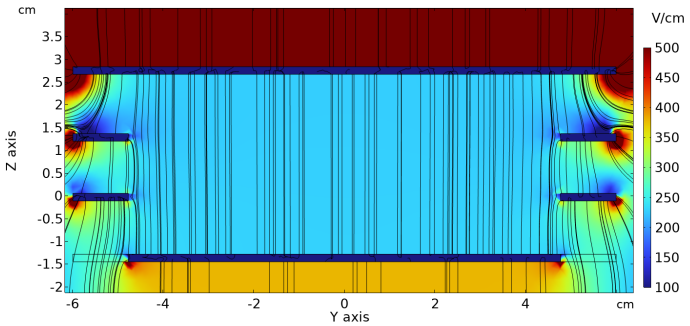
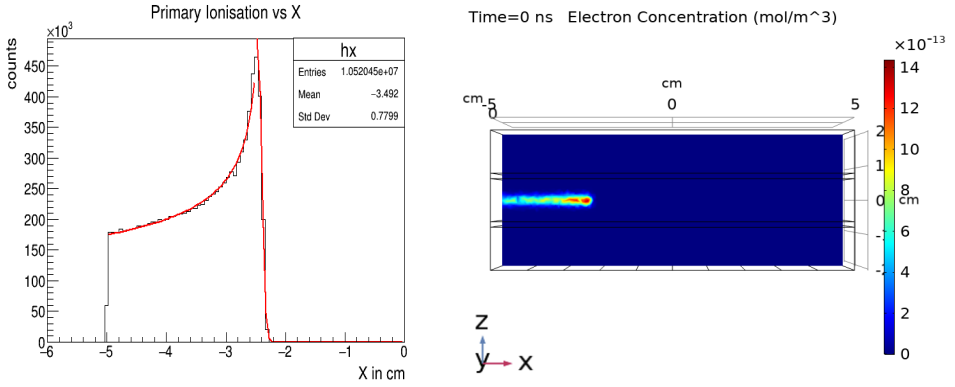


图 11：原型 SAT-TPC 横截面内的电场强度（单位：V/cm）。

使用低能物理列表（Penelope、Livermore 和 PAI），在 GEANT4 中模拟了来自 ^{241}Am 的 5.48 MeV α 粒子的初级电离。MAGBOLTZ 提供了 Ar–CO_2 (90:10) 和 Ar–iC_4H_{10}(95:5) 的漂移速度和扩散参数。利用这些参数模拟了漂移体积内初级电子簇的时间演化和空间扩散。

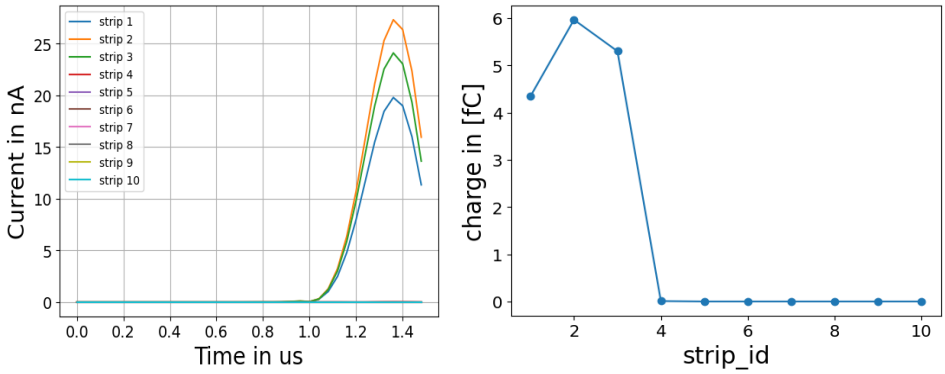
生成了一百个 α条径迹事件，使用 GEANT4 模拟，源放置在距有效体积 2 cm 处（位于 $X = -7$ cm），由此得到的 Ar–CO_2 (90:10) 的 COMSOL 种子簇示意图如图 12所示。



(a) (b)

图 12：(a) 在 Geant4 中模拟的 α 事例。(b) 在 COMSOL 中模拟的 Ar–CO_2 (90:10) 初级电离种子簇。

利用漂移与扩散参数模拟初级电子和离子浓度随时间的演化过程。在电子穿过漂移体积传播时，计算阳极读出焊盘（尺寸为 10 cm × 1 cm）上的感应电流。对这些电流信号进行积分，得到读出条上的等效收集电荷，如图 13所示。



(a) (b)

图 13：(a) 一个 α 径迹产生的电流。(b) COMSOL 模拟得到的 α沉积的初级电离电荷。

4.2 能量分辨率

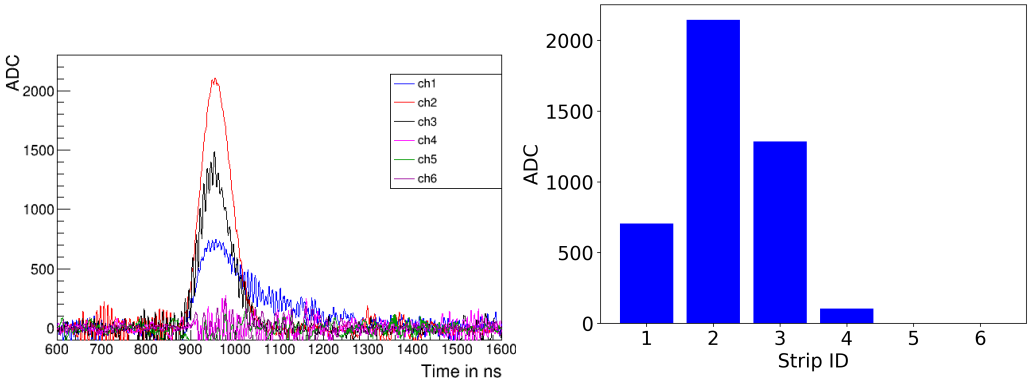
在测量 ^{55}Fe峰时所用的工作电场下，测得的半高全宽能量分辨率对于 Ar+CO_2 (90:10) 为 9.3%，对于 Ar+iC_4H_{10} (95:5) 为 8%。异丁烷混合气体中观察到的较佳分辨率，可能反映了统计电荷收集的改善和增益涨落的降低，这与基于气体电子倍增器的研究 [25] 以及 Micromegas 性能测量 [26]所报告的趋势一致。整个数据集的误差条都很小，表明测量条件稳定。在测量范围内未观察到增益饱和。

4.3 α-径迹

对于使用 ^{241}Am源进行的 α径迹测量，微网信号被用作触发。这些测量采用了前文所述的同一电子学链路。Micromegas条带（10×10 cm^2 有效区域）垂直于α 源取向，并置于场笼下方。 ^{241}Am源使用直径为2 mm的尼龙管进行准直，并放置在微网平面上方2 cm处、场笼Z方向的中心位置，以确保 α粒子近似垂直于阳极条。来自前置放大器的微网信号用于触发条读出。落在微网触发周围 1 μs时间窗内的条带信号使用Compass数据采集软件进行记录。六个电子

通道用于Micromegas读出，实验中另有一路来自其微网的电子学通道用于触发。

图中展示了大气压下 Ar+CO_2 (90:10) 中条带 1–6 的信号示例 14。条带波形显示，相邻通道的脉冲高度按预期有所变化，这是漂移电子云横向扩散以及由此产生的相邻条带间电荷共享所致。相应的积分电荷分布给出了读出板平面上的横向电荷沉积分布，随后可用于确定击中位置，并重建 SAT-TPC 原型中的投影 α粒子径迹。



(a) (b)

图 14: （a）连接至电子学链路的六个通道的条带信号示例。（b）某个 α 事例沿条带的电荷沉积分布。

4.4 α源的气体增益

我们采用第 α 3.2 节所述的方法测定了 径迹的增益。对于大气压下 Ar α CO+ (90:10) 和 Ar_2 iC+H_4(95:5) 中能量为 5.48 MeV 的$_{10}$ 粒子，Micromegas 在 17–30 kV/cm 的放大电场下可提供 $\sim$10 至 110 的有效增益，如图15所示。增益随电场呈指数增长，且 Ar+iC_4H_{10} 中的增益系统性地较高，这与彭宁效应增强的氩–异丁烷混合气体的预期一致 [24]。其绝对增益值与采用类似几何结构、在相近工作压力下使用氩基混合气体的 Micromegas 报告值相当 [28], ，但仍低于采用额外前置放大级或在更高放大电场下工作的配置所获得的较高增益 [29, 30]。

在大气压下，对两种氩基气体混合物中的 α 径迹能量分辨率进行了研究。对于 Ar+CO_2 (90:10)，微网电压设为 -340 V（增益为$\sim$ 29）；对于 Ar+iC_4H_{10} (95:5)，微网电压设为 -240 V（增益为 $\sim$ 23）。相应的阴极电压分别为 -1360V 和 -960V。两种气体中的 α 范围约为 5 cm；由于放射源安装在距有效区 2 cm 处，

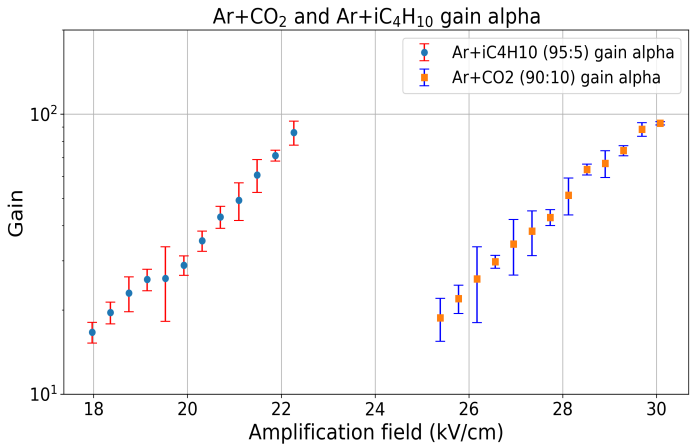
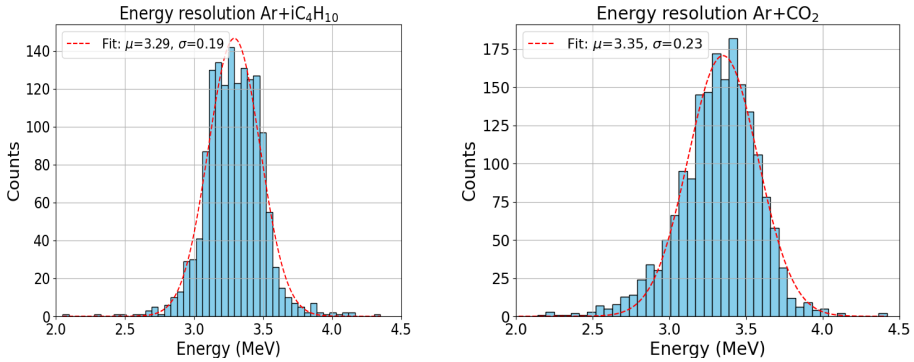


图 15：使用 α 源在 Ar-CO_2 (90:10) 和 Ar-iC_4H_{10} (95:5) 中测得的增益。

部分能量沉积在有效体积外的死区中。TPC 有效区内沉积的有效能量约为 3.43 MeV。两种气体的条带电荷总和所得到的能谱如图 16所示。



(a) (b)

图 16：^{241}Am α 粒子在 (a) Ar–CO_2 (90:10) 和 (b)Ar–iC_4H_{10} (95:5) 中沉积的能量谱。

图中的能谱16 在 3.35 MeV 附近呈现出明显的峰。测得的能量分辨率为 $\sigma = 6.9$ %（Ar+CO_2 (90:10)）和 $\sigma = 5.7$%（Ar+iC_4H_{10} (95:5)），对应的半高全宽值分别约为 16.1% 和 13.6%。异丁烷混合气体的分辨率有所提高，这与其电子扩散减弱及彭宁转移增强相符。相对较粗的 1 cm 条带间距也会导致峰展宽，因为数厘米长的

α 径迹仅跨越几条读出条，从而增加电荷收集方差。目前的结果处于大气压下运行的 AT-TPC 和 TexAT 型系统中体式 Micromegas 读出通常观察到的范围内 [9, 31]，且自然比高压微体式探测器所达到的 ∼2% 半高全宽 [28]更宽。总体而言，测得的分辨率符合在 1 atm 下运行、具有 1 cm 分段的 128 μm 间隙体式 Micromegas 的预期。未来工作将采用更精细的读出分段，以通过更优的空间采样提高位置分辨率和径迹拟合能力，并在更低压力下运行，同时探索混合式或微体式 Micromegas 配置，从而改善能量分辨率。

5 总结与结论

我们设计并表征了一种基于 Micromegas 的 SAT-TPC 原型，并使用 X射线和 α 源评估了其性能。基于焊盘平面信号进行的 α径迹重建结果与使用 GEANT4、Garfield++ 和 COMSOL 开展的数值模拟符合良好，表明该原型能够可靠地还原投影径迹长度和方向。使用 ^{55}Fe 源，在大气压下，我们对 Ar–CO_2 (90:10) 和 Ar–iC_4H_{10} (95:5) 中的 Micromegas 进行了优化，使其能够在全透射区稳定运行，并为 TPC 读出提供合适的增益。使用 ^{241}Am 源时，对于 5.48 MeV 的 α 径迹，探测器在 Ar–CO_2和 Ar–iC_4H_{10}，中实现了介于∼10 和 110 之间的有效气体增益，能量分辨率分别为 $\sigma = 6.9\%$ 和 $\sigma = 5.7\%$，符合在 1 atm 下运行的 128 μm 间隙体式 Micromegas 的预期。观测到的能量分辨率和径迹跟踪能力表明，Micromegas 是未来用于低能核反应研究的主动靶 TPC 的一种很有前景的读出方案。

未来的工作将着重于通过采用更精细的读出分段、探索在更低压力下运行，以及开展束流实验，在真实实验条件下验证 SAT-TPC 的性能，从而提高能量分辨率和径迹追踪的颗粒度。

致谢。 作者感谢 Nilanjan Biswas 先生在组装 Micromegas 探测器方面提供的技术帮助。我们还感谢 Abhik Jash 博士、Tanay Dey 博士、Vishal Kumar 博士和 Subhendu Das 博士在实验工作和数据分析方面提出的宝贵建议。我们也感谢 Tinku Sinha 教授、Anjali Mukherjee 教授和 Chinmay Basu 教授给予的支持。作者感谢萨哈核物理研究所提供的支持。

参考文献

[1] M. Gai 等，一种用于利用 *HI* 处伽马射线束开展核天体物理研究的光学读出 *TPC*（*O-TPC*）γS 《仪器杂志》**5** （2010）P12004。

[2] J. Bishop 等，《style id='2'>使用时间投影室对霍伊尔态直接衰变分量进行近乎无介质测量，《物理评论C》**102** (2020) 041303(R)。

[β C . E. D$_{emonc}$ h$^{y\ et\ a}$ l., $MAYA: An$ 有效区靶 $d_{etector}$ for $b^{inary\ reactions\ wit}$ h 奇异束流，《核仪器与方法》583 (2007) 341.[4]M. Avila等，利用多次采样电离室研究(α,p)和(α,n)反应，《核仪器与方法A》859 (2017) 63.[5] T. Furuno等，MAIKo主动靶的性能测试，《核仪器与方法A》908 (2018) 215.[6]B. Mauss等，主动靶与时间投影室（ACTAR TPC）的调试，《核仪器与方法A》940 (2019) 498.[7]T. Roger等，基于主动靶时间投影室（AT-TPC）项目的下一代实验，《核仪器与方法A》954 (2020) 161341.[8] M. Gai等，用于伽马射线束核天体物理研究的时间投影室（TPC）探测器，《核仪器与方法A》954 (2020) 161779.[9] E. Koshchiy等，用于稀有同位素实验的德克萨斯主动靶（TexAT）探测器，《核仪器与方法A》957 (2020) 163398.[10] Z. C. Zhang等，利用时间投影室研究恒星能区的重离子聚变反应，《核仪器与方法A》1016 (2021) 165740.[11] Ruchi Mahajan等，用于GADGET II的时间投影室，《物理评论C》110 (2024) 035807.[12] R. Smith等，对^{12}C中霍伊尔态直接 3α 衰变的严格上限，《物理评论C》101 (2020) 021302(R).[13] T. K. Ran等，关于 ^{12}C 中霍伊尔态衰变宽度的新高精度研究，《物理快报B》793 (2019) 130.[14] P. K. Das等，面向低能核物理的主动靶时间投影室数值建模，《仪器杂志》20 (2025) P01008.[15] P. K. Das等，利用神经网络对主动靶时间投影室中霍伊尔态衰变分支进行分类，《仪器杂志》20 (2025) P08036.[16] I. Giomataris等，体式Micromegas，《核仪器与方法A》560 (2006) 405.[17] R. Veenhof，Garfield：一种漂移室模拟程序，《核仪器与方法A》419 (1998) 726-730.[18] P. K. Das等，面向低能核物理的主动靶时间投影室数值建模，《仪器杂志》20 (2025) P01008.

[19]COMSOL Multiphysics，COMSOL Multiphysics，https://www.comsol.co.in/ comsol-multiphysics[20] S. Agostinelli等，GEANT4——一种模拟工具包，《核仪器与方法A》506 (2003) 250.[21] Purba Bhattacharya，微结构气体探测器的实验与数值研究，博士论文，加尔各答大学，2014. https://hdl.handle.net/ 10603/171687[22] I. Smirnov，快速带电粒子在气体中产生电离的建模，《核仪器与方法A》554 (2005) 474–493.[23] S.F. Biagi，电场和磁场影响下计数气体中电子漂移与扩散的蒙特卡罗模拟，《核仪器与方法A》421 (1999) 234–240... .[24] O. S¸ahin、I. Tapan、E.N. Ozmutlu、R. Veenhof，氩基气体混合物中的彭宁转移，《仪器杂志》5 (2010) P05002.[25] P. Roy、P. Bhattacharya、S. Mukhopadhyay、N. Majumdar，单层与双层气体电子倍增器中的电荷共享，《仪器杂志》16 (2021) C05001.[26] P. Bhattacharya、S. Bhattacharya、N. Majumdar、S. Mukhopadhyay等，不同设计参数的体式Micromegas性能研究，《仪器杂志》9 (2014) C04037.[27] S.F. Biagi，电场和磁场影响下计数气体中电子漂移与扩散的蒙特卡罗模拟，《核仪器与方法A》421 (1999) 234–240.[28] T. Dafni等，高压氩和氙混合物中微体式Micromegas探测器对 α粒子的能量分辨率，《核仪器与方法A》608 (2009) 259–267.[29] M. Cortesi等，用于AT-TPC应用、在低压H_2 和He中运行的混合式微结构气体探测器的最新进展，《欧洲物理杂志网络会议》117 (2016) 01007.[30] E. Koshchiy等，用于稀有同位素束流实验的德克萨斯主动靶（TexAT）探测器，《核仪器与方法A》957 (2020) 163398.[31] D. Suzuki等，AT-TPC原型：在纯氦气和低压混合气体中的性能，《核仪器与方法A》691 (2013) 39–54.