



北京大学

硕士研究生学位论文

题目：新型微结构气体探测器性能模拟研
究及CMS-GEM探测器升级项目

姓 名： 何少坤

学 号： 1501210102

院 系： 物理学院

专 业： 粒子物理与原子核物理

研究方向： 中高能与粒子物理

导 师： 班勇教授

2018年6月

版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以其他方式传播。否则一旦引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

摘要

关键词：其一，其二

ABSTRACT

Test (Some Major)
Directed by Prof. Somebody

ABSTRACT

Test of the English abstract.

KEYWORDS: First, Second

目录

第一章 引言	1
1.1 微结构气体探测器的发展历史	1
1.2 微结构气体探测器工作原理	3
1.2.1 带电粒子在气体中的原初电离过程	3
1.2.2 光子在气体中的原初电离过程	4
1.2.3 气体探测器中电子和离子的漂移扩散过程	5
1.2.4 电子在探测器中的雪崩倍增过程	6
结论	9
文献列表	11
附录 A 附件	13
致谢	15
北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明	17

第一章 引言

微结构气体探测器（Micro Pattern Gaseous Detector, 简称MPGD）代表了最新一代的气体探测器，由于其拥有极高的计数率承受能力、耐辐照性能、以及时间和空间分辨能力，MPGD目前已经成为国际气体探测器研究的热点，并广泛的应用于高能物理实验、核探测实验以及核技术应用设备等诸多方面。本章节主要介绍微结构气体探测器的发展历史，以及微结构气体探测器的工作原理。

1.1 微结构气体探测器的发展历史

气体探测器在粒子物理与核物理实验中扮演着非常重要的角色。世界上最早的气体探测器，盖革计数器[1],是一种管内存贮有气体，管内沿着轴线方向有特定材料金属丝的气体探测器，如图1.1所示，通过外接高压阳极丝和阴极丝之间产生一定的电压差，当有粒子射入盖革管时就会引起管内的气体发生自激放电，同时在阳极丝上会产生脉冲信号。这种类型的探测器具有灵敏度高、输出脉冲幅度大的优点，应用于各种电离辐射的实验测量中。

1968年G.Charpack发明了多丝正比室(MWPC,Multi Wire Proportional Chamber)[2],使得传统气体探测器的结构发生了革命性的变化，多丝正比室的结构如图1.2所示，上下两块阴极平板的间距通常为几个厘米，中间平面由大量的平行金属丝组成，称为阳极丝平面，这些细丝的直径约为0.1mm，间距通常为几个毫米量级。当有入射粒子进入探测时，会在探测器中产生电离电子，阳极丝平面会收集电子，并产生脉冲信号，通过恰当的电子学设计，就可以使用多丝正比室实现二维的位置测量，如果将许多个多丝正比室堆叠使用，就可以实现粒子的入射径迹测量。此外，多丝正比室的探测器增益可以达到 10^6 量级，相应的具有能量分辨率好，信噪比高，灵敏区面积大等优点，并且还可以根据实验的需求制作成不同形状、不同尺寸的探测器。但同时由于工艺上对于阳极丝之间间距的限制，会对多丝正比室的空间分辨率造成很大的限制，同时由于空间电荷效应的存在，多丝正比室的计数率承受能力也比较小。

20世纪80年代末，随着电子学技术的飞速发展，气体探测器的发展也迎来了崭新的阶段，出现了许多具有新型结构的气体探测器，这些探测器统称为微结构气体探测器（MPGD, Micro Pattern Gaseous Detector）。典型的代表为基于微网结构的Micromegas[3] (Micro Mesh Gaseous Structure)以及基于微孔结构的GEM[4](Gas Electron Multipliers)探测器，与之前的多丝正比室(MWPC)相比较，这种类型的微结构气体探测器具有更好

图 1.1 盖革管示意图

图 1.2 多丝正比室结构示意图

的计数率承受能力、更好的时间分辨和位置分辨能力、更高的耐辐射能力、更高的增益以及长时间稳定性，被广泛的应用于现代粒子物理与核物理实验中。以基于微网结构的Micromegas为例，其结构示意图如图1.3所示，整个探测器是一个三层结构，包括漂移层、微网层、阳极层。中间为带孔洞结构的微网层，

为了更好的推进微结构气体探测器的发展，攻克微结构气体探测器所面临的挑战，欧洲核子研究中心CERN在2008年成立了RD51合作组，合作组的宗旨在于推进微结构气体探测器及相关电子学的发展。

1.2 微结构气体探测器工作原理

微结构气体探测器最基本的工作原理可以描述如下：入射粒子在探测器气体介质中发生电离，电离产生的电子-离子对在电场的作用下向倍增区漂移并扩散，在倍增区发生倍增（雪崩）放大，然后通过读出电极以及电子学实现信号获取，最终研究微结构气体探测器的各种性能。即微结构气体探测器的工作原理可以概括为电离过程、漂移及扩散过程、雪崩倍增过程、信号获取过程。

1.2.1 带电粒子在气体中的原初电离过程

当高能量的带电粒子穿过气体介质，并且满足 $E_p \gg E_i$ 时（其中 E_p 表示带电粒子的能量， E_i 表示气体电离所需要的最小能量），在带电粒子通过气体介质的路径上会与气体介质原子和分子发生电离碰撞，从而释放出电子-离子对。这种直接碰撞产生的电子-离子对称为原初电离。原初电离产生的电子-离子对中，某些电子仍然具有高于 E_i 的能量，可进一步使得介质原子分子发生电离，这时候产生的电子离子对称为次级电子-离子对。原初电离和次级电离两部分的贡献之和称为总电离。通常总电离数可表示为：

$$n_T = \frac{\Delta E}{W_i} \quad (1.1)$$

其中 ΔE 是带电粒子在气体体积中总的能量损失， W_i 是产生一对电子-离子对所需要的平均能量。通常情况下，对于大多数气体来说， W_i 处在20~40eV量级。并且电离碰撞是随机的，可以看做是一种统计过程。即使每个粒子损失相同的能量，他们所产生的总电离仍然具与统计涨落。法诺给出的电离涨落方差为[2]：

$$\sigma^2 = F \cdot \frac{\Delta E}{W_i} \quad (1.2)$$

其中F为法诺因子，对于气体来说，法诺因子F小于等于0.2，这种电离的统计涨落将直

接决定探测器的固有能量分辨率。

1.2.2 光子在气体中的原初电离过程

高能光子与气体原子主要通过光电效应、康普顿散射以及电子对效应发生反应。对于能量处在几十个 KeV 量级的光子主要发生光电效应，光子将自身全部的能量 E_γ 转移给气体原子的某个束缚电子，使之克服壳层电子与原子核的结合能 E_b ，并发射出能量为 E_k 的光电子。其中光子能量 E_γ 与光电子能量 E_k 满足以下关系：

$$E_k = E_\gamma - E_b \quad (1.3)$$

在电场的作用下，逃逸出来的光电子将会在探测器工作气体中继续漂移，从而在气体中发生电离并沉积能量，并产生原初电离。

当光子的能量达到100 KeV 量级的时候，开始发生康普顿散射。康普顿散射即入射光子与气体原子的外层电子发生碰撞，将部分自身的能量转移给核外电子,在这个过程中发射出一个能量为 E_e 的电子，并伴随发射一个能量为 $E_{\gamma 2}$ 的新的光子。其中 E_γ 、 E_e 、 $E_{\gamma 2}$ 、 E_b 满足以下关系：

$$E_\gamma = E_{\gamma 2} + E_b + E_e \quad (1.4)$$

在康普顿散射过程中发射出来的电子，在电场的作用下会在探测器工作气体中继续漂移，从而在气体中发生电离碰撞并沉积能量，并产生原初电离。

当光子的能量达到几个 MeV 量级时，主要发生电子对效应。当光子从原子核旁穿过时，在原子核库伦场的作用下，光子会转化为一对正负电子对,这对正负电子对的总能量满足以下关系：

$$E_{e^+} + E_{e^-} = E_\gamma - 1022 \text{ KeV} - E_{arg} \quad (1.5)$$

其中 E_{arg} 表示原子核的反冲能 (atom recoil energy)，1022 KeV 表示生成正负电子对的质量所需要的能量。正负电子对中的负电子将会作为一个带电粒子在气体探测器中发生原初电离，而正电子将会在漂移一小段距离后，与另一个负电子湮灭，从而产生两个能量为511 KeV 的光子。

通常情况下，气体探测器不被用来探测能量大于100 KeV 的光子，因为在这个能量水平上气体对于光子的探测效率比较低.但是在一些比如量能器之类的装置中，也会使用气体探测器来探测高能量的光子，在这种情况下，光子主要通过康普顿散射以及电子对效应来产生电子从而产生探测器可以探测到的信号。与带电粒子类似，探测器

中产生的原初电离电子的数目可以用以下公式表示：

$$n_0 = \frac{E_{dp}}{W_i} \quad (1.6)$$

其中 E_{dp} 是高能光子在探测器中沉积下来的能量。

1.2.3 气体探测器中电子和离子的漂移扩散过程

在探测器外加电场的作用下，气体中的离子和电子等带电粒子都会受到电场库仑力的作用，因而会在其原有热运动的基础上进行宏观的漂移运动，其速度称为漂移速度，离子的漂移速度是决定探测器时间响应性能的重要因素，对辐射测量的结果有着决定性的影响。气体探测器中电离产生的电子和正离子除热运动外，还有两种定向运动：一种是沿着外加电场方向的漂移运动，另一种是因电子和离子密度不均匀而引起的空间扩散。

• 电子和离子的漂移过程

在电场的作用下，离子作加速运动，同时与探测器中的气体分子及原子发生碰撞并损失能量从而使得自身的速度降低，但在宏观上仍然表现为具有一定平均速度的定向运动，即漂移运动。漂移运动过程中的平均速度称为漂移速度，用符号 v^+ 表示。这里所说的漂移速度并不是离子的瞬时速度，而是离子在无规则瞬时速度上的一个定向速度的平均值，实验表明， v^+ 在很大的电场范围内与约化场强(E/p)成线性关系，并满足以下关系

$$v^+ = \mu^+ \cdot \frac{E}{p} \quad (1.7)$$

其中 p 表示探测器中气体的气压， μ^+ 表示离子的迁移率，迁移率与离子的种类以及探测器工作气体种类有关。在常用的气体探测器中，离子的迁移速度一般为 $10^2 \sim 10^3 \text{ cm/s}$ 。离子的质量越大，漂移速度越慢。漂移速度影响探测器输出信号的时间特性。

然而电子的漂移速度与约化场强(E/p)并不成正比关系，与离子的漂移过程相比，电子的漂移过程具有两个差别，第一个差别是电子的漂移速度约为 $10^5 \sim 10^6 \text{ cm/s}$ ，比离子的漂移速度约大 10^3 倍。由于电子的质量远远小于气体原子的质量，所以每次碰撞损失的能量很小，只有当电子的动能大于气体分子的激发能时才可能产生非弹性碰撞，从而导致大的能量损失。所以电子在电场中一直处于加速过程，直到其自身动能大于等于气体分子的激发能。又因为电子的平均自由程比离子要大，在平均自由程内，电子从电场中可以获得较大的动能，所以漂移速度大。第二个差别是电子的漂移速度对于探测器工作气体组分非常灵敏，在气体组分中加入低激发能的多原子气体分子时，可以显著的降低电子的杂乱运动，使得电子的定向漂移速度变大。

• 电子和离子的扩散过程

如果探测器中电子和离子的空间分布不均匀，就会在密度分布的梯度方向上发生扩散，我们假设漂移的平均距离为 S_w ，扩散的平均距离为 S_d ，在室温条件下，有：

$$\frac{S_d}{S_w} = 0.2 \cdot \sqrt{\frac{\eta}{V}} \quad (1.8)$$

其中 η 是电子及离子无规则运动的能量与粒子热运动能量的比值， V 表示电子及离子在漂移路径两个端点的电势差。气体探测器中使用的工作气体一般是多原子气体，对于同一种类型的气体组分来说，电子对应的 η 值要比离子对应的 η 值大，因此离子的扩散效应要比电子更加明显。研究表明，电子和离子的扩散对于位置灵敏探测器的空间分辨能力有很大的影响。

此外，对于电子来说，当电子与探测器中的气体分子发生碰撞时，有一定的几率被气体分子俘获而形成负离子，这种对电子具有亲和性的气体称为负电性气体。在气体探测器中，适当地加入负电性气体，会使得电子更容易被负电性气体所俘获从而使得气体的漂移特性发生很灵敏的变化，这是因为负离子的漂移速度比电子慢，从而增加了与正离子复合形成中性分子的概率。电子与正离子的复合称为电子复合，负离子与正离子的复合称为离子复合。复合直接影响电离电荷的完全收集，导致探测器输出的脉冲幅度的减小和脉冲上升时间的增加，这将会直接影响气体探测器的时间分辨能力。

1.2.4 电子在探测器中的雪崩倍增过程

在漂移区产生的原初电离的电子在外加电场的作用下，会沿着电场线向有着极强电场强度的雪崩区漂移，从而发生雪崩倍增过程。雪崩过程最早是由J.Townsend发现的，在一个足够强的电场强度下，我们假设探测器工作气体发生电离所需要的能量为 E_i ，气体探测器中的一个原初电离产生的电子在雪崩区获得的动能为 E_k ，原初电离产生的电子会与气体原子或者分子发生非弹性碰撞，从而产生次级电子，次级电子继续与气体原子或者分子发生非弹性碰撞新的次级电子，直到 E_k 不再大于 E_i ，这样的话，一个电子在雪崩过程中最终会产生许多的次级电子，从而使得探测器获得很大的增益。雪崩过程可以通过图1来直观的理解。此外，我们还可以从统计学上理解雪崩过程：

$$\frac{dn_e(x)}{dx} = \alpha n_e \quad (1.9)$$

其中 $n_e(x)$ 表示在位置 x 处产生的雪崩电子的数目， α 表示汤森系数，在均匀电场中总的雪崩产生的电子数目 N_e 可以通过上式两边同时积分得到，其中 n_0 表示最开始发生雪

图 1.3 雪崩过程原理示意图

崩时的初级电子的数目：

$$N_e = n_0 \cdot \exp(\alpha x) \quad (1.10)$$

由于电子的漂移速度要比正离子的漂移速度大得多，所以当雪崩刚开始发生的时候（通常是几个毫秒左右或者更少），电子会快速的漂移向阳极读出条，而正离子则向阴极板缓慢的漂移，最终形成一个类似于水滴的结构，如图所示。我们定义一个值 A 表示气体在均匀电场中的增益，那么：

$$A = \exp(\alpha x) \quad (1.11)$$

在非均匀的电场中，气体的增益 A 可以用下式表示，其中积分路径就是雪崩电子漂移的路径：

$$A = \exp\left(\int \alpha dx\right) \quad (1.12)$$

如图所示，雪崩过程产生的电子在气体雪崩放大区的强电场作用下，以极快的速度向阳极漂移，在漂移过程中感应出一个幅度很大宽度很窄的电流信号。与此同时，雪崩过程产生的正离子以较慢的速度向阴极漂移，感应出一个幅度较小但较宽的电流信号。在气体探测器中，通过合理的读出设计，最终将阳极板或阴极板的信号通过电子学手段读出来，最终进行探测器性能的研究。

图 1.4 雪崩过程电子和正离子漂移示意图

结论

pkuthss 文档模版最常见问题:

`\cite`、`\parencite` 和 `\supercite` 三个命令分别产生未格式化的、带方括号的和上标且带方括号的引用标记: **test-en**, **[test-zh]**、**[test-en, test-zh]**。

若要避免章末空白页, 请在调用 *pkuthss* 文档类时加入 `openany` 选项。

如果编译时不出参考文献, 请参考 `texdoc pkuthss` “问题及其解决”一章“上游宏包可能引起的问题”一节中关于 `biber` 的说明。

文献列表

- [1] H.Geiger. “*An electrical method of counting the number of alpha particles from radioactive substances*” [J]. *Proc.Roy.Soc.Lond.A* 81 (1908) 141.
- [2] G.Charpac. “*The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles*” [J]. *Nucl.Instr.Meth.*62 (1968) 262.
- [3] Y.Giomataris. “*Micromegas: A high granularity position sensitive gaseous detector for high particle flux environments*” [J]. *Nucl.Instr.Meth.A* 376 (1996) 29.
- [4] F.Sauli. “*GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors*” [J]. *Nucl.Instr.Meth.A* 386 (1997) 531.

附录 A 附件

pkuthss 文档模版最常见问题:

`\cite`、`\parencite` 和 `\supercite` 三个命令分别产生未格式化的、带方括号的和上标且带方括号的引用标记: **test-en**, **[test-zh]**、**[test-en, test-zh]**。

若要避免章末空白页, 请在调用 *pkuthss* 文档类时加入 `openany` 选项。

如果编译时不出参考文献, 请参考 `texdoc pkuthss` “问题及其解决”一章“上游宏包可能引起的问题”一节中关于 `biber` 的说明。

致谢

pkuthss 文档模版最常见问题:

`\cite`、`\parencite` 和 `\supercite` 三个命令分别产生未格式化的、带方括号的和上标且带方括号的引用标记: **test-en**, **[test-zh]**、**[test-en, test-zh]**。

若要避免章末空白页, 请在调用 *pkuthss* 文档类时加入 `openany` 选项。

如果编译时不出参考文献, 请参考 `texdoc pkuthss` “问题及其解决”一章“上游宏包可能引起的问题”一节中关于 `biber` 的说明。

北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

（必须装订在提交学校图书馆的印刷本）

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

- 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；
- 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
- 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；
- 因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，授权学校在□一年/□两年/□三年以后在校园网上全文发布。

（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名： 导师签名： 日期： 年 月 日